

Contribution à l'étalonnage d'une machine à mesurer de très haute précision: mesure de rectitude et de planéité à un niveau d'incertitudes nanométriques

Siriwan Boripatkosol

▶ To cite this version:

Siriwan Boripatkosol. Contribution à l'étalonnage d'une machine à mesurer de très haute précision : mesure de rectitude et de planéité à un niveau d'incertitudes nanométriques. Génie mécanique [physics.class-ph]. Arts et Métiers ParisTech, 2010. Français. NNT : 2010ENAM0032 . pastel-00527789

HAL Id: pastel-00527789 https://pastel.hal.science/pastel-00527789

Submitted on 20 Oct 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.





2010-ENAM-0032

École doctorale nº 432: Sciences pour l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie Mécanique "

présentée et soutenue publiquement par

Siriwan BORIPATKOSOL

le 7 Octobre 2010

Contribution à l'étalonnage d'une machine à mesurer de très haute précision : mesure de rectitude et de planéité à un niveau d'incertitudes nanométriques

> Directeur de thèse : Olivier GIBARU Co-encadrement de la thèse : Thierry COOREVITS, Stéphane LELEU

Jury

M. Régis BIGOT, Professeur des Universités, Laboratoire LCFC, Arts et Métiers ParisTech
M. Maxence BIGERELLE, Professeur des Universités, Laboratoire Roberval, UTC Compiègne
M. Serge SAMPER, Professeur des Universités, Laboratoire SYMME, Université de Savoie
M. Thierry TISON, Professeur des Universités, Laboratoire LAMIH, Université de Valenciennes
M. Olivier GIBARU, Professeur des Universités, Laboratoire L2MA, Arts et Métiers ParisTech
M. Stéphane LELEU, Maître de Conférences, Laboratoire L2MA, Arts et Métiers ParisTech
M. Thierry COOREVITS, Maître de Conférences, Laboratoire LML, Arts et Métiers ParisTech
M. Jean DAVID, Professeur ENSAM, Laboratoire L2MA, Arts et Métiers ParisTech
M. Georges-Pierre VAILLEAU, Responsable CMI, Laboratoire National d'Essais

Président Rapporteur Rapporteur Examinateur Encadrant Co-encadrant Co-encadrant Invité Invité

Arts et Métiers ParisTech - Centre de Lille Laboratoire de Métrologie et de Mathématiques Appliquées T H È S E

A ma mère, je te dédie ce mémoire. วิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าตั้งใจทำเพื่อมอบแต่คุณแม่

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Laboratoire de Métrologie et de Mathématiques Appliquées (L2MA) dirigé par Monsieur Le Professeur Olivier GIBARU. Ce laboratoire est installé au centre de Lille de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Ce projet a été réalisé dans le cadre de la coopération entre le L2MA et le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE).

Je tiens à remercier le L2MA et le centre Arts et Métiers ParisTech de Lille pour leur accueil et le LNE, qui a fourni une grande partie des moyens expérimentaux, pour son aide précieuse.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mon université King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB) et au Thai-French Innovation Institute (TFII). Il y a quatre ans, au moment de préparer ma venue en France, j'ai pu compter sur toute l'aide de Monsieur Preecha ONG-AREE, de Mademoiselle Sikan KULCHONCHAN et de Monsieur Mickael CHAUVIN. Sans eux, rien n'aurait été possible, qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude et de mon respect.

Je tiens à remercier Monsieur Régis BIGOT, Professeur des Universités au Laboratoire Conception Fabrication Commande (LCFC) à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, centre de Metz, pour avoir accepté de présider mon jury de Thèse.

Monsieur Serge SAMPER, Professeur des Universités au Laboratoire SYstèmes et Matériaux pour la MEcatronique (SYMME) à l'université de Savoie et Monsieur Maxence BIGERELLE, Professeur des Universités au Laboratoire Roberval à l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), ont accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire de thèse. Je tiens à leur exprimer ma gratitude pour la confiance qu'ils m'ont accordée et pour les conseils et les remarques dont ils m'ont fait profiter.

Je remercie Monsieur Thierry TISON, Professeur des universités au Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH) à l'université de Valenciennes, d'avoir bien voulu participé à mon jury.

J'adresse mes profonds remerciements à Monsieur Jean DAVID, Professeur ENSAM au Laboratoire L2MA et Monsieur Georges-Pierre VAILLEAU, Responsable CMI au Laboratoire National d'Essais, pour avoir accepté de participer au jury en tant qu'invités.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Olivier GIBARU, Professeur des Universités au Laboratoire L2MA à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, centre de Lille. Son accueil au sein du L2MA m'a permis de réaliser cette étude.

Je remercie vivement Stéphane LELEU, Maître de Conférences au L2MA, pour son soutien. Je conserve un très bon souvenir de nos réunions de travail qui ont constitué une source de d'inspiration et de motivation importante. Je tiens à lui dire toute ma reconnaissance pour la part qui est la sienne dans la qualité du document final.

Je remercie chaleureusement Thierry COOREVITS, pour m'avoir fait connaître et apprécier le métier de Métrologue durant ces années. J'ai apprécié tout le plaisir avec lequel il exerce ce métier rigoureux et sait en faire partager l'intérêt à ses élèves. Un grand merci également à Françoise COOREVITS qui m'a généreusement accueilli à mon arrivée.

Je souhaite remercier les membres de laboratoire de Métrologie des Arts et Métiers avec qui j'ai partagé d'agréables moments tout au long de ces années. Tout d'abord, Jean-Claude VERVISCH qui m'a aidé et accompagné tout au long de ma thèse. Merci de ta grande disponibilité, de ta bonne humeur et de tes nombreux coups de main. Un grand merci également à François HENNEBELLE, Adrien VAN GORP et Juliette DELABY, pour leur vitalité et leur amitié. J'ai passé de très bons et mémorables moments en votre compagnie.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont soutenu et aidée. Je pense tout d'abord à Sébastien DUCOURTIEUX et Ludovic LAHOUSSE, la part expérimentale de ma thèse doit beaucoup à leur aide précieuse. Je remercie également Eric NYIRI, il se souviendra surement de l'interfaçage du laser. Enfin, je remercie Michel LELEU, technicien en usinage, pour ses compétences, pour sa gentillesse et pour toutes les modifications du dispositif qu'il a bien voulu usiner pour moi.

En Adel OLABI, j'ai trouvé un ami toujours prêt à m'aider et à échanger avec moi sur nos vies d'étudiants expatriés. J'ai vraiment apprécié les formations suivies en ta compagnie.

Enfin, je souhaite remercier mon père et mes deux petits frères pour tout l'amour qu'ils me donnent et pour m'avoir soutenu lors de ces quatre années en France.

Sommaire général

| IN | TRODU | CTION GÉNÉRAL | 1 |
|----|---------|--|----|
| Cł | napitre | : METHODE DE PROPAGATION ET PROFIL D'UNE LIGNE | 6 |
| 1 | Intro | duction et bibliographie | 8 |
| | 1.1 | Etude de la position d'un solide | 9 |
| | 1.1.1 | Analyse et hypothèses | 9 |
| | 1.1.2 | Mécanique du corps solide en petits déplacements | 10 |
| | 1.1.3 | Modèle dit cinématique | 13 |
| | 1.2 | Défaut de forme | 13 |
| | 1.2.1 | Notion de défaut de forme | 13 |
| | 1.2.2 | Passage du continu au discret | 14 |
| | 1.3 | Défaut de circularité | 15 |
| | 1.3.1 | Définition normalisé de la circularité | 15 |
| | 1.3.2 | Méthode de mesure classique | 16 |
| | 1.3.3 | Permutation circulaire | 16 |
| | 1.3.4 | Propagation circulaire | 17 |
| | 1.3.5 | Utilisation d'un étalon circulaire | 17 |
| | 1.4 | Défaut de rectitude | 18 |
| | 1.4.1 | Définition normalisée de la rectitude | 18 |
| | 1.4.2 | Retournement | 19 |
| | 1.4.3 | Propagation | 21 |
| 2 | Unif | cation des méthodes de séparation | 28 |
| | 2.1 | Concept de séparation | 28 |
| | 2.2 | De la permutation à la propagation : un concept unique | 30 |
| 3 | Prop | agation | 32 |
| | 3.1 | Notations signes et unités | 32 |
| | 3.1.1 | Signes | 32 |
| | 3.1.2 | Unités | 33 |
| | 3.2 | Méthode globale | 33 |
| | 3.2.1 | Mise en équations | 33 |
| | 3.2.2 | Pondération | 35 |
| | 3.2.3 | Interprétation et utilisation du paramètre L | 39 |
| | 3.3 | Méthode « à niveau prépondérant » | 40 |
| | 3.4 | Méthode « à capteurs prépondérants » | 41 |
| | 3.4.1 | Calage de la courbure globale | 41 |
| | 3.4.2 | Résultats | 42 |
| 4 | Cond | lusion : Choix du calage de la courbure, du nombre de capteurs | 44 |

| Chapitre II : BANC EXPERIMENTAL ET ETALONNAGE METROLOGIQUE | | 46 |
|--|--|----|
| 1 Int | roduction | 48 |
| 1.1 | Bref historique du système métrique | 48 |
| 1.2 | Chaîne d'étalonnage | 49 |
| Pré | sentation du banc | 51 |
| 2.1 | Partie existante : Description générale du banc de mesure | 52 |
| 2.1. | 1 Principes de conception | 52 |
| 2.1. | 2 Description technologique et métrologique | 55 |
| 2.2 | Démarche de précautions expérimentales et modifications | 58 |
| 2.2. | 1 Mise en œuvre les instruments | 58 |
| 2.2. | 2 Protocole de mesure de la rectitude | 58 |
| 2.2. | 3 Traitement des résultats : Logiciel MATHEMATICA | 60 |
| 2.2. | 4 Précaution et tests pour les acquisitions | 60 |
| 2.2. | 5 Réglages | 63 |
| 2.3 | Conception du banc pour la phase « étalonnage » | 66 |
| 2.3. | 1 Laser | 66 |
| 2.3. | 2 Principe de conception | 67 |
| 2.3. | 3 Présentation du banc du mesure : Mise en œuvre de l'interféromètre | 68 |
| 2.3. | 4 Source d'incertitudes | 70 |
| Eta | lonnage des capteurs capacitifs | 75 |
| 3.1 | Etalonnage | 75 |
| 3.1. | 1 Capteur capacitif | 75 |
| 3.1. | 2 Détermination de l'axe d'Abbe | 76 |
| 3.1. | 3 Protocole de mesure pour l'étalonnage | 78 |
| 3.1. | 4 Courbe d'étalonnage | 80 |
| 3.1. | 5 Effet de l'étalonnage des capteurs sur le calcul d'un profil | 81 |
| 3.2 | Diminution de l'incohérence entre les capteurs | 83 |
| 3.2. | 1 Courbe de correction | 84 |
| 3.2. | 2 Effet de la diminution de l'incohérence entre les capteurs sur le calcul d'un profil | 85 |
| Eta | lonnage des niveaux électroniques | 86 |
| 4.1 | Niveau électronique | 86 |
| 4.1. | 1 Principe de fonctionnement et mise en service | 86 |
| 4.1. | 2 Méthode de mesure | 87 |
| 4.2 | Précaution | 87 |
| 4.2. | 1 Protocole de mesure pour l'étalonnage | 87 |
| 4.3 | Utilisation du laser | 89 |
| 4.3. | 1 Présentation | 89 |
| 4.3. | 2 Courbe d'étalonnage | |
| 4.3. | 3 Incertitude sur la référence | 90 |
| 4.4 | Utilisation de la matrice de 16 capteurs | 90 |
| 4.4. | 1 Courbe d'étalonnage | 91 |
| 4.4. | 2 Incertitude sur la référence angulaire | 91 |
| 4.5 | Résultats et discussion | 92 |
| Co | nclusion | 93 |
| | | |

| Chapitre III : INCERTITUDES ET OPTIMISATION DU DEPOUILLEMENT | | 96 |
|--|---|----------------------------------|
| 1 | ntroduction | 98 |
| 2 | Evaluation de l'incertitude de mesure par l'approche GUM ENV 13005 | 99 |
| 2.1 | Mesurande | 100 |
| 2.2 | Concepts d'erreurs et d'incertitude | 100 |
| 2.3 | Bilan des causes d'incertitudes :Diagramme d'Ishikawa | 100 |
| 2.4 | Incertitude-type | 101 |
| 2.5 | Modélisation du mesurage | 102 102 103 |
| 2.6 | Evaluation de l'importance des contributeurs | 103 |
| 2.7 | Incertitude élargie U | 103 |
| 2.8 | Expression de l'incertitude (expression finale du résultat de mesure) | 104 |
| 2.9 | Supplément 1 du GUM : Méthode de Monte Carlo | 104 |
| 2.1 | 0 Procédure de calcul des incertitudes | 105 |
| 3 | Evaluation des incertitudes | 106 |
| 3.1 | Rappel de la définition du mesurande | 107 |
| 3.2 | Bilan des causes d'incertitudes | 107 |
| 3.3 | Thermique sur le banc | 108 |
| | 3.3.1 Evaluation expérimentale des variations de température et des gradients 3.3.2 Conséquences | 108 110 |
| 3.4 | Reproductibilité de la position de la table aérotech | 111 |
| 3.5 | Incertitude sur la correction du capteur | 111 |
| 3.6 | Incertitudes sur la correction du niveau 3.6.1 Référence de l'étalonnage du niveau : porte-capteurs 3.6.2 Niveau électronique 3.6.3 Bilan des incertitudes sur la correction du niveau | 113 113 114 116 |
| 4 | Détermination du paramètre L optimal | 116 |
| 4.1 | Recherche du minimum de variabilité du profil en fonction de L 1.1.1 Méthode de simulation 1.1.2 Simulation avec une multiplication des incertitudes sur les niveaux par 10 1.1.3 Intervalle paramètre L optimal, effet sur le profil | 117 117 118 120 |
| 4.2 | Méthode de l'écart-type équivalent | 121 |
| 4 | 1.2.1 Structure du programme de simulation | 122 |
| 2 | 4.2.2 Ecart-type equivalent pour le capteur « σ_c » | 124 |
| 2 | +.2.5 Ecart-type equivalent pour le niveau « O_N » | 125 126 |
| 4.3 | Evaluation finale des incertitudes | 120 126 |
| 5 | Réflexion sur le choix du nombre de canteurs | ==0 120 |
| | | 12 <i>3</i> |
| 2.1 | Decompte des equations et des inconnues | 129 |

| 5 | .2 9 | Simulation de Monte-Carlo | 131 |
|---|-------|---------------------------|-----|
| 6 | Concl | lusion | 132 |

| Chapitre IV : CARTOGRAPHIE DU PLAN | | 134 |
|------------------------------------|--|-----------------------|
| 1 | Introduction et bibliographie | 136 |
| 2 | Méthode « maximale » | 137 |
| 2.1 | 1 Procédure de mesure | 137 |
| 2.2 | 2 Décompte des équations et des inconnues | 138 |
| 3 | Méthode « minimale » utilisant les rectitudes | 139 |
| 4 | Comparaison des méthodes | 141 |
| 5 | Simulation de Monte-Carlo des incertitudes sur la base de la m | éthode des rectitudes |
| | | 142 |
| 6 | Conclusion | 144 |
| | | |

| CONCLUSION ET PERSPECTIVES | 147 |
|---|-----|
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 153 |
| Annexe I : CHOIX DU CALAGE DE LA COURBURE | 161 |
| Annexe II : PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRIE A UNE LONGUEUR D'ONDE | 165 |
| Annexe III : CALCUL DES DEPLACEMENTS DU PORTE-CAPTEUR | 169 |

INTRODUCTION GENERALE

Les termes de nanomatériaux et de nanotechnologies recouvrent tout un domaine de réalisations dont le pas est inférieur au micromètre. Ils sont obtenus soit par des technologies qui permettent une réduction de la taille des composants, soit par la production de nano-objets qui s'auto-organisent [NM110].

Les travaux de recherche et de développement concernent des domaines variés : l'électronique, les télécommunications, l'optique, la mécanique, la chimie, la biologie, la santé, l'environnement, les transports et les sources d'énergie.

Dans le domaine de la Métrologie, le préfixe « nano » peut avoir deux acceptions, celle des objets nanométriques ou celle des incertitudes nanométriques y compris sur des macro objets. Dans ce travail, nous sommes clairement dans cette seconde acception.

La majorité des pays dans le monde ont des laboratoires dont les appellations contiennent les expressions « National Measurement » ou « Metrology Institute », ces laboratoires détiennent les références primaires des Etats correspondants. La plupart des grands laboratoires de métrologie développent des programmes en nanométrologie souvent sur des nano objets.

Aux Etats Unis, le « Center for Nanoscale Science and Technology » (CNST) et neuf autres grands laboratoires du « National Institute of Standards and Technology » (NIST) sont en train de développer les mesures, les normes et les technologies pour le développement de l'industrie des produits pour un marché nanotechnologie qui pourrait dépasser 2.5 billions de dollars dans la prochaine décennie, soit environ 15% de la production manufacturière mondiale.

En Allemagne, le « Physikalisch Technische Bundesanstalt » (PTB) effectue de la recherche fondamentale et du développement dans le domaine de la métrologie dans les domaines concernant la détermination des constantes fondamentales et naturelles, la réalisation, l'entretien et la diffusion des unités légales SI, les services et la métrologie ainsi que du transfert de technologie. Nous retrouverons des références bibliographiques correspondantes à des travaux du PTB dès le chapitre I.

En Grande Bretagne, l'équipe « Surface and Nanoanalysis » au « National Physical Laboratory » (NPL) vise à soutenir l'industrie de l'UK en augmentant les connaissances concernant les microscopes à champ proche.

D'autres grands ont des laboratoires importants en métrologie, citons le Japon, la Corée du Sud ou la Chine dans la zone Asie.

Contexte

En France, le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) au travers de sa section dimensionnelle a initié le projet « Nanométrologie ». Le premier projet visait à développer une machine innovante capable de mesurer des objets tridimensionnels avec des incertitudes nanométriques. Actuellement, d'autres projets sont en cours de développement comme un microscope à force atomique métrologique ou une machine à mesurer les défauts de forme cylindrique présentant des incertitudes nanométriques.

Pour réaliser ce projet une coopération scientifique forte a été mise en place entre la section dimensionnelle du LNE et le Laboratoire de Mathématiques et de Métrologie Appliquée (L2MA) d'Arts et Métiers ParisTech, centre d'enseignement et de recherche de Lille. Ce travail a été réalisé au L2MA.

Notre travail s'inscrit en continuité du travail effectué par M. Ludovic LAHOUSSE qui a soutenu sa thèse en 2005. Le sujet de sa thèse est « Contribution à la construction de machines de grande précision géométrique : Le concept d'information dans l'amélioration des performances des machines » [LAH2005-b].

L'objectif principal de notre travail est d'étudier précisément la topographie Z des plans qui servent de références dans la chaine métrologique Z de la machine « table croisée » [DUC2003] [LAH2005-a] [LAH2005-b] [LAH-2005-c] [LAR2007] du LNE.

La machine (Figure 1) a été construite au LNE à Trappes (Paris). Elle a été conçue à partir des travaux de M. Ludovic LAHOUSSE. Ce projet vise à développer la capacité de raccorder aux étalons dimensionnels nationaux, les mesures d'objets issus des nanotechnologies.



Figure 1 : Machine complète

Cette machine dont le domaine d'exploration est un carré de 300 mm sur une épaisseur d'une cinquantaine de micromètres doit permettre d'atteindre des incertitudes d'une dizaine de nanomètres sur la mesure d'une longueur d'un centimètre. L'incertitude suivant Z étant

limitée à deux nanomètres sur la même distance. Ces deux incertitudes restant limitées à respectivement cinquante et dix nanomètres pour une mesure correspondant à l'envergure du domaine de mesure.

La machine a été structurée en deux sous-ensembles. Le premier est mobile. Il se compose de tous les éléments qui servent à la mise en position et au déplacement de la palette porte échantillon. Le second est fixe. Il constitue la partie supérieure de la machine et matérialise l'espace fixe de référence. Un système de repérage de la partie mobile par rapport à la partie fixe a été mis en place.



Figure 2 : Ensemble de la machine

La machine présente deux modes principaux de report de coordonnées pour les 2 chaînes métrologiques X, Y d'une part, et Z d'autre part.

La chaîne Z est très sensible à la flexion thermique et le respect du principe d'Abbe nécessiterait de fixer la référence de planéité sous la palette porte-objet. On a choisit une solution qui consiste à « reconstituer » le principe d'Abbe par le moyen de 4 capteurs implantés sur le chariot mobile et se repérant à un plan constituant la référence de mesure Z. Les quatre capteurs sont disposés face à la surface de référence constituée de 4 plateaux dont la topographie doit être étalonnée. C'est l'objet de ce travail.

Le repérage dans la direction Z est réalisé au moyen de quatre capteurs capacitifs dont l'étendue de mesure est de 100 μ m. Ces quatre capteurs liés au chariot porte objet, proches des quatre coins de la zone de mesure, sont en regard de quatre références de planéité réalisées sous forme de quatre plateaux circulaires en alliage d'aluminium de diamètre 440 mm et d'épaisseur 70 mm. Ces plateaux sont fixés à la structure de référence par des liaisons qui permettent une libre dilatation de ces références sans entraîner de déformation. L'interprétation des mesures délivrées par ces quatre capteurs permet de reconstituer simultanément l'équivalent d'une double mesure de l'altitude Z en principe d'Abbe ainsi que les valeurs des rotations autour des directions X et Y entre la porte pièce et le palpeur fixé à la structure de référence.

Le schéma de la Figure 3 représente une coupe de la machine suivant la diagonale X, Y. Il montre les pièces massives concourant au repérage vertical dans les structures fixe et mobile ainsi que la chaîne métrologique Z.



Figure 3 : Chaîne métrologique Z

Notre objectif est donc de déterminer une cartographie des références planes qui sont à la base du repérage en Z sur la table croisée. Afin de mettre au point et de valider la méthode d'étalonnage de la planéité des références sans immobiliser le reste de la machine, un banc dédié à la mesure de planéité [LAH2007] a été préalablement développé et mis en place au L2MA. La mesure définitive ne pourrait probablement qu'être réalisée in situ à Trappes tant les problèmes thermiques et de maintien de la forme sont aigues au niveau de qualité cherché.

La métrologie du plan à l'échelle du micromètre est bien connue mais est originale à l'échelle du nanomètre d'autant que les méthodes envisagées sont radicalement différentes des techniques de planimétrie aboutissant à des incertitudes micrométriques.

Présentation du document

L'ensemble de cette démarche est présenté dans ce mémoire de thèse et s'articule en quatre chapitres.

Le chapitre I est intitulé « Méthode de propagation et profil d'une ligne », il présente :

- Le principe de la mesure de la rectitude par propagation
- La proposition de 3 stratégies de dépouillement des données issues de la propagation pour réaliser la rectitude des mesures : une stratégie dite « globale » qui est en fait un calcul au sens des moindres carrés pondérés, une stratégie dite « à capteurs prépondérants » et une stratégie dite « à niveaux prépondérants »
- Pour la méthode de dépouillement au sens des moindres carrés pondérés, nous avons introduit un paramètre noté L qui permet de passer de manière continue de la solution dite « à capteurs prépondérants » à la solution dite à « niveaux prépondérants ». Ce paramètre égal au rapport entre l'incertitude-type attribuée aux capteurs et celle attribuée aux niveaux devra être déterminé

Le chapitre II est intitulé « Banc expérimental et étalonnage métrologique », il présente :

- La description générale du banc de mesure conçu préalablement à ma thèse par Ludovic LAHOUSSE
- La démarche expérimentale et les modifications réalisées pour améliorer le fonctionnement du banc
- La conception du dispositif supplémentaire pour la phase « étalonnage » des capteurs et des niveaux

- L'étalonnage des capteurs capacitifs qui est réalisé en deux étapes. La première étape compare directement l'indication de chaque capteur à un laser interférométrique placé en principe d'Abbe. La seconde étape consiste en la diminution de l'incohérence entre les indications des 16 capteurs.
- L'étalonnage des niveaux peut être réalisé de deux manières. La première référence est un angle engendré par l'inclinaison du matelas supérieur. Des capteurs capacitifs que nous avons ajouté à chaque coin du matelas permettent d'évaluer la position de l'axe de rotation. L'information sur l'angle est fournie par l'indication du laser à l'aide d'un simple calcul de sinus. La seconde référence est toujours un angle engendré par l'inclinaison du matelas supérieur mais cet angle est calculé grâce aux informations venant des 16 capteurs capacitifs du porte-capteurs analysées avec un calcul de type « plan au sens des moindres carrés en 16 points »

Le chapitre III est intitulé « Incertitude et optimisation du dépouillement », il présente :

- La notion d'incertitudes de mesures
- La méthode de Monte Carlo et l'application à la mesure de la rectitude
- L'évaluation des incertitudes sur la correction du capteur et du niveau
- Deux méthodes de détermination du paramètre « L » optimal
- L'évaluation finale des incertitudes

Le chapitre IV est intitulé « Cartographie du plan », il présente :

- Une analyse des méthodes de mesure et de dépouillement possibles pour évaluer la topographie du plan
- Une méthode dite « maximale » en ce sens qu'elle utilise des mesures croisées très redondantes et une stratégie de dépouillement de type « moindres carrés » tenant compte de l'ensemble des données. L'étude est réduite au décompte des équations et des inconnues
- Une méthode dite « minimale » en ce sens qu'elle propose une analyse des rectitudes mesurées dans les sens X et Y puis un recoupement des rectitudes pour reconstituer la topographie du plan. Cette méthode évite la résolution d'un grand système et elle permet d'utiliser directement les méthodes développées dans ce travail. On réalise des simulations sur un plan carré (300*300 mm²) en utilisant les incertitudes obtenues dans le chapitre III

Chapitre I

METHODE DE PROPAGATION ET PROFIL D'UNE LIGNE

| 1 | Intro | oduction et bibliographie | 8 |
|----|-------|--|----|
| 1. | .1 | Etude de la position d'un solide | 9 |
| | 1.1.1 | Analyse et hypothèses | 9 |
| | 1.1.2 | Mécanique du corps solide en petits déplacements | 10 |
| | 1.1.3 | Modèle dit cinématique | 13 |
| 1. | .2 | Défaut de forme | 13 |
| | 1.2.1 | Notion de défaut de forme | 13 |
| | 1.2.2 | Passage du continu au discret | 14 |
| 1. | .3 | Défaut de circularité | 15 |
| | 1.3.1 | Définition normalisé de la circularité | 15 |
| | 1.3.2 | Méthode de mesure classique | 16 |
| | 1.3.3 | Permutation circulaire | 16 |
| | 1.3.4 | Propagation circulaire | 17 |
| | 1.3.5 | Utilisation d'un étalon circulaire | 17 |
| 1. | .4 | Défaut de rectitude | 18 |
| | 1.4.1 | Définition normalisée de la rectitude | 18 |
| | 1.4.2 | Retournement | 19 |
| | 1.4.3 | Propagation | 21 |
| 2 | Unif | ication des méthodes de séparation | 28 |
| 2. | .1 | Concept de séparation | 28 |
| 2. | .2 | De la permutation à la propagation : un concept unique | 30 |
| 3 | Prop | agation | 32 |
| 3. | .1 | Notations signes et unités | 32 |
| | 3.1.1 | Signes | 32 |
| | 3.1.2 | Unités | 33 |
| 3. | .2 | Méthode globale | 33 |
| | 3.2.1 | Mise en équations | 33 |
| | 3.2.2 | Pondération | 35 |
| | 3.2.3 | Interprétation et utilisation du paramètre L | 39 |

| 3.3 | Méthode « à niveau prépondérant » | 40 |
|------|---|----|
| 3.4 | Méthode « à capteurs prépondérants » | 41 |
| 3.4 | I.1 Calage de la courbure globale | 41 |
| 3.4 | 1.2 Résultats | 42 |
| 4 Co | onclusion : Choix du calage de la courbure, du nombre de capteurs | 44 |

1 Introduction et bibliographie

L'objet de ce chapitre est de mettre en place les méthodes permettant d'estimer le défaut de forme de pièce circulaire ou plane avec des incertitudes de l'ordre de quelques nanomètres. Classiquement, l'évaluation d'un défaut de forme est réalisée en deux temps. Dans un premier temps, il s'agit de réaliser l'évaluation métrologique de la pièce. Dans un second temps, on analyse les écarts constatés sur la surface de la pièce comme le résultat de la somme d'un défaut de forme selon un critère à définir. La norme fournit une interprétation du défaut de forme qui consiste à choisir la position de la zone de tolérance par rapport à la surface de la position a un caractère arbitraire, il doit être fait de manière à maximiser la probabilité de déclarer la pièce conforme. Nous nous éloignerons de cette conception en définissant notre propre mesurande car nous ne souhaitons pas faire une déclaration de conformité mais disposer d'un profil utilisable dans le cadre de l'étalonnage de la table croisée.

Pour améliorer l'évaluation métrologique de la pièce, les méthodes proposées par les différents auteurs tiennent sur deux concepts de base. Le premier concept correspond à ce que Jean David (brevet Renault Automation de 1988) appelle la structure métrologique dissociée [LAH2007] qui consiste à remplacer les guidages traditionnels par une chaîne d'information utilisant des capteurs. Le second concept consiste à éliminer les défauts reproductibles de la machine de mesure en utilisant le concept de retournement (séparation par changement de signe) ou le concept de permutation que l'on peut étendre à la propagation comme nous le montrerons au paragraphe 2.2.

Pour modéliser les défauts des machines de manière linéaire, nous développons le concept de torseur de petits déplacements et présentons une étude bibliographique de la modélisation de la géométrie d'un axe de machine. Cette étude est utile tant pour le traitement du défaut de position de la pièce mesurée que pour la modélisation de la géométrie d'un axe de machine. Dans [ROD1840], Rodrigues introduit la formule, bien connue dans les cours de mécanique, de la rotation d'un corps solide dans l'espace. La lecture du document original nous a permis de mettre en évidence qu'Olinde Rodrigues a probablement été un précurseur dans l'introduction du concept de torseur de petits déplacements.

Pour mesurer la circularité ou la rectitude, les normes prévoient des dispositifs classiques dans les métrologies industrielles que nous présentons aux paragraphes 1.3 et 1.4. Le potentiel en termes d'incertitudes de ces moyens est de l'ordre de quelques dixièmes de micromètres au mieux. Nous présentons les méthodes de séparation et de permutation comme moyens de gagner un facteur 10 à 20. Dans le paragraphe 2, nous tentons une unification des différentes méthodes de séparation des défauts. L'idée est de montrer la continuité conceptuelle entre la permutation complète que Coorevits dans [COO90] avait qualifiée de « multiretournement » et la méthode de propagation que nous utilisons pour la rectitude.

La section 3 présente notre approche de la méthode de propagation appliquée à la métrologie de la rectitude d'un plan de référence destiné à la table croisée du LNE. Cette méthode utilise 4 capteurs capacitifs et deux niveaux électroniques. Nous proposons une mise en équations aboutissant à une optimisation globale au sens des moindres carrés permettant de qualifier le défaut de rectitude d'une ligne du plan, les défauts de rectitude et de tangage du porte-capteur

et la position relative des capteurs capacitifs. Les équations qui correspondent aux mesures des capteurs capacitifs forment des écarts au modèle dont l'unité est dérivée du mètre. Par contre, les équations provenant des mesures des niveaux électroniques forment des écarts au modèle dont l'unité est dérivée du radian. L'unité de la distance entre les capteurs est le millimètre (ici en pratique, la distance est de 20mm). La cohérence impose que les indications fournies par les capteurs et les indications angulaires multipliées par cette distance soient exprimées dans la même unité. Les différents choix possibles entre les unités changent les résultats. Nous montrons que ces choix se comportent comme une pondération entre les mesures issues des deux systèmes de mesure. C'est pourquoi nous introduisons une analyse au sens des moindres carrés pondérés en faisant apparaître un paramètre $=\frac{\sigma_{cap}}{\sigma_{niv}}$, en notant σ_{cap} l'incertitude-type sur les capteurs et σ_{niv} l'incertitude-type sur les niveaux. Le paramètre L est inconnu à ce niveau du travail. Il est lié à la qualité relative des capteurs par rapport aux niveaux. Compte-tenu du matériel que nous avons utilisé, nous avons choisi d'exprimer les indications des capteurs en nanomètres, les angles en microradians et les distances en millimètres. L'intérêt de ce choix étant que le nanomètre correspond à 10^{-9} mètre et que le produit d'un microradian par un millimètre correspond lui aussi à 10⁻⁹ mètre. C'est ce choix qui conduira dans la suite du travail à des paramètres L intéressants compris entre un et cent

La modification du choix des unités pour les indications des capteurs et des niveaux ne change pas le rapport physique entre les incertitudes. Le paramètre L sera modifié par une puissance de 10 consécutive au changement des unités qui compensent le changement des unités dans les équations. En conséquence, ces modifications n'auront aucun effet sur le profil

environ c'est-à-dire une échelle de variation facile à appréhender.

Le problème de l'évaluation des incertitudes sera traité en détail selon la méthode de Monte-Carlo au chapitre III. Cette évaluation permettra celle du paramètre L. Ce paramètre peut varier de zéro exclu à plus l'infini.

Lorsqu'il tend vers 0, cela correspond à des incertitudes faibles sur les capteurs et des incertitudes importantes sur les niveaux. La valeur 0 ne peut être atteinte car le système n'admet pas de solution. Dans ce cas, nous modifions les équations du système ce qui nous permet d'introduire une solution dite « à capteurs prépondérants ». De la même manière, quand L tend vers l'infini, la matrice des covariances pondérées est également singulière. Nous introduisons alors une solution dite « à niveaux prépondérants » correspondant à un autre système d'équations à résoudre au sens des moindres carrés.

L'évolution de L génère une famille de solutions. L'évaluation des incertitudes effectuée au chapitre III permettra d'optimiser l'apport des capteurs relativement aux niveaux de manière à minimiser l'incertitude sur le mesurande.

1.1 Etude de la position d'un solide

1.1.1 Analyse et hypothèses

Soit une glissière sur laquelle se translate un chariot (Figure 1). Le mouvement nominal de translation du chariot est repéré par une règle de lecture de déplacement.

Si on suppose que :

calculé.

- la règle est parfaite (au sens du rattachement aux étalons nationaux),

- la glissière est parfaitement réalisée et parfaitement rigide,

- le chariot parfaitement rigide glisse parfaitement sur la glissière, ...

Dans ces conditions, le chariot (donc l'ensemble des points constituant le chariot) subit un mouvement de translation pure de la valeur indiquée par la règle et dans la direction X.

La Figure 1 montre donc le chariot en position théorique et le chariot en position réelle sachant que l'hypothèse d'indéformabilité ne va pas de soi. Cette figure est classique.



Figure 1 : Schéma de la glissière et de son chariot

En pratique, pour chaque valeur de X indiquée, le chariot prend une position réelle différente de la position théorique. Ce chariot est d'ailleurs, éventuellement, déformé. Pour décrire le passage de la position théorique du chariot à la position réelle, on va faire d'une part l'hypothèse de l'indéformabilité du chariot (ou d'un élément de référence lié au chariot) et d'autre part, on s'appuie sur la constatation expérimentale que les défauts à mesurer sont faibles (de l'ordre de quelques dizaines de micromètres pour les translations et quelques dizaines de microradians pour les rotations). On peut alors décrire le passage de la position théorique du chariot à la position réelle comme un petit déplacement de corps solide soit, mathématiquement, un torseur de petits déplacements.

L'hypothèse d'indéformabilité du chariot peut paraître très restrictive, elle mérite un commentaire. L'idée est que le chariot est en fait un générateur de déplacements qui met en position un porte outil ou un porte pièce ou d'une manière générale un solide ; le chariot luimême n'a donc pas besoin d'être globalement indéformable, seul l'élément mis en place doit l'être.

Ce modèle est très intéressant car il permet de modéliser le déplacement d'un solide sous la forme d'un champ de moments décrit par un torseur. Il permet alors d'exprimer des déplacements combinant des translations et des rotations en disposant des propriétés de linéarité, de commutativité et d'associativité.

1.1.2 Mécanique du corps solide en petits déplacements

Dans sa publication de 1840 [ROD1840], Olinde Rodrigues fait une étude très complète du mouvement de corps solide, de la composition des mouvements de corps solides et du passage aux petits mouvements. Les notations modernes du produit vectoriel ou du torseur ne sont pas utilisées mais toutes les formules développées sont exactes et correspondent à une conception très actuelle de ces problèmes.

Un solide est un corps dont les différents points restent à des distances constantes les uns des autres au cours du mouvement. Il peut se mouvoir librement à sa position déterminée par la donnée de six paramètres (degrés de liberté) : la position d'un point (trois coordonnées) et trois angles qui, dans le cas général, sont les angles d'Euler (d'autres écritures sont possibles, par exemple dans la marine, les angles utilisés correspondent au changement de cap 'lacet', au tangage et au roulis).

Les déplacements, du fait des rotations forment, au sens mathématique du terme, un groupe <u>non commutatif</u> et des relations <u>non linéaires</u> rendent leurs manipulations relativement lourdes. Tout déplacement d'un solide autour de deux points fixes se réduit donc à une rotation d'égale amplitude et de même sens pour tous les points du système autour de l'axe formé par la droite passant par les deux points fixes.



Figure 2 : Etude de rotation autour d'un axe fixe

La Figure 2 représente la rotation d'un point (M) dans l'espace autour de l'axe \overrightarrow{Om} , sa trajectoire est dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation et est portée par le cercle centré en m et de rayon mM. L'angle θ envoie le point M sur le point M'. Il n'y a pas d'hypothèse de petit angle à ce niveau.

Dans le plan, on peut écrire les relations :

$$\vec{k} = \cos\theta \cdot \vec{i} + \sin\theta \cdot \vec{j} = \frac{\vec{m}\vec{M'}}{\|\vec{m}\vec{M'}\|} \qquad \text{où} \qquad \vec{i} = \frac{mM}{\|\vec{m}\vec{M}\|} \qquad \text{et} \quad \vec{j} = \vec{n} \wedge \vec{i}$$
$$\vec{m}\vec{M'} = \cos\theta \cdot \vec{i} \|\vec{m}\vec{M}\| + \sin\theta \cdot \vec{n} \wedge \vec{i} \cdot \|\vec{m}\vec{M}\|$$
$$\vec{m}\vec{M'} = \cos\theta \cdot \vec{m}\vec{M} + \sin\theta \cdot \vec{n} \wedge \vec{m}\vec{M}$$
$$\vec{m}\vec{O} + \vec{O}\vec{M'} = \cos\theta \cdot (\vec{m}\vec{O} + \vec{O}\vec{M}) + \sin\theta \cdot \vec{n} \wedge (\vec{m}\vec{O} + \vec{O}\vec{M})$$

Donc $\overrightarrow{OM'} = (1 - \cos\theta) \cdot \overrightarrow{Om} + \cos\theta \cdot \overrightarrow{OM} + \sin\theta \cdot \vec{n} \wedge \overrightarrow{OM}$ (1)

Pour un angle petit, on peut écrire : $\cos \theta \cong 1$, $\sin \theta \cong \theta$

$$\overrightarrow{OM'} = \overrightarrow{OM} + \theta \cdot \vec{n} \wedge \overrightarrow{OM}$$
$$\overrightarrow{MO} + \overrightarrow{OM'} = \theta \cdot \vec{n} \wedge \overrightarrow{OM}$$
$$\overrightarrow{MM'} = \theta \cdot \vec{n} \wedge \overrightarrow{OM}$$

Si on ajoute une translation du point O noté $\vec{\varepsilon}(O)$

$$\overline{MM'} = \overline{\varepsilon}(O) + \theta \cdot \overline{n} \wedge \overline{OM} = \overline{\varepsilon}(M)$$
(2)

Ordre de grandeur de l'approximation

Pour θ petit, on peut développer les fonctions sinus et cosinus de l'angle avec la théorie des séries de Taylor comme ci-dessous.

$$\sin(\theta) = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \dots = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n \frac{\theta^{2n+1}}{(2n+1)!}$$
$$\cos(\theta) = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \dots = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n \frac{\theta^{2n}}{(2n)!}$$

Dans le passage de l'équation (1) à la formule du transport de moment, le plus grand terme négligé est :

$$\frac{\theta^2}{2}\overrightarrow{Om} - \frac{\theta^2}{2}\overrightarrow{OM} = \frac{\theta^2}{2}\overrightarrow{Mm} \qquad \text{qui s'écrit en norme comme } \frac{\theta^2}{2}\|Mm\|$$

Où \overrightarrow{Mm} est le vecteur « bras de levier » donc $\left\|\overrightarrow{Mm}\right\|$ est la distance entre le point M et l'axe de rotation.

Pour préciser les ordres de grandeur, si on fait tourner un solide de 1 m d'un angle de 100 µrad qui est déjà important, cela fait $\frac{(10^{-4})^2}{2} \cdot 1 = 5nm$ ce qui signifie que la différence entre la nouvelle position théorique d'un point situé à un mètre de l'axe de rotation calculée par le torseur des petits déplacements est de l'ordre de 5 nm ce qui est négligeable.

Ce qui vient d'être écrit ne constitue pas une étude complète des limites du torseur de petits déplacements mais ce n'est pas le propos de ce chapitre.

1.1.3 Modèle dit cinématique

Si on reprend le schéma de la Figure 1 avec la mise en place d'un Torseur de Petits Déplacements (TPD) pour caractériser l'erreur de position du chariot, en chaque point M, on définit le moment du torseur par

$$\overrightarrow{\varepsilon(M)} = \overrightarrow{\varepsilon(O)} + \overrightarrow{\varpi} \wedge \overrightarrow{OM}$$

Il est classique de noter :

- $T_{ii}(x)$ la translation de l'axe i dans la direction j, soit :
 - $T_{xx}(x)$: justesse ou erreur relative de position
 - $T_{xy}(x)$: rectitude horizontale
 - $T_{xx}(x)$: rectitude verticale
- $\omega_{ii}(x)$ la rotation de l'axe i autour de l'axe j, soit :
 - $\omega_{xx}(x)$: roulis
 - $\omega_{xy}(x)$: tangage
 - $\omega_{xz}(x)$: lacet

La modélisation de la géométrie d'un axe de machine que nous venons de présenter sera utilisée pour modéliser le comportement géométrique du solide qui portera les capteurs lors du processus de mesure par propagation.

1.2 Défaut de forme

1.2.1 Notion de défaut de forme

On peut définir la notion de défaut de forme à partir de la notion de surface parallèle (Figure 3-a). On note M un point courant sur la surface S. On note \vec{n} le vecteur normal à la surface S en M (on suppose que l'existence de cette normale ne pose pas de problème) tel que \vec{n} soit normé et sortant à la matière. La surface S' dite surface parallèle à S est définie par son point courant M' tel que $\overline{MM'} = d \cdot \vec{n}$. Dans le cas général, une surface parallèle n'a pas la même nature que la surface originelle. Il existe quelques cas particuliers (sphère, cylindre, etc.) pour lesquels le passage de la surface S à sa surface parallèle est trivial.



Figure 3 : Représentation : (a) la notion de surface parallèle (b) la zone de tolérance

On peut maintenant définir une zone de tolérance autour d'une surface à partir de ce concept de surface parallèle. Considérons la surface pour laquelle on souhaite étudier le défaut de forme. Considérons une sphère dont le centre appartient à la surface à étudier, son diamètre est égal à la tolérance. Lorsque le centre de la sphère parcourt la surface S, on peut définir deux surfaces enveloppes (avec la convention de signe de la normale sortante) générées par la sphère (Figure 3-b), l'une, à l'intérieur de la matière, correspond à la surface parallèle définie par une distance d égale à moins le rayon de la sphère, l'autre correspond à la surface parallèle définie par une distance d égale à plus le rayon de la sphère.

Dans le cas d'une ligne plane (comme le cercle), on écrit les mêmes définitions dans le plan contenant la ligne. On retrouve ainsi la couronne que l'on utilise pour définir le défaut de circularité.

La zone définie par l'enveloppe des sphères est la zone de tolérance. Dans le cas des surfaces gauches, on place cette zone de tolérance selon les 6 degrés de liberté d'un mouvement de corps solide pour placer l'ensemble des points mesurés à l'intérieur de la zone.

Dans le cas des surfaces dites simples comme la sphère ou le cylindre, le principe d'indépendance qui sépare l'évaluation de la taille de l'évaluation de la forme conduit à utiliser un degré de liberté supplémentaire qui correspond à la taille.

1.2.2 Passage du continu au discret

Une rectitude est une ligne continue nominalement rectiligne dont on cherche à évaluer la forme et, le cas échéant, le défaut de forme au sens de la norme. La description exhaustive du défaut de forme nécessiterait la saisie d'une densité de points suffisante pour que l'information contenue dans le signal échantillonné soit la même que dans le signal continu. L'utilisation des méthodes d'élimination d'erreurs par permutation ou retournement ou les mesure par propagation impose de placer des capteurs à une distance qui peut être importante à cause des dimensions des capteurs. Dans notre travail, la distance est de 20mm, correspondant à l'entraxe de positionnement des capteurs dans le porte capteur mis en œuvre [LAH2007]. Un porte capteur permettant une distance de 10mm a été conçue par Ludovic LAHOUSSE mais n'a pas été utilisé. De toute façon, 10mm constitue encore un pas important mais inévitable compte-tenu de la technologie utilisée. Cette distance importante est une limite inévitable.

Pour diminuer l'incertitude correspondante, on pourrait envisager une technique de mesure complémentaire pour étudier les intervalles entre les points. Pour ne pas avoir à traiter ce problème, nous avons adopté un mesurande adapté (voir paragraphe 1.4.2).

1.3 Défaut de circularité

1.3.1 Définition normalisé de la circularité

La norme [NF EN ISO 1101] "Spécification géométrique des produits (GPS) - Tolérancement géométrique - Tolérancement de forme, orientation, position et battement", publiée en janvier 2006 constitue la base du tolérancement géométrique. Elle précise les notions fondamentales liées au tolérancement par zone. Suivant la spécification indiquée sur le dessin (Figure 4), *la zone de tolérance de circularité est limitée par deux cercles concentriques ayant une différence de rayons égale à t.*



Figure 4 : Représentation de la zone de tolérance

La norme [NF E 10-103] « Méthodes de mesurage dimensionnel : Quatrième partie - Ecarts de circularité » précise la définition de la circularité : *Qualité de ce qui est circulaire. Caractérise une ligne circulaire mais ne suffit pas à définir dans son ensemble une surface de révolution. Elle donne également la définition de la tolérance de circularité : Distance maximale admissible entre deux circonférences concentriques entre lesquelles être comprise la ligne considérée.*

Note : sur une même surface de révolution, la tolérance de circularité ne s'applique qu'à la ligne circulaire de chaque section prise séparément.

Rappel : spécification sur les dessins techniques de la tolérance de circularité t (selon NF E 04-552)



Il existe des méthodes classiques de mesurage, décrite dans la norme, qui peuvent être enrichies de technique d'élimination d'erreurs par permutation, ou adapter à la mesure de grande pièce en introduisant de la propagation.

1.3.2 Méthode de mesure classique

La norme [NF E 10-103] présente les méthodes de mesurage des écarts de circularité et leur exploitation. Nous présentons suivant les deux mesurages qui sont connus dans le domaine industriel de la production pour l'inspection des pièces et dans la recherche les défauts de la machine.

Mesurage des écarts de circularité par la méthode de variation de rayon

Ces méthodes utilisent des capteurs tournants ou des plateaux tournants (Figure 5). Après avoir dégauchi la pièce par rapport à l'axe de rotation (référence des mesures), le principe consiste à déterminer les variations radiales dans une même section sur une révolution complète, et de répéter opération au nombre requis de sections.

Cette méthode peut - selon le matériel utilisé - permettre des relevés en continu. Par son principe, elle est la meilleure approche du défaut de circularité couplée à une méthode de calcul du défaut de forme en tant que zone minimale.



Figure 5 : Méthode de variation de rayon : (a) Capteur tournant (b) pièce tournante [NF E 10-103]

Mesurage des écarts de circularité par relevés de coordonnées de points.

Cette méthode consiste à relever les coordonnées des points d'une section à l'aide d'une machine à mesurer bi - ou tri - dimensionnelle. Il est recommandé que l'axe de la pièce soit perpendiculaire aux deux axes de mesure de la machine, afin d'assurer le palpage dans une section droite de la pièce.

Cette méthode, étant fondée sur un nombre de relevés de valeurs discrètes dans une même section, ne donne qu'une estimation de l'écart de circularité. Cette estimation est d'autant plus fine que le nombre de points est adapté à la nature des défauts et ce, dans les limites de l'incertitude de mesure des coordonnées.

1.3.3 Permutation circulaire

La technique de permutation est utilisée principalement pour la mesure de pièces par relevés de coordonnées de points présentant un axe de symétrie : une forme circulaire ou une roue

dentée par exemple. La procédure consiste à mesurer la pièce N fois en faisant tourner de $\frac{2\pi}{N}$ tour entre chaque mesure complète de la pièce.

Lorsqu'on réalise une mesure, on obtient N écarts qui sont la somme de trois classes d'erreurs :

- Les écarts dus à la géométrie de la machine.
- Les écarts dus à la différence entre la géométrie théorique de la pièce et sa géométrie réelle.
- Les écarts liés aux défauts de positionnement de la pièce dans l'espace machine.

Après rotation de $\frac{2\pi}{N}$ radians, le premier point vient dans la position du second (en espace machine), la pièce ayant repris nominalement la même position, les défauts machine à prendre en compte sont identiques d'une mesure complète de la pièce à l'autre.



Figure 6 : Mesure par permutation [COO1990]

La Figure 6 montre une illustration simple pour comprendre cette technique.

- les points désignés par des chiffres (1, 2, 3 ou 4) sont en espace pièce
- les points désignés par des lettres (a, b, c, ou d) sont en espace machine

Ainsi, si la pièce tourne de $\frac{2\pi}{N}$ radians N fois, on a N² équations qui permettent à déterminer la géométrie de la pièce et celle de la machine en utilisant une technique présentée dans [COO1990].

1.3.4 Propagation circulaire

La technique de propagation circulaire consiste généralement à disposer les capteurs fixes en périphérie de la pièce et mesurer plusieurs fois la pièce après l'avoir tournée d'un angle donné entre chaque mesure. [WHI1976] [GAO1997-a] [GAO1997-b].

1.3.5 Utilisation d'un étalon circulaire

Nous sommes ici dans une autre logique, on suppose que l'on dispose d'un étalon de circularité. La bibliographie sur l'analyse de mesures de formes circulaires est relativement

bien fournie [KNA1983-a] [KNA1983-b] [KUN1983] [PAH1995] [HEN2007]. Les auteurs mesurent des étalons circulaires de type bagues, MCG, Ball bar, ... et en déduisent les défauts de la machine.

1.4 Défaut de rectitude

Comme pour la circularité, la mesure d'un défaut de rectitude peut relever de méthodes classiques décrites dans les normes mais également d'autres techniques avec ou sans élimination d'erreurs.

1.4.1 Définition normalisée de la rectitude

La norme [NF EN ISO 1101] précise les notions fondamentales liées au tolérancement par zone. Suivant la spécification indiquée sur le dessin, la zone de tolérance peut être limitée :

- par deux droites parallèles, projetées sur un plan, la tolérance correspond alors à la distance entre ces deux droites,
- par deux plans parallèles, la tolérance correspond alors à la distance entre ces deux plans,
- par un cylindre, la tolérance correspond alors au diamètre de ce cylindre.

Cette norme est basée sur le concept de zone minimale [CHE1996] [GOU1999] [ZHA1999].

La norme [NF E04-560] précise la définition de la tolérance de rectitude: *Dimension maximale admissible de la zone de tolérance dans laquelle doit se situer la ligne considérée.*

La norme [NF E 10-101] « Méthodes de mesurage dimensionnel : Deuxième partie - Ecarts de rectitude » présente les méthodes de mesurage des écarts de rectitude. Elle donne également des indications sur l'exploitation des résultats.

Pour le mesurage des écarts de rectitude spécifiés dans un plan, elle propose deux méthodes de mesurage.

La première méthode dite « mesurages directs » : les écarts sont exprimés directement en unités de longueur, par rapport à la référence de mesurage considérée (exemples : fil tendu (Figure 7-a), règle, cylindre ou faisceau optique (Figure 7-b).



Figure 7 : Schématisation des mesurages directs [NF E 10-101]

La seconde méthode dite « mesurages indirects » : les écarts sont exprimés en unités de longueur après transformation d'une indication angulaire (exemple : niveau électronique (Figure 8-a), lunette autocollimatrice, interféromètre à comptage de franges avec option angle (Figure 8-b) en déplaçant successivement l'équipement de mesure d'un pas (l) le long de la ligne ou génératrice).



Figure 8 : Schématisation des mesurages indirects [NF E 10-101]

Ces méthodes sont également utilisées dans le domaine industriel de la production pour l'inspection des machines d'usinage [SAK1987] [FAN2000] [MAG2006] [ARD2008] par exemple.

Dans les publications [KIY1994] [GAO1996-a], les auteurs indiquent une méthode qui utilise deux capteurs mais ils font l'hypothèse de l'absence de tangage du porte-capteur. Le principe conduit à mesurer la différence d'altitudes entre deux points successifs du profil (ce qui élimine l'effet de la rectitude du porte capteur ce que remarque les auteurs), en fait, il s'agit d'une méthode similaire à l'utilisation du niveau électronique en ce sens que l'on a une propagation sur deux points mais sans la référence à la verticale terrestre ce qui n'est pas correct et conduit les auteurs à faire l'hypothèse de l'absence de tangage du porte-capteur ce qui n'a pas de portée pratique.

Le corpus normatif concernant la rectitude est peu pertinent pour notre application (référence verticale de la table croisée) car :

- Le mesurande basé sur le concept de la zone minimale est adapté à un besoin de déclaration de conformité des produits [NF EN ISO14253-1] mais il a l'inconvénient de s'appuyer sur les points extrêmes du profil et de réduire l'information contenue dans le profil à un chiffre unique qualifié de « défaut de rectitude ».
- Les méthodes de mesure proposées par les normes sont bien connues, mais elles assurent des incertitudes au mieux de l'ordre du micromètre.

Nous proposons une définition du mesurande qui concerne le profil complet et qui évite de s'appuyer sur les points extrêmes.

1.4.2 Retournement

La méthode de retournement a été déclinée de différentes façons (Figure 9) : méthode du retournement de l'angle (a), méthode du retournement du carré (b), méthode des trois rectitudes (c) et méthode des trois plans (d). Ces méthodes relèvent d'un changement de signe. La méthode des trois plans (et des 3 rectitudes) utilise une surface intermédiaire mais relève de la même logique. Si on note M1=A+B pour exprimer qu'avec les conventions de

signe, la première mesure fournit la somme des défauts des plans A et B et, de la même manière, M2=A+C et M3=B+C alors M2-M3=A-B qui avec M1=A+B permet de déterminer les défauts de A et B et constitue un retournement.





Figure 9 : Les méthodes du retournement [EVA1996] [BUR]

Ces techniques sont toutes caractérisées par une manipulation mécanique en ce qui concerne un (mais pas tous) les degrés de liberté vis-à-vis de la direction sensible de l'indication de mesure. Cette opération change le signe d'une composante de l'erreur.

Pour mesurer une ligne, la méthode dite du retournement est basée sur l'utilisation d'un seul capteur. Whitehouse dans [WHI1976] [CAM1995] propose deux mesures faisant apparaître ainsi un changement de signe ce qui permet la séparation de l'erreur de la machine de celle du profil.



Figure 10 : Schématisation du principe du retournement [GIA2004]

Cette méthode est connue depuis de nombreuses années et fait partie des méthodes de comparaison à une référence "dématérialisée" utilisée par l'abbé CAYERE [CAY1953] [CAY1956]. On trouve la description d'une méthode de retournement dans l'encyclopédie de Diderot et d'Alembert au chapitre ébénisterie pour vérifier la rectitude d'une règle.

Pour traiter correctement la rectitude, il faut bien mettre en place les conventions de signe (Figure 10) :

- G(x) est la rectitude du guidage, G(x) est positif si le chariot s'avance dans le sens de l'axe Y
- R(x) est la rectitude de la règle, R(x) est positive si la règle présente une bosse (cette convention est d'ailleurs conforme à la normalisation qui veut qu'un excès de matière soit compté positivement)
- Si la tige du comparateur rentre à l'intérieur du corps, l'indication du comparateur I(x) est positive

Avec ces conventions, la Figure 10-a indique une première indication I1(x)=G(x)+R(x) et la Figure 10-b indique I2(x)=-G(x)+R(x), le résultat final est obtenu par demi-somme et demi-différence.

Cette méthode nécessite des précautions expérimentales importantes tant dans le retournement de la règle qu'au niveau de l'état de surface de règle, il est en particulier impossible de mettre en œuvre correctement cette méthode avec une règle grattée ou une règle en granit à cause de l'état de surface qui nécessite une qualité de repositionnement impossible à obtenir en pratique [HEN2007]. Dans le retournement de la règle, la Figure 10 indique en particulier la nécessité de respecter l'alignement des comparateurs entre les deux positions, la rectitude étant exprimée sur cette ligne (Principe d'Abbe).

En pratique, c'est une mesure délicate à mettre en œuvre si l'on souhaite étudier une rectitude de quelques micromètres ou moins mais tout à fait efficace. La mise en œuvre du retournement qui impose, par nature, de bouger les éléments à évaluer rend cette méthode difficile à utiliser si on vise une incertitude de quelques nanomètres.

1.4.3 Propagation

1.4.3.1 Définition du mesurande

En métrologie, la première étape d'un calcul d'incertitudes consiste à définir le mesurande avec une finesse d'autant plus grande que l'on souhaite un niveau faible d'incertitudes.

On peut considérer une surface d'une pièce comme la limite entre la matière et le milieu environnant. Un profil de rectitude est donc la ligne continue obtenue comme l'intersection entre cette surface et un plan. Cette définition n'est pas satisfaisante dans le cadre de la métrologie d'une rectitude d'un plan destiné à servir d'étalon à la table croisée. Plutôt que d'énoncer les raisons pour lesquelles cette définition n'est pas opérante, nous allons faire des propositions.

Il est logique de palper les points dans les mêmes conditions lors de la phase d'étalonnage du plan que lors de son utilisation, soit :

- «Chaque point est atteint grâce à un capteur capacitif présentant une zone utile de 6mm de diamètre » [LAH2005-b]. Un point est donc le résultat de l' « intégration » de la microgéométrie par le capteur capacitif ou plus précisément, nous définissons un point comme la réponse de la surface au capteur capacitif et non comme un point de la surface physique
- Le porte capteur utilisé possède un entraxe de 20 mm. La mesure par propagation impose un pas de décalage de 20 mm. Le profil est donc défini uniquement aux points effectivement mesurés (tous les 20 mm). Le fait de définir le mesurande sur les points mesurés uniquement et non sur une ligne continue évite la question de l'application du théorème d'échantillonnage de Shannon. Le plan est usiné avec des défauts locaux de l'ordre du micromètre, ce qui est très bien pour un fraisage, mais correspond à un rapport entre le défaut (1µm) et l'incertitude recherchée (de l'ordre de 10 nanomètres) de l'ordre de 100. L'incertitude générée par une définition du mesurande sur une ligne serait prépondérante et ne permettrait pas une analyse fine du reste du processus.

Note : Pour aller plus loin, on ne peut qu'aboutir à la conclusion qu'il serait nécessaire d'utiliser d'autres techniques de finition du plan et de réaliser une mesure locale (entre deux points de mesure donc 20mm) de la forme pour aboutir à une caractérisation plus exhaustive du plan. Ce point n'a pas été abordé dans ce travail.

Il faut compléter le mesurande par la définition des grandeurs d'influence : « conformément, à la norme [NF EN ISO 1], la température de référence est de 20°C. Nous considérons l'hygrométrie comme sans effet ».

En fait, la température peut avoir un effet sur les capteurs mais pour une rectitude, c'est l'existence d'un gradient de température, en particulier d'une différence de température entre le dessus et le dessous du plan, qui est la source d'incertitude importante.

1.4.3.2 Principes

Le principe conduit à utiliser des capteurs équidistants permettant la mesure de différences d'altitude entre points voisins et d'exploiter cette mesure par une technique de séparation d'erreur.

Pour supprimer l'influence du tangage du porte-capteur, un système équipé avec trois capteurs distant a été introduit [GAO1996-b].

Cette technique permet de s'affranchir des mouvements parasites de déplacement de la matrice porte capteurs.

Une méthode, très simple, dans son principe consiste à présenter en face de la surface à mesurer un solide portant trois capteurs alignés et espacés de la même distance [LI1996] [PAZ2007]. On montre que dans ces conditions, la méthode avec trois capteurs distants peut permettre de calculer à la fois l'erreur de translation (rectitude) et l'erreur de tangage du guidage du porte-capteurs.

Il est toutefois nécessaire de connaître la position relative des trois capteurs, ce qui peut se traduire par le fait de considérer une droite passant par les deux capteurs extrêmes et chiffrer

l'écart entre le capteur central et cette droite. La position relative du capteur central n'est pas ou mal connue. Ceci introduit un biais systématique sur la courbure globale qui est très sensible.

On trouve dans [GAO2002-a] l'influence de cette erreur pour un système avec 3 capteurs. Il y est défini α ($\alpha = e_{m3} - 2e_{m2} + e_{m1}$) comme paramètre de l'erreur d'alignement des capteurs. Théoriquement, α peut être mesuré par comparaison avec une référence de planéité comme dans la Figure 11-a. En pratique, cependant, cette méthode est difficile et elle apporte une incertitude finale assez grande sur la forme du profil.



Figure 11 : (a) détermination du zéro utilisant une surface de référence de précision, (b) influence de la détermination du zéro sur le profil de la rectitude [GAO2002-a]

En effet, le calage de la position relative du capteur central (Figure 11-a) n'est pas efficace pour la mesure d'une longue rectitude car l'erreur est de type parabolique car proportionnelle au carré de la longueur de mesure (Figure 11-b). Cette incertitude est alors la cause prépondérante d'incertitudes dans la méthode.



Figure 12 : Erreur sur le profil d'évaluation [GAO2002-a]

La Figure 12 montre que pour mesurer une rectitude d'un profil de 600 mm de long, une erreur d'ajustement de ($\Delta \alpha$) de 10 nm va engendrée une erreur de flèche parabolique de 4.5 µm (4500 nm) pour des capteurs espacés de 10 mm. De même, pour des capteurs espacés de 50 mm l'erreur sera de 0.18 µm (180 nm).. Ce résultat montre l'extrême sensibilité de ce paramètre. Néanmoins une incertitude de positionnement relatif des capteurs de 10 nm est nettement plus difficile à obtenir pour un pas de 50 mm que pour un pas de 10 nm. Les solutions proposées dans cette publication sont basées sur une technique de retournement pour déterminer cette grandeur mais cette solution n'est pas adaptée à notre problème.

Pour pallier à ce problème, il faut ajouter une information supplémentaire qui fournisse la possibilité de supprimer ce biais de la courbure. Plusieurs auteurs [YIN2005] [YIN2006] [KUM2006] ont proposé un système à au moins trois capteurs avec une indication de l'angle de tangage du porte-capteur.

Une amélioration de cette procédure peut être trouvée en multipliant le nombre de capteurs. Cette évolution rend les mesures redondantes et « autovérifiantes ». Elle ne lève cependant pas pour autant l'incertitude sur l'existence d'une composante circulaire et elle ne dispense pas d'une mesure complémentaire.



Figure 13 : Dispositif pour la propagation N capteurs avec lunette autocollimatrice [SCH2005]

Dans [SCH2005], le Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) présente la méthode multi-distance (interféromètre) avec une lunette autocollimatrice dite Traçables Multiples Sensor System (TMS). La Figure 13 montre une schématisation d'un dispositif expérimental possible. Un miroir est lié au système de capteurs distants. Une lunette autocollimatrice est utilisée pour mesurer la position angulaire du porte-capteurs. La lunette autocollimatrice et la pièce sont fixées à la table. Lorsque le système de capteurs distants se déplace le long de la pièce avec le miroir, la lunette autocollimatrice mesure l'inclinaison de la partie mobile du porte-capteurs à chaque position.



Figure 14 : Dispositif pour la propagation N capteurs avec lunette autocollimatrice [LIU2009]

Aujourd'hui, dans l'industrie des semi-conducteurs « photorésistant », il est nécessaire d'avoir un dispositif qui permette de mesurer verticalement la planéité avec une résolution nanométrique sans dégrader le film lors de la mesure. Liu [LIU2009] a développé un dispositif (Figure 14). Son document décrit une approche utilisant un « multi-cantilever ball » comme capteurs distants avec également une lunette autocollimatrice comme dispositif d'angle supplémentaire de mesure. En utilisant cette méthode, les auteurs annoncent des incertitudes de l'ordre de ± 30 nanomètres sur une longueur de 11.25 mm.

1.4.3.3 Mise en équations issue de la bibliographie

L'article de Weingärtner [WEI2004] est probablement la première publication proposant une méthode de propagation pour réaliser une rectitude avec des incertitudes nanométriques. L'auteur propose un système de n capteurs équidistants et il écrit les équations correspondantes puis réalise l'ensemble des simulations sur 3 et 4 capteurs.

D'une façon générale, on considère « n » capteurs repérés par l'indice « i » séparés de « d » millimètres, alignés et fixés sur un solide appelé le porte-capteur. Le parcours du profil à mesurer est réalisé par « p » positions successives du porte capteur repérées par l'indice « j ». La topographie de la pièce est acquise avec p+n-1 points mesurés équidistants.

Dans la Figure 15, la position de balayage x_j est définie comme la position à l'extrême bord gauche du porte-capteurs. $s_i = i - 1$ est la position du capteur *i* par rapport au premier capteur. Les positions des *n* capteurs équidistants sont repérées par l'indice $j + s_i$ dans l'espace pièce pour chaque pas de mesure.

Pour chaque position du porte capteur, il existe des défauts de guidage du porte-capteurs : erreur de translation (T_i) et de tangage (R_i) .



Figure 15 : Schéma de principe pour N capteurs distants

Les mesures à chaque position du porte-capteurs sont des variations de distance par rapport à l'élément à mesurer : la valeur relevée par le capteur *i* à la j^{eme} position de balayage est notée m_{ij} .

Les inconnues sont les points du profil (f_{j+si}) la position verticale de déplacement du porte capteur (T_j) et sa rotation (R_j) et l'écart de position du capteur *i* à la position de balayage *j* (ε_{ij}) . Cette erreur ε_{ij} est la somme d'un écart systématique lié à la position du capteur dans le porte capteur et d'un écart aléatoire que l'auteur [WEI2004] choisit de cumuler avec la
position du capteur. La mise en place du porte-capteurs est décrite par l'ensemble d'équations ci-dessous.

$$m_{ij} = -f_{j+si} + T_j + R_j s_i d + \varepsilon_{ij}$$
 $i = 1,...,n$ $j = 1,...,p$ (3)

Dans cette équation, l'auteur introduit l'écart ε_{ii} qui correspond a à une erreur due au fait que

les 4 capteurs ne sont pas parfaitement alignés et une erreur provenant de l'incertitude sur l'évaluation des distances par les capteurs. Nous ne partageons pas cette approche dans la mesure où le fait que les capteurs ne soient pas alignés n'est pas à proprement parlé une incertitude. C'est la méconnaissance de l'alignement exact qui est une source d'incertitude.

Mathématiquement, si les écarts ε_{ij} sont nuls, la reconstruction exacte de la topographie est possible. Si les écarts des mesures sont sans biais systématique, gaussiens et indépendants, un traitement statistique par la méthode des moindres carrés permet de connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée et ainsi de fixer les limites de l'incertitude.

La source principale d'incertitude correspond à l'incertitude sur la connaissance du défaut d'alignement des capteurs. Ce défaut s'exprime en prenant deux capteurs en référence. Par conséquent, les défauts d'alignement des N-2 autres capteurs sont exprimés par rapport à ces deux capteurs pris en référence. Un choix pratique consiste à prendre les capteurs des extrémités. Cette incertitude provient d'un étalonnage imparfait (voir chapitre II).

Pour les simulations, les auteurs ont imposé un diamètre de la pièce de 300 mm. Ils séparent les écarts de position des capteurs en deux parties.

La première partie consiste en erreurs aléatoires $\varepsilon_{i,i}$ (distribution gaussienne de moyenne

nulle et variance σ^2). La seconde partie consiste en écarts de position systématiques simulés par un choix arbitraire pour chaque capteur e_{mj} , j = 1,..., M (distribution gaussienne de moyenne nulle et de variance σ^2). Ces écarts sont qualifiés de systématique en ce sens qu'ils restent constants tout au long de la mesure. Ceci est donc très pénalisant dans le cadre d'un processus de propagation. Les écarts de position $\varepsilon_{i,j}$ des capteurs ont été fixés tels que $\varepsilon_{i,j} = e_{mj}$ pour tous les i, c'est à dire, que l'écart pour chaque capteur reste le même pour

toutes les positions de mesure.

La qualité de la reconstruction de la topographie est chiffrée par l'écart-type normalisé

$$\delta = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left(\hat{f}_i - f \right)^2} .$$

| N | $\Delta x \text{ (mm)}$ | Three-sensor system configuration | $D_3 \ (mm)$ | Four-sensor system configuration | $D_4 \text{ (mm)}$ |
|-----|-------------------------|-----------------------------------|--------------|--|--------------------|
| 20 | 15 | $(k_1, k_2, k_3) = (0, 1, 2)$ | 30 | $(k_1, k_2, k_3, k_4) = (0, 1, 2, 3)$ | 45 |
| 40 | 7.5 | $(k_1, k_2, k_3) = (0, 1, 2)$ | 15 | $(k_1, k_2, k_3, k_4) = (0, 2, 3, 6)$ | 45 |
| 60 | 5 | $(k_1, k_2, k_3) = (0, 1, 2)$ | 10 | $(k_1, k_2, k_3, k_4) = (0, 4, 5, 9)$ | 45 |
| 80 | 3.75 | $(k_1, k_2, k_3) = (0, 1, 2)$ | 7.5 | $(k_1, k_2, k_3, k_4) = (0, 6, 7, 12)$ | 45 |
| 100 | 3 | $(k_1, k_2, k_3) = (0, 1, 2)$ | 6 | $(k_1, k_2, k_3, k_4) = (0, 6, 7, 15)$ | 45 |
| 140 | 2.14 | $(k_1, k_2, k_3) = (0, 1, 2)$ | 4.29 | $(k_1, k_2, k_3, k_4) = (0, 7, 12, 21)$ | 45 |
| 200 | 1.5 | $(k_1, k_2, k_3) = (0, 1, 2)$ | 3 | $(k_1, k_2, k_3, k_4) = (0, 15, 19, 30)$ | 45 |
| 300 | 1 | $(k_1, k_2, k_3) = (0, 1, 2)$ | 2 | $(k_1, k_2, k_3, k_4) = (0, 9, 27, 45)$ | 45 |
| 500 | 0.6 | $(k_1, k_2, k_3) = (0, 1, 2)$ | 1.2 | $(k_1, k_2, k_3, k_4) = (0, 22, 48, 75)$ | 45 |

Sensor systems with sensor positions $s_j = k_j \Delta x$ used for the tests

The lateral extension of the artifact was 300 mm, N denotes the number of scan positions, Δx is the scan step, D_3 is the total size of the three-sensor system, and D_4 is the total size of the four-sensor system.

Tableau 1 : Liste des systèmes de capteurs utilisés [WEI2004]

Le Tableau 1 fournit la liste des systèmes de capteurs utilisés pour les simulations. Divers paires de systèmes de capteurs de trois et de quatre capteurs ont été étudiées. Les configurations présentant de bonnes performances vis-à-vis de l'erreur de propagation ont été choisies.

La conception des systèmes dépend de la largeur Δx choisie pour la matrice du porte-capteur. La valeur de Δx varie entre 0,6 et 15 mm. Tous les systèmes de capteurs permettent la reconstruction de la topographie exacte dans le cas où il n'y a pas d'erreur soit $\varepsilon_{i,j} = 0$.



Figure 16 : Ecart-type normalisé ' δ ' en ajoutant, (a) erreur aléatoire, (b) erreur systématique. N est nombre de la position de balayage. Cercle noir : le système utilise trois capteurs équidistants. Cercle blanc : le système utilise quatre capteurs équidistants [WEI2004]

Sur la Figure 16, nous remarquons que l'écart-type normalisé δ augmente considérablement avec le système utilisant trois capteurs distants (cercle noir) lorsque le nombre de position de balayage augmente. Avec les quatre capteurs distants (cercle blanc), l'écart-type normalisé δ diminue lorsque le nombre de position de balayage augmente. Ceci justifie l'utilisation d'au moins 4 capteurs. La Figure 16 montre également que les écarts systématiques (au sens ci-dessus) sont beaucoup plus sensibles sur la qualité du profil que les écarts aléatoires.

L'équation (3) est réécrite en changeant de point de vue. Si l'écart ε_{ij} est supposé correspondre à l'écart de position relative des capteurs, c'est-à-dire que les ε_{ij} sont fixés égaux à e_{mi} pour chaque capteur et qu'ils sont constants pour toutes les positions de balayage alors il vient l'équation (4) ci-dessous.

$$m_{ij} = -f_{j+si} + T_j + R_j s_i d + e_{mi} \qquad i = 1, ..., n \quad j = 1, ..., p \qquad (4)$$

En fait, les résidus correspondent à la différence entre les deux membres de l'équation (4). Nous devons introduire des informations supplémentaires pour résoudre ce système d'équations. Il est envisageable de chercher à mesurer directement les valeurs de e_{mi} . Ces mesures sont très délicates. Les incertitudes correspondantes seraient amplifiées par la propagation. La seule solution pratique est d'ajouter une mesure d'angle. Il a donc été choisi d'ajouter une lunette autocollimatrice pour mesurer le tangage du porte capteur comme dans [ELS2006] [LIU2009].

A chaque position, l'indication du mesureur d'angle est notée N_j . Une inconnue notée R_0 est introduite. Elle correspond au calage angulaire du porte-capteur par rapport au zéro de l'angle indiqué. Ainsi il vient

$$N_i = R_0 + R_j \tag{5}$$

Les équations (5) complètent les équations (4). Elles rendent le système résoluble sans biais de courbure.

2 Unification des méthodes de séparation

La méthode de retournement consiste à provoquer un changement de signe pour séparer les erreurs. Les méthodes de permutation ou de propagation ajoutent alors des équations en « mélangeant » les inconnues. Dans ce paragraphe, nous tentons de réaliser un passage de la permutation complète, aussi appelée « multiretournement » dans [COO1990], à la propagation sur une rectitude.

2.1 Concept de séparation

En métrologie, le concept de base consiste à mettre en place une chaîne d'étalonnage pour relier le mesurage que l'on est en train de réaliser et l'étalon primaire correspondant. Pour toutes les grandeurs qui relèvent d'une convention, ce concept est incontournable. Ainsi, le raccordement au mètre est indispensable lors de l'évaluation d'une pièce d'une dimension nominale de un mètre. Il est d'ailleurs intéressant de noter que la convention de 1790 aurait pu choisir une autre définition du mètre ce qui ne changerait rien à notre façon de travailler. Nous « vivons à une homothétie près ».



Figure 17 : passage d'un référentiel matériel donc imparfait à un référentiel « idéal »

En métrologie dimensionnelle, ce concept de raccordement à une valeur conventionnelle mérite d'être affiné. Imaginons un repère constitué de deux règles, on s'intéresse au repérage d'un point dans le plan grâce à ces « règles » (Figure 17). Il faut s'assurer que ces règles sont rectilignes, orthogonales, qu'elles présentent la même métrique et que la dite métrique est celle du mètre. Seul ce dernier point relève du raccordement.

Les métrologues ont identifié, de longue date, trois types de méthodes pour l'évaluation des formes et des métriques :

- Les méthodes de permutation qui s'appuient sur l'hypothèse de la reproductibilité des mesures pour séparer les erreurs liées à l'instrument de celles liées à la pièce. L'analyse de ces méthodes fait apparaitre des constantes qui aboutissent à l'idée que l'on mesure moins des positions que des écarts. L'analyse de l'hypothèse de reproductibilité aboutit à l'idée que les défauts de géométrie de la machine et/ou de la pièce doivent être suffisamment « lisses » et fournir des écarts correctement évalués « localement ».
- Les méthodes de retournement qui consistent également à faire l'hypothèse de la reproductibilité des mesurages et à faire apparaître un changement de signe qui permettra de séparer les écarts de l'instrument des écarts de la machine. Il faut malgré tout réaliser le rattachement des comparateurs utilisés mais cette méthode permet de passer du raccordement d'un comparateur sur une petite course à la connaissance de la forme d'un objet macro géométrique.
- Les méthodes de propagation qui ont la même nature que les méthodes de permutation. En effet, une propagation peut être considérée comme une permutation incomplète.

Ces méthodes permettent sous hypothèse de reproductibilité et d'étalonnage d'un comparateur à faible course d'étudier complètement la géométrie d'une machine à un coefficient homothétique près correspondant à la convention du mètre.

L'évaluation des angles fournit également des méthodes intéressantes. L'angle, qui s'exprime en radian, est un rapport entre deux longueurs. C'est une caractéristique adimensionnelle qui n'est pas sensible à la convention du mètre. Les méthodes pour évaluer les angles peuvent relever de deux idées. La première idée consiste à écrire l'angle comme un rapport de longueur. La seconde idée consiste à écrire qu'un tour complet sur un cercle représente 2π radians et qu'il « suffit » de diviser le cercle.

De nombreuses techniques ont été développées dans le cadre de ce que l'Abbé Cayère appelait la métrologie intellectuelle [EVA1996-b].

2.2 De la permutation à la propagation : un concept unique



Figure 18: Permutation circulaire complète

La Figure 18 correspond à la permutation circulaire complète [COO1990] d'un système à 16 capteurs qui se généralise aisément. Entre deux positions, on réalise $1/16^{\circ}$ de tour. Les équations qui décrivent la permutation présentent :

- 16 inconnues correspondantes à la géométrie de la bague aux 16 points considérés et qui ont la nature d'écarts suivant la normale,
- 16 inconnues correspondantes à la position des capteurs
- 32 inconnues de position du porte-capteur circulaire (2 pour chaque position de mesure).

On montre qu'une simple méthode de moyenne et de moyenne avec permutation circulaire des équations suffit à calculer l'ensemble des inconnues à une constante près. Cette constante s'interprète d'ailleurs comme le rattachement au mètre. La position relative de la bague et du porte capteur correspondent « naturellement » au sens de « sans autre calcul » à la position suivant le critère des moindres carrés. Cela est lié à la forme de la matrice de covariance à inverser pour calculer un cercle au sens des moindres carrés lorsque les points sont régulièrement répartis. Les seuls termes non nuls se trouvent sur la première diagonale.



Figure 19 : Permutation circulaire incomplète en position

Une première « dégradation » de la procédure de mesure précédente consiste à ne pas mesurer toutes les positions (Figure 19). Si on note P, le nombre de positions, on a $2 \cdot 16 + 2P$ inconnues et 16P équations. Pour pouvoir résoudre, il faut au minimum avoir $2 \cdot 16 + 2P > 16P$ soit P > 32/14. Il faut donc au moins 3 positions pour pouvoir résoudre. Le système linéaire associé relève alors d'une résolution au sens des moindres carrés. Ce système n'est pas inversible à cause de la prise en compte du rattachement au mètre et de la position

soit de la bague soit du porte capteur qu'il faut gérer en ajoutant trois contraintes supplémentaires.



Figure 20 : Permutation circulaire incomplète en capteurs

Une seconde « dégradation » de la procédure de la permutation circulaire complète consiste à mesurer, pour un nombre de capteurs supérieur ou égal à 3, toutes les positions jusqu'à la fermeture du cercle [EST1997] (Cf. Figure 20). La résolution sous forme d'un système linéaire est également possible à condition de prendre les mêmes précautions concernant le rattachement et les positions que précédemment.



Figure 21 : Permutation circulaire incomplète en position et en capteurs

La procédure peut être encore dégradée en limitant le nombre de positions. La grande différence est alors l'absence de fermeture. Sur le plan de la résolution, cela n'a pas réellement d'effet sur les contraintes à ajouter pour caler les positions et le diamètre (donc le rattachement au mètre). Par contre, le premier point ne voit qu'un passage de capteur et le second point ne voit que deux passages de capteurs. Nous avons alors le même phénomène à la fin du profil. L'absence de fermeture implique que le calage de courbure n'est plus déterminé par celle-ci mais il devient dépendant de la position relative des capteurs. Il ne peut donc plus être résolu.

Cette dernière méthode (Figure 21) est similaire à la méthode de propagation utilisée pour calculer la rectitude présentée dans ce travail où le rayon considéré admet une valeur infinie.

En fait, ces différentes configurations sont très proches tant que les incertitudes ne sont pas prises en compte. La permutation incomplète à la fois en position et en nombre de capteurs est qualifiée de méthode de propagation. La propagation concerne en fait la propagation des incertitudes. Il faut donc prendre beaucoup de précautions pour obtenir des résultats intéressants.

3 Propagation

Nous avons choisi de mesurer le profil d'une ligne de la pièce par une méthode de propagation multi-capteurs. Pour matérialiser cette méthode nous utilisons la même technologie de capteurs capacitifs que ceux utilisés sur la table croisée au LNE de Trappes.

3.1 Notations signes et unités

3.1.1 Signes

Les figures suivantes présentent les conventions de signe qui ont été utilisées dans nos travaux.

Rectitude de surface (f)

Bosse Creux

Figure 22 : Convention de signes pour la matière

Dans la Figure 22, nous adoptons la convention classique de signe suivante pour la matière: Une bosse sur la pièce est interprétée comme un défaut positif et un creux sur la pièce est interprété comme un défaut négatif.

Valeurs relevées avec le capteur (m)



Figure 23 : Position relative des capteurs

La Figure 23 montre la convention pour les capteurs qui consiste à donner une indication plus petite lorsque la distance entre le capteur et la matière diminue et inversement lorsque la distance augmente.

<u>L'erreur de translation (T) et de tangage (rotation R)</u>

Selon les notations et le modèle en petits déplacements mis en place (voir paragraphe 1.1), le porte-capteur se déplace dans la direction Y. Il subit une erreur de translation du guidage dans

la direction Z (T_{yz}) qui a la nature d'une rectitude et une erreur de rotation autour de l'axe X (R_{yx}) qui a la nature d'un tangage. Celle-ci est mesurée par le niveau électronique. Nous notons l'indication du niveau par N_{yy} .



Figure 24 : Définition de direction

Si le porte-capteur subit une erreur de translation vers les Z positif, on convient alors que le défaut sera positif. Si le porte-capteur subit une erreur de tangage selon la règle de la main droite, on convient alors que le défaut sera positif et l'indication issue du niveau sera positive.

3.1.2 Unités

Les petites translations sont exprimées en nanomètres et les petites rotations sont exprimées en microradians. Ce choix est cohérent en ce sens qu'un angle d'un microradian incline le porte capteur (largeur 60 mm) de 60 nm.

3.2 Méthode globale

3.2.1 Mise en équations

A partir des relations (4) et (5), nous allons étudier un système à 4 capteurs équidistants.



Figure 25 : Prise en compte du calage relatif des capteurs

Avec 4 capteurs, seules deux informations sont nécessaires pour caractériser leurs positions relatives. Nous retenons les décalages des capteurs centraux par rapport aux capteurs d'extrémités notée e_{m2} et e_{m3} (Figure 25).



Figure 26 : Choix du calage du profil à zéro aux deux extrémités

Nous choisissons de fixer le premier et le dernier point du profil à zéro (Figure 26). Il reste donc p+n-1-2 inconnues pour le profil notées f_k pour $2 \le k \le p+n-2$.

La Figure 28 montre la mise en équations de la première position pour laquelle le premier point du profil est mis à zéro. La Figure 28 illustre la seconde position de balayage. Le centre de rotation du porte-capteur est placé au milieu du porte-capteur.







Figure 28 : Mise en équation pour la seconde position

On peut écrire le système d'équations sous la forme matricielle ci-dessous:

| [0] | 0 | 0 | 1 | -3d/2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | f ₂ | 1 | <i>m</i> ₁₁ |
|-----|----|--------|---|--------|---|-------|-------|----------------|---|---|----|------------------------|---|--|
| -1 | 0 | 0 | 1 | -d/2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | f_3 | | m ₂₁ |
| 0 | -1 | 0 | 1 | d/2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | | m ₃₁ |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 3d / 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | m ₄₁ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | f_{n+p-2} | | <i>I</i> V ₁ |
| -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | -3d/2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | T_1 | | <i>m</i> ₁₂ |
| 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | -d/2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | R_1 | | m ₂₂ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | d/2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | T ₂ | _ | m 32 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3d/2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | R_2 | - | N 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | | : |
| | | | | | | | | | | | | : | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | -3d/2 | 0 | 0 | 0 | T_p | | <i>m</i> . |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | -d/2 | 1 | 0 | 0 | R_p | | m_{1p} |
| 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | d/2 | 0 | 1 | 0 | e_{m2} | | m_{2p} |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 <i>d</i> / 2 | 0 | 0 | 0 | <i>e</i> _{m3} | | m |
| [0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1_ | R_0 | | N_n |
| | | | | | | | | | | | | | | L P_ |

Le nombre d'informations étant plus important que le nombre d'inconnues du problème, la redondance des informations nécessite la mise en œuvre d'une méthode d'optimisation. Nous retiendrons, de manière classique, le critère des moindres carrés. Le système à résoudre se présente donc ainsi :

$$Ax = B$$

Classiquement, on peut écrire :

 $A^T A x = A^T B$

La matrice de covariance $(A^T A)$ devient alors une matrice carrée. Si le rang de la matrice A est maximal alors nous pouvons résoudre ce système par :

$$x = \left(A^T A\right)^{-1} A^T B$$

Ici B représente le vecteur de toutes les mesures effectuées par les capteurs capacitifs et les niveaux. Le vecteur x regroupe l'ensemble des paramètres inconnus.

3.2.2 Pondération

Importance des unités

Chaque position du porte-capteurs correspond à 5 lignes du système. Les 4 premières équations concernent les mesures des capteurs. Il s'agit donc d'une information de type «longueur». La 5^{eme} équation concerne la mesure angulaire donc une information de type «angle».

La résolution directe de ce système n'est donc pas satisfaisante car les écarts à minimiser sont de nature différente (des longueurs et des angles).



La minimisation de l'équation ci-dessus donne la solution au sens des moindres carrés. Le choix des unités modifie le résultat. Il donne un poids relatif différent aux informations issues des capteurs capacitifs par rapport à celles fournies par le niveau électronique. Plusieurs voies de résolution sont donc possibles. Nous proposons alors de les comparer.

Méthode des moindres carrés pondérés

Cette méthode consiste à résoudre le système complet en pondérant les résidus. Il s'agit d'éliminer l'influence du choix des unités en tenant compte des incertitudes sur les capteurs d'une part et sur les niveaux d'autre part.

Nous considérons un modèle linéaire $y_i = ax_i + b$, avec i = 1, 2, ..., n où n est le nombre d'observations. Le principe général de la méthode des moindres carrées consiste à minimiser la somme des carrés des écarts entre les données expérimentales y_i et le modèle théorique \hat{y}_i en faisant l'hypothèse que les écarts sont gaussiens, indépendants, sans biais systématique et de même écart-type. Si les écart-types ne sont pas égaux, on peut pondérer chaque résidu en le divisant par son incertitude-type. Si on conserve l'hypothèse d'indépendance, cela donne une matrice de pondération diagonale.

$$\sum \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{\sigma_i}\right)^2 \qquad \qquad \sum \frac{1}{\sigma_i^2} (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Ces écart-types s'écrivent via une matrice de pondération W :

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_N^2} \end{bmatrix}$$
où $w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$ est le *poids* de l'écart d'indice *i*

La somme des carrés des écarts s'écrit sous la forme :

$$\zeta = (B - Ax)^T W(B - Ax)$$

En différentiant la relation ci-dessus par rapport à chacune des coordonnées de x, il vient:

$$-A^{T}W(B - Ax) + (B - Ax)^{T}W(-A) = 0$$
$$-2A^{T}W(B - Ax) = 0$$
$$A^{T}WB - A^{T}WAx = 0$$

Le minimum de ζ est dont atteint pour

$$x = (A^T W A)^{-1} A^T W B$$

Dans notre cas, les équations sont classées par groupe de cinq. Les quatre premières correspondent aux capteurs et la cinquième au niveau. Nous faisons l'hypothèse que toutes les

mesures issues des capteurs présentent la même incertitude « σ_c » et que toutes les mesures issues des niveaux présentent la même incertitude « σ_N ». La matrice W peut donc s'écrire :



En multipliant la matrice par σ_c^2 la solution n'est pas modifiée. C'est pourquoi nous introduisons le paramètre «L» caractérisant le rapport de l'incertitude des capteurs sur l'incertitude du niveau : L = σ_c/σ_N . La matrice W s'écrit donc :



En fonction de la valeur de ce paramètre L, la pondération entre les équations issues des capteurs et du niveau sera différente et donc le profil obtenu. Il est donc nécessaire de chiffrer « L » de manière rationnelle, ce que nous tenterons au chapitre 3.

Nous utilisons le nanomètre comme unité de longueur pour les capteurs et le microradian comme unité d'angle pour les niveaux. Ainsi le paramètre $L = \frac{\sigma_C}{\sigma_N}$ est le rapport entre l'incertitude-type sur les capteurs exprimée en nanomètres et l'incertitude-type sur les niveaux exprimée en microradians.

Dans la Figure 29, nous donnons un exemple de profil calculé à partir de nos acquisitions pour un L fixé à 1. Le défaut total est de l'ordre de 2.5µm. Ce défaut est important par rapport aux incertitudes nanométriques recherchées. En conséquence, lorsqu'il s'agit de représenter différents profils issus d'une étude de reproductibilité ou de paramètres L différents, nous serons obligés de tracer des graphiques représentant des différences entre profils ou des différences entre les profils et le profil moyen.



Figure 29 : Exemple de calcul de profil

<u>Remarque1</u> : les segments entre deux points ne constituent pas une interpolation linéaire. Ils sont seulement utiles pour aider à la compréhension de la courbe.

<u>Remarque2</u> : le profil est redressé par rapport à la ligne moyenne déterminée par une méthode des moindres carrés.



Figure 30 : Evolution du profil pour différentes valeurs de L (différence à la moyenne)

Le paramètre L étant le rapport entre l'incertitude des capteurs et l'incertitude du niveau, quand L tend vers zéro, on peut dire que les incertitudes sur les capteurs sont faibles vis-à-vis de celle des niveaux. La solution ainsi obtenue privilégie les capteurs. Elle est appelée «méthode à capteurs prépondérants §3.4 ». Si L tend vers l'infini, les incertitudes sur le

niveau sont faibles vis-à-vis de celles sur les capteurs . Cette solution privilégie les niveaux. Elle est appelée «méthode à niveau prépondérant §3.3 ».

Le passage d'une solution à l'autre est donné dans la figure 30. Sur cette figure, tous les profils sont recalés au sens des moindres carrés. La convergence de la solution vers les valeurs extrêmes de L correspond à la minimisation de la somme des carrés des écarts, ceci correspond à une convergence globale qui peut, localement, faire l'objet de dépassement (flèche sur la figure 30).

3.2.3 Interprétation et utilisation du paramètre L

Pour bien interpréter le changement du profil lors de la variation du paramètre « L », nous proposons d'introduire un paramètre adimensionnel et normé permettant de caractériser la modification physique du profil par rapport aux deux profils extrêmes. La Figure 31 est la représentation d'un profil issu d'une pondération L donnée.

Soient a_i la distance entre les deux profils extrêmes au point de mesure i et b_i la distance du profil avec le pondération choisie par rapport au profil extrême « capteur prépondérant » au point de mesure i. Alors nous introduisons le paramètre normalisé AB suivant : $AB = \sum_{i=1}^{N} b_i / \sum_{i=1}^{N} a_i$.



Figure 31 : Représentation le paramètre AB

Lorsqu'AB est nul le profil mesuré est superposé au profil extrême dit à « capteurs prépondérants ». Pour AB=1, le profil mesuré est superposé au profil extrême dit à « niveau prépondérant ». Le graphe dans la Figure 32 montre l'évolution de la valeur de AB quand L varie entre 0,1 et 200. Nous utilisons les unités précédentes i.e. capteurs en nanomètre et niveau en microradian. Comme le profil avec pondérant », le paramètre AB varie donc bien entre 0 et 1.



Figure 32 : Evolution du paramètre AB en fonction du paramètre L

Nous envisageons le graphe de la Figure 33 en trois zones. La première zone où le changement de AB est très faible correspond à la zone du profil à « capteur prépondérant » (entourée en rouge). La deuxième zone correspond à la transition entre la première zone et la troisième zone (entourée en violet). Dans cette zone, la détermination de L est particulièrement sensible sur le profil obtenu. La troisième zone (entourée en vert) correspond à la zone de convergence vers le profil à « niveau prépondérant ».



Figure 33 : Evolution de AB

Même si les capteurs et le niveau ne sont pas étalonnés, nous pouvons indiquer approximativement les incertitudes des capteurs et du niveau en fonction des caractéristiques fournies par les constructeurs. L'incertitude de niveau est au plus de 1 μ rad (ce qui correspond à sa résolution) et l'incertitude des capteurs capacitifs de quelques dizaines de nanomètres. Le paramètre L est donc de l'ordre de quelques dizaines. Nous constatons que pour cette valeur de L que la zone considérée est la zone 3 dite à « niveau prépondérant ».

3.3 Méthode « à niveau prépondérant »

Nous présentons dans cette partie la méthode privilégiant la qualité locale des niveaux électroniques. Nous faisons l'hypothèse que la connaissance du tangage du porte-capteurs est directement issue des mesures du niveau électronique. Les équations (5) de mesures du niveau disparaissent donc de la résolution et la mesure du niveau intègre uniquement les équations (4). Néanmoins, il est toujours nécessaire de tenir compte du calage angulaire à l'origine du niveau. C'est pourquoi nous conservons la relation $N_j = R_0 + R_j$. Nous avons donc les équations suivantes :

$$m_{ij} = -f_{j+si} + T_j + (N_j - R_0)s_i d + e_{mi}$$
(6)

Cette équation s'écrit encore :

$$m_{ij} - N_j s_i d = -f_{j+si} + T_j - R_0 s_i d + e_{mi}$$
(7)

Où R_i la rotation du porte-capteur à la position j par rapport à la première position.



Figure 34 : Le profil à niveau prépondérant

La Figure 34 représente le profil redressé, correspondant à la méthode niveau prépondérant.

3.4 Méthode « à capteurs prépondérants »

Nous présentons dans cette partie la méthode privilégiant l'apport des capteurs capacitifs. Elle consiste à réaliser le dépouillement du profil par propagation sans tenir compte dans un premier temps de l'information de mesure du niveau. Le profil obtenu présente donc un biais de courbure lié à la méconnaissance de la position relative des capteurs. Les informations de mesure du niveau vont être utilisées pour corriger ce biais de courbure.

La rotation du porte-capteurs à chaque position de mesure, générée par les défauts de guidage, est mesurée avec le niveau électronique. La différence entre la rotation issue de la propagation et celle issue du niveau est la signature de l'imprécision de la connaissance de la position relative des capteurs.

Afin de résoudre ce problème, nous introduisons une courbure de référence. Nous proposons deux nouvelles variables e_2 et e_3 . Elles sont liées par la relation : $a_2e_2 + a_3e_3 = b$, où a_2, a_3 et *b* sont des valeurs arbitraires (voir Annexe I) permettant de choisir cette courbure de référence.

3.4.1 Calage de la courbure globale

Le calage de la courbure globale est une cause importante de l'erreur de propagation qui est toujours inclut dans les mesures. A la base de ce problème, le calage de la courbure provient d'un réglage difficile à réaliser de la position relative des capteurs (e_{mi}). Sans information sur la rotation du porte capteur, et même avec un nombre d'équations supérieur au nombre d'inconnues, il est impossible de résoudre le système car la part constante de la courbure ne peut être déterminée. Il est donc impossible de faire la différence entre une ligne et un cercle.



Figure 35 : (a) position relative des capteurs (b) biais de courbure

Pour mieux comprendre le problème, imaginons une référence supposée parfaite mesurée par un porte-capteur dont la position relative des capteurs est imparfaite (e_{m2}, e_{m3}) (Figure 35-a). Ceci peut être généralisé pour un nombre de capteurs supérieur, en introduisant une équation parabolique.

Avec la procédure de dépouillement à capteurs prépondérant, le profil évalué est un profil optimisé par la méthode des moindres carrés. Il subit un biais de courbure à cause de l'erreur de position relative des capteurs (Figure 35-b). Ce biais de courbure est constant sur tout le profil. Les rotations du porte-capteurs issues de la propagation représentent la pente qui correspond à la dérivée du profil. Afin d'obtenir le profil réel, le biais de courbure est détermine en comparant les rotations obtenues par la propagation à celle mesurées par le niveau.

Pour réaliser la correction, la différence est calculée (Figure 36) entre la rotation issue de la propagation et celle issue du niveau. Le biais de courbure est obtenu à partir de la pente (b) de la droite identifiée.



Figure 36 : Incohérence entre la rotation issue de la propagation et celle issue du niveau

Profil corrigé = Profil évalué – $\frac{b}{2}x^2$ où b : Identification de la pente.

3.4.2 Résultats

Le profil obtenu (Figure 37-a) est issu uniquement de la propagation. Il contient un biais de courbure ayant pour cause l'erreur de position relative des capteurs. Pour corriger ce biais de

courbure, nous disposons de la différence entre la rotation issue de la propagation et celle issue du niveau pour identifier l'erreur de pente. Le profil de correction est la parabole obtenue par intégration de la pente constante avec comme conditions que les points d'extrémités sont à zéro (Figure 37-b)). Ainsi, le profil final (Figure 37-c) est corrigé du biais de courbure sans modification local du profil initial.



Profil corrigé = Profil évalué – Profil correction

(c)





Figure 38 : (a) Le profil à capteur prépondérant et celui à niveau prépondérant (b) La différence du profil entre 2 stratégies (à la moyenne)

La Figure 38-a montre les deux profils issus des différentes méthodes de dépouillement. Pour être plus visible, la différence de ces deux profils est présentée par rapport à leur moyenne (Figure 38-b). Cette différence à la moyenne induit un effet de symétrie sur le graphique qui n'a pas d'autre origine. On constate une différence de l'ordre de 100 nanomètres. Ceci correspond à l'incohérence entre les mesures des capteurs et du niveau qui ne sont pas étalonnés pour l'instant. Leur étalonnage et l'estimation de leur incertitudes devrait permettre d'atteindre les objectifs visés en utilisant la méthode de résolution du système complet avec pondération.

4 Conclusion : Choix du calage de la courbure, du nombre de capteurs

L'étude de la bibliographie montre que de nombreux laboratoires travaillent sur le principe de la propagation. Pour diminuer les incertitudes, les laboratoires proposent une mesure de la rotation du porte-capteurs à la lunette autocollimatrice ou bien de diminuer le pas de mesure en utilisant un microscope interférentiel. Nous proposons une réflexion sur l'optimisation de l'utilisation des données compte tenu des incertitudes. Dans le chapitre traitant des incertitudes, nous introduisons également une démarche d'optimisation du nombre de capteurs et du pas entre les capteurs.

En l'absence d'incertitudes, il y a une relation déterministe entre les paramètres mesurés et le profil. Les paramètres mesurés doivent être considérés comme des tirages particuliers dans des populations aléatoires. Dans la mesure où les capteurs fournissent une partie de l'information sur la forme du profil, que le niveau en fournit une autre et que ces informations ne sont pas indépendantes, il faut choisir une pondération des capteurs capacitifs par rapport au niveau.

Dans la stratégie que nous avons baptisée « capteurs prépondérants », le niveau ne sert qu'à caler la courbure globale du profil. Il n'a pas d'effet local.

Dans la stratégie que nous avons baptisée à « niveau prépondérant », le niveau impose la valeur du tangage du porte-capteurs en chaque point. Cela correspond à une démarche où l'information du niveau est considérée comme parfaite.

La stratégie du calcul au sens des moindres carrés pondérés se propose de tenir compte des incertitudes sur les capteurs d'une part et sur le niveau d'autre part sans prendre en compte les dépendances.

Pour passer de la méthode à « capteurs prépondérants » à la méthode à « niveau prépondérant » nous introduisons un paramètre « L ». Il correspond au rapport de l'incertitude des capteurs sur l'incertitude du niveau. Si L est faible alors le système est proche du résultat à « capteurs prépondérants ». Par contre, si L est important alors le système est proche de la solution à « niveau prépondérant ».

La notion de distance entre deux profils démontre comment le passage d'un profil extrême à l'autre est réalisé via la variation du paramètre L. Ce paramètre étant défini par

 $L = \frac{\sigma_C}{\sigma_N} = \frac{c \quad nm}{n \quad \mu rad}$. Nous avons montré que pour L compris entre 2 et 40 environ la forme

du profil optimum est située entre les deux profils extrêmes. Elle nécessite donc une analyse plus approfondie. Si l'évaluation de L montre que sa valeur est en dehors de cette plage alors la méthode pondérée ne présente pas un grand intérêt. Il n'est donc pas utile de chercher à calculer L finement. Dans le cas contraire, un choix judicieux de L diminue l'incertitude de manière notable.

Nous avons choisi de travailler avec 4 capteurs pour augmenter la redondance sans augmenter exagérément le nombre de capteurs. Nous montrons au chapitre concernant les incertitudes que 5 capteurs constitue un meilleur choix au moins en ligne. Le passage à une matrice est plus couteux puisque l'on passe de 4*4=16 à 5*5=25 capteurs.

Chapitre II

Banc experimental et étalonnage métrologique

| 1 | Intro | duction | 48 |
|---|-------|--|----|
| | 1.1 | Bref historique du système métrique | 48 |
| | 1.2 | Chaîne d'étalonnage | 49 |
| 2 | Prés | entation du banc | 51 |
| | 2.1 | Partie existante : Description générale du banc de mesure | 52 |
| | 2.1.1 | Principes de conception | 52 |
| | 2.1.2 | Description technologique et métrologique | 55 |
| | 2.2 | Démarche de précautions expérimentales et modifications | 58 |
| | 2.2.1 | Mise en œuvre les instruments | 58 |
| | 2.2.2 | Protocole de mesure de la rectitude | 58 |
| | 2.2.3 | Traitement des résultats : Logiciel MATHEMATICA | 60 |
| | 2.2.4 | Précaution et tests pour les acquisitions | 60 |
| | 2.2.5 | Réglages | 63 |
| | 2.3 | Conception du banc pour la phase « étalonnage » | 66 |
| | 2.3.1 | Laser | 66 |
| | 2.3.2 | Principe de conception | 67 |
| | 2.3.3 | Présentation du banc du mesure : Mise en œuvre de l'interféromètre | 68 |
| | 2.3.4 | Source d'incertitudes | 70 |
| 3 | Etal | onnage des capteurs capacitifs | 75 |
| | 3.1 | Etalonnage | 75 |
| | 3.1.1 | Capteur capacitif | 75 |
| | 3.1.2 | Détermination de l'axe d'Abbe | 76 |
| | 3.1.3 | Protocole de mesure pour l'étalonnage | 78 |
| | 3.1.4 | Courbe d'étalonnage | 80 |
| | 3.1.5 | Effet de l'étalonnage des capteurs sur le calcul d'un profil | 81 |
| | 3.2 | Diminution de l'incohérence entre les capteurs | 83 |
| | 3.2.1 | Courbe de correction | 84 |
| | 3.2.2 | Effet de la diminution de l'incohérence entre les capteurs sur le calcul d'un profil | 85 |
| 4 | Etal | onnage des niveaux électroniques | 86 |

| 4.1 | Niveau électronique | |
|--------|---|----|
| 4.1.1 | Principe de fonctionnement et mise en service | 86 |
| 4.1.2 | Méthode de mesure | 87 |
| 4.2 | Précaution | |
| 4.2.1 | Protocole de mesure pour l'étalonnage | 87 |
| 4.3 | Utilisation du laser | |
| 4.3.1 | Présentation | 89 |
| 4.3.2 | Courbe d'étalonnage | 89 |
| 4.3.3 | Incertitude sur la référence | 90 |
| 4.4 | Utilisation de la matrice de 16 capteurs | |
| 4.4.1 | Courbe d'étalonnage | 91 |
| 4.4.2 | Incertitude sur la référence angulaire | 91 |
| 4.5 | Résultats et discussion | |
| 5 Cond | clusion | 93 |

1 Introduction

1.1 Bref historique du système métrique

La première échelle de distance fut, très probablement, le corps humain. C'est ainsi que survivent encore, chez les Anglo-Saxons, des unités « pratiques » comme le pouce et le pied, un pouce valant un douzième de pied. Des commerçants peu scrupuleux profitaient du fait que ces unités avaient une valeur légèrement différente d'une ville à l'autre, la toise de Beauvais n'ayant pas la même valeur que celle de Dijon, pour berner leurs clients. Il a fallu attendre la fin du XVIIIème siècle pour qu'un effort de normalisation internationale soit entrepris.

La Révolution française a vraiment porté le système métrique. Ce système est basé sur deux idées fortes : les multiples et sous multiples sont construits sur une base dix et les unités doivent avoir une nature universelle, stable et être accessibles pour tous les hommes et dans tous les temps. Officiellement adopté en France en 1799, il est maintenant utilisé dans le monde entier...ou presque. Il faut remarquer que le pouce qui vaut 25.4mm est un sous-multiple du mètre qui, simplement, ne correspond pas à la base 10.

Le mètre fut défini comme les dix millionième parties de la distance entre l'équateur et le pôle mesurées le long de la surface de la Terre. Aux XVIIème et XVIIIème siècles, les meilleures mesures des dimensions de la Terre furent effectuées par les astronomes français et ont servi de base pour le nouveau système métrique. Pour matérialiser l'unité, des repères distants de un mètre dans des murs étaient installés, on peut encore voir l'un de ses « étalons » près du Palais du Luxembourg à Paris.

Cette définition n'étant pas susceptible d'une bonne reproductibilité, il fut décidé de construire un étalon en platine et en iridium qui est un étalon à traits. C'est Tresca qui dessine la célèbre section en X pour tracer les traits dans le plan neutre de flexion et optimiser la raideur spécifique à la flexion. Cet étalon a été déposé à Sèvres, au pavillon de Breteuil. Des copies aussi précises que possible ont été faites et distribuées de par le monde. En 1889, il fut décidé que ce mètre étalon servirait de base mais deux définitions plus "transportables" ont été adoptées depuis. Tout en étant cohérente avec les définitions précédentes, elle présente un niveau d'incertitudes plus faible.

En 1960, la référence est devenue la longueur d'onde d'une émission de lumière particulière de l'atome de krypton 86 multipliée par 1 650 763 730. Il suffisait donc d'être équipé d'un laboratoire adéquat pour reproduire un mètre standard sans avoir besoin de posséder de barre étalon.

En 1983, le mètre fut redéfini en se référant à la vitesse de la lumière dans le vide. A cette époque, la seconde avait été définie comme étant égale à 9 192 631 770 fois la fréquence d'une horloge atomique de césium 133. Le mètre a pris alors la valeur de la distance parcourue par la lumière dans le vide en 1/299 792 458 seconde. La lumière-seconde, ou distance parcourue par la lumière en une seconde, est donc égale à 299 792 458 mètres. Cela semble un chiffre bien compliqué pour un usage fréquent, mais il porte toute une histoire et présente l'avantage d'être valable en tout point de l'Univers puisque la vitesse de la lumière est une constante universelle. Cette définition permet le passage d'une définition du mètre à la suivante sans rupture des chaînes d'étalonnage.

1.2 Chaîne d'étalonnage

Une chaîne d'étalonnage est une chaîne continue de comparaisons ayant toutes des incertitudes connues. C'est un travail coordonné à l'échelle internationale, dont le centre est le Bureau international des poids et mesures (BIPM), et dont tous les pays bénéficient. Il permet d'assurer l'uniformité mondiale et la pérennité des mesures les plus exigeantes, pour les besoins scientifiques ou techniques, et aussi pour les besoins des échanges commerciaux nationaux et internationaux.

La législation française, comme celle de la majorité des États, rend ce rattachement obligatoire pour tous les instruments de mesure à usage commercial; c'est même le cas pour les pays anglo-saxons où les unités yard et pound sont aujourd'hui légalement définies à partir du mètre et du kilogramme. L'**Organisation internationale de métrologie légale** a pour objectif d'harmoniser les réglementations en vigueur en matière de mesures dans les différents pays afin d'assurer leur cohérence à l'échelle mondiale.

En France, le Bureau National de Métrologie, créé en 1969, coordonnait l'action de 5 laboratoires primaires. Les activités du BNM ont été transférées au LNE (Laboratoire National d'Essais) au 1er janvier 2005. Si le LNE a conservé son sigle et sa dénomination commerciale, son nom est Laboratoire National de Métrologie et d'Essais. Il s'agit donc de notre Institut National de Métrologie au sens de la traduction directe de l'anglais « National Institute of Metrology ».

Le COFRAC (COmité FRrançais d'ACccréditation) assure les missions liées à l'accréditation indépendamment (sur le plan de l'organisation) du LNE.



Figure 1 : Traçabilité aux étalons

Un utilisateur final peut bénéficier du raccordement (traçabilité) aux étalons de plus haut niveau international soit directement à partir d'un laboratoire national de métrologie, soit à partir d'un laboratoire de métrologie secondaire. Suite à des accords de reconnaissance, la traçabilité de la chaîne de mesure peut être obtenue par des laboratoires d'un autre pays que celui de l'utilisateur final. Le VIM [JCGM200:2008] précise la définition de l'étalonnage : Opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication

Selon le nouveau VIM, l'étalonnage est donc une opération en deux temps. Le premier temps est celui du travail sur les étalons. Le second temps est celui de l'utilisation du travail sur l'étalon en vue d'obtenir un résultat de mesure, c'est-à-dire celui de la correction. Cela est conforme à la nouvelle orientation du VIM focalisé sur les incertitudes et au principe dit de Confucius que l'on a reproduit dans le GUM :

« Celui qui, après avoir commis une faute, ne cherche pas à la corriger, en commet une autre » [Confucius]

Cet aphorisme est fondamental pour tout métrologue. Il consiste à dire, plus simplement, qu'il faut corriger toute erreur systématique à chaque fois que possible.

Dans notre étude, nous utilisons deux systèmes de mesure : les« capteurs capacitifs et les niveaux électroniques » dont il faudra réaliser l'étalonnage.

Le capteur capacitif est de la famille des capteurs de faibles déplacements. Il transforme une variation de longueur en variation d'une grandeur électrique. Fondamentalement, il relève du raccordement au mètre donc à la vitesse de la lumière.

Les niveaux électroniques sont des capteurs d'inclinaison. Ils permettent de mesurer les petits angles. Leur référence est la verticale terrestre du lieu. Ce sont des comparateurs de pente qui peuvent servir à vérifier la planéité ou les inclinaisons de solides.

L'unité d'angle du Système International est le radian. Sa définition, donnée par la norme [NF X 02-006], est la suivante : « *le radian est l'angle plan compris entre deux rayons qui interceptent sur la circonférence d'un cercle, un arc de longueur égale à celle du rayon* ».

La nature abstraite de l'unité d'angle, basée uniquement sur des considérations géométriques, lui confère en théorie une large accessibilité. Il n'existe donc pas dans l'absolu une traçabilité (chaîne d'étalonnage) proprement dite pour les angles comme pour les autres unités telles que le mètre par exemple qui fait référence à un étalon relevant d'une convention arbitraire. Mais dans la pratique, les difficultés sont les mêmes qu'en métrologie des longueurs, car il faut souvent matérialiser un angle étalon par des instruments. Il faudra donc assurer la comparaison de l'angle à mesurer avec la référence utilisée et ce avec une incertitude la plus faible possible.

Il existe deux types de références pour les étalons d'angles :

- Les angles matérialisés : prismes, cales étalons d'angles, polygones, plateaux à indexage, codeurs.
- Les angles engendrés par des variations de longueurs qui définissent les angles par le sinus ou la tangente : barres sinus, option angle des lasers interférométriques, lunettes autocollimatrices.

Aux échelles où nous travaillons, le comportement de ces capteurs dépend de leurs conditions de montage et/ou d'alignement avec la surface cible. Il est primordial de réaliser cet étalonnage in-situ, c'est-à-dire, que les capteurs capacitifs et les niveaux électroniques doivent être étalonnés après leur installation sur la machine. Un montage mécanique spécifique de la référence de longueur basé sur un interféromètre laser, respectant le principe d'Abbe, a donc été intégré.

La première partie de ce chapitre a pour objet une description générale du banc de mesure utilisé. Cette partie consiste à expliquer la construction du montage support de la pièce dont la planéité doit être caractérisée et du dispositif de mesure. Nous donnons aussi une étude du logiciel de pilotage. Nous proposons une analyse fine de la chaîne métrologie du banc, des réglages du banc, et du dispositif nécessaire à la phase étalonnage. Ceci nous permet d'établir le bilan des incertitudes.

La deuxième partie aborde le dépouillement de l'étalonnage des capteurs capacitifs et des niveaux électroniques. Une comparaison entre le profil avant et après étalonnage est réalisée.

2 Présentation du banc

L'objectif principal de la thèse est d'étudier précisément la topographie Z des plans qui servent de références dans la chaine métrologique Z de la machine « table croisée » [DUC2003] [LAH2005-a] [LAH2005-b] [LAH-2005-c] [LAR2007] du LNE.

Afin de mettre au point et valider la méthode d'étalonnage de la planéité des références sans immobiliser le reste de la machine, un banc dédié à la mesure de planéité [LAH2007] a été préalablement développé et mis en place au laboratoire de métrologie (L2MA) d'Arts et Métiers ParisTech de Lille.

Ce banc a été conçu autour d'une architecture dans laquelle les capteurs de mesure sont mobiles et l'objet à mesurer est fixe. Cette structure permet de respecter les choix technologiques réalisés sur la table croisée du LNE. La conception du banc jusqu'à sa réalisation complète ont été réalisées pendant la thèse de Ludovic LAHOUSSE [LAH2005-b].

A partir du banc conçu préalablement, notre travail a commencé par faire l'acquisition d'une rectitude sur le diamètre de la pièce à caractériser avec quatre capteurs alignés. Durant cette première phase de « mesure », nous avons apporté des modifications structurelles du banc ainsi que des préconisations de mise en œuvre afin d'obtenir une bonne répétabilité d'acquisition du profil. Après avoir traité les résultats par trois stratégies (chapitre1 §3) [BOR2008], nous avons constaté des différences significatives de profil reconstruit, conséquence de l'incohérence entre des informations qui proviennent des capteurs et celles provenant des niveaux. Pour diminuer cette cause d'erreur, nous avons réalisé l'étalonnage des capteurs et des niveaux.

Nous présentons la suite en scindant la description du dispositif de banc expérimental en trois parties:

- Partie existante : Description générale du banc de mesure (§2.1)
- Démarche de précautions expérimentales et modifications (§2.2)

• Conception du dispositif pour la phase d'étalonnage (§2.3)

2.1 Partie existante : Description générale du banc de mesure

2.1.1 Principes de conception

2.1.1.1 Positionnement relatif des deux solides

Pour étudier la topographie des références de planéité, la méthode de propagation a été choisie avec la mise en œuvre de seize capteurs capacitifs placés dans une matrice porte-capteurs avec 4 lignes et 4 colonnes.

Le principe de mesure par propagation consiste à positionner la matrice porte-capteurs par rapport à la pièce à mesurer. Ce mouvement relatif de la pièce et du porte-capteur suivant la direction verticale Z est mesuré par les16 capteurs capacitifs en regard de la surface de la pièce.

Afin d'éliminer le biais de courbure dans la méthode de reconstruction qui engendre une erreur de forme sur le profil dû à la méconnaissance pratique de l'erreur d'alignement des capteurs capacitifs, la rotation relative du porte-capteurs par rapport à la pièce à mesurer doit être également mesurée. Pour réaliser cette mesure le banc est équipé de deux niveaux électroniques LEICA Nivel 20. Un niveau mesure le mouvement de la pièce à mesurer vis-à-vis de la verticale terrestre et l'autre niveau mesure le mouvement du porte capteur vis-à-vis de la verticale terrestre. La rotation relative du porte capteur vis-à-vis du plan à mesurer est donc la différence entre ces deux indications.



Figure 2 : Positionnements relatifs

Pour ce banc, la notion classique de chaîne métrologique n'est pas réellement pertinente. Nous proposons de la remplacer par les éléments suivants (Figure 2) qui constituent un « guide » de conception:

- Le porte-capteurs doit se comporter comme un solide et en particulier l'alignement des capteurs ne doit pas évoluer pendant l'ensemble des acquisitions
- Le niveau du bas ne doit pas bouger par rapport au porte-capteur (No.1)
- Le niveau du haut ne doit pas bouger par rapport à la pièce à mesurer (No.2)
- La verticale terrestre est la référence commune qui relie les deux niveaux électroniques (No.3)
- L'ensemble des acquisitions pour chaque position de vérin piézoélectrique dure 6 secondes. Nous disposons donc de 200ms pour lire l'information des 16 capteurs. Il est ainsi effectué une moyenne sur trente valeurs. L'information des niveaux est lue une fois après 15 acquisitions des capteurs. Nous faisons l'hypothèse que le portecapteurs reste immobile pendant cette séquence par rapport à la pièce à mesurer.

Remarque importante sur la notion de répétabilité :

- La répétabilité de la position du porte-capteurs pour une position donnée n'est pas garantie. En principe, si les capteurs et les niveaux sont parfaits, cela n'a aucune importance, seule compte la stabilité pendant l'acquisition. En pratique, les incertitudes sur les capteurs et les niveaux et, en particulier, les incertitudes d'étalonnage apparaissent comme de la répétabilité sur le profil car les capteurs et les niveaux ne sont pas placés de la même manière. Cette méthode de propagation a donc un comportement qui n'est pas classique en métrologie. La répétabilité des acquisitions s'améliore si les capteurs sont étalonnés.
- Sur un autre plan, bien que les capteurs capacitifs aient un effet de lissage de la surface à mesurer, la qualité de mise en position du porte-capteur doit être d'autant meilleure que cette surface est légèrement rugueuse.

2.1.1.2 Mise en œuvre la chaîne de maintien en position

- La pièce à mesurer est maintenue en position par une plaque en aluminium de dimensions 800*800*70 mm³ appelée « matelas ». Elle est supportée par trois cylindres en acier disposés sur un granit, élément fixe du banc.
- Le déplacement du porte-capteurs pour réaliser la mesure par propagation de la pièce est assuré par une table XY motorisée dite Table Aérotech.
- Afin d'améliorer la résolution du niveau électronique supérieur par oscillations, un actionneur piézo-électrique a été installé sur l'un des pieds support du matelas. Il permet la génération d'un mouvement d'inclinaison de celui-ci par rapport à la verticale terrestre. Un autre actionneur est installé entre la matrice porte-capteurs et le granit pour améliorer la résolution du niveau du dessous.

La mise en position relative entre la pièce et le porte-capteurs se fait à travers des composants qui constituent la chaîne de maintien en position. A partir du granit, l'élément fixe du banc, un sous-ensemble est lié à la pièce et l'autre est lié au porte-capteurs pour réaliser une chaîne fermée. La Figure 3 présente la chaîne de maintien en position du porte-capteurs par rapport à la pièce à mesurer pendant une position de mesure.



Figure 3 : Chaîne de maintien en position du banc

2.1.1.3 Banc complet

Le schéma qui suit présente deux vues d'ensemble du banc de mesure servant à la mesure des références Z. Il présente les différents composants et fonctionnalités associées.



Figure 4 : Vue du banc de mesure

2.1.2 Description technologique et métrologique

2.1.2.1 Capteur capacitif

Les capteurs capacitifs que nous utilisons, de marque FOGALE [FOG1995]), sont capables de mesurer une variation de distance avec une résolution de 0.1 nanomètre. Cette résolution est loin de l'exactitude à cause du bruit d'une part, réduit par une moyenne sur 30 acquisitions, et de la nécessité d'un étalonnage d'autre part. Leur principe est de mesurer la capacité relative entre la surface cible et la zone sensible. Elle est matérialisée sous la forme d'une électrode centrale. Il se présente autour de l'électrode centrale une électrode de garde maintenue par asservissement électronique au même potentiel que l'électrode de mesure. Elle permet d'éliminer les effets de bord autour de la zone sensible (Figure 5). L'électronique utilisée est une électronique analogique FOGALE permettant de récupérer en sortie une tension continue variant entre 0V et 10V. Elle correspond à une course de 100 μ m.



Figure 5 : Schéma d'un capteur capacitif [LAH2005-b]

Au niveau du bruit d'acquisition, chaque voie est équipée d'un filtre analogique réglable. Pour nos mesures, nous avons réglé ce filtre sur 1 kHz. Dans ces conditions, le bruit en sortie est d'environ 1.5 mV pic à pic ce qui correspond pour ces capteurs à une quinzaine de nm [LAH2005-b].

2.1.2.2 Niveau électronique

Le Nivel 20 fournit simultanément deux rotations autour de deux axes orthogonaux entre eux d'une part et orthogonaux à la verticale terrestre d'autre part (au moins nominalement). Sa résolution est de 1µrad. Elle est semble-t-il le résultat d'une troncature numérique.



Figure 6 : Une tête du Nivel 20

Son étendue de mesure totale est, selon les spécifications techniques du constructeur, divisée en 3 zones :

Zone 1 : pour des rotations comprises entre ± 1.5 mrad, le niveau présente un écart maximal toléré de linéarité de $\pm(5\mu rd+0.5\%)$ de la valeur mesurée).

Zone 2 : pour des rotations comprises entre ± 1.5 mrad jusqu'à ± 2.0 mrad avec une qualité réduite, cette zone ne doit pas être utilisée pour des mesures de qualité.

Zone 3 : au-delà de ± 2.0 mrad et jusqu'à environ ± 6.5 mrad, le niveau fournit une indication de signe qui est très utile pour le dégauchissage de la tête.

2.1.2.3 Micro actionnement

Le micro-actionneur P845 [PI] est un actionneur d'une très haute résolution linéaire pour les applications statiques et dynamiques. Il fournit une réponse inférieure à la milliseconde et une résolution subnanométrique. Ce modèle P845 est équipé d'un capteur de position intégrée afin de compenser la dérive et l'hystérésis naturelle de l'empilement de quartz en boucle fermée.



Figure 7 : Conception mécanique du micro-actionnement (P845.40)

La partie active de l'élément de positionnement (Cf. Figure 7) se compose d'une pile de disques en céramique séparés par des électrodes métalliques fines. La tension de fonctionnement maximale est proportionnelle à l'épaisseur des disques. La plupart des microactionneurs haute tension sont équipés de plusieurs couches en céramique d'épaisseur de 0,4 à 1 mm. Pour les actionneurs faible tension, l'épaisseur des couches de céramique n'excède pas 25 à 100 μ m.

2.1.2.4 Table aérotech UNIDEX500

La table Aérotech des deux axes de déplacement XY équipée d'une carte UNIDEX500 qui admet une résolution de mise en position de 1,25 $\mu m.$

2.1.2.5 Logiciel de pilotage et informatique associée

Le banc est livré avec sa baie de commande incluant un PC, l'électronique d'acquisition et de commande et le logiciel de pilotage.



Figure 8 : Dispositifs d'acquisition et de commande

Le système d'exploitation Microsoft Windows XP est installé sur le PC. Le logiciel dédié à l'utilisation du banc est développé dans l'environnement LabVIEW. Il peut s'interfacer avec du matériel de mesure et de contrôle, analyser les données et partager les résultats.

Ce logiciel permet de réaliser le pilotage des axes de translation du banc, de réaliser l'acquisition des 16 capteurs et des 2 niveaux puis de stocker ces informations sous forme de fichiers au format texte de façon automatisée.

| urt_etalonnage.vi riontiráliet* | | |
|---|---|--|
| S (See) | | |
| | | |
| Fonctions Paramètres acquisition Capacitive Scosors | DX1000HUb3Herehuw0H10 | |
| Créer une trajectoire table | | |
| Gréer une Insjectoire vérine F2T | | |
| Déterminer offset des vérins P21 | • | |
| | | |
| Backinsson at difficie la visa trainctaire | | |
| Concernence of October of Concernence | | |
| capital capacity North method capacity (m) North traps in riskinger (m) North traps North a North b North | Active Position (mm) Vitesse (mm/min) ** X | |
| de General 2 | | |

Figure 9 : Interface principal du logiciel de pilotage

L'interface principale du logiciel affiche les informations relatives au banc : position des axes motorisés, position des micro-actionneurs ; mais aussi d'accéder aux fonctionnalités de mesure, de pilotage de moyennage, etc...

Les opérations accessibles à l'utilisateur sont sécurisées de manière à ne pas réaliser des mouvements qui pourraient provoquer un frottement entre les capteurs et la pièce avec le risque d'endommager un capteur. Des limites logicielles permettent de définir une plage de mesure sécurisée pour chaque capteur capacitif. Au-delà de ces limites, le banc arrête automatiquement les mouvements en cours.

Pour les acquisitions, le banc est équipé d'une carte d'acquisition NI PCI-6289. C'est une carte d'acquisition de données multifonction de la Série M, optimisée avec une résolution d'entrée analogique 18 bits. Avec 625000 échantillons par seconde, la fréquence d'acquisition est suffisante pour notre travail.

2.1.2.6 Environnement de la machine

Notre banc d'essai se situe dans une pièce climatisée à $20^{\circ}C \pm 0.2^{\circ}C$.

2.2 Démarche de précautions expérimentales et modifications

Au début de notre travail, le banc avait été monté et préréglé. La première mesure a montré qu'il était nécessaire de reprendre les réglages (§2.2.5) afin d'améliorer la plage de mesure des capteurs capacitifs.

Pour améliorer la qualité des acquisitions et pour obtenir une mesure de rectitude, nous avons complété les instruments nécessaires (§2.2.1) pour la phase de mesure et d'étalonnage. Ensuite, nous avons fait des tests (§2.2.4) concernant le temps d'acquisition expérimental et de la stratégie de moyennage qui permettent d'améliorer les informations des capteurs et des niveaux.

Nous avons également fait une modification mécanique (§2.2.4.3) sur le montage car pendant ces tests, nous avons constaté un comportement anormal du déplacement du porte-capteurs.

2.2.1 Mise en œuvre les instruments

Nous avons complété le montage du porte-capteur avec huit capteurs capacitifs.

Pour la phase étalonnage, nous avons ajouté deux micro-actionneurs supplémentaires à deux cylindres en acier qui supportent le matelas.

Après avoir mis en œuvre les huit capteurs capacitifs et les deux micro-actionneurs supplémentaires, nous les avons ensuite interfacés avec le logiciel LabVIEW.

2.2.2 Protocole de mesure de la rectitude

Actuellement les capteurs sont disposés dans la matrice porte-capteurs avec un espace de 20mm. Pour réaliser une mesure par propagation avec l'implantation actuelle des capteurs, il est donc nécessaire de déplacer la matrice porte-capteurs par pas de 20mm. Il faut 13 déplacements de la matrice porte-capteurs pour mesurer la rectitude sur un diamètre de 300mm.

En relation avec l'indication fournie par la table Aérotech et la définition de ses origines, nous assurons une mise en position qui passe par l'origine de la pièce. L'origine du repère du portecapteurs correspond à la position centrale de la matrice du porte-capteurs. Sa position est repérée par rapport au repère de la pièce à mesurer..

La Figure 10 représente la position de départ d'une mesure qui a pour coordonnées : X = 0; Y = -120 (mm).



Figure 10 : Schématisation de la mesure

Chaque trajectoire est effectuée par le porte-capteurs suivant l'axe Y (Figure 10). Il est obtenu pour chaque position les quatre informations des quatre lignes des capteurs (Ex. ligne1 : capteur 1 à 4). Une seule information du niveau est requise pour les quatre séries de capteurs capacitifs. Il est ainsi possible de dépouiller quatre rectitudes en même temps.



Figure 11 : Une position de balayage du porte-capteur

Pour une position donnée (Figure 11), la valeur de chaque niveau correspond à la moyenne obtenue à partir d'un basculement de 10 microradians réalisé en 40 stations. Pour chaque pas

de mesure des niveaux, on retient la moyenne des 30 mesures effectuées par les capteurs capacitifs.

Dix séries de mesures sont effectuées afin d'évaluer la répétabilité. Nous avons ensuite traité les résultats à l'aide du logiciel MATHEMATICA.

2.2.3 Traitement des résultats : Logiciel MATHEMATICA

L'ensemble des programmes de traitement et de préparation des données issues des différents moyens de mesure précédemment cités, ont été écrit à l'aide du logiciel de calcul MATHEMATICA Version7, de la société WOLFRAM RESEARCH. Ce logiciel intègre un moteur de calcul symbolique et numérique, des fonctions graphiques 2D et 3D ainsi qu'un ensemble de fonctions programmées. Ses différentes fonctions, ajoutées à sa puissance de calcul font de MATHEMATICA un logiciel de calcul et de traitement de données en bonne adéquation avec les besoins du projet. Tous les traitements des données issues du banc, la modélisation de la méthode par pondération, les calculs des résidus et toutes les simulations Monte-Carlo ont été réalisés grâce à ce logiciel.

2.2.4 Précaution et tests pour les acquisitions

2.2.4.1 Amélioration des données des capteurs capacitifs

Selon la procédure d'acquisition d'une position de mesure (Figure 11), nous avons amélioré les données des capteurs capacitifs en deux étapes :

- Le moyennage de 30 mesures brutes pour diminuer le bruit. Ce choix résulte d'une étude menée au LNE dans le cadre du développement de la table croisée.
- Pendant la phase d'inclinaison du porte-capteurs qui a pour vocation d'améliorer la résolution des niveaux, on parcourt de fait une zone du capteur qui fera également l'objet d'une moyenne ce qui permet de diminuer l'effet des erreurs locales de justesse. Cette seconde stratégie est certainement moins classique que la réduction du bruit par moyenne.

2.2.4.2 Amélioration de la résolution des niveaux

La résolution affichée par les niveaux électroniques dont nous disposons est de 1 microradian. Elle correspond à 20 nanomètres d'écart entre deux capteurs situés à 20 mm l'un de l'autre ce qui est excessif pour notre application.



Figure 12 : Oscillation des niveaux [LAH2005-b]

Dans la thèse de Ludovic LAHOUSSE [LAH2005-b], il teste le niveau en provoquant une oscillation de la matrice porte capteurs. La courbe présentée sur la Figure 12 montre une comparaison entre la mesure de rotation donnée par les capteurs capacitifs et les indications du niveau électronique. La régularité des sauts laisse penser que la qualité de comportement du niveau est très fine et qu'il est possible d'améliorer sa résolution. Nous avons validé par simulation numérique la pertinence de l'amélioration de la résolution du niveau en moyennant les mesures sur une dizaine de pas, où chaque pas correspond à la résolution initiale du niveau qui est de 1µrd.

Pour cette raison, deux actionneurs piézo-électriques sont introduits dans le banc dédié. Le premier actionneur permet de faire basculer la matrice du porte-capteurs et le niveau électronique qui lui est associé. Le second actionneur permet quant à lui de faire osciller la pièce et le niveau électronique de référence.

2.2.4.3 Modification du montage du porte-capteurs

Nous avons testé le protocole de mesure d'une position en basculant le porte-capteurs. Nous avons constaté un comportement anormal pendant le déplacement du porte-capteur à partir des mesures du niveau électronique.


Figure 13 : Les données du niveau électronique avant la modification

La Figure 13 correspond à trois séries mesurées avec le niveau. Pour chaque série, le portecapteurs monte puis descend via l'action de l'actionneur piézoélectrique. Comme nous pouvons le constater, le porte-capteur ne se revient pas à la même position de départ. La cause vraisemblable est certainement d'origine mécanique.

Nous avons alors analysé le montage du porte-capteurs (Figure 14). Sa conception met en œuvre une liaison découplée isostatique définie par 3 fils entre le porte-capteurs et la table Aérotech. Elle permet d'éviter la transmission de déformations éventuelles. Afin d'éviter la rupture des fils suite à une sollicitation imprévue de la liaison, trois vis de diamètre 8mm servent de butées.



Figure 14 : présentation des anciens liens (3 fils fixés et 3 vis)

Nous avons remarqué que les trois vis (Figure 15 en haut) frottent dans l'alésage qui les reçoit. Ceci l'empêche alors de se déplacer librement et crée l'hystérésis constaté.



Figure 15 : La vis avant et après la modification

Nous les avons remplacé par des tiges de diamètre 2 mm qui sont centrées à l'intérieur d'une vis M8, avec un contre écrou (Figure 15 en bas). L'extrémité de chaque tige est mise en contact sur le fond de l'alésage afin de créer l'effort de tension.



Figure 16 : Les données du niveau après la modification

La Figure 16 montre des mesures effectuées avec le niveau après les modifications. Elles améliorent nettement la maîtrise de la position du porte-capteurs.

2.2.5 Réglages

Pendant la phase de mesure, pour chaque position, il est nécessaire de basculer le portecapteurs de 10 µrad afin d'améliorer la résolution du niveau. Il est donc nécessaire de prendre en considération la plage de déplacement des capteurs qui est d'environ 20 µm. Nous présentons dans la suite les trois étapes principales de ce réglage.

Réglage du parallélisme pièce à mesurer par rapport au granit (guidage porte-capteur)

Ce premier réglage consiste à positionner la pièce de référence à l'aide d'un comparateur mécanique dont la résolution est de dix nanomètres.

Au niveau du réglage de la pièce, nous avons des leviers permettant un réglage fin du parallélisme de la pièce par rapport au granit. Le porte-capteurs se déplace en dessous. Une

démultiplication de mouvement permet d'obtenir, à partir d'une butée micrométrique de résolution $1\mu m$, un mouvement vertical de $0.1\mu m$ sur la référence.

Après réglage, les lames de suspension sont serrées puis les lames de réglage sont libérées.



Figure 17 : Pièce à mesurer

Réglage de la course (plage de mesure) des capteurs

La procédure pour aligner les capteurs consiste simplement à monter tous les capteurs sans serrage puis à retourner l'ensemble sur une surface plane de haute qualité comme un marbre de métrologie. La qualité de réalisation de la surface du porte-capteurs n'était pas suffisante puisque la pièce « boitait » sur le marbre de manière importante. Nous avons réalisé un rodage sur la partie supérieure de la platine porte-capteurs.





Figure 18 : Porte-capteur sans et avec capteurs

L'étape suivante consiste au réglage du parallélisme entre la pièce à mesurer et les 16 capteurs via trois vis fixées sur la matrice porte-capteurs (Figure 19).

En utilisant les données des mesures fournies par les 16 capteurs directement lues sur l'écran de l'interface LabVIEW, le réglage, après le desserrage des lames flexibles de maintien, s'effectue avec les trois vis micrométriques (Figure 19) du support jusqu'à obtenir la réponse d'un juste positionnement de l'ensemble de 16 capteurs. Après resserrage des lames flexibles, il reste à vérifier le maintien de l'alignement. Normalement, il faudrait ensuite desserrer les vis micrométriques. Or, la conception a été réalisée de telle manière que le comportement en tant que solide de l'ensemble porte-capteurs plus le niveau soit bien meilleur en laissant les vis serrées. Le vérin piézoélectrique, qui s'appuie sur le granit, fait basculer l'ensemble qui s'appuie sur les points de contact entre la pièce support et le granit.



Figure 19 : Matrice du porte-capteurs et son réglage

A la fin du réglage, l'idéal aurait été d'avoir une réponse de $50\mu m$ pour tous les capteurs, ce qui aurait placé chaque capteur au milieu de l'étendue de mesure (0-100 μm). En pratique, la réponse des 16 capteurs est située entre 4 et 6 volts environ soit entre 40 et 60 μm . Les difficultés pratique ne permettent pas d'améliorer ce résultat qui cumule la qualité d'alignement des capteurs obtenus précédemment et le parallélisme du porte-capteur.

Réglage de la course de l'actionneur piézo-électrique du porte-capteurs

Afin de basculer le niveau qui s'intègre dans le montage du porte-capteurs pour améliorer sa résolution, nous utilisons un actionneur piézo-électrique installé sur le montage du porte-capteurs.



Figure 20 : Représentation du piézo mobile

L'actionneur piézo-électrique utilisé est un vérin PI (P-845.40) de 60 µm de course. Il doit entrer en contact avec le granit pour commencer à mouvoir le porte-capteurs mais, pendant le déplacement du chariot suivant les axes X et Y, il ne doit pas rester en contact avec le granit pour éviter un effort latéral, du au frottement, pour lequel il n'est pas conçu.

Des cales pelables sont intercalées sous le support du vérin piézoélectrique (Figure 20) pour obtenir une distance nominale de 20 µm entre la face de contact du vérin piézoélectrique et le granit en position non chargée. Le vérin à l'état non excité n'est donc pas en contact avec le granit. Le premier déplacement du vérin (pour chaque position du porte-capteur) programmé a pour fonction d'assurer le contact avec le granit.

2.3 Conception du banc pour la phase « étalonnage »

L'étalonnage des capteurs capacitifs est effectué en plaçant un interféromètre à laser en principe d'Abbe. Cet étalonnage est réalisé in-situ car l'expérience montre que les capteurs capacitifs sont sensibles aux conditions de montage.

Pour réaliser l'étalonnage du niveau électronique, nous avons étudié deux voies :

- la méthode de la tangente qui consiste à utiliser le laser comme référence et à déterminer l'axe de rotation à l'aide de capteurs capacitifs
- l'utilisation de l'angle fournit par l'inclinaison du porte-capteurs. Cet angle est calculé grâce aux indications des 16 capteurs préalablement étalonnés.

2.3.1 Laser

2.3.1.1 Laser hélium-néon

LASER est une abréviation qui signifie *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que l'on traduit en français par : amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement.

On l'utilise maintenant couramment pour la mesure des longueurs, et des déplacements.

Le laser le plus répandu en métrologie dimensionnelle est le laser hélium-néon (He-Ne). Il émet en régime permanent un faisceau très intense, très directif, d'une radiation rouge dont la longueur d'onde dans le vide est de 632.99 nm.

Le premier laser He-Ne a été réalisé en 1961. Depuis lors, la technologie laser a été améliorée, mais le principe de travail n'a pas changé.



Figure 21 : Schéma de principe d'un laser hélium-néon [LIP_R1320]

La Figure 21 montre les composants essentiels d'un laser He-Ne. Le laser est un oscillateur couplant un milieu actif amplificateur et une cavité résonnante. Le milieu actif est un mélange basse pression des gaz hélium et néon contenu dans un capillaire dans une proportion d'environ 6 à 1, avec une pression de 400 Pa. Afin de créer la décharge, le capillaire du tube est muni d'une anode et d'une cathode.

La cavité résonnante est formée de deux miroirs plans ou sphériques dont l'un est légèrement transparent, de façon à permettre la sortie du faisceau laser. La lumière qui est émise par une émission spontanée du gaz néon excitée est reflétée vers le capillaire puis est amplifiée par émission stimulée [WET1998].

2.3.1.2 Interféromètre à laser

L'interféromètre à laser représente l'un des meilleurs dispositifs pour l'application du contrôle pour la haute-précision des déplacements.



Figure 22 : Principe de l'interféromètre

Le système d'interféromètre à laser homodyne est basé sur la mesure de la différence de phase entre deux faisceaux. La source de lumière ultra stabilisée est séparée par une lame séparatrice qui réfléchit la moitié du faisceau vers un coin de cube fixe, le reste continuant vers un coin de cube mobile (Figure 22).

2.3.2 Principe de conception

L'objectif d'incertitude suivant Z de quelques nanomètres impose que la chaîne métrologique Z soit étalonnée, ce qui conduit à étalonner les capteurs capacitifs. Cet étalonnage est prévu pour être réalisé in-situ pour éviter des incertitudes liées au démontage des capteurs comme la déformation sous l'effet du serrage ou l'orientation par rapport à la cible. Les capteurs capacitifs seront évidemment étalonnés un par un de manière à pouvoir être placé en principe d'Abbe par rapport au laser.



Figure 23 : Schéma de principe de l'étalonnage d'un capteur capacitif

2.3.3 Présentation du banc du mesure : Mise en œuvre de l'interféromètre

Nous avons complété le banc existant avec un dispositif supplémentaire indispensable pour soutenir les instruments :

- Laser, son coin de cube et son cube à lame séparatrice (Figure 24 : entouré en bleu)
- Quatre capteurs capacitifs supplémentaires mesurant le mouvement du matelas (Figure 24 : entouré en rouge)
- Deux actionneurs piézo-électriques en complément de l'actionneur déjà prévu sur l'un des 3 pieds du matelas afin de pouvoir crée une translation : mouvement utile pour l'étalonnage des capteurs capacitifs.





Figure 24 : Banc en phase d'étalonnage équipé de l'interféromètre

Le banc de mesure pour la phase « étalonnage » se présente sous les deux parties suivantes :

Partie mobile

La structure mobile est composée du matelas (plaque en Aluminium de 800*800*100mm³) sur lequel sont installés les trois actionneurs piézo-électrique qui permettent un mouvement de translation quasi parfait (meilleure que ±1µrd, résolution du niveau) suivant l'axe principal (Z) de mesure. Les actionneurs sont des vérins de 60 µm de course.



(a)



(b)

Figure 25 : (a) laser avec son système (b) capteur capacitif supplémentaire

Ce matelas mobile porte le coin de cube mobile sur son support (Figure 25-a) d'une part et le plan de référence d'autre part. Ainsi le même mouvement de translation linéaire de la partie mobile selon l'axe Z est mesuré par l'interféromètre laser d'une part et par un capteur capacitif d'autre part placés en principe d'Abbe. Afin de disposer d'une information supplémentaire concernant le mouvement du matelas, quatre capteurs capacitifs supplémentaires (Figure 25-b) ont été disposé aux quatre coins du matelas (les poutrelles 2 et 4 : Figure 24).

Partie fixe

La lame séparatrice (Figure 26 : No.2) est fixée sur la poutrelle 3 qui est solidaire du granit sur lequel est posé le porte-capteurs (Figure 26 : No.1). Il est important que cet ensemble, qui constitue une chaîne métrologique au sens classique du terme, se comporte comme un solide.

Cette chaîne de solides ayant une grande longueur, la stabilité thermique ne va pas de soi. Pour limiter, l'effet d'une variation de température sur la position relative, nous avons équilibré les matériaux (acier et aluminium) pour minimiser les effets de dilatation. Cette équilibre n'est pas parfait. En particulier le porte-capteurs est en aluminium sur un support en acier. Nous n'avons pas voulu réaliser les supports verticaux de la lame séparatrice en deux parties.



Figure 26 : Chaîne de maintien en position du banc « phase étalonnage »

2.3.4 Source d'incertitudes

L'interféromètre idéal a été décrit (Annexe II). Il a été démontré que, pour un interféromètre homodyne (interféromètre à une seule fréquence), le déplacement d'un coin de cube peut être déterminé en mesurant le changement de phase entre la mesure et la référence du signal. De l'équation (Annexe II), on constate que la précision des déplacements calculés dépend de la précision de la détermination du changement de phase, de la longueur d'onde de la lumière utilisée et de l'indice de réfraction du milieu. A partir de cela, il y a de nombreuses autres sources d'erreurs en fonction de la configuration utilisée. Les erreurs de l'interféromètre à laser peuvent être divisées en trois catégories : celles dépendant du dispositif, celles de l'instrument et celles de l'environnement.

La première catégorie appelée « Dispositif dépendant », concerne des erreurs qui sont liées à la mise en œuvre du dispositif. Elles peuvent typiquement être minimisées ou même éliminées en utilisant une installation correcte et des procédures d'alignement.

La seconde catégorie appelée « Instrument dépendant », concerne les effets de l'électronique comme les erreurs de comptabilité, d'interpolation et de non-linéarité de l'électronique. Elles sont en général de l'ordre de 0.5 nm [COS2004]. L'erreur résultant du retard de l'optique de l'interféromètre à l'échantillon de mesure, aussi connu en tant que données a été étudié par Demarest [DEM1998].

La troisième catégorie appelée « Environnement dépendant », concerne l'influence thermique sur l'interféromètre correspondant à la dilatation du dispositif optique, ou bien des effets thermiques de l'optique. Il y a aussi l'indice de réfraction du milieu dans lequel la lumière se déplace, l'air en particulier, fait partie de cette catégorie.

En conclusion, l'influence sur la précision d'un interféromètre laser est [COS2004] :

Dispositif dépendant :

- Erreur de cosinus
- Erreur d'Abbe
- Erreur de trajet mort
- Uniformité des miroirs

- Stabilité mécanique

Instrument dépendant

- Fréquence et stabilité de la source du laser
- Électronique
- Erreur d'interpolation

Environnement dépendant

- Indice de réfraction
- Influence thermique
- Turbulence

2.3.4.1 Erreur de comptage et d'interpolation (SDE : sub division error)

En général, la résolution donnée par le système de lecture de déplacement est plus fine que le pas de la frange d'onde. Un système d'interpolation permet de partager cette frange dans un rapport qui peut évoluer entre 4 et 256. Ce système, qui correspond cette fois à un système absolu et non plus à une longueur d'onde devient sensible à des causes d'erreurs telles que la linéarité de circuits électroniques ou des problèmes d'alignement relatif des miroirs. L'erreur introduite sur le résultat de la mesure est périodique, de période correspondant à celle de la longueur d'onde. La forme de cette erreur est cependant susceptible de se déformer le long d'un déplacement important. Les erreurs d'alignement sont susceptibles de varier le long du déplacement.



Figure 27 : les résultats mesurés avec l'écart périodique [COS2004]

Pour minimiser ce défaut, il faut procéder aux corrections du Lissajous en le modélisant par une ellipse excentrée à partir de laquelle on extrait les paramètres de correction [HEY1981].

2.3.4.2 Indice de l'air, formules de Bengt Edlen

La longueur d'onde de la lumière émise par un laser hélium néon de la société Renishaw est typiquement de 632.99058 nm dans le vide. La précision de l'interféromètre dans le vide est à ± 0.1 ppm. Toutefois, la plupart des applications nécessitent un fonctionnement du système dans des conditions atmosphériques maitrisées, cette précision (± 0.1 ppm) est donc dégradée.

En effet, la longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde au cours d'une période. Elle est proportionnelle à la période *T*, et donc inversement proportionnelle à la fréquence *f*. Si on appelle ν la vitesse de l'onde, alors $\lambda = \nu T = \frac{\nu}{f}$. L'indice de réfraction d'un gaz, de l'air en particulier, dépend de la température, de la pression, de l'humidité relative ambiante, du taux de CO_2 et autres polluants. Elle change effectivement la fréquence de la lumière qui apparaît comme un trajet long.

Dans le vide, la longueur d'onde est notée λ_{vide} où $\lambda_{vide} = c/f$ avec c la vitesse de l'onde dans le vide. A partir de la relation $= \frac{c}{v}$, nous obtenons la relation liant la longueur d'onde λ_n dans un milieu d'indice *n*, et la longueur d'onde de la même radiation dans le vide i.e.

$$\lambda_n = \lambda_{vide} / n$$

La longueur d'onde est la période spatiale de l'onde lumineuse. Pour la connaître au moment de la mesure, on doit :

- connaître la longueur d'onde dans le vide,
- calculer l'indice de réfraction en fonction des conditions ambiantes (pression, température, humidité relative).

Heureusement, les effets de la température, de la pression et de l'humidité qui affectent la longueur d'onde de la lumière sont bien connus. Ils sont liées par l'équation Edlen. La longueur d'onde de laser peut varier selon des paramètres ci-dessous.

Température : 1 ppm/1°C

Pression : 1 ppm/2.5 mm Hg

Humidité : 1 ppm/85% changé

Dans la publication de ces travaux en 1966 [EDL1965], B.Edlen donnait des relations permettant de calculer l'indice de réfraction de l'air pour la radiation utilisée et les caractéristiques de l'air ambiant. Ces relations ont été modifiées par Birch et Downs du NPL (Londres) en 1993 [BIR1993]; une correction a été apportée en 1994 [BIR1994]. Elles sont actuellement les plus précises. L'incertitude sur l'application de ces formules est de $\pm 3 \cdot 10^{-8}$. Elles sont précisées dans le Tableau 1.

| Tableau 1 – Formules d'Edlen modifiées (d'après Métrologia 1993, 30, p. 155-162) | | | | | | |
|--|--|---|--|--|--|--|
| Indice | Réfringence standard | Réfringence de l'air sec | Réfringence de l'air humide | | | |
| Équation | $\begin{split} (n-1)_8 \times 10^8 &= 8 \; 342,54 \\ &+ 2 \; 406 \; 147 \; (130 - \sigma^2)^{-1} \\ &+ 15 \; 998 \; (38,9 - \sigma^2)^{-1} \end{split}$ | $(n-1)_{tp} = (n-1)_{s} \frac{p}{96095,43}$ $\cdot \frac{1+10^{-8}p(0,601-0,00972t)}{1+0,0036610t}$ | $n_{tpf} = n_{tp} - f[3,734 \ 5 - 0,040 \ 1 \ \sigma^2] \cdot 10^{-10}$ | | | |
| Validité | $350 < \lambda < 650 \text{ nm}$ $X_{co_2} = 450 \text{ ppm}$ f = 0 p = 1.013,25 hPa $t = 15 ^{\circ}\text{C}$ | 10 °C < <i>t</i> <30 °C 200 < <i>p</i> <1 150 hPa <i>f</i> = 0 | $0 < f \le f_s$ ou 0 < e < 100 % | | | |
| Unités | σ = 1/λ avec λ en μm | ten ^o C (EIT 90) ρ en Pa | f en Pa $e = \frac{f}{f_s} \cdot 100 \text{ (en \%)}$ | | | |
| Modifications | – Taux moyen de CO ₂ | – Échelle EIT 90 – Unités SI – Densité de l'air sec | BIPM (1998) Comparaison des valeurs mesurées par réfractomètre (Birch et Downs) | | | |
| Valeurs à 633 nm | $(n-1)_{s} = 276,531 \cdot 10^{-6}$ | $(n-1)_{tp} = 2,877\ 67\ \cdot 10^{-9}\ \cdot \rho \\ \cdot \frac{1+10^{-8}\ \rho(0,601-0,009\ 72t)}{1+0,003\ 661\ 0\ t}$ | $n_{tpf} = n_{tp} - f \cdot 3,635 \ 3 \cdot 10^{-10}$ | | | |
| Influence de petites variations | $dn = 1,5 \cdot 10^{-10} \cdot dX_{CO_2}$ $X_{CO_2}(ppm)$ | Pour t = 20 °C et p = 1 013,25 hPa dn = 2,68 · 10 ⁻⁹ dp dn = - 9,26 · 10 ⁻⁷ dt | autour de 20 °C d <i>n</i> = – 8,49 · 10 ⁻⁹ d <i>e</i> ou d <i>n</i> = – 3,63 · 10 ⁻¹⁰ df | | | |
| Incertitude sur $n_{tpf} = \pm 3$ p: pression atmospheri t: température (sèche) (f: pression partielle de f_{e} pression saturante de | ³ · 10 ^{−8} à laquelle il faut ajouter les incertitud que en Pa de l'air en °C vapeur d'eau en Pa, ou <i>e</i> humidité relative, e ≥ vapeur d'eau en Pa | n % | | | | |

Tableau 1 : Formules d'Edlen [LIB_R1320]

L'indice de réfraction n ou la réfringence n-1 se calcule en trois étapes :

- la réfringence standard en fonction de la longueur d'onde λ .
- la réfringence de l'air sec en fonction de la pression atmosphérique et de la température de l'air et de la réfringence standard.
- la réfringence de l'air humide en fonction de taux d'humidité et de $(n-1)_{tp}$.

Il est aussi possible de mesurer l'indice de réfraction avec un interféromètre spécifique dénommé *réfractomètre*. Un bras de l'interféromètre est dans le vide, l'autre est dans l'air dont on veut mesurer l'indice. La différence de marche optique n'est donc due qu'à la différence d'indice. Pour obtenir une justesse de l'ordre de 10^{-8} , la réalisation d'un tel appareil est délicate. L'avantage, c'est qu'il prend en compte des éventuelles pollutions de l'air.

Généralement, l'interféromètre laser est équipé avec un système de mesure de l'environnement capable de calculer la température, la pression barométrique, et l'humidité lors d'un essai. Cette information est utilisée pour modifier électroniquement les valeurs de déplacement, pour compenser le changement de la vitesse de la lumière dans l'air dans les conditions mesurées. Ainsi, la compensation propre peut éliminer la plupart des effets environnementaux sur le système. Il y a cependant une zone appelée « trajet mort » où la compensation pour la vitesse de la lumière n'est pas appliquée.

2.3.4.3 Trajet mort

Le trajet mort est une des sources d'erreur dues à l'environnement et à la position des optiques du laser. Cette erreur est subie par la partie du faisceau que la compensation ne peut pas corriger.



Figure 28 : Illustration du trajet mort (TM) dans le système d'interféromètre

Dans la Figure 28, la zone 1 est la distance fixe entre la source laser et le cube à lame séparatrice. Cette zone étant traversée par le faisceau fixe et le faisceau variable, une variation d'indice n'a pas d'influence sur leur mesure de phase.

En Zone 3, le coin cube mobile donne l'information de position tout le long du parcours de la mesure. L'électronique de compensation environnementale calcule et prend en compte la variation de l'indice de réfraction de l'air avec les formules de Bengt Edlen.

La compensation des changements des conditions ambiantes pendant la mesure ne se font que pour la distance mesurée d et non pas pour le trajet mort en Zone 2. Toutefois, si le trajet mort est faible et les mesures sont faites sur une court période de temps, les conditions ambiantes en général ne changeront pas suffisamment pour générer une erreur importante. L'erreur du trajet mort peut être réduite en minimisant le trajet mort.



Figure 29 : Distance de trajet mort

Afin de minimiser le trajet mort, il faut que le cube à lame séparatrice soit placé au plus près possible du point zéro du coin cube mobile. En règle générale, quand les optiques sont placées à moins de 50 mm, l'erreur due au trajet mort est négligeable [ENG]. C'est effectivement la distance où nous effectuons nos mesures (Figure 29).

3 Etalonnage des capteurs capacitifs

Dans cette partie, nous présentons deux étapes de correction des capteurs.

Première étape : Etalonnage (§3.1):

L'objectif est de comparer et de corriger les mesures de déplacement d'un capteur capacitif par rapport aux mesures du même déplacement faites avec l'interféromètre laser.

Le principe d'Abbe a été respecté. Ainsi les capteurs capacitifs et les interféromètres se trouvent dans la même ligne de l'axe de mesure. Seuls les quatre capteurs capacitifs supplémentaires montés aux quatre coins du matelas ne pourront pas être étalonnés en principe d'Abbe.

Deuxième étape : Diminution de l'incohérence entre les capteurs (§3.2)

Nous verrons que même après l'étalonnage des capteurs capacitifs, il reste une incohérence entre la mesure des 16 capteurs liés au même solide en regard de la pièce à mesurer. Nous proposons une seconde correction ayant pour but de diminuer l'incohérence entre les indications des 16 capteurs en comparant leurs indications à chaque pas de mesure par rapport au plan moyen calculé.

3.1 Etalonnage

3.1.1 Capteur capacitif

Un capteur capacitif est très généralement réalisé avec une électrode plane entourée d'un anneau de garde. L'électrode forme avec la pièce à mesurer un condensateur plan. Leur principe est de mesurer la capacité relative entre la surface cible et la zone sensible, matérialisée sous la forme d'une électrode centrale.

Ils présentent autour de l'électrode centrale une électrode de garde maintenue par asservissement électronique au même potentiel que l'électrode de mesure afin d'éliminer les effets de bord autour de la zone sensible (Figure 30).



Figure 30 : Schémas d'un capteur capacitif mesurant une pièce conductrice

La détermination de la distance d est réalisée en mesurant la capacité C du condensateur.

La capacité entre le capteur et la pièce à mesurer est reliée à la constante de champ électrique \mathcal{E}_o , à la constante diélectrique relatif \mathcal{E}_r du milieu entre le capteur et la pièce à mesurer, à la surface de l'électrode du capteur A et à la distance à mesurer d

$$C = \frac{\varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}$$

Un changement de capacité, en raison de modifications d'un de ces paramètres, est mesuré par un système électronique. Pour les mesures de déplacement, ε_r et A sont considérés comme constant tandis que d évolue.

Si un courant alternatif de fréquence constante traverse le condensateur du capteur, alors l'amplitude de la tension alternative dans le capteur est proportionnelle à l'écart entre le capteur et la pièce à mesurer. Ils sont liés par la relation :

$$V = \frac{I}{j\omega \cdot C} = \frac{I \cdot d}{j\omega \cdot \varepsilon \cdot S}$$

où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation du courant d'alimentation. Cette tension est proportionnelle à la distance *d*

Un défaut de parallélisme entre cette zone et la cible perturbe la loi de variation de la capacité en fonction de la distance (Figure 31). D'après une étude effectuée pendant la rédaction de cette thèse par le LNE mais qui n'est pas encore publiée, l'inclinaison d'un capteur capacitif par rapport à la surface cible a effectivement une incidence sur la pente de correction. Dans notre cas, le capteur s'incline par rapport à sa cible de l'ordre de $\pm 25\mu$ rd. Cette inclinaison pourrait avoir une incidence de l'ordre de la moitié de notre incertitude totale sur la pente de correction. Cela reste néanmoins à confirmer car c'est une étude préliminaire.



Figure 31 : Défaut d'alignement d'un capteur capacitif [LAH2005-b]

3.1.2 Détermination de l'axe d'Abbe

Nous donnons dans ce paragraphe des explications concernant uniquement l'axe X. Un travail similaire, mais non décris, a été réalisé pour l'axe Y. Pour étalonner un capteur capacitif en respectant le principe d'Abbe, il faut trouver la position du porte-capteurs qui le placera en face du laser. L'alignement est délicat car le laser et le capteur capacitif sont séparés par la pièce à mesurer et le matelas. Pour déterminer la position du porte-capteurs qui aligne un capteur et le laser, l'idée consiste à faire subir une rotation dans un sens puis dans l'autre (soit un angle total de 25μ rd) au plan de référence en optimisant les valeurs fournies aux vérins de manière à ce que le laser donne une indication sensiblement constante. En pratique, la dérive liée au transfert de masse du porte-capteurs de l'ordre de ± 50 nm près limite cette sensibilité).

On cherchera alors la position pour laquelle l'indication du capteur est sensiblement indépendante de la rotation.



Figure 32 : Illustration de la distance d'Abbe

Trois étapes sont nécessaires pour trouver la position adéquate entre le laser et les capteurs.

Première étape (Figure 33) : nous avons piloté les trois vérins piézo-électriques afin d'orienter l'ensemble de la pièce en respectant l'indication du zéro laser (expérimentalement : $\pm 50nm$). Le porte-capteur est déplacé selon la course qui correspond au diamètre de la pièce. Un nombre de 13 mesures sont ainsi effectuées.



Figure 33 : La position pour l'étape 1

Deuxième étape (Figure 34) : on a orienté la pièce dans l'autre sens en actionnant les vérins et réaliser une nouvelle séries de mesures.



Figure 34 : La position pour l'étape 2

Troisième étape (Figure 35) : on calcule la différence « delta » entre les deux valeurs relevées avec le même capteur pour les deux positions de la pièce et pour toutes les positions du porte-

capteurs. A partir de ces mesures, on calcule la droite des moindre carrés des valeurs « delta » et on détermine la position de la table Aérotech qui correspond à la valeur « delta » égale à zéro. Cette position est celle pour laquelle l'indication du capteur n'est pas sensible à la rotation et correspond donc à l'alignement avec l'axe du Laser. Sur le graphique de la Figure 35, l'axe des ordonnées n'est pas gradué car d'une part le capteur n'est pas encore étalonné dans cette phase et d'autre part seule la position X du passage à zéro compte.



Figure 35 : Détermination de la position de l'axe d'Abbe

Lorsqu'on calcule la distance entre les positions des capteurs par différence entre les positions d'Abbe, on trouve des différences inférieures à ± 0.5 mm par rapport aux distances multiples de 20mm issues de l'usinage du porte-capteur. Ceci constitue une bonne indication sur l'incertitude liée au processus.

L'incertitude sur la détermination de l'axe d'Abbe introduit une incertitude sur la qualité de l'étalonnage qui est proportionnel à l'angle de rotation. Pour cette raison, nous avons réalisé un test en pilotant les trois vérins piézo-électriques qui soutiennent le matelas correspondant à un déplacement horizontal de 20 μ m, parallèle au réseau des capteurs de mesure. Les informations du niveau du dessus montrent que l'erreur de rotation est inférieure à $\pm 1 \mu$ rad. Elle correspond à une erreur d'Abbe de ± 0.5 nm sur l'étalonnage.

3.1.3 Protocole de mesure pour l'étalonnage

Phase de mesure

Afin de faire l'étalonnage du capteur sur sa course utile, nous avons déterminé la plage de mesure de chaque capteur capacitif pendant la phase de mesure de propagation. La Figure 36 représente les acquisitions d'un capteur effectuées pour une rectitude. Chaque capteur balaye une course d'environ 20 μ m.



Figure 36 : L'étendue de la phase mesure

<u>Phase étalonnage</u>

Les déplacements nécessaires à la phase d'étalonnage sont créés par les actionneurs piézoélectriques. Nous avons piloté trois piézo-électriques qui soutiennent le matelas pour générer un déplacement plan parallèle au réseau des capteurs de mesure (Figure 37). La mesure de l'étalonnage a été réalisée. Elle correspond à la reproductibilité. On mesure respectivement du capteur 1 au capteur 16 puis on le recommence.



Figure 37 : Phase d'étalonnage



Figure 38 : Phase de mesure et phase d'étalonnage de 16 capteurs

La phase d'étalonnage est réalisée à l'aide d'un cycle de 60 positions en montée et autant en descente. Chaque incrément représente 340 nm soit une course totale de 60*340nm=20400nm. La Figure 38 montre des rectangles qui correspondent à la plage d'étalonnage et les courbes qui correspondent aux étendues de mesure des capteurs pendant l'acquisition d'un profil. Par exemple, la mesure du capteur 1 est en dehors de la plage étalonnée. Il est clair que cette situation n'est pas satisfaisante même si la correction est linéaire. Pour la corriger, il faut programmer un offset sur les vérins avant de réaliser la course

de 20µm. Ceci aurait nécessité une nouvelle campagne d'acquisitions qui n'a pas pu être réalisée.

3.1.4 Courbe d'étalonnage



3.1.4.1 Choix d'un modèle linéaire comme courbe d'étalonnage

Figure 39 : Courbe d'étalonnage d'un capteur capacitif

La Figure 39 représente les acquisitions aller-retour d'étalonnage d'un capteur capacitif. L'allure générale est une droite identifiée au sens des moindres carrés. Le passage à un modèle parabolique, voire à un polynôme de plus haut degré, permet de diminuer la valeur du résidu ce qui peut paraître tentant. Cependant, les résidus entre la droite des moindres carrés et les points mesurés ne sont pas stables d'une acquisition à l'autre ce qui rend l'utilisation d'un polynôme de plus haut degré complètement illusoire.



Figure 40 : Bruit du capteur 9

La Figure 40 représente les résidus des informations du capteur par rapport à la courbe d'étalonnage pour deux acquisitions. La courbe bleue est une courbe aller et la courbe rouge est une courbe retour, l'écart entre les deux courbes met en évidence d'éventuelle dérive thermique ou hystérésis. On constate que les résidus ne sont pas stables, il n'est donc pas nécessaire d'utiliser un modèle de correction de degré supérieur à 1.

3.1.4.2 Stabilité des pentes de correction

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à la reproductibilité de la pente de correction de chaque capteur. Les 16 capteurs ont été étalonnés 7 fois dans un cycle. Cela consiste à récupérer l'information des capteurs 1 à 16 puis à recommencer 7 fois. En conséquence, entre chaque étalonnage d'une durée de quatre heures, la table a bougé. Ceci induit alors des dérives dont l'évaluation est importante.



Figure 41 : Reproductibilité des pentes d'étalonnage

Dans la Figure 41, nous voyons deux groupes de capteurs. Pour les premiers huit capteurs, entourés en bleu, les pentes de la courbe d'étalonnage sont de l'ordre de 0.5%. Pour le deuxième groupe de huit capteurs, entourés en rouge, les pentes de la courbe d'étalonnage sont de l'ordre de 16% sauf celle du quinzième capteur qui est de l'ordre de 11%. Il est à noter que ces deux groupes de capteurs n'ont pas été approvisionnés en même temps et qu'ils ne sont pas de la même technologie.

Si le premier cycle des mesures est exclu, alors la reproductibilité des pentes de chaque capteur est de l'ordre de ± 1 pour 1000. Puisque les capteurs sont utilisés sur une course d'environ 20 μ m, cela représente ± 2 nm. Ceci valide la stabilité de la réponse du capteur dans le temps.

3.1.5 Effet de l'étalonnage des capteurs sur le calcul d'un profil

Dans le chapitre I, les différentes méthodes de dépouillement montrent une différence d'une centaine de nanomètres sur les profils reconstruits. Cette incohérence est due aux incertitudes.



Figure 42 : L'incohérence sur le calcul d'un profil

La Figure 42 représente, sans étalonnage des capteurs, le calcul d'un profil pour les deux stratégies extrêmes : à « capteur prépondérant » en rouge et à « niveau prépondérant » en bleu. La différence entre les deux profils est représentée par la courbe de droite.

Après l'étalonnage des capteurs capacitifs, nous constatons une diminution de cette incohérence. Cette diminution est d'autant plus importante que la correction des capteurs est importante. On a nettement deux groupes.



Figure 43 : (a) diminution de l'incohérence pour la ligne 1 (capteur 1 à 4) (b) idem pour la ligne 2 (capteurs 5 à 8)

Le premier groupe (Figure 43) est constitué des deux premières lignes de capteurs (capteurs numérotés de 1 à 8). La courbe bleue est la différence de chaque point du profil entre deux stratégies avant l'étalonnage du capteur. La courbe rouge est celle avec l'étalonnage des capteurs capacitifs. Effectivement, nous constatons une diminution de l'incohérence d'une cinquantaine de pourcent après l'étalonnage du capteur.





(b)

Figure 44 : (a) diminution de l'incohérence pour la ligne 3 (capteur 9 à 12) (b) idem pour la ligne 4 (capteurs 13 à 16)

Le deuxième groupe (Figure 44) est constitué des capteurs présentant une correction de l'ordre de 16%. Cette correction est beaucoup plus forte et diminue donc de manière significative l'écart. Avant l'étalonnage, l'incohérence est de l'ordre de quelques centaines de nanomètres (Figure 44 à gauche). Et après l'étalonnage, il ne reste qu'une incohérence de ± 20 nanomètres (Figure 44 à droite).



Figure 45 : Les profils avant et après faire l'étalonnage pour les 2 stratégies (capteurs 13 à 16)

L'étalonnage des capteurs (Figure 45) provoquent un rapprochement très net des solutions issues des dépouillements « à capteurs prépondérants » et « à niveaux prépondérants ». Compte tenu de l'échelle, les deux solutions sont quasiment parfaitement superposées. Il est à noter que les courbes obtenues après l'étalonnage sont en fait proche de la solution « à niveaux prépondérants ». Ceci revient à dire que les incertitudes sur les capteurs ont une sensibilité plus forte sur la solution « à capteurs prépondérants ».

3.2 Diminution de l'incohérence entre les capteurs

Lors de chaque pas de mesure pas propagation, une oscillation des niveaux est réalisée pour améliorer leur résolution. Durant ces oscillations, les 16 capteurs capacitifs mesurent le même mouvement relatif de solides. Leurs variations sont donc corrélées. Or, malgré leur étalonnage, les valeurs de chaque capteur ne sont pas totalement cohérentes entre elles.

Pour chaque position de mesure, le porte-capteurs oscille de 80 pas : 40 en montée et 40 en descente (Figure 46-gauche). Pour chaque pas de l'oscillation, les 16 capteurs fournissent une variation de distance (Figure 46-droite : points rouges) par rapport à la position initiale. Les 16 capteurs appartenant au même solide, le mouvement de celui-ci peut être estimé par la détermination du plan bleu par les moindres carrés.



Figure 46 : (a) Les déplacements d'un capteur pour une position mesurée (b) Trois pas des déplacements du porte-capteur

Pour chaque capteur, nous avons analysé et traité ces écarts expérimentaux par rapport au plan afin de diminuer les incohérences entre les capteurs en modifiant les coefficients de correction des capteurs.

3.2.1 Courbe de correction

Lorsque nous mesurons un profil (Figure 36), pour chaque position du porte-capteurs une oscillation est générée à l'aide de micro-actionneur. Nous déterminons une correction de la pente d'étalonnage pour chaque capteur afin d'améliorer leur cohérence. Pour un capteur, nous obtenons donc 13 corrections de pente différentes de la courbe d'étalonnage. Elles correspondent à chacune des positions de mesure de la propagation.



Figure 47 : Pentes de correction de 16 capteurs

Nous constatons que la dispersion sur les pentes des courbes d'étalonnage des 16 capteurs (Figure 47) est de l'ordre de 0,4 % pour un capteur. Cette valeur est beaucoup plus importante que celle de la reproductibilité de raccordement au laser (0,2 %). Ce résultat n'est pas surprenant étant donné que les corrections de pente d'un capteur ne sont pas déterminées sur la même plage de mesure des capteurs à cause de la topographie de la pièce et du granit.



3.2.2 Effet de la diminution de l'incohérence entre les capteurs sur le calcul d'un profil

Figure 48: Effet de la diminution d'incohérence entre les étalonnages des capteurs sur les profils.

La Figure 38 montre que les capteurs 1 à 6 n'ont pas été étalonnés tout à fait dans bonne zone d'utilisation. La Figure 48 montre l'évolution entre un profil dépouillé avec la méthode à capteurs prépondérants et le même profil dépouillé avec la méthode à niveau prépondérant et ceci pour les deux niveaux d'étalonnage. Il est apparaît que pour le profil mesuré avec les capteurs 1 à 4, l'amélioration, liée à la diminution d'incohérence entre les capteurs, est sensible puisque qu'elle est divisée par deux. Pour les capteurs de 5 à 8, la différence est faible. Elle correspond plutôt à une dégradation. L'effet est quasiment inexistant pour les capteurs 9 à 16.

L'ordre de grandeur de la différence entre les profils dépouillés selon les deux stratégies est de l'ordre de ± 20 nm pour les capteurs de 9 à 16 et de l'ordre de ± 35 nm pour les capteurs de 1 à 8.

4 Etalonnage des niveaux électroniques

L'étude de la bibliographie montre que la plupart des travaux concernant la mesure d'angle avec un faible niveau d'incertitude s'appuis sur l'étude d'angles matérialisés basés sur la division du cercle tels que les polygones ou plateaux angulaires [LEL2003]. Nous avons trouvé également l'étalonnage des angles repérés par variation de longueur : barres sinus [ACK2005], interféromètre.

Dans notre cas, nous avons besoin de faire l'étalonnage du niveau « in-situ ». La difficulté d'accès et donc de mise en œuvre de références angulaires de meilleur niveau (lunette autocollimatrice par exemple), nous a conduit à avoir recourt à la mesure *d'angles engendrés* par des variations de longueurs (Cf. chapitre 1 §1.2.2).

Pour réaliser l'étalonnage du niveau électronique, nous avons étudié deux stratégies liées aux différentes sources d'informations disponibles.

- L'information des mesures du laser et des quatre capteurs capacitifs supplémentaires disposés à chaque coin du matelas (§4.3)
- L'information provenant des 16 capteurs capacitifs du porte-capteurs (§4.4)

4.1 Niveau électronique

4.1.1 Principe de fonctionnement et mise en service

L'élément sensible à l'inclinaison est un liquide à surface libre qui sert de référence d'horizontalité. Le capteur n'est donc pas en mesure de mettre en évidence de rapides modifications de l'inclinaison.

Le plan de référence est constitué d'un liquide transparent à surface libre inclus dans un réservoir fermé. Un plan massif et transparent constitue le fond du réservoir. Un système de prisme, une diode lumineuse (LED) et un photo-détecteur sensible à la position du spot sont fixes par rapport au réservoir du liquide. Grâce au prisme, le flux lumineux issu de la LED apparaît, au travers du liquide, sur le détecteur sensible à la position. La surface du liquide fait fonction de miroir et elle dévie le signal lumineux. Le point d'impact de la lumière se déplace alors sur le détecteur de position. L'angle d'inclinaison est donc déterminé en fonction de la position de ce point d'impact.



Figure 49 : Principe de fonctionnement Nivel20

L'existence d'une source lumineuse à l'intérieur du boitier provoque un échauffement. A la mise sous tension, après un temps de chauffage d'environ 10 minutes, la température

intérieure est d'environ 3°C supérieure à la température ambiante. Si avant la mise en service, le capteur avait une température différente de la température ambiante, le temps d'attente devra être prolongé en conséquence.

4.1.2 Méthode de mesure

Le NIVEL20 dispose de quatre valeurs de mesure : l'inclinaison en X et en Y, mesurée en [mrad], la température T à l'intérieur du boitier mesurée en [°C] et enfin le signal P qui indique si l'appareil se déplace sur une zone de travail grossière ou s'il est trop fortement incliné. Ce signal a un caractère d'information utile lors de l'automatisation des mesures.

Inclinaisons X, Y :

Les inclinaisons en X et en Y sont saisies toutes les secondes et elles sont stockées dans la mémoire interne avec une résolution de 13 Bit ce qui correspond à 0.1 μ rad. Pour chaque mesure, la moyenne courante des dernières valeurs de mesure (de 1 à 128 en fonction de la configuration) est calculée. Elle est fournit par l'interface numérique avec une résolution d'un μ rad. Cette valeur est corrigée avec les paramètres de correction pour le point zéro, d'échelle et d'inversion. Nous avons souhaité obtenir du fabriquant, qui appartient aujourd'hui au groupe Hexagon Metrology, obtenir un accès aux valeurs mesurées avant le calcul de la moyenne et à une résolution de 0,1 μ rad. Malheuresement, ce niveau n'est plus maintenu et les ingénieurs compétents ont depuis quitté l'entreprise.

Température de l'appareil T :

La température de l'appareil est mesurée toutes les 10 secondes et elle est mise directement à disposition.

Etat du capteur P :

L'état du capteur P est obtenu à partir de l'électronique de mesure qui envoie un signal d'alarme en cas d'inclinaison trop prononcée. Le message envoyé est 'OK' ou 'F' (bon ou mauvais).

4.2 Précaution

4.2.1 Protocole de mesure pour l'étalonnage

4.2.1.1 Phase de mesure

Afin de réaliser l'étalonnage du niveau, nous avons déterminé la plage de mesure du niveau électronique pendant la phase de mesure. Les Figure 50 et 51 représentent les acquisitions du niveau effectuées pendant la mesure d'une rectitude.



Figure 50 : Phase de mesure du niveau dessus



Figure 51 : Phase de mesure du niveau dessous

4.2.1.2 Phase d'étalonnage

Le mouvement pour la phase d'étalonnage est réalisé à l'aide des actionneurs piézo-électrique pour deux niveaux :

- Niveau placé sur le matelas : un cycle de 180 positions en montée et autant en descente soit une course totale de 44 µrad (Figure 52).
- Niveau intégré avec le porte-capteur : un cycle de 150 positions en montée et autant en descente soit une course totale de 45 µrad (Figure 53).



Figure 52 : L'étalonnage de toute la plage de mesure



Figure 53 : L'étalonnage de toutes les étendues de mesure avec le niveau de dessous

4.3 Utilisation du laser

4.3.1 Présentation

Afin de faire étalonnage du niveau de référence, posé au dessus du matelas, nous utilisons les informations du laser et des capteurs capacitifs placés aux quatre coins sur la plaque.



Figure 54 : Représentation de positionnement du capteur et du piézo-électrique

La Figure 54 représente le schéma de la position du laser et des quatre capteurs avec des dimensions en millimètre. Le déplacement du matelas est caractérisé par trois informations. Le calcul utilise l'information du laser, du capteur1 et du capteur2. Les capteurs 1 et 2 servant à évaluer la position de l'axe de rotation sachant que les vérins piézoélectriques étant pilotés de telle manière que, nominalement, ces capteurs sont sur l'axe de rotation (voir annexe III).

4.3.2 Courbe d'étalonnage

Nous avons traité des mesures du niveau par rapport à la rotation calculée grâce aux calculs (Cf. Annexe III). La Figure 55 représente les mesures du niveau par rapport à la référence calculée. Les points bleus représentent les mesures du niveau en phase de montée de l'actionneur piézo-électrique, et ceux en rouge correspondent à la phase descendante.

Comme pour les capteurs capacitifs, nous proposons une courbe d'étalonnage linéaire. La pente obtenue est de 1.0915.



Figure 55 : Courbe d'étalonnage

4.3.3 Incertitude sur la référence

L'utilisation du laser et des capteurs capacitifs pour constituer une référence angulaire est entachée de trois sources d'incertitudes :

- La distance entre la ligne formée par les capteurs C1, C2 et le coin de cube (Figure 54) est mal maîtrisée. Elle n'a pu être mesurée qu'au mètre à ruban dans des conditions « précaires ». Une incertitude sur cette distance de l'ordre de ±2mm provoque une incertitude sur la pente de l'ordre ±0.5%
- L'étalonnage des quatre capteurs supplémentaires ne peut être réalisé en respectant le principe d'Abbe. La Figure 56 représente les résidus des capteurs qui sont utilisés pour localiser le pivot. Ces résidus sont cohérents avec une maîtrise de l'angle de rotation de l'ordre du µrad.



Figure 56 : Résidus sur l'étalonnage des deux capteurs supplémentaires

4.4 Utilisation de la matrice de 16 capteurs

Nous pouvons également utiliser comme référence l'angle calculé à partir des indications des 16 capteurs préalablement étalonnés (Cf. Annexe III).

4.4.1 Courbe d'étalonnage

<u>Niveau sur le matelas</u>

La Figure 57 représente en ordonnée et en rouge, les données brutes du niveau et en abscisse, les pas de 150nm du vérin piézoélectrique en montée et en descente. On retrouve la résolution du niveau qui est de 1µrad. La courbe bleue correspond à la rotation mesurée grâce au laser et aux capteurs C1 et C2. La courbe verte concerne la référence fournie par les 16 capteurs capacitifs.



Figure 57 : Comparaison des rotations mesurées par le niveau du dessus et par les deux références possibles

Les deux techniques de référence donnent des résultats très semblables mais cela sera précisé ci-dessous. La pente obtenue grâce à une référence fournie par les capteurs capacitifs est de 1.09312. Elle est comparable à la pente de 1.0915 obtenue par la méthode précédente.

Niveau intégré dans le porte-capteur

L'étalonnage du niveau du bas ne peut être réalisé que grâce aux capteurs capacitifs. La pente d'étalonnage pour ce niveau est de 1.04062.

4.4.2 Incertitude sur la référence angulaire

Nous montrons au chapitre III que l'incertitude sur l'angle fournie par les capteurs capacitifs dans le processus d'étalonnage du niveau du dessus est de l'ordre de 0.14%. Cette incertitude est meilleure que celle obtenue par le laser. La Figure 57 montre néanmoins que les résultats des deux méthodes : laser plus les capteurs C1 et C2 ou les 16 capteurs, peuvent être considérées comme des références pour l'étalonnage des niveaux. Elles sont en effet très cohérentes.

Nous avons choisi d'étalonner nos niveaux grâce aux 16 capteurs capacitifs puisque cette méthode présente le moins d'incertitudes. Elle permet de traiter de la même manière les deux niveaux.

4.5 Résultats et discussion

La comparaison de la différence entre les profils obtenus à l'aide de la méthode à « capteurs prépondérants » et celle « à niveaux prépondérants », avant et après l'étalonnage des capteurs capacitifs (Figure 43 et Figure 44), montre que la diminution de l'incohérence est importante.

Par contre, la différence entre les profils obtenus à l'aide de la méthode à « capteurs prépondérants » et « à niveaux prépondérants », avant et après l'étalonnage des niveaux, est quasiment nulle. Cela s'explique par le fait que la correction agit essentiellement sur un biais de courbure présentant presque le même effet sur les deux dépouillements.

Le graphique à gauche (Figure 58) montre un dépouillement à capteurs prépondérants tenant compte de l'étalonnage des capteurs mais pas de celui du niveau pour 10 acquisitions du même profil. Le tracé des écarts est réalisé par rapport au profil moyen.

Le graphique de droite intègre la correction du niveau. Il edonne probablement le résultat principal de cette thèse puisqu'il montre une répétabilité dépendant de l'étalonnage. Ceci n'est pas une idée classique. Il montre une cohérence des résultats de l'ordre de ± 5 nanomètres qui intégre l'ensemble des opérations d'acquitions et d'étalonnage. La moindre erreur dans une procédure de calcul à ce niveau d'exigence est rédhibitoire.



Figure 58 : Répétabilité à capteurs prépondérants (différence à la moyenne)

Le même résultat est obtenu avec le dépouillement à niveaux prépondérants (Figure 59).



Figure 59 : Répétabilité à niveaux prépondérants (différence à la moyenne)

5 Conclusion

Les résultats du dernier paragraphe sont très encourageants. Ils montrent que malgré les améliorations nécessaires sur le banc, nous obtenons une reproductibilité de l'ordre de ± 5 nm sur 10 acquisitions.

L'étalonnage des capteurs numérotés de 9 à 16 qui nécessitent une correction de 16% diminue l'incohérence entre les solutions « à capteurs prépondérants » et « à niveaux prépondérants » de près de 500nm. L'étalonnage des capteurs numérotés de 1 à 8 diminue l'incohérence d'une centaine de nanomètres. L'étalonnage des capteurs a un effet très important probablement à cause de la propagation qui cumule les incertitudes.

L'étalonnage des niveaux ne diminue pas l'incohérence entre les profils issus des deux solutions car c'est un effet en courbure qui est identique sur les deux profils. Par contre, l'étalonnage des niveaux permet de gagner une trentaine de nanomètres en reproductibilité en diminuant la dispersion sur les corrections en courbure.



Figure 60 : Indication de la rotation relative du porte-capteur par rapport au plan à étalonner

Les courbes de la Figure 60 montrent que le tangage relatif du porte-capteurs par rapport au plan à étalonner est très important en particulier sur la première position. De plus, son influence sur la première exécution est nettement différente des neuf autres. La qualité des recoupements de la Figure 58 et de la Figure 59 montre que nos corrections corrigent cet effet. Ceci signifie qu'il n'y a pas d'effet systématique qui se propage. Une seconde réflexion consiste à dire que théoriquement le concept de propagation que nous utilisons devrait permettre de corriger une mauvaise qualité de déplacement du porte-capteurs. Or, plus la qualité de déplacement du porte-capteurs est élevée meilleures sont les incertitudes. En effet, les capteurs sont ainsi moins sollicités. L'influence de l'étalonnage des capteurs est donc mois sensible sur le résultat final.

Pour minimiser les incertitudes, il est donc très important de minimiser les plages de variation sur lesquelles les capteurs ou les niveaux sont sollicités.

Le logiciel pourrait piloter sous LabVIEW le vérin piézoélectrique mobile. L'idée serait de détecter le début du déplacement des capteurs capacitifs afin de maîtriser sa mise en charge. La phase d'étalonnage du niveau du dessus pourrait être optimisée en programmant les trois

vérins de manière à gérer un centre de rotation au milieu de la matrice porte-capteurs. Ainsi en diminuant la plage de variation sur laquelle les capteurs sont sollicités, il est possible d'envisager de gagner un facteur 10 sur la qualité d'étalonnage.

Sur le plan mécanique, nous avons modifié les vis servant de butée pour protéger les fils des liaisons flexibles dans le but d'améliorer le comportement du porte-capteurs dans les opérations de basculement. Comme nous l'avons démontré ces opérations sont fondamentales dans le cadre de l'amélioration de la résolution du niveau. Néanmoins, une re-conception de l'ensemble s'avère nécessaire.. En particulier, il faudrait que le vérin mobile s'appuie sur une partie mobile afin de ne plus frotter sur le granit. Une autre amélioration consisterait en l'augmentation de la taille du granit pour minimiser l'effet du transfert de charge.

Chapitre III

INCERTITUDES ET OPTIMISATION DU DEPOUILLEMENT

| 1 Int | Introduction | | |
|----------------------------|---|--|--|
| 2 Eva | uluation de l'incertitude de mesure par l'approche GUM ENV 13005 | | |
| 2.1 | Mesurande | | |
| 2.2 | Concepts d'erreurs et d'incertitude | | |
| 2.3 | Bilan des causes d'incertitudes :Diagramme d'Ishikawa | | |
| 2.4 | Incertitude-type | | |
| 2.5 2.5. 2.5. | Modélisation du mesurage 1 Propagation des incertitudes 2 Incertitude-type composée u c | | |
| 2.6 | Evaluation de l'importance des contributeurs | | |
| 2.7 | Incertitude élargie U | | |
| 2.8 | Expression de l'incertitude (expression finale du résultat de mesure) | | |
| 2.9 | 2.9 Supplément 1 du GUM : Méthode de Monte Carlo | | |
| 2.10 | Procédure de calcul des incertitudes | | |
| 3 Eva | Evaluation des incertitudes | | |
| 3.1 | Rappel de la définition du mesurande | | |
| 3.2 | Bilan des causes d'incertitudes | | |
| 3.3 3.3. 3.3. | Thermique sur le banc | | |
| 3.4 | Reproductibilité de la position de la table aérotech | | |
| 3.5 | Incertitude sur la correction du capteur | | |
| 3.6 3.6. 3.6. | Incertitudes sur la correction du niveau 1 Référence de l'étalonnage du niveau : porte-capteurs 2 Niveau électronique | | |

| | 3.6.3 | Bilan des incertitudes sur la correction du niveau | 116 |
|---|--------------|--|-----|
| 4 | Déte | ermination du paramètre L optimal | 116 |
| | 4.1 | Recherche du minimum de variabilité du profil en fonction de L | 117 |
| | 4.1.1 | Méthode de simulation | 117 |
| | 4.1.2 | Simulation avec une multiplication des incertitudes sur les niveaux par 10 | 118 |
| | 4.1.3 | Intervalle paramètre L optimal, effet sur le profil | 120 |
| | 4.2 | Méthode de l'écart-type équivalent | 121 |
| | 4.2.1 | Structure du programme de simulation | 122 |
| | 4.2.2 | Ecart-type équivalent pour le capteur « $\sigma_{_C}$ » | 124 |
| | 4.2.3 | Ecart-type équivalent pour le niveau « $\sigma_{_N}$ » | 125 |
| | 4.2.4 | Bilan paramètre L optimal | 126 |
| | 4.3 | Evaluation finale des incertitudes | 126 |
| 5 | Réfle | exion sur le choix du nombre de capteurs | 129 |
| | 5.1 | Décompte des équations et des inconnues | 129 |
| | 5.2 | Simulation de Monte-Carlo | 131 |
| 6 | 6 Conclusion | | 132 |
1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est l'évaluation des incertitudes selon le GUM sur le profil mesuré et la détermination du paramètre L optimal.

Dans un premier temps, nous faisons un résumé des points essentiels contenus dans le GUM et dans son supplément 1. Nous avons bâti la figure 3 sur l'idée qu'il n'y a pas deux méthodes d'évaluation des incertitudes selon que l'on travaille avec le GUM ou son supplément 1 mais une seule méthode que l'on peut décliner en deux approches dite « approche analytique » et « approche Monte-Carlo ». La figure 3 montre que les deux approches différent assez peu sauf sur des aspects pratiques de calculs et surtout sur l'évaluation des coefficients de sensibilité. Nous montrons également que le processus de Monte-Carlo consiste simplement à écrire un scénario qui modélise le processus de mesure et en particulier l'ensemble des causes d'incertitudes et à rejouer ce scénario autant de fois que nécessaire.

Un intérêt majeur de l'approche de Monte-Carlo dans notre travail tient à la prise en compte des covariances. La propagation introduit forcément des dépendances entre les différentes mesures, la prise en compte de ces dépendances sous forme de covariances pour utiliser la formule de propagation analytique complète est, au moins, non évidente. L'approche selon Monte-Carlo permet de rendre compte de ces dépendances en les simulant au plus près du processus physique.

Le Vocabulaire International de Métrologie « VIM » [JCGM200 :2008] précise la définition du mesurande : *grandeur que l'on veut mesurer*. Nous avons défini notre mesurande au chapitre I. Nous rappelons sa définition au paragraphe 3.1. Nous avons ensuite décrit le processus de mesure sous la forme classique d'un diagramme 5M puis chaque cause d'incertitudes est analysée.

Une source d'incertitudes importante est la flexion de la pièce à évaluer sous l'influence d'un gradient thermique. Cette flexion peut être évaluée avec un modèle simple basé sur l'existence d'un gradient proportionnel de température, l'essentiel du travail consiste donc à évaluer les gradients auquel sont soumises en pratique les différentes parties de notre banc. Pour cela, nous avons mis en œuvre des sondes de température de type Pt100. Comme il s'agit d'évaluer un gradient, les sondes ont été recalées en différence de température en les plaçant cote à cote sur le même bloc d'aluminium.

Nous avons évalué les incertitudes liées aux capteurs en considérant d'une part l'incertitude sur la pente de correction qui se propage en introduisant des dépendances entre les différentes positions mesurées et d'autre part, une incertitude de type bruit.

Nous avons montré que le niveau Nivel20 présente à certains endroits de sa course ce que nous avons appelé un palier exceptionnel, c'est-à-dire que le niveau se comporte comme s'il présentait « un point dur ». Les quatre têtes disponibles au laboratoire présentent le même type de défaut mais pas au même endroit. Nous avons simplement choisi nos plages de mesure de manière à éviter ce « palier exceptionnel ». Nous avons ensuite mis en évidence une incertitude liée à l'irrégularité des paliers que nous avons prise en compte par un programme de simulation qui sert à la fois pour l'évaluation de l'incertitude sur la pente de correction et sur l'incertitude finale (phase mesure).

Une fois ce travail réalisé, nous n'avons pas cherché à décrire le programme de calcul complète qui aurait abouti uniquement à des redites sans rien apporter. Nous avons utilisé Mathematica 7.0 pour l'ensemble de nos calculs de dépouillement et pour les simulations de Monte-Carlo. Dans [HEN2007], une évaluation des générateurs de variables aléatoires de Mathematica été faite et les résultats comparés à ceux de Crystal Ball et de SAS, nous n'avons pas refait de validation.

Grâce à ces études, nous pouvons évaluer le meilleur paramètre L. Nous proposons deux approches, l'une consiste à chercher le paramètre L qui rend minimal l'incertitude-type sur le profil, l'autre consiste à définir une notion d'incertitude-type équivalente sur les capteurs et une incertitude-type équivalente sur les niveaux pour en faire le rapport. Cette notion d'incertitude-type équivalente consiste à chercher un bruit purement aléatoire et gaussien qui fournit la même incertitude-type sur le profil que celle que nous obtenons par la simulation de Monte-Carlo complète qui intègre les incertitudes sur les pentes donc des dépendances entre les points.

La seconde approche est délicate car on ne peut pas séparer complètement l'effet des capteurs de l'effet des niveaux sur les incertitudes puisque les deux types de capteurs sont indispensables à l'évaluation du profil. Néanmoins, les deux méthodes aboutissent au fait que L doit être compris entre 40 et 200, c'est-à-dire que nous sommes quasiment sur une méthode de dépouillement « à niveaux prépondérants ». Nous intégrons donc dans les causes d'incertitudes notre méconnaissance de L pour fournir une évaluation finale qui correspond à une incertitude-type moyenne de l'ordre de 5nm. En fait, l'incertitude-type dépend du point du profil, elle est plus importante sur les bords comme le montre la figure 27.

Nous terminons ce chapitre par une réflexion sur le nombre de capteurs optimal pour minimiser les incertitudes sur une ligne. Nous montrons qu'il y a effectivement une grande réduction des incertitudes lorsqu'on passe de trois capteurs à quatre mais que le passage à cinq capteurs présente encore un intérêt certain.

2 Evaluation de l'incertitude de mesure par l'approche GUM ENV 13005

Le GUM « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » [NF ENV 13005] a été publié conjointement par le BIPM, l'IEC, l'IFCC, l'ISO, l'IUPAC, l'IUPAP et l'OIML. Il est largement accepté comme modèle pour l'expression de l'incertitude de mesure. Il se base sur une théorie solide du point de vue scientifique Il propose une évaluation de l'incertitude de mesure logique en elle-même et transférable. Ainsi, l'information relative à l'incertitude peut être utilisée entre le fournisseur du résultat de mesure et son utilisateur. Une version ayant subie quelques corrections mineures est disponible sur le site du BIPM gratuitement.

Nous présenterons dans la suite une brève interprétation des idées et des concepts de base qui sont développés dans le GUM.

2.1 Mesurande

Dans la deuxième édition du VIM et dans la CEI 60050-300:2001, le mesurande est défini comme « la grandeur particulière soumise à mesurage ».

2.2 Concepts d'erreurs et d'incertitude

Le changement dans le traitement de l'incertitude de mesure d'une approche «erreur», quelquefois appelée approche traditionnelle ou approche de la valeur vraie, (à une approche «incertitude», a conduit à reconsidérer certains des concepts correspondants qui figuraient dans la deuxième édition du VIM. L'objectif des mesurages dans l'approche « erreur » est de déterminer une estimation de la valeur vraie qui soit aussi proche que possible de cette valeur vraie unique. L'écart par rapport à la valeur vraie est constitué d'erreurs aléatoires et systématiques. Les deux types d'erreurs, supposés distinguables, doivent être traités différemment. Il n'existe pas de règle indiquant comment les combiner pour obtenir l'erreur totale caractérisant un résultat de mesure donné, celui-ci étant en général l'estimation. Il est seulement possible d'estimer une limite supérieure de la valeur absolue de l'erreur totale, appelé parfois abusivement « incertitude ».

L'incertitude de mesure est maintenant définie comme un « paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées ». Ceci exclue la notion de valeur vraie à cause de la notion d'incertitude définitionnelle.

Un complément essentiel de la notion d'incertitude est celle de traçabilité métrologique: « propriété d'un résultat de mesure selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'étalonnages dont chacun contribue à l'incertitude de mesure »

2.3 Bilan des causes d'incertitudes :Diagramme d'Ishikawa

Le diagramme de causes et effets ou diagramme d'Ishikawa est un outil graphique simple qui sert à comprendre les causes d'un défaut de qualité. Il sert à analyser le rapport existant entre un problème et toutes les causes possibles. L'arborescence remonte des effets vers les causes.

Pour tenter de diminuer ou d'anéantir un problème de qualité, il faut connaître toutes les causes qui peuvent lui donner naissance. Puis, en cherchant leur poids relatif, nous pouvons déterminer sur quelle cause agir en priorité.

Cet outil classe les catégories de causes inventoriées selon la loi des 5 M :

Matières : les matières premières ;

Matériels : les machines-outils, le matériel informatique (logiciels), les technologies ;

Méthodes : les modes opératoires utilisés ;

Main-d'œuvre : les ressources humaines ; Milieu : l'environnement, le positionnement, le contexte.

Un diagramme d'Ishikawa avec les 5M se présente sous la forme d'arrêtes de poisson.



Figure 1 : Diagramme d'Ishikawa

2.4 Incertitude-type

Le GUM a considérablement clarifié la situation en posant que les incertitudes doivent être clairement identifiées comme des incertitudes types ou des incertitudes élargies. Par définition d'après le VIM, l'incertitude de mesure est un paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande. L'incertitude type est une incertitude exprimée de manière homogène à un écart type.

Le GUM pose qu'il existe deux grands types d'évaluations des composantes d'incertitudes.

• Evaluation de type A de l'incertitude-type : approche statistique

Elle se fonde sur l'application de la statistique à une série de déterminations répétées. Elle est principalement utilisée pour quantifier les incertitudes de répétabilité des processus de mesures. Elle consiste à réaliser n mesures et à calculer un écart-type expérimental.

• Evaluation de type B de l'incertitude-type

Elle est employée lorsqu'on ne peut ou lorsqu'on ne veut pas utiliser des méthodes basées sur l'analyse de série d'observations (type A). Elle permet de déterminer les incertitudes à partir de connaissances des erreurs ou phénomènes en jeu : expérience ou connaissance du comportement des matériaux et des instruments, spécification du fabricant, certificat d'étalonnage, Les incertitudes répondent à plusieurs lois de distribution (uniforme, triangle,...) amenant des formules de calculs différentes :

• Choix entre type A et B

Le choix de l'un ou l'autre de ces types d'évaluation dépend des connaissances scientifiques. Si celles-ci sont suffisantes pour attribuer une loi de probabilité particulière à la grandeur d'entrée étudiée, alors la méthode d'évaluation choisie est de type B. Dans le cas contraire, la méthode d'évaluation de type A est préférée, bien que celle-ci nécessite davantage de ressources pour organiser les travaux expérimentaux.

2.5 Modélisation du mesurage

Le GUM est basé sur l'équation de la mesure appelée modèle de la mesure. Plus que la simple équation d'un phénomène physique, il s'agit d'une description mathématique du processus qui est utilisée pour déterminer le résultat d'un mesurande Y.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

Dans cette équation, le mesurande Y est déterminé à partir de N grandeurs $x_1, x_2, ..., x_N$ appelées les grandeurs d'entrée par une relation fonctionnelle f.

2.5.1 Propagation des incertitudes

La loi de propagation des incertitudes exprime la variance composée du résultat de mesure Y (mesurande) (Cf. [des_p105]). Elle gère la contribution des variances de chaque grandeur d'entrée, leurs covariances lorsqu'elles existent, au travers du modèle mathématique issu du processus de mesure.

La formule générale de la loi de propagation des incertitudes s'écrit :

$$u_{c}^{2}(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}}\right)^{2} u^{2}(x_{i}) + 2\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_{j}}\right) u(x_{i}) u(x_{j}) r(x_{i}, x_{j})$$
(J)

Le premier terme de la sommation de l'équation (J) traite chacune des variables de mesure comme étant indépendante i.e. grandeurs d'entrée non corrélées, alors que le second terme de la sommation représente toute corrélation i.e. grandeurs d'entrée corrélés, entre les paires de variables x_i et x_j . Le dernier terme $r(x_i, x_j)$ est le coefficient de corrélation qui représente le degré de corrélation entre x_i et x_j : $u(x_i, x_j)$.

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}$$

Les différentielles partielles entre parenthèses dans l'équation (J) sont généralement indiquées comme étant les coefficients de sensibilité.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \tag{K}$$

Elles doivent être évaluées avec les équations de modélisation développées pour chaque type d'appareil de mesure. En tenant compte de l'équation (K), l'équation (J) devient alors

$$u_{c}^{2}(y) = \sum_{i=1}^{N} c_{i}^{2} u^{2}(x_{i}) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} c_{i} c_{j} u(x_{i}) u(x_{j}) r(x_{i}, x_{j})$$

2.5.2 Incertitude-type composée u_c

L'incertitude composée u_c reflète l'incertitude totale de la mesure. Elle s'exprime sous la forme d'un écart-type, dans l'unité du résultat correspondant.

2.5.2.1 Grandeurs d'entrée non corrélées

Dans la majorité des cas, les causes d'incertitudes sont indépendantes les unes des autres et peuvent être calculées séparément. On obtient alors différentes incertitudes que l'on somme par la racine carré de la somme des carrés. Elle tient compte de l'incertitude associée à chaque grandeur entrant dans la détermination du mesurande.

$$u_{c}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} c_{i}^{2} u^{2}(x_{i})}$$

2.5.2.2 Grandeurs d'entrée corrélées

Lorsque les grandeurs d'entrée sont corrélées, l'expression convenable pour la variance composée associée au résultat d'un mesurage est

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) u(x_i, x_j)$$

$$u_{c}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} c_{i}^{2} u^{2}(x_{i}) + 2\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} c_{j} c_{j} u(x_{i}) u(x_{j}) r(x_{i}, x_{j})}$$

2.6 Evaluation de l'importance des contributeurs

La formule de propagation sans corrélation permet de manière simple d'estimer la contribution de chaque paramètre. Si chaque terme $\frac{c_i^2 u_i^2}{u_c^2}$ est calculé, alors la contribution de la i^{ème} cause d'incertitude peut éventuellement exprimée en pourcentage.

Le métrologue peut alors choisir d'étudier plus finement les causes prépondérantes voire décider de mener une action corrective pour en diminuer l'importance et de ne pas investir dans les contributions mineures voire les négliger.

Par contre, si une des grandeurs x_i du modèle est nulle alors il ne faut surtout ne pas l'éliminer car son incertitude n'est pas forcément nulle.

2.7 Incertitude élargie U

L'incertitude élargie U est obtenue en multipliant l'incertitude composée par un facteur k appelé facteur d'élargissement. Il fournit un intervalle ayant un niveau de confiance à un degré spécifié :

$$U = k \times u_c$$

Le résultat peut alors s'exprimer sous la forme :

$$X = x \pm U$$

Le plus souvent le facteur d'élargissement choisi est k = 2 pour un niveau de confiance de 95 % environ, pour une loi normale. Si un calcul analytique des incertitudes est réalisé tel qu'il vient d'être présenté ci-dessus, alors la densité de probabilité reste ignorée. Il n'est pas possible de justifier la normalité du mesurande uniquement à partir du théorème central limite. La simulation d'incertitudes par la méthode de Monte-Carlo présente cet avantage majeur de fournir un histogramme sur lequel des tests statistiques sont possibles.

2.8 Expression de l'incertitude (expression finale du résultat de mesure)

D'une façon générale, un résultat de mesure est constitué de 3 éléments [GUM]:

Une valeur annoncée correspondant à la valeur moyenne du mesurande éventuellement corrigée si une erreur de justesse a été constatée.

Une incertitude élargie associée à un intervalle de confiance

Une unité de mesure garantissant la traçabilité avec le System international (S.I.) d'unités.

2.9 Supplément 1 du GUM : Méthode de Monte Carlo

Les méthodes de simulation de Monte Carlo peuvent être vues comme des méthodes d'approximation. même s'il s'agit d'approximations au sens statistique du terme. Comme nous le verrons, ces méthodes sont moins exigeantes en termes d'hypothèses sur le modèle. Il n'y a pas un consensus absolu sur une définition précise de ce qu'est une technique de type Monte Carlo, mais la description la plus habituelle consiste à dire que les méthodes de ce type se caractérisent par l'utilisation du hasard pour résoudre des problèmes centrés sur un calcul. Elles sont en général applicables à des problèmes de type numérique, ou bien à des problèmes de nature probabiliste.

Un certain nombre de documents et de logiciels commencent à voir le jour sur la méthode de Monte Carlo appliquée au calcul des incertitudes [GEN2003]. Cette situation fait suite à un guide supplémentaire 1 [JCGM_101_2008/internet] du GUM [NF ENV 13005].

La méthode de propagation des distributions selon la méthode de Monte Carlo nécessite de simuler des échantillons de valeurs pour chacune des grandeurs d'entrée du modèle de la mesure.

Traditionnellement, un modèle de la mesure fait intervenir *n* variables aléatoires $x_1, x_2, ..., x_N$ auxquelles il est associé :

- une loi de distribution (d_i) ;
- une valeur moyenne (\bar{x}_i) ;

• un écart type ou une plage de variabilité $u(x_i)$.

A partir de ces données une distribution est générée afin d'en déduire la valeur moyenne et l'incertitude type $u_c(y)$ du résultat comme indiqué sur la Figure 2.



Figure 2 : Méthode de Monte Carlo

Cette méthode permet évidemment d'avoir un niveau de confiance à partir de la distribution de la variable de sortie et de contourner les problèmes de non linéarité du modèle constatés avec la méthode traditionnelle de propagation des variances.

La méthode de Monte Carlo dont le principe est rappelé dans le supplément 1 du GUM permet d'obtenir directement la distribution de la grandeur de sortie du modèle à partir de simulations des grandeurs d'entrée.

2.10 Procédure de calcul des incertitudes

Finalement, le cheminement pour calculer des incertitudes selon l'approche du GUM analytique ou l'approche du supplément 1 du GUM peut se schématiser par le synoptique de la Figure 3.



Figure 3 : Procédure de calcul des incertitudes

3 Evaluation des incertitudes

Dans cette partie, nous nous intéressons aux incertitudes sur la correction des capteurs et, du niveau. Nous nous intéressons aussi à l'effet de cette correction sur les écarts mesurés.

Au §Erreur ! Source du renvoi introuvable. concernant la simulation Monte Carlo, nous utilisons les incertitudes liées aux capteurs et aux niveaux pour les calculs des incertitudes sur les mesurandes.

3.1 Rappel de la définition du mesurande

La définition du mesurande est la première étape dans la description du processus de mesure. Nous proposons une définition en trois parties adaptée à l'utilisation des résultats dans le cadre du programme de la table croisée.

Première partie.

Définition d'un point : « chaque point étant atteint grâce à un capteur capacitif présentant une zone utile de 6mm de diamètre, ce qui correspond à l'utilisation du plan sur la table croisée, un point est le résultat de l' « intégration » de la micro-géométrie par le capteur capacitif. Plus précisément, nous définissons un point comme la réponse de la surface au capteur capacitif et non comme un point de la surface physique ».

Seconde partie.

Grandeurs d'influence : « conformément, à la norme [NF EN ISO 1], la température de référence est de 20°C. Nous considérons l'hygrométrie comme sans effet ».

Troisième partie.

Définition du profil : « le profil est défini uniquement aux points effectivement mesurés, tous les 20 mm, pour une longueur de 300 mm. Il est recalé au sens des moindres carrés ».

3.2 Bilan des causes d'incertitudes

La décomposition de ce diagramme appliquée à notre cas d'étude est représentée sur la Figure 4. L'analyse du diagramme est une aide à la décision pour une action corrective sur un effet observé. Cette décomposition est une approche possible. Elle permet de bien lister l'ensemble des causes d'incertitudes possibles pour chacun des « 5M ».



Figure 4 : Décomposition du diagramme d'Ishikawa pour nos applications

3.3 Thermique sur le banc

3.3.1 Evaluation expérimentale des variations de température et des gradients

Nous avons utilisé des sondes planes de type Pt100 i.e. résistance de platine de 100Ω et une centrale d'acquisition Agilent 3497 équipée d'une carte 16 voies en montage 4 fils.

Les sondes n'étant pas raccordées, la mesure de gradient est donc une mesure d'une différence nominalement nulle. Expérimentalement, nous avons effectué les mesures suivantes :

- Test1 : on place les 2 sondes plates l'une à coté de l'autre (Cf. Figure 5) sur une pièce en aluminium pour étudier le décalage d'indication entre les sondes via une mesure toutes les 2 minutes
- Test2 : on place les mêmes sondes entre les surfaces de la pièce à mesurer pour en étudier le gradient
- Test3 : on place les mêmes sondes entre les surfaces du matelas pour en étudier le gradient



Figure 5 : Représentation de la variation des écarts de mesure de la température entre 2 sondes plates (toutes les 2 minutes)

La Figure 5 montre les mesures de la température. L'acquisition a commencé un jeudi à 21h. Le début de la mesure ne peut être conservé car il n'est pas sûr qu'elle soit stable. La courbe montre l'arrivée du technicien le vendredi à 7h20. La mise en activité à 11h30 du laboratoire provoque une variation brutale de température. De plus, l'heure du déjeuner a le même effet. Nous avons donc choisi de conserver les indications fournies pendant la nuit c'est-à-dire sans présence humaine. Il est calculé un décalage moyen entre les deux sondes de 0.0396 °C.

Une conséquence directe de ces courbes est de conclure qu'il est indispensable de ne pas faire d'acquisitions pendant les périodes d'activité du laboratoire. Il est préférable d'effectuer des

mesures la nuit et le week-end afin d'atteindre le niveau de performances qui nous intéresse i.e. des incertitudes de type nanométriques.



Figure 6 : position des mesures de gradients



Figure 7 : Température et la différence entre l'un et l'autre côté de la plaque d'aluminium (a) test2 (b) test3

La Figure 7 montre le gradient de température pour les positions des tests 2 et 3 décrits en Figure 6. La différence entre les courbes de température est corrigée du décalage de 0.0396 °C évalué précédemment entre les sondes.

L'intervalle de temps entre deux points étant d'une minute, ces courbes montrent des variations rapides qui ne peuvent que correspondre aux bruits des sondes. Les fluctuations lentes ne dépassent pas 0.005°C. Cette valeur correspond à la limite de détection des sondes.

3.3.2 Conséquences

3.3.2.1 Stabilité thermique pendant l'étalonnage d'un capteur

Compte tenu des précautions prises sur les matériaux et de la stabilité de la température, il est naturel de considèrer que la chaîne de maintien en position est thermiquement stable pendant l'étalonnage d'un capteur. Cette durée est de l'ordre de 16 minutes.

3.3.2.2 Bilame thermique de la pièce à mesurer

Classiquement, la dilatation est modélisée par l'équation linéaire : $\Delta L = \lambda \cdot L_0 \cdot \Delta T$ où

- ΔL : La variation de longueur en mètre,
- λ : Le coefficient de dilatation linéaire en °K⁻¹
- L_0 : Longueur initiale,
- ΔT : La variation de température en °K.

Un gradient thermique constant induit une variation linéaire de la température au sein de la pièce. Il tend alors à déformer celle-ci selon un arc de cercle qu'il est possible d'approcher par un arc de parabole. Ce phénomène est appelé bilame thermique [WEB1984]. Le fait de considérer que la variation de température est linéaire est réaliste en situation établie de stratification de température d'une salle climatisée. Ainsi la variation de longueur des fibres est proportionnelle à la position de celles-ci dans l'épaisseur. La déformée correspondante est donc un cercle.

Le calcul est relativement simple. Il est schématisé sur la Figure 8 suivante :



Figure 8 : Schéma pour le calcul théorique du bilame thermique

La flèche est donnée par $f = \frac{L^2 . \Delta T}{2h}$ où L=150mm, h=70mm, λ =23.10⁻⁶°K⁻¹ et Δ T=0.005°K. Dans ce cas f=18nm. Nous n'avons pas intégré de terme d'incertitude correspondant au bilame. L'incertitude fournie correspond alors à un profil évalué à un moment donné. Cette sensibilité extrême au phénomène de bilame justifierait l'utilisation d'un plan en zérodur doré. Le problème est que la conductivité thermique de ce matériau est moins bonne qu'un plan en invar. Néanmoins, l'usinage de cet acier est très délicat car il est fortement allié au nickel (36%).

3.4 Reproductibilité de la position de la table aérotech

Nous avons réalisé des tests pour estimer la reproductibilité de positionnement du système de commande de la table AéroTech. Cette valeur est inférieure à la résolution de 0.01mm. Nous n'avons pas vérifié la reproductibilité de la position du porte-capteurs qui aurait nécessité le montage du laser en principe d'Abbe pour réaliser une justesse de déplacement.

3.5 Incertitude sur la correction du capteur

Les incertitudes sur la correction du capteur sont scindées en deux parties :

- L'incertitude sur la référence (interféromètre à laser : voir chapitre II §2.3.5)
- L'incertitude sur la correction du capteur : il s'agit de l'incertitude sur la pente de la courbe d'étalonnage et de la prise en compte des résidus ou bruits par rapport à la courbe d'étalonnage

Dans le chapitre II, nous avons réalisé 7 mesures pour chaque capteur. La première mesure n'est pas retenue pour le calcul. Elle est cependant indispensable à la stabilisation de l'ensemble en température et pour la mise en position. Nous avons donc 6 courbes d'étalonnage pour chaque capteur.

Le processus d'étalonnage des 16 capteurs a été réalisé pour un cycle qui consiste à mesurer respectivement du capteur 1 au capteur 16 puis à recommencer 7 fois. En conséquence, entre chaque étalonnage il s'écoule une durée de 4 heures et la table change de position.

Nous pouvons faire l'hypothèse que :

- Le laser interférométrique servant de référence n'apporte pas d'incertitude significative en raccordement compte-tenu du petit trajet mort (de l'ordre de 10mm) et de la faible course utilisée (de l'ordre de 100μm). L'effet de l'interpolation est lissé par le calcul de la pente de correction au sens des moindres carrés
- Le repositionnement de la table Aérotech est meilleur que sa résolution (10μm) et n'a pas d'effet sensible compte-tenu de la taille de la zone de mesure des capteurs capacitifs
- La dérive thermique des capteurs est prise en compte dans la mesure où la totalité des acquisitions représente une journée
- L'erreur sur la prise en compte de l'axe d'Abbe (chapitre 2 §3.1.2) est de l'ordre de ±0.5mm. Par ailleurs, lorsqu'on déplace le matelas parallèlement à lui-même grâce aux vérins piézoélectriques, le niveau oscille d'un µrd au maximum. Cela correspond à un bruit de l'ordre de ±0.5nm.
- On peut considérer que tous les capteurs présentent la même incertitude sur la courbe d'étalonnage et sur le bruit.



Figure 9 : Organigramme pour aboutir au calcul de l'incertitude et du bruit

La Figure 9 décrit le processus pour calculer l'incertitude sur la pente et le bruit de 16 capteurs capacitifs. Pour chacun des 6 allers-retours il est calculé au sens des moindres carrés la pente moyenne.Puis une pente moyenne est obtenue à partir de ces valeurs. Ceci permet de calculer 6 écarts sur les pentes. On calcule alors l'écart entre les indications des capteurs pour un aller-retour et la pente correspondante. Cet écart est alors considéré comme un bruit non modélisable.



Figure 10 : Histogramme représentant (a) la dispersion sur la pente (b) le résidu entre les indications des capteurs et la pente moyenne

Chaque capteur étant considéré comme indépendant, on trace un histogramme (Figure 10 à gauche) qui comporte 16*6=96 valeurs que l'on assimile à une gaussienne de moyenne nulle et d'écart type 0.00059136 qui est une pente adimensionnelle.

L'ensemble des résidus est collecté dans l'histogramme de la Figure 10 à droite. On choisit de le modéliser par une distribution gaussienne de moyenne nulle. En fait, la valeur calculée est de -0.0091nm et son écart type est de 7.4 nm.



Figure 11 : Incertitudes prises en compte pour les capteurs

La Figure 11 est une vision synthétique des résultats et des données prises en compte pour la simulation.

3.6 Incertitudes sur la correction du niveau

Nous envisageons la prise en compte des incertitudes sur la correction du niveau en deux parties :

- La première partie provient de la référence : incertitudes liées aux 16 capteurs.
- La deuxième partie provient du niveau lui-même, à savoir, la résolution, l'irrégularité des paliers et le palier exceptionnel.

3.6.1 Référence de l'étalonnage du niveau : porte-capteurs

Nous considérons que les 16 capteurs sont déjà étalonnés par le laser. Il faut alors prendre en compte l'incertitude sur la correction des capteurs (voir §3.5). Pour cette raison, nous avons pris un fichier expérimental d'étalonnage pour faire une simulation en perturbant les mesures des capteurs par deux distributions gaussiennes : une pour l'incertitude sur la pente et une autre pour tenir compte du bruit du capteur.



Figure 12 : pilotage de l'inclinaison pour l'étalonnage des niveaux

La simulation de Monte-Carlo est réalisée à partir de 1000 tirages.

Pour le niveau du dessus, la Figure 12 montre que les capteurs sont très sollicités car le pivot est à gauche. L'incertitude sur les capteurs introduit donc une incertitude type de valeur adimensionnelle 0.00302147 sur la pente. Par contre, pour le niveau du dessous, l'incertitude type admet une valeur adimensionnelle de 0.000456338 sur la pente. Cette valeur est environ dix fois plus faible que la valeur précédente car les capteurs sont peu sollicités. Une amélioration évidente est de gérer un point de pivot au milieu du porte capteur en pilotant les vérins de manière ad hoc. Dans ce paragraphe, nous avons laissé toutes les décimales sur l'incertitude-type de 0.003 soit 0.3% est significative tandis que l'autre de 0.04% est négligeable. Ceci signifie que l'amélioration du pilotage des vérins permettrait d'éliminer en pratique cette source d'incertitude à condition que la stratégie d'inclinaison soit la même pendant la phase d'étalonnage que pendant la phase de mesure du profil.

3.6.2 Niveau électronique

La Figure 13 est une mesure effectuée avec un niveau Leica Nivel20 sur 10 μ rad. Nous constatons que les paliers qui correspondent à la résolution de 1 μ rd sont irréguliers d'une manière générale mais que le palier à -309 μ rad apparaît beaucoup plus long que les autres.



Figure 13 : La mesure effectuée avec le niveau

Lorsque nous répétons la mesure sur la même plage du niveau, le palier -309µrd est toujours anormalement long.

Nous disposons au laboratoire de deux paires de niveaux LeicaNivel20. L'une appartient au Laboratoire national d'Essais et l'autre appartient à Arts et Métiers ParisTech. Nous avons essayé les quatre têtes. Nous avons repéré un palier exceptionnel sur une tête du LNE et une tête d'Arts et Métiers ParisTech. Ce palier exceptionnel correspond peut-être à un frottement du liquide à l'intérieur de la tête en un point particulier. Après avoir vérifié la stabilité de la position de ce palier, nous avons organisé nos mesures pour ne pas le rencontrer. Ceci évite d'avoir à en tenir compte en termes d'incertitude.



Figure 14 : L'incertitude sur le niveau

La Figure 14 représente la logique de détermination des incertitudes sur le niveau pendant la phase d'étalonnage et pendant la phase de mesure.

3.6.2.1 Incertitude sur la pente

Nous avons réalisé un ensemble d'acquisitions permettant de constater que la longueur des paliers est irrégulière. Le nombre de points minimum sur un palier est donc de deux pour le niveau du dessus et de trois pour le niveau du dessous. Sachant que le basculement des niveaux est réalisé de manière régulière par les vérins, alors le nombre de points maximum pour le niveau du dessus doit être de cinq et de six pour le niveau du dessous. Si deux acquisitions de suite sont réalisées, alors nous ne retrouvons pas les mêmes longueurs de paliers aux mêmes positions.

L'expérience acquise nous permet de valider un modèle de simulation simple dans lequel on allonge ou l'on raccourcit un palier de un ou deux points en utilisant un générateur aléatoire. La Figure 15 montre à gauche un résultat expérimental et à droite un résultat simulé.



Figure 15 : Représentation des paliers irréguliers du niveau du dessus (a) acquisition (b) simulation

A partir du programme de simulation, l'incertitude sur la pente de la courbe d'étalonnage est évaluée via 1000 tirages. Pour le niveau du dessus, un écart type sur la pente adimensionnelle est de 0.00143253, soit 0.14%. Cette incertitude est modélisée comme une distribution gaussienne de moyenne nulle. Pour le niveau du dessous, un écart type sur la pente adimensionnelle est de 0.00172879, soit 0.17%. Cette incertitude est modélisée comme une distribution gaussienne de moyenne nulle.

3.6.2.2 Bruit

Pour la phase de mesure, les idées sont les mêmes que précédemment sauf que la variable d'intérêt n'est plus une pente de correction mais une valeur moyenne obtenue dans un basculement de 10µrad aller et retour.

Nous avons modélisé l'incertitude sur la moyenne d'une indication d'un niveau comme une distribution gaussienne de moyenne nulle et chiffré les écarts-types grâce à une simulation de 1000 tirages. Nous obtenons un écart type de 0.0256099µrad pour le niveau du dessus et un écart type de 0.0290221µrad pour le niveau du dessous.

3.6.3 Bilan des incertitudes sur la correction du niveau



Figure 16 : Bilan des causes d'incertitudes pour les niveaux

Dans ce bilan (Figure 16), on considère que toutes les causes d'incertitudes sont indépendantes. Elles correspondent au fonctionnement de chacune des têtes et elles sont simulées séparément pour chiffrer les incertitudes sur le profil.

4 Détermination du paramètre L optimal

Le paramètre $L = \frac{\sigma_{cap}}{\sigma_{niv}}$, défini au chapitre I, doit être déterminé de manière à optimiser l'incertitude sur le profil. Ce choix est complexe car les hypothèses de base de la méthode des

moindres carrés pondérés utilisant une matrice diagonale consistent à affirmer la normalité des résidus et leurs indépendances. Nous ne sommes pas dans ces conditions. En particulier, la méthode de propagation lie les points entre eux et les incertitudes sur l'étalonnage des capteurs. Elles correspondent à une incertitude sur la pente de correction et elles sont difficiles à appréhender. Sur le plan du calcul des incertitudes, la simulation de Monte-Carlo permet de tenir compte de la propagation et des dépendances entre les mesures. La vraie difficulté tient à l'évaluation du paramètre L optimal ou à l'évaluation des coefficients de sensibilité. Cette dernière étude ne sera pas abordée ici.

Nous avons développé deux approches. La première approche abordée dans le paragraphe 5.1 consiste à chercher le minimum d'un écart-type chiffrant la variabilité du profil en fonction de L. La seconde approche abordée dans le paragraphe 5.2 consiste à chercher à chiffrer directement les incertitudes-types liées aux capteurs d'une part et au niveau d'autre part puis de calculer le paramètre L.

4.1 Recherche du minimum de variabilité du profil en fonction de L



4.1.1 Méthode de simulation

Figure 17 : Ecart-type sur le profil en fonction du paramètre « L » (1000tirages)

La courbe de la Figure 17 porte en abscisse le paramètre L variant entre 0 (dépouillement à capteurs prépondérants) et 100 (méthode quasiment à niveaux prépondérants). En réalité, le calcul avec L=0 est impossible.Il n'est en effet pas possible de se passer complètement des niveaux. La matrice du système est alors singulière. Le premier point de la courbe a donc été calculé avec L=1.

Pour chaque valeur de L, un ensemble de profils est simulé par la méthode de Monte-Carlo. Ces simulations consistent à dépouiller une acquisition expérimentale en ajoutant les incertitudes sur les capteurs et les niveaux conformément aux paragraphes précédents. La moyenne de l'ensemble des profils est calculée puis recalée au sens des moindres carrés conformément à notre définition du mesurande. Les graphiques qui entourent la courbe sont donc la différence entre chacun des 1000 profils calculés et la moyenne des 1000 profils.

Ces faisceaux de courbes ont une allure particulière qui mérite des commentaires.

Commentaire 1 : On présente des variations par rapport à la moyenne, c'est la raison pour laquelle le profil moyen est nul.

Commentaire 2 : L'incertitude sur les premiers points et les derniers points est plus importante que dans la partie centrale car ces points sont palpés avec moins de redondance. Le premier point est palpé une seule fois, le second point est palpé deux fois, le troisième point est palpé trois fois. Les points suivants sont palpés quatre fois. A la fin du profil, on retrouve le même phénomène, le dernier point n'étant palpé qu'une fois.

Commentaire 3 : Les courbes qui correspondent à un paramètre L important sont du type « dépouillement à niveaux prépondérants ». Pour ces courbes, l'incertitude sur le niveau intervient essentiellement comme une correction de courbure donc comme la superposition d'une parabole. Comme le profil est recalé au sens des moindres carrés, le point qui correspond à 60mm et le point qui correspond à 240mm apparaissent comme des points fixes, ce qui est uniquement lié au recalage de la parabole aux moindres carrés.

Commentaire 4 : Les courbes qui correspondent à un paramètre L faible sont du type « dépouillement à capteurs prépondérants ». Pour ces courbes, l'incertitude sur la pente de corrections des capteurs conduit à cette forme à deux « ventres ».

Commentaire 5 : On définit une notion d'écart-type global pour le profil. Cet écart-type est obtenu avec les valeurs de tous les profils et pour tous les points. Cela revient à considérer l'ensemble des points comme une même population.

Sur la Figure 17, cet écart-type global est porté en ordonnée et la valeur de L correspondante est portée en abscisse.

La courbe montre clairement une décroissance lente pour les grandes valeurs de L même si il se présente des fluctuations liées au relativement faible nombre de tirages. Pour interpréter le résultat, nous avons volontairement multiplié par 10 les incertitudes sur les niveaux.

4.1.2 Simulation avec une multiplication des incertitudes sur les niveaux par 10

Nous avons procédé à une simulation en multipliant les incertitudes sur les niveaux par 10. Ceci est tout à fait artificiel par rapport à l'expérimentation mais a pour vocation de montrer l'existence d'un minimum pour le paramètre L.



Figure 18 : Ecart-type sur le profil en fonction du paramètre « L » obtenue en multipliant les incertitudes sur les niveaux par 10

La courbe de la Figure 18 est obtenue de la même manière que celle de la Figure 17. Pour « lisser » la courbe, nous avons du réaliser 3000 tirages.

La courbe montre clairement un minimum même si sa détermination exacte mériterait une augmentation du nombre de tirages. Le fait de multiplier par 10 les incertitudes sur les niveaux équilibre les contributions des capteurs d'une part et des niveaux d'autre part ce qui signifie qu'en réalité l'essentiel des incertitudes provient bien des capteurs. En fait, intrinsèquement, les capteurs sont d'excellente qualité. La notion même de propagation dégrade les incertitudes sur le profil liées aux capteurs tandis que les niveaux ne subissent pas cet effet puisque la référence à la verticale terrestre ne relève pas de la propagation.



4.1.3 Intervalle paramètre L optimal, effet sur le profil

Figure 19 : Effet du paramètre L sur la forme du profil

La Figure 19 représente en abscisse la distance sur laquelle est mesurée le profil et en ordonnée la différence entre des profils obtenus pour différentes valeurs de L et un profil obtenu en faisant la moyenne entre le profil dépouillé à capteurs prépondérants et le profil dépouillé à niveaux prépondérants. Comme nous l'avons déjà expliqué, il n'est pas possible de faire coexister sur le même graphique le profil dont le « crête à crête » représente environ 2.5µm et des variations nanométriques. Les profils présentés ici sont corrigés grâce à l'étalonnage des capteurs et des niveaux.

Si on examine la Figure 17, on peut raisonnablement penser que le minimum est compris entre L=40 et le profil dépouillé à niveaux prépondérants. En fait, on est probablement quasiment sur la solution à niveaux prépondérants mais les informations disponibles ne permettent pas de l'affirmer complètement.

On calcule la différence entre le profil L=40 et le profil « niveaux prépondérants ». Le résultat est montré Figure 20. Elle de l'ordre de ± 10 nm, ce qui n'est pas négligeable. Cela montre l'intérêt de chercher à mieux connaitre L.

On choisit donc de calculer la moyenne entre le profil « L=40 » et le profil « à niveaux prépondérants » qui sera considéré comme le profil final.

La différence entre le profil moyen et les profils « L=40 » et « niveaux prépondérants » est montrée Figure 21. Il faudra ajouter une incertitude correspondante au fait que le profil final correspond à un paramètre L mal connu.



Figure 20 : Différence entre le profil « à niveaux prépondérants » et le profil « L=40 »



Figure 21 : Différence recalée à la moyenne entre le profil L=40 et le profil « niveaux prépondérants »

4.2 Méthode de l'écart-type équivalent

Nous avons envisagé d'évaluer directement les écart-types liés aux capteurs et aux niveaux. On ne peut réaliser ce travail qu'avec les méthodes de dépouillement extrêmes correspondantes à L tendant vers zéro (capteurs prépondérants) ou L très grand (niveaux prépondérants).

Pour chaque méthode, la stratégie consiste à simuler les incertitudes liées aux capteurs seuls donc en forçant les paramètres décrivant les incertitudes des niveaux à zéro puis celles liées aux niveaux seuls. Lorsqu'on simule les incertitudes, on a des paramètres comme les incertitudes sur les pentes de correction des capteurs qui, compte-tenu de la propagation, provoquent des incertitudes non indépendantes d'un point du profil à l'autre.

Pour chaque cas, on lance deux simulations (Figure 22). La première simulation colle à la physique avec les problèmes de dépendance évoqués ci-dessus. La seconde simulation superpose à chaque lecture soit des capteurs soit des niveaux selon le cas une variation gaussienne de moyenne nulle et d'un écart-type S. La valeur de S est déterminée par

dichotomie de manière à provoquer des fluctuations des profils de la même valeur d'écarttype moyen que dans la première simulation.



Figure 22 : Schéma de principe de la simulation de l'écart-type équivalent

4.2.1 Structure du programme de simulation



Figure 23 : Principe de la simulation des incertitudes sur les mesures des capteurs

La Figure 23 représente le processus mis en œuvre pour évaluer les écart-types équivalents aux incertitudes introduites par les capteurs pour les deux méthodes d'évaluation du profil (capteurs prépondérants et niveaux prépondérants) en annulant les incertitudes liées aux niveaux.



Figure 24 : Principe de la simulation des incertitudes sur les mesures du niveau

La Figure 24 représente le processus mis en œuvre pour évaluer les écart-types équivalents aux incertitudes introduites par les niveaux pour les deux méthodes d'évaluation du profil (capteurs prépondérants et niveaux prépondérants) en annulant les incertitudes liées aux capteurs.

4.2.2 Ecart-type équivalent pour le capteur « σ_c »

Les graphiques des Tableau 1et Tableau 2 montrent l'ensemble des profils simulés pour d'une part des incertitudes conformes aux paragraphes ci-dessus et d'autre part un bruit gaussien additif sur chaque capteur.

| Incertitude liées aux capteurs | Capteur prépondérant | $\sigma_{\acute{	ext{e}}cart}$ de profil | σ_{C} |
|-----------------------------------|---|--|--------------|
| Sur la pente + Bruit | $\begin{array}{c} 40 \\ 0 \\ -20 \\ -20 \\ -40 \\ 0 \\ 50 \\ 100 \\ 150 \\ 200 \\ 250 \\ 300 \end{array}$ | 9 8 nm | |
| Bruit | $\begin{array}{c} 40 \\ 0 \\ -20 \\ -20 \\ -40 \\ 0 \end{array} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0$ | | 6.85 nm |

 Tableau 1 : Méthode à capteurs prépondérants, incertitudes liées aux capteurs

| Incertitude liées aux capteurs | Niveau prépondérant | $\sigma_{\acute{	ext{e}}cart}$ de profil | σ_{C} |
|-----------------------------------|--|--|--------------|
| Sur la pente + Bruit | $\begin{bmatrix} 10 \\ 5 \\ 0 \\ -5 \\ -10 \\ 0 \\ 50 \\ 100 \\ 150 \\ 200 \\ 250 \\ 300 \\$ | 3 1 nm | |
| Bruit | 10^{-10}_{-10} | 5.1 mii | 4.7 nm |

Tableau 2 : Méthode à niveaux prépondérants, incertitudes liées aux capteurs

4.2.3 Ecart-type équivalent pour le niveau « σ_{N} »

Les graphiques des Tableau 3 et Tableau 4 montrent l'ensemble des profils simulés pour d'une part des incertitudes conformes aux paragraphes ci-dessus et d'autre part un bruit gaussien additif sur chaque niveau.



Tableau 3 : Méthode à capteurs prépondérants, incertitudes liées aux niveaux

| Incertitude liées aux niveaux | Niveau prépondérant | $\sigma_{\acute{	ext{e}}cart}$ de profil | σ_N |
|----------------------------------|--|--|------------|
| Sur la pente + Bruit | $\begin{array}{c} 10 \\ 5 \\ 0 \\ -5 \\ -10 \\ 0 \\ 50 \\ 100 \\ 150 \\ 200 \\ 250 \\ 300 \end{array}$ | 1.52 nm | |
| Bruit | $10 \\ -5 \\ -10 \\ 0 \\ -5 \\ -10 \\ 0 \\ 50 \\ 100 \\ 150 \\ 200 \\ 250 \\ 300 \\ $ | 1.55 mm | 0.067 µrd |

Tableau 4 : Méthode à niveaux prépondérants, incertitudes liées aux niveaux

4.2.4 Bilan paramètre L optimal

| | Capteur prépondérant | Niveau prépondérant |
|-------------------------|----------------------|---------------------|
| Ecart-type « capteurs » | 6.85 nm | 4.7 nm |
| Ecart-type « niveau » | 0.095 µrad | 0.067 µrad |
| Paramètre "L" | 72.1 | 70.15 |

 Tableau 5 : récapitulatif des écarts-types équivalents

Le passage des incertitudes liées aux phénomènes physiques à notion d'écart-type équivalent laisse des questions d'interprétation ouvertes. Le problème est que les équations sont fortement imbriquées. Il est impossible de calculer le profil en annulant l'apport des niveaux ou en annulant l'apport des capteurs. Nous avons ici calculé un paramètre L pour les deux stratégies. Ces deux paramètres sont cohérents mais l'interprétation n'en est pas claire.

Ce qui est certain est qu'en choisissant de calculer les incertitudes sur des profils déterminés par un paramètre L compris entre 40 et 200, nous avons très probablement surévalués les incertitudes et que nous sommes presque surement dans une situation à niveaux prépondérants. En conséquence, nous avons intérêt à améliorer la mesure de l'angle pour n'utiliser les capteurs que dans une mesure locale. Ceci justifie la stratégie de la PTB qui a lancé un programme de recherche sur une lunette autocollimatrice de haute exactitude.

Sur le plan théorique, nous pensons que la résolution rigoureuse du problème qui consiste à dépouiller des mesures provenant de capteurs de nature différentes avec leurs propres incertitudes est un problème ouvert et difficile en présence de dépendances.

4.3 **Evaluation finale des incertitudes**



Figure 25 : Principe de la simulation finale de l'incertitude

Pour chiffrer les incertitudes finales, nous avons deux solutions : soit chercher une incertitude pour chacun des 16 points du profil ou soit chercher à chiffrer un écart-type global. Nous avons choisi cette dernière solution. Il faut également tenir compte de l'incertitude sur la détermination de L. Le processus (Figure 25) basé sur la simulation des incertitudes sur un profil calculé pour L=40 et un autre profil calculé pour L=200 est décrit ci-dessous.

Les incertitudes sur le profil correspondant à L=40 sont simulées. Elles fournissent une collection de profils. On peut donc tracer l'histogramme correspondant à l'ensemble des écarts de chaque profil simulé par rapport au profil moyen. Chaque profil étant constitué de 16 points. Si N=1000 profils sont simulés alors l'échantillon comporte donc 16000 valeurs. L'écart-type calculé est de 3.7nm.

La même procédure sur le profil correspondant aux niveaux prépondérants conduit à un écarttype de 3.5nm.

Si on réunit l'ensemble des deux collections de profils et que l'on applique la même procédure, on aboutit à un écart-type de 4.9nm. Cet écart-type intègre les incertitudes sur chacun des profils et l'incertitude sur la connaissance de L qui se traduit par une incertitude supplémentaire (Figure 21). On vérifie que la moyenne des 2000 profils est très proche de la moyenne des profils à L=40 et L=200 (voir Tableau 6). Sur ce tableau, on donne les altitudes des 16 points du profil en nanomètres (que l'on a volontairement peu tronquées) ce qui permet de juger de la différence entre les valeurs.

| profil moyen entre L=40 et L=200 | profil moyen de la simulation (1000 profils de chaque L) |
|----------------------------------|--|
| -316.701 | -316.766 |
| -319.548 | -319.541 |
| -534.5885 | -534.589 |
| -396.6465 | -396.657 |
| 1727.475 | 1727.49 |
| 1072.015 | 1072.02 |
| 497.802 | 497.816 |
| -651.0465 | -651.024 |
| -1089.025 | -1088.99 |
| 100.18055 | 100.214 |
| -175.9305 | -175.908 |
| -290.9765 | -290.981 |
| -341.177 | -341.2 |
| 957.5315 | 957.489 |
| 113.515 | 113.49 |
| -352.8785 | -352.874 |

Tableau 6 : Profil moyen entre L=40 et L=200 et comparaison au profil moyen simulé



Figure 26 : Tracé du profil correspondant au tableau 2



Figure 27 : Collection des 1000 profils pour L=40 et des 1000 profils pour L=200

La Figure 27 représente la collection des 2000 profils simulés, on pourrait également chiffrer un écart pour chacun de 16 points du profil qui donne une vision moins globale de l'incertitude.

5 Réflexion sur le choix du nombre de capteurs

La question est de déterminer le nombre optimal de capteurs pour une stratégie donnée. Nous étudions ici la stratégie à capteurs prépondérants. Le calcul consiste à supposer que le niveau n'apporte pas d'incertitudes sur la correction de courbure. Dans la publication [WEI2004], l'auteur étudie un cas similaire avec 3 capteurs et 4 capteurs en jouant sur la distance entre les capteurs pour une longueur balayée de 300mm. Dans ce paragraphe, nous gardons la distance entre les capteurs constante et nous étudions à la fois sur le plan théorique et grâce à une simulation de Monte-Carlo, l'intérêt d'augmenter le nombre de capteurs. Dans cet article, l'auteur ne réalise pas de correction de courbure. Nous avons tenu compte de cet effet dans nos simulations.

Pour la simulation du paragraphe 6.2, un bruit sur les données des capteurs est introduit. Il est caractérisé par une variable gaussienne de moyenne nulle et d'écart type égal à 1nm, sans incertitude sur l'angle.

L'existence d'un optimum provient du fait qu'on augmente le recouvrement en augmentant le nombre de capteurs mais que pour une longueur donnée et un pas donné, on diminue le nombre de positions.

5.1 **Décompte des équations et des inconnues**

Par la suite, l'analyse du système de capteurs est traitée pour le cas général de n capteurs. Afin d'analyser la construction d'une rectitude et d'apporter des éléments sur le choix du nombre de capteurs, nous nous proposons d'étudier le nombre d'équations et d'inconnues ou plutôt le nombre d'équations supplémentaires par rapport au nombre d'inconnues. Considérons n capteurs séparés de d millimètres alignés et fixés sur un solide et p positions de balayage.

La longueur explorée sur le profil vaut $((p-1)+(n-1))^*d$.

Le nombre de points mesurés et donc d'inconnues du profil vaut p+n-1. Le profil étant connu à une translation et une rotation près, nous choisissons de fixer le premier et le dernier point à zéro (Figure 28). Il reste donc p+n-1-2 inconnues notées f_{j+si} pour $2 \le j \le p+n-2$.



Figure 28 : Choix du calage du profil à zéro aux deux extrémités

Pour chaque position, le porte capteur est à une distance T et à un angle R par rapport à l'élément à mesurer, ce qui fournit 2p inconnues notées T_i et R_i pour $1 \le j \le p$.

Les capteurs n'étant pas alignés, si l'on prend une droite de référence passant par le premier et le dernier capteur, il faut considérer le défaut d'alignement des n-2 capteurs centraux comme des inconnues notées e_{mi} pour $2 \le i \le n-1$. Le calage de courbure revient à choisir une des variables comme nulle ou à fixer une combinaison linéaire entre les variables (voir annexe 1). On a donc n-3 variables indépendantes.

Au total, on a p + n - 1 - 2 + 2p + n - 3 = 3p + 2n - 6 inconnues.

A chaque mesure, on introduit n * p informations correspondantes aux indications des capteurs notées m_{ii} pour $1 \le i \le n$ et pour $1 \le j \le p$.

On considère un profil de 300mm de longueur. On peut écrire une relation qui relie entre le nombre de capteur et la position de balayage :

$$(p-1)* pas + (n-1)* pas = 300$$
 (4.1)
 $p+n-2 = \frac{300}{pas}$ (4.2)

Avec un pas de mesure fixé à 20 mm, l'équation 4.2 devient p = 17 - n. Pour pouvoir résoudre le système linéaire d'équations, il faut (condition nécessaire mais pas suffisante) que le nombre d'équations soit supérieur au nombre d'inconnues, soit :

$$3p + 2n - 6 \le np$$

$$3(17 - n) + 2n - 6 \le n(17 - n)$$

$$n^{2} - 18n + 45 \le 0$$

$$(n - 15)(n - 3) \le 0$$



Figure 29 : différence entre le nombre d'inconnues et le nombre d'équations

La Figure 29 montre qu'on ne peut résoudre le système avec moins de 3 capteurs ou avec plus de 15 capteurs. Le point optimum qui garantit la plus grande différence entre le nombre d'inconnues et le nombre d'équations est de 9 capteurs.



5.2 Simulation de Monte-Carlo

Figure 30 : simulation pour 3 à 8 capteurs



Figure 31 : évolution de l'écart-type global sur le profil en fonction du nombre de capteurs

La Figure 31 montre l'évolution de l'écart-type calculé en simulant 1000 profils de 16 points puis en cherchant l'écart-type moyen correspondant à l'ensemble des 16000 valeurs. Un minimum de l'ordre de 9 capteurs est obtenu comme prévu. En fait, les fluctuations liées à la simulation de Monte-Carlo donnent un minimum situé entre 8 et 10. Ce qui est plus intéressant est de constater la grande diminution d'incertitude lors du passage de 3 capteurs à 4 capteurs. Le passage à 5 capteurs apporte encore une nette amélioration. Par contre, le passage à 6 capteurs n'apporte qu'un gain marginal.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons un bilan des causes d'incertitudes sur la détermination d'un profil de rectitude.

Nous ne prenons pas en compte l'incertitude sur la flexion thermique du plan de référence car elle dépend de la stratification de température de la salle dans laquelle est installé le plan. Le processus d'étalonnage ne peut être réalisé qu'in situ dans une salle climatisée dont le gradient principalement vertical est stable dans le temps. Le calcul réalisé dans ce chapitre montre qu'une différence de température de 0.005°C induit une flèche de 18nm. C'est donc un paramètre prépondérant. Pour diminuer l'effet de bilame, le choix de l'aluminium comme matériau peut être discuté. Il y a une alternative qui consiste soit à chercher un matériau avec une conductivité thermique comme un métal de coefficient de dilatation important soit à chercher un matériau à faible coefficient de dilatation comme le zérodur dont la conductivité thermique est nettement moins bonne. Il faut en plus que le plan puisse être réalisé dans de bonnes conditions. Il faut donc trouver un matériau présentant une bonne conductivité thermique, un faible coefficient de dilatation et une bonne capacité à l'usinage fin voire au rodage.

Le positionnement des capteurs par la table Aerotech est réalisé sans erreur de poursuite mesurable puisque le repositionnement de la table est meilleur que la résolution. Le repositionnement du porte capteur n'a pas pu être mesuré mais grâce au cycle réalisé pour étalonner les capteurs, l'effet de la reproductibilité de positionnement de la table est évalué.

Les capteurs ont été étalonnés selon un modèle linéaire. Les incertitudes sur la pente de correction et le bruit additif par rapport à cette droite de correction sont chifrés. L'expérience montre qu'un modèle de plus haut degré, comme un arc de parabole, ne présente pas d'intérêt car seul la partie linéaire admet une stabilité raisonnable.

Les niveaux ont été étalonnés grâce à la matrice porte-capteurs. Une incertitude sur la pente de correction et une incertitude sur la valeur indiquée au moment de l'acquisition du profil sont déterminées.

L'ensemble de ces données permet de réaliser une simulation de Monte-Carlo au plus prés de la physique à condition d'être capable de choisir le paramètre L.

Nous proposons une réflexion sur le choix de L basée soit sur l'étude par simulation de la variabilité du profil en fonction de L, soit par une étude directe des incertitudes induits sur le profil par les capteurs d'une part et par les niveaux d'autre part. Cette réflexion aboutit à un profil optimisé et à une incertitude associée. Elle ne peut être considérée comme complètement aboutie. Nous pensons que le problème du dépouillement de données issues de capteurs de nature différente et donc d'incertitudes différentes, mérite une étude mathématique qui n'est pas simple dans le cas de la propagation puisque les données ne sont pas indépendantes à la fois à cause de la nature du processus métrologique (par exemple les niveaux sont étalonnés grâce aux capteurs) mais également à cause de l'imbrication des données par le calcul au sens des moindres carrés. Le problème est que nous ne savons pas calculer le profil sans les informations issues des niveaux et inversement. L'incertitude-type sur le profil est estimée à 4.9nm en moyenne. Cette valeur est probablement surévaluée.

Enfin, nous proposons une réflexion sur le nombre de capteurs optimum pour une stratégie à capteurs prépondérants sans incertitude sur les niveaux. Cette réflexion complète l'apport de la bibliographie. Elle montre que si l'apport en termes d'incertitudes lors du passage de 3 capteurs à 4 capteurs est très important, le passage à 5 capteurs apporte encore une réelle amélioration des incertitudes, mais par contre le passage à 6 capteurs ne paraît pas être d'un apport réel.
Chapitre IV

CARTOGRAPHIE DU PLAN

| 1 | In | troduction et bibliographie | 136 | | |
|---|-----|---|-----|--|--|
| 2 | М | léthode « maximale » | 137 | | |
| | 2.1 | Procédure de mesure | 137 | | |
| | 2.2 | Décompte des équations et des inconnues | 138 | | |
| 3 | М | léthode « minimale » utilisant les rectitudes | 139 | | |
| 4 | Сс | omparaison des méthodes | 141 | | |
| 5 | Si | Simulation de Monte-Carlo des incertitudes sur la base de la méthode des rectitudes _ | | | |
| | | | 142 | | |
| 6 | Сс | onclusion | 144 | | |

1 Introduction et bibliographie

La norme [NF E 04-560] définit la tolérance de planéité comme la « Distance maximale admissible entre deux plans parallèles entre lesquels doit être comprise la surface considérée ».

La norme [NF E 10-102], « Méthodes de mesurage dimensionnel : Troisième partie - Ecarts de planéité » présente trois méthodes de mesurage des écarts de planéité et l'exploitation des résultats.

La première méthode est dite « mesurages des écarts de planéité par composition de rectitudes ou de rectitudes et d'écarts par rapport à des lignes circulaires » : La méthode consiste à composer des écarts de rectitude entre eux ou des écarts de rectitude et des écarts par rapport à des lignes circulaires. C'est cette méthode qu'utilise GAO [GAO2002-b] (Figure 1). Quelle que soit la méthode utilisée, les lignes sur lesquelles sont relevés les écarts doivent former un maillage dont la composition et la finesse dépendent de la forme de la pièce, de ses dimensions et de la tolérance à contrôler.



Figure 1 : Composition de rectitudes et de lignes circulaires [GAO2002-b]

La seconde méthode dite « mesurages des écarts de planéité par comparaison à une référence plane » : On peut envisager deux types de méthodes selon que l'on cherche un contrôle rapide de grandes surfaces avec une tolérance de planéité assez large ou une méthode applicable aux pièces de petites dimensions par utilisation d'un verre plan vérifiable en interférométrie.

La troisième méthode dite « contrôle en coordonnées dans l'espace » : le principe est de déterminer les coordonnées dans l'espace (x, y, z) de points appartenant au plan à contrôler, dans un repère orthonormé lié à l'instrument ou à la pièce. Cette méthode peut être réalisée :

- Avec deux théodolites
- Par photogrammétrie
- Avec une machine à mesurer tridimensionnelle

Au niveau de l'étude de la planéité de la surface, on trouve assez facilement des publications basées sur la zone minimale [LEE1996] [LEE1997]. Néanmoins, ce type de référence n'est

pas indispensable pour notre étude car notre objectif est de connaître la topographie pour l'utiliser comme une référence dans la direction verticale pour la table croisée. Nous pratiquerons un recalage au sens des moindres carrés de la topographie.

Les méthodes classiques de métrologie de la planéité ne sont pas suffisantes en termes d'incertitudes dans le cas qui nous occupe. Nous nous proposons évidemment d'utiliser notre banc de mesure comme système d'acquisition mais les stratégies de mesure et de dépouillement possibles sont très nombreuses. Nous avons choisi de décrire deux situations extrêmes en termes de taille du système d'équations à traiter et de nombre d'acquisitions. L'idée est de montrer l'étendue des choix à réaliser sans chercher à trancher.

2 Méthode « maximale »

Nous utilisons la matrice de 16 capteurs dans un balayage de lignes et de colonnes pour réaliser un dépouillement global c'est-à-dire en résolvant le système linéaire complet. Ce système est donc composé de toutes les données et de toutes les inconnues.

2.1 Procédure de mesure



Figure 2 : Mesure en direction X

On réalise un mesurage des rectitudes selon l'axe X (Figure 2). Pour chaque série de balayage du porte-capteurs (p positions), on obtient quatre rectitudes à la fois. Dans cette stratégie globale, on considère que les inconnues correspondantes à la position relative des capteurs sont constantes.



Figure 3 : Mesure en direction Y

On réalise également les acquisitions pour les rectitudes selon l'axe Y (Figure 3). Certes toutes les positions ont déjà été mesurées mais nous souhaitons ainsi disposer de recoupement entre des positions qui sont éloignées l'une de l'autre dans le temps et donc sont susceptibles de varier à cause de la dérive thermique.

2.2 Décompte des équations et des inconnues

Afin d'analyser la construction de topographie, nous réalisons ici le décompte des équations et des inconnues. Considérons une matrice de $n \ge n$ (ici n=4) capteurs séparés de *d* millimètres (ici d=20mm) alignés et fixés sur un solide et *p* positions de balayage selon les axes X et Y. Nous supposons donc que la surface à caractériser est carrée.

Pour une rectitude, le nombre de points mesurés est de p+n-1. Pour le plan, le nombre de points mesurés et donc d'inconnues vaut $[p+n-1]^2$. Le plan doit être calé selon trois degrés de liberté (Figure 4-a). Il reste donc $[p+n-1]^2 - 3$ inconnues notées f_{ii} .



Figure 4 : Prise en compte du calage relatif (a) des positions mesurées (b) des capteurs

La position des capteurs les uns vis-à-vis des autres n'étant pas parfaite si l'on prend un plan de référence passant par les trois capteurs (Figure 4-b), il faut considérer le défaut d'alignement des $n^2 - 3$ capteurs restant comme des inconnues.

Pour chaque position, le porte-capteurs subit une translation T et deux rotations R_x , R_y par rapport à la pièce à mesurer, ce qui fournit $3p^2$ inconnues.

Au total, on a $[p+n-1]^2 - 3 + n^2 - 3 + 3p^2$ inconnues.

Pour chaque position, on introduit 16 mesurages issus des capteurs capacitifs et deux mesurages issus du niveau soit 18 informations. On a donc globalement $18p^2$ indications pour chaque sens de balayage soit $36p^2$ pour les deux sens de balayage.

Si on réalise une évaluation pratique pour un plan de 300x300 mm^2 avec une matrice de 16 capteurs (n=4) et une distance de 20mm entre deux capteurs soit p=13 positions alors la taille du système est de $[p+n-1]^2 - 3 + n^2 - 3 + 3p^2 = 773$ inconnues pour $36p^2 = 6084$ équations. Le système étant linéaire, il est théoriquement résoluble au sens des moindres carrés. En pratique, le conditionnement du système reste à étudier.

3 Méthode « minimale » utilisant les rectitudes

La métrologie du plan à l'aide d'un niveau électronique est bien connue et a fait l'objet de travaux et d'intercomparaison. Dans [DAV2001], il est montré qu'il est possible de recaler les séries de rectitudes mesurées en lignes par rapport aux série mesurées en colonnes afin de reconstituer le plan à condition de connaitre l'angle relatif des rectitudes entre elles dans chacune des directions.

On pourrait remplacer la matrice de 16 capteurs par une « équerre » de 9 capteurs selon la Figure 5.



Figure 5 : « équerre » de 7 et 9 capteurs

Cette proposition permet de mesurer avec un pas de 20 mm et tire profit de la mise en évidence de l'intérêt d'une ligne de 5 capteurs obtenue grâce à la simulation présentée au chapitre 3. Une matrice de 5*5=25 capteurs est possible mais onéreuse. La disposition à 9 capteurs suppose que l'agencement du banc permet de mesurer toutes les rectitudes (éventuellement, en faisant « dépasser » des capteurs qui ne servent pas en dehors de la zone utile).

Dans cette stratégie, chaque rectitude est dépouillée indépendamment des autres ce qui signifie que les positions relatives des capteurs sont recalculées à chaque fois. En théorie, on devrait trouver toujours les mêmes valeurs. En pratique, la comparaison des résultats constitue un test de reproductibilité.

La position angulaire relative des rectitudes est fournie par le paramètre R_0 (voir chapitre 1 paragraphe 3). Ce point est important. Pour mieux comprendre le problème, imaginons une surface qui corresponde à l'équation $\varepsilon = \beta_{.xy}$ (Figure 6). Parallèlement à l'axe des x ou à l'axe des y, les rectitudes sont droites. Pourtant la surface n'est pas plane. Elle est vrillée. Les diagonales ne sont évidemment pas droites. Ceci constitue une première méthode pour quantifier ce phénomène. La méthode des diagonales n'est pas praticable ici. Elle n'est d'ailleurs pas satisfaisante en particulier à cause de la gestion du pas. La connaissance de la part « vrillée » du profil est donc directement issue de la connaissance des rotations relatives des profils donc des R_0 .



Figure 6 : Surface vrillée de type xy



Figure 7 : Notation pour une mesure d'un plan 300x300 mm²

La Figure 7 représente un plan mesuré avec une stratégie dite du damier en n lignes et m colonnes soit n*m points mesurés.

Comme dans [DAV2001], les rectitudes sont considérées comme des profils "rigides" associés à un degré de liberté vertical uniquement. Nous proposons une amélioration de la démonstration du calcul des paramètres correspondant à la position verticale des lignes et des colonnes en décrivant directement une résolution au sens des moindres carrés.

Notons l(i, j) les points calculés en lignes et c(i, j) les points calculés en colonne. Ces valeurs sont obtenues grâce aux méthodes décrites dans les chapitres précédents.

Nous notons aussi par $L(i, j) = l(i, j) + \lambda_i$ les lignes recalées en altitude où les λ_i sont inconnus. De même, nous notons $C(i, j) = c(i, j) + \mu_i$.

Puisque les tableaux L(i,j) et C(i,j) représentent théoriquement la même surface, on peut écrire le problème au sens des moindres carrés:

$$w = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} (L(i, j) - C(i, j))^{2} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} (l(i, j) + \lambda_{i} - (c(i, j) + \mu_{j})^{2})^{2}$$

On écrit ainsi une somme des carrés des écarts. Cette méthode très simple correspond à l'hypothèse que les incertitudes sur L(i,j) et sur C(i,j) sont égales ou du même ordre de grandeur. On a donc un extremum de cette expression si:

$$\frac{\partial w}{\partial \lambda_i} = 2\sum_{j=1}^m [(l(i, j) + \lambda_i) - (c(i, j) + \mu_j)] = 0$$

Soit:
$$m\lambda_i + \sum_{j=1}^m (l(i, j) - c(i, j)) - \sum_{j=1}^m \mu_j = 0$$

$$\lambda_{i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} (c(i, j) - l(i, j)) + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \mu_{j}$$

De la même façon,

$$\frac{\partial w}{\partial \mu_j} = -2\sum_{i=1}^n l(i,j) + \lambda_i - (c(i,j) + \mu_j) = 0$$

Soit:
$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i + \sum_{i=1}^{n} (l(i, j) - c(i, j)) - n\mu_j = 0$$

Soit:
$$\mu_{j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (l(i, j) - c(i, j)) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i}$$

L'une des deux constantes doit être choisie arbitrairement. Nous posons $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 0$.

Il vient alors
$$\mu_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (l(i, j) - c(i, j))$$

Et

$$\lambda_{i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} (c(i,j) - l(i,j)) + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \mu_{j} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} ((c(i,j) + \mu_{j}) - l(i,j)) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} (C(i,j) - l(i,j))$$

On termine le calcul avec les altitudes moyennes:

$$h(i,j) = \frac{L(i,j) + C(i,j)}{2}$$

Le calcul des écarts de recoupement fournit une évaluation de la qualité des données expérimentales e(i, j) = L(i, j) - C(i, j).

4 Comparaison des méthodes

Les méthodes précédentes ont été qualifiées de « maximale » et de « minimale ». En effet, la matrice complète de 16 capteurs peut être utilisée pour un balayage dans les deux sens pour un dépouillement global. Néanmoins, il est aussi possible de réaliser un dépouillement où chaque rectitude est traitée séparément avant un simple recalage en altitude. Ces deux

Soit :

méthodes constituent deux stratégies quasi extrêmes en termes de taille du système à résoudre et de nombre d'acquisitions à réaliser.

On peut imaginer des stratégies intermédiaires. Par exemple, on peut dépouiller les rectitudes parallèles globalement pour éviter de faire apparaître une incohérence entre les positions relatives des capteurs.

Toutes les stratégies possibles sont équivalentes en l'absence d'incertitudes. Les incertitudes de mesure étant, par nature, inévitables, il faut arbitrer entre le nombre de positions et la stratégie numérique pour minimiser les incertitudes.

Enfin, on peut envisager l'utilisation successive sur les mêmes données de la méthode « minimale » de calage des rectitudes. Elle devrait faire apparaître les incohérences de manière plus sensible pour déceler les données anormales issues d'un incident de mesure et d'une méthode « moins minimale » pour optimiser le résultat final.

5 Simulation de Monte-Carlo des incertitudes sur la base de la méthode des rectitudes

Afin de faire la simulation de Monte-Carlo, nous proposons d'étudier la topographie de la pièce à mesurer (Figure 8-gauche). Cette pièce a été fabriquée en fraisage par balayage. Les zones de recouvrement montrent des variations brutales de l'ordre de ± 2 micromètres. Ces variations se retrouvent sur les résultats des rectitudes obtenues au chapitre 2 (Figure 8-droite) qui montrent toujours trois pics sur le profil de 300 mm.



Figure 8 : La surface de la pièce à mesurer

Nous avons simulé une surface nominalement plane et carrée $(300*300 \text{ mm}^2)$ avec un pas de 20mm soit 16 points au carré. Dans une première étape, on simule (Figure 9 à gauche) une géométrie sinusoïdale qui rappelle le passage successif de la fraise (Figure 8 à gauche) pour obtenir la topographie globale. Dans une seconde étape, on ajoute une valeur tirée d'une variable aléatoire uniforme de $\pm 0.6 \mu m$ sur chaque point (Figure 9 à droite) pour obtenir une allure des rectitudes « ressemblant » aux acquisitions expérimentales (Figure 8 à droite). Cette procédure n'a pas pour objet de modéliser la surface effective mais seulement de fournir une base de simulation située dans les bons ordres de grandeur par rapport à notre plan de référence.



Figure 9 : Surface calculée

Pour obtenir des données correspondantes aux attendus du paragraphe 3, on procède au découpage du plan en rectitudes respectivement dans les directions X et Y. Un recalage permet de fixer chaque premier point à zéro. On obtient ainsi des rectitudes du même type que lors d'une mesure classique aux niveaux électroniques.

On note l(i, j) les points calculés en lignes et c(i, j), les points calculés en colonne. Nous avons réalisé la simulation de la méthode Monte-Carlo de la reconstruction de la surface conformément aux équations du paragraphe 3. Chaque point est entaché d'une incertitude modélisées par une loi normale de moyenne nulle et de 4.85nm d'écart-type de manière cohérente avec les résultats de chapitre 3.



Figure 10 : Incertitude-type pour chaque point du plan

La Figure 10 représente l'écart-type sur chaque point du plan en fonction du nombre de tirages. Avec 1000 tirages, on a déjà une bonne appréciation de l'écart-type et une valeur bien stabilisée avec 5000 tirages. On converge vers 3.57nm. Cette valeur était en fait attendue car le recalage en hauteur de chaque rectitude obtenu à partir d'une moyenne de 16 points est affecté d'une incertitude $4.85/\sqrt{16} = 1.22$ nm. La hauteur résultante d'un point est donc entachée d'une incertitude de $\sqrt{4.85^2 + 1.22^2} = 5.05$ nm qui n'est pas significativement différente de 4.85nm. La moyenne des valeurs en ligne et en colonne est donc entachée d'une incertitude de suleur sen ligne et en colonne est donc entachée d'une incertitude de 5.05/ $\sqrt{2} = 3.57$ nm qui est le résultat trouvé.

En l'absence de covariances, la maîtrise des incertitudes sur les rectitudes permet donc d'envisager celle de la planéité.



Figure 11 : Différence entre la surface simulée initiale et la surface moyenne issue de la simulation

La Figure 11 montre la stabilisation de la différence entre la surface simulée initiale et la surface moyenne obtenue par la simulation. Cette différence tend naturellement vers zéro puisque les incertitudes prises en compte sont centrées.

6 Conclusion

Ce court chapitre a pour vocation d'ouvrir les réflexions pour passer de la maîtrise des rectitudes à la planéité. Les stratégies possibles de dépouillement des acquisitions sont nombreuses entre deux situations extrêmes. La première consiste à calculer les rectitudes indépendamment et à les recouper pour reconstituer une surface nominalement plane. La seconde consiste à réaliser un dépouillement global. Le dépouillement global définit un grand nombre de degré de liberté et il aboutit forcément à un résidu moindre à condition de maîtriser la manipulation d'un grand système dont la matrice n'a probablement pas une structure particulière.

En termes d'incertitudes, le traitement de la redondance sur la connaissance de la position des points aboutit à une incertitude-type plus faible pour la position de chaque point du plan que pour son équivalent sur la rectitude. Ce résultat est issu du fait que la moyenne est calculée entre un point mesuré dans la direction des lignes et d'un point mesuré dans la direction des colonnes. Une limite de ce raisonnement tient aux covariances entre les acquisitions qui sont liées par exemple au fait que ce sont les mêmes capteurs qui réalisent plusieurs rectitudes. Une autre limite concerne le temps nécessaire aux acquisitions qui rend la question de la stabilité thermique délicate.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES



Figure 1 : Reproductibilité sur 10 profils, dépouillement à « capteurs prépondérants »



Figure 2 : Reproductibilité sur 10 profils, dépouillement à « niveaux prépondérants »

Ce travail a permis de développer la métrologie d'une rectitude sur 300mm avec des incertitudes de l'ordre de ± 10 nm.

Les 10 courbes des Figure 1 et Figure 2 constituent des profils de rectitudes issues des mêmes données et dépouillées selon deux stratégies extrêmes. Ces courbes ont été montrées à la fin du chapitre II. La reproductibilité est de l'ordre de ±5nm. Cette reproductibilité intègre l'ensemble du processus d'acquisitions, d'étalonnage des capteurs et des niveaux, et de dépouillement. A la fin du chapitre 3, nous déclarons une incertitude-type moyenne le long du

profil de 4.85nm soit de l'ordre de ± 10 nm. La faible différence entre la reproductibilité et l'incertitude s'explique par le fait que l'incohérence sur l'étalonnage des différents capteurs se traduit par une dégradation de la reproductibilité. L'incertitude sur les extrémités du profil de l'ordre de ± 20 nm est plus importante. Ceci a un effet direct sur l'incertitude sur la courbure du profil et du recalage au sens des moindres carrés.

Pour obtenir ce résultat, le banc de mesure de planéité commencé par Ludovic LAHOUSSE a été finalisé pour réaliser les étalonnages. Les procédures expérimentales visant à l'étalonnage des capteurs et des niveaux ont été créées et validées. Les stratégies de dépouillement à « capteurs prépondérants » et à « niveaux prépondérants » au sens des moindres carrés pondérés ont été développées. Un résultat important a été la mise en évidence du fait qu'il est possible de passer de manière continue de la solution à « capteurs prépondérants » à la solution à « niveaux prépondérants » via un paramètre L.

L'ensemble du processus de mesure aboutissant au mesurande a été simulé par la méthode de Monte-Carlo. Cette méthode a pour avantage de prendre en compte l'ensemble des covariances liées, par exemple, au fait que l'incertitude sur l'étalonnage des capteurs fournit une incertitude sur l'ensemble des points « vus » par le capteur. De plus, ces incertitudes ne sont pas indépendantes. Elles se « mélangent » dans le processus de propagation.

Nous avons enfin cherché à développer une méthodologie de détermination du paramètre L. Le paramètre L fournissant une variabilité minimale sur le profil apparaît comme un minimum très plat qui ne permet pas une détermination fiable de L. Ceci ajoute une incertitude sur le profil de l'ordre de \pm 5nm. Nous avons cherché à calculer directement et séparément les incertitudes sur les capteurs et sur les niveaux pour en déduire L. L'interprétation des résultats est délicate car on ne peut calculer le profil sans capteurs ou sans niveaux c'est-à-dire séparer les causes d'incertitudes. Ceci constitue une question ouverte. On aboutit à un paramètre optimal L=72 pour la méthode à capteurs prépondérants, L=70 pour la méthode à niveaux prépondérants. Ces deux valeurs sont cohérentes entre elles et situées entre 40 et 200 qui est la zone dans laquelle on pense devoir trouver l'optimum. On obtient donc le résultat de la Figure 3.





En conclusion de chaque chapitre, nous avons résumé les principaux acquis et les modifications qui devraient être apportées au banc pour améliorer les incertitudes. L'essentiel de la réflexion tient au point suivant : plus la plage de mesure utilisée sur les capteurs et les niveaux est faible et plus les incertitudes sont faibles puisque l'on minimise l'effet des incertitudes liées à l'étalonnage. L'idéal est d'utiliser les capteurs comme « détecteur de zéro ».

Un autre point essentiel est que l'incertitude sur l'étalonnage des capteurs capacitifs et des niveaux se traduit par de la reproductibilité car, à l'échelle micrométrique, la répétabilité du déplacement du porte-capteurs n'est pas garantie. Ce défaut de répétabilité du déplacement du porte-capteurs se traduit par le fait que les capteurs et les niveaux ne sont pas sollicités dans la même zone. Par conséquent, l'incertitude sur l'étalonnage influe sur le résultat final. Il est donc difficile de considérer que l'on a affaire à de la répétabilité puisque les capteurs ne fonctionnement pas dans la même zone. Dans une méthode de propagation, la limite entre les deux concepts de répétabilité et de reproductibilité est un peu floue.

Cela n'est pas classique en métrologie, sur une machine à mesurer tridimensionnelle, la répétabilité ne dépend pas de l'étalonnage. La reproductibilité vis-à-vis d'un changement de position de la pièce en dépend. Si on imagine une machine présentant des défauts proportionnels de justesse sur tous les axes, avec le même coefficient de proportionnalité, alors la reproductibilité n'en souffre pas. La propagation est d'une autre nature.

Le dernier chapitre fournit des pistes pour traiter la planéité. Les acquisitions n'ont pas été possibles à cause d'une panne de l'électronique de commande de la table AeroTech qui nécessitait d'envoyer la table aux Etats-Unis pour réparation ce qui était incompatible avec les délais de réalisation de la thèse. Néanmoins, en l'absence de dépendances entre les acquisitions, on montre que les résultats sur la planéité seront plutôt meilleurs que les résultats sur les rectitudes grâce à des recoupements entre les rectitudes parallèles à X et celles parallèles à Y. Une simulation Monte-Carlo complète du processus aboutissant à la topographie du plan ne poserait pas de problème. Le plus difficile sur des acquisitions longues est de maintenir une température suffisamment constante.

Le PTB utilise pour des acquisitions du même type une lunette autocollimatrice. Ce laboratoire travaille à une lunette de haute exactitude. L'utilisation du niveau électronique est surement moins intéressante en termes d'incertitudes mais permet d'envisager facilement le passage à la planimétrie. Ceci n'est pas envisageable avec la lunette puisque le calage angulaire relatif des lignes n'est pas maîtrisé. Il est donc clair que l'utilisation d'un niveau de plus haute exactitude est nécessaire et que la solution de la lunette n'est satisfaisante.

La métrologie à cette échelle est d'une grande exigence. On ne peut tolérer ni le moindre manquement sur les acquisitions ni le moindre manquement sur les dépouillements de résultats. En particulier, la température est toujours un souci. Pourtant, ce travail montre qu'avec des matériels relativement classiques, il est possible d'atteindre un niveau de performance intéressant.

En termes de perspectives, on peut proposer plusieurs pistes de réflexion :

Il est possible, avec les mêmes capteurs, d'envisager la diminution de la distance entre deux capteurs à 10mm. Le banc pourrait également être sensiblement amélioré en particulier au niveau de la conception du porte-capteur et surtout de son support.

- On peut améliorer les incertitudes en passant à 5 capteurs par ligne. On a montré que cette disposition permet en théorie de gagner 30% sur l'incertitude. Cette disposition des capteurs dans la matrice porte-capteur conduit cependant à 25 capteurs. On propose la disposition de la Figure 4. L'équerre de 9 capteurs permet de mesurer des rectitudes orthogonales avec 5 capteurs, le groupe de 4 capteurs permet d'améliorer la mesure des angles de rotations pour l'étalonnage des niveaux. Nous n'avons pas encore simulé les incertitudes liées à cette nouvelle disposition.
- On peut chercher à améliorer les incertitudes liées aux capteurs et aux niveaux soit en achetant du matériel plus performant soit en concevant un matériel spécifique
- Une voie importante d'amélioration est de réaliser une surface à étalonner de meilleure qualité géométrique de manière à diminuer le rapport entre le défaut de forme à mesurer et les incertitudes cherchées. Dans notre travail, ce rapport est de l'ordre de 100. On aurait également intérêt à une surface plus « lisse » en ondulation et en rugosité.
- Nous avons défini un mesurande lié uniquement aux points mesurés mais pas à la totalité du profil. Il faut donc compléter l'étude de la géométrie du plan par une étude locale (géométrie entre les points) ce qui ne peut relever des mêmes principes.
- Sur le plan mathématique, l'optimisation des incertitudes dans un processus de propagation qui est un « mélange non séparable » des indications de distances et des indications angulaires est un problème largement ouvert. Nous avons exploré deux pistes possibles avec un point de vue numérique mais une étude théorique reste nécessaire.



Figure 4 : Proposition d'une nouvelle disposition pour les capteurs

Références bibliographiques

- [ACK2005] B. Acko "Calibration of electronic levels using a special sine bar" Precision Engineering 29 (2005) 48-55.
- [ARD2008] Flavius A. ARDELEAN, "The Measurement of the straightness in the case of long guideways, using modern measurement methods, namely, the laser", ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), 2008.
- [BIR1993] Birch, K. P. and Downs, M. J. "An updated Edlen equation for the refractive Index of air" Metrologia, Vol. 30, pp. 155-162, 1993.
- [BIR1994] Birch, K. P. and Downs, M. J. "Correction to the Updated Edlen Equation for the Refractive Index of Air" Metrologia, Vol. 31, pp. 315-316, 1994.
- [BOR2008] S. Boripatkosol, L. Lahousse et al., "LNE activities in nanometrology: flatness reference calibration algorithm", 8th EUSPEN International Conference, Zurich, Suisse, 18-22 Mai 2008.
- [BUR] Jan Burke, Bozenko (Bob) Oreb and Roger Netterfield, "Customized three-flat calibration method for a 320 mm aperture Fizeau interferometer with vertical optical axis".
- [CAM1995] Alan Campbell, "Measurement of lathe Z-slide straightness and parallelism using a flat land", Precision Engineering 17:207-210, 1995.
- [CAY1953] CAYERE, "Métrologie des angles". Extraits de la "machine moderne" de juin 1953 à septembre 1954. Publié en polycopié par l'Ecole Libre d'Apprentissage de Grenoble.
- [CAY1956] CAYERE, "Mesure des défauts d'une règle-étalon". Extraits de "Manipulation de Métrologie mécanique" de décembre 1956 à mai 1957. Publié en polycopié par l'Ecole Libre d'Apprentissage de Grenoble.
- [CHE1996] S. Hossein CHERAGHI, Huay S. LIM, Saied MOTAVALLI, "Straightness and flatness tolerance evaluation : an optimization approach", Precision Engineering 18:30-37, 1996.

- [COO1990] Thierry Coorevits, "Contribution au développement des techniques d'autocalibrage appliquées aux machines à mesurer tridimensionnelles", Thèse de Doctorat ENSAM No90, ENAM. 0003, 1990.
- [COS2004] Cosijns, Suzanne J.A.G., "Displacement laser interferometry with subnanometer uncertainty", Thèse de doctorat Technische Universiteit Eindhoven, Octobre 2004.
- [DAV2001] Jean David, Thierry Coorevits, Georges Vailleau, Stéphane Leleu, "Métrologie des marbres : méthode de calcul et incertitudes", Congrès international de Métrologie, Saint-Louis 2001.
- [DEM1998] F.C. Demarest. "High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics". *Meas. Sci.Technol.*, 9:1024–1030, 1998.
- [DES2007] M. Désenfant, N. Fischer et al., "Evaluation de l'incertitude en utilisant les simulations de monte carlo", 13^e Congrès International de Métrologie, Lille, 18-21 Juin 2007.
- [DUC2003] S. Ducourtieux, F. Larsonnier et al., "Le programme de recherche et developpement en nanometrologie du BNM-LNE", 11^e Congrès International de Métrologie, Toulouse, 20-23 Octobre 2003.
- [EDL1965] Edlen, Bengt "*The Refractive Index of Air*" Metrologia, Vol. 2, No. 2, pp. 71-80, 1965
- [ELS2006] Clemens Elster, Ingolf Weingärtner, Michael Schulz, "Coupled distance sensor systems for high-accuracy topography measurement: Accounting for scanning stage and systematic sensor errors", Precision Engineering 30(1):32-38, 2006.
- [ENG] Engineering Reference <u>www.aerotech.com</u>
- [EST1997] W. Tyler ESTLER, Chris J. EVANS, L. Z. SHAO, "Uncertainty estimation for multiposition form error metrology" Precision Engineering 21 :72-82, 1997.
- [EVA1996-b] Chris J. Evans, Robert J. Hocken and W. Tyler Estler, "Self-Calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation, and Absolute Testing", Annals of the CIRP, Vol. 45, No. 2, pp. 617-634, 1996.
- [FAN2000] K.C. Fan, Yang Zhao, "A laser straightness measurement system using optical fiber and modulation techniques", International Journal of Machine Tools & Manufacture 40:2073–2081, 2000.
- [FOG1995] **Fogale Nanotech** "*Mesures sans contact par capteurs capacitifs*", Document technique constructeur; 1995.
- [GAO1996-a] Wei Gao, Satoshi Kiyono, "High accuracy profile measurement of a machined surface by the combined method", Measurement Vol. 19, No. 1, pp. 55-64, 1996.

- [GAO1996-b] Wei Gao, Satoshi Kiyono, Tadatoshi Nomura, "A new multiprobe method of roundness measurements", Precision Engineering 19(1):37-45, 1996.
- [GAO1997-a] Wei Gao, Satoshi Kiyono, "On-machine roundness measurement of cylindrical workpieces by the combined three-point method", Measurement Vol. 21, No.4, pp. 147-156, 1997.
- [GAO1997-b] Wei Gao, Satoshi Kiyono, Takamitu Sugawara, "High-accuracy roundness measurement by a new error separation method", Precision Engineering 21:123-133, 1997.
- [GAO2002-a] Wei Gao, Jun Yokoyama, Hidetoshi Kojima and Satoshi Kiyono, "Precision measurement of cylinder straightness using a scanning multi-probe system", Precision Engineering 26(3):279-288, 2002.
- [GAO2002-b] Wei Gao, Peisen S. Huang, Tomohiko Yamada and Satoshi Kiyono, "A compact and sensitive two-dimensional angle probe for flatness measurement of large silicon wafers", Precision Engineering 26:396-404, 2002.
- [GEN2003] James E. GENTLE, "Random Number Generation and Monte Carlo methods" – Springer, Statistics and Computing, second Edition.
- [GIA2004] Benedito Di Giacomo, Rita de Cássia Alves de Magalhães, Fabricio Tadeu Paziani, "Reversal technique applied to the measurement of straightness errors", ABCM Symposium series in Mechatronics, Vol. 1, pages 479-487, 2004.
- [GOU1999] J. B. Gou, Y. X. Chu, Z. X. Li, "A geometric theory of form, profile, and orientation tolerances", Precision Engineering 23:79-93, 1999.
- [HEN2007] François HENNEBELLE, "Determination des incertitudes de mesures sur machines à mesurer tridimensionnelles : Application aux engrenages", Thèse de Doctorat ENSAM, Décembre 2007.
- [HEY1981] P.L.M. Heydemann, "Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers", *Applied optics*, 20(19):3382–3384, October 1981
- [JCGM 101 : 2008] Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM/WG1), Évaluation des données de mesure — Supplément 1 du "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure" - Propagation de distributions par une méthode de Monte Carlo, 1^{er} édition 2008.
- [JCGM 200 :2008] Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM/WG2), "Vocabulaire international de métrologie - Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)", 3^e édition 2008.

- [KIY1994] Satoshi Kiyono, Wei Gao, "Profile measurement of machined surface with a new differential surface with a new differential method", Precision Engineering 16(3):212-218, 1994.
- [KNA1983-a] W. KNAPP, (1983). "Test of three-Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors" – Annals of the CIRP Vol. 32/1/1983.
- [KNA1983-b] W. KNAPP, (1983). "Circular test for three-coordinate measuring machines and machine tools" Precision engineering Vol. 5, No.3 July 1983.
- [KUM2006] Tatsuya KUME, Kazuhiro ENAMI, Yasuo HIGASHI, and Kenji UENO, "Evaluation of Error Propagation in Profilometry using Stitching", 9th International Workshop on Accelerator Alignment, September 26-29, 2006.
- [KUN1983] H. KUNZMANN, F. WÄLDELE, (1983). "On Testing Coordinate Measuring Machines (CMM) with Kinematic Reference Standards (KRS)" – Annals of the CIRP Vol.32/1/1983.
- [LAB GTA 14-2006] "Guide d'évaluation des incertitudes de mesures des analyses de biologie médicale", Document LAB GTA 14, Novembre 2006.
- [LAH2005-a] L. Lahousse, S. Ducourtieux et al., "Programme de recherche et développement du LNE en nanométrologie : Derniers résultats", 12^e Congrès International de Métrologie, Lyon, 20-23 Juin 2005.
- [LAH2005-b] L. Lahousse, "Contribution à la conception d'une machine à mesurer de précision nanométrique Architecture globale Dispositions constructives Etalonnage de références planes", Thèse de doctorat ENSAM ; Octobre 2005.
- [LAH2005-c] L. Lahousse, J. David, "Application d'une nouvelle conception d'architecture à une machine de mesure de résolution nanométrique", Revue française de métrologie No.4, Vol 2005-4.
- [LAH2007] L. Lahousse, S. Ducourtieux et al., "Z calibration of the LNE ultra precision coordinate measuring machine", 7th EUSPEN International Conference, Brême, Allemagne, 20-24 Mai 2007.
- [LAR2007] F. Larsonnier, S. Ducourtieux et al., " Derniers résultats du programme de recherche et de développement du LNE en nanométrologie dimensionnelle", 13^e Congrès International de Métrologie, Lille, 18-21 Juin 2007.
- [LEE1996] Eung Suk LEE, "'Z' Approaching Minimum Zone Method for Flatness and Straightness Error Calculation", JSME International Journal, Vol.39, No.3, 1996.
- [LEL2003] S. Leleu, J.M.David et G.P. Vailleau, "La mesure des angles au BNM-LNE création d'une nouvelle référence de mesure angulaire", 11^e Congrès International de Métrologie, Toulouse, 20-23 Octobre 2003.

- [LI1996] C. JAMES LI, SHENGYI LI and JIANMING YU, "High-resolution error separation technique for in-situ straightness measurement of machine tools and workpieces", Mechatronics 6(3):337-347, 1996.
- [LIP,R1320] Geneviève LIPINSKI, "Mesures dimensionnelles par interférométrie laser", Techniques de l'ingénieur R1320 : 1-17.
- [LIU2009] Shujie Liu, Kentaro Watanabe, Xin Chen, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, "Profile measurement of a wide-area resist surface using a multiball cantilever system", Precision Engineering 33(1):50-55, 2009.
- [MAG2006] Andrea Magalini, David Vetturi, "Laser interferometry for straightness measurement in a weakly controlled environment" XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, Metrology for a Sustainable Development September, 17 – 22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.
- [NF E04-560] Norme Française AFNOR NF E04-560, Juin 1985 "Dessins techniques Cotation et tolérancement Vocabulaire".
- [NF E10-101] Norme Française AFNOR NF E10-101, Février 1988 "Méthodes de mesurage dimensionnel **Deuxième partie : Ecarts de rectitude**".
- [NF E10-102] Norme Française AFNOR NF E10-102, Février 1988 "Méthodes de mesurage dimensionnel **Troisième partie : Ecarts de planéité**".
- [NF E10-103] Norme Française AFNOR NF E10-103, Juin 1988 "Méthodes de mesurage dimensionnel **Quatrième partie : Ecarts de circularité**".
- [NF EN ISO 1] Norme Française AFNOR NF EN ISO 1, Décembre 2002 "Spécification géométrique des produits (GPS) **Température normale de référence pour la spécification géométrique des produits et vérification**".
- [NF EN ISO 1101] Norme Française AFNOR NF EN ISO 1101, Janvier 2006 "Spécification géométrique des produits (GPS) **Tolérancement géométrique** Tolérancement de forme, orientation, position et battement".
- [NF EN ISO 5725-1, 1994] : Norme Française AFNOR NF EN ISO 5725-1, Décembre 1994 -"Application de la statistique - Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 1 : principes généraux et définitions".
- [NF EN ISO/CEI 17025, 2000] : Norme Française AFNOR NF EN ISO/CEI 17025, Mai 2000 - "Prescriptions générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais".
- [NF EN ISO14253-1] Norme Française AFNOR NF EN ISO 14253-1, Mars 1999 -"Spécification géométrique des produits (GPS) – Vérification par la mesure des pièces et équipements de mesure - Partie 1 : Règles de décision pour prouver la conformité ou la non-conformité à la spécification".

- [NF ENV 13005] : Norme Française AFNOR NF ENV 13005, Août 1999 Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM).
- [NF X02-006] Norme Française AFNOR NF X02-006, Août 1994 "Normes fondamentales – Le système international d'unités – Description et règles d'emploi – Choix de multiples et de sous-multiples.
- [PAH1995] H. PAHK, J. KIM, "Application of Microcomputer for Assessing the Probe Lobing Error and Geometric Errors of CMMs Using Commercial Ring Gauges". Int. J. Adv. Manuf. Technol. (1995) 10 :208-218.
- [PAZ2007] Fabricio T. Paziani, Benedito Di Giacomo, Roberto H. Tsunaki, "Development of an Automated and Dedicated Measuring System for Straightness Evaluation", J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng Vol XXIX(3), 290-298, 2007.
- [PRI2007] Marc Priel, Soraya Amarouche et al., "Utiliser les résultats des essais d'aptitude dernière méthode alternative pour l'évaluation des incertitudes-Application à la biologie médicale", 13^e Congrès International de Métrologie, Lille, 18-21 Juin 2007.
- [RIV2003] Cédric RIVIER, Béatrice LALERE, "Guide méthodologique pour l'estimation des incertitudes en analyse chimique", Annexe au compte rendu de fin d'opération d'une recherche financée par le Ministère de la Recherche – Projet METREAU, Janvier 2003.
- [ROD1840] Olinde RODRIGUES, "Des lois géométriques qui régissent les déplacements d'un système solide dans l'espace, et de la variation des coordonnées provenant de ces déplacements considérés indépendamment des causes qui peuvent les produire", Journal de mathématiques pures et appliquées 1^{er} série, tome 5, p.380-440, 1840.
- [SAK1987] H. H. Sakuma and H. Wada, "Straightness measurement using a heterodyne moiré method", Precision Engineering 9(1), p.19-22, 1987.
- [SCH2005] Michael Schulz, "Traceable Multiple Sensor Systems for High-Accuracy Form Measurement", DGaO Proceedings 2005– http://www.dgao-proceedings.de ISSN: 1614-8436.
- [WEB1984] H. WEBER, "Beeinträchtigung der Genauigkeit von Koordinatenmessungen durch die Umgebung" VDI Berichte n°524 107-116.
- [WEI2004] Ingolf Weingärtner, Clemens Elster, "System of four distance sensors for highaccuracy measurement of topography", Precision Engineering 28(2):164-70, 2004.
- [WET1998] Serge Felix Chretièn Lucien Wetzels, "Laser based displacement calibration with nanometer accuracy" Thèse de doctorat de Technische Universiteit Eindhoven, 1998.

- [WHI1976] D.J. Whitehouse, "Some theorical aspects of error separation techniques in surface metrology", Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 9, Mars 1976.
- [YIN2005] Yin Zi-qiang, Li Sheng-yi, "Exact straightness reconstruction for on-machine measuring precision workpiece", Precision Engineering 29(4):456-466, 2005.
- [YIN2006] Yin Zi-qiang, Li Sheng-yi, "High accuracy error separation technique for onmachine measuring straightness", Precision Engineering 30(2):192-200, 2006.
- [ZHA1999] Qing ZHANG, K. C. FAN, ZHU LI, "Evaluation method for spatial straightness errors based on minimum zone condition", Precision Engineering 23: 264-272, 1999.

Annexe I

Choix du calage de la courbure

Lorsqu'on utilise trois capteurs (Figure 1), l'incertitude sur la position relative du capteur central par rapport aux capteurs d'extrémités se traduit par la superposition d'une parabole sur le profil mesuré. Il y a équivalence entre la connaissance de la variable e_{m2} et celle de la courbure. Il existe deux façons de régler ce problème, la première méthode consiste à placer les capteurs sur une surface de référence mais cette procédure n'est pas satisfaisante en terme d'incertitudes et la seconde méthode consiste à ajouter une mesure d'angle qui constitue une évaluation du tangage du porte-capteur, c'est la solution que nous avons choisie.



Figure 1: effet du calage des capteurs sur la courbure

La problématique d'un système utilisant 4 capteurs est plus compliquée que celle qui implique

3 capteurs. La position relative des 4 capteurs est décrite par inconnues indépendantes e_{m2} et

 e_{m3} qui correspondent au calage des capteurs centraux par rapport aux capteurs d'extrémités. Dans un calcul de type « capteurs prépondérants », il est possible de calculer l'une des deux inconnues en fixant l'autre ce qui revient à caler la courbure. Cette annexe décrit la problématique du choix de l'inconnue à fixer et du lien avec la courbure.

Le principe est d'abord d'imposer une parabole quelconque puis de la relier avec les positions relatives des capteurs en introduisant des nouvelles inconnues. On prend ensuite en compte les nouvelles inconnues dans la matrice de la propagation.

Nous montrons ici trois exemples de courbures différentes (rouge, bleu et vert dans la Figure 2-a). On suppose que la courbure rouge passe parfaitement par la position zéro du capteur 3, la courbure verte passe par la position zéro du capteur 2 et la courbure bleue passe à la moyenne de e_{m2} et e_{m3} à la position des capteurs 2 et 3 respectivement.



Figure 2 : choix du calage de la courbure

Ensuite, on introduit e_2 et e_3 qui sont la différence entre l'indication du capteur et la parabole arbitraire (Figure 2-b) et on relie ces deux variables par une relation.

Par exemple, si la parabole passe par la position zéro du capteur 2 : nous posons $e_2 = 0$, si la courbure passe par la position zéro du capteur 3 : nous posons $e_3 = 0$. D'une façon générale, on définit une relation : $a_2e_2 + a_3e_3 = b$, où a_2, a_3 et *b* qui sont des constantes arbitraires.

Grâce à cette relation, on peut diminuer le nombre des variables e_i en remplaçant par une variable « β » qui peut être déterminée par la méthode de la propagation (

Tableau 1).

| Relation choisi | e_i en variable | eβ |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| $e_2 = 0$ | <i>e</i> ₂ = 0 | $e_3 = \beta$ |
| $e_3 = 0$ | $e_2 = \beta$ | $e_{3} = 0$ |
| $e_2 + e_3 = 0$ | $e_2 = \beta$ | $e_3 = -\beta$ |
| $a_2e_2 + a_3e_3 = b$ | $e_2 = \beta$ | $e_3 = (b - a_2 \beta) / a_3$ |

Tableau 1 : mesure à 4 capteurs, choix du calage de la courbure

Dans le cas général, on peut réécrire les équations et aussi le système d'équations sous la forme matricielle comme ci-dessous.

Grâce à la comparaison entre la rotation issue de la propagation et celle du niveau, on obtient la parabole qui correspond à la relation entre e_2 et e_3 . Comme on connaît le paramètre d, on peut calculer h (voir Figure 3). e_{m2} et e_{m3} sont alors déterminés grâce aux équations (1) et (2).



Figure 3 : Représentation de la position relative

Cette démarche se généralise avec cinq capteurs ou plus (

Tableau 2).

| Combinaison linéaire | $\sum_{i=2}^{n-1} a_i e_i - b = 0$ |
|----------------------|--|
| | $e_{i} = \beta_{i-1} , i = 2,, n-2$ $e_{n-1} = \frac{b - \sum_{i=2}^{n-2} a_{i} \beta_{i-1}}{a_{n-1}}$ |
| | $h = [\text{la pente de la rotation} (\vec{R} - \vec{N})] * \frac{(n-1)^2}{8}$ |
| | $e_{mi} = \left[1 - \frac{(n-2i+1)^2}{(n-1)^2}\right] * h + e_i \qquad , i = 2,, n-1$ |

Tableau 2 : Paramètres pour le système à N capteurs

Annexe II

PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRIE A UNE LONGUEUR D'ONDE

Le phénomène d'interférences lumineuses peut être observé avec un interféromètre de type Michelson, qui utilise un miroir semi-transparent pour diviser en deux le faisceau émis pas la source. Ces deux faisceaux sont réfléchis par deux miroirs perpendiculaires aux faisceaux (Figure 1), puis se recombinent grâce au miroir semi-transparent (ou lame semi-réfléchissante), vers le dispositif d'observation.

Les deux ondes vibrations reçues par ce dispositif d'observation ont la même longueur d'onde λ ou la même fréquence f, puisqu'elles sont issues d'une même source.

L'amplitude de la vibration réfléchie par le miroir fixe peut s'écrire :

$$S_1 = a_1 \cos(2\pi f t)$$

L'amplitude de la vibration réfléchie par le miroir mobile peut s'écrire :

$$S_2 = a_2 \cos(2\pi f t + \varphi)$$

 φ est le déphasage introduit par la différence des trajets 1 et 2. Pour un déplacement L du miroir mobile, on obtient la relation :

$$\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda_{air}}$$

avec $\delta = 2L$ différence de chemin optique



Figure 1 : Interféromètre à comptage de franges et à une longueur d'onde [LIP_R1320]

Soit un photodétecteur recevant ces deux vibrations, l'intensité résultante I est égale à :

$$I = (S_1 + S_2)^2$$

Après développement et suppression du terme $cos(4\pi ft + \varphi)$ de moyenne nulle, on obtient :

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos\varphi$$

 $2a_1a_2\cos\varphi$ est le terme d'interférence.

Dans le cas particulier qui nous intéresse en interférométrie, les amplitudes sont égales $a_1^2 = a_2^2 = I_0$ et l'intensité résultante est :

$$I = 2I_0(1 + \cos \varphi)$$

L'intensité est égale à $4I_0$ lorsque les vibrations sont en phase ($\varphi = 2K\pi$), l'interférence étant alors constructive, et l'intensité est nulle lorsqu'elles sont en opposition de phase $[\varphi = (2K+1)\pi]$, l'interférence étant destructive.

Si l'on déplace lentement un miroir, l'intensité augmente et diminue, elle s'annule avec un pas de déplacement correspondant à une demi-longueur d'onde, soit une variation totale de la trajectoire d'une longueur d'onde. Si la longueur d'onde λ est connue, le déplacement peut être ainsi mesuré avec précision.

De cette observation vient l'analogie entre un interféromètre et une règle à traits gravée tous les $\lambda/2$, appelé *interfrange*.

En comptant ces alternances d'intensité lumineuse, appelées *franges*, il est donc possible de mesurer la longueur L du déplacement du miroir mobile :

$$L = K\lambda/2$$
 (K réel)

• <u>Résolution</u>

Pour
$$\lambda = 0.633 \ \mu m$$
 (raie rouge), $r = \lambda / 2 = 0.316 \ \mu m$.

• <u>Etendue de mesure</u>

Les lasers stabilisés hélium-néon présentent un spectre très étroit, ils sont capables de former des franges avec un contraste et une intensité suffisante sur plusieurs dizaines de mètres.

• Interpolation à l'intérieur d'une frange

Les signaux délivrés par l'interféromètre sont deux signaux sinusoïdaux déphasés de 90°. Le mode de visualisation et de représentation choisi est celui du Lissajous.

$$I_1 = I_0 \cos \varphi$$
$$I_2 = I_0 \sin \varphi$$

Avec I_0 intensité à l'entrée

 I_1 intensité à la sortie (photodétecteur 1)

 I_2 intensité à la sortie (photodétecteur 2)

Pour obtenir ces deux signaux $(\cos \varphi, \sin \varphi)$, il est nécessaire d'interposer une lame retard de phase $(\pi/2 \text{ ou } \lambda/4)$ sur la moitié du faisceau en sortie de la source laser qui émet une lumière polarisée. Après interférence, un prisme biréfringent permet de séparer les deux signaux déphasés et de les envoyer sur deux photodétecteurs. Par analyse en amplitude des signaux analogiques, il est possible de faire du comptage-décomptage.

La mesure de déplacement retenue est basée sur le principe de comptage de franges d'interférence entière et de fraction de frange. Un déplacement relatif entre les deux miroirs qui se traduit par le passage de deux franges d'interférence successives est égale à la moitié de la valeur de la longueur d'onde ($\lambda/2$) de la source, soit 316.5 nm.

Les deux signaux peuvent être observés sur un oscilloscope en mode XY, idéalement la courbe de Lissajous est un cercle (Figure 2).



Figure 2 : Visualisation des signaux en représentation Lissajous

On calcule la phase φ :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$
$$\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$$

Et

Annexe III

CALCUL DES DEPLACEMENTS DU PORTE-CAPTEUR

1 Calcul des déplacements de la matrice du portecapteur

Nous utilisons le plan qui minimise la somme des carrés des résidus pour évaluer le roulis et le tangage du porte-capteur. Puisque l'on dispose de 16 capteurs (figure 1) et que la position du plan correspond à trois paramètres indépendants, la vérification des résidus après calcul est un bon test de cohérence.



Figure 1 : La matrice du porte-capteur

En supposant que le porte-capteur (Figure 1) se comporte comme un corps solide en petits déplacements, on peut décrire son déplacement par l'équation c—dessous en utilisant les mesures des 16 capteurs :

$$\varepsilon_i = f(x_i, y_i)$$
, $i = 1 \ge 16$
= $t + \alpha y_i - \beta x_i$

Où ε_i est l'indication du capteur *i*
x_i, y_i sont les coordonnées de la position du capteur itest la translation verticale du porte-capteur α et β sont les rotations autour des axes X et Y du porte-capteur

Il s'agit de rechercher la solution moyenne la plus vraisemblable en minimisant la somme $\sum \zeta_i^2$ où ζ_i désigne le *résidu* évalué pour le capteur *i* c'est-à-dire la différence entre ε_i l'indication du capteur et $t + \alpha y_i - \beta x_i$ l'évaluation de la position du plan au droit du capteur :

$$\zeta_{i} = \varepsilon_{i} - (t + \alpha y_{i} - \beta x_{i})$$
$$w = (t, \alpha, \beta) = \sum_{i=1}^{16} \zeta^{2}$$

Qui peut également être écrit sous forme :

$$w = (t, \alpha, \beta) = \sum_{i=1}^{16} \left(\varepsilon_i - \left(t + \alpha y_i - \beta x_i\right)\right)^2$$

Où w est la somme des carrés des résidus

Afin de minimiser la somme des carrés des résidus (*w*) qui est une fonction de trois variables, il faut annuler ses dérivées partielles par rapport aux trois variables :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = 0; \qquad 2\sum_{i=1}^{16} \left(\varepsilon_i - \left(t + \alpha y_i - \beta x_i\right)\right) \cdot \left(-1\right) = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial \alpha} = 0; \qquad 2\sum_{i=1}^{16} \left(\varepsilon_i - \left(t + \alpha y_i - \beta x_i\right)\right) \cdot \left(-y_i\right) = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial \beta} = 0; \qquad 2\sum_{i=1}^{16} \left(\varepsilon_i - \left(t + \alpha y_i - \beta x_i\right)\right) \cdot \left(x_i\right) = 0$$

Un tel système peut s'écrire sous forme matricielle.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{16} 1 & \sum_{i=1}^{16} y_i & -\sum_{i=1}^{16} x_i \\ \sum_{i=1}^{16} y_i & \sum_{i=1}^{16} y_i^2 & -\sum_{i=1}^{16} x_i y_i \\ -\sum_{i=1}^{16} x_i & -\sum_{i=1}^{16} x_i y_i & \sum_{i=1}^{16} x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{16} \varepsilon_i \\ \sum_{i=1}^{16} \varepsilon_i y_i \\ \beta \end{bmatrix}$$

Le paramétrage des positions x_i et y_i des capteurs est donné Figure 2 ci-dessous :



Figure 2 : Schéma de position des capteurs

| 16 | 0 | 0 | $\begin{bmatrix} t \end{bmatrix}$ | | $\sum_{i=1}^{16} \mathcal{E}_i$ |
|----|------|------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|
| 0 | 8000 | 0 | α | = | $\sum_{i=1}^{16} \varepsilon_i y_i$ |
| 0 | 0 | 8000 | β | | $-\sum_{i=1}^{16}\varepsilon_i x_i$ |

On obtient donc le système ci-dessus qui fournit les angles cherchés.

2 Calcul des déplacements de la plaque aluminium

La Figure 3 est le schéma de la position du laser et des 4 capteurs supplémentaires en millimètre.



Figure 3 : Représentation de positionnement du capteur et du piézo-électrique

En supposant que la plaque d'aluminium se comporte comme un corps solide en petits déplacements, on peut décrire son déplacement pour chaque point par l'équation comme cidessous.

$$z = f(x, y)$$

$$= t + \alpha y_i - \beta x_i$$

Où x_i, y_i sont les positions que l'on mesure

On peut écrire les relations entre 2 points :

Laser/capteur1 :
$$t_L = t_{C1} + \alpha (y_L - y_{C1}) - \beta (x_L - x_{C1})$$
 (1)

Laser/capteur2 :
$$t_L = t_{C2} + \alpha (y_L - y_{C2}) - \beta (x_L - x_{C2})$$
 (2)

Laser/capteur3 :
$$t_L = t_{C3} + \alpha (y_L - y_{C3}) - \beta (x_L - x_{C3})$$
 (3)

Laser/capteur4 :
$$t_L = t_{C4} + \alpha (y_L - y_{C4}) - \beta (x_L - x_{C4})$$
 (4)

Où t : la translation de la plaque d'aluminium selon l'axe Z

- α : la rotation de la plaque d'aluminium autour de l'axe X
- β : la rotation de la plaque d'aluminium autour de l'axe Y

Nous imposons l'origine du repère (0,0,0) au niveau du laser. L'axe Y est donc l'axe de symétrie entre C1 et C2 et par conséquent, on peut éliminer β pour déterminer α avec la somme des équations (1) et (2) :

(1)+(2) :
$$\alpha[i] = \frac{2t_L - (t_{C1} + t_{C2})}{-(y_{C1} + y_{C2})}$$
 (5)

(1)-(2) :
$$\beta[i] = \frac{t_{C1} - t_{C2}}{x_{C2} - x_{C1}}$$
 (6)

Contribution à l'étalonnage d'une machine à mesurer de très haute précision : mesure de rectitude et de planéité à un niveau d'incertitudes nanométriques

RESUME : L'objet de ce travail est de proposer une étude métrologique visant à la maîtrise d'incertitudes de l'ordre de ±10 nanomètres sur une rectitude de longueur 300mm mesurée avec un pas constant. Une extension permet d'appliquer cette méthode au cas de la planéité. Le plan ainsi étalonné est destiné à constituer la référence verticale d'une table croisée de haute exactitude développée par le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais. Une instrumentation basée sur une matrice carrée de 16 capteurs capacitifs distants de 20mm et une paire de niveaux électroniques a été développée. Les acquisitions sont réalisées avec un pas égal à la distance entre les capteurs. La redondance des mesures permet de séparer les défauts de mise en position du porte-capteur, les écarts de forme de l'élément à étalonner et les inconnues correspondantes à la connaissance des positions relatives des capteurs. La méthodologie proposée correspond à un processus dit de mesure par propagation. L'utilisation de l'hypothèse des petits déplacements conduit à la résolution d'un système linéaire surdéterminé. Nous montrons que le choix des unités des mesures provenant soit des indications des capteurs exprimées en unité de longueur soit des niveaux exprimés en unité d'angle a l'effet d'une pondération. C'est pourquoi nous mettons en œuvre une résolution au sens des moindres carrés pondérés. Nous étudions particulièrement les solutions dites extrêmes selon que les incertitudes des capteurs sont négligeables devant celles des niveaux ou réciproquement. Nous réalisons une étude métrologique du processus de mesure incluant la phase d'étalonnage sur la base d'un raccordement à un laser interférométrique. Nous simulons les incertitudes par une méthode de Monte-Carlo. Nous en déduisons deux méthodes conduisant à proposer une pondération optimale du système. Nous montrons une reproductibilité sur 10 acquisitions contenue dans une bande de ±5 nanomètres par rapport à la moyenne des profils mesurés.

Mots clés : métrologie, rectitude, planéité, incertitude, Monte-Carlo, nanomètre, séparation par propagation, raccordement

Contribution to the calibration of a measuring machine with very high accuracy: measure straightness and flatness at the nano-scale level of uncertainty

ABSTRACT : The aim of this work is to investigate and focuse on the measurement of straightness under uncertainty about ± 10 nanometers over a length of 300mm with a constant step. This study also has been extended to include the flatness study. The flat used for this study was designed and calibrated to utilize as the vertical reference for a high accuracy coordinate machine, which is developed by the Laboratoire National de Métrologie et d'Essais. The instrumentation has been developed into two main parts. The first part is a square matrix of 16 capacitive sensors 20mm apart. Moreover, the second part is a pair of electronic levels. The data acquisitions were examined by a step equal to the distance between the sensors. The redundancy of the measures specifically designed to separate the error motions of the scanning stage, the form deviation of the element was calibrated and the unknowns corresponding to the information of the relative sensors positions. The proposed methodology represents a process known as propagation by using the assumption of small displacement which leads to solving an overdetermined linear system. The measurements units have two mains categories: the indications of sensors given in length units and the levels given in angle radian have the effect of weighting units. Therefore the resolution in the sense of weighted least squares has been introduced. In addition, the extreme solutions have been considered according to the uncertainties of the sensors are negligible or that of levels. This metrological study of measurement process is including the traceability with a laser interferometer. The Monte-Carlo method has been introduced for uncertainty model in this research. There are utilize two methods propose for an optimal weighting system. The results shown a reproducibility of 10 acquisitions contained in ± 5 nanometers range compared to the average measured profiles.

Keywords : metrology, straightness, flatness, uncertainty, Monte-Carlo, nanometer, propagation process, traceability



