

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**Développement d'un système de mesure en temps réel des  
erreurs dans les machines-outils à axes multiples pour une  
compensation active**

MÉMOIRE

Présenté à

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

Comme exigence partielle du programme de maîtrise en ingénierie

Par

Noureddine Barka

Janvier 2005

MR 03-26

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Ce mémoire est dédié à la mémoire de mon très cher frère Ahmed que Dieu le bénisse,  
décédé tragiquement le 11 décembre 2002;

## Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Monsieur Abderrazak El Ouafi pour sa grande disponibilité, son soutien moral et financier, les conseils précieux qu'il m'a donnés et surtout pour cette passion de recherche qui m'a transmise. Qu'il trouve toute ma reconnaissance et mon grand respect. Mes remerciements vont également à mon codirecteur, Monsieur Michel Guillot pour ses conseils précieux.

Ce mémoire représente un long parcours et un rêve qui est en train de se réaliser. Je ne l'aurais jamais atteint sans l'aide financière et morale de mes chers parents, de ma chère Imane pour son soutien moral et pour sa grande compréhension, de mes sœurs et de mes frères.

Finalement, je remercie tout le personnel du département de mathématique, informatique et génie de l'université du Québec à Rimouski d'avoir mis à ma disposition tous les moyens techniques et logistiques pour réussir mes études à Rimouski.

## Résumé

La perte de précision dans les machines-outils à axes multiples est due aux imperfections géométriques de la structure mécanique et aux modifications de cette structure sous l'effet de sollicitations statiques, thermiques et dynamiques. Même si certaines de ces imperfections peuvent être réduites par l'amélioration de la conception de la machine, il est cependant difficile d'éliminer totalement leurs effets. Les limitations technologiques et les coûts associés à cette solution ont conduit à l'introduction du concept de la compensation des erreurs. En raison du manque de techniques de mesure directe et fiable, la plupart des techniques de compensation se sont basées sur la mesure préalable, dans des conditions environnementales typiques, des différentes composantes de l'erreur volumétrique séparément avant de les combiner à travers le modèle cinématique de la machine pour générer les informations nécessaires à la compensation. Ces mesures nécessitent des efforts longs et coûteux. De plus, étant de nature statique, elles ne représentent pas les conditions réelles de fonctionnement des machines. Les résultats qu'elles génèrent ne reflètent pas les variations dues aux effets statiques, thermiques et dynamiques et aux interactions entre les différentes sources d'erreurs qui contribuent de façon significative à la dégradation de la précision de la machine.

Pour contourner ces limitations, il est nécessaire de développer une approche de mesure dynamique et intégrée permettant d'évaluer, en temps réel, les composantes de l'erreur volumétrique associées aux effets géométriques, thermiques et dynamiques cumulés. Cette

démarche permet de fournir une représentation fiable de l'état de la machine pour une compensation adaptative robuste et efficace.

Ce mémoire présente une nouvelle approche d'identification en temps réel des erreurs dans les machines-outils. Basé sur une structure optoélectronique, le système de mesure proposé permet d'évaluer simultanément et de façon dynamique les erreurs selon 5 des 6 degrés de liberté de chacun des axes de la machine et ce quelles que soient les conditions opératoires. De plus, cette approche simplifie de façon substantielle les procédures d'étalonnage et d'évaluation des performances métrologiques en fournissant des mesures qui reflètent avec fidélité le comportement géométrique de la machine sans avoir recours à une analyse longue et coûteuse des différentes sources d'erreur.

Les tests réalisés sur le système de mesure ont permis d'évaluer les performances des modèles développés pour l'identification des erreurs, d'étalonner le système de mesure et de caractériser ses performances métrologiques et dynamiques. Les résultats obtenus montrent que l'approche proposée est avantageusement comparable à des techniques de mesure reconnues aussi bien en terme de précision qu'en termes de rapidité et de coûts. De plus, par son caractère dynamique et sa flexibilité, le système de mesure permet d'intégrer les effets géométriques, thermiques et dynamiques et de les cumuler dans la même opération de mesure qu'elle soit pour l'évaluation des performances de la machine, pour l'étalonnage ou pour la compensation en temps réel.

# Table des matières

Chapitre 1	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1	Généralités.....	1
1.2	Classification des erreurs.....	2
1.3	Approches d'évaluation des performances.....	8
1.4	Problématique.....	9
1.5	organisation du mémoire .....	13
Chapitre 2	<b>PRÉCISION DANS LES MACHINES-OUTILS .....</b>	<b>14</b>
2.1	Analyse des sources d'erreurs .....	14
2.1.1	Erreurs quasi-statiques .....	14
2.1.2	Erreurs dynamiques .....	27
2.1.3	Erreurs dues à la pièce et à l'outillage .....	30
2.2	Techniques de réduction des effets d'erreurs .....	31
2.2.1	Évitement d'erreur .....	32
2.2.2	Compensation des erreurs par étalonnage.....	33
2.2.3	Compensation active.....	36
2.2.4	Limitations des techniques de compensation.....	37
Chapitre 3	<b>DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE .....</b>	<b>39</b>
3.1	Introduction .....	39

3.2	Configuration du système de mesure .....	40
3.2.1	Mesure des rectitudes horizontale et verticale .....	41
3.2.2	Mesure du lacet et du tangage.....	42
3.2.3	Mesure du roulis .....	43
3.3	Quantification des signaux .....	44
3.3.1	Calcul de la position du faisceau .....	45
3.3.2	Calcul des six composantes de l'erreur.....	45
3.4	Discussion .....	46
<b>Chapitre 4 ANALYSE DES PERFORMANCES.....</b>		<b>48</b>
4.1	Introduction .....	48
4.2	Montage expérimental.....	48
4.3	Essais préliminaires.....	51
4.3.1	Évaluation de l'impact de l'environnement.....	52
4.3.2	Correction des effets environnementaux .....	57
4.3.3	Calibration des détecteurs de position .....	69
4.4	Amélioration de la stabilité .....	75
<b>Chapitre 5 TEST ET VALIDATION.....</b>		<b>76</b>
5.1	Introduction .....	76
5.2	Caractéristiques métrologiques du système .....	77
5.2.1	Caractéristiques du système de mesure.....	77
5.2.2	Précision du système de mesure .....	79
5.2.3	Spécifications de fonctionnement .....	82

5.3	Mesure de validation sur la MMT .....	84
5.3.1	Montage expérimental .....	84
5.3.2	Analyse des résultats.....	85
Chapitre 6	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>94</b>
	<b>Bibliographie</b> .....	<b>97</b>
	<i>Annexe 1 : Principes de l'interférométrie laser</i> .....	<b>101</b>
	<i>Annexe 2 : Mesure des rectitudes (Renishaw ML 10)</i> .....	<b>105</b>
	<i>Annexe 3 : Mesure du lacet et du tangage (Renishaw ML 10)</i> .....	<b>107</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1.	Comparaison entre la régression linéaire et les réseaux neuroniques .....	69
Tableau 2.	Comparaison entre l'apprentissage et la vérification .....	73
Tableau 3.	Influence de la température sur la position .....	74
Tableau 4.	Influence de l'humidité relative sur la position.....	74
Tableau 5.	Précision du système de mesure (rectitude horizontale) .....	81
Tableau 6.	Précision du système de mesure (rectitude verticale) .....	81
Tableau 7.	Précision du système de mesure (lacet).....	81
Tableau 8.	Précision du système de mesure (tangage).....	82
Tableau 9.	Comparaison des résultats .....	88
Tableau 10.	Comparaison des résultats.....	92

## Liste des figures

Figure 1.	Facteurs affectant la précision.....	3
Figure 2.	Liaison linéaire typique d'une machine-outil.....	16
Figure 3.	Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).....	17
Figure 4.	Liaison linéaire idéale .....	18
Figure 5.	Liaison linéaire réelle .....	19
Figure 6.	Schéma cinématique de la machine MMT .....	20
Figure 7.	Sources d'erreurs thermiques dans une machine-outil, [35].....	26
Figure 8.	Stratégies de réduction des erreurs.....	32
Figure 9.	Concept d'évitement des erreurs.....	32
Figure 10.	Technique de compensation par étalonnage.....	33
Figure 11.	Concept de la compensation active des erreurs.....	37
Figure 12.	Configuration des six composantes de l'erreur géométrique.....	40
Figure 13.	Configuration globale du système de mesure .....	41
Figure 14.	Mesure des rectitudes horizontale ( $\delta_{zx}$ ) et verticale ( $\delta_{zy}$ ).....	42
Figure 15.	Mesure du lacet ( $\epsilon_{zx}$ ) et du tangage ( $\epsilon_{zy}$ ).....	43
Figure 16.	Mesure du roulis $\epsilon_{zz}$ .....	44
Figure 17.	Lecture des signaux .....	45
Figure 18.	Montage expérimental.....	50
Figure 19.	Période d'échauffement du laser .....	52

Figure 20.	Influence de la lumière sur la position : (a) Présence de lumière et (b) Absence de lumière .....	54
Figure 21.	Évolution des quatre tensions et du signal de température en fonction du temps : (a) Tensions en fonction du temps et (b) Température en fonction du temps .....	55
Figure 22.	Estimation de la position horizontale par tension : (a) Tension $V_{0A}$ , (b) Tension $V_{0C}$ , (c) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0A}$ ), (d) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0C}$ ), (e) Position $P_H$ et (f) Erreur résiduelle ( $\Delta P_H$ ).....	58
Figure 23.	Estimation de la position verticale par tension : (a) Tension $V_{0B}$ , (b) Tension $V_{0D}$ , (c) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0B}$ ), (d) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0D}$ ), (e) Position $P_V$ et (f) Erreur résiduelle ( $\Delta P_V$ ).....	59
Figure 24.	Modélisation de la position horizontale : (a) Position $P_H$ et (b) Erreur $\Delta P_H$ .	60
Figure 25.	Modélisation de la position verticale : (a) Position $P_V$ et (b) Erreur $\Delta P_V$ .....	61
Figure 26.	Structure d'un réseau neuronique multicouche : (a) Fonctionnement d'un neurone et (b) Perceptron multicouche .....	63
Figure 27.	Estimation de la position horizontale par tension : (a) Tension $V_{0A}$ , (b) Tension $V_{0C}$ , (c) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0A}$ ), (d) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0C}$ ), (e) Position $P_H$ et (f) Erreur résiduelle ( $\Delta P_H$ ).....	65
Figure 28.	Estimation de la position verticale par tension : (a) Tension $V_{0B}$ , (b) Tension $V_{0D}$ , (c) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0B}$ ), (d) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0D}$ ), (e) Position $P_V$ et (f) Erreur résiduelle ( $\Delta P_V$ ).....	66

Figure 29.	Modélisation de la position verticale : (a) Position $P_H$ et (b) Erreur $\Delta P_H$ .....	67
Figure 30.	Modélisation de la position verticale : (a) Position $P_V$ et (b) Erreur $\Delta P_V$ .....	68
Figure 31.	Patron de données.....	70
Figure 32.	Diagramme du compensateur.....	71
Figure 33.	Modélisation du processus .....	71
Figure 34.	Apprentissage et vérification du réseau neuronique : (a) Phase d'apprentissage et (b) Phase de vérification.....	73
Figure 35.	Montage expérimental.....	84
Figure 36.	Mesure de la rectitude horizontale : (a) Mesure par le laser ML10 et (b) Mesure par le nouveau système de mesure .....	86
Figure 37.	Mesure de la rectitude verticale : (a) Mesure par le laser ML10 et (b) Mesure par le nouveau système de mesure .....	87
Figure 38.	Mesure du lacet : (a) Mesure par le laser ML10 et (b) Mesure par le nouveau système de mesure.....	90
Figure 39.	Mesure du tangage sur la MMT : (a :ML10, b : NSM).....	91
Figure 40.	Mesure du roulis avec le NSM.....	93
Figure 41.	Schéma bloc du système interférométrique .....	102
Figure 42.	Arrangement de l'interféromètre et du rétro réflecteur pour la mesure des déplacements linéaires.....	103
Figure 43.	Arrangement de l'interféromètre et du rétro réflecteur pour la mesure des déplacements angulaires.....	104
Figure 44.	Montage expérimental.....	105

Figure 45.	Mesure de la rectitude horizontale .....	105
Figure 46.	Mesure de la rectitude verticale .....	106
Figure 47.	Montage expérimental.....	107
Figure 48.	Mesure du lacet .....	107
Figure 49.	Mesure du tangage .....	107

## Liste des symboles

$\delta_{ii}$  : déviation linéaire dans la direction  $i$  en se déplaçant selon l'axe  $i$ .

$\delta_{ij}$  : déviation linéaire dans la direction  $j$  en se déplaçant selon l'axe  $i$ .

$\delta_{ik}$  : déviation linéaire dans la direction  $k$  en se déplaçant selon l'axe  $i$ .

$\epsilon_{ii}$  : déviation angulaire autour de l'axe  $i$  en se déplaçant sur l'axe  $i$ .

$\epsilon_{ij}$  : déviation angulaire autour de l'axe  $j$  en se déplaçant sur l'axe  $i$ .

$\epsilon_{ik}$  : déviation angulaire autour de l'axe  $k$  en se déplaçant sur l'axe  $i$ .

$s$  : seconde.

$\mu\text{m}$  : micromètre.

$\text{mm}$  : millimètre.

$\text{min}$  : minute.

$\text{arcsec}$  : arcseconde.

$^{\circ}\text{C}$  : degré Celsius.

$P_H$  : position horizontale.

$P_V$  : position verticale.

$T_R$  : tension réelle.

$T_M$  : tension modélisée.

$P_R$  : position réelle.

$P_E$  : position estimée.

$S_{ei}$  : sortie estimée par le réseau neuronique.

$S_{di}$  : sortie désirée.

$\text{ppm}$  : particule par minute.

## Liste des acronymes

MMT : machine à mesurer tridimensionnelles.  
LVDT : transformateur différentiel de tension linéaire.  
CCD : caméra à cristaux digital.  
GMAS : guideway measuring and analysing system.  
MOCN : machine-outil à commande numérique.  
MO : machine-outil.  
MTHI : matrice de transformation homogène idéale.  
MTHR : matrice de transformation homogène réelle.  
Laser He-Ne : laser Hélium-Néon.  
MOP : machine-outil-pièce.  
COP : contact-outil-pièce.  
BCN : bureau canadien des normes.  
MSE : mean square error.  
NSM : nouveau système de mesure.  
DP<sub>1</sub>, DP<sub>2</sub>, DP<sub>3</sub> : détecteurs de position.  
SF<sub>1</sub>, SF<sub>2</sub>, SF<sub>3</sub>: séparateur de faisceau.  
MP<sub>1</sub>, MP<sub>2</sub>, MP<sub>3</sub> : miroirs plats.  
RR : rétro-rélecteur.  
SSE : sum of square errors.  
HR : humidité relative.  
DAQ : multifunction Data Acquisition device.

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 GÉNÉRALITÉS

La contribution des machines-outils dans l'épanouissement de plusieurs domaines industriels de pointe n'est plus à démontrer. Cependant, durant la dernière décennie, le contexte économique a imposé à cette industrie de nouvelles normes de performance en ce qui concerne la qualité, la productivité, les coûts et les délais de production. Ces contraintes de marché ont évolué beaucoup plus vite que les performances des machines actuelles. La technologie sur laquelle ces machines reposent est basée sur des concepts datant de plusieurs décennies et qui arrivent presque à la limite de leur potentiel. Les quelques développements technologiques enregistrés dans le domaine sont davantage motivés par les besoins des utilisateurs que par les initiatives des constructeurs. Cette situation met en évidence la nécessité de développer des stratégies permettant de répondre à ces nouveaux défis en mettant en place les moyens susceptibles d'améliorer les performances des machines et de les faire évoluer vers un palier technologique supérieur. Cette tâche s'avère difficile vu la complexité des interactions entre les machines-outils et le procédé de coupe. Les nouvelles technologies dans le domaine permettent de réaliser une

amélioration nette de la précision des machines-outils en augmentant la qualité de leurs designs. Cependant, pour la mettre en place, cette approche mobilise des moyens financiers et techniques énormes. L'autre alternative réside dans l'amélioration de la partie contrôle en combinant la commande numérique et la structure grâce au développement enregistré au niveau de l'instrumentation, de l'électronique et de la microinformatique.

## **1.2 CLASSIFICATION DES ERREURS**

La qualité des pièces produites par des machines-outils découle principalement du degré de précision et de stabilité des machines elles-mêmes. De manière générale, la qualité mesure *"le degré de conformité d'une pièce à des spécifications dimensionnelles et géométriques prédéfinies"*. Cependant, une simple mesure ne permet pas d'identifier la contribution de chaque source d'erreur affectant la pièce. Il est alors important d'analyser les aspects technologiques définissant la structure des machines-outils, le contrôle numérique et l'influence du procédé.

Dans le but de donner à la problématique de la précision dans les machines-outils une dimension conceptuelle, il est préférable de procéder à une classification des facteurs qui l'affectent. Les erreurs peuvent être classées selon la phase de travail pendant laquelle les sources qui les génèrent sont actives. Pendant la phase de préparation, les erreurs peuvent être associées aux procédures de réglage, aux erreurs de programmation et de conversion des programmes d'usinage en langage machine. Durant la phase d'usinage, les sources d'erreur qui affectent la précision sont beaucoup plus variées. Leurs effets peuvent être considérés comme étant la combinaison des contributions individuelles de tous les éléments constituant le système Machine-Outil-Pièce (MOP), ainsi que l'interaction de ce système

avec le procédé. La figure 1 présente une classification possible de l'ensemble des facteurs qui peuvent affecter la précision des machines-outils. De façon générale, la précision est fortement limitée par la structure géométrique de la machine et par la modification de cette structure sous des conditions statiques, thermiques et dynamiques. Les sources d'erreurs durant l'usinage sont regroupées selon trois catégories :

- les sources d'erreurs dues à la machine;
- les sources d'erreurs dues au procédé de coupe;
- les sources d'erreurs dues à l'environnement.

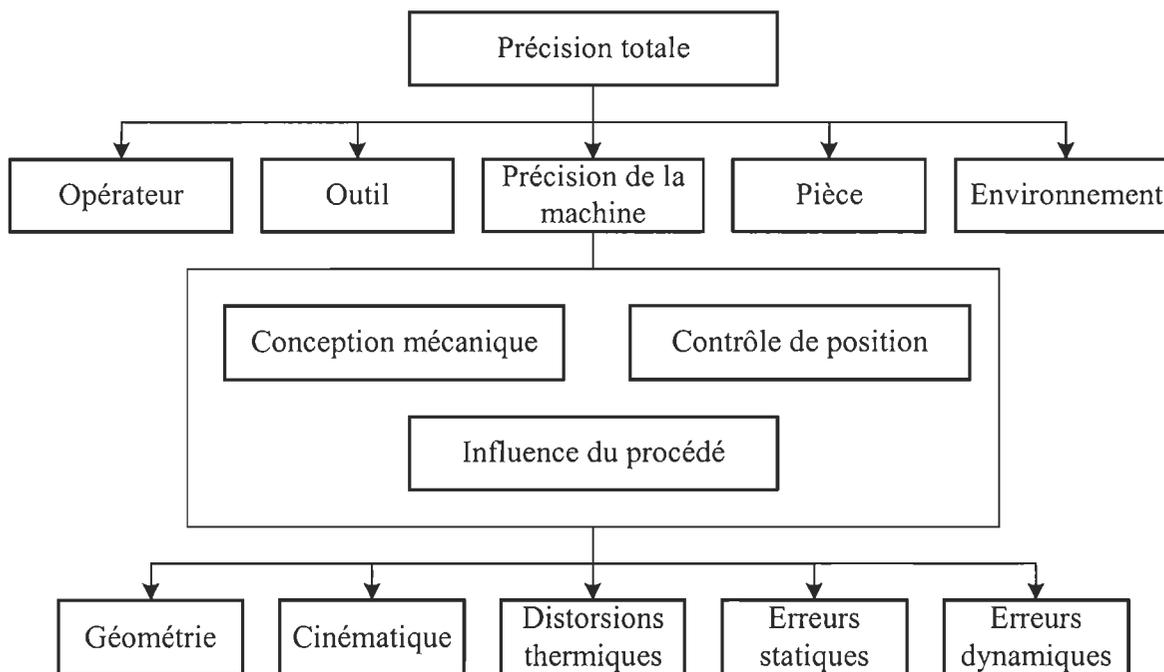


Figure 1. Facteurs affectant la précision

Une machine-outil de haute précision peut être réalisée en se basant exclusivement sur des techniques avancées de conception. Le succès de cette solution se trouve souvent inhibé par plusieurs limitations physiques et technologiques. Les coûts qu'il faut supporter pour

contourner ces limitations sont exorbitants. Cette situation a conduit à l'introduction du concept de l'amélioration de la précision des machines-outils à travers des techniques de correction ou de compensation des erreurs. En effet, à cause des économies qu'il permet de réaliser, ce concept s'est imposé comme alternative et a acquis rapidement une certaine popularité. La compensation de certaines erreurs telles que le jeu et l'usure des outils est devenue même une fonction standard dans certaines versions de MOCN actuellement disponibles sur le marché. Dans plusieurs applications, la compensation électronique des erreurs s'est avérée plus économique et plus efficace qu'une modification dans le design de la machine. Cependant, une bonne conception demeure la première étape du processus de contrôle de la précision. La compensation des erreurs ne constitue pas une alternative aux efforts de conception mais un complément. Depuis quelques dizaines d'années, plusieurs études ont été menées concernant le problème d'amélioration des performances des MO. Ces travaux ont débouché sur plusieurs concepts, techniques et recommandations pertinentes que nous allons présenter dans les sections suivantes.

Un bref survol des recherches dans le domaine de la précision des MO montre que la plupart des travaux s'inscrivent dans l'une des quatre catégories suivantes: évaluation des performances, amélioration de la précision, modélisation mathématique, et analyse des erreurs. Dans l'évaluation des performances, la précision des MO a été examinée selon différentes sources en utilisant des méthodes analytiques ou expérimentales. Les procédures d'amélioration de la précision comportent l'ensemble des approches et des techniques susceptibles d'améliorer les performances des MO. Dans la modélisation mathématique, plusieurs méthodes ont été proposées pour décrire le comportement de la

machine sur le plan de la cinématique. Finalement, l'analyse des erreurs soulève le problème des incertitudes et des erreurs introduites durant le processus d'étalonnage.

- **Évaluation des performances:** les performances des MO peuvent être évaluées selon deux optiques différentes. En régime statique ou quasi-statique, les performances sont évaluées quand la machine est dans un état d'équilibre statique. Les performances dynamiques sont mesurées durant le régime dans lequel des facteurs tels que les vibrations et la stratégie de commande deviennent significatifs. Trois stratégies de base ont été employées pour évaluer les performances des MO. Les tests d'usinage [1], les tests géométriques [2] et [3-6] et l'étalonnage par comparaison à des pièces étalons [2, 5, 7, 8]. La plupart de ces tests sont utilisés dans des procédures d'acceptation et lors des vérifications périodiques des performances des MO [9-11]. De plus, parce qu'ils sont incomplets, ils ne permettent pas de prédire le comportement réel des machines dans des conditions aussi disparates que celles qui règnent dans un atelier de fabrication. Enfin, ces tests sont coûteux, souvent très lents à mettre en oeuvre et consomment beaucoup de temps. Un test de circularité sur un tour, par exemple, peut prendre jusqu'à trois heures.
- **Amélioration de la précision:** trois techniques de base peuvent être considérées pour résoudre le problème de l'imprécision des MO. La première de ces techniques suppose la présence d'instruments de mesure dans l'espace de travail de la machine pour décrire la position et l'orientation de l'outil/la pièce par rapport au système de référence [12]. Les axes de la MO sont alors commandés de manière à réduire

l'erreur entre la position désirée et la position mesurée. Dans cette situation, la connaissance de la relation entre les déplacements des axes et la position et l'orientation de l'outil et de la pièce ne sont pas requises. Cependant le développement d'un tel système sensoriel peut s'avérer très difficile à cause de l'accessibilité réduite. La seconde approche nécessite la mesure des erreurs et l'élaboration de cartes de contrôle établissant une relation de correspondance entre l'espace de travail de la MO et la position et l'orientation de l'outil par rapport à la pièce [13]. Ces cartes de contrôle, qu'on appelle également matrices d'erreurs, sont stockées dans une mémoire interne ou externe au contrôleur de la MO pour effectuer la correction des erreurs. Cette solution est loin d'être satisfaisante à cause du nombre infini de positions possibles dans l'espace de travail et aussi à cause des limitations au niveau des unités de mémoire du contrôleur qui ne peuvent pas supporter une correspondance une à une entre les variables de l'espace de travail et les composantes de l'erreur. Même si différents schèmes d'interpolation ont été investigués pour approcher un niveau raisonnable de précision globale, cette approche reste toujours tributaire de la disponibilité de l'espace mémoire des contrôleurs. La troisième et dernière approche nécessite le développement d'un modèle mathématique précis qui décrit les relations entre les déplacements élémentaires dans chaque liaison et la position et l'orientation de l'outil et de la pièce. Cette approche est basée sur l'identification des sources d'erreurs les plus importantes, de les mesurer et de créer un modèle simplifié qui permet d'effectuer

une approximation de la trajectoire réelle de l'outil par rapport à la pièce dans l'espace de travail de la machine-outil.

- **Modélisation mathématique:** la plupart des techniques de modélisation s'inspirent des transformations de Hartenberg-Denavit [13-15] pour décrire les relations spatiales entre la position et l'orientation de l'outil et de la pièce par rapport au système de référence de la machine [16-21]. La plupart de ces techniques sont également basées sur les hypothèses de la cinématique des corps rigides, par conséquent, elles ne décrivent que les erreurs de type géométrique. Les effets statiques, thermiques et dynamiques ne sont pas intégrés directement dans le modèle. D'autres procédures doivent être établies pour favoriser l'intégration de la totalité des sources d'erreurs [22-26]. Devant les difficultés de l'élaboration des modèles théoriques pour décrire ces effets sur la géométrie de la machine, la plupart de ces procédures sont basées sur des modèles empiriques [16, 27].
- **Analyse des erreurs:** dans la plupart de ces études qu'elles soient basées sur des approches analytiques ou expérimentales, les résultats ne reflètent pas la précision réelle de la machine puisqu'ils ne tiennent pas en compte de la variation des erreurs [28]. Même si on arrive à mesurer les erreurs dans les liaisons et à estimer l'erreur globale de la MO sous certaines conditions, il est rare qu'on tente de déterminer les incertitudes de cette estimation. En effet, aucune des approches proposées n'utilise de traitement statistique pour tenir compte des effets des erreurs de mesure ou des erreurs de modélisation sur la qualité des modèles de prédiction.

### 1.3 APPROCHES D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES

Suite à la classification des erreurs, il est important de souligner la nécessité d'une modélisation cinématique pour décrire le comportement des erreurs sur une machine-outil afin d'améliorer sa précision. Les techniques d'amélioration des performances sont basées sur la mesure et la modélisation des erreurs dans le volume de travail d'une machine-outil selon deux principales approches : l'approche volumétrique et l'approche élémentaire.

- **Approche volumétrique :** cette approche est basée sur la mesure et la décomposition de l'erreur dans l'espace de travail dans sa globalité sans aucune considération spécifique à la nature des sources réelles des erreurs, ni à la contribution des erreurs dues à des éléments de la machine ni aux mécanismes de propagations. Les modèles générés par de telles approches tendent plus à être des représentations heuristiques plutôt que de véritables supports pour une compensation en temps réel des erreurs.
- **Approche élémentaire :** cette approche consiste à synthétiser l'erreur globale dans l'espace de travail en se basant sur la modélisation des erreurs individuelles de chaque composante de la machine-outil. Les modèles générés par une telle approche offrent la possibilité de décrire les mécanismes de propagation des erreurs élémentaires à travers la chaîne cinématique de la machine-outil et leurs effets sur l'erreur totale. Pour montrer leurs pleines efficacités, les modèles de représentation doivent être jumelés avec de bonnes stratégies d'évaluation des erreurs et de méthodes de modélisation fiables et robustes.

## 1.4 PROBLÉMATIQUE

Dans la plupart des machines à axes multiples, les erreurs quasi-statiques sont responsables de la majorité des déviations. Elles contribuent pour au moins 70% des erreurs attribuables à la machine. Ces erreurs de comportement sont dues à la structure de la configuration géométrique-cinématique de la machine, combinées aux sollicitations mécaniques, thermiques et inertielles développées durant l'opération d'usinage. Si elles sont connues, elles peuvent être compensées par l'intermédiaire d'un module de commande interne ou externe que l'on peut intégrer à la MO. Les erreurs dynamiques, par leur nature, varient très rapidement dans le temps. Leurs compensations demandent généralement des techniques de mesures plus sophistiquées et souvent une modification de la structure de commande, car les contrôleurs qui équipent les machines actuelles ne peuvent supporter des fréquences très élevées. Cependant, ces erreurs n'affectent que des caractéristiques locales de la pièce telle que l'état de surface, plutôt que la précision dimensionnelle et géométrique.

La plupart des techniques de compensation telles qu'elles sont pratiquées actuellement impliquent la mesure préalable, dans des conditions opératoires et environnementales typiques, de l'ensemble des composantes de l'erreur volumétrique, de les combiner à travers un modèle mathématique basé sur la structure cinématique de la machine pour générer les informations nécessaires à la correction en temps réel. Bien qu'elles rendent possible la correction d'une proportion importante de l'erreur systématique, les techniques proposées pour l'amélioration des performances des machines-outils ne permettent pas de prendre en compte la composante aléatoire de l'erreur. De plus, ces techniques présentent plusieurs inconvénients et contraintes pouvant être résumés sous forme des points suivants :

- L'importance des délais et des coûts nécessaires à la mesure en différé des erreurs individuelles dans différentes conditions opératoires spécifiques.
- La difficulté de couvrir l'ensemble des conditions opératoires pouvant avoir des effets sur la précision de la machine.
- La mesure des erreurs dans des conditions statiques permet d'évaluer la composante systématique de l'erreur, mais elle ne permet pas de couvrir la composante dynamique qui représente une portion non négligeable de l'erreur totale et ayant un effet direct sur les tolérances dimensionnelles, géométriques et de fini de surface.
- Le comportement des erreurs géométriques dans les conditions dynamiques de l'usinage est très différent de celui évalué dans des conditions statiques (à vide).
- Les erreurs étant mesurées individuellement, les mécanismes d'interaction entre les différentes erreurs ne sont pas considérés. Ces interactions modifient le comportement des sources d'erreur.
- La nécessité de procéder à l'étalonnage périodique de la machine dont la géométrie subit des variations continues en raison de l'usure et d'autres effets dynamiques.

Dans l'optique de pallier aux limitations des techniques classiques de réduction d'erreurs, plusieurs approches d'évaluation et de réduction des erreurs ont été déjà développées, testées et validées dans différents types de machines-outils. La première approche, implantée sur une machine-outil uni-axiale (machine à aléser) visait la mesure des cinq composantes de l'erreur générées lors du déplacement du chariot longitudinal dans la

direction principale d'alésage [29]. La deuxième approche développée (GMAS) consistait à mesurer les cinq erreurs géométriques d'une glissière linéaire en utilisant des capteurs à capacitance [30]. La troisième approche consistait à mesurer les cinq composantes de l'erreur en utilisant une source laser et une caméra CCD [31]. Même si ces approches sont intéressantes au niveau de l'étalonnage des machines-outils, elles ne permettent pas d'obtenir des informations suffisamment précises et fiables capables d'effectuer une compensation active et dynamique.

L'objectif global de ce projet consiste à développer un système de mesure en temps réel permettant d'identifier simultanément l'ensemble des composantes de l'erreur volumétrique dans les machines-outils multiaxiales et ce quelles que soient les conditions opératoires. Les plus récentes technologies dans le domaine de l'instrumentation, de l'optique et de l'électronique favorisent le développement d'une stratégie de mesure permettant d'intégrer les différentes sources d'erreurs dans la même opération de mesure et de les lier de façon dynamique aux statuts interne et externe de la machine. De cette manière, il sera possible de disposer d'un système de mesure capable de fournir une information précise, fiable et économique sur le comportement géométrique, statique, thermique et dynamique de la machine en vue d'une compensation active et efficace des erreurs. La flexibilité, l'adaptabilité et la facilité d'utilisation doivent être également considérées comme caractéristiques importantes du système dans le but de simplifier les procédures d'étalonnage et d'évaluation des performances métrologiques des machines et ainsi éviter des analyses longues et coûteuses des diverses sources d'erreur.

De façon générale, la mise au point d'un tel système nécessite trois étapes majeures, soit l'établissement de la stratégie de mesure, le développement du concept et la réalisation du prototype et finalement l'évaluation et la caractérisation des performances du système de mesure.

L'analyse et l'évaluation des différentes techniques de mesure associées à la métrologie des machines, aux techniques d'étalonnage et de compensation des erreurs a conduit à l'élaboration d'un concept de mesure compatible avec les contraintes d'une application en temps réel. Ce concept représente une configuration géométrique simple à 5 degrés de liberté basée sur des composants laser, optiques et électronique combinée à une chaîne d'acquisition et de contrôle. La démarche adoptée dans le processus de confection du système de mesure a permis d'analyser systématiquement toutes les facettes de l'opération de mesure de manière à respecter l'ensemble des exigences. Des efforts particuliers ont été déployés pour compenser les erreurs systématiques et réduire les erreurs aléatoires dans les mesures, pour simplifier les procédures de réglage et d'alignement et pour automatiser l'identification des différentes composantes de l'erreur en fonction des déviations détectées par le système de mesure.

L'évaluation et la validation du prototype a nécessité la conduite de deux séries de tests. Les tests préliminaires ont permis d'étudier la sensibilité du système face aux différentes perturbations que peuvent occasionner les conditions de fonctionnement et les conditions environnementales et d'élaborer des procédures permettant de réduire l'impact leurs effets sur la qualité de la mesure. Plusieurs algorithmes de prétraitement ont été élaborés à cet effet, de manière à améliorer la fiabilité et la robustesse du système de mesure. Les tests

de validation ont permis de procéder à l'étalonnage du système de mesure, de déterminer ses caractéristiques métrologiques et de valider ses performances en les comparant à des techniques de mesure de référence.

## **1.5 ORGANISATION DU MÉMOIRE**

Le mémoire est divisé en quatre chapitres majeurs consacrés principalement aux différentes étapes qui ont conduit à la réalisation du système de mesure. Le deuxième chapitre présente une revue bibliographique mettant l'accent sur les techniques de mesure associées à la métrologie des machines-outils, aux techniques d'étalonnage et de compensation des erreurs. L'analyse des erreurs et des techniques de leurs compensations constitue le cœur de cette analyse. Le troisième chapitre présente le concept du système de mesure, sa configuration globale, ainsi que les différentes procédures d'agencement et d'optimisation des composantes optiques. Il couvre également les modèles de décomposition et de calcul des déviations linéaires et angulaires (rectitude horizontale, rectitude verticale, lacet, tangage et roulis). Le quatrième chapitre présente les tests préliminaires réalisés dans des différentes conditions environnementales afin d'analyser la sensibilité du système de mesure et de pouvoir améliorer sa stabilité. Finalement, le cinquième chapitre décrit les procédures d'implantation du système de mesure sur une machine-outil multiaxiale (MMT) afin d'évaluer ses caractéristiques métrologiques et valider ses performances par comparaison avec un système de référence.

# Chapitre 2

## Précision dans les machines-outils

### 2.1 ANALYSE DES SOURCES D'ERREURS

De façon générale, dans le domaine des machines-outils, une erreur est définie comme étant *"la différence entre la réponse réelle de la machine à une commande dictée selon un protocole spécifique et la réponse à cette commande anticipée par ce même protocole"* [32]. En pratique, les erreurs dans les machines-outils peuvent être classées en plusieurs catégories selon leurs sources, leurs effets et leurs comportements dans le temps. Les plus importantes sont : les erreurs quasi-statiques, les erreurs dynamiques et les erreurs dues à la pièce et à l'outillage.

#### 2.1.1 Erreurs quasi-statiques

Les erreurs quasi-statiques constituent 70 % des erreurs attribuables aux machines-outils et [34]. Ces erreurs sont définies comme les erreurs sur la position relative entre l'outil et la pièce à usiner et varient lentement en fonction du temps. Elles dépendent de la structure de la machine et elles comportent principalement les erreurs géométriques, les erreurs cinématiques et les erreurs sous des contraintes statiques et thermiques [32]. Pour illustrer le comportement des erreurs géométriques dans une machine-outil multiaxiales, un

exemple d'évaluation de ces erreurs est présenté dans les sections suivantes en utilisant l'approche cinématique.

#### **2.1.1.1 Erreurs géométriques**

Les erreurs géométriques sont associées aux composantes structurelles de la machine et affectent directement les déplacements des éléments mobiles par rapport au système de référence. Le déplacement de la table d'une machine-outil par rapport à son bâti selon un axe entraîne des erreurs géométriques selon les trois axes principaux [35]. La figure 2 présente une configuration typique d'une liaison linéaire représentant le déplacement d'un chariot sur des glissières. Dans une telle configuration, il est possible de mettre en relief au moins six termes d'erreurs, dont chaque terme représente un degré de liberté. Trois erreurs sont sous forme de déviations linéaires et trois erreurs sont sous forme de déviations angulaires. Ces erreurs dépendent de la position de l'élément mobile sur son axe de déplacement principal. La première erreur de translation est obtenue à partir de la différence entre la position réelle de l'élément mobile sur son axe de mouvement et la position mesurée par le capteur de position. Il s'agit de l'erreur de position linéaire. Les deux autres erreurs sont mesurées le long des deux autres axes. Ces erreurs sont appelées "*erreurs de rectitude horizontale et verticale*". Les erreurs de rotation sont des déviations angulaires du chariot par rapport à la position de référence par des rotations autour des trois axes du système de référence. Elles sont usuellement appelées "*lacet, tangage et roulis*".

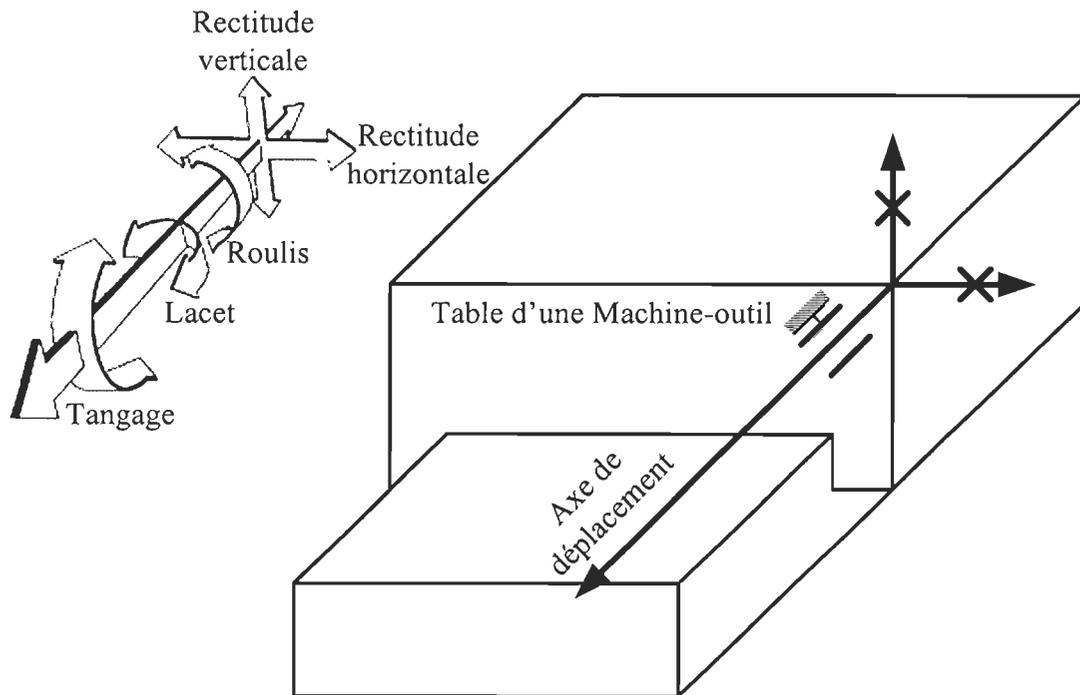


Figure 2. Liaison linéaire typique d'une machine-outil

### 2.1.1.2 Erreurs cinématiques

Les erreurs cinématiques sont des variations de position dans le comportement fonctionnel des éléments d'une machine-outil. Ce type d'erreur est souvent rencontré dans le cas d'applications nécessitant la combinaison d'axes ou de mouvements. Pour éviter ces erreurs, une coordination précise entre les mouvements est non pas seulement utile mais obligatoire. Dans les machines-outils conventionnelles, cette coordination est réalisée à l'aide de trains d'engrenages. Au niveau des machines-outils à commande numérique, la coordination ou plus spécifiquement l'interpolation est obtenue par commande électronique.

### 2.1.1.3 Exemple des erreurs géométriques dans une machine-outil multiaxiale

L'amélioration des performances métrologiques d'une machine-outil passe nécessairement par l'analyse géométrique de sa structure cinématique. L'identification des erreurs

structurelles est nécessaire afin d'analyser les défauts géométriques. Pour illustrer le concept des erreurs géométriques, une application porte sur l'identification des erreurs dans une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) tel qu'illustré à la figure 3. Cette machine est composée principalement des éléments suivants :

- un pont guidé en translation par rapport au bâti selon l'axe  $y$ ;
- un portique guidé en translation par rapport au pont selon l'axe  $x$ ;
- un chariot vertical guidé à son tour par rapport au portique selon l'axe  $z$ .

Le palpeur est monté sur le chariot vertical. La pièce à mesurer est maintenue d'une manière isostatique sur la table de la machine.

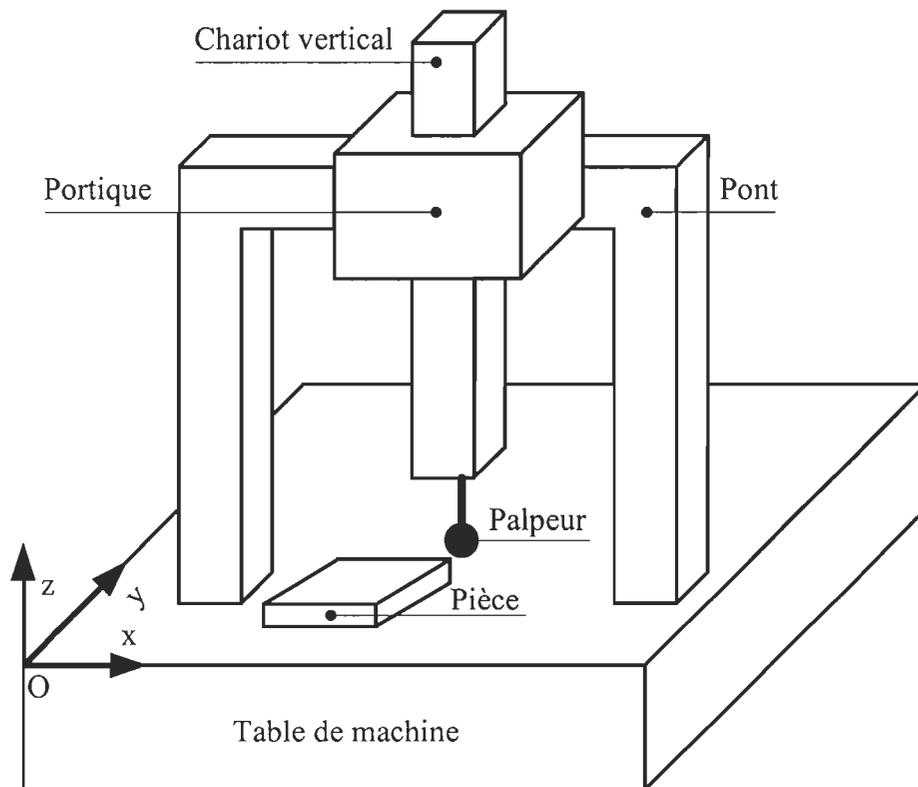


Figure 3. Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)

Avant d'entamer l'étude cinématique de la MMT, il est important de noter la différence entre une liaison linéaire idéale et une liaison linéaire réelle en introduisant le concept des matrices homogènes [35-37]. Dans le cas d'une liaison linéaire idéale, le déplacement peut être caractérisé par une translation pure représentée par la matrice de transformation homogène (1) permettant d'évaluer la position de l'élément mobile dans son mouvement selon l'axe de déplacement principal comme illustré dans la figure 4.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

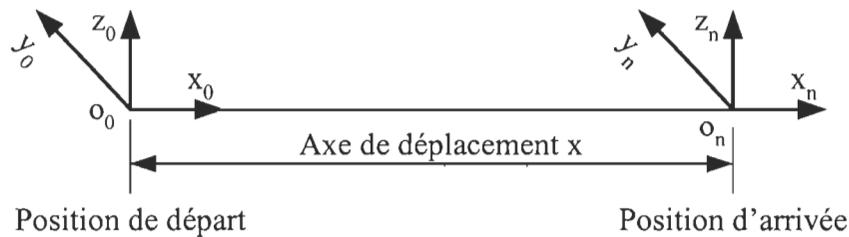


Figure 4. Liaison linéaire idéale

La figure 5 présente le cas d'une liaison linéaire réelle. La matrice de transformation homogène (2) permet de caractériser la position de l'élément mobile ainsi que les erreurs associées dans son déplacement dans le volume de travail de la machine. Les erreurs sont sous forme de déviations linéaires (rectitudes axiale ( $\delta_{xx}$ ), horizontale ( $\delta_{xy}$ ) et verticale ( $\delta_{xz}$ )) et de déviations angulaires (lacet ( $\epsilon_{xy}$ ), tangage ( $\epsilon_{xz}$ ) et roulis ( $\epsilon_{xx}$ )).

$$\begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{xz} & \epsilon_{xy} & x + \delta_{xx} \\ \epsilon_{xz} & 1 & -\epsilon_{xx} & \delta_{xy} \\ -\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 1 & \delta_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

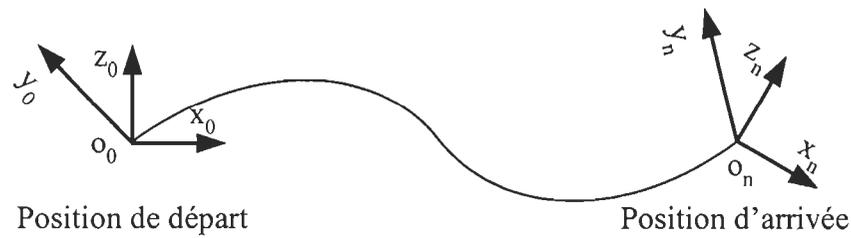


Figure 5. Liaison linéaire réelle

Le schéma cinématique présenté à la figure 6 permet de définir l'agencement des différents systèmes de coordonnées et montre comment chaque système de coordonnées peut être exploité de manière à déterminer la relation spatiale entre la pièce et le palpeur. Les systèmes de coordonnées sont définis de la manière suivante :

- Le système de coordonnées principal  $SC_0(o_0, x_0, y_0, z_0)$  est placé au coin de la table de la machine.
- Le système de coordonnées associé au pont  $SC_1(o_1, x_1, y_1, z_1)$  est défini à l'aide d'un vecteur  $(X_1, Y_1, Z_1)$  par rapport au  $SC_0$ .
- Le système de coordonnées associé au portique  $SC_2(o_2, x_2, y_2, z_2)$  est défini à l'aide d'un vecteur  $(X_2, Y_2, Z_2)$  par rapport au  $SC_0$ .
- Le système de coordonnées relié au chariot supérieur  $SC_3(o_3, x_3, y_3, z_3)$  est défini à l'aide d'un vecteur  $(X_3, Y_3, Z_3)$  par rapport au  $SC_0$ .
- Le système de coordonnées relié au palpeur  $SC_4(o_4, x_4, y_4, z_4)$  est défini à l'aide d'un vecteur  $(0, 0, Z_4)$  par rapport au  $SC_3$ .
- Le système de coordonnées relié à la pièce à mesurer  $SC_P(o_P, x_P, y_P, z_P)$  est défini à l'aide d'un vecteur  $(X_P, Y_P, Z_P)$  par rapport au  $SC_0$ .

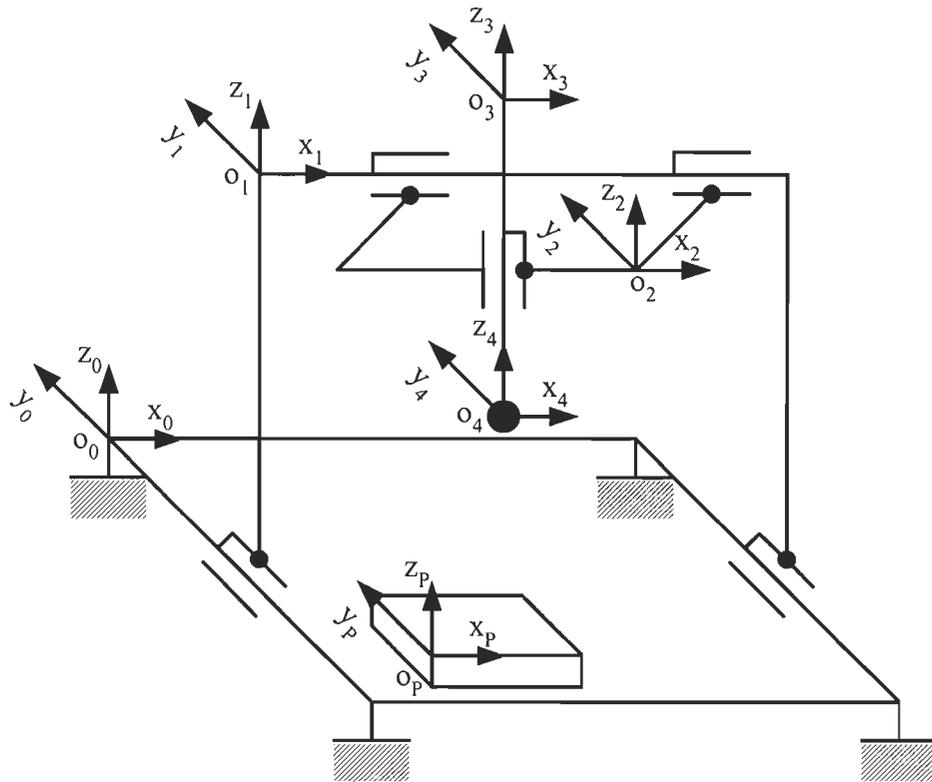


Figure 6. Schéma cinématique de la machine MMT

Dans cette analyse, les matrices de transformation homogène sont désignées de manière à établir la relation spatiale entre les éléments mobiles et leurs guidages respectifs :

- ${}^0T_1$  représente la matrice de transformation des coordonnées du pont par rapport au bâti de la machine.
- ${}^1T_2$  représente la matrice de transformation des coordonnées du portique par rapport au pont.
- ${}^2T_3$  représente la matrice de transformation des coordonnées du chariot vertical par rapport au portique.
- ${}^3T_4$  représente la matrice de transformation des coordonnées du palpeur par rapport au chariot vertical.

- ${}^0T_5$  représente la matrice de transformation des coordonnées de la pièce par rapport au bâti de la machine.

Le seul degré de liberté du pont est le mouvement dans la direction transversale (y). La MTHI correspondante est la suivante:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_1 \\ 0 & 1 & 0 & y + Y_1 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

En supposant que le pont est fixe, le seul degré de liberté du portique est le mouvement dans la direction longitudinale (x). La MTHI correspondante est la suivante:

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x + X_2 \\ 0 & 1 & 0 & Y_2 \\ 0 & 0 & 1 & Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

En supposant que le pont et le portique sont fixes, le seul degré de liberté du chariot vertical est le mouvement dans la direction verticale (z). La MTHI correspondante est la suivante:

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_3 \\ 0 & 1 & 0 & Y_3 \\ 0 & 0 & 1 & z + Z_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Tout mouvement du palpeur est interdit par rapport au chariot vertical. La MTHI correspondante est la suivante:

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

La pièce est maintenue en position isostatique par rapport à la table de la machine MMT; la MTHI correspondante est la suivante:

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_p \\ 0 & 1 & 0 & Y_p \\ 0 & 0 & 1 & Z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$  présente la position du système de coordonnées relié à la pièce par rapport au système de coordonnées principale  $CS_0$ .

La matrice de transformation homogène réelle doit tenir compte de la position réelle et de l'orientation de chaque élément mobile dans son déplacement.

Pour le pont, la MTHR correspondante est la suivante :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{yy} & \delta_{yx} + X_1 \\ \varepsilon_{yz} & 1 & -\varepsilon_{yx} & \delta_{yy} + y + Y1 \\ -\varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yx} & 1 & \delta_{yz} + Z1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Pour le portique, la MTHR correspondante est la suivante :

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{xz} & \varepsilon_{xy} & \delta_{xx} + x + X_2 \\ \varepsilon_{xz} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \delta_{xy} + Y_2 \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 1 & \delta_{xz} + Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Pour le chariot vertical, la MTHR correspondante est la suivante :

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zz} & \varepsilon_{zy} & \delta_{zx} + X_3 \\ \varepsilon_{zz} & 1 & -\varepsilon_{zx} & \delta_{zy} + Y_3 \\ -\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zx} & 1 & \delta_{zz} + Z + Z_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Pour le palpeur, la MTHR correspondante est la suivante :

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_{ox} \\ 0 & 1 & 0 & \delta_{oy} \\ 0 & 0 & 1 & \delta_{oz} + Z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Les termes  $\delta_{ox}$ ,  $\delta_{oy}$  et  $\delta_{oz}$  sont les déviations linéaires dues au changement de la longueur du palpeur selon les axes x, y et z.

Les erreurs d'orientation pendant le montage de la pièce à mesurer sont supposées nulles.

La MTHR correspondante est la suivante :

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_{px} + X_p \\ 0 & 1 & 0 & \delta_{py} + Y_p \\ 0 & 0 & 1 & \delta_{pz} + Z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Les termes  $\delta_{px}$ ,  $\delta_{py}$  et  $\delta_{pz}$  sont les erreurs dues au placement initial de la pièce selon les axes x, y et z.

En utilisant les matrices de transformation réelle, la position du palpeur par rapport à la référence est représentée par la multiplication des matrices (8), (9), (10) et (11) :

$$\text{Ref } T_{\text{palpeur}} = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \quad (13)$$

D'une façon similaire, le point d'interférence idéale Plapeur-Pièce est donnée par la matrice suivante :

$$\text{Ref } T_{\text{Pièce}} = {}^0T_5 \quad (14)$$

Le vecteur de correction est ainsi:

$$P_E = \text{Ref } T_{\text{Pièce}} - \text{Ref } T_{\text{Palpeur}} \quad (15)$$

#### **2.1.1.4 Erreurs dues aux chargements statiques**

Les machines-outils sont affectées par une variété de charges statiques qui entraînent des déflexions des éléments structurels de la machine-outil. Ces déformations affectent la position relative de l'outil par rapport à la pièce à usiner et entraînent une dégradation de la précision des machines-outils.

Au cours de la phase d'installation d'une machine-outil, il est nécessaire de prendre les précautions nécessaires afin d'éviter ce type de distorsion. En effet, pour éviter la perte de précision, la machine-outil doit être mise en position en portant une attention particulière à la distribution des contacts. Plusieurs machines-outils en service sont installées sur des fondations flottantes ou en utilisant des supports hydrostatiques pour des applications de haute précision.

D'autres déformations résultent des déplacements des éléments mobiles. Le poids de certains éléments est tellement important que la rigidité des supports devient insuffisante pour maintenir les déformations à des niveaux admissibles. Généralement, les constructeurs des machines-outils appliquent un certain nombre de solutions permettant de corriger les effets des déformations dues à ce type de sollicitations mécaniques par le renforcement de la structure de la machine et en prévoyant des contrepoids.

Actuellement, la plupart des approches de mesure des erreurs géométriques ne tiennent pas systématiquement compte des effets des contraintes générées par le procédé et par le poids

de la pièce. Le poids des éléments mobiles de la machine et le poids additionnel de la pièce peuvent causer des déformations statiques considérables surtout quand il s'agit d'un montage de pièce avec porte-à-faux.

Durant certaines opérations, divers éléments mobiles de la machine (contre-pointe, broche, porte-outil...etc.) doivent rester immobiles. Ils sont bloqués par serrage à leurs guides respectifs. Les mécanismes de serrage sont parfois mal conçus, l'action du serrage provoque également des déformations indésirables et peut affecter la précision globale de la machine-outil.

#### **2.1.1.5 Erreurs dues aux chargements thermiques**

Les erreurs induites thermiquement proviennent essentiellement de la chaleur introduite à partir de plusieurs sources. La figure 7 présente les sources thermiques possibles ainsi que leur mode d'action dans une machine-outil. Les mécanismes de transfert de la chaleur à travers la structure de la machine-outil sont variés (conduction, convection et radiation) [33, 35].

Le niveau de perte de précision dû aux effets thermiques est comparable à ceux résultants des sollicitations mécaniques et de l'usure des outils de coupe. Les effets thermiques sont provoqués par des sources de chaleur internes et externes. Les sources internes sont causées par les éléments composant la machine-outil elle-même tels que les moteurs d'axe, les systèmes de transmission de mouvements, la broche, ainsi que les glissières et les systèmes hydrauliques et électroniques. Les sources de chaleur externes se rattachent à l'environnement immédiat de la machine. En effet, la variation de la température ambiante peut provoquer des distorsions importantes dans la machine-outil à cause de la distribution

non uniforme de la masse dans la structure ainsi que de l'inertie thermique inégale des différentes composantes [34].

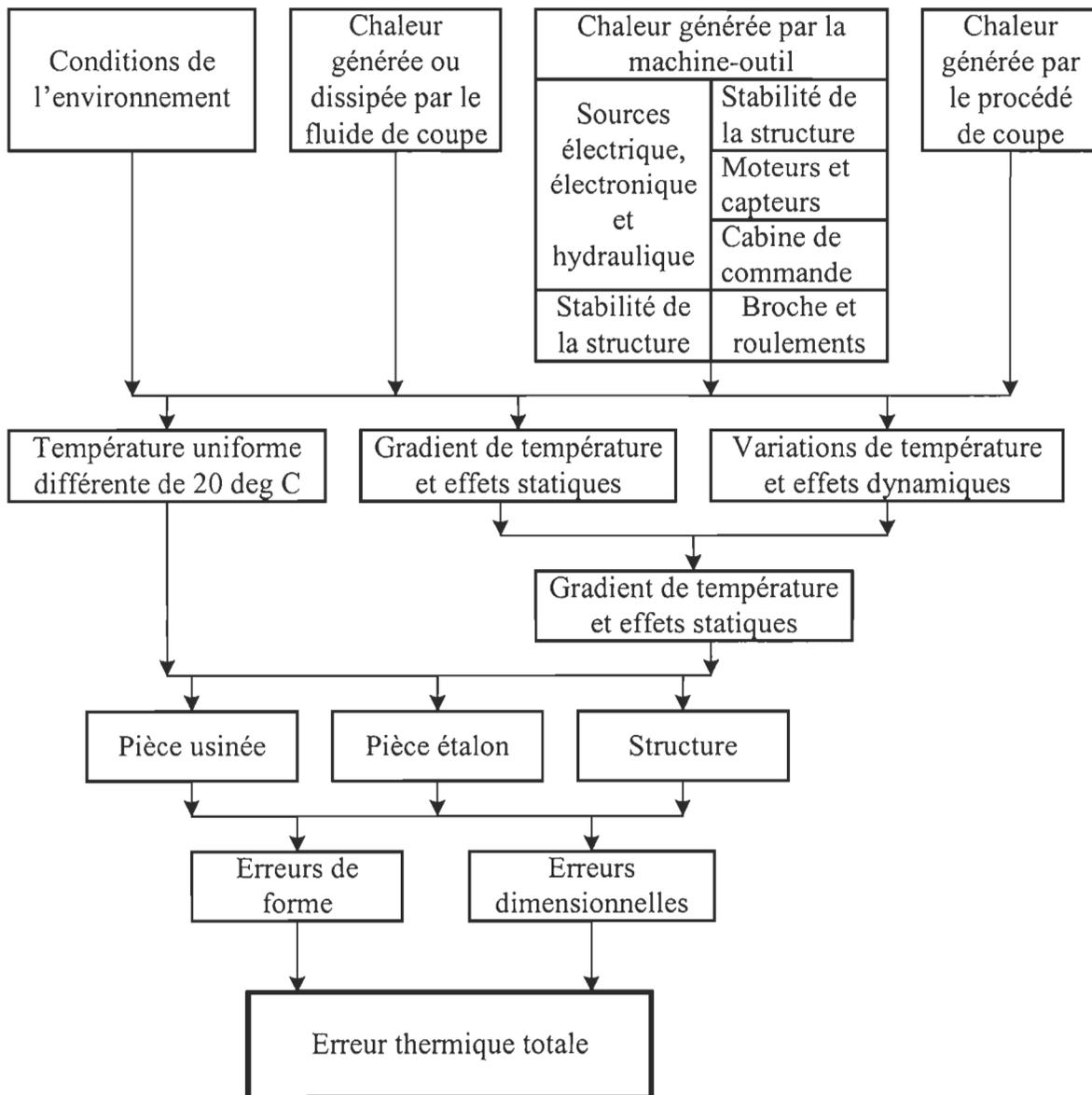


Figure 7. Sources d'erreurs thermiques dans une machine-outil, [35]

La transmission de la chaleur à partir de toutes ces sources vers la structure de la machine-outil génère des gradients de température variables dans le temps. Ces gradients

provoquent des distorsions et des contraintes thermiques ainsi que des variations dans la rigidité de la structure de la machine-outil. Ils affectent également les systèmes de mesure, la pièce et l'outil. En conséquence, le statut thermique de la machine-outil contribue largement à la variation de son comportement géométrique et cinématique [35].

### ***2.1.2 Erreurs dynamiques***

Dans une machine-outil, les erreurs dynamiques représentent les variations rapides dans le comportement dynamique du système MOP. Les principales sources qui causent ces variations sont : le mouvement de rotation de la broche, les vibrations induites et forcées dans la structure de la machine, les erreurs du contrôleur et les déflexions sous des forces d'inertie. Contrairement aux erreurs quasi-statiques, les erreurs dynamiques varient rapidement dans le temps et elles affectent les caractéristiques locales de la pièce à usiner en terme de précision dimensionnelles, géométrique et de fini de surface [32]. La précision d'usinage des machines-outils est fréquemment réduite par les vibrations et limitée par les caractéristiques dynamiques de la machine-outil.

Parmi les sources les plus importantes, il faut considérer les efforts de coupe, les vibrations dues à la rotation de la broche et les vibrations induites dans la structure. De façon générale, ces erreurs peuvent être divisées en deux catégories majeures: les erreurs dynamiques dues à la machine-outil et les erreurs dues au procédé. Il est important de noter que dans le cas des machines à mesurer tridimensionnelles, les effets dynamiques sont négligeables, cependant, la vitesse d'approche, la vitesse de mesure et la nature de contact entre le palpeur et la surface à mesurer sont des contraintes à considérer dans l'analyse dynamique.

### **2.1.2.1 Erreurs dynamiques dues à la machine-outil**

La rotation d'un outil de coupe ou de la pièce à usiner autour d'un axe précis est fondamentale pour l'obtention de la qualité de toute opération d'usinage. Ces erreurs sont principalement causées par les défauts dans les roulements, les déformations causées par la distribution des charges, la variation des contacts entre les différentes composantes ou encore au comportement de la structure en fonction des modes d'excitations.

### **2.1.2.2 Erreurs dynamiques dues au procédé**

La coupe des métaux est un processus dynamique dans lequel la fonction d'enlèvement du métal génère des sollicitations qui affectent la précision de la machine-outil. Ces sollicitations ont des effets sur la variation des erreurs quasi-statiques et peuvent donner naissance à d'autres types d'erreurs. L'influence du procédé sur la précision peut être caractérisée par la coexistence des trois phénomènes suivants : les déformations sous l'effet des forces de coupe, la température générée par la coupe et les vibrations.

- **Déformations sous l'effet des forces de coupe**

Au cours d'une opération d'usinage, les forces de coupe provoquent des efforts sur l'outil et sur la pièce. Ces sollicitations sont propagées dans les autres composantes de la machine et elles provoquent par conséquent des déformations qui se répercutent sur la qualité dimensionnelle et géométrique de la pièce finie. Ces erreurs sont une conséquence de la variation des forces de coupe due aux défauts de forme de la pièce brute, de la variation de la rigidité du système de mise en position ou de la structure et de la variation des conditions de coupe (profondeur de passe, vitesse de coupe et vitesse d'avance).

- **Température générée par la coupe**

La chaleur générée par la coupe dans la zone COP est dégagée à l'extérieur de cette zone. Elle se trouve propagée dans la structure à travers les contacts mécaniques ou par le fluide de coupe. Cette chaleur provoque des distorsions qui dégradent la précision globale de la machine-outil.

- **Vibrations**

La vibration est produite principalement par le processus de coupe. La précision d'usinage obtenue avec les machines-outils est fréquemment compromise par les vibrations. Le mouvement relatif entre l'outil et la pièce résulte de la superposition des déplacements commandés par les mouvements de coupe et d'avance ainsi que les déplacements générés par la dynamique du procédé. La variation de ce mouvement relatif donne naissance à des erreurs qui affectent principalement l'état de surface de la pièce finie. La variation de la profondeur de passe provoque une variation des efforts de coupe; ce qui génère une excitation de la structure de la machine-outil et de la pièce elle-même. Cette excitation forcée de la structure génère une déflexion de l'outil de coupe. La modélisation du processus de coupe devient nécessaire afin de prédire les effets de la vibration pour des outils de coupe bien spécifiques.

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

La caractérisation de la réponse dynamique des machines-outils durant la phase de conception peut aider les ingénieurs à réaliser une diminution nette de la rigidité et du poids total de la machine-outil. Une machine-outil prototype est souvent utilisée afin d'étudier l'influence de plusieurs variables affectant les performances dynamiques. Les méthodes des éléments finis peuvent être utilisées afin de déterminer le facteur d'amortissement et la rigidité de la structure. Les performances de la machine peuvent être testées numériquement pour différentes configurations possibles afin d'optimiser la structure en fonction de la vibration induite dans la structure et apporter les corrections nécessaires au modèle général.

Pour atténuer l'effet des vibrations, il est impératif de balancer dynamiquement toutes les composantes tournantes et d'isoler complètement la machine de la structure du local où elle est installée en utilisant des composantes mécaniques (ressort, masses et amortisseurs) [35].

### ***2.1.3 Erreurs dues à la pièce et à l'outillage***

La précision dimensionnelle de la pièce finie est influencée par les distorsions que subit la pièce pendant l'usinage. De façon générale, les forces de maintien en position doivent être supérieures aux forces coupantes sans causer des déformations pouvant changer les dimensions initiales de la pièce.

En effet, pendant chaque opération d'usinage qui implique l'enlèvement de la matière, les forces de coupe, les vibrations et l'usure de l'outil génèrent des contraintes mécaniques et thermiques. Ces contraintes affectent directement la pièce ou l'outil et contribuent à la dégradation de la précision et de l'intégrité de la surface.

L'arête tranchante de l'outil subit des sollicitations mécaniques et thermiques intenses qui conduisent à sa dégradation. L'usure de l'outil entraîne alors une augmentation du niveau des forces de coupe et de la température. Ces effets provoquent la variation des erreurs quasi-statiques et dynamiques.

Dans le but de réduire les erreurs causées par le réglage de l'outil, il est nécessaire de disposer d'une station de pré-réglage qui permet de déterminer la position réelle de l'outil dans le volume de travail de la machine-outil.

## **2.2 TECHNIQUES DE RÉDUCTION DES EFFETS D'ERREURS**

Pour améliorer la précision, il est nécessaire d'effectuer une analyse détaillée des sources d'erreurs en utilisant une approche approfondie et fiable tout en adoptant une méthodologie de compensation efficace et robuste afin de corriger ces erreurs en temps réel [32]. Les stratégies classiques d'amélioration de la précision dans les machines-outils sont présentées à la figure 8. Elles impliquent la réduction des erreurs en adoptant deux approches majeures. La première consiste à éviter les erreurs par l'amélioration du design des machines-outils et par l'isolement des sources d'erreurs induites dans la structure des machines-outils. La deuxième approche consiste à compenser les erreurs en utilisant les différentes techniques d'étalonnage et de compensation.

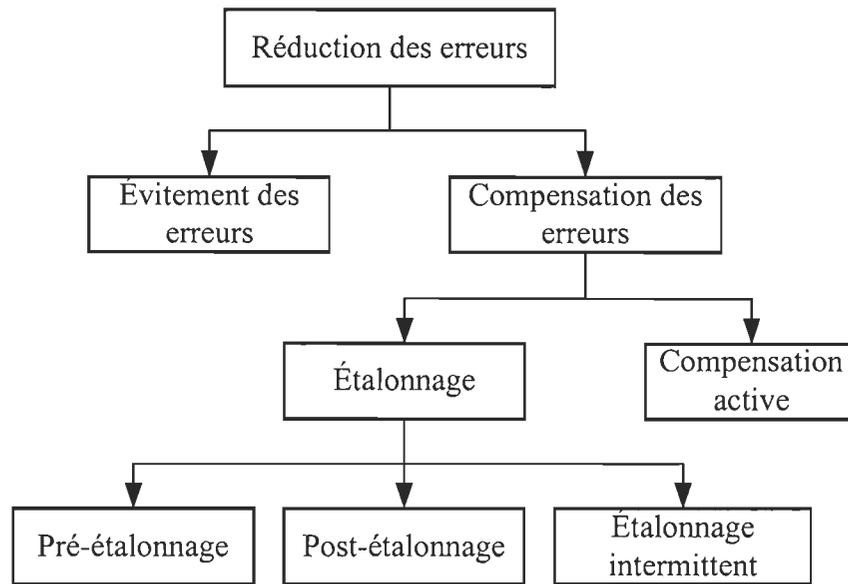


Figure 8. Stratégies de réduction des erreurs

### 2.2.1 Évitement d'erreur

Le concept d'évitement des erreurs, présenté à la figure 9, consiste à éliminer partiellement ou totalement les sources d'erreurs. Cette solution, utilisée dans des machines-outils spécialisées, consiste à augmenter la qualité du design ainsi qu'à développer des solutions susceptibles d'isoler les sources d'erreurs et d'atténuer leurs effets. Le coût associé à cette solution ainsi que les limitations technologiques sont deux éléments majeurs qui limitent la mise en place de cette stratégie [32, 35].

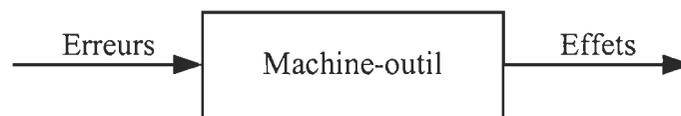


Figure 9. Concept d'évitement des erreurs

### 2.2.2 Compensation des erreurs par étalonnage

Les techniques de compensation impliquent la nécessité de mesurer, dans des conditions opératoires et environnementales typiques, l'ensemble des composantes de l'erreur, de les combiner à travers des modèles mathématiques basés sur la structure de la machine pour ensuite générer les données nécessaires à la correction des erreurs [34, 38]. Le but de la compensation est de maintenir la qualité dimensionnelle et géométrique conforme aux spécifications tout en éliminant les effets des sources d'erreurs. La figure 10 illustre le concept de la compensation des erreurs. Il consiste à déterminer une entrée additionnelle de correction afin d'atténuer les effets des erreurs et ainsi fournir une sortie compensée.

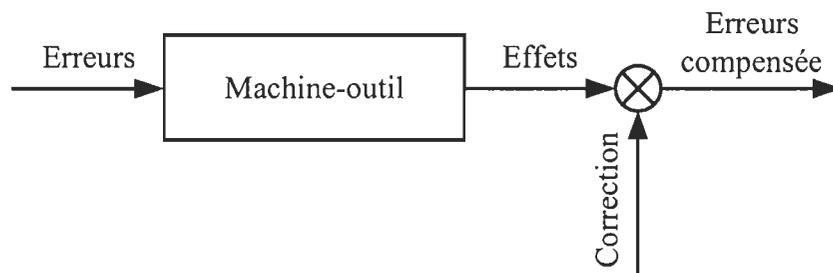


Figure 10. Technique de compensation par étalonnage

La compensation par étalonnage peut se faire au niveau matériel en optimisant le montage et en rendant les différents éléments plus compacts afin de réduire les erreurs systématiques qui peuvent influencer les mesures. Elle peut également se faire au niveau logiciel en établissant un modèle mathématique résumant le comportement des erreurs et en appliquant, par la suite, une correction à l'aide d'un contrôleur avec rétroaction. Ce type de compensation peut être confronté à des limitations dont l'espace de la matrice des erreurs

qui peut être difficile à déterminer avec une grande précision et le grand effort à déployer afin de mettre en place une correction efficace [39].

La compensation d'erreurs par étalonnage est définie comme une méthode d'annulation des erreurs systématiques dans une machine-outil ou des sources qui les provoquent. Trois types d'étalonnage peuvent être envisagés: le pré-étalonnage, le post-étalonnage et l'étalonnage intermittent.

### **2.2.2.1 Pré-étalonnage**

Le pré-étalonnage est parmi les techniques les plus anciennes avec laquelle la compensation reste possible pour des erreurs répétitives. Elle trouve son application lorsqu'une ou deux erreurs sont dominantes et que les coûts engendrés sont plus bas que ceux générés par d'autres méthodes. Par exemple, il est préférable de compenser les erreurs de position dans un système vis-écrou que de tenter de fabriquer un système géométriquement parfait. En plus des limitations attribuées à l'ensemble des techniques d'étalonnage, cette méthode ne donne qu'une approximation de l'erreur totale. En effet, en l'absence d'instruments de mesure capables d'évaluer directement les effets des sources de variations; cette méthode se trouve sévèrement limitée aux erreurs de justesse car elle ne tient pas compte des erreurs à caractère dynamique telles que les déformations sous les effets mécaniques, thermiques et dynamiques.

### **2.2.2.2 Post-étalonnage**

Le post-étalonnage est une technique d'amélioration de la précision des pièces en utilisant le résultat de la mesure de la pièce afin de compenser les erreurs répétitives dans la trajectoire d'outil. Le processus est normalement appliqué à des machines-outils à

commande numérique. Le post-étalonnage est souvent utilisé dans le cas des pièces qui présentent des spécifications dimensionnelles et géométriques supérieures à la précision totale de la machine ou les cas où le nombre de série de pièces à usiner justifie l'effort nécessaire d'augmenter la précision. Cette technique permet de produire des pièces avec une haute précision, de compenser les erreurs répétitives ainsi que d'intégrer les effets de toutes les erreurs répétitives avec une simple inspection de la pièce finie.

L'inconvénient majeur de cette méthode est associé au fait que les informations obtenues à partir de l'inspection de la pièce ne sont utilisables que pour la correction de la même pièce ou d'une série de pièces identiques. D'autre part, même si les investissements sont faibles, cette méthode exige beaucoup de temps de laboratoire et elle est généralement limitée à des cas spécifiques. La précision obtenue avec une telle technique d'étalonnage est également limitée par:

- la répétitivité de la machine;
- la répétitivité du procédé d'usinage;
- la résolution de la machine;
- la communication des données de l'inspection;
- la fréquence des corrections.

### **2.2.2.3 Étalonnage intermittent en cours du processus**

Le principe de cette technique consiste à remplacer, après l'usinage, l'outil par un palpeur électronique pour la mesure tridimensionnelle de la pièce finie sans aucun démontage. Au moyen d'une connexion entre le signal du palpeur et la boucle de commande de la MOCN; celle-ci joue le rôle d'une machine à mesurer tridimensionnelles. Les informations qui

découlent de ces mesures sont alors stockées dans la mémoire de l'unité de commande sous forme de matrice d'erreurs pour la compensation. Pour avoir la précision nécessaire, les erreurs systématiques à vide dans la portion du volume de travail qu'occupe la pièce doivent être préalablement compensées. Avec cette méthode les erreurs non répétitives ainsi que celles générées par le procédé ne peuvent pas être compensées. Cette solution est sévèrement restreinte à des formes géométriques élémentaires.

### ***2.2.3 Compensation active***

Le concept de la compensation active vient remédier aux limitations des techniques de compensation classiques. Généralement, elle existe deux catégories d'approches de compensation active. La première consiste à effectuer des mesures hors ligne et à adapter les résultats sous forme d'un modèle mathématique capable de corriger les erreurs pendant que la machine-outil est en opération. Ce concept est illustré à la figure 11. La deuxième catégorie consiste à mesurer les erreurs en ligne et à injecter la correction en temps réel. Deux méthodes de compensation en temps réel sont possibles. La première méthode consiste à injecter les signaux directement au servomoteur de la machine-outil sous forme d'un signal analogique. Cette méthode est difficile à implanter vu les problèmes technologiques reliés à cette approche. La deuxième méthode consiste à injecter le signal de compensation dans le contrôleur de la machine. Cette méthode ne demande pas une interface additionnelle pour sa mise au point et n'exige aucune modification de la partie électronique du contrôleur [35].

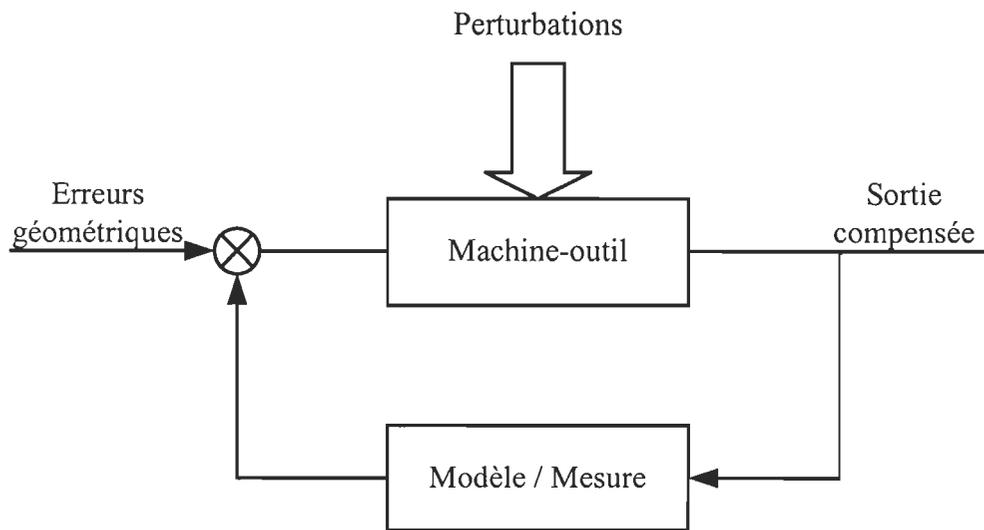


Figure 11. Concept de la compensation active des erreurs

#### ***2.2.4 Limitations des techniques de compensation***

Les techniques de compensation par étalonnage, bien qu'elles rendent possible la correction d'une proportion importante de l'erreur systématique, ne permettent pas de réduire complètement toutes les composantes de l'erreur. Elles sont limitées par plusieurs contraintes : (i) la mesure des erreurs géométriques en différé sur une machine-outil multiaxiale demande un temps de laboratoire assez important, car les moyens de mesure ne permettent d'évaluer qu'une seule composante de l'erreur à la fois. De plus, pour étudier la variation de cette erreur dans des conditions opératoires et environnementales différentes, il est nécessaire de créer un plan d'expérience et pouvoir contrôler et maintenir ces conditions stables tout au long de la durée des mesures. (ii) l'évaluation de la totalité des facteurs opératoires ayant des effets sur la précision de la machine-outil est difficile à mettre en œuvre. La budgétisation de toutes les sources d'erreur ne peut être exhaustive vu la difficulté de couvrir toutes les causes qui les provoquent. De plus, l'évaluation de ces

facteurs demande la mobilisation des outils technologiques extrêmement rapides dans le temps et ayant une bonne précision afin de couvrir l'ensemble des facteurs opératoires ayant des effets sur la précision de la machine. (iii) lors du procédé de coupe, les effets dynamiques ne se sont pas pris en compte dans la modélisation, puisque les mesures sont effectuées dans des conditions opératoires statiques (mesure hors ligne). La modélisation du comportement des erreurs géométriques dans des conditions dynamiques est complexe à mettre en place vu la multitude des sources pouvant avoir un effet sur ces erreurs et la complexité de la configuration des différents éléments composant une machine-outil ainsi que la prédiction complète de la réponse des machines-outils dans un contexte dynamique. Finalement, (iv) l'utilisation de l'approche élémentaire de mesure des composantes d'erreur ne permet pas de considérer les mécanismes d'interaction entre les différentes erreurs. Ceci modifie complètement la dynamique de l'analyse du comportement des erreurs. De plus, plusieurs machines-outils doivent être étalonnées, d'une façon périodique, pour palier à la dégradation de leur structure sous l'effet des conditions statiques et dynamiques ainsi que l'usure des éléments mobiles.

# Chapitre 3

## Développement du prototype

### 3.1 INTRODUCTION

Le but du projet est de développer un nouveau système de mesure capable d'évaluer dynamiquement les erreurs dans les machines-outils à axes multiples. Ce chapitre présente les étapes de mise en œuvre du nouveau système de mesure. Ce système est conçu afin d'évaluer les six composantes de l'erreur associées à une liaison linéaire d'une machine-outil multiaxiale. En effet, au cours de cette phase consacrée au développement du concept, la recherche d'une configuration optimale des éléments optiques a permis une réduction substantielle des erreurs systématiques relatives aux mesures. De plus, une méthodologie de décomposition des erreurs est mise en place permettant le calcul des différentes composantes de l'erreur totale en fonction des déviations détectées sur les capteurs de position dans les deux directions.

Un système de coordonnées (xyz) est désigné. Tout mouvement selon l'axe conventionnel z (axe de déplacement principal) provoque 6 erreurs géométriques : la rectitude axiale  $\delta_{zz}$ , la rectitude horizontale  $\delta_{zx}$ , la rectitude verticale  $\delta_{zy}$ , le lacet  $\epsilon_{zx}$ , le

tangage  $\varepsilon_{zy}$  et le roulis  $\varepsilon_{zx}$ . La figure 12 présente la configuration des 6 composantes d'erreur pour un déplacement principal.

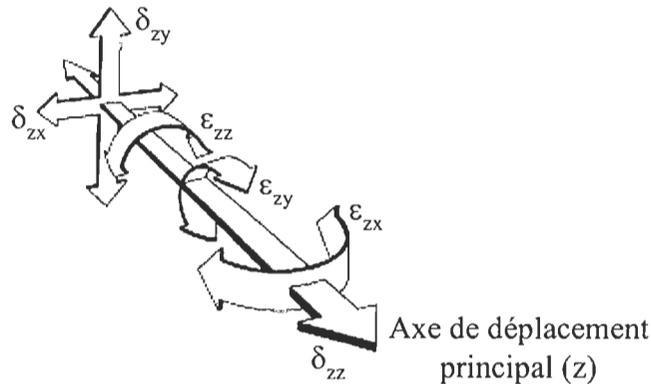


Figure 12. Configuration des six composantes de l'erreur géométrique

### 3.2 CONFIGURATION DU SYSTÈME DE MESURE

La configuration globale du système de mesure est présentée à la figure 13. Le système de mesure développé est composé de deux plaques. Premièrement, la plaque mobile est fixée sur l'élément de déplacement de la machine à calibrer. Elle comporte deux miroirs réfléchissants placés à  $45^\circ$  par rapport à l'axe principal du déplacement, un miroir plat placé perpendiculairement à l'axe principal de déplacement et un rétro-rélecteur. Deuxièmement, la plaque de référence est fixée sur la table de la machine et elle comporte une source laser stabilisée de type He-Ne, trois miroirs semi-réfléchissants afin de diviser le faisceau original en plusieurs faisceaux secondaires. Ce choix permet d'éviter l'utilisation de trois sources laser en parallèle. La plaque fixe comporte également trois détecteurs de position capables d'enregistrer toute déviation de la table mobile par rapport à la plaque fixe dans les deux plans horizontal et vertical. Ces déviations seront traduites, bien entendu, en déviations linéaires et angulaires en utilisant les transformations nécessaires.

Les trois sections suivantes présentent les principes de mesure des rectitudes horizontale et verticale, du lacet, du tangage et du roulis.

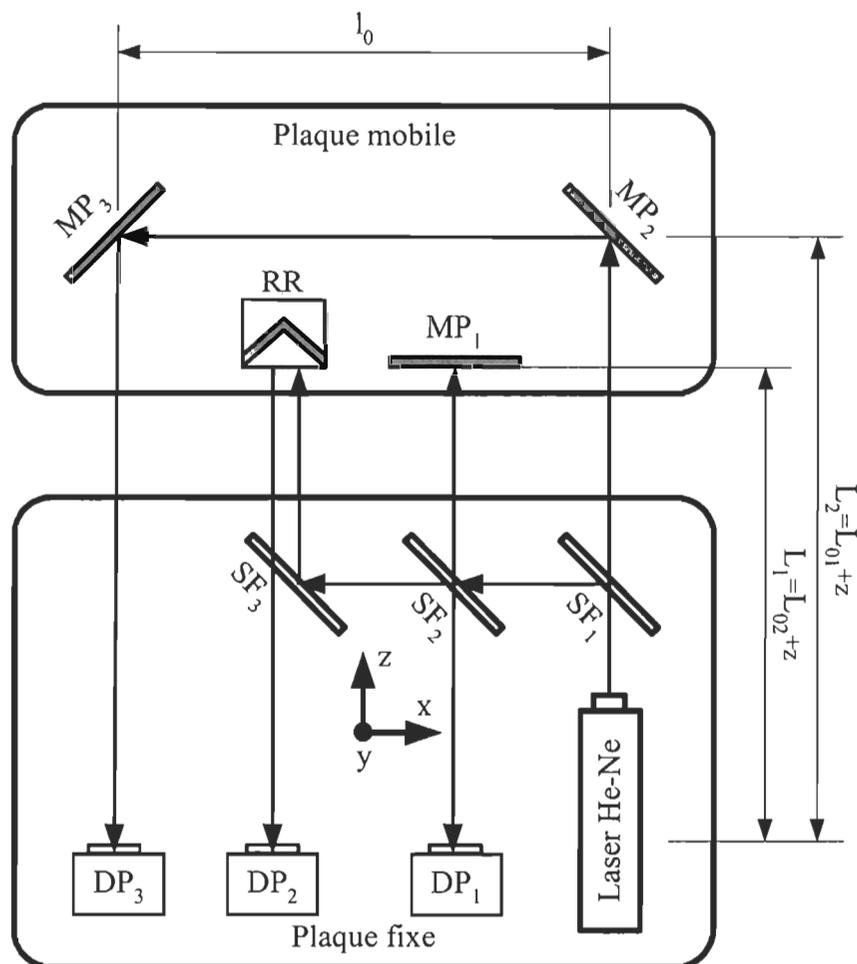


Figure 13. Configuration globale du système de mesure

### 3.2.1 Mesure des rectitudes horizontale et verticale

Le principe de mesure des déviations linéaires ( $\delta_{zx}$ ,  $\delta_{zy}$ ) est présenté à la figure 14. Le faisceau, provenant de la source laser He-Ne, est réfléchi au moyen du miroir semi-réfléchissant SF<sub>1</sub> et traverse le miroir semi-réfléchissant SF<sub>2</sub> pour être réfléchi de nouveau par le miroir semi-réfléchissant SF<sub>3</sub>. Par la suite, le faisceau est projeté sur le rétro-

réflecteur RR puis réfléchi sur le détecteur de position  $DP_2$ . Toutes déviations enregistrées sur ce détecteur sont considérées comme des erreurs de rectitudes horizontale et verticale.

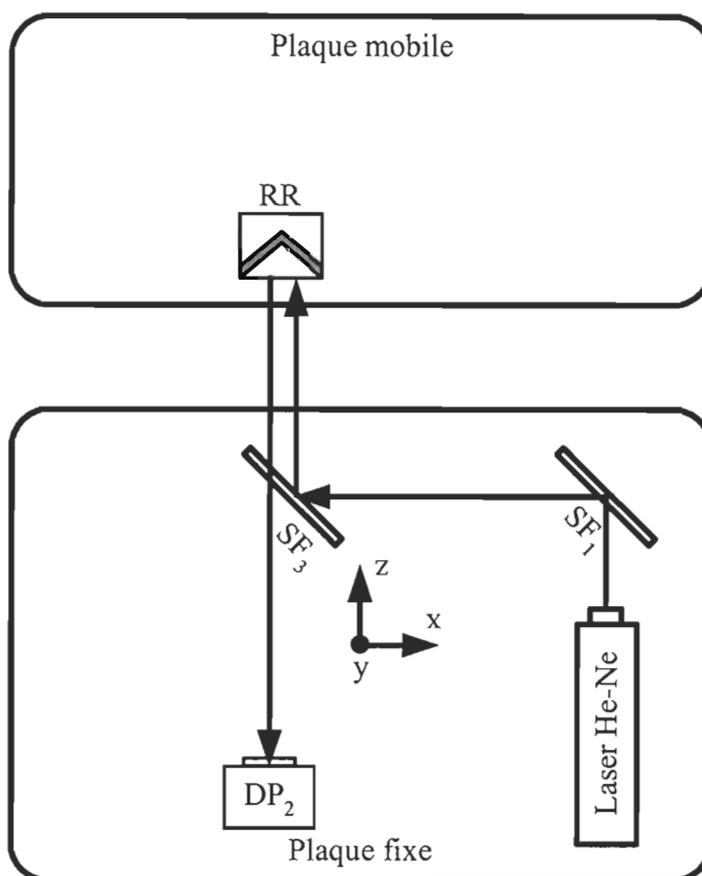


Figure 14. Mesure des rectitudes horizontale ( $\delta_{zx}$ ) et verticale ( $\delta_{zy}$ )

### 3.2.2 Mesure du lacet et du tangage

Le principe de mesure du lacet et du tangage est présenté à la figure 15. Le faisceau original, provenant de la source laser He-Ne, est réfléchi au moyen du miroir semi-réfléchissant  $SF_1$  et réfléchi par la suite par le miroir semi-réfléchissant  $SF_2$ . Ce faisceau est projeté sur le miroir plat  $MP_1$  puis réfléchi sur le détecteur de position  $DP_1$ . Le détecteur  $DP_1$  est capable de lire toutes les déviations dans les deux plans horizontal et

vertical. Toutes déviations enregistrées sur ce détecteur sont converties respectivement en lacet et en tangage à l'aide d'une simple relation trigonométrique.

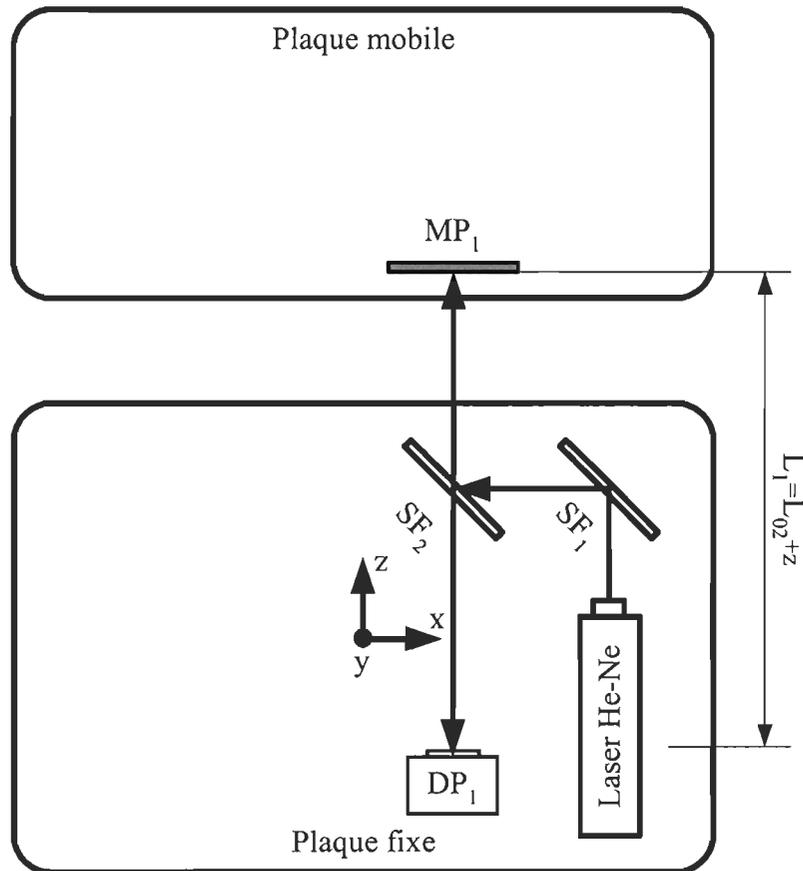
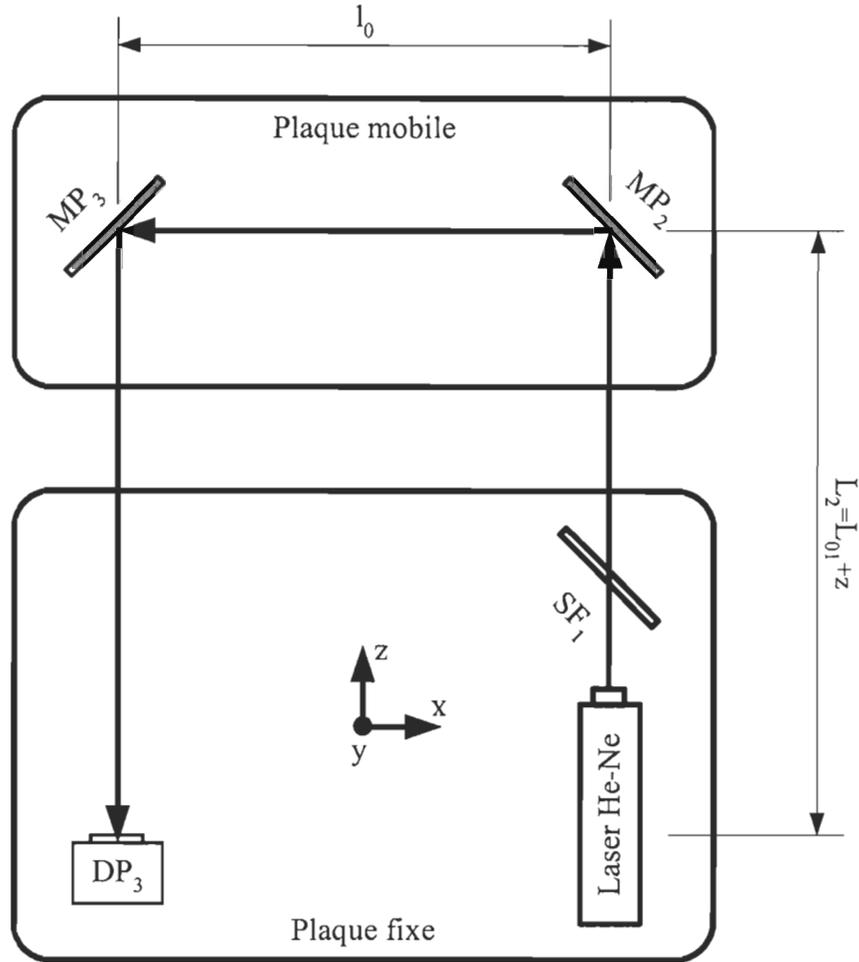


Figure 15. Mesure du lacet ( $\epsilon_{zx}$ ) et du tangage ( $\epsilon_{zy}$ )

### 3.2.3 Mesure du roulis

Le principe de mesure du roulis est présenté à la figure 16. Le faisceau original provenant de la source laser traverse le miroir semi-réfléchissant SF<sub>1</sub> et il est projeté sur le miroir réfléchissant MP<sub>2</sub> puis réfléchi au moyen du miroir réfléchissant MP<sub>3</sub> sur le détecteur de position DP<sub>3</sub>. Toutes déviations enregistrées sur ce détecteur sont converties en roulis à l'aide d'une simple relation trigonométrique.

Figure 16. Mesure du roulis  $\varepsilon_{zz}$ 

### 3.3 QUANTIFICATION DES SIGNAUX

Les deux sections suivantes permettent de mettre l'accent sur l'évaluation des positions horizontale ( $P_H$ ) et verticale ( $P_V$ ) du faisceau laser sur les détecteurs de position en utilisant les tensions provenant des détecteurs de position ainsi que le calcul des déviations linéaires et angulaires correspondants à ces positions.

### 3.3.1 Calcul de la position du faisceau

Le principe et la méthode de calcul de la position d'un rayon sur un photo-détecteur de type photodiode à effet latéral est présenté à la figure 17. La projection d'un faisceau laser sur la surface d'un détecteur de position provoque quatre tensions  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  et  $V_D$  dépendant étroitement de la position de ce dernier. Ces tensions déterminent les positions horizontale ( $P_H$ ) et verticale ( $P_V$ ) en utilisant les deux équations (16-17). Les unités de mesure des positions sont en  $\mu\text{m}$ .

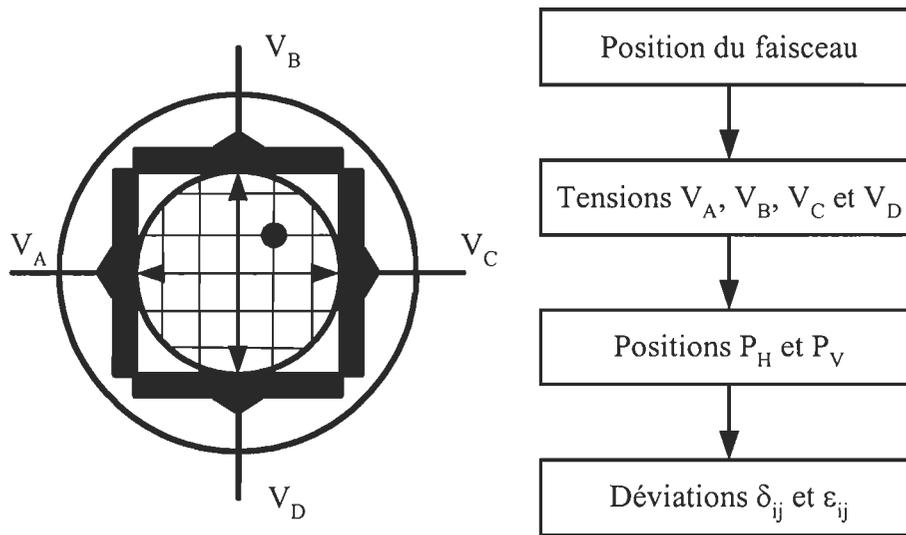


Figure 17. Lecture des signaux

$$P_H = \left( \frac{V_A - V_C}{V_A + V_C} \right) \quad (16-17)$$

$$P_V = \left( \frac{V_B - V_D}{V_B + V_D} \right)$$

### 3.3.2 Calcul des six composantes de l'erreur

Une fois les positions  $P_H$  et  $P_V$  sont calculées pour chaque détecteur, les composantes linéaires de l'erreur sont obtenues directement des lectures sur le détecteur de position  $DP_2$ .

Toute déviation dans le plan horizontal est ainsi vue comme une erreur de rectitude horizontale alors que toute déviation dans le plan verticale est considérée comme une erreur de rectitude verticale (18-19).

$$\begin{aligned}\delta_{zx} &= x_2 \\ \delta_{zy} &= y_2\end{aligned}\tag{18-19}$$

Les deux composantes angulaires  $\varepsilon_{zx}$  et  $\varepsilon_{zy}$  dépendent de la rotation autour des deux axes horizontal et vertical. Toute rotation de la cible par rapport à l'axe x et l'axe y sera traduite en lacet et en tangage en utilisant les deux relations trigonométriques 20 et 21.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{zx} &= \tan^{-1}\left(\frac{x_1}{L_{02} + z}\right) \\ \varepsilon_{zy} &= \tan^{-1}\left(\frac{y_1}{L_{02} + z}\right)\end{aligned}\tag{20-21}$$

L'erreur du roulis dépend de la rotation autour de l'axe z et de la rotation autour de l'axe y. L'angle de rotation autour de l'axe z, considéré comme l'axe de déplacement, est donnée par la relation trigonométrique 22.

$$\varepsilon_{zz} = \tan^{-1}\left(\frac{y_3}{l_0} - \frac{y_1}{L_{01} + z}\right)\tag{22}$$

### 3.4 DISCUSSION

Le déplacement selon un axe entraîne automatiquement des déviations sur les trois détecteurs de position  $DP_1$ ,  $DP_2$  et  $DP_3$ . Cependant, des erreurs secondaires sont attachées aux déviations sur les détecteurs de position. Ces erreurs systématiques sont provoquées principalement par la configuration globale du système de mesure ainsi que son alignement. Afin de remédier à cette situation, il est impératif de procéder à un traitement secondaire

afin de compenser cette influence en développant les algorithmes de correction appropriés permettant de diminuer les interactions entre les erreurs. Ces modèles doivent être développés dans la phase de validation du nouveau système et dans différentes configurations possibles afin de produire un modèle robuste et efficace.

L'utilisation du laser He-Ne constitue une solution à moindre coût et avec une bonne répétitivité. Les séparateurs de faisceau laser non-polarisants empêchent la polarisation du faisceau incident. Leur absorption proche de zéro permet, à ces séparateurs diélectriques, de séparer les faisceaux à 50 %. Ils sont fabriqués à partir d'un substrat de grande précision en BK7, ayant un facteur d'expansion thermique de l'ordre de  $7.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , permettant de minimiser la déformation du front d'onde. De plus, l'inclinaison du substrat permet d'éviter toutes rétro-réflexions possibles vers le laser. Les détecteurs de position sont constitués de photodiodes en silicium à un seul élément avec une électrode quadruple. Compatibles avec les rayons laser à basse puissance et avec d'autres faisceaux infrarouges, ils permettent d'obtenir des informations précises sur le positionnement linéaire du faisceau dans les deux directions horizontale et verticale.

# Chapitre 4

## Analyse des performances

### 4.1 INTRODUCTION

L'objectif de l'analyse des performances du système de mesure consiste à étudier la sensibilité de sa réponse face aux différentes sources d'erreurs qui risquent d'affecter les signaux provenant des détecteurs de position. La réduction de l'impact de ces effets perturbateurs sera le cœur de cette analyse dans le but d'établir les conditions les plus favorables au bon fonctionnement du système de mesure. Ce chapitre présente dans l'ordre, le montage expérimental, les essais préliminaires et une brève discussion des mécanismes d'amélioration de la stabilité.

### 4.2 MONTAGE EXPÉRIMENTAL

L'évaluation et la validation du système de mesure a nécessité la mise en place d'un programme de tests réalisés sur une machine-outil multiaxiale (MMT) installée dans un laboratoire de métrologie classé de type II selon les normes du BCN. Le choix de cette machine est dû principalement à son incertitude faible par rapport aux machines-outils à commande numérique conventionnelle. L'incertitude relative à une MMT dépend de la

distance parcourue par le palpeur pendant la mesure. Puisque la dimension  $L$ , représentant la largeur et la hauteur de la surface de projection du détecteur de position, ne dépasse pas 10 mm, la précision totale de la machine peut être évaluée en utilisant la formule suivante  $(1.5+L/2000) \approx 1.5 \mu\text{m}$ . L'étude de la variation des positions  $P_H$  et  $P_V$  du faisceau sur les détecteurs de position implique l'analyse attentive du comportement des quatre signaux  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  et  $V_D$ . Ces tensions sont étroitement reliées aux positions par la relation établie dans le chapitre précédent. Cependant, en fonctionnement normal, les positions  $P_H$  et  $P_V$  obtenues présentent des variations non négligeables aussi bien en terme d'intensité qu'en terme de forme. Dans ces conditions, il est nécessaire d'analyser attentivement le comportement des signaux et d'identifier les sources de ces variations et leurs effets sur la procédure d'extraction des erreurs. Généralement, pour des systèmes de mesure à base de laser, les variations de température ( $\Delta T$ ) et d'humidité relative ( $\Delta H$ ) constituent les deux paramètres les plus critiques. Pour cette raison, il est nécessaire d'établir la relation entre la variation des quatre tensions ( $V_{0i}$ ) et les variations des paramètres  $\Delta T$  et  $\Delta H$ . La variation de chaque tension provenant des détecteurs de position peut être exprimée par la relation suivante :

$$V_{0i} = f(\Delta T, \Delta H), i=A, B, C \text{ et } D. \quad (23)$$

Une analyse exhaustive sera réalisée pour déterminer la nature de ces relations. Les données nécessaires à cette analyse ont été générées à l'aide du montage expérimental illustré à la figure 18. Ce montage comprend principalement deux parties. La première est montée sur le mécanisme de déplacement de la MMT et la deuxième, considérée comme référence, est placée sur la table de la machine. Les signaux provenant des détecteurs de

position sont protégés contre le bruit et contre tous les effets électromagnétiques. Les quatre signaux  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  et  $V_D$  sont envoyés vers un système d'acquisition et de contrôle de 16 entrées-sorties permettant une fréquence d'échantillonnage par multiplexage de 2 MHz. La carte d'acquisition comprend un circuit d'amplification et des convertisseurs analogiques-numériques. Un programme utilisant l'interface graphique du logiciel LabView a été utilisé pour gérer les données et traiter les 12 signaux provenant des trois détecteurs optiques et les deux signaux supplémentaires pour la mesure de la température et de l'humidité relative. Les données sont par la suite converties en déviations linéaires et en déviations angulaires à l'aide des relations déterminées dans le chapitre précédent.

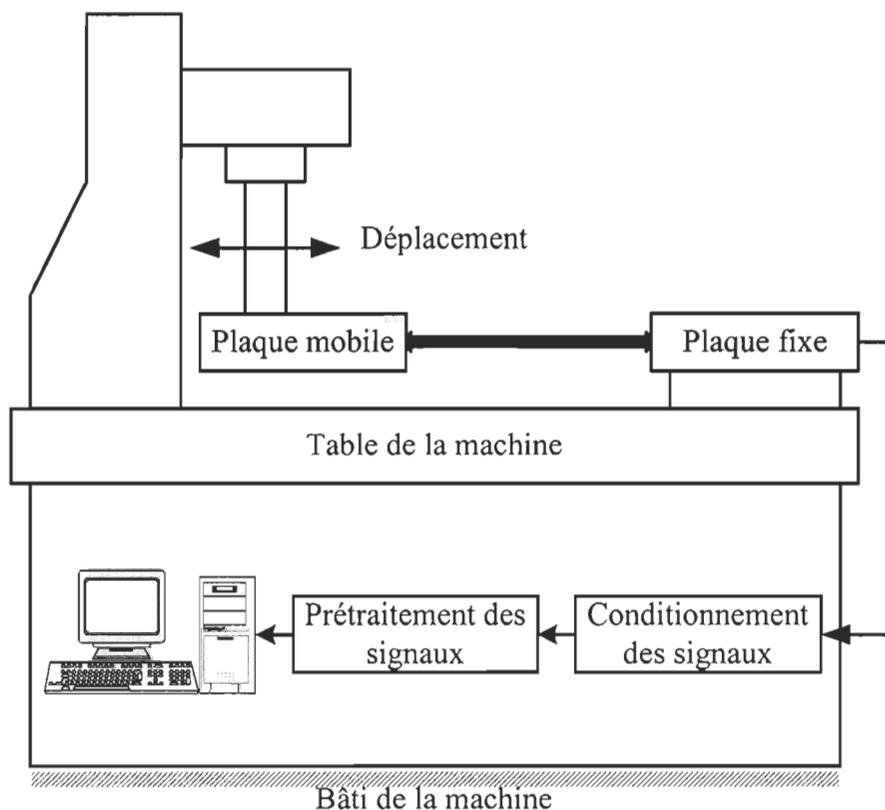


Figure 18. Montage expérimental

Dans le but d'avoir une première estimation de la précision totale du système de mesure, des essais préliminaires ont été effectués sur la MMT.

### **4.3 ESSAIS PRÉLIMINAIRES**

Ces tests préliminaires ont été réalisés pour établir les conditions initiales d'utilisation du système de mesure afin de maximiser sa précision et augmenter sa stabilité. Dans ce type d'application, le contrôle des conditions ambiantes susceptibles d'influencer directement ou indirectement le faisceau laser est primordial. Pour mesurer le degré d'influence des conditions opératoires, plusieurs tests ont été planifiés de manière à isoler les effets associés à chaque paramètre. La figure 19 montre l'évolution des deux positions horizontale et verticale du faisceau laser en fonction du temps sur une période moyenne de 6 heures. À partir de ce graphique, une dérive thermique au début de la période d'échauffement est observée avec des offsets  $\Delta_{pH} = 38 \mu\text{m}$  et  $\Delta_{pV} = 65 \mu\text{m}$ . Ces variations sont principalement dues à la durée de l'échauffement du laser. Dans les conditions normales d'utilisation, il est nécessaire de prévoir une période d'échauffement de la source laser de 60 minutes afin que le faisceau laser atteigne son régime permanent.

Dans un premier temps, l'observation du système a permis de :

- évaluer l'impact de l'environnement;
- compenser les effets de l'environnement;
- calibrer les détecteurs de position.

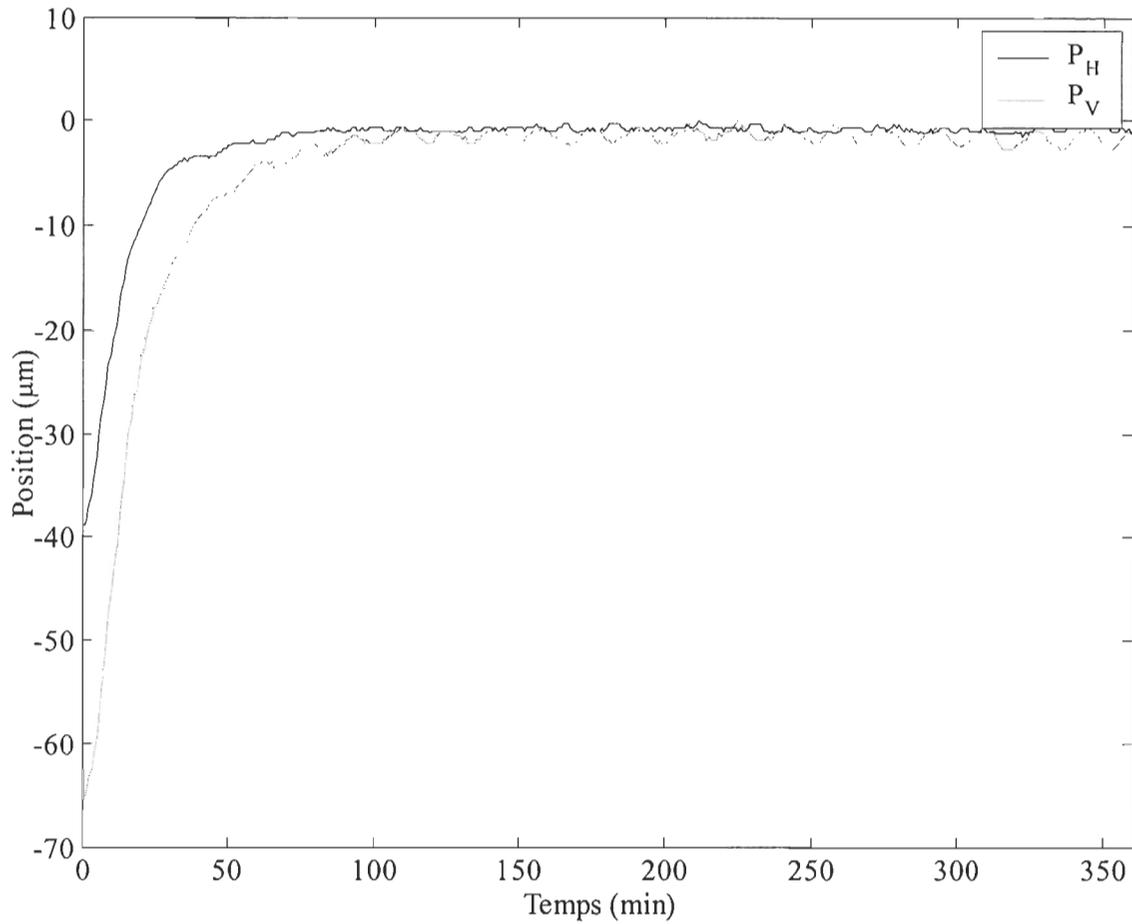


Figure 19. Période d'échauffement du laser

#### 4.3.1 *Évaluation de l'impact de l'environnement*

Cette section présente l'analyse des variations de la position sous l'influence des conditions de fonctionnement. Les tests réalisés ont permis de quantifier l'influence des effets des conditions environnementales sur la globalité du système de mesure. Ces tests ont permis également de montrer clairement que les conditions environnementales (lumière, température, humidité, vibration, courant d'air...) ont un impact négatif sur la qualité de la réponse du système de mesure. Pour remédier à cette situation et dans le but d'améliorer la stabilité du faisceau, une analyse détaillée et exhaustive du comportement du faisceau a été

réalisée. Une batterie d'essai a été appliquée sur chaque détecteur de position séparément. Les sections suivantes présentent les tests associés à chaque paramètre. Dans chaque cas, une analyse aborde les différentes sources d'influence, leurs actions ainsi que les mécanismes de leurs interactions afin de dégager les conditions permettant de réduire leurs effets. L'évaluation de l'impact de l'environnement comprend l'analyse de l'influence de la lumière, l'influence de la température, l'influence de l'humidité relative et de l'influence des effets dynamiques.

#### 4.3.1.1 Influence de la lumière

La présence de la lumière influence de façon directe la précision et la puissance des quatre signaux provenant des détecteurs de position. Pour la position horizontale ( $P_H$ ), le rapport entre la variation du signal en présence de la lumière  $\sigma_{PHPL}$  et la variation du signal en

absence de la lumière  $\sigma_{PHAL}$   $\left( \frac{\sigma_{PHPL}}{\sigma_{PHAL}} \right)$  est de l'ordre de 10. Au niveau de la position verticale

( $P_V$ ), le rapport entre la variation du signal en présence de la lumière  $\sigma_{PVPL}$  et la variation

du signal en absence de la lumière  $\sigma_{PVAL}$   $\left( \frac{\sigma_{PVPL}}{\sigma_{PVAL}} \right)$  est de l'ordre de 7. Ces rapports

constituent un indice tangible et pertinent pour quantifier l'influence de la lumière. La figure 20 montre la variation des signaux due à l'influence de la lumière sur la stabilité du laser et sur sa précision. Il est possible que la lumière ambiante influence la longueur d'onde du faisceau laser. Ces variations sont dues aux effets de la lumière ambiante sur les caractéristiques du faisceau laser. De plus, les détecteurs de position, constitués de

photodiodes, sont sensibles à la luminosité venant perturber l'interprétation de la position du faisceau.

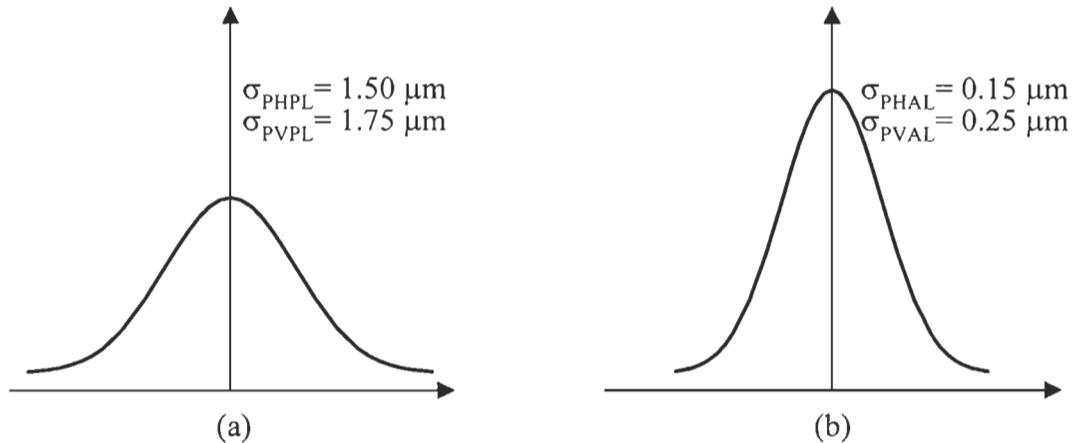


Figure 20. Influence de la lumière sur la position : (a) Présence de lumière et (b) Absence de lumière

#### 4.3.1.2 Influence de la température

Les signaux provenant du détecteur de position sont également influencés par la température. Ces effets thermiques peuvent provenir de plusieurs sources potentielles. Même s'il est impossible d'éliminer totalement leurs impacts sur le système de mesure, il est cependant possible de les réduire. À cet effet, une analyse des variations des signaux en fonction de la température dans le volume de travail de la machine est nécessaire. Un montage expérimental spécifique permettant de mettre en place une sonde de température au voisinage du système de mesure a été réalisé dans ce but. La sonde utilisée possède une bonne précision et une stabilité thermique de l'ordre de 20 ppm. La figure 21 présente l'évolution des quatre tensions  $V_{0A}$ ,  $V_{0B}$ ,  $V_{0C}$  et  $V_{0D}$  représentant les variations des quatre signaux ( $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  et  $V_D$ ) ainsi que l'évolution de la température en fonction du temps.

Dans ce graphique, les quatre tensions présentent le même taux de variation de façon inverse par rapport au signal de la température. Une variation du signal de température de l'ordre de 25 mV (0.2 °C) provoque en moyenne une variation moyenne des quatre tensions d'environ 400  $\mu$ V. La période de variation des quatre tensions est égale à celle de la température; ce qui correspond à 30 minutes environ. Cette variation coïncide avec le pas du système de régulation de la température ambiante dans le laboratoire de métrologie.

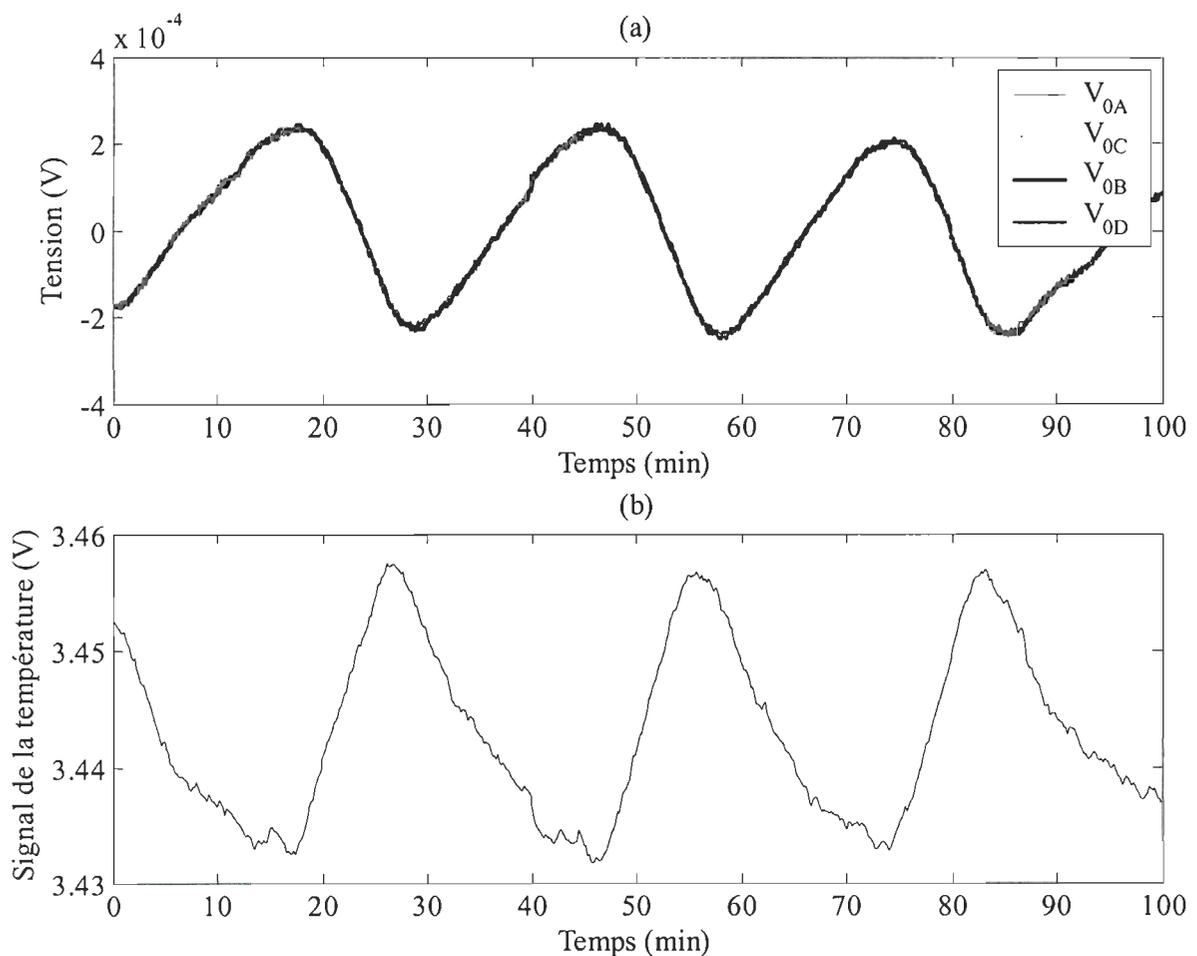


Figure 21. Évolution des quatre tensions et du signal de température en fonction du temps :

(a) Tensions en fonction du temps et (b) Température en fonction du temps

#### **4.3.1.3 Influence de l'humidité relative**

Les signaux de positions sont également influencés par l'humidité relative. Contrairement aux effets de la température, l'humidité affecte essentiellement le comportement du faisceau laser et elle n'influence, en aucun cas, l'aspect mécanique du système de mesure. Toutefois, il est difficile de faire une corrélation directe entre les quatre signaux  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  et  $V_D$  provenant du détecteur et le niveau de l'humidité relative. La mesure de l'humidité relative a exigé la mise en place d'un capteur analogique d'humidité et elle a démontré que l'influence de l'humidité relative sur la mesure des positions est négligeable dans un laboratoire dont les conditions environnementales sont contrôlées.

#### **4.3.1.4 Influence des effets dynamiques**

Au cours de la phase d'analyse des performances, le système de mesure subit des perturbations de nature vibratoires dues aux conditions de mise en mouvement (Vitesse d'approche, Accélération, etc.). Afin d'analyser l'influence de ces effets sur le système de mesure, le bâti de la machine a été excité avec une source de vibration connue et contrôlée. Les mesures prises ont démontré que leurs effets sur les signaux sont négligeables et que le système de mesure est robuste face aux vibrations de petite et de moyenne amplitude. Cependant, l'exploitation réelle du système de mesure dans des conditions de fonctionnement industrielle nécessite une étude attentive des effets dynamiques lors d'une éventuelle étape d'implantation du système de mesure sur des machines-outils multiaxiales (Vitesse de retrait et d'approche, conditions de coupe, rotation de la broche, ...).

### 4.3.2 Correction des effets environnementaux

Dans le but de minimiser les effets des conditions environnementales sur les lectures, des modèles de compensation ont été développés afin d'estimer les deux positions horizontale et verticale ainsi que les quatre tensions  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  et  $V_D$  en fonction de la température ambiante et de l'humidité relative à une position fixe. Dans ce cadre, deux approches de modélisation ont été proposées et comparées, soit la régression linéaire multiple et la modélisation par réseaux neuroniques.

#### 4.3.2.1 Régression linéaire multiple

Dans ce cas, deux approches ont été proposées, soient la modélisation des tensions et la modélisation des positions.

- **Modélisation par tension :**

La variation de chaque tension provenant du détecteur de position est estimée en fonction de la température  $T$  et de l'humidité relative  $H$  à l'aide de l'équation (24) :

$$V_{0i} = a_0 + a_1.T + a_2.H, \quad i=A, B, C \text{ et } D. \quad (24)$$

Les coefficients  $a_0$ ,  $a_1$  et  $a_2$  représentent les coefficients de régression. Ils ont été déterminés par une régression multiple linéaire utilisant la méthode des moindres carrés.

Les deux positions horizontale et verticale relatives sont obtenues en utilisant les deux équations (25) et (26).  $K$  est un facteur utilisé pour déterminer les positions réelles.

$$P_H = K \cdot \left( \frac{V_A - V_C}{V_A + V_C} \right) \quad (25)$$

$$P_V = K \cdot \left( \frac{V_B - V_D}{V_B + V_D} \right) \quad (26)$$

La figure 22 montre les résultats de la modélisation des deux tensions  $V_{0A}$  et  $V_{0C}$ , des erreurs résiduelles  $\Delta V_{0A}$  et  $\Delta V_{0C}$  entre les tensions réelles ( $T_R$ ) et les tensions modélisées ( $T_M$ ), la position horizontale ainsi que l'erreur résiduelle représentant la différence entre la position réelle ( $P_R$ ) et la position estimée ( $P_E$ ). Les deux erreurs résiduelles  $\Delta V_{0A}$  et  $\Delta V_{0C}$  présentent une variation identique et elles ne dépassent pas  $200 \mu\text{V}$ . L'erreur résiduelle  $\Delta P_H$  a une moyenne de l'ordre de  $0.000877 \mu\text{m}$  variation ( $\pm 3\sigma$ ) de l'ordre de  $1.3525 \mu\text{m}$ .

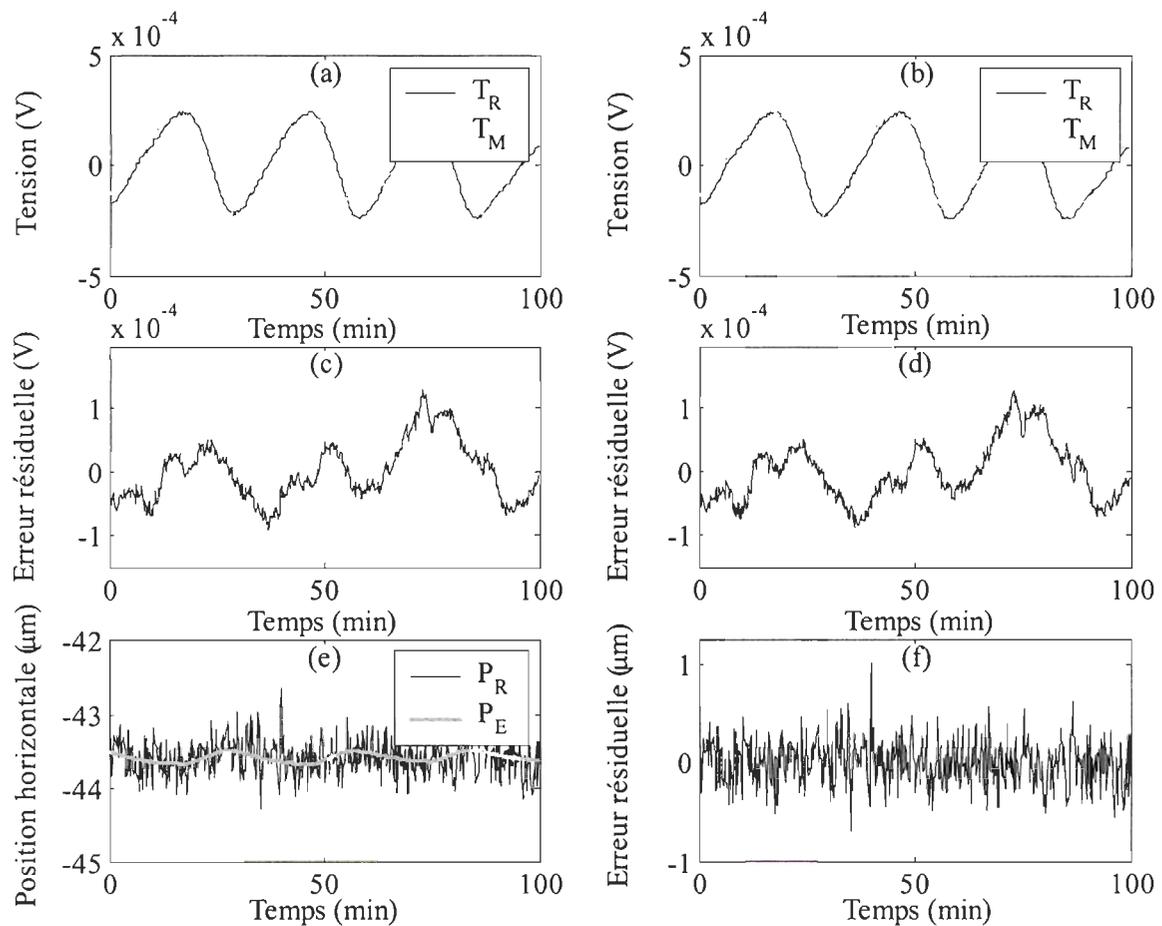


Figure 22. Estimation de la position horizontale par tension : (a) Tension  $V_{0A}$ , (b) Tension  $V_{0C}$ , (c) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0A}$ ), (d) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0C}$ ), (e) Position  $P_H$  et (f) Erreur résiduelle ( $\Delta P_H$ ).

La figure 23 montre les résultats de la modélisation des deux tensions  $V_{0B}$  et  $V_{0D}$ , des erreurs résiduelles  $\Delta V_{0B}$  et  $\Delta V_{0D}$ , l'estimation de la position  $P_V$  ainsi que l'erreur résiduelle  $\Delta P_V$ . Les deux erreurs résiduelles ont la même tendance de variation et elles ne dépassent pas  $200 \mu V$ . L'erreur résiduelle  $\Delta P_V$  a une moyenne de l'ordre de  $-0,00325 \mu m$  et une variation ( $\pm 3\sigma$ ) de l'ordre de  $1.091 \mu m$ .

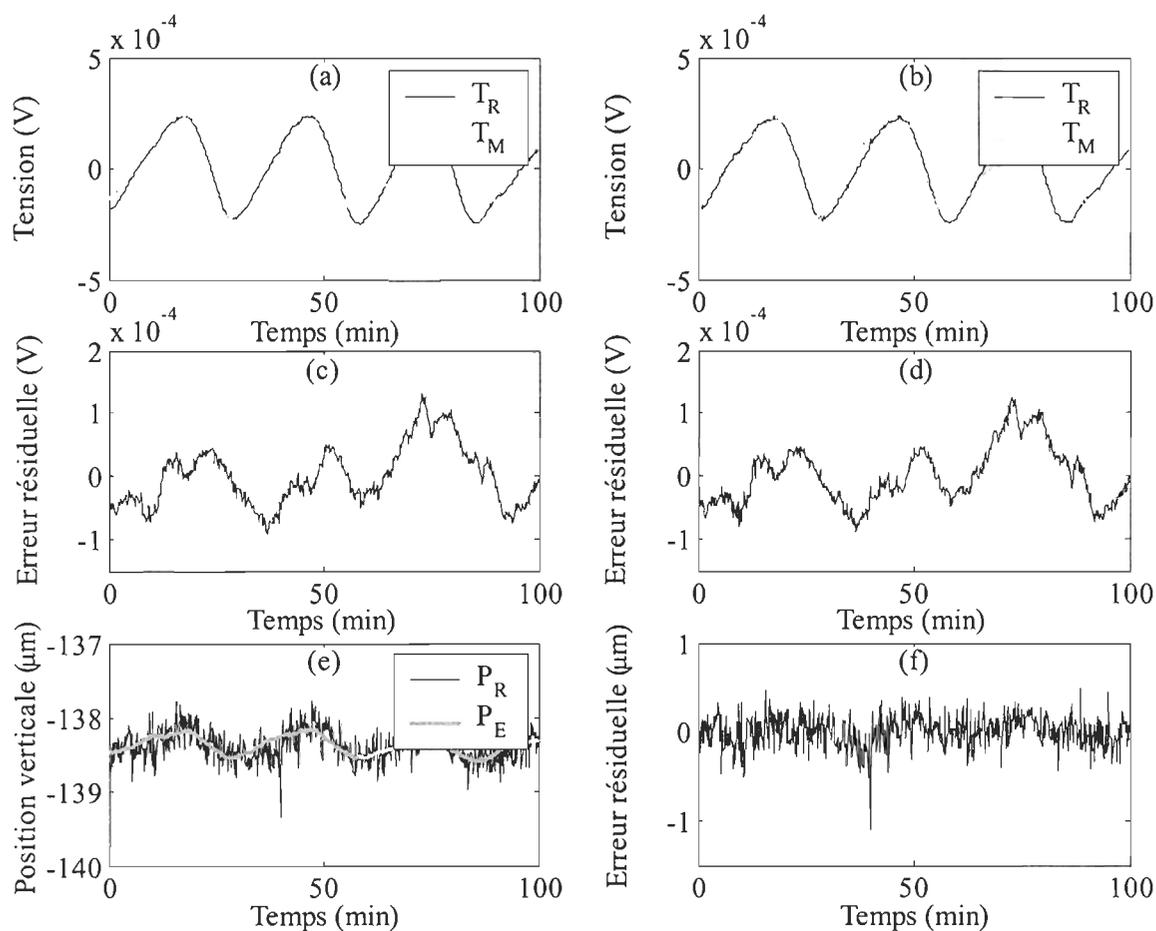


Figure 23. Estimation de la position verticale par tension : (a) Tension  $V_{0B}$ , (b) Tension  $V_{0D}$ , (c) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0B}$ ), (d) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0D}$ ), (e) Position  $P_V$  et (f) Erreur résiduelle ( $\Delta P_V$ ).

▪ **Modélisation par position**

Dans ce modèle, chaque position est estimée en fonction de la température  $T$  et de l'humidité relative  $H$  à l'aide de l'équation (27) :

$$P_i = a_3 + a_4.T + a_5.H, \quad i=H \text{ et } V. \quad (27)$$

Les coefficients  $a_3$ ,  $a_4$  et  $a_5$  représentent les coefficients de régression. La figure 24 et 25 montrent le résultat de la modélisation directe des positions  $P_H$  et  $P_V$  ainsi que les erreurs résiduelles  $\Delta P_H$  et  $\Delta P_V$ .

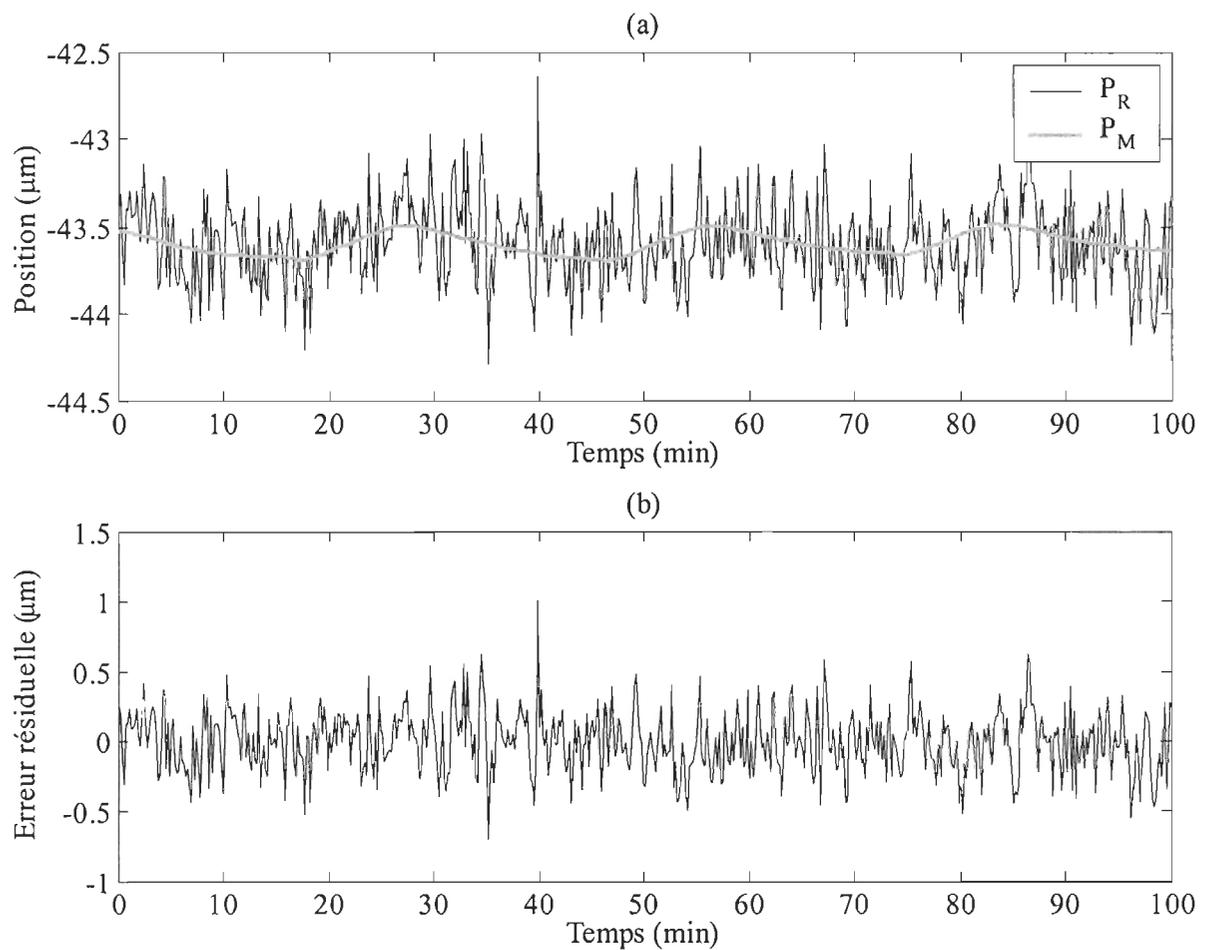


Figure 24. Modélisation de la position horizontale : (a) Position  $P_H$  et (b) Erreur  $\Delta P_H$

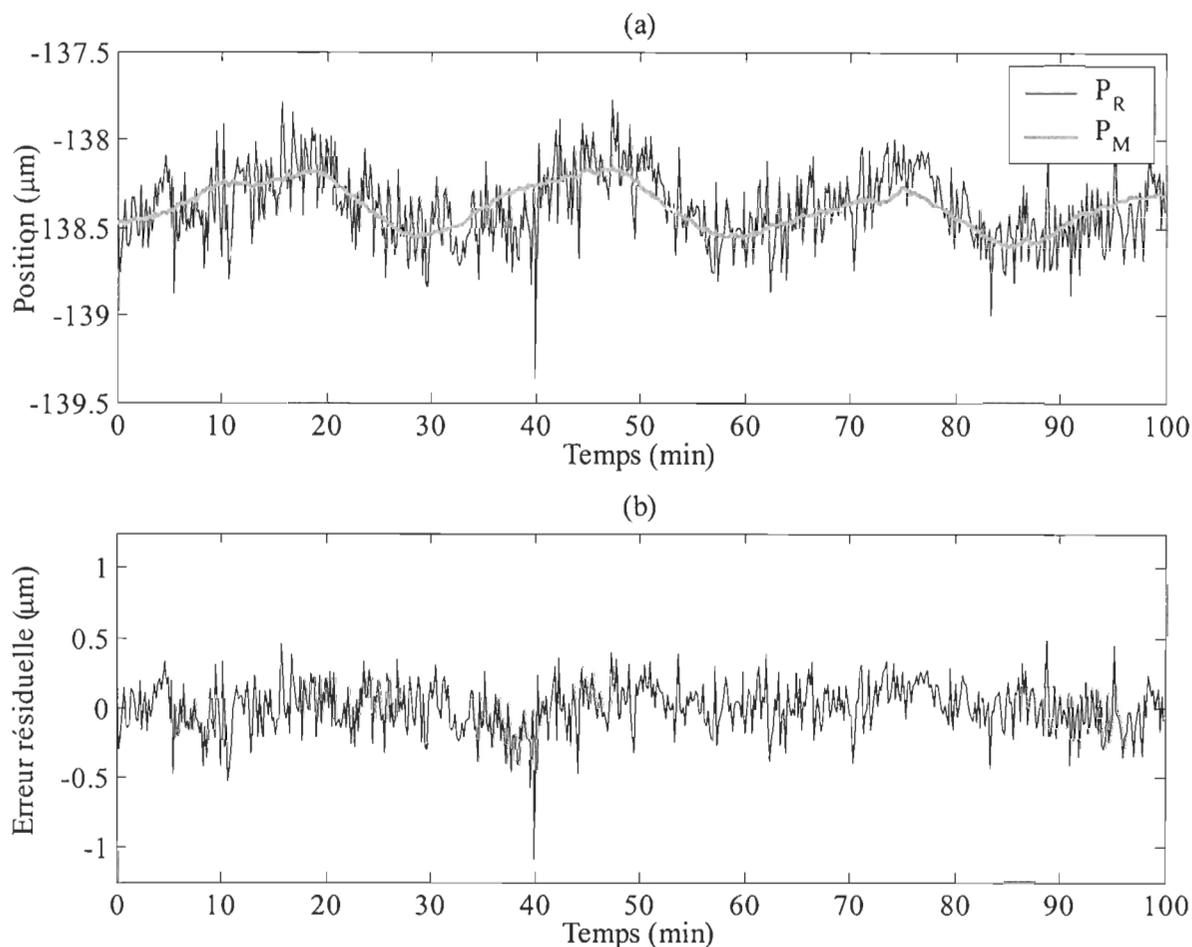


Figure 25. Modélisation de la position verticale : (a) Position  $P_V$  et (b) Erreur  $\Delta P_V$

À partir des deux graphiques, l'erreur résiduelle présente une moyenne de l'ordre de  $0.050 \mu\text{m}$  pour les deux positions  $P_H$  et  $P_V$ . Quant à la variation ( $\pm 3\sigma$ ), elle est de l'ordre de  $0.477 \mu\text{m}$  dans la position horizontale et de l'ordre de  $0.388$  dans la position verticale.

#### 4.3.2.2 Réseaux neuroniques

##### ▪ Introduction

Un réseau neuronal est une architecture logicielle comprenant des entités interconnectées. Les neurones sont représentés par des couches multiples d'éléments de

traitement simple. Chaque neurone est lié à un certain nombre de ses voisins avec les coefficients variables de connectivité qui représentent les poids de ces connexions. L'apprentissage du réseau est accompli en ajustant ces poids afin de produire le réseau global des résultats appropriés. Les réseaux neuroniques artificiels sont des structures capables d'identifier le comportement des procédés complexes et ils sont souvent utilisés comme filtre spécialisé, pour la reconnaissance des formes, pour modéliser un processus industriel complexe ou comme contrôleur neuronique. Un réseau neuronique multicouche est représenté à la figure 26. Chaque neurone du réseau est représenté par une fonction sigmoïde sous la forme suivante :

$$O_j = \left( \frac{1}{1 + \exp(-(I_j + \theta))} \right), \text{ où : } I_j = \sum_{i=1}^i W_{ij} \cdot O_i \quad (28)$$

Les sorties du neurone courant et celle du neurone de la couche précédente sont représentées respectivement par  $O_j$  et  $O_i$ . Souvent, tous les neurones d'une couche donnée sont complètement connectés à ceux de la couche adjacente. Les valeurs d'entrée sont introduites à travers le réseau pour générer un estimé du modèle à la sortie. Le réglage des paramètres des réseaux est primordial. Les poids  $W_{ij}$  et les écarts  $\theta_j$  sont obtenus en utilisant l'algorithme de rétro-propagation de l'erreur. Cette procédure consiste à minimiser la somme quadratique des erreurs SSE entre la sortie estimée par le réseau  $S_{ei}$  et la sortie désirée  $S_{di}$  à travers les  $n$  points d'entraînement. L'évaluation des paramètres du modèle neuronique est effectuée à travers tous les points d'entraînement pour toutes les sorties, comme le présente l'équation suivante :

$$E = \frac{1}{2} \sum_i^{n_p} \sum_j^{n_s} [S_{ei} - S_{di}]^2 \quad (29)$$

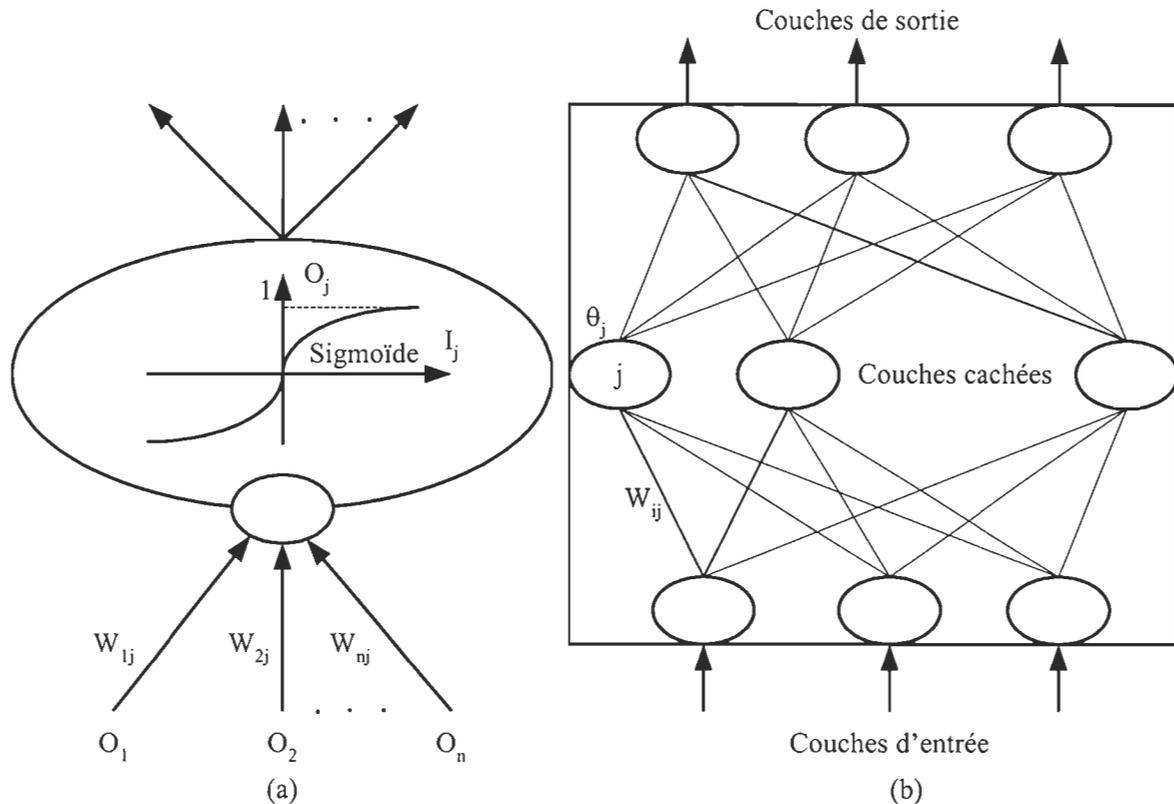


Figure 26. Structure d'un réseau neuronique multicouche : (a) Fonctionnement d'un neurone et (b) Perceptron multicouche

La capacité de prédiction ou d'estimation d'un réseau neuronique est conditionnée par son architecture. Le nombre d'entrées au réseau, le nombre de ses sorties ainsi que le nombre de couches cachées. Le nombre de neurones dans chacune des couches détermine les limites du réseau en terme de complexité des formes à modéliser.

Dans cette analyse, un perceptron multicouche est utilisé pour modéliser les variations des tensions et les positions en fonction de la température et de l'humidité relative. À cet effet,

deux approches ont été testées et comparées, soit la modélisation par tension et la modélisation par position.

▪ **Modélisation par tension :**

Quatre modèles ont été développés afin d'estimer les quatre tensions en fonction de la température et de l'humidité relative. La position est ensuite calculée à partir des deux tensions estimées. Les figures 27 et 28 montrent un exemple de représentation des quatre tensions  $V_{0A}$ ,  $V_{0B}$ ,  $V_{0C}$  et  $V_{0D}$  modélisées et réelles, des erreurs résiduelles représentant la différence entre les tensions réelles ( $T_R$ ) et les tensions modélisées ( $T_M$ ), de l'estimation des positions horizontale et verticale ainsi que l'erreur résiduelle représentant la différence entre la position horizontale réelle ( $P_R$ ) et la position horizontale estimée ( $P_E$ ). À partir de ces deux graphiques, il est clair que les courbes représentant les erreurs résiduelles  $\Delta V_{0A}$ ,  $\Delta V_{0B}$ ,  $\Delta V_{0C}$  et  $\Delta V_{0D}$  ont la même tendance de variation et leurs valeurs maximales sont évaluées à environ 200  $\mu V$ . On estime également, que l'erreur résiduelle présente une moyenne de l'ordre de 0.0037  $\mu m$  pour les deux positions  $P_H$  et  $P_V$ . Quant à la variation ( $\pm 3\sigma$ ), elle est de l'ordre de 1.357  $\mu m$  dans la position horizontale et de l'ordre de 1.538 dans la position verticale.

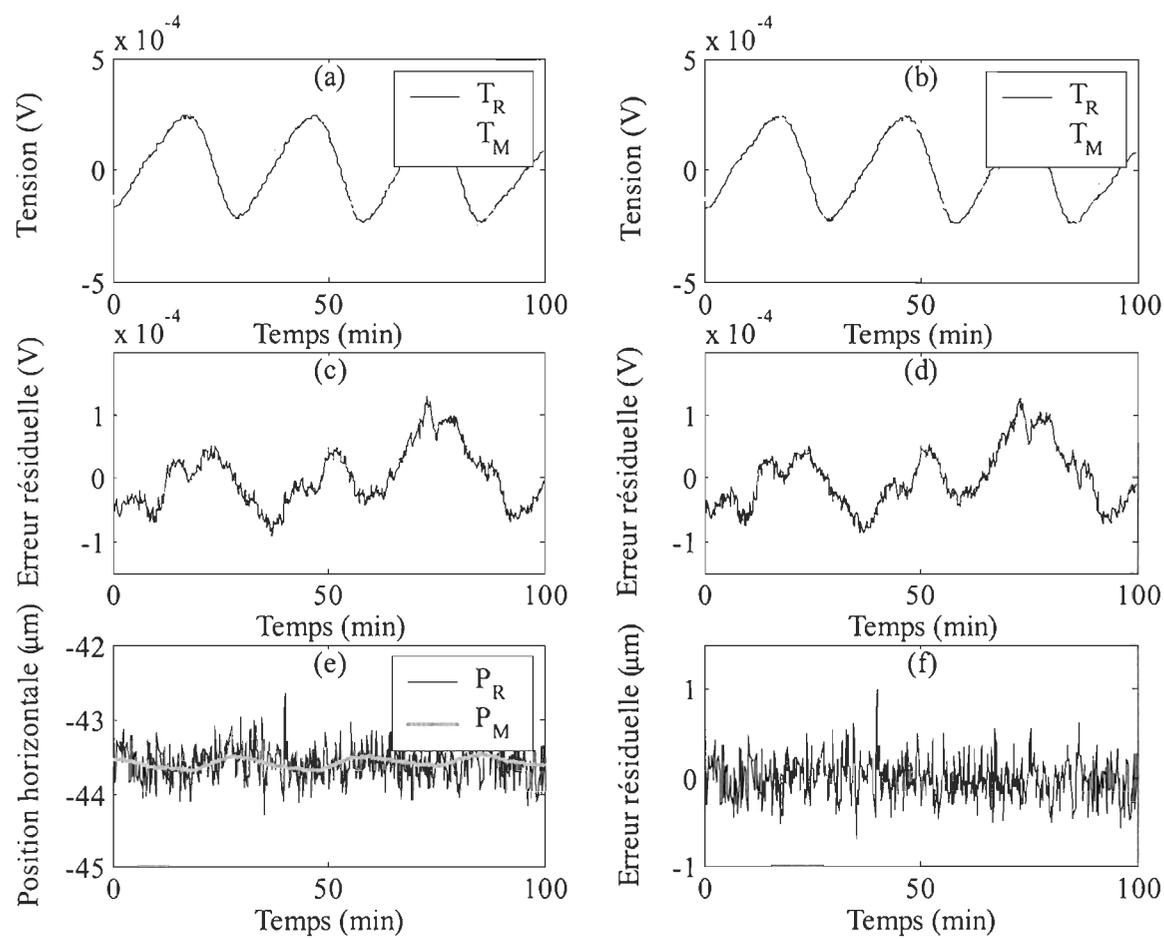


Figure 27. Estimation de la position horizontale par tension : (a) Tension  $V_{0A}$ , (b) Tension  $V_{0C}$ , (c) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0A}$ ), (d) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{0C}$ ), (e) Position  $P_H$  et (f) Erreur résiduelle ( $\Delta P_H$ ).

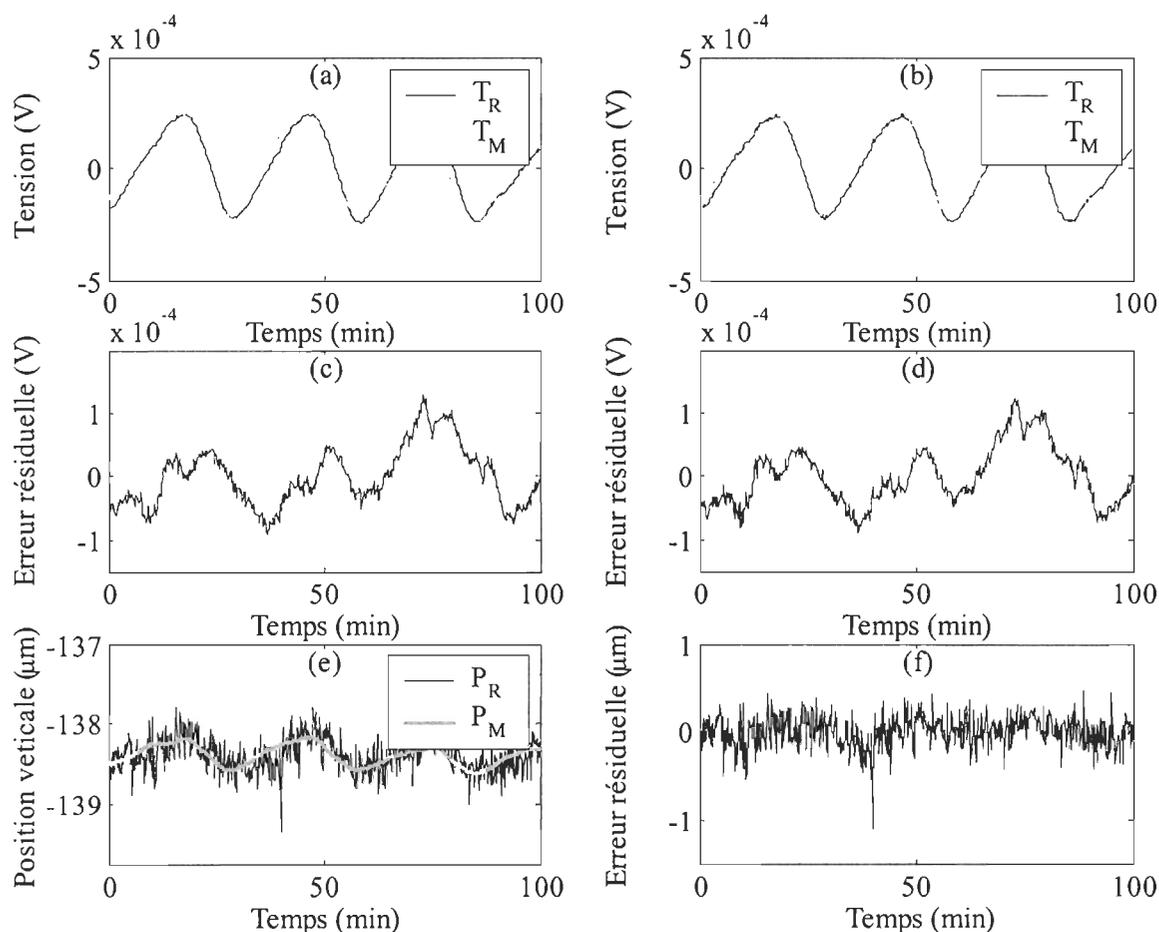


Figure 28. Estimation de la position verticale par tension : (a) Tension  $V_{OB}$ , (b) Tension  $V_{OD}$ , (c) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{OB}$ ), (d) Erreur résiduelle ( $\Delta V_{OD}$ ), (e) Position  $P_V$  et (f) Erreur résiduelle ( $\Delta P_V$ ).

▪ **Modélisation par position :**

Dans cette section, il est question d'estimer directement les deux positions horizontale et verticale en fonction de la température et de l'humidité relative. Les résultats obtenus à l'aide de ce modèle sont représentés aux figures 29 et 30. La courbe de la position estimée cherche à reproduire l'allure de la courbe de la position réelle. Les réseaux neuronniques s'avèrent des modèles robustes pour cette application. L'erreur résiduelle démontre que

l'erreur systématique dû au système de mesure est nulle pour les deux positions  $P_H$  et  $P_V$ . Quant à la variation ( $\pm 3\sigma$ ), elle est de l'ordre de  $1.317 \mu\text{m}$  dans la position horizontale et de l'ordre de  $1.042$  dans la position verticale. Cette variation est contenue dans une zone distante de  $1 \mu\text{m}$  pour les deux positions  $P_H$  et  $P_V$ .

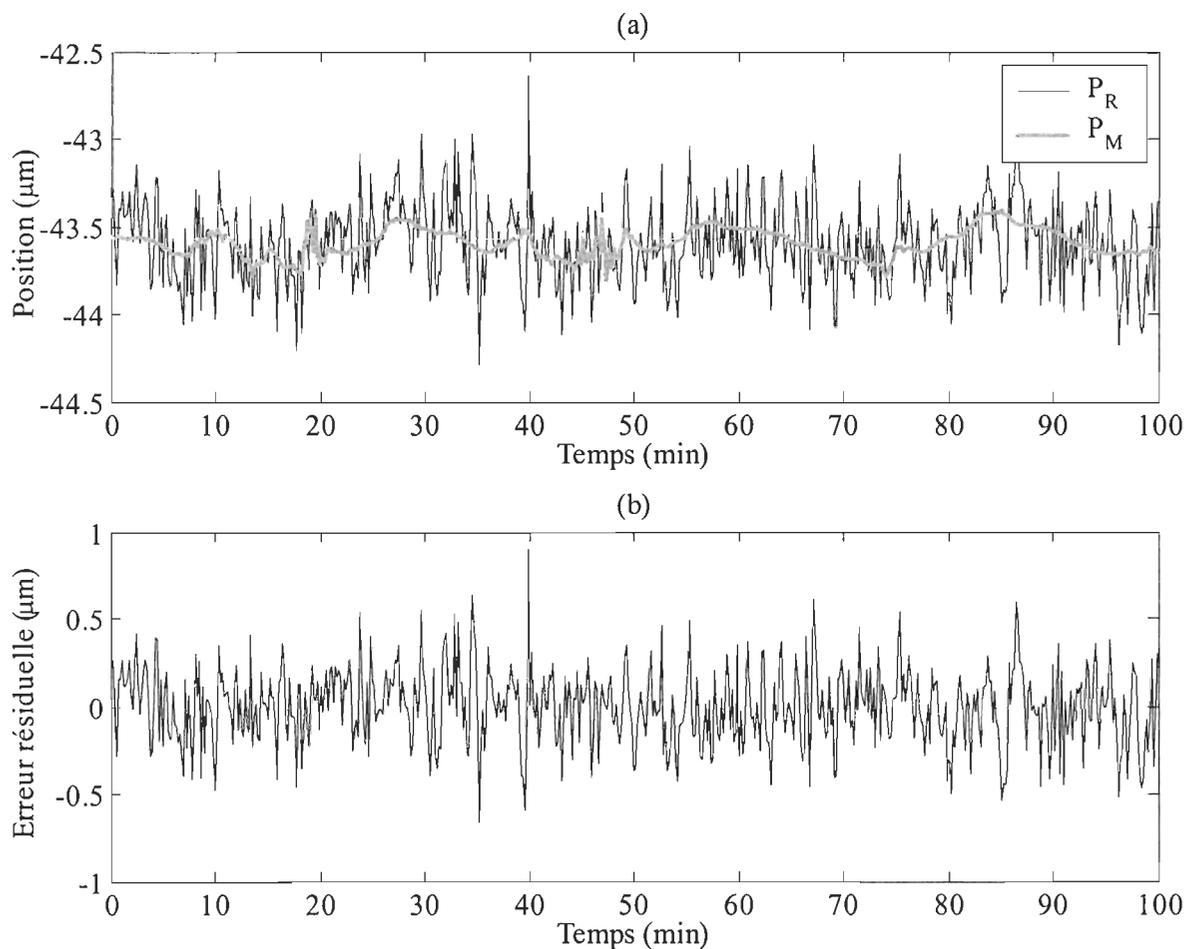


Figure 29. Modélisation de la position verticale : (a) Position  $P_H$  et (b) Erreur  $\Delta P_H$

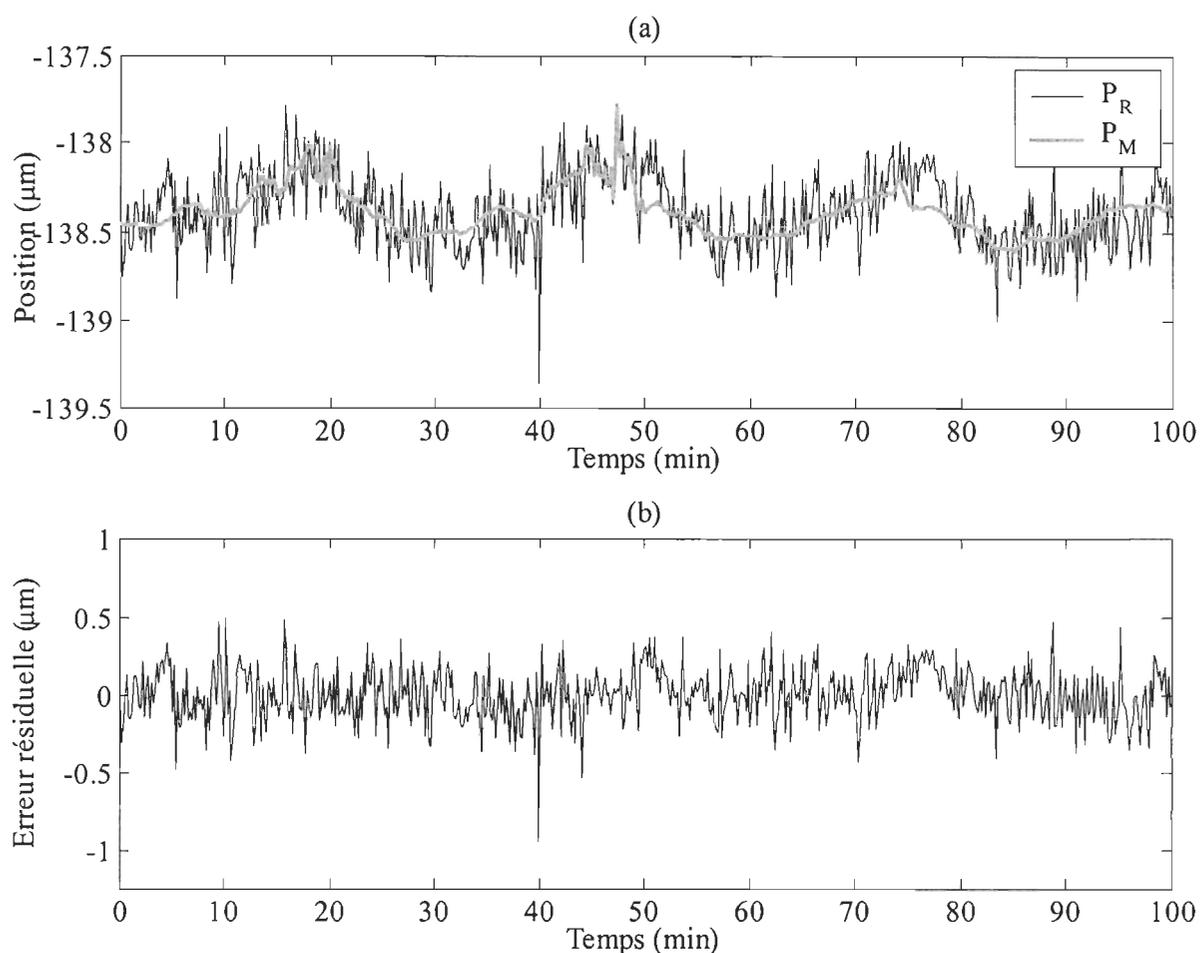


Figure 30. Modélisation de la position verticale : (a) Position  $P_V$  et (b) Erreur  $\Delta P_V$

#### 4.3.2.3 Synthèse des résultats

Deux alternatives ont été utilisées pour établir les modèles nécessaires à l'estimation directe ou indirecte de l'influence des conditions environnementales. Les résultats obtenus viennent confirmer la concordance entre ces deux approches. La modélisation par tension présente une variance inférieure à celle de la modélisation par position. Par contre, la modélisation par position possède une erreur moyenne quadratique (MSE) inférieure à celle de la modélisation par tension. Le tableau 1 présente la comparaison entre les deux alternatives analysées, soit la régression linéaire multiple et les réseaux neuroniques. La

régression linéaire est préférable pour la détermination de la position verticale en optant pour une modélisation par tension. Cependant, en utilisant le critère de l'erreur moyenne quadratique, les réseaux neuroniques présentent une excellente option pour la modélisation directe des deux positions.

Tableau 1. Comparaison entre la régression linéaire et les réseaux neuroniques

			Régression linéaire	Réseau neuronique
<b>Tension</b>	<b>Variance (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>P<sub>H</sub></b>	0.354	0.340
		<b>P<sub>V</sub></b>	0.697	0.747
	<b>MSE (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>P<sub>H</sub></b>	30.438	30.687
		<b>P<sub>V</sub></b>	19.813	20.014
<b>Position</b>	<b>Variance (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>P<sub>H</sub></b>	0.386	0.471
		<b>P<sub>V</sub></b>	0.742	0.770
	<b>MSE (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>P<sub>H</sub></b>	30.414	28.884
		<b>P<sub>V</sub></b>	19.798	18.092

#### 4.3.3 Calibration des détecteurs de position

La régression linéaire multiple et les réseaux neuroniques s'avèrent des modèles efficaces pour la compensation des effets de la température et de l'humidité relative. L'intégration de ces modèles dans la compensation est facile et simple à implanter. Cependant, le modèle ne peut être généralisé pour toutes les positions de la surface du détecteur de position à cause de la non linéarité due à la forme géométrique du détecteur de position.

Pour palier à ces limitations, il est nécessaire de procéder à la calibration du détecteur de position en développant un algorithme d'estimation des positions horizontale et verticale

tout en corrigeant la non-linéarité due à la forme concave de la surface des détecteurs de position. Cet algorithme doit tenir compte de la position du faisceau sur la surface de projection du détecteur de position tout en combinant les facteurs environnementaux. Pour avoir une première estimation de la résolution des lectures, des tests de calibration ont été réalisés. Durant ces tests, la plaque mobile est montée sur l'élément de déplacement de la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) vis-à-vis la plaque fixe de manière à ramener le faisceau laser au centre du détecteur de position. Cette position constitue alors la position de référence pour la calibration du détecteur de position. Un balayage de toute la surface du détecteur de position est effectué afin de générer les données nécessaires pour la modélisation. Le patron de prise de données est présenté à la figure 31.

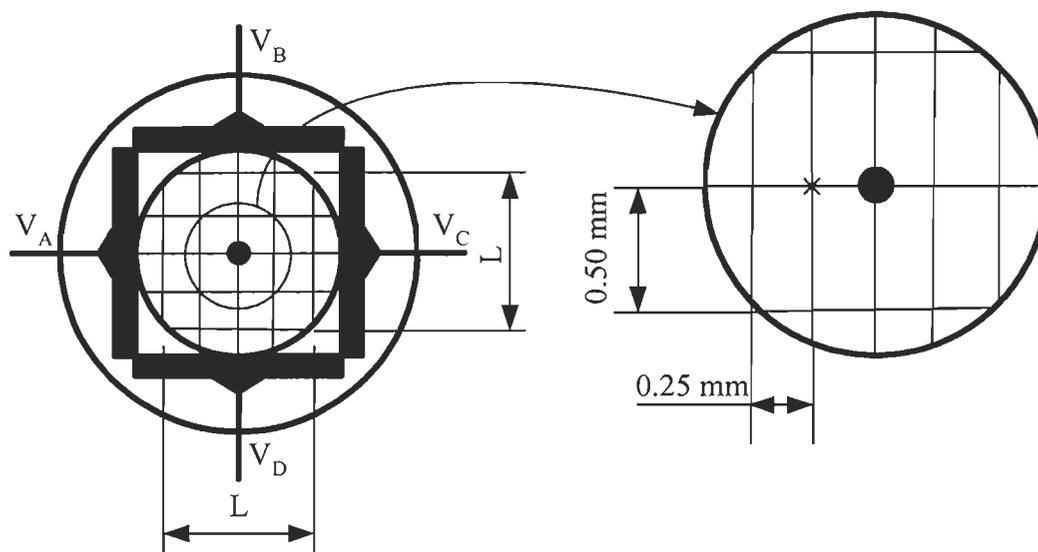


Figure 31. Patron de données

Les réseaux neuroniques présentent une solution intéressante. Les positions  $P_H$  et  $P_V$  du faisceau laser sur le détecteur sont estimées en fonction des tensions  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  et  $V_D$ . Le schéma bloc du compensateur est présenté à la figure 32. Il est composé d'un modèle

neuronique représentant le comportement des positions en fonction des tensions et de l'influence de la température ambiante et de l'humidité relative et d'un contrôleur neuronique capable d'apporter les corrections appropriées pour compenser l'effet des conditions environnementales.

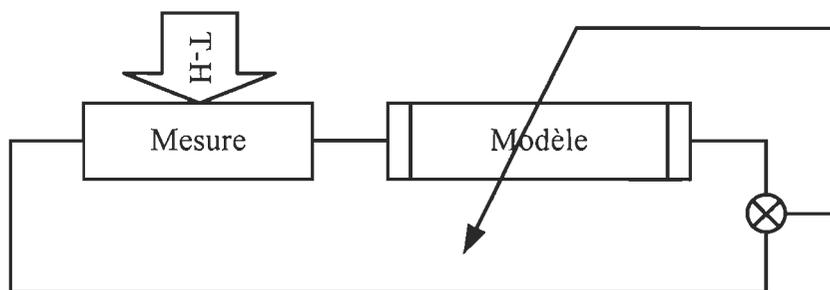


Figure 32. Diagramme du compensateur

Il faut noter que pour valider l'efficacité d'un réseau neuronique suite à la phase d'apprentissage présentée à la figure 33, il est nécessaire de vérifier le modèle par le moyen des nouvelles données qui n'ont pas servi à l'apprentissage. Les tests effectués sur la machine à mesurer tridimensionnelle ont conduit à la génération de deux groupes de données. La première série de données a servi à l'apprentissage du réseau neuronique et la deuxième série de données a été utilisée pour la vérification.

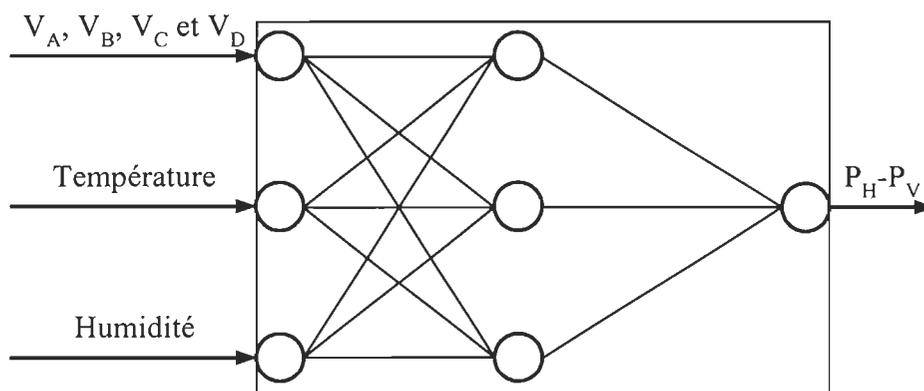


Figure 33. Modélisation du processus

La figure 34 présente l'erreur résiduelle sur les positions  $P_H$  et  $P_V$  dans la phase d'apprentissage et de vérification. Dans la phase d'apprentissage, les deux erreurs quadratiques moyennes (MSE) sont respectivement de l'ordre de  $76.15 \mu\text{m}$  et de l'ordre de  $92.81 \mu\text{m}$  pour les positions  $P_H$  et  $P_V$ . En ce qui concerne la variance, elle est de l'ordre de  $0.601 \mu\text{m}$  pour la position  $P_H$  et de l'ordre de  $0.650 \mu\text{m}$  pour la position  $P_V$ . Les variations observées dans le comportement de l'erreur résiduelle sont dues au bruit dans les mesures. Pendant la phase de vérification, les deux erreurs quadratiques moyennes (MSE) sont respectivement de l'ordre de  $277.71 \mu\text{m}$  et de l'ordre de  $240.27 \mu\text{m}$  pour les positions  $P_H$  et  $P_V$ , ces erreurs sont respectivement 3 fois supérieures par rapport aux erreurs d'apprentissage. Au niveau de la variance, elle est de l'ordre de  $1,797 \mu\text{m}$  pour la position  $P_H$  et de l'ordre de  $1,795 \mu\text{m}$  pour la position  $P_V$ . Dans cette phase, le comportement des erreurs est différent. Les erreurs résiduelles ont une variation assez importante par rapport à celle de la phase d'apprentissage. Les deux extrémités représentent les erreurs sur les positions dans les régions périphériques du détecteur de position. Les résultats démontrent également que la prise des données dans la région périphérique du détecteur optique présente une incertitude 6 fois plus grande que celle mesurée; ce qui correspond exactement aux spécifications données par le constructeur de cet élément optique. Pour diminuer les incertitudes, il est important d'effectuer les mesures le plus proche possible de la zone centrale du détecteur de position en améliorant l'alignement total du système de mesure.

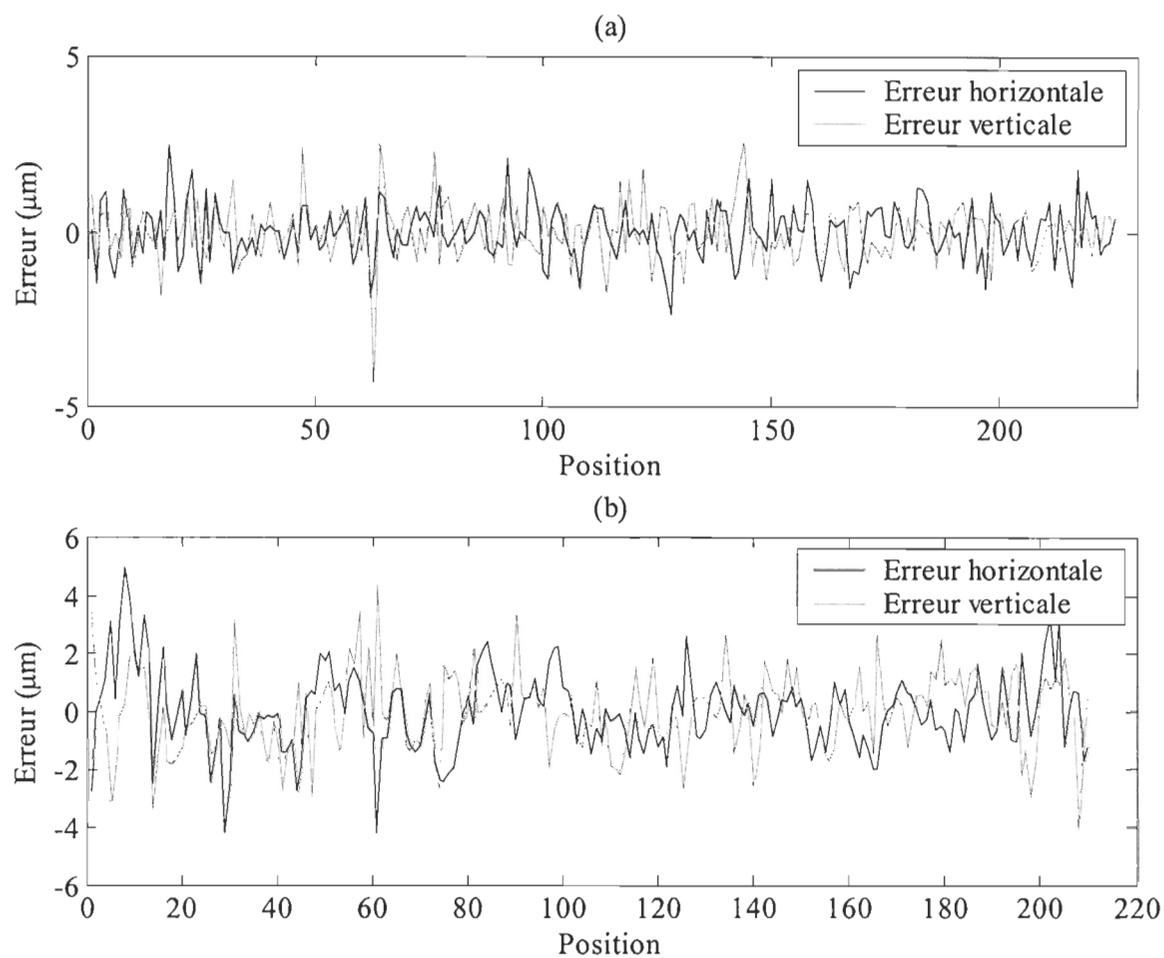


Figure 34. Apprentissage et vérification du réseau neuronique : (a) Phase d'apprentissage et (b) Phase de vérification

Tableau 2. Comparaison entre l'apprentissage et la vérification

	<b>Apprentissage</b>	<b>Vérification</b>
<b>MSE (<math>P_H : \mu\text{m}</math>)</b>	76.15	277.71
<b>MSE (<math>P_V : \mu\text{m}</math>)</b>	92.81	240.27
<b>Variance (<math>P_H : \mu\text{m}</math>)</b>	0.601598	1.797867
<b>Variance (<math>P_V : \mu\text{m}</math>)</b>	0.6507	1.795309

L'analyse du modèle a permis d'évaluer l'influence de la température sur la position. En moyenne, une variation de la température de l'ordre de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  provoque une variation de  $1\ \mu\text{m}$  dans la direction horizontale et  $1.5\ \mu\text{m}$  dans la direction verticale de la position du faisceau sur le détecteur de position. Toutefois, la variation due à la température n'est pas linéaire, car elle dépend de la position du faisceau laser sur la surface du détecteur ainsi que de l'incertitude liée à l'étalonnage de la sonde de température intégrée dans le montage expérimental. Le tableau 3 indique l'influence du changement de température ambiante sur la position du faisceau laser sur le détecteur de position.

Tableau 3. Influence de la température sur la position

	<b>Position horizontale</b>	<b>Position verticale (P<sub>v</sub>)</b>
<b><math>\pm 0.5^{\circ}\text{C}</math></b>	$1\ \mu\text{m}$	$1.5\ \mu\text{m}$
<b><math>\pm 1^{\circ}\text{C}</math></b>	$3.25\ \mu\text{m}$	$5\ \mu\text{m}$
<b><math>\pm 2^{\circ}\text{C}</math></b>	$5\ \mu\text{m}$	$9\ \mu\text{m}$

Au niveau de l'humidité, à partir d'une position désignée comme référence pour les mesures, chaque variation moyenne de l'humidité de l'ordre de  $0.5\%$  HR provoque en moyenne une variation de  $0.15\ \mu\text{m}$  dans la direction horizontale et  $0.20\ \mu\text{m}$  dans la direction verticale de la position du faisceau sur le détecteur de position.

Tableau 4. Influence de l'humidité relative sur la position

	<b>Position horizontale</b>	<b>Position verticale (P<sub>v</sub>)</b>
<b><math>\pm 0.5\% \text{ HR}</math></b>	$0.15\ \mu\text{m}$	$0.20\ \mu\text{m}$
<b><math>\pm 1\% \text{ HR}</math></b>	$0.45\ \mu\text{m}$	$0.65\ \mu\text{m}$
<b><math>\pm 2\% \text{ HR}</math></b>	$0.75\ \mu\text{m}$	$1.10\ \mu\text{m}$

#### **4.4 AMÉLIORATION DE LA STABILITÉ**

Suite à l'évaluation de l'impact des conditions environnementales sur le faisceau laser, l'étude de sensibilité vient quantifier la sensibilité du signal face à ces facteurs perturbateurs. Les modèles obtenus contribuent à estimer l'influence des différentes sources d'erreur. Un compensateur neuronique était nécessaire afin de compenser les variations dues aux conditions environnementales en tenant compte de toute la région du détecteur. La stabilité des mesures a été améliorée grâce à la rapidité d'action de ce compensateur.

L'effort déployé a permis de maîtriser les variations provenant de différentes sources de natures systématiques et aléatoires. Il reste finalement à réaliser une caractérisation métrologique du système de mesure dans le but de définir sa précision et l'incertitude liée à son fonctionnement et valider ses performances sur une machine-outil à axes multiples.

# Chapitre 5

## Test et validation

### 5.1 INTRODUCTION

La dernière phase de ce projet consiste à évaluer les caractéristiques métrologiques du nouveau système de mesure (NSM) et valider ses performances sur une machine-outil multiaxiale par comparaison avec un laser de précision (ML10). Un protocole de mise en référence et d'installation du système de mesure sur la machine est mis en place afin de faciliter les procédures d'alignement et diminuer le temps de réglage. Afin d'avoir une bonne estimation des 5 composantes de l'erreur selon l'axe principal de déplacement, un laser interféromètre (ML10) ayant une précision de l'ordre de  $0.1 \mu\text{m}$  et une stabilité thermique de l'ordre de  $\pm 0.0011 \text{ ppm}$  a été utilisé pour évaluer les mesures obtenues par le NSM. Vu que le ML10 ne permet de mesurer qu'une composante à la fois, la procédure de mesure adoptée consiste à comparer à chaque test effectué une des 5 composantes mesurées par le nouveau système aux résultats obtenus par le ML10. Dans chaque test, un cycle de déplacement aller-retour a été effectué pour valider la mesure des déviations linéaires (rectitude horizontale et rectitude verticale) et des déviations angulaires (lacet et tangage).

Le principe de fonctionnement du laser interféromètre est présenté à l'annexe 1. En ce qui concerne le roulis, il n'existe pas une configuration directe du laser ML10 permettant de valider cette erreur. Pour valider cette mesure, il est nécessaire d'utiliser deux systèmes de détection de mouvement transversal utilisant des LVDT.

La calibration du nouveau système de mesure selon la configuration actuelle permet de générer les algorithmes permettant de donner une mesure fiable et efficace des différentes déviations en diminuant les erreurs dues à l'alignement total du NSM et les erreurs systématiques dues au système de mesure lui-même. Cette calibration doit être refaite après chaque montage du système sur une nouvelle machine. Une remise à zéro des lectures est obligatoire pour définir un système absolu de mesure permettant au NSM de revenir à sa position initiale. Les modèles développés permettent d'estimer les erreurs en fonction des positions du faisceau sur les détecteurs de position et la distance parcourue par la plaque mobile. Les deux sections suivantes mettent l'accent sur les caractéristiques métrologiques du nouveau système de mesure et sur les résultats des mesures de validation.

## **5.2 CARACTÉRISTIQUES MÉTROLOGIQUES DU SYSTÈME**

Au départ, il est nécessaire d'évaluer le NSM afin de déterminer ses caractéristiques métrologiques, sa précision totale et ses conditions spécifiques au fonctionnement.

### ***5.2.1 Caractéristiques du système de mesure***

- **Étendue de la mesure**

La portée maximale du détecteur de position est de l'ordre de  $\pm 3.50$  mm dans les deux directions horizontale et verticale. Lors de la mesure sur une MMT, le faisceau doit

toujours pointer dans un carré de 6.5 mm de coté en assurant un alignement soigné. La portée minimale de l'ensemble du système de mesure est définie par la distance minimale  $l_0$  entre les éléments optiques. Cette distance est de l'ordre de 125 mm. L'appareil de mesure est conçu de façon à pouvoir calibrer des machines-outils multiaxiales avec un volume de travail important; la portée maximale pourrait atteindre 1000 mm dans les trois directions principales. Au-delà de cette limite, un algorithme de compensation devient nécessaire pour palier à la perte de puissance due à l'augmentation de la portée.

- **Temps de réponse**

Le temps de réponse caractérise la phase transitoire du NSM avant de fournir des valeurs de déviations stables après un déplacement selon l'axe principal. Le temps de réponse du système est de l'ordre de 0.75 s. Ce déphasage est dû principalement aux temps de traitement et de calcul relativement longs. Lors de la compensation en temps réel, il devient obligatoire de mettre en place une plateforme informatique ayant une grande capacité de traitement et une haute résolution et assurant l'acquisition et le traitement des données avec une grande vitesse de réponse.

- **Sensibilité**

La sensibilité du système est définie comme le quotient de l'accroissement de la réponse du système de mesure par l'accroissement correspondant au signal d'entrée. La sensibilité correspond alors au facteur d'échelle employé pour calculer les positions  $P_H$  et  $P_V$ . la sensibilité du nouveau système de mesure est autour de 23000.

- **Résolution**

La résolution des lectures du système dépend directement de la résolution de la carte d'acquisition de données (16  $\mu\text{V}$ ) et de la précision du modèle utilisé lors de la calibration des détecteurs de position. La résolution moyenne des positions est ainsi de l'ordre de 0.25  $\mu\text{m}$  dans les deux directions. Au niveau de l'erreur angulaire, la résolution est définie à partir de la résolution linéaire et en appliquant les transformations nécessaires.

- **Mobilité**

La mobilité caractérise l'amplitude du système de mesure à répondre aux petites variations de la valeur du signal d'entrée. L'erreur de mobilité est minimale suite à l'utilisation du traitement numérique des données.

### ***5.2.2 Précision du système de mesure***

La précision du système de mesure est liée étroitement à l'incertitude des signaux provenant des détecteurs de position et au modèle de calibration employé pour palier aux erreurs du système de mesure. Pour quantifier la précision totale du système de mesure, des mesures sont effectuées à six positions distantes de 80 mm. La position de départ coïncide avec le système de coordonnées  $SC_5$  ( $X = 128.787$ ;  $Y = 400.091$ ;  $Z = -66.134$ ) appartenant au volume de travail de la machine CMM.

- **Erreur de fidélité ( $e_f$ )**

La fidélité caractérise l'aptitude du système de mesure à donner pour la même position mesurée, des indications concordantes entre elles. En effet, elle mesure la dispersion des mesures entre elles. Généralement, l'erreur de fidélité est approximée à 6 fois l'écart type des mesures obtenues.

$$e_f = 6.\sigma \quad (30)$$

- **Justesse ( $e_j$ )**

L'erreur de justesse est une erreur systématique qui dépend directement du système de mesure. Elle mesure le degré de concordance entre la moyenne de positions dans les deux directions principales. L'erreur de justesse représente la valeur absolue de la différence entre la valeur moyenne des mesures dans chaque position et la valeur de position de référence donnée par le laser ML 10.

$$e_j = |\mu - P_R| \quad (31)$$

- **Précision totale du système de mesure ( $e_p$ )**

La précision du système de mesure caractérise la répétitivité des lectures en fonction des sources d'erreur. La précision est évaluée dans des conditions environnementales propre à une salle de métrologie. La température d'étalonnage est de 18 °C et 20 % HR. La répétitivité caractérise la capacité du système à reproduire le même niveau de signal dans différentes conditions. La précision est calculée à partir des deux erreurs de justesse et de fidélité. Globalement, la précision totale du système de mesure est de l'ordre de  $\pm 2 \mu\text{m}$ . Les tableaux 5, 6, 7 et 8 présentent la variation de la précision pour six positions distantes de 80 mm.

Tableau 5. Précision du système de mesure (rectitude horizontale)

Rectitude horizontale ( $\mu\text{m}$ )					
$e_{j1}$	$e_{j2}$	$e_{j3}$	$e_{j4}$	$e_{j5}$	$e_{j6}$
0.548	0.074	0.729	0.066	0.507	0.355
$e_{r1}$	$e_{r2}$	$e_{r3}$	$e_{r4}$	$e_{r5}$	$e_{r6}$
0.043	0.056	0.024	0.037	0.040	0.024
$e_{p1}$	$e_{p2}$	$e_{p3}$	$e_{p4}$	$e_{p5}$	$e_{p6}$
0.550	0.093	0.729	0.075	0.508	0.355

Tableau 6. Précision du système de mesure (rectitude verticale)

Rectitude verticale ( $\mu\text{m}$ )					
$e_{j1}$	$e_{j2}$	$e_{j3}$	$e_{j4}$	$e_{j5}$	$e_{j6}$
0,924	0,350	0,893	0,524	0,609	0,640
$e_{r1}$	$e_{r2}$	$e_{r3}$	$e_{r4}$	$e_{r5}$	$e_{r6}$
0,391	0,324	0,238	0,051	0,078	0,031
$e_{p1}$	$e_{p2}$	$e_{p3}$	$e_{p4}$	$e_{p5}$	$e_{p6}$
0,609	0,134	0,968	0,251	0,922	0,620

Tableau 7. Précision du système de mesure (lacet)

Lacet (arcsec)					
$e_{j1}$	$e_{j2}$	$e_{j3}$	$e_{j4}$	$e_{j5}$	$e_{j6}$
0,061	0,225	0,084	0,156	0,488	0,189
$e_{r1}$	$e_{r2}$	$e_{r3}$	$e_{r4}$	$e_{r5}$	$e_{r6}$
0,174	0,805	0,911	0,523	0,180	0,034
$e_{p1}$	$e_{p2}$	$e_{p3}$	$e_{p4}$	$e_{p5}$	$e_{p6}$
0,184	0,836	0,915	0,545	0,520	0,192

Tableau 8. Précision du système de mesure (tangage)

Tangage (arcsec)					
$e_{j1}$	$e_{j2}$	$e_{j3}$	$e_{j4}$	$e_{j5}$	$e_{j6}$
0,001	0,007	0,001	0,003	0,005	0,003
$e_{f1}$	$e_{f2}$	$e_{f3}$	$e_{f4}$	$e_{f5}$	$e_{f6}$
0,057	0,362	0,009	0,109	0,027	0,042
$e_{p1}$	$e_{p2}$	$e_{p3}$	$e_{p4}$	$e_{p5}$	$e_{p6}$
0,057	0,362	0,009	0,109	0,028	0,042

### 5.2.3 Spécifications de fonctionnement

Dans le but d'obtenir le maximum d'information concernant l'utilisation et la flexibilité du nouveau système de mesure, les spécifications suivantes et les caractéristiques sont listées :

#### 5.2.3.1 Spécifications générales

- **Configuration du système de mesure**
- La plaque fixe comporte une source laser He-Ne stabilisée, 3 miroirs semi-réfléchissants et 3 détecteurs de positions en silicium.
- La plaque mobile comporte essentiellement 3 miroirs semi-réfléchissants et un rétro-rélecteur.
- Une interface graphique à base du logiciel LabView.
- Carte d'acquisition DAQ.
- Ordinateur
- **Conditions environnementales**
- Température : 10-40 °C.

- Humidité relative : 0-50 %.
- Vibration : 25 g pour 11 msec
- **Alimentation**
- Source :  $V \approx 115-220$
- Fréquence : 50-60 Hz.
- Consommation : 125 VA max.
- **Caractéristiques du faisceau laser**
- Type : Hélium-Néon.
- Puissance à la sortie : 0.5 mW.
- Temps d'échauffement : 60 min.
- Longueur d'onde : 633 nm.
- Diamètre du faisceau : 0.25 mm.
- Divergence du faisceau : 1.77 mrad.
- Étendu du bruit : 30 Hz à 10 MHz

#### 5.2.3.2 Mesure des rectitudes

- **Précision** de l'ordre de  $0.85 \mu\text{m}$  par 400 mm.
- **Résolution** de l'ordre de  $0.25 \mu\text{m}$ .
- **Étendue** de l'ordre de 1000 mm.

#### 5.2.3.3 Mesure des erreurs angulaires

- **Précision** de l'ordre de 0.90 arcsec.
- **Résolution** de l'ordre de 0.1 arcsec.
- **Étendue** de l'ordre de  $\pm 3600$  arcsec.

## 5.3 MESURE DE VALIDATION SUR LA MMT

### 5.3.1 Montage expérimental

Les premiers tests de validation des performances du système de mesure sont effectués sur la MMT. La plaque fixe du système de mesure est placée sur le bâti de la machine, tandis que la plaque mobile est montée sur le mécanisme de déplacement de cette machine. Le système de mesure est aligné selon un protocole d'alignement spécifique. Puisque le laser interféromètre utilise l'approche de mesure élémentaire, il ne peut, cependant, valider plus d'une composante de l'erreur à la fois. Il est nécessaire de le monter en parallèle avec le NSM tout en respectant les configurations proposées pour chacune des mesures. Le montage expérimental utilisé est présenté à la figure 35.

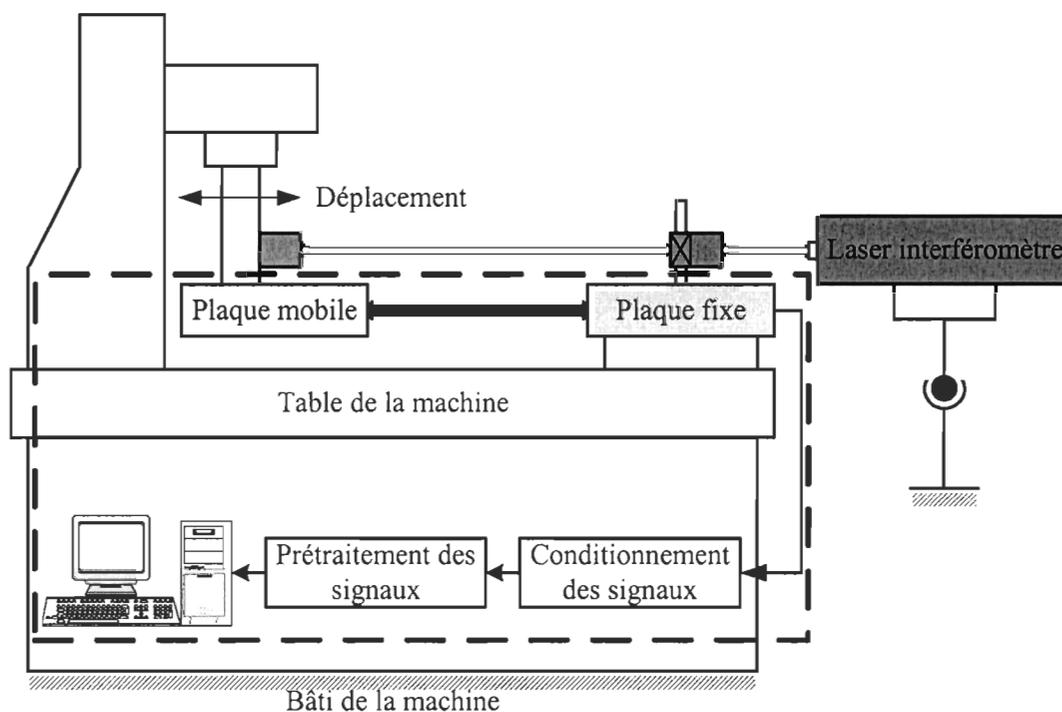


Figure 35. Montage expérimental

Les configurations utilisées pour la validation des deux rectitudes horizontale et verticale ainsi que pour le lacet et le tangage sont présentées dans les annexes 2 et 3. Un système de coordonnées initial de mesure ( $SC_5$ ) est placé à un point ayant les coordonnées suivantes (128.787; 400.091; -66.134). Les mesures sont prises à des points fixes distants de 20 mm selon l'axe de déplacement principal (y) sur une distance totale équivalente à l'étendue maximale de mesure selon cet axe (400 mm). Cette section présente les mesures des rectitudes horizontale et verticale ainsi que les mesures du lacet, du tangage et du roulis en utilisant le nouveau système de mesure et le laser ML10.

### **5.3.2 Analyse des résultats**

#### **5.3.2.1 Mesure des rectitudes horizontale et verticale**

La figure 36 présente le résultat de la mesure de la rectitude horizontale en utilisant les deux approches. La calibration du NSM est effectuée à l'aide d'un modèle linéaire transformant les informations relatives aux positions horizontales sur le détecteur de position en rectitude horizontale. Cette calibration a pour but d'éliminer les erreurs systématiques et les erreurs du cosinus pouvant affecter l'ensemble du système de mesure. Les deux courbes d'aller-retour obtenues à l'aide du laser ML10 ont la même tendance et elles présentent un offset sous forme d'hystérésis mécanique du principalement au comportement des erreurs géométriques et au guidage du pont de la MMT dans son déplacement selon l'axe de déplacement (y). L'erreur de rectitude maximale est de l'ordre de 3.8  $\mu\text{m}$ . Les deux courbes (aller et retour) obtenues par le NSM ont la même tendance que celles des courbes de référence. L'erreur de rectitude totale est de l'ordre de 2.6  $\mu\text{m}$ . En ce qui concerne la courbe de retour, à l'origine du  $CS_5$ , le système de mesure enregistre

un offset de l'ordre de  $0.5 \mu\text{m}$  qui est dû l'hystérésis mécanique de la MMT et de l'hystérésis du système de mesure lui-même.

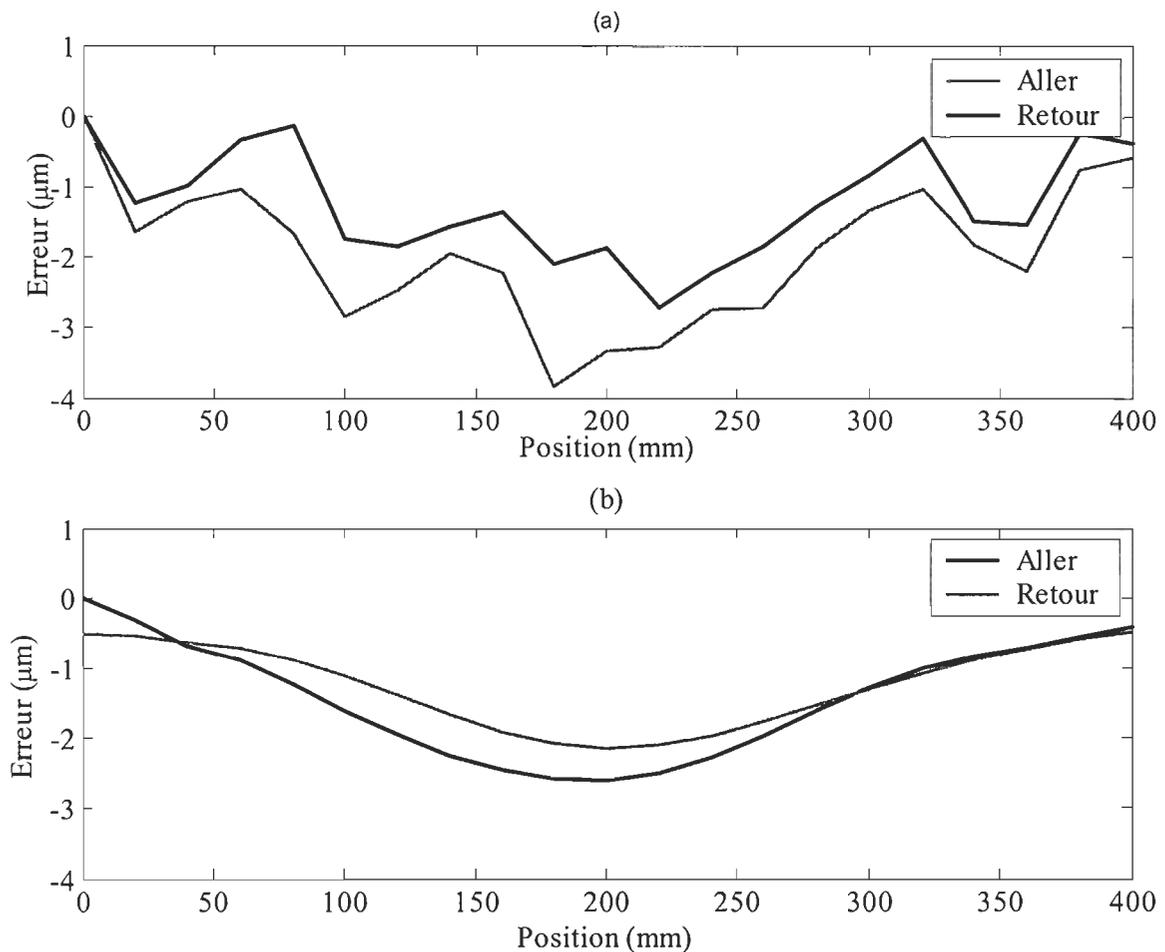


Figure 36. Mesure de la rectitude horizontale : (a) Mesure par le laser ML10 et (b) Mesure par le nouveau système de mesure

La figure 37 présente le résultat de la mesure de la rectitude verticale en utilisant les deux approches. La calibration du NSM est effectuée à l'aide d'un modèle linéaire transformant les informations relatives aux déviations verticales sur le détecteur de position en rectitude verticale. Les deux courbes d'aller-retour obtenues à l'aide du laser ML10 ont la même tendance et elles présentent un offset sous forme d'hystérésis mécanique du principalement

au comportement des erreurs géométriques et au guidage du pont de la MMT dans son déplacement selon l'axe de déplacement (y). L'erreur de rectitude maximale est de l'ordre de  $9.64 \mu\text{m}$ . Les deux courbes (aller et retour) obtenues par le NSM ont la même tendance que celles des courbes de référence. L'erreur de rectitude maximale est de l'ordre de  $9.01 \mu\text{m}$ . En ce qui concerne la courbe de retour, à l'origine du CS<sub>5</sub>, le système de mesure enregistre un offset de l'ordre de  $0.15 \mu\text{m}$  qui est dû à l'hystérésis mécanique de la MMT et à l'hystérésis du système de mesure lui-même.

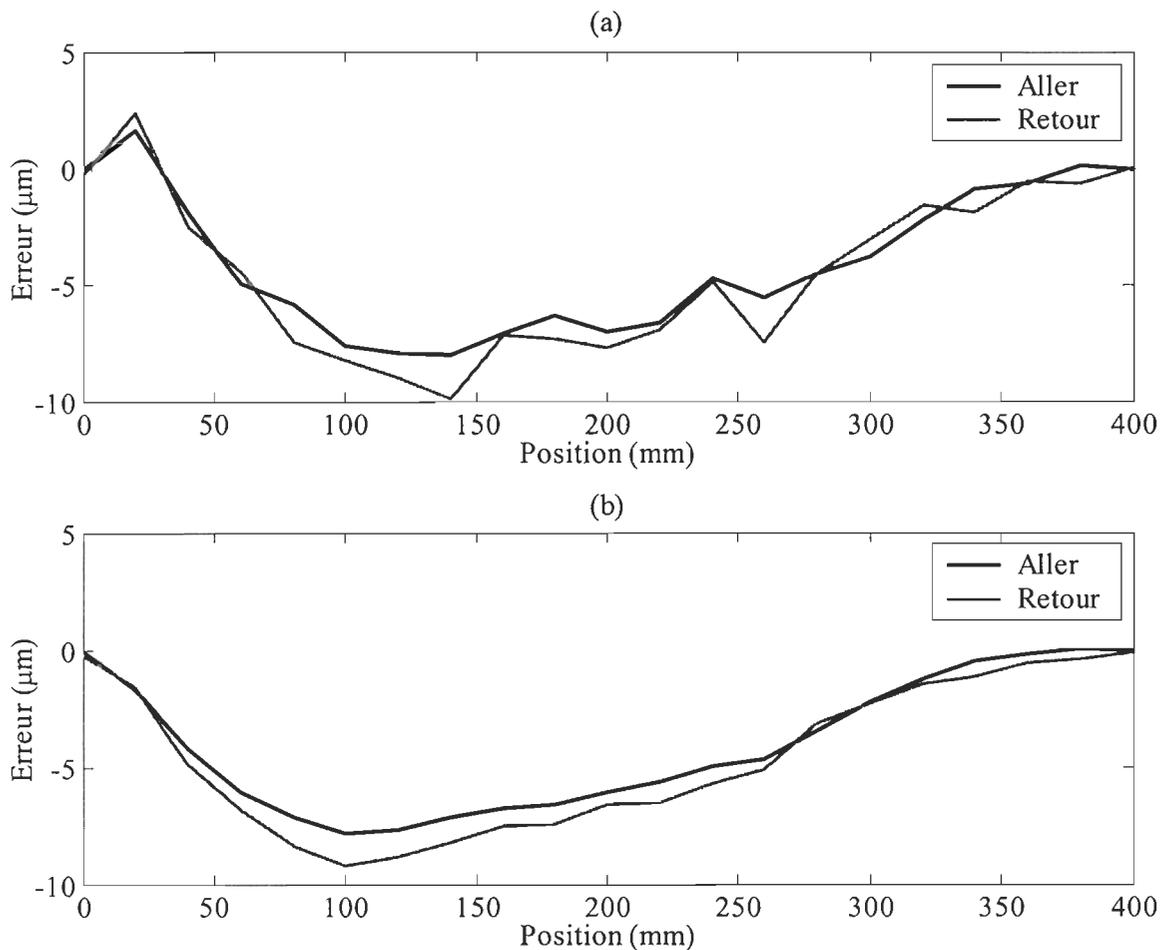


Figure 37. Mesure de la rectitude verticale : (a) Mesure par le laser ML10 et (b) Mesure par le nouveau système de mesure

L'analyse statistique réalisée a permis de comparer la concordance entre les deux courbes dans une séquence d'aller-retour. Le tableau 9 présente une synthèse d'une étude comparative des courbes selon le cycle de déplacement. Le critère MSE présente un outil pertinent de comparaison entre les courbes d'aller-retour. En ce qui concerne la séquence d'aller, l'erreur résiduelle entre les courbes obtenues avec les deux techniques est de l'ordre de 11.130  $\mu\text{m}$  pour la rectitude horizontale et de l'ordre de 13.665  $\mu\text{m}$  pour la rectitude verticale. Quant à la séquence de retour, l'erreur résiduelle est deux fois moins par rapport au cycle d'aller pour la rectitude horizontale et de l'ordre de 9.371  $\mu\text{m}$  pour la rectitude verticale. L'analyse de la variance de la différence entre les deux courbes en aller et en retour révèle une variation presque égale pour les rectitudes horizontale et verticale. Cette analyse a permis de prédire une estimation grossière de la précision totale du système de mesure en fonction de la variance. À la lumière de ces résultats, les deux modèles générés pour calibrer les mesures sont apparemment robustes et efficaces. La vérification des modèles est effectuée en utilisant des nouvelles données afin de vérifier la répétitivité du NSM. Le système de mesure est donc, capable de suivre les erreurs de rectitude dans l'étendue totale de la MMT selon l'axe y.

Tableau 9. Comparaison des résultats

		Rectitude horizontale ( $\mu\text{m}$ )	Rectitude verticale ( $\mu\text{m}$ )
MSE	Aller	11.1130	13.665
	Retour	5.121	9.371
Variance	Aller	0.275	0.319
	Retour	0.256	0.347

### 5.3.2.2 Mesure du lacet et du tangage

Les mesures obtenues par le NSM sont introduites à travers un modèle de calibration permettant de palier aux erreurs de cosinus et aux erreurs systématiques ainsi que la correction de l'équation de base utilisée pour calculer le lacet et le tangage. Cette calibration tient compte de la mesure de position dans les deux directions horizontale et verticale ainsi que la distance parcourue par la plaque mobile. La figure 38 illustre la mesure du lacet en utilisant les deux approches dans un cycle d'aller-retour. Contrairement aux mesures des rectitudes, l'erreur d'hystérésis est minimale. L'erreur du lacet ( $\varepsilon_{yx}$ ) peut être estimée par une droite ayant l'équation (40). L'évolution de cette erreur est quasiment linéaire en fonction de la distance parcourue ( $y$ ) selon l'axe de déplacement. L'erreur maximale est de l'ordre de 5.9 arcsec.

$$\varepsilon_{yx} = 0.0137y + 0.0574 \quad (40)$$

Les résultats obtenus par les NSM sont concordants avec les mesures prises par le ML10. Les deux courbes d'aller et de retour ont la même tendance et elles varient d'une façon linéaire en fonction du déplacement. Cependant, il y a un offset de l'ordre de 0.45 arcsec à l'origine du à l'hystérésis du NSM et de la MMT. L'erreur du lacet maximale mesurée par le NSM est comparable à celle obtenue par le laser ML10 et elle est de l'ordre de 5.9 arcsec.

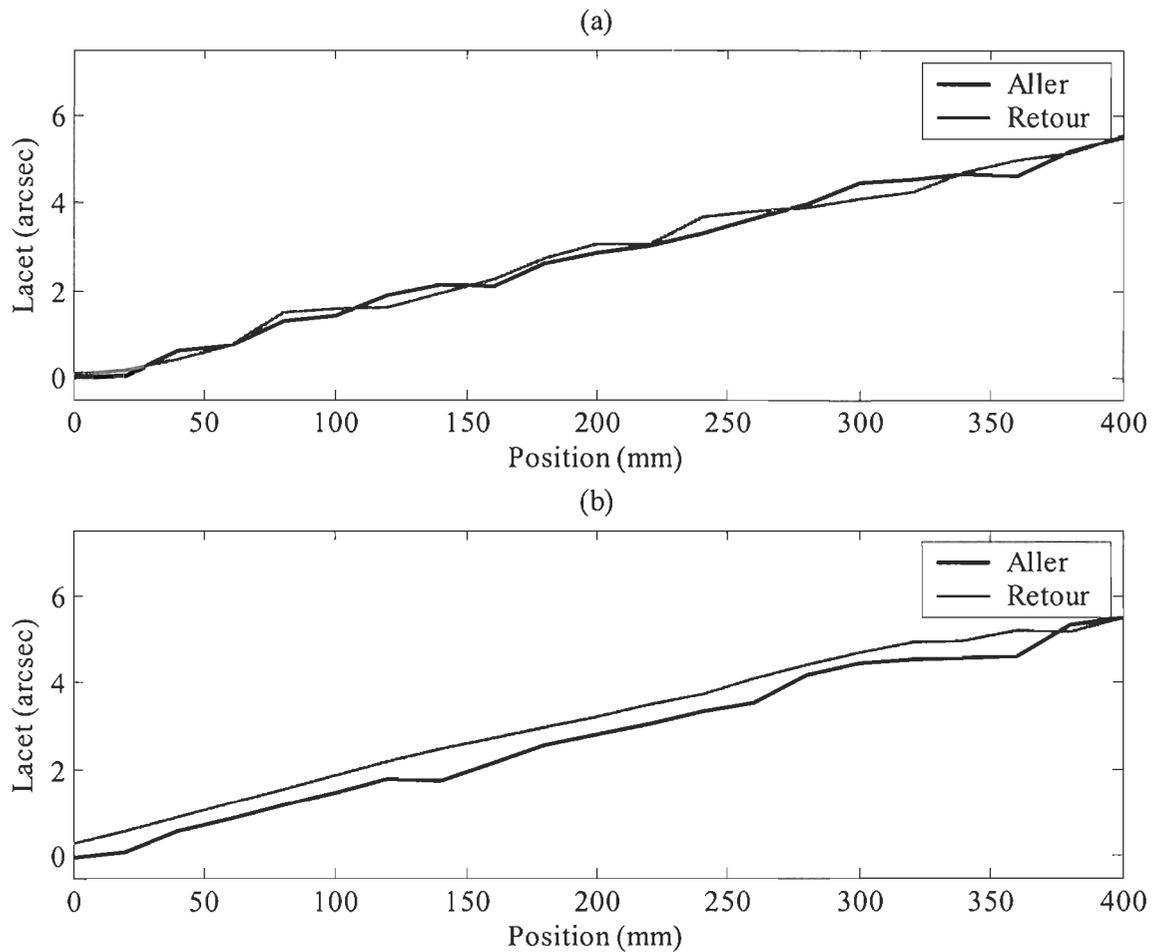


Figure 38. Mesure du lacet : (a) Mesure par le laser ML10 et (b) Mesure par le nouveau système de mesure

La figure 39 illustre la mesure du tangage en utilisant les deux approches dans un cycle d'aller et de retour. Les courbes d'aller et de retour présentent la même tendance pour la mesure par laser ML10. Contrairement aux mesures des rectitudes, l'erreur d'hystérésis est minimale. L'erreur du lacet ( $\epsilon_{yy}$ ) peut être estimée par une droite ayant l'équation (41). L'évolution de cette erreur est quasiment linéaire en fonction de la distance parcourue selon

l'axe de déplacement ( $y$ ). L'erreur maximale est plus imposante que l'erreur du lacet et elle est de l'ordre de 9.456 arcsec.

$$\varepsilon_{yy} = 0.0244y + 0.3512 \quad (41)$$

Les résultats obtenus par les NSM concordent effectivement avec les mesures prises par le ML10. Cependant, il y a un offset de l'ordre de 0.25 arcsec à l'origine du à l'hystérésis du NSM et de la MMT. L'erreur du lacet maximale est comparable à celle obtenue par le laser ML10 et qui est de l'ordre de 9.474 arcsec.

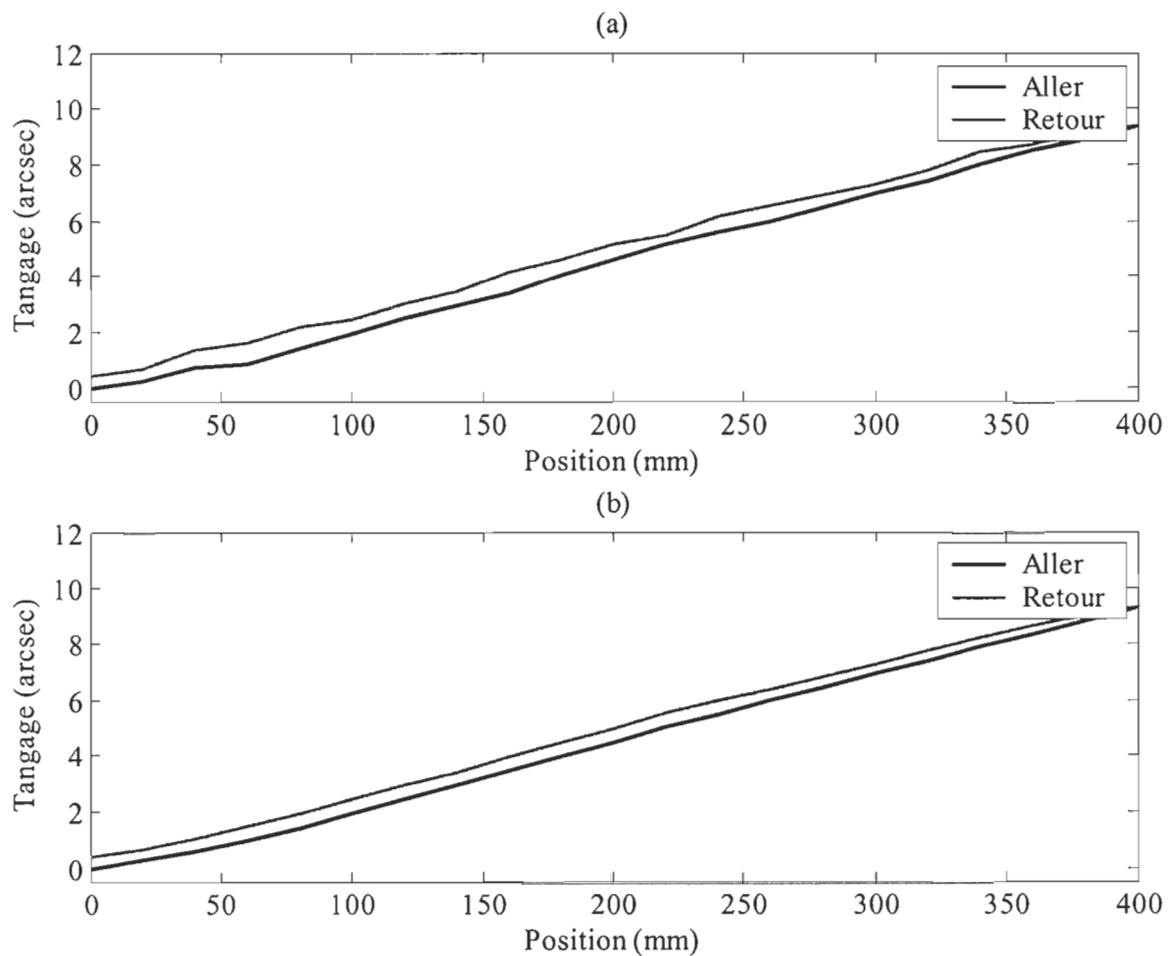


Figure 39. Mesure du tangage sur la MMT : (a :ML10, b : NSM)

La comparaison des deux approches se fait par l'introduction du calcul de l'erreur moyenne quadratique (MSE) et de la variance. Au niveau du lacet, la variance est plus prononcée entre les deux courbes d'aller qu'entre les courbes de retour. Le MSE est de l'ordre de 0.331 arcsec. Dans le cycle de retour, le MSE est de l'ordre de 1.204 arcsec. La variance est d'ordre de 0.016 arcsec et de l'ordre de 0.045 arcsec. Quant au tangage, les MSE d'aller et de retour sont comparables et elles sont de l'ordre de 0.151 arcsec et 0.170 arcsec respectivement. Les deux variances sont comparables aux variances des mesures prises par le ML10. Cette analyse a permis d'étudier les modèles servant aux calculs des erreurs angulaires (lacet et tangage) tout en offrant une première estimation de la précision au niveau des mesures angulaires.

Tableau 10. Comparaison des résultats

		Lacet (arcsec)	Tangage (arcsec)
MSE	Aller	0.331	0.151
	Retour	1.204	0.170
Variance	Aller	0.016	0.005
	Retour	0.041	0.008

### 5.3.2.3 Mesure du roulis

La mesure du roulis est illustrée à la figure 40. Le calcul des erreurs est effectué en appliquant la relation déterminée dans la partie consacrée au développement. L'erreur du roulis est moins importante que les autres erreurs angulaires. La validation de cette mesure reste nécessaire pour avoir une idée de la précision du NSM. Cependant, la validation de

cette erreur nécessite la mise en place d'une structure de validation spéciale et ayant une bonne précision. Les courbes d'aller et de retour présentent la même tendance. L'erreur maximale est de l'ordre de 4 arcsec. L'offset observé entre les deux courbes est dû à l'hystérésis de la MMT. Il faut rappeler que le ML10 n'a pas permis la mesure de l'erreur du roulis.

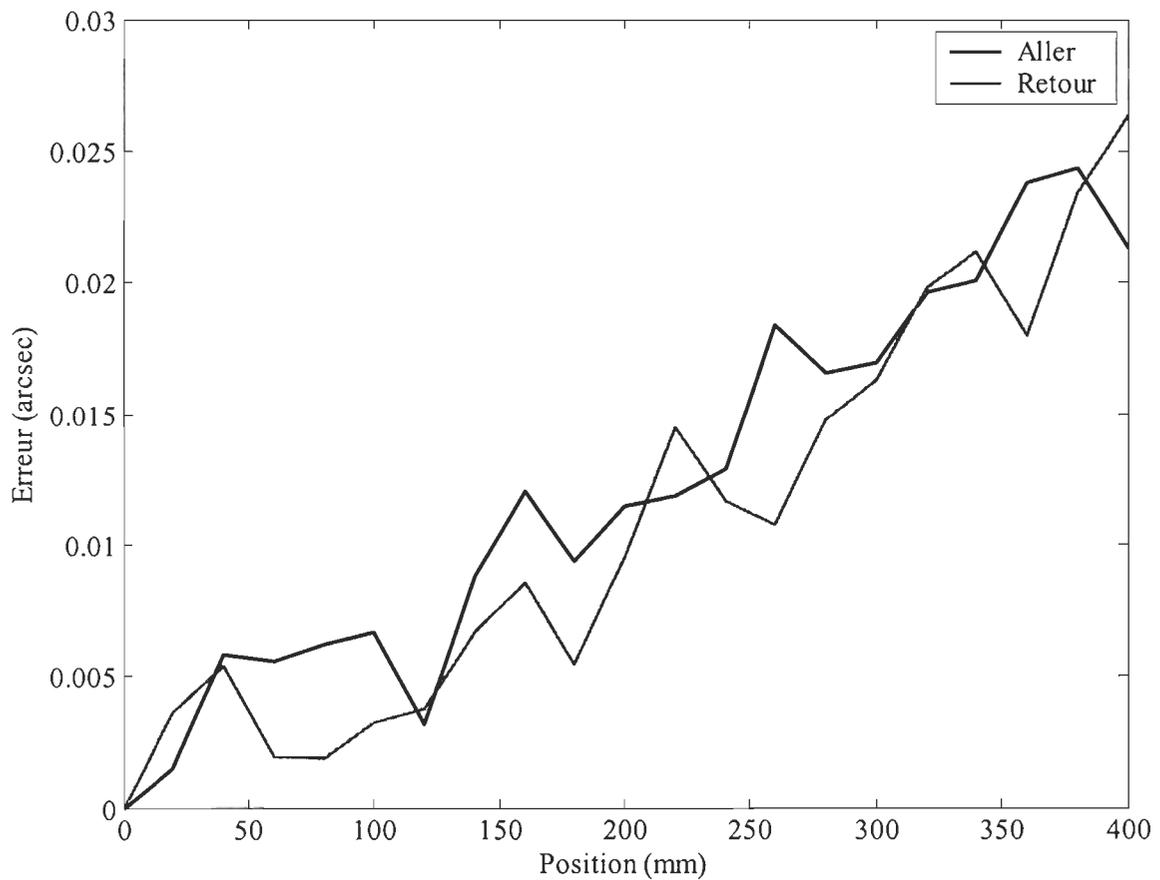


Figure 40. Mesure du roulis avec le NSM

# Chapitre 6

## Conclusion

Dans le but de réaliser le système de mesure actuel, une revue bibliographique concernant la précision dans les machines-outils multiaxiales a été présentée. Dans cette étape, il était nécessaire d'analyser les différentes sources d'erreurs affectant d'une façon directe ou indirecte la précision, de proposer une classification typique des erreurs ainsi que leurs contributions dans la composante totale de l'erreur. Il était question également, des mesures et techniques d'évaluation et des approches de compensation de ces erreurs.

La réalisation de ce projet s'inscrit dans l'optique de remédier aux inconvénients des techniques classiques de réduction d'erreurs. Le nouveau système de mesure développé est conçu pour l'évaluation directe et simultanée des cinq erreurs géométriques sur une machine-outil multiaxiale en utilisant une combinaison de différents éléments optiques et électroniques. L'agencement optimal de ces éléments selon la configuration actuelle a permis de mesurer les positions du faisceau laser sur les détecteurs de position et convertir ces positions en erreurs réelles. Cette configuration permet de quantifier les deux déviations linéaires, soit la rectitude horizontale et la rectitude verticale ainsi que les trois erreurs angulaires, le lacet, le tangage et le roulis.

Le nouveau système de mesure a nécessité une analyse de sensibilité afin d'étudier le comportement dans le temps des signaux provenant des trois détecteurs de position. Cette analyse a permis de dévoiler l'impact des conditions environnementales sur les mesures. Deux étapes de modélisation ont été adoptées. Le premier modèle a été développé dans le but de caractériser les positions horizontales et verticales du faisceau en fonction des paramètres d'influence. Malgré qu'il ait permis de stabiliser les variations sur les positions dans une étendue de température entre 17°C et 25°C, il ne permettait pas de remédier à la forme convexe des détecteurs optiques. Une calibration des détecteurs s'avérait nécessaire. Le deuxième modèle neuronique a été développé en conséquence dans le but de modéliser les positions horizontale ( $P_H$ ) et verticale ( $P_V$ ) en fonction des tensions provenant des détecteurs ( $V_A, V_B, V_C, V_D$ ), de la température et de l'humidité relative.

La caractérisation des paramètres métrologiques du système de mesure était nécessaire afin de déterminer ses conditions de fonctionnement et ses caractéristiques en terme de précision et de résolution. Une analyse statistique a permis d'étudier les erreurs de justesse et de fidélité dans différents points au voisinage de la région périphériques de la surface de projection du détecteur de position. De plus, les essais sur la MMT ont permis de valider les performances du nouveau système de mesure en utilisant un laser de précision (ML10).

Le système de mesure développé se distingue par sa rapidité, sa précision (de l'ordre de  $\pm 1 \mu\text{m}$ ) et sa facilité d'utilisation. La précision pourrait être améliorée en adoptant une analyse plus complète et plus poussée des conditions environnementales et les conditions de fonctionnement. De plus, les conditions dynamiques doivent être cernées davantage de manière à les intégrer dans le modèle final. L'intégration complète du système de mesure

dans les machines-outils exige une optimisation du prototype réalisé en terme de dimension, de composantes et de protection des perturbations environnementales. Les modèles de traitement et de calibration doivent être raffinés en fonction de la nouvelle configuration globale.

## Bibliographie

1. Burdekin, M., S., *Cutting Tests for Accuracy Assessment*, ed. MTTF. Vol. Machine Tool Accuracy, Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Livermore, California, 1980.
2. Sutton, G.P., *Economics Of Accuracy*, Technology of Machine Tools, ed. MTTF, California, 1980.
3. Bryan, J.B., *A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Part I*, Journal of Precision Engineering, Vol. 4, 1982.
4. Bryan, J.B., *A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Part II*, Journal of Precision Engineering, Vol. 4, 1982.
5. Tlusty, J., *Techniques for Testing Accuracy of NC Machine Tools*, Proc. of 12eme Conf. MTDR, 1971.
6. Tlusty, J. and Koenigsberger, F., *New Concepts of Machine Tools Accuracy*, Annals of CIRP, Vol. 24, 1975.
7. Knapp, W., *Test of the Three-Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and Its Relation to the Machine Errors*, Annals of CIRP, Vol. 30, 1980.
8. Knapp, W., *Circular Test for Three-Cordinate Measuring Machines and Machine Tools*, Journal of Precision Engineering, Vol. 5, 1983.
9. Jones, F.W., *Performance Evaluation of Precision Numerically Controlled Turning Equipment*, MTDR, 1970.
10. Jedrzejewski, J., W. Kwasny, and Milejski, D., *Selected Diagnostic Methods for Machine Tools Acceptance Tests*, Annals of CIRP, Vol. 34, 1985.
11. Burdekin, M.S., *Instrumentation and Techniques for the Evaluation of Machine Tool Errors*, Journal of Technology of Machine Tools, 1980.
12. Clark, W.N., *In-Process or Post-Process Metrology*, MTDR, 1974.
13. Dufour, P. and Groppeti, R., *Computer Aided Accuracy Improvement in Large NC Machine Tools*, MTDR, 1981.
14. Denavit, J. and Hartenberg, S., *A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices*. Journal of Applied Mechanics, 1955.
15. Paul, R.P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*, MIT Press, 1981.

16. Donmez, A., *A General Methodology For Machine Tool Accuracy Enhancement - Theory, Application and Implementation*, Perdue University, W. Lafayette, Indiana, 1985.
17. Ferreira, P.M. and Liu, C.R., *A Contribution to the Analysis and Compensation of the Geometric Error of Machining Center*, Annals of CIRP, Vol. 1, 1986.
18. Kiridena, V.S.B. and Ferreira, P.M., *Mapping the Effects of Positioning Errors on the Volumetric Accuracy of Five-Axis CNC Machine Tools*. Journal of Machine Tools Manufacturing, Vol. 33, 1993.
19. Kiridena, V.S.B. and Ferreira, P.M., *Kinematic Modeling of Quasistatic Errors of Three-Axis Machining Centers*, Journal of Machine Tools Manufacturing, Vol. 1, 1994.
20. Eman, K.F. and Wu, B.T., *A Generalized Geometric Error Model For Multi-Axis Machine*, Annals of CIRP, Vol. 1, 1987.
21. Lin, P.D. and Ehmann, K.F., *Direct Volumetric Error Evaluation for Multi-Axis Machines*, Journal of Machine Tools Manufacturing, Vol. 5, 1993.
22. Takeuchi, Y., Sakamoto, M. and Sata, T., *Improvement in the Working Accuracy of an NC Lathe by Compensation for Thermal expansion*, Journal of Precision Engineering, Vol. 1, 1982.
23. Murty, R.L., *Thermal Deformation of Semi Automatic Machine: a Case Study*. Journal of Precision Engineering, Vol. 1, 1980.
24. Sata, T., Takeuchi, Y. and Okubo, N., *Analysis of Thermal Deformation of Machine Tool Structure and Its Application*, MTDR, 1973.
25. Sata, T., Takeuchi, Y. and Okubo, N., *Control of the Thermal Deformation of a Machine Tool*, MTDR, 1975.
26. Okushima, K., Kakino, Y. and Higashimoto, A., *Compensation of Thermal Displacement by Coordinate System Correction*, Annals of CIRP, Vol. 24, 1975.
27. Kiridena, V.S.B. and Ferreira, P.M., *Parameter Estimation and Model Verification of First Order Quasistatic Error Model for Three-Axis Machining Centers*, Journal of Machine Tools Manufacturing, Vol. 34, 1994.
28. Nawara, H.L. and Kowalski, M., *Analysis of the Random Component of Multicoordinate Measuring Machine and Metrological Robots Position Error*, Annals of CIRP, Vol. 36, 1987.
29. Chen, Z.X., Zhu, Z.N. and Wu, S.M., *Guideway's geometrical error measurement and forecasting control*, SME Manufacturing Engineering Trans, Michigan, 1984.

30. Treib, T., *A new measuring system for testing the geometric accuracy of linear guideways*, 1984.
31. Kagawa, Y., and al., *Laser-CCD based sensor system for real time detection of motion linearity*, 2003.
32. Hocken, R.J., *Automated Production Technology*, Annals of CIRP, 1990.
33. Rangunath, V., *Thermal effects on the accuracy of numerically machine tools*, Purdue University, Indiana, 1985.
34. Slocum, A.H., *Precision machine design*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
35. Sartori, S., and al., *A way to improve the accuracy of a coordinate measuring machine*, Journal of Measurement, Vol. 6, p. 50-54, 1988.
36. Busch, K., Kunzmann, H. and Waeldele, F., *Numerical error-correction of a coordinate measuring machine*, International Symposium on metrology for Quality Control in Production, 1984.
37. Kim, K. and Kim, M.K., *Volumetric accuracy analysis based on generalized geometric error model in multi-axis machine tools*, Journal of Mechanic Theory, Vol. 26, p. 207-219, 1991.

## **Annexes**

### *Annexe 1 : Principes de l'interférométrie laser*

L'interférométrie laser est basée sur la génération d'un rayon lumineux stable et cohérent en présence d'un champ magnétique. Un aimant permanent cylindrique provoque l'oscillation du rayon lumineux pour générer deux fréquences différentes  $F_1$  et  $F_2$  ayant des polarisations circulaires opposées. Le passage du rayon à travers des conditionneurs permet de transformer les polarisations circulaires de  $F_1$  et  $F_2$  en polarisations linéaires perpendiculaires. Le rayon est propagé à travers un télescope collimateur pour être projeté par la suite sur un séparateur orienté à 45 degrés qui renvoie le rayon à l'extérieur de l'unité laser vers les accessoires optiques de mesure. Une portion du rayon est échantillonnée pour déterminer la différence des fréquences et contrôler le laser.

Durant l'opération de mesure, le rayon laser passe à travers les accessoires optiques et retourne à l'élément récepteur de l'unité laser. Le rayon qui retourne au récepteur est composé du contenu du rayon qui a été envoyé vers l'extérieur et d'une variation de fréquence  $\Delta F$  proportionnelle au mouvement relatives entre les différents accessoires optiques (Effet Doppler). Si aucun mouvement n'est effectué, le contenu des deux rayons est identique. Par contre, dans le cas où il y a une variation de position, la superposition des deux rayons permet de former des franges d'interférences. Les pulsations du rayon de retour sont comptées et comparées à celles échantillonnées dans le rayon original pour corriger toute dérive entre les fréquences des deux rayons. La figure 41 présente le schéma bloc du système interférométrique.

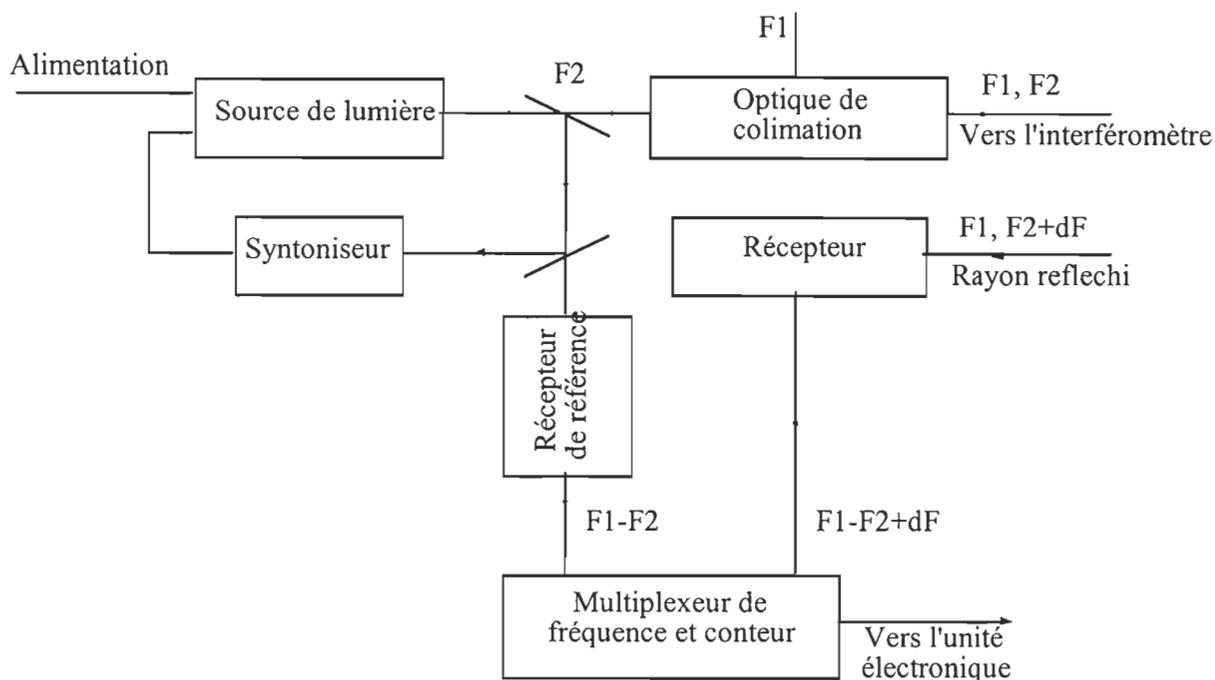


Figure 41. Schéma bloc du système interférométrique

La mesure des déplacements linéaires et angulaires nécessite les quatre types d'accessoires optiques suivants:

- un rétro-réflecteur linéaire composé d'un prisme triédral qui réfléchit le rayon reçu parallèlement à lui-même avec une distance de séparation symétrique par rapport au centre du prisme;
- un interféromètre linéaire composé d'un séparateur de rayons polarisé qui sépare le rayon reçu en deux composantes  $F_1$  et  $F_2$  et les achemine dans deux directions perpendiculaires;
- un interféromètre angulaire composé des mêmes éléments que l'interféromètre linéaire;

- un rétro réflecteur angulaire constitué de deux retroreflecteurs linéaires espacés d'une distance connue avec précision.

Pour la mesure des déplacements linéaires l'interféromètre et le rétro réflecteur linéaires sont combinés tel qu'illustré dans la figure 42. Après avoir séparé le rayon en deux composantes, l'interféromètre envoie l'une au rétro réflecteur fixe et l'autre au rétro réflecteur mobile. Le rétro réflecteur mobile retourne le rayon avec l'effet Doppler  $\Delta F$ . Cette variation de fréquence est transformée électroniquement en une variation de position ou en déplacement.

L'arrangement des accessoires optiques pour la mesure des déplacements angulaires est présenté à la figure 43. Les composants optiques créent deux rayons parallèles entre l'interféromètre et le rétro réflecteur à des fréquences  $F_1$  et  $F_2$ . Toute rotation de l'un des deux composants dans le plan de mesure provoquerait des variations dans les fréquences.

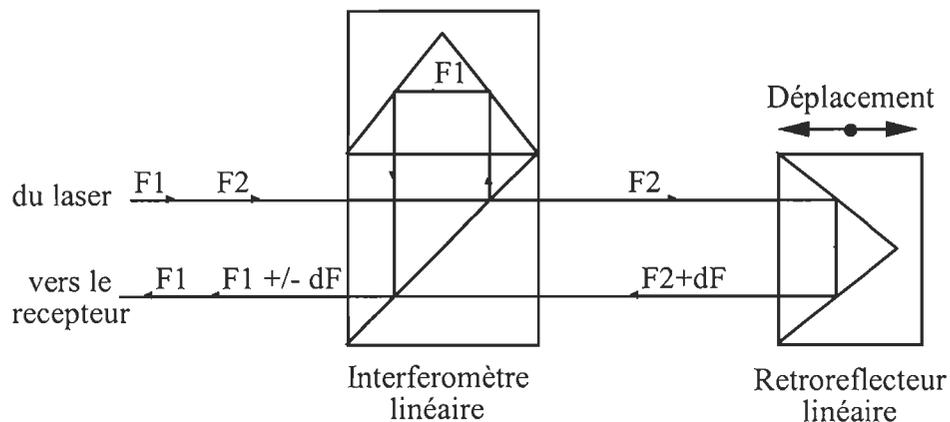


Figure 42. Arrangement de l'interféromètre et du rétro réflecteur pour la mesure des déplacements linéaires

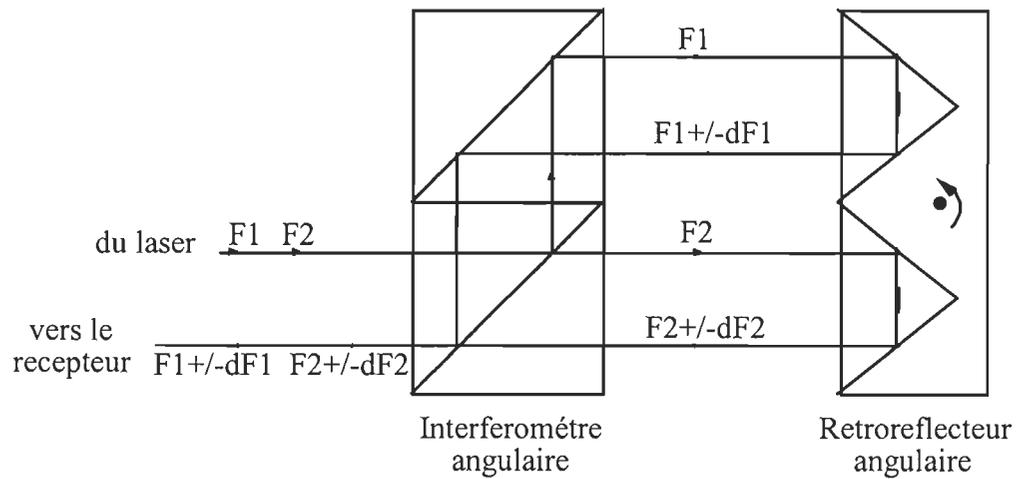


Figure 43. Arrangement de l'interféromètre et du rétroreflecteur pour la mesure des déplacements angulaires

La précision des mesures effectuées par interférométrie laser est assujettie à des erreurs provoquées par les conditions de mesure. En effet, plusieurs conditions environnementales peuvent avoir des effets négatifs sur la qualité des mesures. La vitesse de la lumière à travers l'air est affectée par la température, l'humidité et la pression.

## Annexe 2 : Mesure des rectitudes (Renishaw ML 10)

### ▪ Montage expérimental

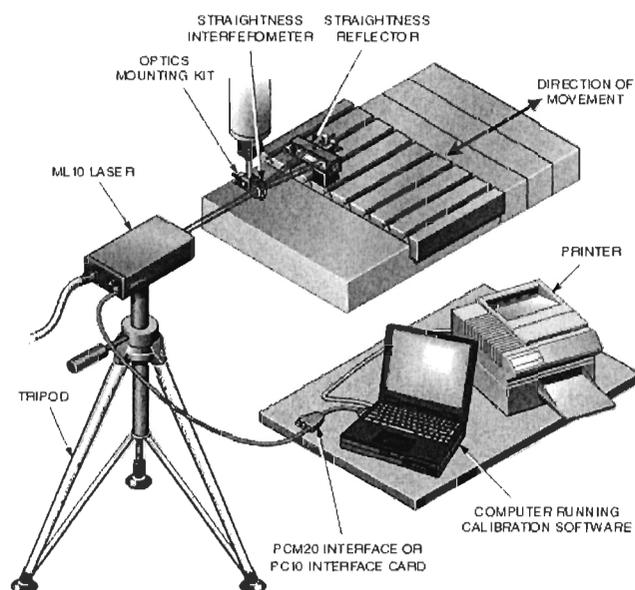


Figure 44. Montage expérimental

### ▪ Configurations de mesure des rectitudes

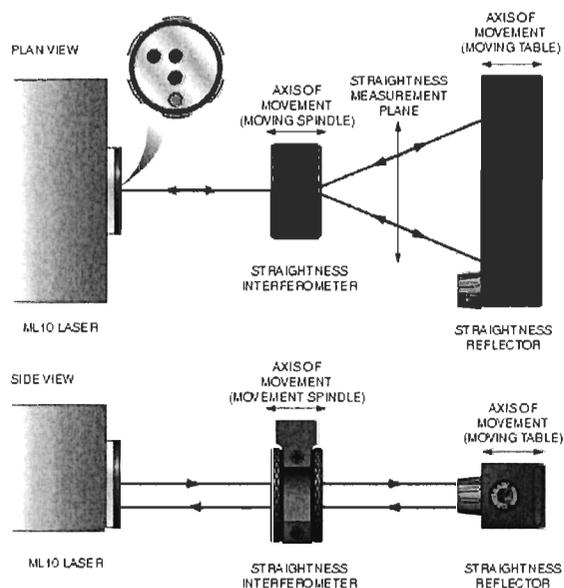


Figure 45. Mesure de la rectitude horizontale

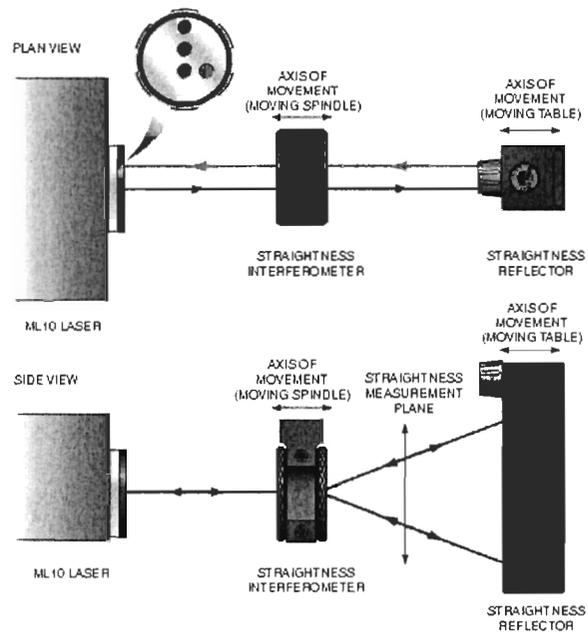


Figure 46. Mesure de la rectitude verticale

### Annexe 3 : Mesure du lacet et du tangage (Renishaw ML 10)

#### ▪ Montage expérimental

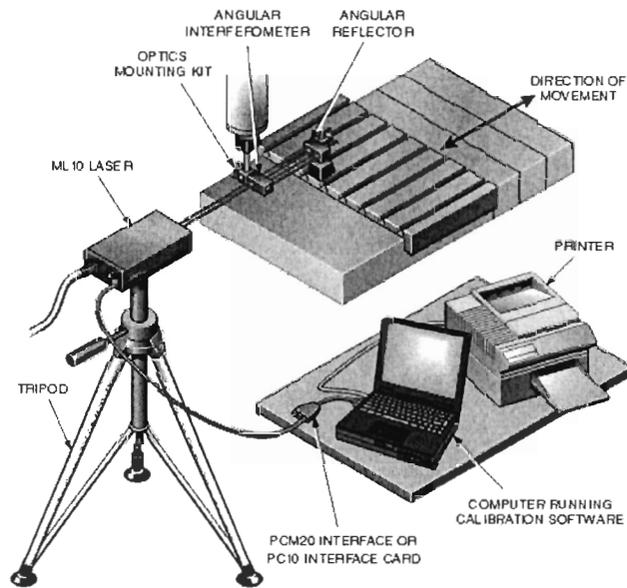


Figure 47. Montage expérimental

#### ▪ Configurations des mesures angulaires

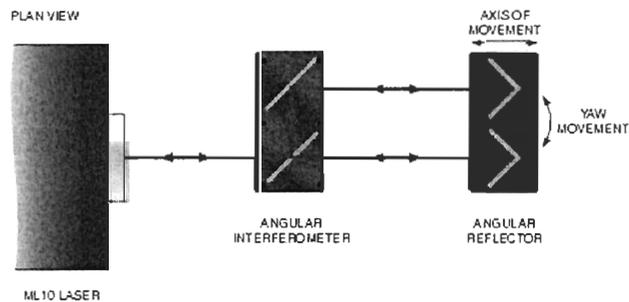


Figure 48. Mesure du lacet

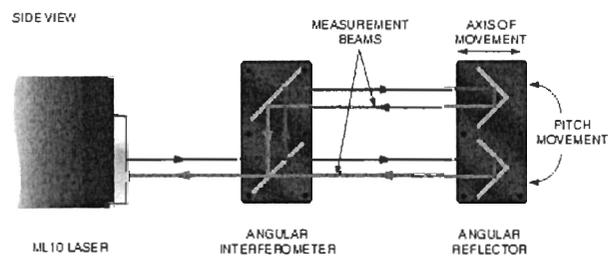


Figure 49. Mesure du tangage