



HAL
open science

Nanométrie dimensionnelle dédiée aux déplacements de platines macroscopiques

Luc Chassagne

► **To cite this version:**

Luc Chassagne. Nanométrie dimensionnelle dédiée aux déplacements de platines macroscopiques. Autre. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2006. tel-00120736

HAL Id: tel-00120736

<https://theses.hal.science/tel-00120736>

Submitted on 18 Dec 2006

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.



**Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines
École doctorale Société du Futur
Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles**

**Mémoire pour l'obtention du diplôme d'habilitation à
diriger des recherches**

Luc CHASSAGNE

**Nanométrie dimensionnelle dédiée aux
déplacements de platines macroscopiques**

Soutenue le 28 novembre 2006

Jury

Yasser ALAYLI	PR – Université de Versailles Saint-Quentin – LISV – Tuteur
Noël DIMARCQ	DR – Observatoire de Paris – SYRTE – Rapporteur
Patrick MEYRUEIS	PR – ENSPS – Université de Strasbourg – Rapporteur
Bernard CRETIN	PR – Université de Besançon – FEMTO-ST – Rapporteur
Marc GAZALET	PR – Université de Valenciennes – IEMN
François PIERROT	DR – Université de Montpellier – LIRMM
Jacques VIENNET	PR – Université de Versailles Saint-Quentin – LISV

Remerciements

Je remercie vivement les membres du jury qui ont pris de leur temps et de leur énergie pour examiner mon travail en cette période toujours chargée.

Ce travail est le fruit de six ans à Versailles, je tiens particulièrement à remercier et à rendre hommage à Yasser ALAYLI et Suat TOPCU avec qui il a toujours été très agréable de travailler et sans qui tout ceci n'aurait pu être mené à bien. La complémentarité a permis de prendre beaucoup de plaisir chaque jour et des liens d'amitiés ont été créés. J'y associe Patrick JUNCAR à l'origine de beaucoup de chose également.

Bien sur je remercie les étudiants en thèse qui me subissent au jour le jour, mais j'espère toujours dans la bonne humeur.

Je remercie les autres membres du laboratoire, avec qui nous avons su construire des passerelles et des liens d'amitiés également. De même je remercie mes collègues du Département qui m'ont aidé dans mon enseignement et mes différentes charges.

Merci spécial à tous les autres.

TABLE DES MATIÈRES



UNIVERSITE DE VERSAILLES
SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES

INTRODUCTION	7
CHAPITRE 1	9
MISE EN PLACE DE LA THÉMATIQUE ET D'UNE STRUCTURE	9
1. ÉTAT INITIAL.....	9
2. PROBLÉMATIQUE POSÉE.....	11
3. MOYENS RÉUNIS	13
3.1. <i>Cadre de travail et structure du laboratoire</i>	13
3.2. <i>Activités contractuelles</i>	14
3.3. <i>Moyens humains</i>	15
CHAPITRE 2	17
CONTRÔLE NANOMÉTRIQUE D'UNE POSITION	17
1. MISE EN CONTEXTE.....	17
1.1. <i>Introduction et objectifs</i>	17
1.2. <i>Moyens mis en œuvre</i>	17
2. PRINCIPES DÉVELOPPÉS	18
2.1. <i>Choix de conception</i>	18
2.2. <i>Principe de la méthode de contrôle de position</i>	19
2.3. <i>Système double étage pour une grande course</i>	21
2.4. <i>Extension à un système double axes XY</i>	22
3. RÉSULTATS OBTENUS	24
3.1. <i>Conditions expérimentales</i>	24
3.2. <i>Mesure des sauts de position</i>	24
3.3. <i>Mesure sur la course piézoélectrique</i>	25
3.4. <i>Mesures de répétabilité de positionnement sur des courtes distances</i>	27
3.5. <i>Répétabilité sur des courses millimétriques</i>	29
4. CONCLUSION	30
4.1. <i>Résumé et bilan</i>	30
4.2. <i>Perspectives</i>	30

CHAPITRE 3	31
PLATINE PORTE-ÉCHANTILLON POUR LA MICROSCOPIE ET LA LITHOGRAPHIE.....	31
1. MISE EN CONTEXTE.....	31
1.1. <i>Spécificités et besoins de ces applications</i>	<i>31</i>
1.2. <i>État de l'art et objectifs.....</i>	<i>32</i>
1.3. <i>Système du LNIO et méthodes actuelles utilisées.....</i>	<i>34</i>
1.4. <i>Moyens mis en œuvre</i>	<i>36</i>
2. PROGRAMME DE TRAVAIL	37
2.1. <i>Platine porte-échantillons pour la microscopie à champ proche.....</i>	<i>37</i>
2.2. <i>Platine porte-échantillons pour la lithographie électronique.....</i>	<i>40</i>
2.3. <i>Nouvelle source optique intégrée pour l'interférométrie sous vide</i>	<i>41</i>
3. RÉSULTATS OBTENUS	43
3.1. <i>Première topographie de grande taille.....</i>	<i>43</i>
4. CONCLUSION	48
4.1. <i>Résumé et bilan</i>	<i>48</i>
4.2. <i>Perspectives</i>	<i>48</i>
CHAPITRE 4	50
CONTRÔLE D'UNE VITESSE	50
1. MISE EN CONTEXTE.....	50
1.1. <i>Contexte métrologique de la balance du watt.....</i>	<i>50</i>
1.2. <i>Divers projets en développement</i>	<i>52</i>
1.3. <i>Principe de la balance du watt.....</i>	<i>53</i>
1.4. <i>La balance du watt du Laboratoire National d'Essai.....</i>	<i>53</i>
1.5. <i>Problématique du déplacement et du contrôle de vitesse</i>	<i>56</i>
1.6. <i>Moyens mis en œuvre</i>	<i>57</i>
2. PRINCIPE DU CONTRÔLE DE LA VITESSE.....	58
2.1. <i>Principe issu du contrôle de position.....</i>	<i>58</i>
2.2. <i>Contrôle et mesure de la vitesse.....</i>	<i>58</i>
2.3. <i>Résultats obtenus pour un miroir mobile horizontal.....</i>	<i>60</i>
2.4. <i>Extension à une masse en déplacement vertical</i>	<i>61</i>
2.5. <i>Mise en application sur le prototype de la balance</i>	<i>62</i>
2.6. <i>Bilan métrologique.....</i>	<i>63</i>
2.7. <i>Application à la mesure d'une longueur d'onde.....</i>	<i>63</i>
3. CONCLUSION	65
3.1. <i>Résumé et bilan</i>	<i>65</i>
3.2. <i>Perspectives</i>	<i>65</i>
CHAPITRE 5	66
SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES.....	66
CONCLUSION	68

BIBLIOGRAPHIE.....	69
ANNEXES	75
1. CURRICULUM VITAE.....	75
2. ACTIVITÉS D’ENSEIGNEMENT.....	77
3. PUBLICATIONS	78
4. ANNEXES SCIENTIFIQUES	84
4.1. <i>Alignement du système double axe XY (Chapitre 2)</i>	<i>84</i>
4.2. <i>Nouvelle source optique (Chapitre 3)</i>	<i>85</i>
4.3. <i>Principe de la balance du watt (Chapitre 4).....</i>	<i>87</i>
4.4. <i>Réglage d’alignement et mesure de longueur d’onde (Chapitre 4)</i>	<i>90</i>
5. COPIES D’ARTICLES	92

INTRODUCTION

Ce document présente mes activités de recherche depuis mon arrivée à l'Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines (UVSQ). J'ai été recruté en septembre 2000 à l'UFR des Sciences de Versailles en tant que Maître de Conférences (thèse soutenue en janvier 2000 au Laboratoire de l'Horloge Atomique à Orsay).

Lors de mon arrivée en septembre 2000, il n'y avait pas réellement de laboratoire d'accueil. Le Professeur Yasser ALAYLI avait été recruté l'année précédente afin de monter une filière d'enseignement Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur (STPI) depuis le DEUG jusqu'à la cinquième année et en parallèle un laboratoire de physique orientée technologie. En septembre 2000, seule la première année avait fonctionné l'année précédente et le LIRIS (Laboratoire d'Instrumentation et de Relation Individu Systèmes) n'était pas né. Mon recrutement avait pour but de renforcer la mise en œuvre de ces deux projets ambitieux. J'ai consacré mes premières années de recherche à la mise en place, avec d'autres collègues, de l'actuelle structure du LIRIS en parallèle de l'ensemble de la filière second cycle STPI. Avant de pouvoir bénéficier d'une structure propice à un travail expérimental tel que l'exige la métrologie, cela a nécessité un important labeur et beaucoup d'énergie pour la mise en place des moyens, tant au niveau des locaux, des financements, que des recherches de partenaires. Ce travail s'est accompagné d'une réflexion sur les thématiques du laboratoire en gestation. Le LIRIS a fortement évolué au cours de ces années, et est devenu une partie d'un plus grand laboratoire en 2006, le LISV (Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles). De même, la filière d'enseignement a subi la réforme LMD et a nécessité de nombreuses évolutions.

Ceci m'a conduit à adopter la forme du présent mémoire. Il m'a paru important de consacrer un **premier chapitre** à la **mise en place d'une structure nécessaire** aux recherches en métrologie dimensionnelle qui fait l'objet actuellement d'un des axes de recherches du LISV. J'y présente l'état initial de mes activités à l'UVSQ en situant le contexte, et notamment le **développement** parallèle **du laboratoire**. Pour cela, j'étudie les **problématiques** posées, les **moyens** mis en œuvre, les **activités contractuelles** et l'**évolution scientifique** de l'ensemble.

J'ai ensuite opté pour trois chapitres qui permettent de détailler scientifiquement mes activités. Le **second chapitre** explique les choix scientifiques, les solutions et les techniques originales développées au laboratoire. J'y ai condensé des **travaux qui sont ensuite à la base** de deux champs d'actions plus particuliers qui sont développés aux chapitres 3 et 4. Ces deux champs d'actions m'ont paru très illustratifs et riches d'enseignements sur ce qui a été monté au laboratoire pendant ces années. Tout au long de ces deux chapitres, j'essaie de mettre en avant les problématiques ainsi que les **résultats et acquis scientifiques** inhérents à cette thématique.

Le **troisième chapitre** concerne le développement de platines porte-échantillons pour des applications de microscopie en champs proches et de lithographie.

Le **quatrième chapitre** concerne la balance du watt et le contrôle en position et en vitesse avec une grande exactitude d'une masse mobile à une vitesse uniforme.

La structure de ces chapitres sera uniforme : un premier paragraphe permet de situer les **particularités** et le **contexte** des thèmes abordés. Un second paragraphe met l'accent sur les **moyens** ; un troisième paragraphe donne quelques détails scientifiques pour expliquer **les méthodes mises en œuvre** et les **résultats obtenus les plus significatifs**. S'agissant d'un travail de métrologie, les résultats expérimentaux sont nombreux. La plupart apparaissent dans les articles publiés, je n'ai choisi ici que les plus explicatifs où ceux étant aujourd'hui uniquement soumis mais non publiés pour des raisons de délais ; un quatrième paragraphe permet de résumer, de conclure et d'examiner les **perspectives**.

Un **cinquième** et dernier chapitre fait un **bilan** et une **synthèse** de ces 6 années pour positionner le travail effectué et surtout les **perspectives** d'avenir à court, moyen et long terme.

Enfin une conclusion termine ce mémoire.

CHAPITRE 1

MISE EN PLACE DE LA THÉMATIQUE ET D'UNE STRUCTURE

Ce chapitre a pour objectif de montrer la démarche qui a abouti à la forme actuelle de l'équipe **Capteurs Instrumentation et Métrologie** du LISV en passant par les **multiples étapes** intermédiaires. J'ai opté pour une présentation mélangeant chronologie et analyse des réflexions sur la thématique de recherche, afin de mettre l'évolution en valeur. Il s'agit bien évidemment d'un travail d'équipe auquel j'ai très fortement contribué.

Je ferai également allusion au montage de la filière d'enseignement Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur (STPI) car celle-ci a été pensée simultanément et en lien étroit avec les thématiques de recherche. ***Il me paraît donc fondamental de souligner les interactions entre les deux et de ne pas négliger les points forts communs.***

1. ÉTAT INITIAL

À mon arrivée à l'UVSQ en septembre 2000, la volonté de créer une filière d'enseignement en Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur (STPI), accouplée à un laboratoire de recherche ayant ses thématiques dans le domaine SPI avait été affichée depuis un an. Une filière STPI avait ouvert sa première année (BAC + 1 uniquement) en 1999. Les programmes d'enseignement avaient été prévus pour le diplôme du DEUG. Le laboratoire SPI était encore virtuel.

La **spécificité** du programme de Deug STPI de l'UVSQ résidait dans un **couplage** fort entre deux parties dominantes des sciences pour l'ingénieur que sont la **mécanique et le E.E.A.** (Électronique – Électrotechnique – Automatique) au sens large. Il était planifié de faire émerger aux travers de la cohérence des modules proposés le concept de **système de précision, c'est-à-dire un système alliant mécanique, électronique, informatique de contrôle et capteurs**, afin de concevoir des systèmes complets dits « *de précision* ».

J'insère ici un extrait du texte du projet initial qui a été ensuite la pierre angulaire d'une bonne partie des développements du laboratoire par la suite :

Le projet de création de laboratoire de recherche est centré sur la thématique de l'ingénierie des systèmes complexes de précision. (...)

*Cette thématique présente l'originalité de vouloir rassembler des enseignants-chercheurs de plusieurs disciplines, ce qui permet de couvrir un large champ thématique et d'avoir une approche système. L'objectif de l'équipe est donc de rassembler et développer des compétences multidisciplinaires susceptibles de permettre la conception et la gestion en temps réel de systèmes complexes de hautes performances dont les dimensions sont centimétriques mais dont les éléments constitutifs sont millimétriques voire micrométriques, nous l'appellerons par la suite **mini-machine**. Les mini-machines d'exactitude nanométrique correspondent à un besoin qui émerge rapidement pour la microfabrication (laser, électroérosion, outil de coupe), la micromanipulation, l'implantation de composants électroniques sur wafer, l'assemblage de microsystèmes ou de fibres optiques et la caractérisation de l'état de surface des matériaux, avec des étendues de déplacement de plusieurs mm à plusieurs cm.(...)*

*La mini-machine ouvre alors la voie à des travaux de recherche avec l'objectif de commander les mouvements pour tendre vers une exactitude de 10 nm. Ceci implique des recherches et travaux expérimentaux sur **la métrologie absolue des déplacements dans l'air** (physique, optique), la*

*caractérisation dynamique (bruit de machines, phénomènes vibratoires), la commande numérique de haute résolution (gestion temps réel), la **métrologie in-situ** et différée des surfaces fabriquées (métrologie de surfaces) et la **compensation active** (mathématiques appliquées). (...)*
L'élévation croissante des performances et des moyens d'investigation amène à considérer des phénomènes de plus en plus fins. A ceci s'ajoute le constat international que, depuis le début du siècle, la performance des plateformes porte-outils ou porte-échantillons, qui ne sont que des systèmes mécatroniques, en terme du rapport course/résolution gagne un facteur 5 à 10 tous les 10 ans.

Si j'ai tenu à insérer ce texte, c'est pour montrer plusieurs points qui ont servi à une base de réflexion par la suite :

- ✓ la **position et la volonté scientifique** de créer un laboratoire couplé à une formation en sciences pour l'ingénieur ; en **1999 il n'y avait rien**, mais l'appui de l'UFR des Sciences a permis d'arriver au point actuel où l'équipe du LISV concernée est reconnue nationalement, voire internationalement dans le cas de la balance du watt. Cela peut paraître une évidence, mais je pense qu'il est parfois nécessaire de le rappeler ; l'appui clair et ferme d'une tutelle permet d'opérer dans des délais raisonnables,
- ✓ le projet initial met en avant la nécessité naissante de réaliser des **systèmes de précision** capables d'agir sur des courses macroscopiques, c'est-à-dire millimétriques voire centimétriques, avec des résolutions et des exactitudes nanométriques. En métrologie, le terme *précision* est impropre car trop vague. Les différences de vocabulaire spécifique en métrologie, telles résolution, exactitude, répétabilité sont parfois confuses pour le profane et le non spécialiste. J'ai essayé de construire ce document pour assurer une clarté, d'une part pour un métrologue, mais également et surtout pour un non métrologue pour qui la caractérisation métrologique d'un instrument n'est pas l'activité principale mais pour qui l'utilisation courante d'appareils performants le sensibilise à cette problématique,
- ✓ les systèmes dits *de précision* font appel à des champs de connaissance très divers ; être performant et compétitif demande donc des **compétences multi-domaines**. Je tiens donc à souligner que si l'équipe CIM (Capteurs Instrumentation et Mesures) du laboratoire a su devenir rapidement active c'est grâce à la **complémentarité** parfaite des enseignants-chercheurs la constituant. J'appuie notamment sur la complémentarité indispensable entre l'optique et l'électronique. On peut toutefois signaler l'absence de personnel technique au sein du LIRIS qui nous pénalise aujourd'hui que les expériences nécessitent un **entretien permanent**,
- ✓ cette complémentarité n'est valable que si les enseignants-chercheurs sont à même de pouvoir travailler dans de bonnes conditions. Je tiens à souligner ici, à la fois en forme d'hommage, mais également sous forme d'une réflexion et d'une synthèse quand au rôle du Directeur Yasser ALAYLI qui a su mener et diriger cette équipe avec conviction malgré ses nombreuses charges. Il a su à la fois donner les impulsions motrices, tout en permettant une grande liberté quand aux choix scientifiques en n'imposant que très rarement certaines orientations. Il a toujours été ouvert à toutes les propositions tout en resituant toujours les problématiques dans leur contexte. Ceci m'a je pense beaucoup appris sur **certains aspects pour ensuite mener à bien la progression de mes recherches**.

2. PROBLÉMATIQUE POSÉE

Le texte du projet initial permet de souligner la problématique scientifique initiale. L'étude des différents projets mondiaux en 2000 concernant les systèmes de déplacements fait apparaître une lacune cruciale : « *grande* » course de déplacement et « *précision* » de déplacement sont incompatibles. **On entend par « grande » course, une course de plusieurs centaines de micromètres voire de quelques millimètres. On entend par « précision », une exactitude et une répétabilité de positionnement de l'ordre du nanomètre.**

De plus en plus, l'émergence des nanotechnologies fait appel à des systèmes nécessitant des déplacements millimétriques, voire centimétriques, avec des exactitudes de positionnement nanométriques. Les domaines de recherche ou applicatifs des nanotechnologies sont extrêmement nombreux, et au laboratoire LISV nous ne prétendons que se préoccuper de ce que l'on appelle communément la **nanométrie**, c'est-à-dire la science de la mesure lorsque le dimensionnement devient de l'ordre de grandeur du nanomètre. Cela peut être, soit dans des systèmes de mesures où la résolution nanométrique existe depuis déjà de nombreuses années mais où l'exactitude n'est pas toujours assurée, soit dans des systèmes de contrôle et de fabrication où le positionnement mécanique est sujet à des défauts qui ne sont pas toujours contrôlables en temps réel. Les limitations peuvent être environnementales, purement mécaniques, ou bien des compromis entre les temps de mesures et l'exactitude nécessaire.

En effet, on peut souligner un paramètre parfois sous-entendu mais fondamental qu'est le temps de mesure. Effectuer une mesure fine est parfois possible, mais au détriment d'un temps de mesure, en règle générale lié à un temps d'intégration, qui devient très long et donc rédhibitoire selon l'application.

Les champs applicatifs sont multiples, il est hors de question de les mentionner tous. Il est souvent cité le domaine de la microélectronique qui de part ses nombreuses voies et son évolution permanente est l'illustration parfaite des besoins en métrologie dimensionnelle [1]. On peut toutefois faire émerger quelques exemples pour essayer de dégager des caractéristiques et des points communs : machine d'usinage de précision (usinage diamant par exemple, polissage) ; instruments de mesures complexes (AFM, microscopes, ...) ; machine de fabrication en nanotechnologies : machine d'insolation/exposition, etc.

On peut y trouver les points communs suivants et y injecter des volontés métrologiques supplémentaires :

- ✓ Positionner un objet macroscopique ou microscopique d'une manière précise,
- ✓ Mesurer sa position finement,
- ✓ Contrôler la position statique par rapport à un zéro absolu,
- ✓ Contrôler la trajectoire ou le déplacement en dynamique (quelques hertz),
- ✓ Assurer la répétabilité du processus,
- ✓ Assurer la traçabilité par rapport au Mètre étalon.

Pour cela, il est indispensable d'associer :

- ✓ Un capteur performant. Aujourd'hui, deux familles de capteurs peuvent atteindre des performances nanométriques : les capteurs capacitif ou inductif, qui peuvent avoir une résolution sub-nanométrique mais qui nécessitent des calibrations régulières ; les capteurs optiques qui permettent là aussi d'obtenir des résolutions sub-nanométriques, avec une très bonne répétabilité et même la traçabilité dans le cas de l'interférométrie. Le début du chapitre suivant récapitule les choix que nous avons effectués.
- ✓ Un système mécanique de précision capable de se déplacer en ayant une bonne connaissance de ses défauts a priori, au moins à l'échelle du micromètre, voire de quelques centaines de nanomètres. Là aussi, les technologies sont multiples, on peut toutefois dissocier les actionneurs grandes courses (éléments motorisés avec guidage) et les actionneurs nanométriques (céramiques piézoélectriques, éléments inductifs ou magnétostrictifs, ...). Nous verrons dans le chapitre suivant que nous avons opté pour un système double étage où un étage fin compense en temps réel les défauts d'un étage assurant la grande course.
- ✓ Selon le type d'application, des lois de commandes complexes peuvent être indispensables. Sur certaines machines, le positionnement et le suivi de trajectoire peut conduire à des bandes passantes de contrôle assez importantes.

La combinaison de ces trois points : capteurs, mécanique de déplacements et contrôle du système conduit à ce que l'on appelle **un système de précision**.

En termes de chiffres, nous verrons par la suite que la plupart des applications visées peuvent se satisfaire d'une grande course de quelques millimètres et d'une répétabilité de positionnement de quelques nanomètres.

3. MOYENS RÉUNIS

3.1. Cadre de travail et structure du laboratoire

Lorsque je suis arrivé en septembre 2000, nous n'étions que deux spécialistes des capteurs et de la métrologie. Nous n'avions à l'époque pas de salle dédiée afin de monter une expérience et seul un BQR (Bonus Qualité recherche, financement UFR de Versailles) permettait d'envisager l'achat d'un peu de matériel. Je distinguerai plusieurs phases qui ont permis la montée de l'équipe CIM (Capteurs, Instrumentation et Métrologie) actuelle :

✓ Phase 1 : établissement initial

En 2000, il n'y avait rien pour mener à bien une activité de recherche appliquée. J'ai alors passé un contrat de prestation avec mon ancien laboratoire de thèse sur ma spécialité de l'époque (horloge atomique). Ceci m'a permis de continuer pendant un an des activités en temps-fréquence sur un avenant à un contrat CNES. Le travail concernait l'amélioration des performances d'un système de pompage optique par l'utilisation de nouvelles diodes laser. L'intérêt a été double : amener une manne financière (26 k€) qui a permis l'achat de matériel et pouvoir en parallèle négocier auprès de l'UFR des locaux. Courant 2001, une salle nous a été allouée que nous avons pu aménager au fur et à mesure (récupération de matériel, par exemple table de marbre issus du LHA et prêt de matériel de l'Institut National de Métrologie).

✓ Phase 2 : création d'une équipe de recherche CISTEC

En parallèle, à partir du printemps 2001, des discussions avec d'autres enseignants-chercheurs issus d'un laboratoire de robotique (LRP – Laboratoire de Robotique de Paris) ont amené un projet de création d'une équipe de recherche. Les discussions ont été parfois difficiles car le contexte apportait des chercheurs d'horizons assez variés. Néanmoins, une cohérence avait pu être trouvée. Cela a abouti à la proposition de création de l'équipe de recherche CISTEC (Centre d'Ingénierie des Systèmes TEchnologiques). Cette équipe a généré des débuts de collaboration thématique et a permis l'établissement clair d'une partie *Instrumentation et Capteurs* dans les locaux de Versailles, la partie robotique ayant quand à elle des locaux sur Vélizy. Malheureusement, le regroupement géographique n'a jamais pu se faire depuis cette époque pour des raisons de manque de locaux sur Versailles. Ceci a nuit au développement complet du LIRIS et encore du LISV (trois sites actuels : Versailles, Vélizy et Mantes).

✓ Phase 3 : création du LIRIS – FRE CNRS

En 2002, l'équipe CISTEC avait suffisamment de solidité pour être reconnue FRE au CNRS, section STIC, sous le nom de LIRIS (Laboratoire d'Instrumentation et de Relations Individu Système - printemps 2002, rétrospectivement janvier 2002). On pouvait alors distinguer une partie robotique à Vélizy et une partie Métrologie à Versailles (arrivée d'un MCF en septembre 2002 pour renforcer cet axe).

Sans rentrer dans tous les détails, le LIRIS s'est fortement développé mais s'est vu retiré son association CNRS en 2005 suite à la restructuration du CNRS et de plusieurs laboratoires sur Versailles, considérés comme trop petits (15 permanents pour le LIRIS). L'implantation de

l'équipe Métrologie sur Versailles a eu le temps de se faire avec notamment des activités contractuelles et l'arrivée d'étudiants doctorants qui sont précisés un peu plus loin dans ce mémoire.

✓ *Phase 4 : création du LISV : regroupement de trois laboratoires*

Fin 2005, les tutelles ont exigé le regroupement des trois laboratoires : le LIRIS, le LEMA (laboratoire de mécanique) et le LRV (laboratoire de robotique et de mécatronique, issu lui aussi de l'éclatement initial du LRP). Au sein de ce nouveau laboratoire né en janvier 2006, 6 équipes ont été formées, et notamment l'équipe Capteurs Instrumentations et Métrologie (qui regroupe maintenant 3 PR et 3 MCF).

3.2. Activités contractuelles

Nos activités sont fortement orientées vers la physique appliquée, et les expériences de métrologie sont gourmandes en moyens financiers. Il est donc important à mes yeux de dégager ici l'aspect contractuel qui demande un **effort constant et assidu**.

Au cours de mes six années en tant que MCF, j'ai largement participé à l'élaboration des contrats ou des conventions que je cite ici par ordre chronologique en précisant mon rôle à chaque fois :

- ✓ Responsable d'un contrat de prestation entre l'Université de Versailles et le DANOF-SYRTE à l'Observatoire de Paris, (avenant au contrat d'étude n° CNES 714/CNES/98/7477/00) ; non détaillé ici, comme il a été dit plus avant, cela m'a permis de continuer des activités de recherche pendant la première année transitoire à l'UVSQ d'une part, et d'autre part de pouvoir commencer à équiper le laboratoire naissant en appareils de mesures coûteux (multimètre, FFT, instrumentation optique).
- ✓ **Coordinateur d'une Action Concertée Incitative (ACI) 2003** en programme Nanosciences (Réf : NNPI-1 décembre 2003 – décembre 2006). Il s'agit d'une ACI dite « soutien à projet intégré » « *visant à lever des verrous technologiques, prévus à échéance de 7 à 10 ans* ».
Titre : *Mesure et contrôle sub-nanométrique d'un déplacement de grande course (Nano2m3)*.
Les travaux sont effectués pour l'essentiel en collaboration avec le LNIO de l'UTT (Laboratoire de Nanotechnologie et d'Instrumentation Optique de l'Université de Technologie de Troyes) et font l'objet d'une description détaillée au chapitre 3.
- ✓ Au cours de ces six années, des liens très forts ont été tissés avec le Bureau National de Métrologie (BNM), l'Institut National de Métrologie (BNM-INM au CNAM) et le LNE (Laboratoire National d'Essai), le tout étant maintenant regroupé au sein du LNE (Laboratoire National de métrologie et d'Essai).
Différentes conventions de collaboration ont vu le jour : *a)* convention avec le CNAM et l'INM qui a permis d'assurer le démarrage de nos activités dès fin 2001 par le prêt de matériel et une forte implication du professeur Patrick JUNCAR de l'équipe de métrologie dimensionnelle ; *b)* convention de collaboration avec le LNE qui a permis

des travaux communs sur le projet balance du watt ou le LIRIS a été moteur sur la partie positionnement (voir chapitre 4). Cette convention a été récemment (2006) étendue à d'autres activités que la balance du watt (travaux sur le refroidissement de l'atome d'argent et sur l'étude d'un AFM – Atomic Force Microscope – métrologique). La partie collaborative qui concerne la microscopie en champ proche permettra notamment de rapprocher les résultats obtenus au cours de l'ACI au LIRIS et l'équipe Nanométrie du LNE.

- ✓ Un financement Sésame (Ile de France) en 2004 a permis l'achat d'un microscope à champ proche Pacific Nanotechnology en 2005.
- ✓ Dans le cadre de la thèse en co-direction de Suan XU démarrée en septembre 2005, une collaboration avec l'université de Jiliang (Hangzhou – Chine) se met en place. L'université de Jiliang est une université entièrement dédiée à la métrologie ; le laboratoire du professeur Donsheng LI est responsable d'un laboratoire naissant dans le domaine des platines de translation de précision.

3.3. Moyens humains

L'installation de la salle d'expérimentation de l'équipe Métrologie courant 2002 a permis d'accueillir des étudiants en thèse. En ce qui me concerne, j'ai encadré ou j'encadre actuellement :

- ✓ Darine HADDAD dont la thèse avait pour sujet *Mesure et contrôle de position et de vitesse à l'échelle nanométrique : application à la balance du watt*.
Thèse **soutenue** le 15 décembre 2004, jury : Y. Alayli, P. Juncar, A. Razek, P. Royer, R. Thalmann, L. Chassagne, G. Genevès). D. HADDAD est actuellement en contrat post-doctoral au LNE.
- ✓ Marwan WAKIM qui a pris la suite de D. HADDAD (suite à son stage de DEA en collaboration avec l'université libanaise) sur la thématique de déplacement de la partie mobile de la balance. M. WAKIM est en **contrat CIFRE** avec le LNE. Il a **démarré** sa thèse en septembre 2004 et je suis son encadrant principal.
- ✓ Suan XU qui est une étudiante ayant effectué son stage de Master recherche en 2005 au laboratoire. Elle a **commencé** une thèse en **co-direction** avec un professeur de l'Université de Jiliang (Université de métrologie à Hangzhou – Chine). Elle a effectué sa première année en Chine et vient de revenir en septembre 2006 pour effectuer ses deux dernières années au LISV. Je suis son encadrant principal et sa thématique concerne l'étude du positionnement et de la mesure nettement inférieure au nanomètre dans des systèmes de très haute précision.
- ✓ Dans le cadre de l'ACI, j'encadre en partie Ahmad SINNO, issu de la promotion 2004-2005 du master CSER (Capteurs, Système Electroniques et Robotiques) du

parcours SPI sur Versailles. Il a initié sa thèse en septembre 2005 avec P. RUAUX sur la thématique du contrôle du positionnement d'une platine porte-échantillon pour des applications en microscopie et en lithographie. J'ai eu l'occasion pendant sa première année de l'encadrer en tant que coordinateur de projet.

Dans une moindre mesure, j'ai l'occasion d'aider Karim OUEDRAOGO (sur les parties électronique d'asservissement) qui effectue une thèse en optique sur un inclinomètre absolu. Un nouveau doctorant (Benoît POYET) issu de la promotion 2005-2006 du master CSER a commencé sa thèse en convention CIFRE avec le LNE sur la thématique d'AFM métrologique ce qui devrait renforcer les liens LNE – LISV.

J'ai eu l'occasion également d'encadrer des stagiaires d'école d'ingénieur ainsi que des étudiants de master et de licence que je ne citerai pas tous.

Je tiens particulièrement ici à souligner la complémentarité déjà évoquée sur la mise en place d'un laboratoire de recherche **ET** d'une filière d'enseignement accouplée qui permet au bout de cinq années d'efforts de voir émerger des étudiants continuant leur cursus en thèse (c'est le cas de B. POYET qui a suivi l'ensemble de sa formation sur l'UVSQ).

CHAPITRE 2

CONTRÔLE NANOMÉTRIQUE D'UNE POSITION

1. MISE EN CONTEXTE

1.1. Introduction et objectifs

Les travaux présentés ci-dessous représentent la base de nombreuses applications qui ont vu le jour au LIRIS. J'ai choisi d'isoler quelques points dans ce chapitre pour bien expliquer la méthode originale développée et qui sert ensuite aux chapitres 3 et 4. Certains résultats et problèmes importants sont mis en valeur mais il ne s'agit en aucun cas d'une description exhaustive. Pour de plus amples détails on se reportera aux copies d'articles à la fin de ce mémoire. Ces travaux ont vu le jour suite à des pré-études sur l'interférométrie hétérodyne et la mise en fonction de la partie électronique haute fréquence et asservissement de phase qui est plus particulièrement ma spécialité, ceci historiquement dans un premier temps dans le cadre de la balance du watt (voir chapitre 4).

Les objectifs sont de pouvoir disposer d'un système combinant mécanique de précision, et positionnement nanométrique répétable et traçable sur des distances considérées comme très grandes par rapport à la résolution de positionnement. Ce système doit pouvoir être assez souple pour s'adapter à différents appareils et machines.

1.2. Moyens mis en œuvre

Ce chapitre me permet de regrouper la base technique afin d'introduire les chapitre suivants, ces travaux ont été menés à la fois dans le contexte des conventions BNM-LNE et de l'ACI nanosciences (voir *Moyens mis en œuvre* des chapitres 3 et 4).

Les expérimentations ont été réalisées dans les locaux de Versailles à partir du moment où nous avons pu disposer d'une salle d'expérimentation ce qui a nécessité d'importants efforts comme expliqué au chapitre 1. C'est pourquoi j'ai aussi tenu à les différencier, car ils ont été menés pour la plupart dans une période transitoire où l'installation du LIRIS naissant était encore sujet à de nombreux efforts administratifs, techniques et de communication, notamment pour réunir le matériel coûteux et pour équiper correctement la salle d'expérience en appareil d'instrumentation et de métrologie.

Le travail concernant la partie interférométrique était inclus dans les travaux de thèse de Darine HADDAD. Le travail concernant la platine double axe a été plus spécifiquement effectué par Marwan WAKIM et pour partie par Suan XU lors de son stage de master et son début de thèse.

2. PRINCIPES DÉVELOPPÉS

2.1. *Choix de conception*

Pour atteindre le niveau de performances souhaité, et notamment de répétabilité, il est indispensable de fonctionner en boucle fermée. Le système complet doit comporter un capteur et un actionneur avec une boucle de réaction.

Pour l'**actionneur**, actuellement, aucun système commercial ou en phase de prototype dans les laboratoires n'est capable d'assurer un tel niveau de précision à cause essentiellement des problèmes de mécanique de guidage qui ne peuvent satisfaire la grande course avec des performances nanométriques en rectitude. Les meilleurs systèmes ont des défauts de quelques centaines de nanomètres au mieux sur des courses millimétriques [2][3][4]. Il est préférable d'avoir un système à double-étage composé d'un étage « grossier » avec une grande course, et d'un étage « fin » avec une faible course mais bénéficiant d'une très bonne résolution de positionnement. Le système « grossier » est une platine de translation mécanique composée d'un actionneur, de type moteur par exemple, et d'un système de guidage. Le système « fin » est typiquement une céramique piézoélectrique avec une course de l'ordre de quelques dizaines de micromètres et avec une sensibilité en positionnement nanométrique voire sub-nanométrique. Les deux étages fonctionnent en même temps. L'étage « fin » rattrape les défauts de l'étage « grossier » en permanence. Ce principe est évidemment conditionné par le fait que les défauts de l'étage « grossier » soient nettement inférieurs à la course de l'étage « fin ». Les qualités de guidage des moteurs que l'on peut trouver actuellement sur le marché assurent des défauts de rectitude de quelques micromètres sur des courses millimétriques ce qui est tout à fait compatible avec les courses des actionneurs piézoélectriques.

Il existe très peu de systèmes commerciaux de positionnement et de déplacement à deux étages. Les caractéristiques de ces systèmes sont assez limitées, avec des répétabilités de l'ordre de la centaine de nanomètres et des exactitudes encore moins bonnes. Les actionneurs piézoélectriques ont des bandes passantes limitées, typiquement quelques hertz.

Le rôle du **capteur** est fondamental ; son exactitude peut limiter les performances de l'ensemble. Au niveau nanométrique, on peut distinguer trois grandes familles : les capteurs interférométriques, les capteurs optiques du type règle-codeur et enfin les capteurs à effet capacitif ou inductif. Les résolutions de chacun d'entre eux peuvent être nettement inférieures au nanomètre, les codeurs optiques pouvant même atteindre l'angström [5]. Toutefois, le seul capteur qui a des vertus intrinsèques d'exactitude et de traçabilité reste l'interféromètre. C'est pourquoi cette solution a été choisie.

Les **interféromètres** commerciaux peuvent avoir des résolutions sub-nanométriques avec des temps d'intégration assez courts ce qui autorise des bandes passantes d'asservissement intéressantes. Dans l'ensemble des interféromètres existants, les interféromètres fibrés présentent l'intérêt d'être compacts et très intégrables, mais les performances sont dégradées par rapport à des appareils en optique libre. On peut concevoir un compromis entre fibre optique qui déporte la mesure et référence externe à condition de choisir précautionneusement ses fibres, toutefois, pour atteindre des performances nanométriques, la référence est classiquement externe [6]. Ceci nous a orienté plutôt vers une solution en optique libre dans un premier temps.

Dans cette gamme, deux principes sont en concurrence : l'interférométrie homodyne qui présente moins de défauts de linéarité mais une résolution souvent limitée (défaut classique du principe sinus-cosinus), et l'interférométrie hétérodyne ayant une meilleure résolution (à temps de mesure comparable) mais des erreurs de non-linéarités plus fortes. Nous avons opté pour ce second principe car la fréquence d'hétérodynage nous intéresse pour une raison très particulière qui sera développée par la suite. L'information de la position est contenue dans la phase du signal d'hétérodynage en sortie de l'interféromètre. Pour les interféromètres commerciaux, la fréquence hétérodyne utilisée est de l'ordre de plusieurs mégahertz. La comparaison en phase du signal de sortie avec le signal de référence à la fréquence hétérodyne permet de mesurer la position.

→ **Le principe d'asservissement de la phase de ce signal de sortie sur la phase d'un signal électronique permet alors d'asservir la position du miroir mobile.**

On trouve ainsi un intérêt particulier à l'interférométrie hétérodyne car la maîtrise de la phase d'un signal radio fréquence peut se faire par des méthodes bien connues en métrologie temps-fréquence, ce qui assure la pérennité et une excellente stabilité long terme.

2.2. Principe de la méthode de contrôle de position

Le schéma de principe du contrôle de position est illustré Figure 1. Des détails pourront être trouvés dans [P5]. Lorsque le miroir mobile composant l'interféromètre de Michelson en simple passage se déplace d'une distance de $\lambda/2$ (respectivement $\lambda/4$ pour un interféromètre double passage), la différence de phase entre les faisceaux optiques de mesure et de référence varie de 2π . Le principe de notre méthode consiste à contrôler la différence de phase entre les deux faisceaux et donc la position du miroir mobile. Par soucis de simplicité, nous considérons que l'indice de réfraction de l'air est constant et nous posons $n = 1$.

Soit un circuit électronique permettant de générer deux signaux S_1 et S_2 synchronisés et de même fréquence Δf . Ce circuit a la capacité de générer un décalage de phase sur l'un des signaux par rapport à l'autre. Le signal S_1 est envoyé vers l'oscillateur alimentant le modulateur acousto-optique qui permet la génération des deux faisceaux optiques nécessaires à l'interférométrie hétérodyne. Le signal S_2 est envoyé vers un comparateur de phase situé à la sortie de l'interféromètre. Le mélangeur compare le signal S_2 et le signal S_3 résultant de l'interférence des deux faisceaux optiques après passage dans l'interféromètre. Le signal S_3 contient l'information sur la position du miroir mobile. Le signal d'erreur ε résultant de la comparaison est envoyé vers un actionneur supportant le miroir mobile. Une boucle d'asservissement permet de contrôler la position du miroir en fonction du signal d'erreur ε .

Supposons que la boucle d'asservissement soit fermée. Si le miroir mobile vient à se déplacer à cause d'un élément perturbateur tel que par exemple une vibration mécanique, le signal S_3 subit un décalage de phase dû à l'effet Doppler engendré par le déplacement. Le déphasage entre S_2 et S_3 évolue. Le signal d'erreur ε devenant non nul, la boucle d'asservissement agit sur l'actionneur pour ramener le miroir à sa position initiale. Nous avons ainsi réalisé un asservissement en position du miroir mobile de l'interféromètre.

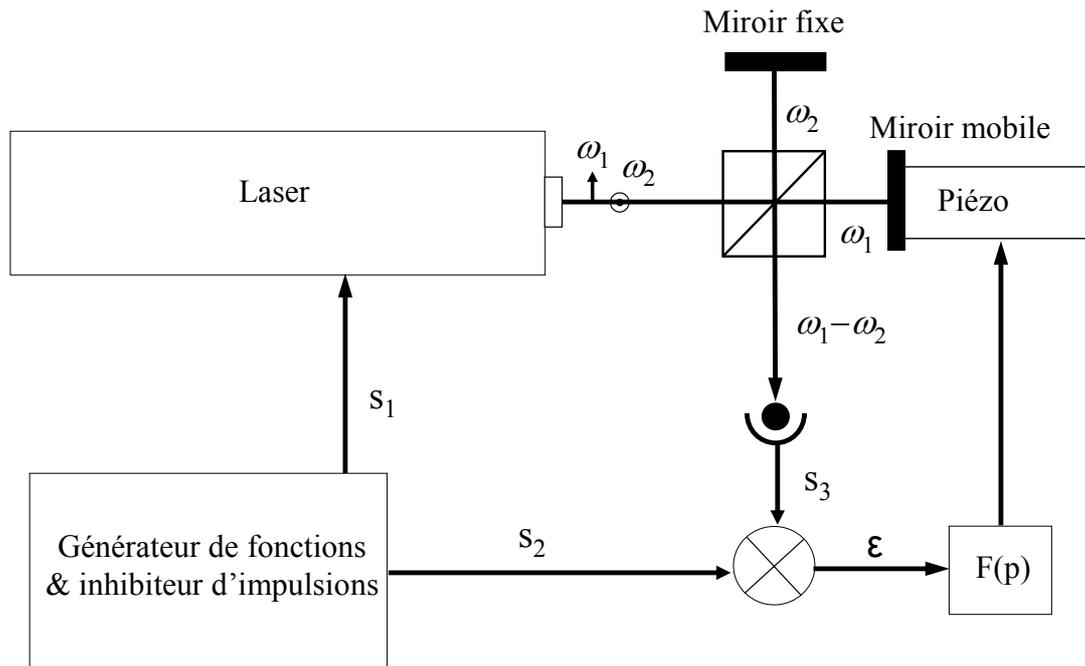


Figure 1 : Principe de l'asservissement en position

Supposons maintenant qu'une différence de phase $\Delta\phi$ entre les signaux S_1 et S_2 soit induite à la sortie du générateur de fonctions telle que $\Delta\phi = \phi_{S_1} - \phi_{S_2}$ soit positive ou négative. Là aussi, le signal ε devient non nul et la boucle d'asservissement agit sur l'actionneur de manière à compenser cette différence de phase en déplaçant le miroir mobile pour générer un décalage de phase Doppler égale à $\phi_{Doppler} = \pm\Delta\phi$.

Dans le cas d'un interféromètre double passage, le déplacement Δx du miroir mobile qui correspond à $\Delta\phi$ est donné par la relation :

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4} \times \frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\lambda \times \Delta\phi}{8\pi}. \quad (1)$$

Il est possible de quantifier $\Delta\phi$ tel que $\Delta\phi = 2\pi/N$ où N est un entier. Nous parlons alors de « saut de phase ». Ces sauts de phase sont appliqués sur S_2 ou sur S_1 suivant le sens de déplacement désiré du miroir mobile. Le déplacement élémentaire est donné par :

$$\Delta p = \Delta x_{\min} = \frac{\lambda}{4N} = \frac{1}{4N} \times \frac{c}{f_{Laser}}. \quad (2)$$

La traçabilité de la mesure à l'échelle nanométrique peut être assurée en choisissant la fréquence f_{Laser} du laser parmi l'une des fréquences recommandées par le Comité International des Poids et Mesures pour la matérialisation du Mètre.

Cette méthode nous permet de contrôler la position et le déplacement du miroir mobile par le contrôle de la différence de phase entre les deux faisceaux optiques formant les deux bras de l'interféromètre de Michelson.

L'interféromètre que nous utilisons est un interféromètre hétérodyne Zygo ZMI2001, de fréquence d'hétérodynage égale à 20 MHz. Sur la Figure 1, le bloc *Générateur de fonction* correspond à un système électronique haute-fréquence spécifique qui a été développé au cours de la thèse de D. HADDAD et qui permet d'obtenir des sauts de phase programmables. C'est le cœur du système, sa réalisation soignée a permis d'obtenir de nombreux résultats qui illustrent ce document. On pourra trouver des détails de conception dans [7][P10].

Nous avons développé une méthode originale à base de signaux numériques haute fréquence. Ceci offre plusieurs intérêts, notamment pour des caractéristiques de stabilité de phase – donc de position – très long terme, et des raisons de souplesse d'emploi. Les signaux numériques haute-fréquences sont de nos jours accessibles par des technologies de type ECL (Emitter Coupled Logic) ou PECL (Positive ECL). Ce type de composants possède l'avantage d'avoir des temps de montée et de descente très courts (<100 ps), donc de fréquence de travail très grandes (> GHz), et surtout des caractéristiques en bruit de phase excellentes.

Ceci a permis d'obtenir des sauts de position de 0,25 nm [P10]. Il serait aisé d'envisager des sauts de position plus petits, ce n'est pas l'électronique qui limite, toutefois, on se trouve confronté à la limite de mesure de l'interféromètre (0,31 nm).

La thèse de Suan XU a été initiée sur cette thématique : réalisation et mesure de sauts de position très inférieurs au nanomètre.

2.3. Système double étage pour une grande course

Afin d'assurer une grande course, l'actionneur précédent est remplacé par un système à double étage. Un actionneur de type moteur (TS1) assure une course millimétrique avec des défauts de rectitude inférieurs à la course de l'actionneur piézoélectrique fixé dessus (TS2). Le miroir mobile de l'interféromètre est monté sur TS2 qui est rigidement fixé à TS1 et les deux axes de déplacements sont considérés colinéaires. L'actionneur piézoélectrique assure la sensibilité de positionnement. Il pourrait être autre que piézoélectrique, toutefois il s'agit là des actionneurs les plus courants et simples d'utilisation pour des déplacements nanométriques. Le rôle de TS2 est de compenser les défauts de translation de TS1 en temps réel. TS1 a un système d'asservissement indépendant de celui de TS2. Il est généralement basé sur un codeur optique pour la lecture de la position et d'un correcteur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) pour la boucle électronique de contre-réaction. Le contrôle de TS2 est similaire à celui décrit au paragraphe précédent.

Une consigne est envoyée sur TS1 pour le déplacer d'une distance d . Le signal S_3 est alors déphasé de $\phi_D \pm \delta\phi_1$ par effet Doppler. Simultanément, le signal S_2 est déphasé de $\phi_D \pm \delta\phi_2$ grâce aux sauts de phase pré-calculés à l'avance. Le bruit de phase $\delta\phi_1$ dû aux défauts de l'actionneur « grossier » est très supérieur au bruit de phase $\delta\phi_2$ généré par l'électronique. L'erreur qui apparaît au niveau du comparateur de phase est alors :

$$\varepsilon = \pm K (\delta\phi_1 - \delta\phi_2) \approx \pm K \times \delta\phi_1 \quad (3)$$

où K est un facteur d'échelle. La boucle de contre réaction de TS2 va corriger les défauts apportés par le système TS1. Les sauts de phase pré-calculés permettent à l'actionneur piézoélectrique de constamment se trouver autour de son point de fonctionnement nominal et d'éviter ainsi tous les effets de saturation, d'hystérésis et de non-linéarités [P7][P10].

2.4. Extension à un système double axes XY

Les principes décrits ci-dessus sont eux-mêmes étendus à un système double axe. Deux actionneurs grande course sont associés et un actionneur piézoélectrique double axe fixé sur l'ensemble comme représenté schématiquement sur la Figure 2.

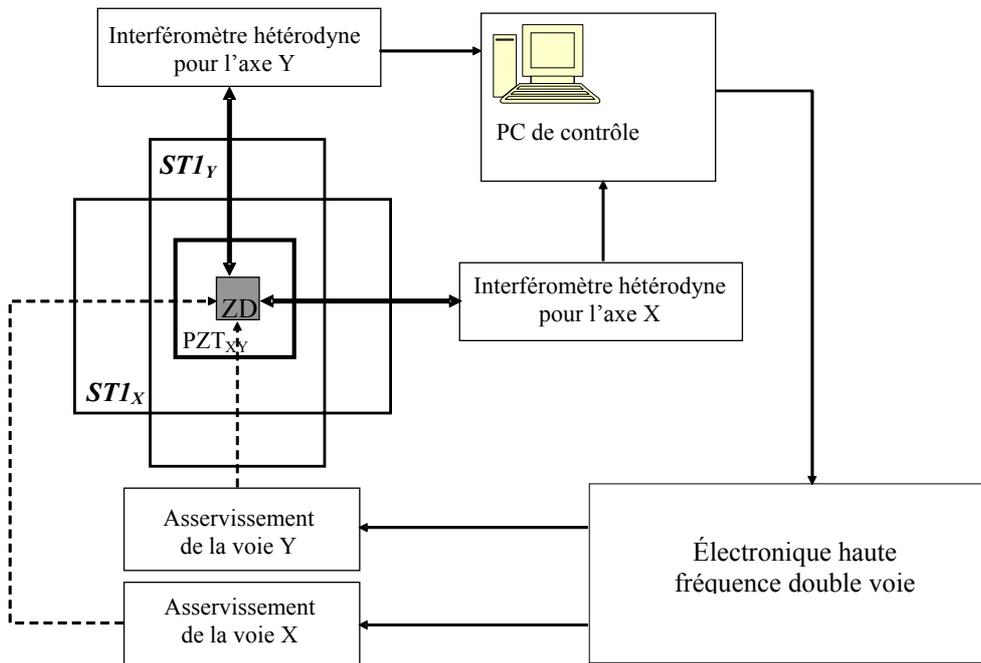


Figure 2 : Système de contrôle double axe : ZD : cube en zérodur poli miroir ; PZT_{XY} : platine piézoélectrique double axe ; ST1_X et ST1_Y : actionneur motorisé

Le système est composé d'un actionneur double axe (notés ST1_X et ST1_Y) ayant chacun une course millimétrique et son propre système de positionnement contrôlé par PC. L'orthogonalité entre les deux étages a été contrôlée avec une incertitude meilleure que 5 sec d'arc (24 μ rad). Un actionneur piézoélectrique double axe – noté PZT_{XY} – est positionné au dessus. Le PC synchronise l'ensemble et gère les sauts de phase similairement au principe exposé dans les paragraphes précédents. Le miroir mobile est un cube en zérodur poli miroir.

La **difficulté supplémentaire** réside dans l'alignement des différents axes (axes optiques, axes de poussée des actionneurs piézoélectriques, axes des éléments motorisés) car sur des grandes courses, si l'orthogonalité entre l'axe X et l'axe Y n'est pas assurée, des défauts de positionnement peuvent rapidement rendre le système biaisé ou incapable d'assurer son rôle. Pour cela, nous avons développé un système décrit plus en détail en annexe. La Figure 3

illustre plusieurs mesures au cours de l'étape de réglage. Un déplacement de 5 mm selon l'axe X est demandé et mesuré simultanément selon les axes optiques X_o et Y_o . La courbe *a* illustre le désalignement puisque l'ordonnée du point d'arrivée est décalée d'environ 900 nm ; on peut voir l'hystérésis entre les deux sens de déplacement de la platine. L'action sur l'étage de rotation permet d'obtenir la courbe *b* par ajustements successifs. Les défauts d'hystérésis et de rectitude sont ensuite compensés en temps réel par l'asservissement sur l'actionneur piézoélectrique qui a une course alors suffisante comme illustré courbe *c* ([P14] soumise à Precision Engineering en 2006).

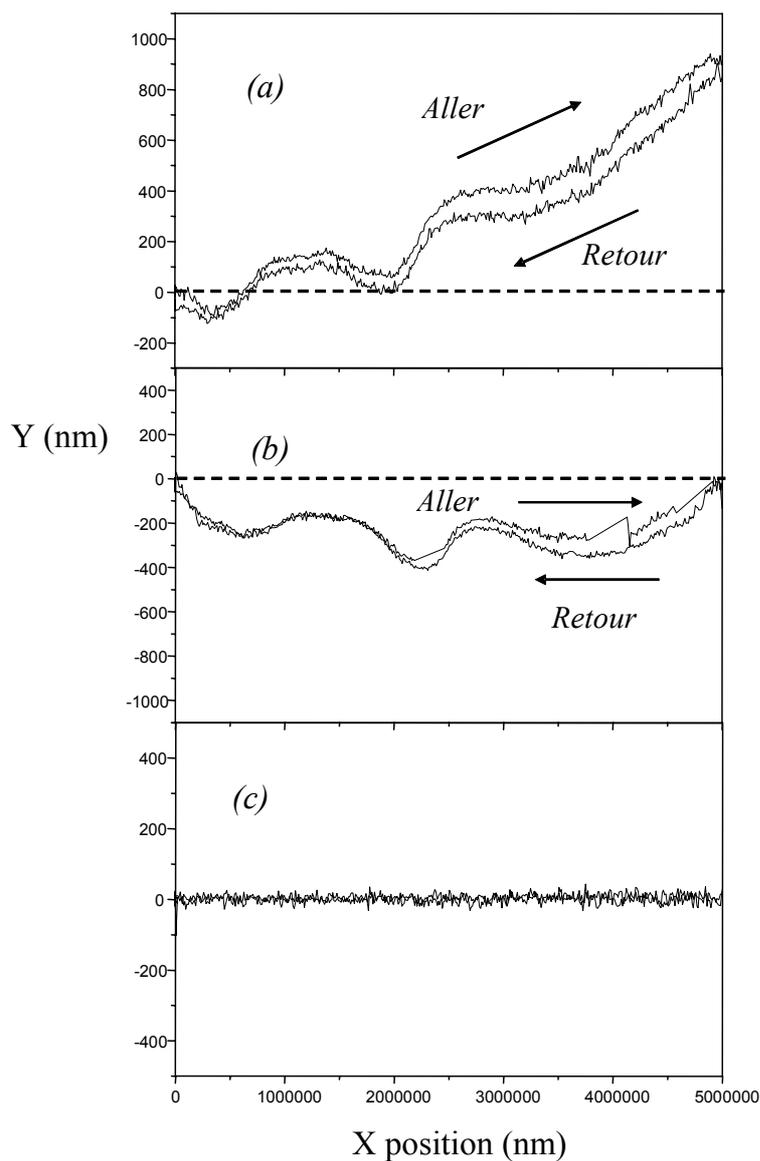


Figure 3 : Mesures des alignements des axes pour le système double étage. Courbe *a* sans réglage d'alignement, courbe *b*, avec l'étage de rotation ajusté et courbe *c* avec asservissement fonctionnel

3. RÉSULTATS OBTENUS

3.1. Conditions expérimentales

Ce paragraphe présente rapidement quelques détails sur les matériels utilisés et les conditions environnementales car je tiens particulièrement à rappeler l'importance des conditions expérimentales en métrologie. *Le souci des procédures d'expérience est constant, notamment dans l'enseignement que j'essaie d'apporter aux étudiants que j'encadre, ce que j'ai voulu signifier par ce simple paragraphe.*

L'interféromètre est un modèle commercial Zygo ZMI2001. La source laser est un hélium-néon. L'hétérodynage se fait à 20 MHz par un cristal acousto-optique, les deux longueurs d'onde sont $\lambda_1 = 632,991\,528$ nm et $\lambda_2 = 632,991\,501$ nm. Le laser a été étalonné par la méthode des battements optiques en utilisant une référence nationale (NIST – USA). L'incertitude relative sur les longueurs d'onde à 1σ est de $1,63 \times 10^{-9}$. En double passage, la résolution de mesure est de 0,31 nm.

Pour chaque axe, à la sortie de l'interféromètre, le faisceau laser est divisé en plusieurs parties selon l'application : une partie est envoyée vers le châssis de mesure du Zygo qui permet de mesurer la position en temps réel avec un programme d'acquisition Labview. La bande passante de mesure peut atteindre quelques kilohertz. Une autre partie est envoyée vers l'asservissement analogique externe et une troisième partie peut être envoyée vers un appareil de mesure autre (analyseur FFT, oscilloscope, etc...).

Si besoin, une station météo composée d'un capteur de pression (Digiquartz), d'une sonde de température (PT100), d'un capteur d'humidité (Elcowa) et d'un capteur de CO₂ (Innova 1312 – Airtech Instruments) est mise en oeuvre. Les incertitudes-types de ces instruments sont respectivement de 3 Pa, 0,05 mK, 1% et 50 ppm. Ces capteurs nous permettent de mesurer l'indice de réfraction de l'air en utilisant les formules semi-empiriques d'Edlén avec une incertitude-type de 5×10^{-8} [77][78][79]. Toutefois, pour des déplacements réduits, cette correction n'est pas nécessaire.

Les actionneurs grande course sont des moteurs linéaires Aerotech (ALS130 et ANT50). Leur course nominale est de 50 mm, la résolution de positionnement est de 20 nm et la rectitude annoncée inférieure à 2 μ m sur la course totale. L'actionneur piézoélectrique est un PXY 15CDT (15 μ m de course en haute tension) de chez PiezoSystem Jena.

Outre les perturbations d'indice, la pièce du laboratoire est très perturbée par des vibrations car il ne s'agit pas d'un bâtiment isolé. Celles-ci sont rattrapées dans une certaine mesure [7] par l'asservissement mais la bande passante limitée de l'actionneur piézoélectrique ne permet pas toujours une correction parfaite. Les résultats obtenus sont donc parfois dépendants de l'instant de mesure mais il est clair que de meilleurs résultats seraient possibles dans un meilleur environnement.

3.2. Mesure des sauts de position

L'électronique haute fréquence telle qu'elle a été configurée permet d'effectuer des sauts de phase de $2\pi/32$ sur le signal S₂ engendrant un déplacement minimum de $\lambda/(4 \times 32)$ soit 4,945 246 313 nm. Comme l'incertitude relative sur la longueur d'onde est de $1,6 \times 10^{-9}$,

l'incertitude intrinsèque sur la valeur du pas est de 8×10^{-9} nm. Les courbes illustratives ici ont été faites avec un système monoaxial. La Figure 4 montre clairement les pas nanométriques correspondant à chaque saut de phase exercé sur le signal S_2 . Lorsque l'asservissement est optimisé, le niveau de bruit à 1σ sur chaque pas est de 0,22 nm. On peut observer la bonne conservation de la phase au moment du changement de sens. En effet l'asservissement est maintenu, le changement de sens ne se fait que par le choix d'envoyer les impulsions d'inhibition sur la voie S_1 ou la voie S_2 . On peut ainsi aisément passer de l'un à l'autre par un aiguillage des signaux de commandes qui sont complètement indépendants de l'électronique d'asservissement.

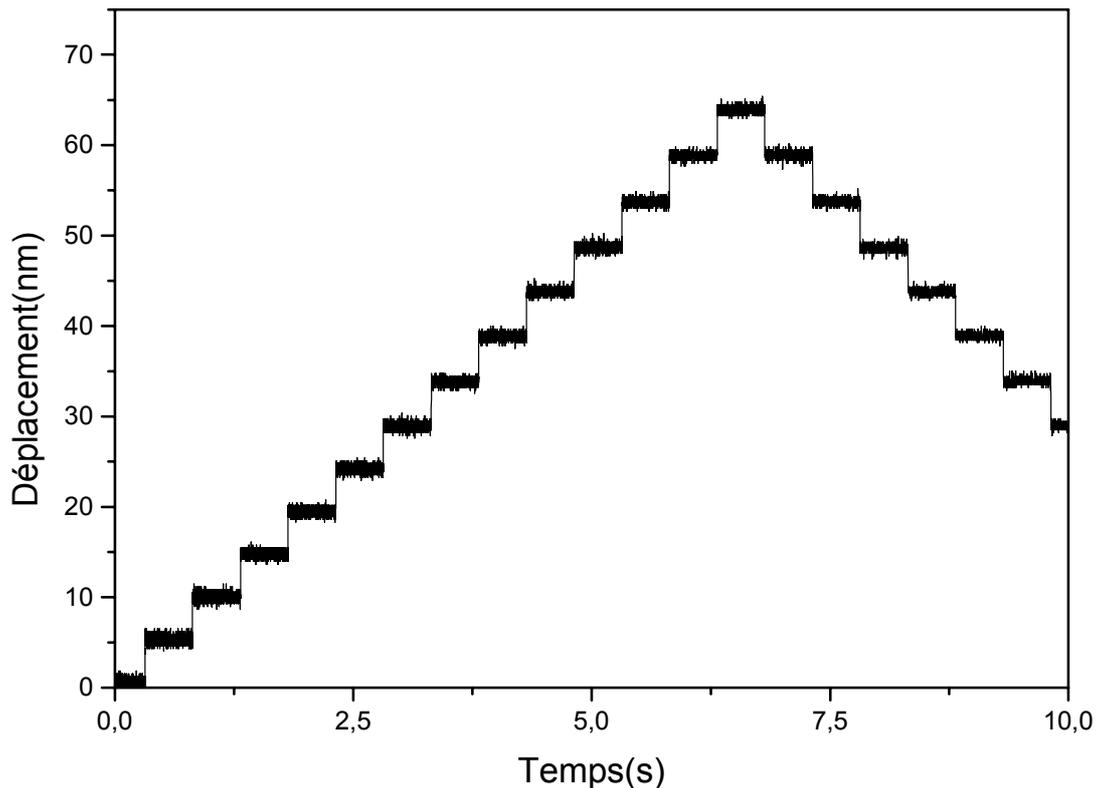


Figure 4 : Mesures aller retour des pas de position

L'échelle de temps en abscisse dépend de la fréquence de répétition des sauts de phase, qui peut être très lente comme ici ou très rapide selon la vitesse de déplacement désirée (plusieurs centaines de kilohertz).

3.3. Mesure sur la course piézoélectrique

La Figure 5 montre le déplacement du miroir mobile sur la totalité de la course possible de la céramique piézoélectrique qui est de $3 \mu\text{m}$ avec le modèle utilisé. La période de répétition des sauts de phase est constante, ce qui assure un déplacement linéaire.

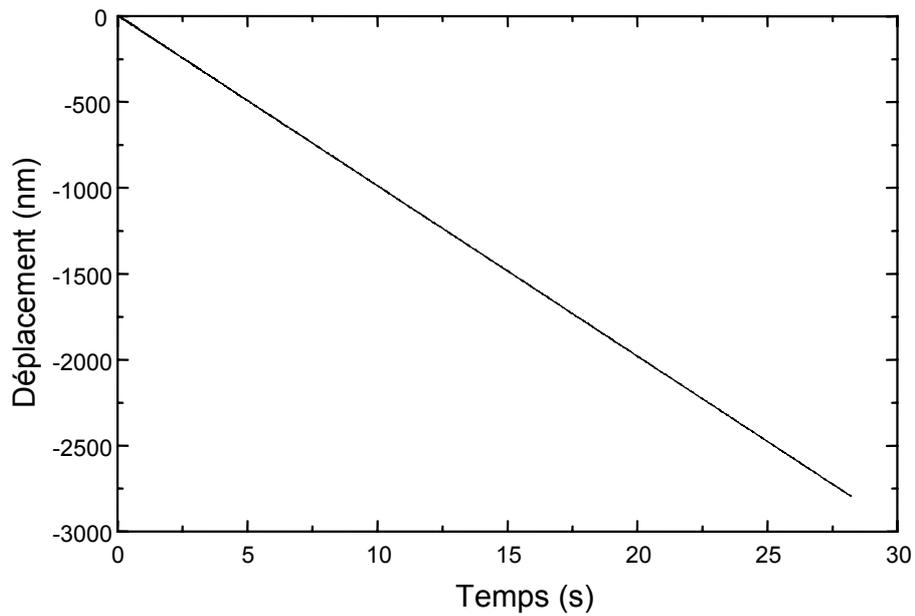


Figure 5 : Mesures du déplacement sur la course de l'actuateur piézoélectrique

La Figure 6 est un agrandissement sur une plage de 800 nm. Les pas de position de 4,945.. nm apparaissent ainsi qu'une modulation périodique de la pente. Cette modulation provient d'un mélange des deux composantes de la source laser.

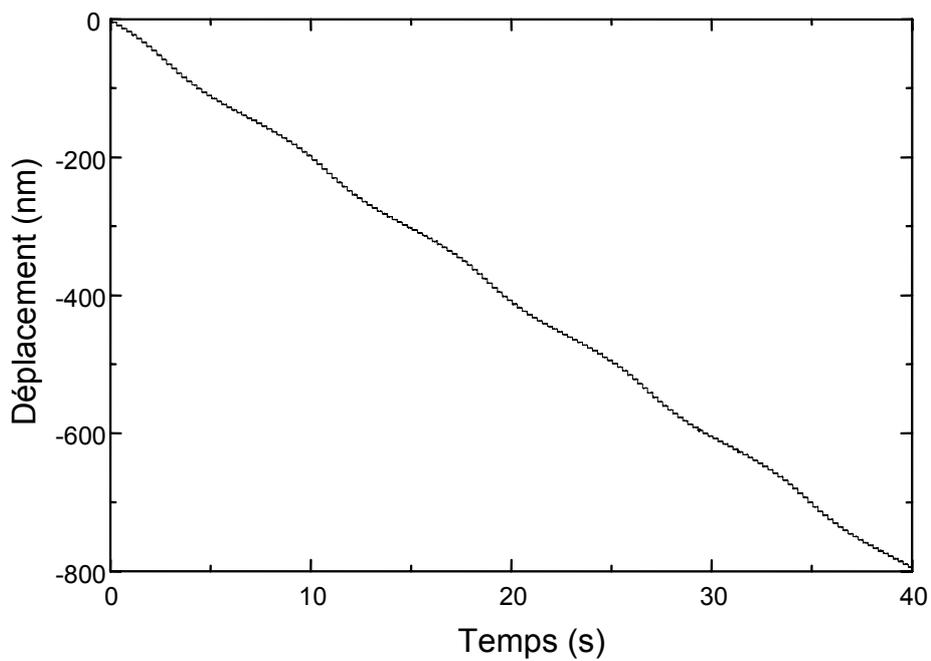


Figure 6 : Agrandissement des mesures de position : apparition des non-linéarités

Il s'agit d'un défaut propre à l'interférométrie hétérodyne. L'interférométrie hétérodyne repose sur la présence dans la source laser de deux composantes optiques polarisées linéairement et orthogonales entre elles. En pratique, les états de polarisations ne sont pas parfaitement linéaires mais présentent une faible ellipticité. De plus, ces deux états ne sont pas tout à fait orthogonaux mais peuvent présenter un angle de $90^\circ \pm 0,5^\circ$ ($\pi/2 \pm 0,0087$ rad) dans les meilleurs des cas. À cela, il faut ajouter un mauvais alignement entre les états de polarisation et l'axe principal du cube séparateur en polarisation et les imperfections de cette dernière dans la séparation des deux composantes. Tout ceci résulte en une relation non linéaire entre la variation de phase mesurée et le déplacement correspondant [8][9]. Cette erreur périodique est la limite intrinsèque de l'interférométrie hétérodyne.

Nous avons jugé important d'en estimer clairement l'impact pour mettre en balance un éventuel changement en faveur de l'interférométrie homodyne. Nous verrons par la suite que nous avons initié l'étude et la réalisation d'une nouvelle source optique pour pallier ce défaut dans des futures applications qui exigeront des niveaux d'exactitude sub-nanométriques. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication à laquelle on se référera pour de plus amples détails [7][P8].

De nombreuses expériences ont été menées pour mesurer et compenser cette erreur [10][11][12][13]. La méthode de mesure que nous avons utilisée consiste à comparer le déplacement du miroir mobile mesuré par l'interféromètre hétérodyne à celui mesuré par un interféromètre homodyne. En effet, ce type d'erreur est de moindre importance dans des interféromètres à une seule fréquence. Nous avons ainsi pu vérifier que l'erreur sur chaque pas est une erreur périodique (de période π si l'on considère la phase de sortie de l'interféromètre), estimée à 1,92 nm en valeur crête. La valeur donnée par le constructeur est de 1,4 nm.

→ Il faut toutefois noter que cette erreur n'est pas cumulative et n'est plus significative pour des grands déplacements. À cette échelle, les facteurs limitant l'exactitude de mesure sont plutôt les erreurs classiques comme l'alignement, l'indice de réfraction de l'air etc.

En conclusion, le choix de l'interféromètre hétérodyne reste intéressant pour pouvoir développer nos techniques d'asservissement de phase, tant que les non-linéarités de l'ordre du nanomètre ne gênent pas l'application visée, ce qui sera le cas dans celles présentées dans les chapitres suivants.

3.4. Mesures de répétabilité de positionnement sur des courtes distances

Une fois les non-linéarités minimisées, nous avons testé la répétabilité de positionnement du système. L'électronique conçue et utilisée est programmable avec des pas sub-nanométriques. Sur les courses de l'actionneur piézoélectrique, nous avons montré expérimentalement que notre système permettait d'obtenir des performances en répétabilité très inférieures au nanomètre [P10]. Le principe d'asservissement en phase du signal d'hétérodynage permet de s'affranchir complètement de l'hystérésis de l'actionneur. La Figure 7 illustre les possibilités du système.

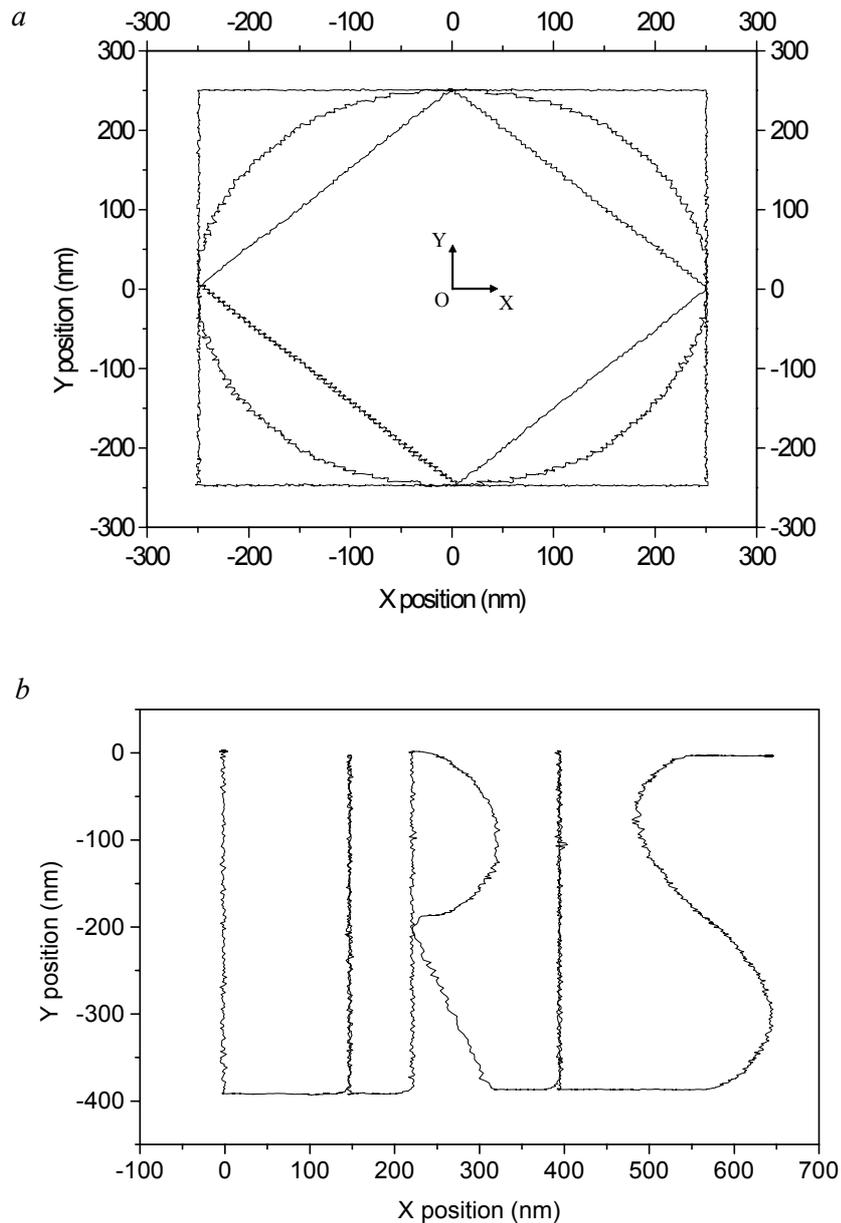


Figure 7 : Démonstration des possibilités de positionnement du système a) séquence de figures géométriques pour tester la répétabilité b) trajectoire spécifique précalculée

La partie *a* montre une série de figures géométriques : un mouvement préprogrammé exécute un carré puis un cercle puis un losange. Les axes X et Y sont contrôlés par des sauts de phase, avec ici une résolution de 4,945 nm. Plusieurs séquences de ce type ont été programmées afin d'effectuer des mesures de répétabilité. On montre par exemple que si l'on mesure la dispersion au passage du coin supérieur droite du carré, l'écart type de la position est de 3 nm sur l'axe X et 2,2 nm sur l'axe Y ce qui est compatible avec la résolution utilisée (4,945 nm). La partie *b* permet d'illustrer les possibilités de contrôle ; une séquence a été programmée afin d'écrire le mot LIRIS avec une amplitude de 400 nm en hauteur et 650 nm en largeur.

3.5. Répétabilité sur des courses millimétriques

Des mesures de répétabilité sur des courses millimétriques ont aussi été menées car nous verrons dans la suite qu'il s'agit d'un point clé pour les applications qui nous intéressent.

Pour cela, nous avons effectué une séquence de 20 déplacements selon un axe d'un point A vers un point B (distance D_{AB} égale à 5 mm) suivi à chaque fois du retour D_{BA} pour revenir au point de départ. L'erreur $\varepsilon = D_{AB} - D_{BA}$ est mesurée et reportée pour les 20 trajets, reportée sur la Figure 8. La valeur moyenne est égale à -0,001 nm et l'écart type égal à 0,49 nm.

La répétabilité s'exprime quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats et est donnée par l'écart type expérimental des séries de mesures successives de ε .

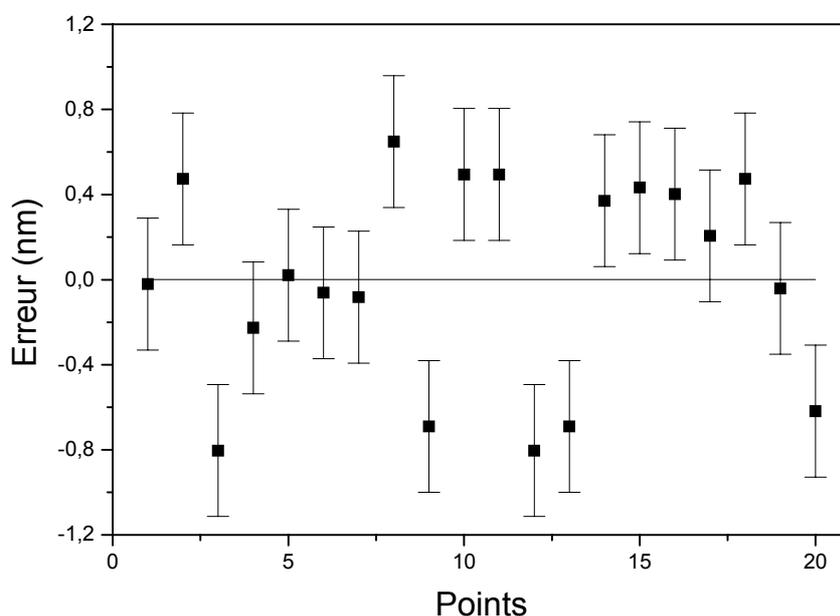


Figure 8 : Mesures de l'erreur $D_{AB} - D_{BA}$

On peut voir que tous les points de mesures sont situés à moins de 2σ de la valeur moyenne. Ces résultats, ainsi qu'un descriptif détaillé correspondant au paragraphe qui concerne la platine double étage et l'alignement des axes, ont fait l'objet d'une publication à *Precision Engineering* (soumise 2006).

4. CONCLUSION

4.1. Résumé et bilan

Il a été développé un outil de contrôle nanométrique sur grande course qui peut s'adapter aisément à des platines doubles étages commerciales. Le système combine un interféromètre et une électronique haute fréquence qui assure une très grande stabilité long terme puisque le contrôle se fait via des asservissements en phase dont les techniques en métrologie des fréquences assurent des performances excellentes.

L'initiation de ces travaux s'est faite dans la période de naissance du laboratoire ce qui a nécessité de nombreux efforts administratifs, techniques et de communication, notamment pour réunir le matériel coûteux et pour équiper correctement la salle d'expérience en appareils d'instrumentation et de métrologie. La mise en place de ces travaux a permis d'identifier des besoins qui vont pouvoir être présentés plus clairement dans les deux chapitres suivants.

4.2. Perspectives

A court terme, un effort de compacité reste à faire comme on pourra le voir au chapitre 3. A moyen et long terme, l'utilisation d'un DDS (Direct Digital Synthesis) fait sur mesure pourrait permettre aisément de réduire énormément la résolution de déplacement à des valeurs sub-nanométriques. Se pose alors la problématique de la mesure, car l'interférométrie arrive à ses limites.

Des applications nécessitant de telles performances n'émergeront sûrement pas avant de nombreuses années encore.

CHAPITRE 3

PLATINE PORTE-ÉCHANTILLON POUR LA MICROSCOPIE ET LA LITHOGRAPHIE

Comme décrit au chapitre précédent, une action plus ciblée a été engagée sur l'intégration de ce type de système de positionnement pour des applications en microscopie en champ proche et en lithographie. Quelques précisions spécifiques vont être abordées ici. Par souci de clarté, je distinguerai les deux. Comme les principaux efforts ont portés sur la microscopie, j'insisterai plutôt sur cet aspect, puis dans un deuxième temps j'étendrai la réflexion à la lithographie par comparaison pour éviter les redondances car il existe de très nombreux points communs.

1. MISE EN CONTEXTE

1.1. Spécificités et besoins de ces applications

Les deux problèmes principaux **en imagerie** sont d'une part la course limitée des « *scans* » actuels qui sont réalisés par des actionneurs piézoélectriques pour garantir une bonne résolution, et d'autre part le manque de répétabilité des images lié aux défauts de positionnement de ce type d'actionneur. Les principaux appareils (AFM Atomic Force Microscope, STM Scanning Tunneling Microscopy, SNOM Scanning Near-field optical Microscopy) sont équipés de platines porte-échantillons plus ou moins performantes selon les appareils.

Celles-ci sont **limitées** aujourd'hui à une **dynamique de déplacement typiquement de 100 μm** avec une résolution spatiale de 0,1 nm. Cette dynamique est limitée par l'actionneur piézoélectrique. Des céramiques piézoélectriques existent avec des courses de quelques micromètres voire quelques dizaines de micromètres. De nombreux efforts ont été fournis pour réaliser des systèmes piézoélectriques ayant plusieurs centaines de micromètres de course, mais ceci se fait par des voies d'amplification mécaniques ce qui réduit sensiblement la bande passante [14]. D'excellentes résolutions de positionnement ont été obtenues, mais souvent en utilisant des commandes en tension ce qui conduit inévitablement à tenir compte des défauts intrinsèques et peut poser problème sur des stabilités long terme de positionnement [15]. Certaines applications nécessitent pourtant des analyses d'échantillons sur des surfaces de plusieurs dizaines de mm^2 , voire même plusieurs cm^2 . C'est le cas par exemple de l'analyse par microscopie optique en champ proche d'ondes guidées associées à des composants d'optique intégrée pour le domaine des télécommunications optiques. Les dimensions des composants nécessitent un balayage sur plusieurs millimètres dans la

direction de propagation de la lumière dans le composant alors que quelques dizaines de micromètres dans l'axe orthogonal suffisent.

On peut trouver le même type de limitations en lithographie bien que pour des raisons différentes. La plupart des systèmes de lithographie électronique fonctionnent par la déflexion d'un faisceau électronique dans une enceinte à vide (typiquement un MEB : microscope électronique à balayage). La déflexion du faisceau ne peut se faire sur des grandes courses ni avec des bonnes répétabilités. De plus, le fait que ce soit le faisceau qui soit défléchi plutôt que l'échantillon déplacé sous un faisceau fixe entraîne des défauts (forme du faisceau insolateur inhomogène selon les endroits du motif, effets de bords).

Il serait donc nettement plus intéressant de disposer d'un système de déplacement de l'échantillon qui permette d'une part un déplacement répétable sur des courses millimétriques pour réaliser des motifs de grandes tailles (actuellement limité à quelques dizaines de micromètres), et d'autre part de **fonctionner à faisceau fixe** pour éliminer les inhomogénéités. Disposer d'un déplacement millimétrique avec précision nanométrique ouvrirait la voie à un nouveau mode d'exposition dit à faisceau d'électron fixe. Ce n'est plus celui-ci qui balaye le motif, mais l'échantillon qui est déplacé en dessous. Dans le cas de la lithographie électronique, une résolution de quelques nanomètres est suffisante actuellement. Des **résolutions sub-nanométriques** sont intéressantes plutôt pour des systèmes de **lithographie UV**.

Dans la **communauté des utilisateurs**, des techniques existent actuellement pour contourner les courses limitées. En microscopie, la méthode dite du « *stitching* » ou **recollement d'images**. Plusieurs petites images sont réalisées puis réassemblés ensuite par traitement (voir plus loin pour quelques détails). Cette méthode est très gourmande en temps et lourde à gérer. Dans le domaine de la lithographie, la solution généralement proposée consiste à décomposer le motif et à déplacer l'échantillon à l'aide d'une platine de translation centimétrique. Cette solution n'est cependant utilisable que dans le cas des systèmes haut de gamme à plus d'un million d'euros équipés de platines interférométriques [16]. Dans la majeure partie des microscopes électroniques à balayage, les platines de translation ont une résolution limitée à quelques micromètres. Ceci est d'autant plus dommage que la grande profondeur de champ du microscope électronique et la planéité des substrats permettraient d'exposer sur de grandes surfaces.

Ces deux techniques palliatives résolvent partiellement le problème de la course limitée mais en aucun cas les problèmes de répétabilité, les mettant au contraire en exergue.

1.2. État de l'art et objectifs

De nombreux produits commerciaux existent qui traduisent dans leurs spécifications des résolutions nanométriques. Toutefois, très rarement la notion de répétabilité est clairement chiffrée. La raison en est qu'un bilan d'incertitude clair est parfois très difficile à apporter, car

en marge parfois des préoccupations des communautés développant ce type de platines à forte dominante mécanique.

Plusieurs instituts de métrologie dans le monde ont initié l'étude et la réalisation de platines porte-échantillons 2 axes ou 3 axes dédiées à être implantées sous un AFM, mais aucun en lithographie. On peut citer des laboratoires : en Grande Bretagne (NPL : National Physical Laboratory [17][18]); en Allemagne (l'Université de Ilmenau en collaboration avec l'entreprise Sios et la PTB [19][20]), en Suisse (Metas [21][22]), en Chine (National Institute of Metrology [23]), au Japon (National Metrology of Japan [24][25]), aux Etats-Unis (National Institute of Standards and Technology [26][27]). Ces systèmes sont encore en cours de développement et font l'objet de projets long terme pour la plupart jusqu'en 2010 voire plus. Plusieurs laboratoires (comme le NIM en Chine que nous avons pu visiter dans le cadre de la thèse de Suan XU) ont pour objectif prioritaire de développer des systèmes dédiés pour l'instant à des programmes d'inter-comparaison de réseaux et de codeurs optique qui est une thématique en nanométrie très développée.

Dans les systèmes les plus aboutis destinés à la microscopie, les performances annoncées sont :

- ✓ Pour le NIST, la Molecular Measuring Machine garantit une résolution d'un nanomètre sur une course de 50 mm selon deux axes, et 1 mm selon l'axe vertical [28]. Le principe du double étage de déplacement (un étage « grossier » et un étage « fin ») est utilisé.
- ✓ Pour la Nanomeasuring Machine d'Ilmenau, la plage de travail annoncée est de 25 mm sur deux axes et 5 mm selon l'axe Z, avec une résolution de 1,2 nm. Une image grande taille a été réalisée sur 1 mm x 100 μm , la résolution d'échantillonnage n'étant toutefois que de 100 nm [19].
- ✓ Les systèmes du Metas et du NPL sont plus dédiés à des courses de quelques centaines de micromètres, surtout dans un but métrologique pour les mesures de pas de réseau.

Les deux systèmes les plus aboutis sont ceux du NIST et de l'université d'Ilmenau.

En France une équipe de nanométrie au LNE développe une table de positionnement [29] (objectif 300 mm x 300 mm x 50 μm avec une incertitude de l'ordre de 10 à 33 nm selon la course) mais le projet demeure dans une phase où les problèmes de réalisation mécanique ne sont pas encore résolus. La philosophie adoptée est plutôt de réaliser une table de déplacement susceptible de se déplacer sous des grands systèmes, l'industrie de la microélectronique étant plus particulièrement visée. Le principe d'un positionnement de précision est basé sur un système double étage, un étage pour la grande course et un second étage pour le positionnement de précision. Le LNE a depuis cette année également lancé un projet visant à réaliser un AFM dit métrologique, sur des courses d'environ 100 μm mais avec une exactitude de l'ordre du nanomètre.

Notre approche se situe plutôt sur la compacité du système pour que l'ensemble puisse être intégré aisément sous un microscope ou un système sous vide type lithographie. Cela permet de mieux s'affranchir de certains effets, par exemple les défauts d'alignements en

interférométrie, les problèmes d'indice du milieu, qui sont d'autant plus néfastes que la course est grande. Or pour les applications en microscopie et en lithographie, il n'est pas nécessaire de viser des courses centimétriques mais quelques millimètres assurent déjà des débouchés novateurs. Les actionneurs de précision type moteurs linéaires ou piézoélectriques sont meilleurs si on ne cherche pas des courses surdimensionnées.

Le système qui a été développé et décrit au chapitre précédent peut convenir pour ces deux types d'applications, en tenant compte des spécificités d'intégration comme nous allons le voir.

L'**objectif** est de réaliser un système de déplacement ayant une dynamique de 5 mm dans les deux axes du plan horizontal. L'exactitude de positionnement visé est de 5 nm dans un premier temps (10^{-6} en valeur relative) puis 1 nm ensuite (erreurs systématiques plus contraignantes). Il doit être possible de régler l'angle d'inclinaison du plan de déplacement. La rectitude dans le plan vertical doit rester inférieure à 1 μm sur la course. Les notions de traçabilité, d'exactitude et de répétabilité sont fondamentales. Ce type de système sera intégré sous forme de platines porte-échantillons ou l'échantillon peut être positionné aisément dessus. Dans le cas de la lithographie, le système doit pouvoir être intégré sous vide.

1.3. Système du LNIO et méthodes actuelles utilisées

Le LNIO a développé un microscope spécifique (que l'on appellera par la suite AFM/SNOM) où il est possible de réaliser simultanément la topographie et une image optique comme illustré Figure 9. Il est intéressant de le détailler ici car à terme, il s'agit de l'application la plus pertinente car elle vise la cartographie millimétrique de composants optiques.

La pointe AFM en mode *tapping* (la pointe vibre à haute fréquence puis le signal AFM est démodulé ; cette méthode implantée sur tous les AFM modernes depuis quelques années autorise une meilleure résolution) sert de sonde diffusante pour réaliser une imagerie optique. Cette configuration tout à fait originale prend tout son intérêt pour l'imagerie simultanée de guides d'onde optiques qui peuvent présenter des dimensions millimétriques dans un axe et quelques dizaines de micromètres de largeur uniquement. Une très bonne résolution selon l'axe de propagation est importante afin de remonter à des propriétés du guide d'onde et de l'onde de propagation [30].

La seule solution actuellement pour effectuer des images de grande taille est la méthode dite du « *stitching* » ou recouvrement d'image. Une image est effectuée sur la course de l'actionneur piézoélectrique, puis la tête du microscope ou l'échantillon est déplacé ; une seconde image est réalisée avec une zone de recouvrement par rapport à la première ; des techniques de traitement d'image permettent de recoller les deux images en repérant des points particuliers. On peut ensuite réitérer le processus sur une grande distance.

Ce principe est bien sûr très gourmand en temps, le recollement d'image nécessitant de plus une zone de recouvrement non négligeable. De plus, la qualité du recouvrement est conditionnée par la qualité du déplacement entre deux images. On peut observer une illustration de cette technique sur la Figure 10 où une image a ainsi été réalisée par l'équipe du LNIO sur 1,6 mm de long.

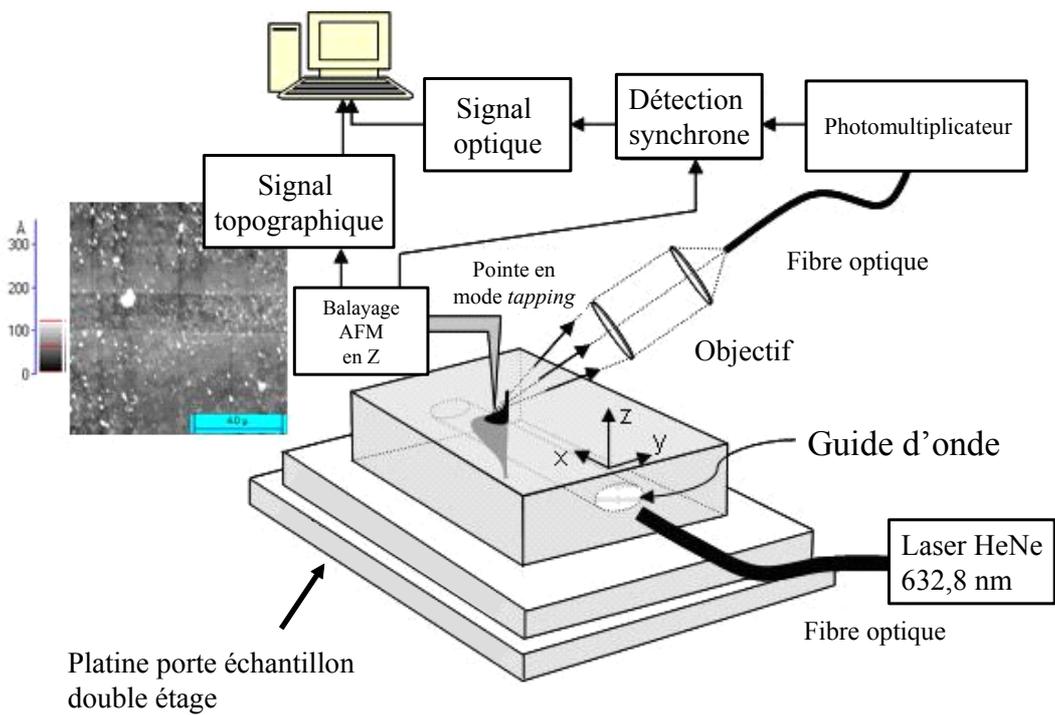


Figure 9 : Configuration expérimentale utilisée pour la caractérisation d'un guide d'onde intégré par SNOM à sonde diffusante (pointe AFM). Dans cette configuration, la pointe AFM reste fixe par rapport à l'optique de collection et c'est l'échantillon qui se déplace grâce à un nano-positionneur. La zone cartographiée est actuellement au maximum de $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ [schéma LNIO]

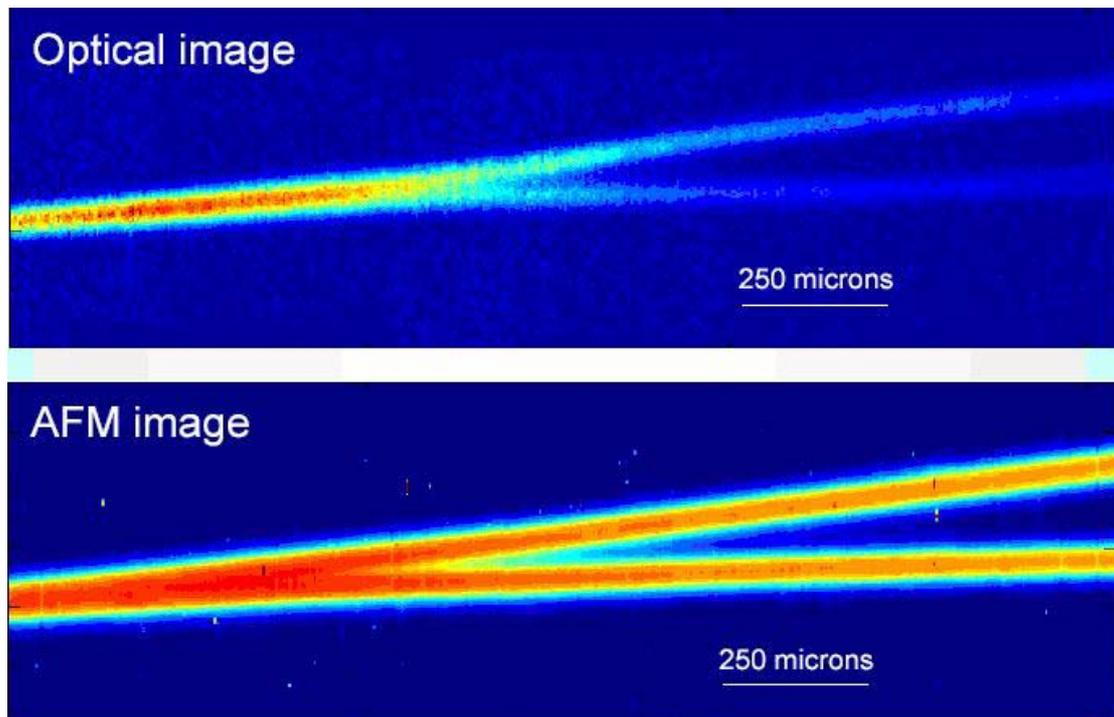


Figure 10 : Cartographie AFM/SNOM d'un composant millimétrique [image LNIO]

Cette technique ne peut évidemment pas être implantée pour la problématique de lithographie, on peut toutefois concevoir des motifs de grandes tailles par insolation de motifs adjacents.

1.4. Moyens mis en œuvre

L'activité a été initiée début 2004 avec l'apport de l'ACI nanosciences en décembre 2003. Certains travaux sont corrélés à ceux qui concernent la balance du watt et sont donc communs. Les appareils utilisés sont extrêmement coûteux, cela a nécessité une phase de réflexion sur les budgets assez conséquente. Initialement la demande prévue dans le cadre de l'ACI portait sur 1M€ HT, il a été accordé 400 k€ TTC. Le programme de travail a alors été largement revu, et l'activité dédiée à la lithographie a dû être reléguée au second plan ce qui explique le peu d'avancement sur cette partie. Il est rappelé que le LIRIS ne dispose d'aucun personnel technique et que mettre en œuvre des prototypes aussi complexes et à vocation fortement expérimentale demande un fort développement. Pour pleinement réaliser dans des délais raisonnables le plan de travail, il est indispensable de disposer de ces personnels car sinon les charges techniques réparties sur les enseignants et les doctorants ne permettent pas d'avancer comme désiré.

Le développement du système s'est fait à Versailles, mais les premières mesures ont été faites à Troyes sous un AFM disponible.

Cette activité est le travail de A. SINNO que j'encadre en tant que coordinateur du projet, et de S. XU que j'encadre pleinement lorsqu'elle est en France. Certains points particuliers ont vu l'aide de M. WAKIM car certaines parties sont fortement corrélées à sa thèse portant plutôt sur la balance du watt.

2. PROGRAMME DE TRAVAIL

Il est important lors de la phase d'étude de bien réfléchir sur plusieurs points clés qui permettent d'optimiser les temps d'expérimentations. On distingue dans la suite les deux applications visées pour plus de clarté. Toutefois, il est évident que la problématique et les développements des deux applications sont fortement corrélés car le cœur du système reste la platine porte-échantillons.

2.1. *Platine porte-échantillons pour la microscopie à champ proche*

Le cœur du système de contrôle de position est basé sur les principes vus au chapitre précédent : contrôle interférométrique, utilisation d'une électronique haute fréquence et asservissement en phase pour assurer la pérennité et une grande stabilité long terme. On peut ensuite analyser l'intégration de la platine qui doit se faire suivant plusieurs points :

- ✓ **Intégration mécanique** : la platine porte-échantillon doit accueillir l'échantillon et être réglable en tilt selon XY, ainsi qu'avoir une rotation pour pouvoir choisir l'axe de balayage. Sur la Figure 22 (en annexe), on peut voir que l'échantillon a largement la place d'être positionné sur le cube miroir.
- ✓ **Intégration logicielle** : ce problème s'avère crucial. Les microscopes actuels ne sont pas du tout conçus pour pouvoir réaliser des images longues avec une densité de points de mesures importantes. Le nombre de points maximal est souvent 1024×1024 sur la taille de l'image (cela donne donc environ 100 nm de résolution sur une course de 100 μm ou 1 nm sur une course de 1 μm). Il est nécessaire de complètement réadapter la partie qui gère l'acquisition de l'image du microscope pour la coupler au système qui porte l'échantillon. L'image est constituée en effectuant l'acquisition du signal issu de la pointe par une simple acquisition par un CAN (convertisseur analogique-numérique).
- ✓ **Traitement de données a posteriori** : une image par exemple de 1 mm de long sur 100 μm de large, réalisée avec une résolution de 10 nm représente 10^9 points de mesures. En codant chaque point sur 16 bits, cela aboutit à un fichier de 2 Go ce qui pose évidemment problème pour une visualisation en temps réel, et même de traitement de l'image a posteriori.
- ✓ Pour les mêmes raisons de **densité d'information**, il est intéressant de balayer le plus rapidement possible. Il est opportun de développer des **asservissements** qui garantissent le positionnement nanométrique **les plus rapides possibles**. Toutefois, actuellement, ce qui limite la vitesse de balayage est le contact de la pointe avec l'échantillon ; si la pointe se déplace trop vite, la topographie peut être faussée, les variations brutales en Z pouvant être filtrées. Cette problématique est plus cruciale dans l'application de lithographie comme on le verra par la suite.

- ✓ Tous les effets perturbateurs doivent être estimés à l'avance pour faire un bilan métrologique lors du tracé de l'image.

Des premières études ont permis d'identifier l'ensemble de ces problèmes et d'envisager trois modes de fonctionnement pour réaliser une image de grande dimension avec une bonne résolution, ceci dans un temps de mesure raisonnable. Nous allons détailler ici les trois modes de fonctionnement retenus en précisant les avantages et les inconvénients de chacun.

- ✓ **Un premier mode dit « scan rapide long » :**

La platine de déplacement à moteur linéaire se déplace sur une grande course (millimétrique) selon l'axe X en effectuant des lignes parallèles, mais le second étage piézoélectrique de la platine porte-échantillon ne corrige en temps réel que les défauts selon l'axe Y pour assurer un parallélisme entre les lignes. Seuls les points de démarrage de chaque ligne qui composent une image sont ajustés à quelques nanomètres près. Ce mode permet d'assurer l'image d'une ligne longue parfaitement rectiligne. En parallèle, le logiciel qui gère le déplacement prend la main sur le logiciel d'acquisition AFM pour échantillonner à une cadence synchronisée sur le déplacement et très élevée le signal issu de la sonde. Un signal issu du déplacement est obtenu pour générer des interruptions régulières qui déclenche les points de mesures aux emplacements fixés. Ce mode est destiné à réaliser rapidement une image, les vitesses de déplacement visées sont de l'ordre de 40 $\mu\text{m/s}$, limitées par la tête AFM.

Avantages : images longues de bonne qualité, avec une très bonne résolution et obtenue assez rapidement. Ceci permet d'obtenir une topographie d'un objet long sans avoir ensuite à effectuer des agrandissements numériques ou de déplacer la tête AFM pour agrandir une partie de l'image par un nouveau scan. Il faut toutefois relativiser le mot *rapide*. Une image de 1 mm de long sur 750 μm de large a été effectuée à une vitesse de 40 $\mu\text{m/s}$; le repositionnement entre chaque ligne peut prendre quelques secondes, l'ensemble à demandé environ une demi-heure.

Inconvénients : les défauts de positionnement de la platine selon l'axe X ne sont pas compensés en temps réel, l'image obtenue peut être déformée. Il faut prévoir une correction d'image a posteriori. Celle-ci peut se faire efficacement car la position réelle est mesurée en temps réel, rien n'empêche une correction ultérieure.

- ✓ **Un second mode dit « par morceaux » :**

Cette technique est inspirée du *stitching*. Il s'agit de réaliser plusieurs petites images adjacentes à la suite les unes des autres. Chaque image est obtenue en utilisant le mode de contrôle de déplacement vu précédemment dans la course du piézo. Toutes les non-linéarités sont donc annulées. Entre chaque image, la platine double étage est repositionnée pour que le recollement entre chaque petite image soit garanti sans traitement d'image a posteriori. La position de début et de fin de chaque image est ainsi

contrôlée au nanomètre près, et un processus de positionnement enchaîne les images automatiquement les unes après les autres. L'image finale est constituée de petites images parfaitement conjointes.

Avantages : chaque petite image bénéficie cette fois du contrôle en temps réel de la position. Toute non-linéarité de positionnement supérieure au nanomètre disparaît grâce aux techniques exposées dans ce mémoire. Bien que moins rapide que le mode précédent, la résolution peut être encore meilleure (on peut envisager des acquisitions AFM à des résolutions nanométriques) et surtout les défauts de non-linéarité sont supprimés.

Inconvénients : le contrôle logiciel est plus lourd, et compte tenu d'une plus grande quantité d'information, le temps d'acquisition d'une image est plus long.

✓ **Un troisième mode dit « suivi de trajectoire » :**

Il s'agit là du mode le plus abouti qui fait appel à des techniques d'asservissement particulières et qui allie les deux modes précédents. La platine effectue un scan long et rapide comme dans le premier mode avec un contrôle de la rectitude selon l'axe Y. Mais cette fois ci, l'étage piézoélectrique rattrape en temps réel les défauts de la platine selon l'axe X et chaque point de la trajectoire entre le point A de départ et le point B d'arrivée situé à une distance millimétrique est assuré avec une exactitude nanométrique. En parallèle, le logiciel réalise l'acquisition des données AFM. Ceci nécessite des bandes passantes d'asservissement très nettement supérieures aux modes précédents et des techniques de robotique qui permettent d'assurer robustesse et erreur dynamique faible. On fera pour cela appel à des commandes dynamiques robustes permettant une correction possible sur les positions, vitesses et accélérations, mais aussi de se prémunir d'un changement possible du système (par exemple : vieillissement de l'actionneur piézoélectrique). L'utilisation de commandes par mode glissant pourrait répondre à ce genre de modification du système.

Avantages : allie les avantages de deux modes précédents : image longue en un seul passage et contrôle des défauts en temps réel pour avoir une résolution nanométrique.

Inconvénients : techniques d'asservissements et d'acquisition très lourdes qui nécessitent un développement spécifique.

Points clés de ce mode : ce mode doit être géré par des contrôleurs temps réel à réaliser d'une manière spécifique.

Ces trois modes de fonctionnement sont le fruit de discussions abouties entre le LIRIS/LISV et le LNIO, d'autres modes pourront voir le jour selon les besoins dans le futur.

2.2. Platine porte-échantillons pour la lithographie électronique

Certains points sont très similaires à l'application de microscopie champ proche, des renvois sont faits au paragraphe précédent.

Les deux points spécifiques principaux par rapport à l'application de microscopie sont :

- Il est indispensable que le système soit intégré dans un MEB sous vide.
- Des premières études portant sur le système actuel du LISV laissent apparaître que le capteur interférométrique (ZYGO ZMI2001) utilisé actuellement ne peut être intégré tel quel. Un état de l'art des interféromètres fibrés laisse apparaître que les performances sont trop dégradées et qu'il est donc nécessaire de développer une source interférométrique dédiée. Celle-ci sera détaillée par la suite.

Les modes de fonctionnements détaillés ci-dessus restent valables, cette fois-ci en considérant non plus une tête AFM mais un faisceau d'électron dans un MEB.

✓ **Le premier mode dit « *exposition rapide* » :**

D'une manière similaire, ce mode est prévu pour effectuer rapidement un motif long mais avec quelques défauts résiduels selon un axe. L'aspect acquisition décrit pour la microscopie disparaît.

✓ **Le second mode dit « *par morceaux* » :**

Ce mode est prévu pour effectuer des petits motifs précis distants l'un de l'autre et positionné sur une plaque d'échantillon de grande taille. L'aspect répétabilité de positionnement est essentiel et nettement plus crucial que pour l'imagerie. En effet dans le cas de l'imagerie, si des légers défauts subsistent, il est toujours possible de compenser l'image a posteriori. Dans le cas de l'insolation d'un motif, si des défauts de chevauchements sont générés, cela induira des motifs mal exécutés et irréparables.

✓ **Le troisième mode dit « *suivi de trajectoire* » :**

Ce mode reprend le point clé qui est le suivi point par point de la trajectoire de la platine, compensée de ses défauts en temps réel.

Quel que soit le mode utilisé, un moyen de caractérisation possible du contrôle de déplacement de la platine serait de graver dans une résine (PMMA) une ligne droite typiquement de 10 nm de largeur sur une distance de quelques millimètres. Une observation au microscope électronique après développement de la résine permettrait de visualiser les « défauts » éventuels induits par le déplacement.

Spécificités par rapport aux modes décrits pour la microscopie :

- ✓ Il n'est plus nécessaire de prévoir une acquisition à cadence élevée en parallèle du déplacement, ce qui simplifie la partie logicielle.

- ✓ Les **vitesse de déplacement** ont intérêt à être **plus élevées** pour permettre une exposition du motif rapide. Ceci devrait permettre de compenser partiellement l'augmentation du temps d'écriture résultant de la plus grande surface gravée. La vitesse de déplacement pourrait par contre dans certains cas dépendre de l'intensité du faisceau d'électron.
- ✓ Un point fondamental émerge de ces modes de fonctionnement : on peut envisager de réaliser des motifs avec **un faisceau d'électron fixe**. Ce n'est plus celui-ci qui balaye le motif, mais l'échantillon qui est déplacé en dessous. De nos jours, les MEB fonctionnent avec une déflexion du faisceau ce qui induit des défauts en bord de motif (distorsion du faisceau, inhomogénéité de la dose...) Fonctionner à faisceau incident normal et fixe apporte donc des avantages très significatifs. Cette approche initialement proposée dans l'ACI intégré 2003 vient d'être indirectement validée puisque la société RAITH propose maintenant un système de lithographie (e-line) avec cette option [16].

Il est important de préciser ici que cette phase de développement concerne également la lithographie par faisceau d'ions focalisé et que par conséquent le prototype développé et les modes de fonctionnement validés ici pourraient être directement utilisés dans ce dernier type de microscope.

2.3. Nouvelle source optique intégrée pour l'interférométrie sous vide

Le système de mesure actuellement utilisé qui permet la boucle d'asservissement est un interféromètre hétérodyne Zygo ZMI2001. Il présente certains inconvénients :

- ✓ La source utilisée est un laser He-Ne faible puissance stabilisé en fréquence. Si l'on veut mesurer plusieurs axes simultanément pour remonter en temps réel aux défauts de déplacements, le signal à bruit s'en trouve nettement diminué. Il est intéressant d'avoir une source stabilisée en fréquence de **plus forte puissance**.
- ✓ Le faisceau laser est composé de deux composantes de polarisations linéaires et orthogonales entre elles et décalées en fréquence de 20MHz. En pratique, des non-linéarités et des imperfections sur les polarisations entraînent des erreurs comme on l'a vu au chapitre précédent. Il est intéressant de réaliser l'hétérodynage avec une autre technique pour **minimiser les erreurs résiduelles** qui peuvent être de l'ordre de quelques nanomètres. Ceci est surtout une perspective plus long terme pour la lithographie UV par exemple où les résolutions demandées seront de l'ordre du nanomètre voire sub-nanométriques.
- ✓ Le principe de l'hétérodynage du Zygo interdit le passage dans une fibre au niveau des bras de l'interféromètre de Michelson. Or dans une application type lithographie qui est nécessairement sous vide, cela pose un réel problème. Les interféromètres fibrés existant ne présentent pas les performances nécessaires. Il est intéressant de développer un système hétérodyne qui puisse être **entièrement fibré** au niveau de l'interféromètre.
- ✓ Le système développé au LIRIS autorise le contrôle du déplacement avec une résolution de 0,25 nm. Cette résolution peut être fortement diminuée si la fréquence d'hétérodynage est abaissée. Réaliser une source hétérodyne avec une fréquence de battement plus faible

permettrait d'envisager des **résolutions meilleures**, ce qui serait un point intéressant si un jour on vise des applications de lithographie UV ou à faisceau d'ions.

Une solution a été imaginée pour améliorer le système actuel. Les détails techniques figurent en annexes.

3. RÉSULTATS OBTENUS

3.1. Première topographie de grande taille

Une première série de mesures a pu être effectuée en mai 2006. Je tiens tout particulièrement à présenter ici les résultats expérimentaux issus de ces mesures. Bien qu'encore modestes, les images obtenues laissent penser que le système pourra ouvrir la voie à des explorations novatrices dans le domaine.

Le système développé au LISV a été transportée en LNIO pendant 15 jours. Après une adaptation mécanique sous l'AFM et différents ajustements (Figure 11), des premières images ont pu être enregistrées. La plus significative est présentée sur les figures suivantes. Des limitations non résolues dans la courte période de 15 jours n'ont pas permis de faire une image plus large selon le petit axe, mais une nouvelle série de mesure est prévu bientôt. On peut toutefois tirer des enseignements instructifs de ces résultats.

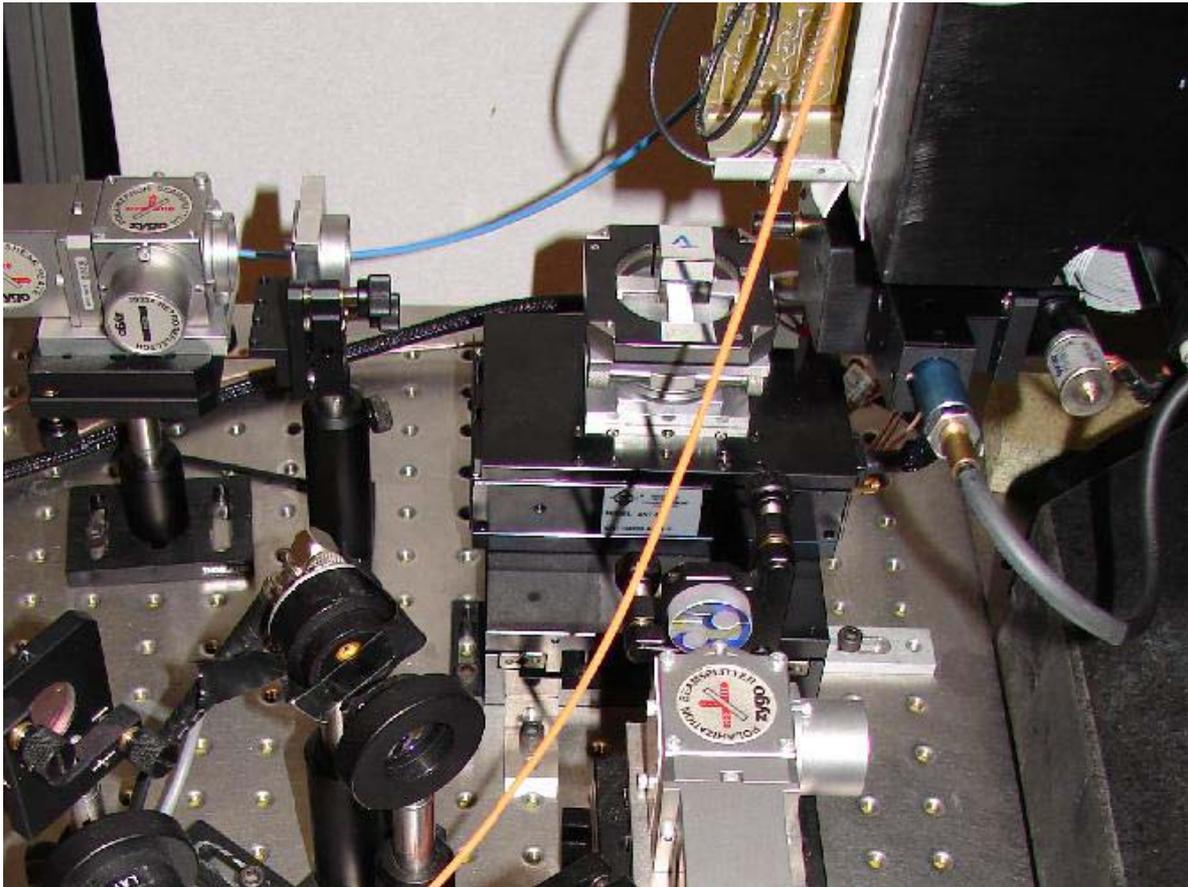


Figure 11 : Système prototype implanté sous l'AFM du LNIO. On peut voir la tête AFM en haut à droite, la double platine de moteurs linéaires, l'actionneur piézoélectrique double axe, le cube miroir ainsi que les deux interféromètres.

Les données opératoires sont :

- ✓ Le mode 1 « *scan rapide long* » est adopté.
- ✓ Le grand axe de déplacements choisi ici est l'axe Y. Un point est échantillonné tous les 20 nm sur une course d'un millimètre, ce qui donne donc 50 000 points par ligne.
- ✓ 29 lignes parallèles sont enchainées, avec un écart de 25 nm entre chaque ligne ce qui donne une largeur d'image de 725 nm.
- ✓ La vitesse de balayage de la tête AFM est de 40 $\mu\text{m/s}$, ce qui donne 25 sec/ligne.
- ✓ En tenant compte du repositionnement nanométrique entre chaque ligne, le temps total pour réaliser l'image est d'environ 20 minutes.
- ✓ L'échantillon utilisé est un motif de guides d'onde parallèle, connu a priori. Chaque guide fait environ 150 nm de profondeur et 3 μm de largeur. L'espacement entre chaque guide n'est pas régulier.

La Figure 12 présente le résultat issu d'un traitement sous le logiciel Matlab. Une image de cette dimension est assez délicate à traiter par les logiciels classiques, nous avons donc opté dans l'immédiat pour Matlab. L'axe Z est en volts, il s'agit du résultat direct de la sortie AFM échantillonné par un convertisseur 16 bits ; cette sortie correspond en fait à la consigne de l'actionneur piézoélectrique qui suit la topographie de l'image. En connaissant sa sensibilité, on peut remonter à la position en Z ; c'est cette méthode qui est utilisée dans tous les logiciels de visualisation des AFM. Ce plan en coupe permet déjà de repérer les guides d'onde parallèles et d'observer que bien sûr le plan de balayage est décalé par rapport à l'axe des guides.

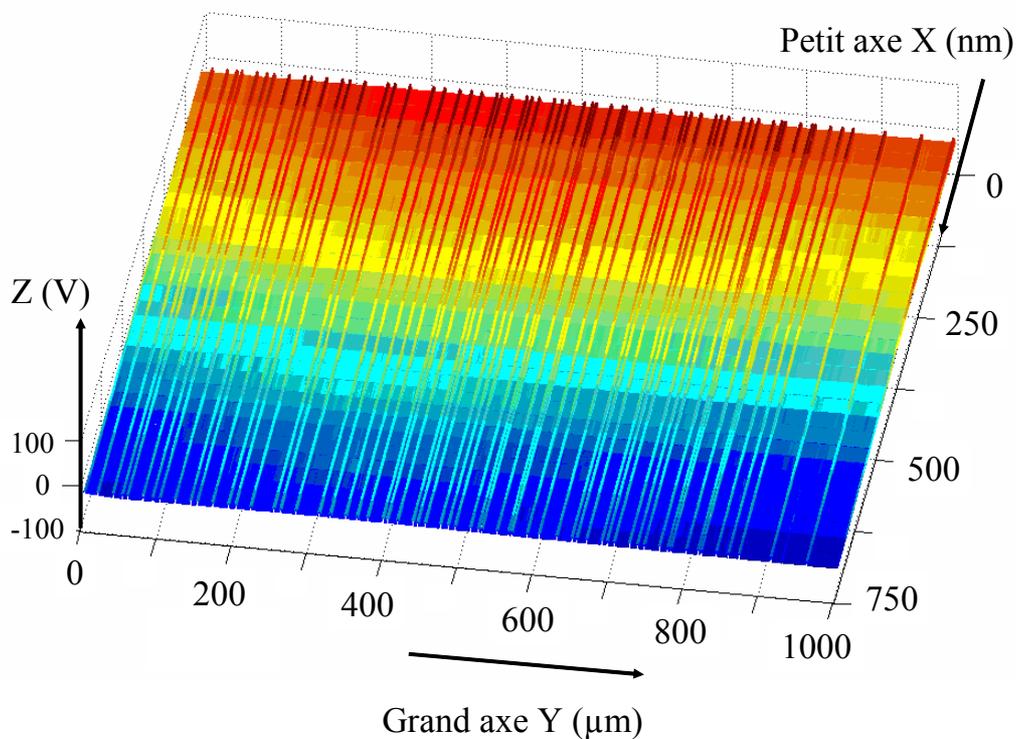


Figure 12 : Image AFM de dimensions : 1 mm \times 725 nm ; résolution 20 nm selon le grand axe et 25 nm selon le petit axe (29 lignes de 50 000 points)

Afin de faire un traitement plus quantitatif, nous pouvons en agrandir une partie. On considère une coupe selon le grand axe, Figure 13.

On peut observer les guides d'ondes très clairement. Ceux-ci paraissent de largeurs inégales et l'on observe bien la répartition irrégulière. On peut observer une pente résiduelle (environ 1 mrad), ce qui montre que l'échantillon n'est pas dans le plan de balayage. Il s'agit d'un problème classique en imagerie. Pour des images de quelques dizaines de micromètres de long, ce problème est moins sensible et est souvent traité a posteriori par calcul en enlevant le plan d'inclinaison avec le logiciel de traitement de données. Sur des distances plus longues, le problème peut être traité a posteriori, mais il est tout de même préférable de régler correctement le plan de balayage. En effet si l'angle est trop important, la course de l'actionneur piézoélectrique Z peut ne pas être suffisante pour rattraper le défaut.

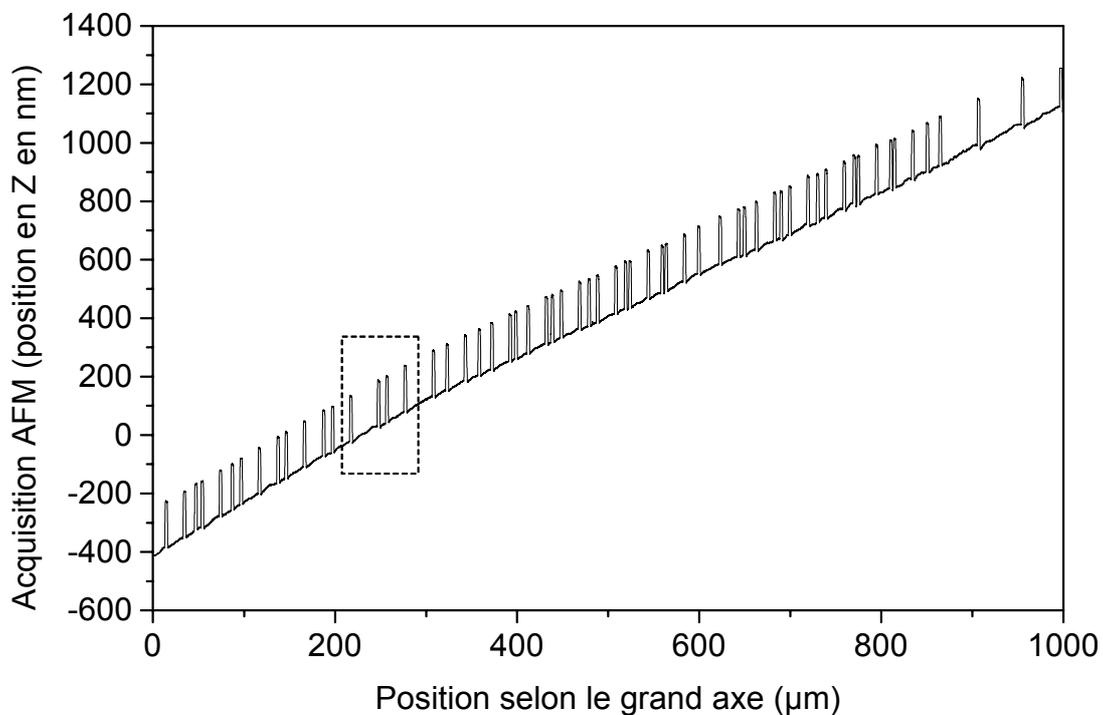


Figure 13 : Coupe de l'image précédente selon le grand axe

L'allure inégale des guides n'est pas une caractéristique intrinsèque mais vient là aussi de l'affichage qui ne peut être assez précis sur un aussi grand nombre de points. Pour s'en convaincre, deux agrandissements successifs sont reportés Figure 14 et Figure 15.

Le point important à noter, est que ces agrandissements sont effectués à partir du fichier initial, par simple sélection de la zone de données. Il ne s'agit pas de refaire un balayage plus fin comme cela est fait sur les AFM actuellement lorsqu'une zone intéressante est trouvée.

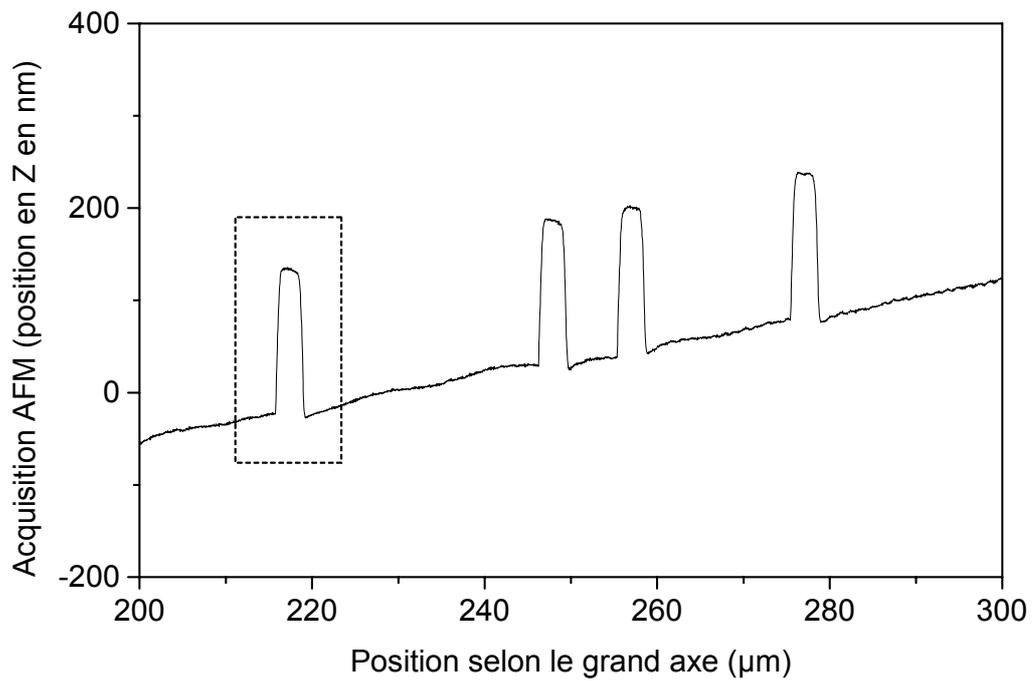


Figure 14 : Agrandissement de l'image précédente

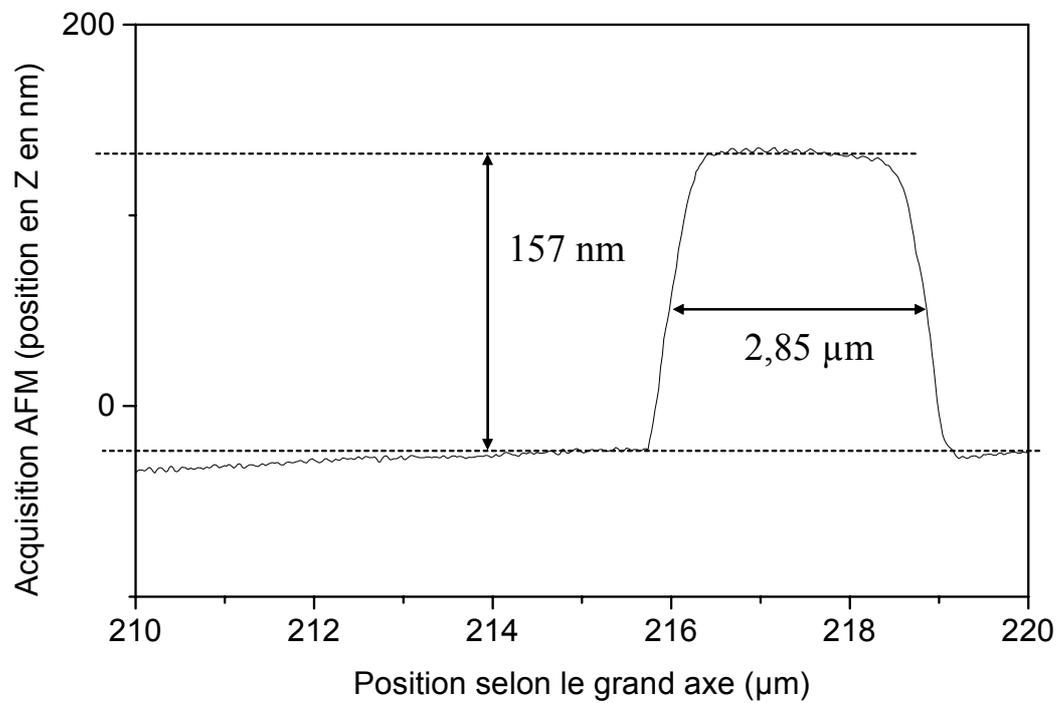


Figure 15 : Agrandissement sur un profil de guide

Enregistrer l'image de grande surface est donc long, mais **toutes les informations sont comprises dans le fichier enregistré**. On peut voir nettement sur la Figure 14 apparaître les guides d'ondes plus proprement. Si l'on veut alors faire des mesures statistiques, il devient indispensable de développer un logiciel spécifique afin d'automatiser les mesures. En effet traiter un tel flot de données par exemple pour mesurer finement la largeur ou la hauteur des guides est beaucoup trop fastidieux. Il apparaît donc indispensable de **développer en collaboration avec les utilisateurs, des logiciels performants de reconnaissance de motifs** capables de traiter l'image grande taille d'une manière automatique, traitement qui par habitude se fait manuellement sur les images actuelles de tailles raisonnables en imagerie. Ces reconnaissances de motifs doivent pouvoir se faire avec des critères métrologiques paramétrables (définition des paramètres de reconnaissances, mesures statistiques, compensation des erreurs systématiques...).

4. CONCLUSION

4.1. Résumé et bilan

Une platine porte-échantillon a été mise en œuvre, susceptible d'être fonctionnelle dans des applications de microscopie à champ proche et de lithographie, deux domaines des nanotechnologies où la problématique de répétabilité nanométrique sur des courses millimétriques s'avère importante pour ouvrir de nouvelles études.

Les premiers efforts se sont portés surtout sur l'application pour la microscopie en champ proche. Les premiers résultats très prometteurs ont montré la capacité à effectuer une acquisition d'une image de grande taille avec une bonne résolution. Ces premiers résultats ont permis d'en déduire les problèmes à résoudre pour obtenir un prototype pleinement opérationnel.

Ces travaux ont été menés grâce à une ACI nanosciences dont je suis le coordinateur. Un financement Sésame (région Ile-de-France) a permis l'achat d'un microscope AFM en 2005.

Cette activité est le travail de A. SINNO que j'encadre partiellement, de S. XU lors de son stage de master et de sa thèse que j'encadre pleinement lorsqu'elle est en France. Certains points particuliers ont eu l'aide de M. WAKIM, car certaines parties sont fortement corrélées à sa thèse portant plutôt sur la balance du watt.

4.2. Perspectives

A court terme, il s'agit de nombreuses améliorations techniques à apporter pour rendre le logiciel qui pilote le système plus robuste et plus fonctionnel. Ceci devrait permettre d'aboutir rapidement à une deuxième série de mesures au LNIO qui devraient être de plus grandes tailles et de meilleures résolutions. Un effort de compacité reste à faire, notamment par la finition de la nouvelle source optique. Ce point devrait permettre de démarrer plus efficacement l'intégration dans un MEB pour les applications en lithographie.

A moyen terme, des algorithmes d'automatique plus performants permettront d'envisager des déplacements plus robustes et plus rapides, utiles surtout en lithographie.

Début 2006, des contacts ont été amorcés avec l'entreprise allemande RAITH GmbH, meneur européen en développement et distribution de matériel de lithographie électronique. RAITH GmbH, apporte son soutien à ce projet.

A long terme, on peut songer à étendre ce type de platine porte-échantillon à d'autres domaines car l'intérêt pour le système de contrôle développé dans ce cadre, ne se limite pas à la lithographie par faisceau d'électrons. On peut penser à la lithographie UV qui nécessite des résolutions sub-nanométriques pour être pleinement intéressant et aux systèmes de gravure par faisceaux d'ions focalisés.

On peut songer à étendre la course utile, mais ce n'est toutefois pas un objectif prioritaire dans notre cas compte tenu des choix effectués à la base de ce projet. Il est par contre

intéressant d'étendre l'aspect métrologique à l'axe Z afin de pallier les défauts de l'acquisition actuelle des images (conversion tension – distance selon l'actionneur piézoélectrique au lieu d'une mesure traçable). De nombreux besoins émergent également dans le domaine de la nano-manipulation [32].

CHAPITRE 4

CONTRÔLE D'UNE VITESSE

Ce chapitre détaille l'application de contrôle nanométrique d'une vitesse. Ceci s'est effectué dans le cadre du projet balance du watt qui regroupe plusieurs laboratoires de métrologie. Il s'agit d'une expérience assez vaste, c'est pourquoi je commence par un rappel du contexte et de la problématique qui a initié ce projet.

1. MISE EN CONTEXTE

1.1. Contexte métrologique de la balance du watt

Le kilogramme est le dernier étalon matériel du Système International d'unités (SI). Depuis 1889 (1^{re} CGPM – Convention Générale des Poids et Mesures) il est défini tel que [33] :

« Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme ».

L'étalon de masse est ainsi le prototype international du kilogramme qui est actuellement gardé au BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) à Sèvres sous trois cloches de verre (Figure 16). Il a la forme d'un cylindre en platine iridié dont la hauteur est égale au diamètre (environ 39 mm).



Figure 16 : Prototype international du kilogramme [photo BIPM]

Un des inconvénients majeurs de cette définition est que la masse du matériau composant l'étalon est sujette à des variations au cours du temps. L'usure de l'étalon est liée à son utilisation. Les nettoyages et lavages tendent à diminuer irrémédiablement sa masse alors que la contamination de sa surface par les poussières et la condensation tendent à l'augmenter. La stabilité du prototype n'est donc pas garantie et puisque les variations ne peuvent pas être correctement quantifiées, la pérennité de la définition n'est plus assurée.

Ces phénomènes ont été observés lors d'inter-comparisons périodiques d'un ensemble de prototypes nationaux [34][35]. Des comparaisons entre l'étalon international du BIPM et des étalons provenant de pays signataires de la Convention du Mètre menées depuis 1889 ont montré une dérive à long terme de l'ordre de 3 µg/10 ans (Figure 17).

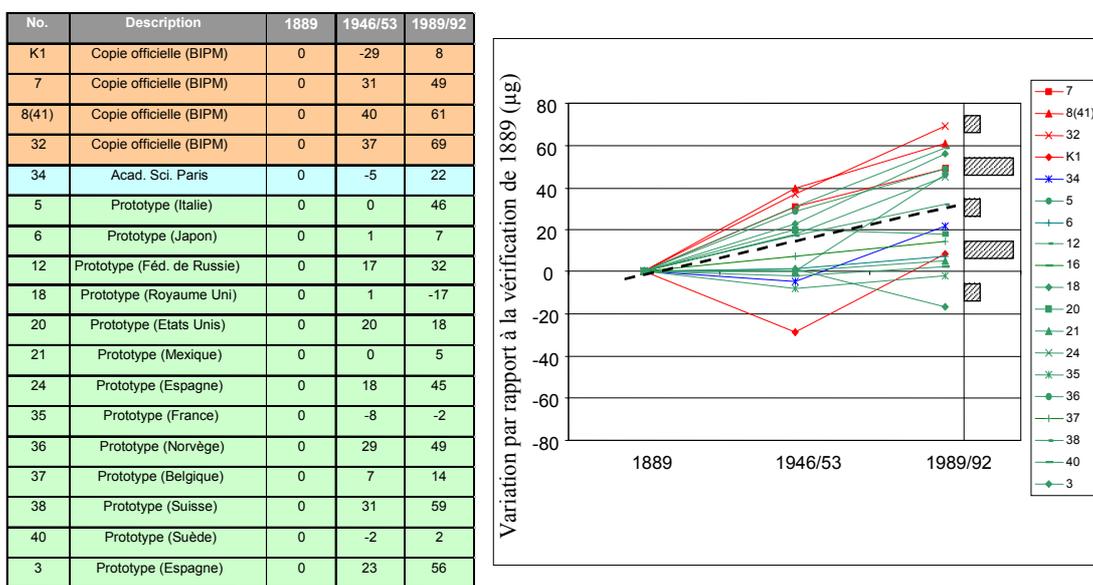


Figure 17: Évolution de la masse des prototypes en Pt/Ir [Graphique BIPM]

Les valeurs des copies sont contrôlées par comparaison par rapport au prototype international du kilogramme, nommé « K ». Le fait qu'un seul étalon assure la traçabilité de la masse à l'échelle mondiale est contradictoire à la notion de pérennité et de fiabilité. De plus, l'incertitude relative sur la masse se répercute sur les trois autres unités de base du SI (la mole, la candela et l'ampère) ainsi que sur la définition des grandeurs électriques telle que le volt et l'ohm, et également sur les valeurs de certaines constantes fondamentales de la physique comme la constante de Planck. En 1990, sont apparues des références standards pour le volt et l'ohm basées respectivement sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. Ces définitions reposent sur les valeurs conventionnelles K_{J-90} et R_{K-90} représentant respectivement la constante de Josephson (estimateur du rapport $2e/h$) et la constante de Von Klitzing (estimateur du rapport h/e^2) [36].

Depuis, toutes les autres grandeurs électriques sont mesurées en fonction de ces deux références, permettant une amélioration de presque deux ordres de grandeur des mesures électriques. Compte-tenu de l'écart existant entre l'incertitude relative des constantes K_J

($1\sigma = 4 \times 10^{-7}$) et R_K ($1\sigma = 2 \times 10^{-7}$) dans le Système International d'unités, et la reproductibilité relative des effets Josephson ($\sim 10^{-11}$) [37][38] et Hall quantique ($\sim 10^{-10}$) [39][40], ainsi que de l'évolution des besoins en matière d'exactitude sur les grandeurs électriques, il apparaît nécessaire d'améliorer les incertitudes mentionnées ci-dessus. Une expérience du type balance du watt constitue une alternative pour réduire ces incertitudes. En comparant des puissances mécaniques et électriques, elle conduit à la détermination directe du produit $R_K K_J^2$, estimateur de la constante de Planck.

Pour s'affranchir de ce problème, il est devenu nécessaire de redéfinir l'unité de masse avec une définition qui serait indépendante du temps et du lieu. Il est pertinent de relier la définition de l'unité à une constante fondamentale ou à une propriété atomique. La nouvelle définition du kilogramme doit être considérée dans la mesure où il serait possible de relier l'unité de masse à une constante fondamentale ou une propriété atomique avec une incertitude relative d'au moins 10^{-9} .

L'expérience dite *balance du watt* est certainement la voie la plus prometteuse. Le principe a été proposé en 1976 par B. Kibble du National Physical Laboratory (NPL). Il est basé sur la comparaison d'une puissance mécanique avec une puissance électrique.

Des projets *balance du watt* ont été initiés dans différents laboratoires de métrologie de par le monde : au Royaume Uni (National Physical Laboratory – NPL) [41][42], aux Etats-Unis (National Institute of Standards and Technology - NIST) [43][44][45], en Suisse (Metrologie und akkreditierung schweiz – METAS) [46][47]

[48], et plus récemment en France au LNE et au BIPM (Sèvres). Chacune a ses propres spécificités de réalisation. Nous ne détaillerons que les caractéristiques principales concernant la balance du watt du Laboratoire National d'Essai.

Les mesures les plus abouties actuellement sont celles du NIST qui ont conduit à la détermination de la constante de Planck avec une incertitude de 5×10^{-8} [49]. À tel point que des propositions récentes pour une nouvelle définition du kilogramme étalon sont mises en avant pour le prochain CIPM (Comité International des Poids et Mesures - 2011), sans attendre de mesures comparatives issues des autres expérimentations, les autres balances n'étant pas encore pleinement opérationnelles à ce niveau d'incertitude [50][51][52].

1.2. Divers projets en développement

La caractérisation de la stabilité de l'étalon de masse ne pourra être effectuée que par comparaison à des grandeurs invariantes dans le temps. Deux catégories d'expériences sont explorées pour aboutir à une nouvelle définition du kilogramme. La première raccorde l'unité de masse à une quantité d'atomes et la seconde à des grandeurs électriques. Je ne fais que les citer ici, pour situer la balance par rapport à ces projets.

Dans la première catégorie, on peut citer le *projet Avogadro ou boule de silicium*. Il s'agit sans doute de l'expérience la plus concurrentielle par rapport à la balance du watt. Le projet Avogadro se propose de relier le kilogramme à un nombre fixé d'atomes de silicium. La masse d'une sphère en silicium est reliée à la constante d'Avogadro. Cette expérience est actuellement limitée par des problèmes d'impuretés et de défauts de structure du monocristal de silicium ainsi que par la détermination de la masse molaire du silicium qui possède trois

isotopes naturels. L'incertitude relative atteinte à ce jour est de l'ordre de 10^{-7} [53][54][55], mais des améliorations sur le cristal de silicium sont prévues à court et moyen terme.

On peut également citer le projet *Accumulation d'ions*. Cette expérience commencée à la Physikalisch-Technische-Bundesanstalt (PTB) en Allemagne, consiste à relier une masse macroscopique d'or m à un nombre d'atomes de même espèce [56][57] mais l'incertitude relative obtenue pour ce genre d'expérience est de l'ordre de 10^{-3} ce qui la rend peu compétitive.

Dans la deuxième catégorie, on peut citer (autre que la balance du watt) *le projet de lévitation magnétique*. L'expérience utilise la force agissante sur un corps ayant des propriétés diamagnétiques dans un champ magnétique non uniforme. L'idée a été évoquée pour la première fois par Sullivan et Frederich [58][59] comme une possibilité pour réaliser l'ampère. L'expérience a quelques difficultés métrologiques à surmonter. Cette étude a été menée dans le National Research Laboratory of Metrology (NRLM) au Japon et dans le D I Mendelejev Research Institute of Metrology (VNIIM) en Russie. Les incertitudes relatives obtenues actuellement par le groupe NRLM sont de l'ordre de 10^{-6} [60].

On peut citer également *la balance du volt*. Une force électrostatique agissant entre les plaques d'une capacité C est comparée au poids mg de la masse étalon m , où g est l'accélération gravitationnelle. En utilisant cette approche, Funck et Sienknecht de la PTB [61] ont atteint une incertitude standard relative de $6,3 \times 10^{-7}$ dans la détermination de h . Des expérimentations ont également été effectuées à l'université de Zagreb. Une incertitude relative de $3,5 \times 10^{-7}$ dans la détermination du volt a été obtenue en 1987. Bego *et al* a proposé une configuration améliorée qui a mené à une proposition pour une nouvelle balance de 100 kilovolts de tension [62][63]. Avec les techniques actuelles, la balance de tension ne promet pas d'atteindre une incertitude en dessous de 10^{-7} . Les problèmes principaux sont la haute tension exigée dans l'expérience, la dépendance tension/fréquence de la capacité et les imperfections mécaniques de la balance.

1.3. Principe de la balance du watt

Le principe proposé par B.P. Kibble [41] repose sur une expérience qui se déroule en deux phases : une phase statique et une phase dynamique. Des détails peuvent être trouvés en annexe sur le fonctionnement complet. Pour ce qui nous intéresse ici, durant la phase dynamique, il est nécessaire de déplacer une masse, d'environ un kilogramme, à une vitesse constante de 2 mm.s^{-1} selon l'axe gravimétrique. La vitesse doit être maîtrisée avec une incertitude relative inférieure à 10^{-9} .

1.4. La balance du watt du Laboratoire National d'Essai

Le BNM-LNE (Bureau National de Métrologie – Laboratoire National de métrologie et d'Essai) a initié ce projet en 2000 (chef de projet : Gérard GENEVÈS). S'agissant d'un projet fortement multidisciplinaire, cela réunit plusieurs laboratoires :

- ✓ le Laboratoire National d'Essai (LNE),

- ✓ l'Institut National de Métrologie (ex BNM-INM),
- ✓ le laboratoire SYstèmes de Références Temps – Espace (ex BNM-SYRTE).

Diverses collaborations avec des laboratoires non LNE ont été menées :

- ✓ le Laboratoire de Génie Électrique de Paris (LGEP) pour les aspects magnétiques,
- ✓ le laboratoire des Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie (SATIE), qui travaille également sur les aspects magnétiques,
- ✓ le LIRIS/LISV qui travaille en étroite collaboration avec le LNE pour le contrôle et la mesure du positionnement de la bobine pendant la phase dynamique.

Un bâtiment a été construit sur le site de Trappes du LNE pour accueillir le prototype de la balance. Une salle spécifique lui est dédiée, isolée des perturbations mécaniques et électromagnétiques externes. Des détails sur la conception et la réalisation de la balance peuvent être trouvés dans la référence [66]. Un schéma du prototype en cours de réalisation est représenté sur la Figure 18. Citons quelques points spécifiques et l'apport des différentes équipes travaillant sur le projet :

- ✓ des études (chimiques, mécaniques, magnétiques) ont été engagées par l'équipe Masse de l'INM et le Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne (LPUB) de Dijon pour déterminer le meilleur alliage qui pourrait constituer la masse étalon
- ✓ [67][68][69]. Ce point est important car la pérennité de l'étalon dépend des caractéristiques physico-chimiques du matériau utilisé,
- ✓ l'induction magnétique permanente – de valeur égale à 1 T – est réalisée par un aimant permanent. Des modélisations de l'ensemble du circuit magnétique ont fait l'objet d'études par le SATIE (ENS Cachan) et le LGEP (Orsay) [70],
- ✓ la bobine cylindrique fait environ 260 mm de diamètre. Le courant nominal pendant la phase statique vaut 5 mA et la tension induite pendant la phase dynamique 1 V. Toute l'électronique concernant la source de courant faible bruit et les mesures par effet Josephson et effet hall sont à la charge du LNE,
- ✓ la valeur de l'accélération g est mesurée par un gravimètre à atomes froids (SYRTE de l'Observatoire de Paris [71]) situé dans une salle proche de la balance,
- ✓ un fléau a été développé à l'INM - LNE,
- ✓ un système de guidage à base de lames flexibles déformables a été développé au LNE en collaboration avec l'ENSAM de Lille (partie de thèse en cours de F. VILLAR du LNE). Son but est d'assurer le guidage mécanique du mouvement de translation pendant la phase dynamique pour obtenir une excellente rectitude (les photos Figure 19 et Figure 20 montrent ce système),
- ✓ la mesure et l'asservissement en vitesse de la bobine a été l'objet d'une étude au LIRIS qui va être détaillée dans la suite de ce chapitre.

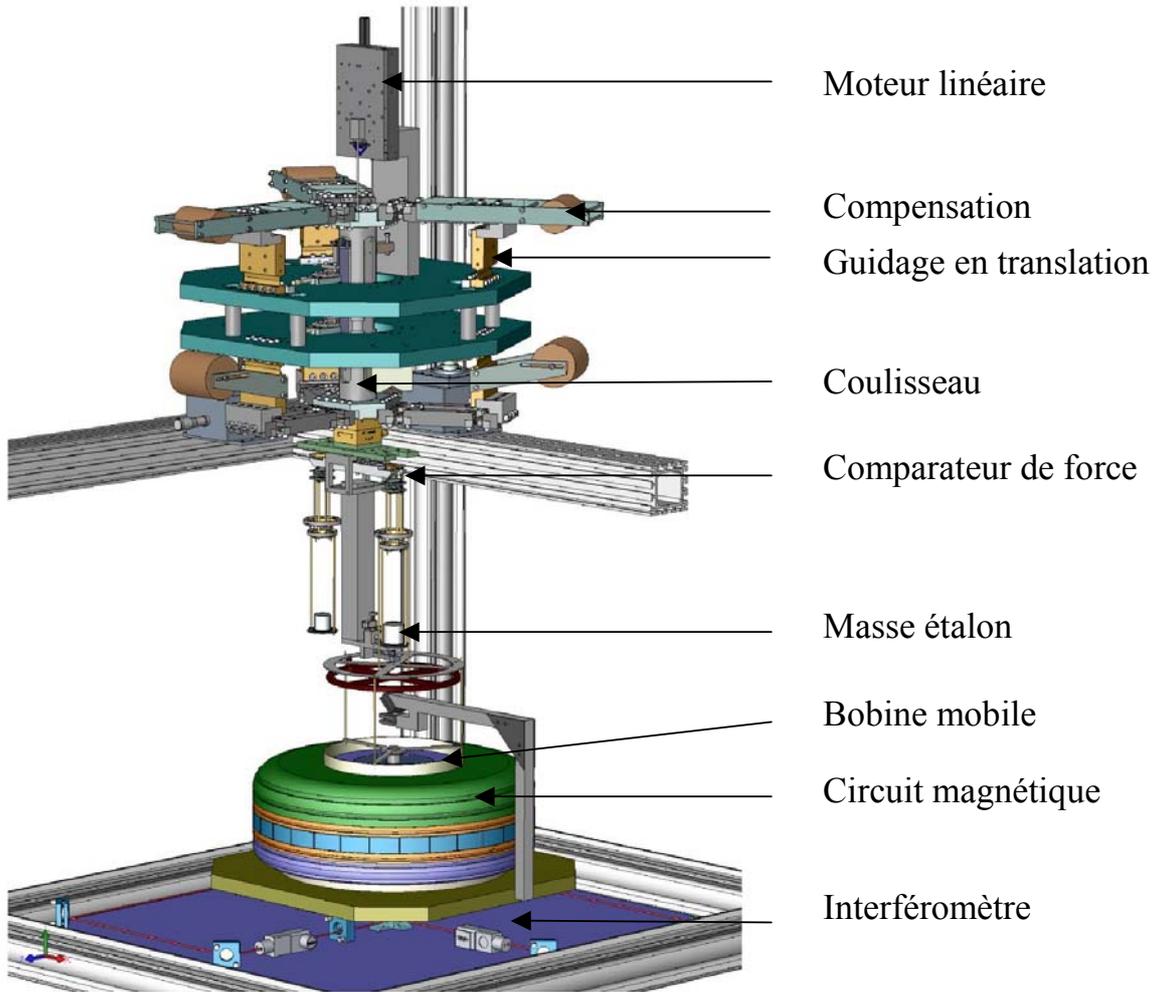


Figure 18 : La balance du watt du LNE [réf LNE]

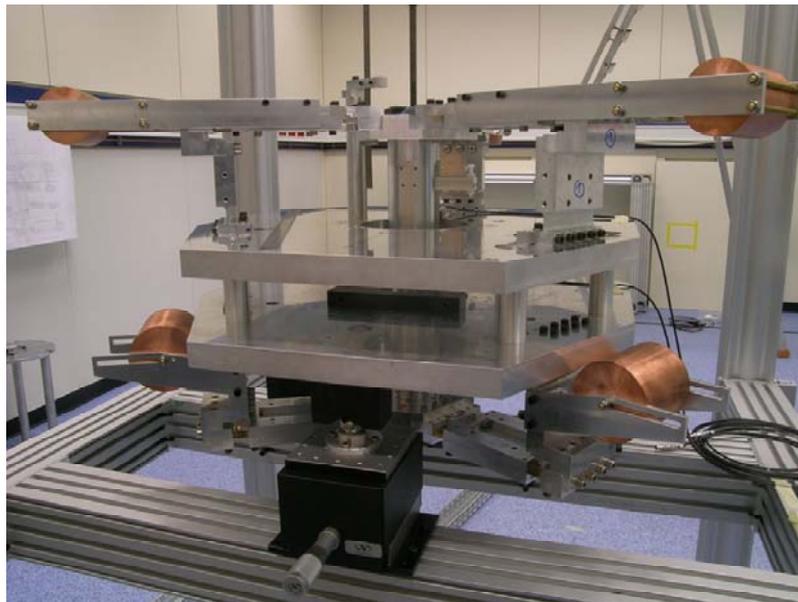


Figure 19 : Prototype du système de guidage (photo LNE)

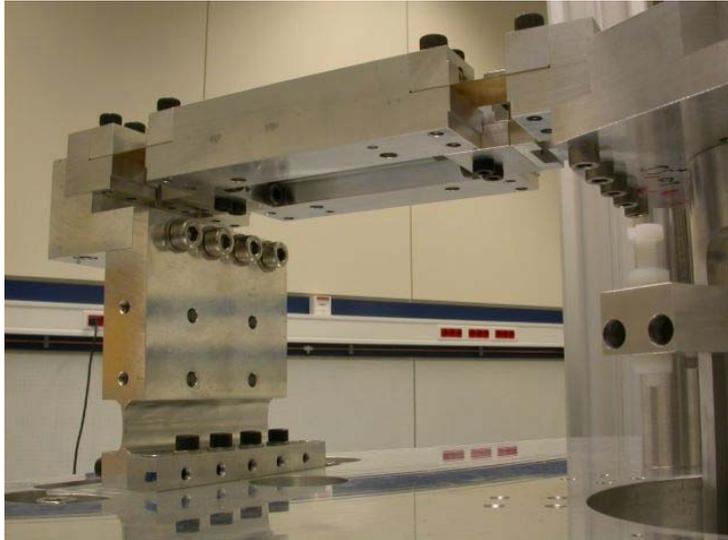


Figure 20 : Lame déformable (photo LNE)

1.5. Problématique du déplacement et du contrôle de vitesse

La masse de la bobine et de son support est d'environ un kilogramme. L'ensemble est déplacé selon l'axe gravimétrique à une vitesse constante de 2 mm.s^{-1} , sur une course utile de 60 mm (hors zone d'accélération et de décélération, cela correspond à la zone où le champ magnétique est constant de par le dimensionnement de l'aimant permanent). L'objectif sur l'instabilité en vitesse est de l'ordre de 10^{-9} en valeur relative. La vitesse de 2 mm.s^{-1} a été dimensionnée pour que la tension Josephson résultant soit optimisée (1 V, pleine échelle du réseau Josephson) ; elle n'est donc pas réellement modifiable.

On peut dégager les points à résoudre suivants :

- ✓ il est bien entendu primordial que la bobine soit positionnée avec une **mesure dimensionnelle traçable**. Pour cela, le recours à l'interférométrie est incontournable. Un interféromètre mesure donc la position et la vitesse par effet Doppler en permanence,
- ✓ l'interféromètre n'étant pas un capteur permettant un positionnement absolu, il est indispensable de prévoir une méthode pour aligner l'ensemble sur un **zéro absolu**,
- ✓ les **défauts de translation** dans les axes horizontaux doivent être mesurés. L'interféromètre est un interféromètre trois voies qui permet de mesurer la vitesse selon l'axe utile ainsi que le tangage et le lacet,
- ✓ comme on le verra par la suite, les principales limitations de l'interférométrie résident dans la qualité de l'alignement. Il est notamment sous-entendu dans le principe de la balance, que le vecteur vitesse est aligné avec le vecteur de la gravité. Il est indispensable que le déplacement soit d'une part rectiligne, d'autre part vertical d'une manière absolue. Pour cela, indépendamment du contrôle de la vitesse, un inclinomètre absolu est développé au LIRIS. Les inclinomètres commerciaux

disponibles peuvent atteindre un bon niveau de sensibilité, mais aucun ne fonctionne avec un principe absolu. Un principe original de mesure a été imaginé au LIRIS et fait l'objet d'une thèse (Karim OUEDRAOGO, en cours). Ce capteur est basé sur une cavité Fabry-Perot à double entrée/sortie. Dans ce projet pour ma part, je ne travaille que sur les parties asservissement des sources lasers et traitement du signal obtenu et non sur la partie optique qui est le cœur du système. Mon rôle d'encadrement sur cette thèse est donc mineur, je ne mentionnerai donc pas plus en détail cet inclinomètre dans la suite. Il va de soit toutefois qu'il s'agit d'un système corrélé avec la problématique du contrôle de la bobine.

1.6. Moyens mis en œuvre

L'activité balance du watt a débutée au LIRIS début 2002 par des premiers travaux sur la partie interférométrique en collaboration avec Patrick JUNCAR du BNM-INM (maintenant intégré au LNE).

Le matériel nécessaire a été financé par le LNE. Deux conventions ont été mises au point entre le LNE, le CNAM de Paris et le LIRIS. Une première convention initiale entre l'UVSQ et le CNAM/BNM-INM à partir de 2001. Une seconde convention entre l'UVSQ/LIRIS et le LNE à partir de 2003, cette convention ayant été prolongée jusqu'en 2008 (et élargie depuis cette année à l'activité AFM-métrologique).

Les expérimentations ont été réalisées dans les locaux de Versailles à partir du moment où nous avons pu disposer d'une salle d'expérimentation. Depuis le deuxième semestre 2005, les tests et le développement intégrés au système de guidage de la balance se font sur le site de Trappes au LNE, dans la salle réservée au prototype de la balance.

Le travail concernant le déplacement nanométrique décrit ci-dessus a été le fruit de la thèse de Darine HADDAD, démarrée en mai 2002 et soutenue le 15 décembre 2004. Un certain nombre d'illustrations et de descriptions sont issues de son mémoire, je l'en remercie. D. HADDAD est actuellement post-doctorante au LNE pour travailler plus particulièrement sur le fléau de la balance. Marwan WAKIM a pris le relais sur son travail depuis novembre 2004, dans le cadre d'un financement CIFRE avec le LNE.

2. PRINCIPE DU CONTRÔLE DE LA VITESSE

2.1. Principe issu du contrôle de position

Mesurer ou contrôler une vitesse ne peut s'appliquer évidemment à une vitesse instantanée car toute mesure suppose un temps d'intégration non nul. Il s'agit donc de mesurer une vitesse moyenne sur un intervalle de temps τ . On peut définir une vitesse moyenne comme une différence de position moyenne Δp pendant cet intervalle de temps τ . Si cet écart de position et cet intervalle de temps sont très petits par rapport à l'ordre de grandeur de la vitesse, on pourra estimer que l'approximation de la vitesse est assez bonne.

Le principe adopté est donc de maîtriser grâce à l'interférométrie des sauts de position parfaitement connus, répétés à des intervalles de temps parfaitement maîtrisés, à une cadence très bien connue. Si le système mécanique qui contrôle l'objet soumis à ces sauts répétitifs correspond correctement aux exigences de rectitude, alors la réalisation du mouvement est effectuée avec une vitesse moyenne ayant une très bonne stabilité.

Pour cela, nous pouvons reprendre le raisonnement qui a été développé au chapitre concernant le nano-positionnement. Reconsidérons la Figure 5.

La vitesse est la pente de la courbe. Son incertitude dépend de celle sur le pas Δp d'une part, et sur l'intervalle de temps de celui-ci τ d'autre part. Si l'on considère que le cadencement des sauts de position est maîtrisé grâce à un système synchronisé sur un étalon de fréquence, l'incertitude sur τ peut être négligeable ($< 10^{-10}$). Nous avons vu au chapitre précédent que l'incertitude sur les pas pouvait être très faible (quelques 10^{-9} en valeur relative). La pente de la courbe est égale à la vitesse de déplacement v du miroir mobile. On montre que l'incertitude standard relative sur la vitesse peut se mettre [7] sous la forme :

$$\frac{\sigma_v}{\bar{v}} = \frac{2\sqrt{3} \times \sigma_{\Delta p} \times \sqrt{\Delta p}}{D^{3/2}} \quad (4)$$

où (\bar{v}, σ_v) et $(\overline{\Delta p}, \sigma_{\Delta p})$ représentent respectivement la valeur moyenne et l'incertitude-type sur la vitesse et la position, et D la course totale de déplacement. Par exemple pour atteindre une incertitude relative de 10^{-9} , le déplacement doit avoir une course minimale de 1,5 mm. Dans le cas de la balance du watt, la course utile est nettement supérieure. La relation montre également que nous avons intérêt à ce que les sauts de position soient petits et que l'incertitude-type sur la position - qui dépend de la qualité de la boucle d'asservissement et de la résolution de l'interféromètre - soit minimale.

2.2. Contrôle et mesure de la vitesse

Il est important dans le cas de la balance du watt de mesurer par plusieurs moyens la vitesse afin de recouper l'information. Le principe est issu de celui présenté au chapitre 2 (Figure 1) avec une partie ajoutée pour mesurer la vitesse :

- ✓ le signal de sortie de l'interféromètre est divisé en deux par un coupleur. Une partie est toujours utilisée pour l'asservissement de l'actionneur piézoélectrique, l'autre partie est envoyée vers un second mélangeur à diodes pour être démodulé,
- ✓ ce signal démodulé par le signal de référence peut être envoyé vers des appareils de mesure adéquats : un analyseur de spectre FFT (Fast Fourier Transform), ou un compteur de fréquence. L'analyseur FFT est un SR785 Stanford. Sa bande passante est de 100 kHz (pour les vitesses envisagées de l'ordre de 2 mm.s^{-1} , la fréquence Doppler est de l'ordre de 12 kHz). Le fréquencemètre est le même que celui utilisé dans la caractérisation de la carte haute fréquence vu au chapitre 3 (Agilent 53132A).

L'analyseur FFT n'est pas utilisé en régime permanent pour mesurer finement la fréquence Doppler mais pendant les étapes de caractérisation du montage. En parallèle, le châssis Zygo fournit toujours la position en temps réel. Toutefois, la limitation de la bande passante de mesure liée à l'interface avec le PC ne permet pas de calculer la régression linéaire donnant la vitesse avec une résolution suffisante. Même si à terme ces deux mesures seront comparatives dans l'expérience de la balance du watt, la mesure de la fréquence Doppler par le fréquencemètre est considérée comme la mesure de référence.

L'actionneur grande course est un moteur linéaire Aerotech, programmée pour évoluer avec une vitesse de 2 mm.s^{-1} . Une fois en régime établi, l'asservissement de l'actionneur piézoélectrique est lancé pour asservir la vitesse moyenne. La fréquence de commande correspondant aux sauts de phases à effectuer pour que l'actionneur piézoélectrique fonctionne autour de sa position centrale peut être calculée par la relation :

$$f_c = \frac{v}{\Delta p} \quad (5)$$

où v est la vitesse de translation du miroir mobile et Δp la valeur du pas utilisé. La fréquence Doppler se calcule par la relation :

$$f_{Doppler} = 4 \times f_c \times \frac{\Delta p}{\lambda} \quad (6)$$

Pour une vitesse de 2 mm.s^{-1} , et un Δp égal à $4,945\,246\,312 \text{ nm}$ on obtient une fréquence de commande égale à $404\,428,793 \text{ Hz}$ et une fréquence Doppler égale à $12\,638,399\,781 \text{ Hz}$. En pratique, la valeur de la fréquence de commande programmée sur le générateur numérique (DDS) est légèrement différente : l'horloge interne qui cadence le déplacement du moteur linéaire n'est pas synchronisée avec la base de temps du DDS, le codeur du banc n'est pas parfaitement étalonné par rapport à l'interféromètre, et enfin les expériences sont réalisées dans notre environnement de salle de laboratoire à l'air. La fréquence d'inhibition est affinée au hertz près par un processus de réglage itératif afin que l'actionneur piézoélectrique fonctionne au mieux autour de son point de repos nominal.

Si on remplace Δp par sa valeur ($\Delta p = \lambda / (4 \times 32)$) dans l'équation précédente, et la longueur d'onde λ par c / f_{Laser} (c célérité de la lumière et f_{Laser} la fréquence optique), on trouve la relation suivante :

$$v = c \times \frac{1}{128} \times \frac{f_c}{f_{Laser}} \quad (7)$$

Cette relation montre que la vitesse v est raccordée à la constante c et ne fait donc intervenir ni l'unité du mètre ni celle de la seconde. Les techniques de mesure de rapport de fréquences actuelles par la méthode des peignes de fréquences peuvent ainsi permettre d'obtenir des exactitudes extrêmes [72].

Dans les mesures préliminaires, nous avons utilisé le déclenchement interne pour synchroniser les mesures du fréquencemètre. Le déclenchement externe est moins performant mais satisfaisant tout de même pour l'objectif fixé. Dans le prototype de la balance, un système de comptage et de synchronisation permettra de synchroniser les mesures de fréquence Doppler et les mesures de tension Josephson ce qui permettra de corréler à une position donnée toute les mesures.

2.3. Résultats obtenus pour un miroir mobile horizontal

La plupart des résultats présentés ici sont ceux de la thèse de D. HADDAD et publié dans [7] [P7][P12]. Des améliorations ont toutefois été obtenues, par le travail de M. WAKIM qui a pris la relève, notamment pour la Figure 21 dont les résultats sont issus de mesures effectuées en mai 2005.

Une première visualisation de la qualité de l'asservissement peut se voir par l'analyse FFT du signal Doppler. Cette procédure a été utilisée pour montrer l'efficacité de la technique proposée en visualisant l'affinement de la raie à la fréquence Doppler ainsi que l'amélioration du rapport signal à bruit.

Une méthode plus rigoureuse consiste à calculer la variance d'Allan du signal. Dans cette étape, le signal démodulé est envoyé vers le compteur de fréquence HP53132A et la stabilité de la fréquence est calculée en terme de variance d'Allan, outil conventionnel pour caractériser un oscillateur en fréquence [73][74]. Le compteur est piloté pour mesurer en automatique la fréquence Doppler. Le temps d'acquisition pour un point est de 1 s, le compteur échantillonne le maximum de points sur la course de déplacement. Ce nombre de points dépend évidemment de la vitesse. Puis l'expérience est reconduite immédiatement un certain nombre de fois. Le nombre total de points N_T est le produit du nombre de trajets faits par le nombre de points qu'on peut mesurer lors du déplacement de la platine. Les méthodes de regroupement des points de mesures permettent ainsi d'estimer l'écart type d'Allan sur des temps longs qui dépendent alors de N_T . Notons que l'estimation de la variance d'Allan suppose que le temps mort entre les échantillons est négligeable, ce qui n'est pas tout à fait le cas ici. Nous avons choisi quand même cette technique puisqu'elle est conventionnellement utilisée dans le cadre de la métrologie des fréquences pour caractériser leurs stabilités. D'autres analyses à base de calcul de variances classiques ont été effectuées et ont abouti à des résultats identiques. La Figure 21 montre les résultats les plus significatifs obtenus. Par rapport à la courbe de [P7], un facteur 4 d'amélioration a été obtenu, ce qui a nécessité d'importants efforts, notamment au niveau de l'asservissement.

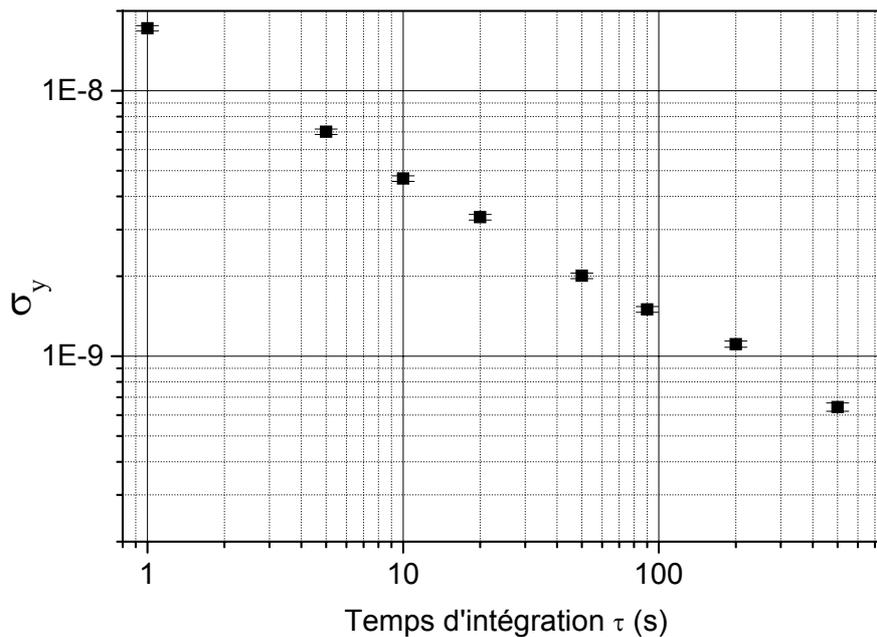


Figure 21 : Instabilité relative de la fréquence Doppler à 2 mm.s^{-1} ($f_{\text{moyen}} = 12,6 \text{ kHz}$)

Nous pouvons souligner les points suivants :

- ✓ la pente de $\sigma_y(\tau)$ est en $1/\sqrt{\tau}$, caractéristique d'un bruit blanc de fréquence [74],
- ✓ le plancher de bruit n'est pas encore atteint. Notons qu'il est difficile d'aller plus loin dans les conditions d'expérimentation où l'on se trouve (vibrations trop fortes, variations d'indice de réfraction de l'air,...),
- ✓ la stabilité de la vitesse à 2 mm.s^{-1} en terme d'écart type d'Allan franchi la limite de 10^{-9} au bout de 200 s.

Le cahier des charges de la balance ne spécifie pas de temps d'intégration pour atteindre cet objectif, mais si l'on compare aux performances des mesures associées (tension Josephson, gravimétrie, résistance Hall), ce ne sera pas la mesure Doppler qui limitera.

2.4. Extension à une masse en déplacement vertical

Les résultats présentés ci-dessus ont été obtenus sur un ensemble ne comportant qu'un miroir mobile monté sur une platine de translation horizontale. L'objectif de la balance est bien de déplacer une bobine, ayant une masse approximative d'un kilogramme si l'on inclut son support, sur une direction verticale.

Ces premiers tests ont toutefois permis de dimensionner les éléments ; moteur linéaire, actionneur piézoélectrique et électronique d'asservissement et de démontrer les qualités intrinsèques de la méthode.

Le système de guidage de la balance n'étant pas disponible une fois ces premiers travaux effectués, nous avons développé un banc de test mécanique au LIRIS pour tester le déplacement vertical d'une bobine de test.

La platine de translation a été surélevée. Deux poulies à palier à air assurent le renvoi dans la direction verticale. Un système de guidage à palier à air permet de limiter le tangage et le lacet. Différents réglages de positionnement ont été insérés. Le point important est que l'actionneur piézoélectrique agit en compression. Les pièces mécaniques sont percées au centre, ce qui permettra à terme de réaliser une mesure interférométrique par le dessous pour la fréquence Doppler, et par le dessus pour le tangage ou le lacet grâce à un miroir double face. La bobine elle-même est une bobine de test réalisée sur un support en époxy au LNE. L'ensemble à une masse de 1 kg.

Des tests similaires à ceux décrits dans les paragraphes précédents ont été effectués. Le contrôle en position de cette masse s'avère satisfaisant. **Des sauts de position** de 4,945 nm ont été réalisés avec un asservissement tout à fait similaire mais bien évidemment avec des réglages différents.

L'asservissement en vitesse n'a pu être mené à bien correctement. La salle d'expérience du LIRIS ne bénéficie pas du tout d'un environnement protégé comme l'est la salle au LNE. De très nombreuses vibrations viennent perturber le marbre sur lequel est fixé l'ensemble. L'asservissement de vitesse doit alors compenser de fortes perturbations et l'actionneur piézoélectrique peut saturer rapidement, ce qui aboutit à de nombreux écarts ponctuels sur les mesures de vitesse.

Une solution aurait été d'augmenter la course de l'actionneur. En effet jusqu'à présent nous travaillons à **faible tension** (± 15 V). Il est néanmoins indispensable dans le cas de la balance de s'assurer que le cristal piézoélectrique ne s'échauffe pas pour ne pas perturber thermiquement l'équilibre local de la balance. Or il est bien connu que les cristaux piézoélectriques voient leur température augmenter en fonction de la fréquence et de l'amplitude du champ électrique appliqué. Il est donc exclu de le faire fonctionner en haute tension pour augmenter la course de correction. Ces problèmes sont essentiellement liés d'une part aux mauvaises conditions environnementales au LIRIS, problèmes qui sont normalement fortement minimisés dans le bâtiment du LNE, et d'autre part au système de guidage qui ne présente pas des caractéristiques aussi bonnes que le système à lame déformable développé au LNE. Nous avons donc décidé de mettre en attente des tests plus poussés.

2.5. Mise en application sur le prototype de la balance

Depuis fin 2005, le prototype de guidage à lame flexible est disponible au LNE. Les tests en horizontal ont permis de dimensionner l'actionneur principal. Nous avons opté pour un moteur commercial Aerotech ATS150 à guidage à billes. Un système de fixation et de coulisseau permet d'assurer le lien avec le système de guidage et de permettre ainsi le déplacement vertical.

L'ensemble a été monté sur le prototype dans la salle balance. Des premiers tests récents de mesures de vitesse font apparaître que les performances du système de guidage sont très satisfaisantes. Toutefois, des vibrations de l'ensemble de la structure rendent le réglage de l'asservissement délicat et ne permettent pas une bonne homogénéité de la vitesse sur toute la

dynamique. **Le rôle des vibrations de la bobine semble être prépondérant.** En effet celle-ci est assez volumineuse et a tendance à vibrer latéralement. Il est probable de plus que dans le futur, la bobine étant insérée dans le circuit magnétique (non encore disponible à ce jour) sera soumise à des forces latérales.

Pour pallier ce problème, le travail actuel de M. WAKIM porte sur la conception d'une pièce de guidage pour l'actionneur piézoélectrique qui devrait permettre d'assurer un guidage local à la poussée de l'actionneur. Le dimensionnement de la précontrainte du cristal piézoélectrique permettra d'optimiser l'influence de l'asservissement.

2.6. Bilan métrologique

La stabilité long terme obtenue sur les bancs de tests horizontaux permet d'envisager des mesures d'exactitude et d'étudier d'une manière systématique les différentes sources d'erreurs. On peut distinguer trois grands types de sources d'erreurs : des erreurs d'origine optique (déformation du front d'onde, stabilité de la source laser, retours optiques, indice de l'air), d'origine mécanique (tangage, lacet, erreurs d'alignements), et d'origine électronique (bruit de phase, bruit d'asservissement, non-linéarité des mélangeurs) ou instrumentale (mesure par le voltmètre, synchronisation). Un bilan d'incertitude a été développé dans la thèse de D. HADDAD et poursuivi dans les travaux de M. WAKIM. Il n'est pas possible de les rappeler ici exhaustivement, on se reportera à [7] et

[75] à [84].

Dans notre environnement de laboratoire, l'erreur la plus significative est liée à l'indice de l'air. Dans le futur prototype de la balance, l'ensemble étant sous vide, le principal défaut est le défaut classique de toute méthode interférométrique c'est-à-dire l'alignement du faisceau par rapport à l'axe réel de déplacement. Le fait de travailler avec un interféromètre double passage assure une qualité de réglage qui permet d'obtenir aisément 10^{-7} en valeur relative, mais pour avoir mieux, il est nécessaire de passer par une phase de réglage spécifique.

2.7. Application à la mesure d'une longueur d'onde

Une méthode à deux lasers est envisagée et décrite en annexe (et dans [7]) car elle a conduit à une autre application et une publication.

Cette technique sera implantée sur la balance. Nous l'avons testée en prenant la problématique inverse ce qui a débouché sur une application de mesure de longueur d'onde inconnue par mesure comparative de fréquences Doppler. Ceci a fait l'objet d'un montage expérimental, de mesures et d'un article [P11]. Cette technique peut paraître assez lourde comparée aux *lambdamètres* existants, elle présente toutefois certains avantages, notamment d'être différente des principes des *lambdamètres* commerciaux qui fonctionnent typiquement par comptage de franges.

On peut noter ici que nous avons développé au laboratoire d'autres techniques originales de mesure d'une longueur d'onde inconnue, ce qui a fait l'objet d'un brevet en juillet 2006 [B2] et d'une publication soumise. *La mise en œuvre du dépôt de brevet nous a paru très pertinente car il s'agit d'une méthode originale qui peut conduire à un nouveau type de lambdamètre extrêmement compact, robuste et moins onéreux que les lambdamètres commerciaux actuels.*

3. CONCLUSION

3.1. Résumé et bilan

Depuis 2002, l'activité dite « balance du watt » a permis d'établir une dynamique de travail par le biais de conventions avec l'INM puis le LNE. Elle a permis de tester de nombreuses techniques, et de développer notamment toute la partie interférométrique, les techniques électroniques hautes fréquences ainsi que les techniques d'asservissement de position par actionneur piézoélectrique.

Des conventions de collaborations existent et permettent de pérenniser l'association avec le LNE. Cette convention a permis d'ouvrir les collaborations futures avec l'équipe nanométrie du LNE.

Cette activité a conduit à la soutenance de thèse de D. HADDAD, et la thèse CIFRE actuelle de M. WAKIM pour les parties déplacements.

Outre les résultats obtenus sur le contrôle de la vitesse, cela nous a permis d'ouvrir sur d'autres activités que le nanodéplacement : la thèse actuelle de K. OUEDRAOGO pour l'aspect capteurs angulaires et tiltmètres de grande exactitude, ainsi que des études sur des nouveaux types de lambdamètres.

3.2. Perspectives

A court terme, un effort reste à faire sur le guidage de l'actionneur piézoélectrique. Il est important que les perturbations rattrapées par cet actionneur soient les plus faibles possibles, ceci pour permettre de fonctionner à la tension de correction la plus basse possible pour éviter les problèmes thermiques. M. WAKIM développe actuellement un système optique pour réaliser une mesure d'une position de référence puisque l'interféromètre n'est qu'un capteur relatif. A terme, tous les cycles de mouvements de la bobine seront référencés par rapport à cette position qu'il est nécessaire de pouvoir repérer avec une répétabilité meilleure que 40 nm.

A moyen terme, l'intégration de l'ensemble va nécessiter d'importants efforts car l'encombrement de l'ensemble doit être contraint dans l'espace libre de l'enceinte à vide. La nouvelle source optique décrite au chapitre précédent devrait permettre de résoudre certaines contraintes.

A long terme, l'ensemble est dépendant du fonctionnement global de la balance. Des mesures sont espérées pour 2009.

CHAPITRE 5

SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Ma problématique de recherche depuis mon arrivée à Versailles concerne les déplacements de systèmes de translation macroscopiques, avec des *précisions* de positionnement nanométriques. Si l'on se penche sur les systèmes de déplacements existants, on s'aperçoit que de nos jours, *grande course* et *précision de positionnement* sont contradictoires.

Des techniques interférométriques associées à une électronique haute fréquence permettent de contrôler finement la position d'un objet d'une manière originale, en faisant appel à des techniques d'asservissement de phase connues en métrologie temps-fréquence. Cela permet d'assurer répétabilité et stabilité long terme.

Ces techniques sont particulièrement adaptées aux platines porte-échantillons. Les collaborations mises en place ont permis de développer un prototype dédié à la microscopie en champ proche. Dans un premier temps, l'effort s'est porté sur l'imagerie AFM. Des premières images de grandes tailles ont été obtenues, ce qui représente des résultats novateurs et qui pourront ouvrir la voie à de nouvelles caractérisations et applications métrologiques. Le contrôle de position peut se faire d'une manière très rapide et peut ainsi atteindre des vitesses de plusieurs millimètres par seconde ce qui a porté ses fruits dans le projet balance du watt du LNE.

Les évolutions envisagées et spécifiques aux champs d'applications mentionnés au cours des chapitres 3 et 4 ont été déjà abordés. Hors celles-ci, on peut ici résumer quelques autres points généraux. Il a été dit que notre problématique scientifique réside dans l'alliance étroite entre capteurs de précision, systèmes mécaniques de déplacement, et méthodes de contrôle.

D'importants efforts concernent encore actuellement :

- ✓ Les capteurs interférométriques : les méthodes originales décrites sont fortement dépendantes de l'interféromètre utilisé. Les défauts de linéarités liés à l'hétérodynage seront à terme problématiques, il est important de les résoudre. De plus, la puissance limitée de la source laser est elle aussi un facteur limitatif quand au rapport signal sur bruit qui oblige un temps d'intégration conséquent. Le développement de la source optique devrait permettre à moyen terme de fortement améliorer ces deux aspects.
- ✓ La recherche de capteurs moins précis mais plus compacts peut être une voie intéressante. Nous avons porté nos efforts sur un capteur à fibre optique [P6][P9], mais cela reste une préoccupation permanente.
- ✓ L'interférométrie possède également le défaut de ne pas être un capteur absolu, nous développons actuellement dans le cadre de la balance du watt ce type capteur. Je ne l'ai que peu décrit dans ce manuscrit car l'étude n'est que préliminaire actuellement. Les premiers résultats sont encourageants.

A plus long terme, d'autres problématiques sont envisagées :

- ✓ Une des voies que nous avons explorée en tant que capteur est l'ellipsométrie [P4][P8][B2]. Cette voie très prometteuse devrait être approfondie pour aboutir à des résolutions sub-nanométriques (dans le cadre de la thèse de Suan XU). Lorsque l'on approche du nanomètre, les bilans d'incertitudes peuvent s'avérer très complexes. Les besoins de mesures et d'appareils franchissant cette limite ne sont pas encore réels de nos jours, mais nul doute qu'ils le seront dans les années futures.
- ✓ Le positionnement métrologique à cette échelle se fait souvent au détriment d'un temps d'intégration important. Comme vu dans le chapitre 3, le développement d'algorithmes robustes issus des communautés de la robotique commencent à être au cœur de nos préoccupations afin de pouvoir se déplacer plus rapidement (point crucial en lithographie).
- ✓ Les applications d'imagerie développées au chapitre 3 aboutissent à des images de très grandes tailles, il est nécessaire de développer des outils de caractérisation et de traitement automatiques.
- ✓ Les mesures d'imagerie n'ont pas toutes les vertus métrologiques, notamment par une mesure non traçable selon l'axe Z. Là aussi il est nécessaire d'effectuer des développements particuliers afin de rendre la mesure selon le troisième axe plus traçable.
- ✓ D'autres domaines des nanotechnologies que ceux explorés dans ce manuscrit peuvent être intéressés par un déplacement précis sur des distances millimétriques. Chaque application peut avoir ses spécificités qu'il est alors nécessaire d'explorer.

On peut également chercher à augmenter la course de nos systèmes qui est actuellement de quelques millimètres. Je reste convaincu toutefois que de nombreuses applications et de nombreux problèmes peuvent apparaître dans les années à venir avec des courses millimétriques. Augmenter la course n'est donc pas la priorité actuelle.

CONCLUSION

Depuis mon arrivée en septembre 2006, j'ai participé à la création et au développement de l'équipe de recherche en métrologie dimensionnelle à l'Université de Versailles Saint-Quentin au sein de différentes structures de laboratoire.

Cela m'a permis de participer à toutes les facettes de l'activité d'un chercheur : la réflexion pour cibler une thématique claire et pérenne (en l'occurrence la nanométrie appliquée au positionnement de platines), l'élaboration d'une structure de travail (locaux, étudiants, moyens financiers et contractuels), la fédération dans des structures administratives selon les tutelles (équipes de recherche CISTEC puis LIRIS, puis LISV) et enfin naturellement l'encadrement d'étudiants en thèse au cours de travaux scientifiques.

Ces travaux ont abouti à une méthode originale de contrôle nanométrique de la position d'une platine de déplacement sur des courses millimétriques. Deux grands projets, ont permis d'étayer et d'obtenir des résultats très significatifs grâce aux méthodes développées, ce qui a conduit à des publications reconnues.

L'avenir devrait permettre d'obtenir des prototypes plus performants pour ce qui concerne les platines porte-échantillons dédiées à la microscopie et à la lithographie. D'autres applications pourront être développées, des besoins pouvant apparaître au fur et à mesure des développements constants en nanotechnologie. Pour répondre aux besoins sans cesse plus fins en termes de mesures de positionnement notamment, nul doute que des recherches sont encore nécessaires pour arriver à des systèmes de mesures et des bilans d'exactitude qui dépasseront la limite du nanomètre.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] The international technology Roadmap for semiconductors, Metrology report, 2005, <http://www.itrs.net/Common/2005ITRS/Metrology2005.pdf>.
- [2] H. Mizumoto, M. Yabuya, T. Shimizu, Y. Kami, *An angstrom-positioning system using a twist-roller friction drive*, *Prec. Eng.* 14:57-62, 1995.
- [3] J. Hwang, C-H. Park, C-H. Lee, S-W. Kim, *Estimation and correction method for the two-dimensional position errors of a planar XY stage based on motion error measurements*, *International Journal of Machine Tools & manufacture* (2005) 1-12.
- [4] W. Gao, Y. Arai, A. Shibuya, S. Kiyono, C. H. Park, *Measurement of multi-degree-of-freedom error motions of a precision linear air-bearing stage*, *Prec. Eng.* 30 (2006) 96-103.
- [5] R.K. Hailmann, C. G. Chen, P. T. Konkola, M. L. Schattenburg, *Dimensional metrology for nanometre-scale science and engineering: towards sub-nanometre accurate encoders*, *Nanotechnology* 15 (2004) S504-S511.
- [6] B.A.W.H. Knarren, S.J.A.G. Cosjins, H. Haitjema, P.H.J. Schellekens, *Validation of a single fibre-fed heterodyne laser interferometer with nanometre uncertainty*, *Precision engineering* 29 (2005) 229-236.
- [7] D. Haddad, *Mesure et contrôle de position et de vitesse à l'échelle nanométrique : application à la balance du watt*, thèse de l'Université de Versailles, décembre 2004.
- [8] C.M. Sutton, *Non-linearity in length measurement using heterodyne michelson interferometry*, *Phys. E: Sci. Instrum.*, 20:1290-1292, 1987.
- [9] C. Wu, C. Su, *Non-linearity in measurements of length by optical interferometry*, *Meas. Sci. Technol.*, 7:62-68, 1996.
- [10] W. Hou, G. Wilkening, *Prec. Eng.* 14(2) 1992 (91).
- [11] C.G.B. Picotto, A. Sacconi, *Conf. Proc. Quantum Electron. Plasma Phys.* 29 (1991) 61.
- [12] A.E. Rosenbluth, N. Bobroff, *Optical sources of non-linearity in heterodyne interferometers*, *Prec. Eng.*, 12(1):7-11, 1990.
- [13] S. Patterson, J. Beckwith, in: Eighth IPES Conference, Compiègne France, 1995, p101.
- [14] C-L. Chu, S-H. Fan, *A novel long-travel piezoelectric-driven linear nan positioning stage*, *Prec. Eng.* 30 (2006) 85-95.

- [15] H-C. Yeh , W-T. Ni, S-S. Pan, *Digital closed-loop nanopositioning using rectilinear flexure stage and laser interferometry*, Control Engineering Practice 13 (2005) 559-566.
- [16] http://www.raith.com/WWW_RAITH/nanolithography/nano_overview.html
- [17] J. Haycocks, K. Jackson, *Traceable calibration of transfer standards for scanning probe microscopy*, Precision Engineering 29 (2005) 168-175.
- [18] R. Leach, J. Haycocks, K. Jackson, A. Lewis, S. Oldfield, A. Yaccot, *Advances in traceable nanometrology at the National Physical Laboratory*, Nanotechnology 12 (2001) R1-R6.
- [19] G. Wilkening, L. Koenders, *Nanoscale Calibration Standards and Methods*, Ed. Wiley-vch, ISBN n°3-527-40502-X (2005).
- [20] <http://www.maschinenbau.tu-ilmeneau.de/mb/sfb622/index.htm>
- [21] <http://www.metas.ch/fr/>
- [22] F. Meli, R. Thalmann, *Long range AFM profiler used for accurate pitch measurements*, Meas. Sci. Technol. 9 (1998) 1087-1092.
- [23] <http://en.nim.ac.cn/>
- [24] I. Misumi, S. Gonda, T. Kurosawa, Y. Azuma, T. Fujimoto, I. Kojima, T. Sakurai, T. Ohmi, K. Takamasu, *Reliability of parameters of associated base straight line in step height samples: Uncertainty evaluation in step height measurements using nanometrological AFM*, Prec. Eng. 30 (2006) 13-22.
- [25] http://www.aist.go.jp/index_en.html
- [26] M. Holmes, R. Hocken, D. Trumper, *The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probed microscopy*, Precision Engineering 24 (2000) 191-209.
- [27] <http://www.nist.gov/>
- [28] J.A. Kramar, *Nanometre resolution metrology with the molecular Measuring Machine*, Meas. Sci. Technol., 16 (2005), 2121 -2128.
- [29] S. Ducourtieux, F. Larsonnier, S. Duhem, L. Lahousse, J. Salgado, J. David, J.P. Vaillau, *Le programme de recherche et développement en nanométrie du BNM-LNE*, proceedings de Métrologie 2003, sur CD-ROM ou www.lne.fr
- [30] R. Bachelot, G. Lerondel, S. Blaize, S. Aubert, A. Bruyant, P. Royer, *Probing Photonic and Optoelectronic Structures by Apertureless Scanning Near Field Optical Microscopy*, (invited paper) Microscopy research and technique 64:441-452 (2004).

- [31] S. Decossas, F. Mazen, T. Baron, G. Brémond, A. Souifi, *Atomic force microscopy, nanomanipulation of silicon nanocrystals for nanodevice fabrication*, Nanotechnology, 14 272-1278 (2003).
- [32] St. Fahlbusch, S. Mazerolle, J-M. Breguet, A. Steinecker, J. Agnus, R. Pérez, J. Michler, *Nanomanipulation in a scanning electron microscope*, Journal of Materials Processing technology 167 (2005) 371-382.
- [33] Bureau International des Poids et Mesures, *Le système international d'unités (SI)*, 7^o édition (1998).
- [34] R. Davis, *The SI unit of mass*, Metrologia 40 299-305 (2003).
- [35] T. Quinn, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 40 80-85 (1991).
- [36] B.N. Taylor, T.J. Witt, *New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall Effects*, Metrologia 26(1) 47-62 (1989).
- [37] R. Pöpel, *The Josephson Effect and Voltage Standards*, Metrologia 29 (2) 153-174 (1992).
- [38] D. Reymann, A. Iwasa, H. Yoshida, T. Endo, T.J. Witt, *Comparison of the Josephson Voltage Standards of the Electrotechnical Laboratory and the Bureau International des Poids et Mesures*, Metrologia, 29(6) 389-395 (1993).
- [39] S. W. Chua, A. Hartland, P. B. Kibble, *Measurement of the AC Quantized Hall Resistance*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 48 vol 2 309-313 (1999).
- [40] A. Hartland, *The Quantum Hall Effect and Resistance Standards*, Metrologia, 29(2) 175-190 (1992).
- [41] B. P. Kibble, I. A. Robinson, *A realization of the SI watt by the NPL moving-coil balance*, Metrologia 47 173-192 (1990).
- [42] I. A. Robinson, B. P. Kibble, *The NPL Moving-Coil Apparatus for measuring Planck's Constant and Monitoring the Kilogram*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 46(2) 596-600 (1997).
- [43] E. R. Williams, R. L. Steiner, D. B. Newell, and P.T. Olsen, *Accurate measurement of the Planck constant*, Phys. Rev. Lett. 81 2404-2407 (1998).
- [44] A. D. Gillespie, K. Fujii, D. B. Newell, P. T. Olsen, A. Picard, Richard L. Steiner, G. N. Stenbakken, and E. R. Williams, *Alignment uncertainties of the NIST watt experiment*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 46 605-608 (1997).
- [45] R. L. Steiner, D. B. Newell, E. R. Williams, *A result from the NIST Watt Balance and an Analysis of Uncertainties*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 48(2) 205-208 (1999).

- [46] W. Beer, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, P. Richard, *A proposal for a new moving coil experiment*, IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-48 192-195 (1999).
- [47] W. Beer, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, P. Richard, H. Schneider, A. Pourzand, A. Courteville, R. Dändliker, *The OFMET watt balance: Progress report*, IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-50 583 (2001).
- [48] W. Beer, A. L. Eichenberger, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, A. R. Pourzand, P. Richard, J.P.Schwarz, *Status of the METAS watt balance experiment*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 52 626-630 (2003).
- [49] R. Steiner, E. Williams, R. Liu, D. Newell, *Anticipated uncertainty improvements of the NIST electronic kilogram*, Conference CPEM 2006 (Torino), pp58-59.
- [50] I.M. Mills, P.J. Mohr, T.J. Quinn, B.N. Taylor, E.R. Williams, *Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come*, Metrologia, 2005, 42, n°2, 71-80.
- [51] I.M. Mills, P.J. Mohr, T.J. Quinn, B.N. Taylor, E.R. Williams, *Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005)*, Metrologia 2006 43, n°3, 227-246.
- [52] B. P. Leonard, *Note on invariant redefinitions of SI base units for both mass and amount of substance*, Metrologia 43(1), L3-L5 (2006).
- [53] P. Becker, H. Bettin, H-U. Danzebrink, M. Gläser, U. Kuetgens, A. Nicolaus, D. Schiel, P. De Bièvre, S. Valkiers, P. Taylor, *Determination of the Avogadro constant via the silicon route*, Metrologia 40 271-287 (2003).
- [54] P. Becker, *Tracing the Definition of the Kilogram to the Avogadro Constant using a Silicon Single Crystal*, Metrologia 40 366-375 (2003).
- [55] A. Picard, *Mass determinations of a 1 kg silicon sphere for the Avogadro project*, Metrologia, 2006, 43, n°1, 46-52.
- [56] M. Gläser, *Tracing the Atomic Mass Unit to the Kilogram by Ion Accumulation*, Metrologia 40 376-386 (2003).
- [57] P. Becker, M. Gläser 2003, *Avogadro constant and ion accumulation: steps towards a redefinition of the SI unit of mass*, Meas. Sci. Technol. 14 1249 -1258 (2003).
- [58] D.B. Sullivan, N. V. Frederich, *Can superconductivity contribute to the determination of the absolute ampere ?*, IEEE Trans. Magn. 13 396-399 (1977).
- [59] A. Eichenberger, B. Jeckelmann, P. Richard, *Tracing Planck's constant to the kilogram by electromechanical method*, Metrologia 40 356-365 (2003).
- [60] F. Shiota, Y. Miki, T. Morokuma, Y. Nezu, *Evaluation of equilibrium trajectory of superconducting magnetic levitation*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 49 1117-1138 (2000).

- [61] T. Funck, V. Sienknecht, *Determination of the volt with the improved PTB voltage balance*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 40 158-61 (1991).
- [62] V. Bego, J. Butorac, K. Poljančić, *Voltage balance for replacing the kilogram*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 44 579-82 (1995).
- [63] V. Bego, J. Butorac, D. Ilić, *Realization of the kilogram by measuring at 100 kV with the voltage balance ETF*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 48 212-15 (1999).
- [64] B.N. Taylor, P.J. Mohr, *On the Redefinition of the Kilogram*, Metrologia 36 63-64 (1999).
- [65] B.P. Kibble, I.A. Robinson, *Replacing the kilogram*, Meas. Sci. Technol. 14 1243-1248 (2003).
- [66] G. Genevès & al, *The BNM watt balance project*, proceedings of CPEM2004, London – UK (2004).
- [67] Z. Silvestri, *Caractérisation physico-chimique de surface des étalons de masse*, thèse de doctorat du Conservatoire national des Arts et Métiers, octobre 2005.
- [68] P.A. Meury, *Alliage métallique pour l'étalon de masse de la balance du watt et des références secondaires*, thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, décembre 2005.
- [69] Y. Haidar, *Étude en champ proche et champ lointain de surfaces métalliques : apport des microscopes à sondes locales à l'étude des étalons de masse*, thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne, juin 2005.
- [70] P. Gournay, G. Genevès, F. Alves, M. Besbes, F. Villar, J. David, *Magnetic Circuit Design for the BNM Watt Balance Experiment*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 54(2), 742-745 (2005).
- [71] P. Cheinet, *Conception et réalisation d'un gravimètre à atomes froids*, thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, 2006.
- [72] S.T. Cundiff, J. Ye, J.L. Hall, *Optical frequency synthesis based on mode-locked lasers*, Rev. Sci. Instr. 72 3749-3771 (2001).
- [73] D. W. Allan, *Time and Frequency (Time Domain) Characterization, Estimation and Prediction of Precision Clocks and Oscillators*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 34 647-654 (1997).
- [74] Claude Audoin, Bernard Guinot, *Les fondements de la mesure du temps*, Edition Masson.
- [75] N. Bobroff, *Critical alignment in plane mirror interferometry*, Prec Eng. 15(1) (1993), 33-38.

- [76] N. Oldham, J.A. Kramar, P.S. Hetrick, E.C. Teague, *Electronic limitations in phase meters for heterodyne interferometry*, Prec. Eng. 15 173-182 (1993).
- [77] B. Edlén, *The Refractive index of Air*, Metrologia 2 71-80 (1966).
- [78] K.P. Birch, M.J. Downs, Metrologia 30, 155 (1993).
- [79] P. Schellekens, G. Wilkening, F. Reinboth, M.J. Downs., K.P. Birch, J. Spronck, *Measurements of the Refractive Index of Air Using Interference Refractometers*, Metrologia 22 279-287 (1986).
- [80] N. Khélifa, H. Fang, J. Xu, P. Juncar, M. Himbert, *Refractometer for Tracking Changes in the Refractive Index of Air Near 780 nm*, App. Opt. 37 156-161 (1998).
- [81] N. Khélifa, H. Fang, M. Himbert, P. Juncar, *A New Refractometer: Towards an Air Wavelength Reference*, SPIE 3052 64-71 (1996).
- [82] R. Thibout, *Référence de Longueur d'Onde dans l'Air. Application à la Mesure Dimensionnelle dans l'Air*, Thèse, Conservatoire National des Arts et Métiers-Paris (1999).
- [83] S. Topçu, Y. Alayli, J. P. Wallerand and P. Juncar, *Heterodyne refractometer and air wavelength reference at 633 nm*, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 24 85-90 (2003).
- [84] F.C. Demarest, High resolution, high speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics, Meas. Sci. Technol. 9, 1024-1030, 1998.
- [85] J-Y. Shim, D-G. Gweon, *Piezo-driven metrological multiaxis nanopositioner*, Rev. Sci. Instrum., 72, n°11, 4183-4187 (2001).
- [86] H. Liu, B. Lu, Y. Ding, Y. tang, D. Li, *A motor-piezo actuator for nano-scale positioning based on dual servo loop and nonlinearity compensation*, J. Micromech. Microeng. 13 (2003) 295-299.

ANNEXES

On trouvera ici :

- ✓ Curriculum vitae
- ✓ Activités d'enseignements
- ✓ Publications
- ✓ Annexes scientifiques
- ✓ Copies de quelques articles

1. CURRICULUM VITAE

Luc CHASSAGNE

Nationalité : Française

Âge : 35 (12 janvier 1971)

Laboratoire LISV (ex LIRIS) de l'Université de Versailles Saint-Quentin

☎ bureau : 01 39 25 44 78

Mèl : luc.chassagne@ens-phys.uvsq.fr

- ✓ **Maître de Conférences** à Versailles depuis septembre 2000. Activités de recherche en instrumentation et métrologie dimensionnelle.
- ✓ **A.T.E.R.** pour l'année universitaire 1999-2000 au L.H.A. et à la N.F.I.O. (Nouvelle Formation d'Ingénieur en Optronique) à Orsay.
- ✓ **Thèse** (octobre 1996 – soutenue le 16 janvier 2000) effectuée au Laboratoire de l'**Horloge Atomique** (L.H.A. CNRS – Orsay), en contrat Cifre avec Tekelec Temex.
Sujet : Amélioration de l'exactitude d'une horloge atomique à jet de césium pompée optiquement.
Mots clés : métrologie des fréquences – laser – asservissement en fréquence – optoélectronique
Jury de thèse : Pierre CÉREZ (Directeur de thèse), Andrea DE MARCHI, Marcel OLIVIER, Alain BRUN, Claude AUDOIN, Vincent PELLETIER (Tekelec Temex).
- ✓ **Ingénieur en bureau d'étude** d'électronique en 1996.
- ✓ Diplôme d'ingénieur **Supélec** en 1994.

✓ **DUT** de Cachan en 1991.

2. ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

Depuis ma nomination en septembre 2000, je suis Maître de Conférences en section 63 au département de physique de l'UFR des Sciences de Versailles. En 1999, la première année d'une filière, le Deug 1 de STPI (Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur) avait démarré suite à l'habilitation donnée par le ministère. Il m'a fallu depuis assumer la création de plusieurs modules (électronique, optoélectronique et instrumentations), ainsi qu'une active participation à l'élaboration de la filière SPI puisque pratiquement chaque année a vu la création de nouveaux enseignements pour finaliser une filière à BAC+5 (première promotion en 2005). J'ai également dû assumer de nombreuses charges de coordination pour seconder le professeur Y. ALAYLI. Je suis actuellement responsable de la Mention Licence SPI.

✓ *Responsabilités administratives :*

- ✓ **Responsable de la Mention Licence Spi - Sciences pour l'Ingénieur – depuis sept. 2005 (comprenant trois parcours : E.E.A., E.E.A-informatique et Mécanique).**
 - Membre du **bureau du département de physique** (au titre du représentant SPI – Sciences pour l'Ingénieur).
 - Coordinateur des **travaux pratiques** de la filière EEA-SPI.
 - Membre de la **commission de spécialiste 61-63 de Versailles**
 - Membre de la **commission de spécialiste** de l'Université de Technologie de Troyes.

✓ *Élaboration de filières :*

- Participation à la **création** du premier cycle **STPI** (ouverture 2000) et du deuxième cycle **licence EEA** (ouverture 2001) et **maîtrise EEA** (ouverture 2002) sur Versailles.
- Participation à la transformation du Deug STPI – licence EEA en Licence SPI et maîtrise EEA en master1 dans le système LMD.
- Participation à la **création du master (professionnel et recherche) C.S.E.R. : Capteurs, Systèmes Électronique et Robotique** (ouverture 2004).

✓ *Enseignements :*

- Cours-TD-TP d'électronique en **licence E.E.A. et SPI**.
- Cours-TD-TP d'Optoélectronique en **maîtrise E.E.A. et master 1 SPI**. Création de nombreux TP.
- Cours-TD-TP d'Instrumentation en **master CSER**.
- Cours-TD-TP d'électricité et d'électronique en **Deug S.T.P.I.**
- Encadrement de projets et de stages industriels en Deug, licence, maîtrise, master.
- Modérateur du domaine Electronique sur le site www.librecours.org (site de mise en ligne de cours modéré pour s'assurer du contenu ; on y trouvera un certain nombre de mes polycopiés de cours et de TD).

3. PUBLICATIONS

	Issues des travaux de thèse (3+1 ATER ans)	Issues des travaux MCF (6 ans)	Total
Revue à comités de lecture	3	10	13
Special issue	-	1	1
Brevets	1	1	2
Conférences invitées	-	1	1
Communications avec publications des actes	5	20	25
Communications sans publications des actes	1	6	7

+ 2 revues soumises non comptées ici

Revue à comité de lecture

Revue issues des travaux de thèse

1999

- [P1] C. Audoin, F. Hamouda, L. Chassagne, R. Barillet
Controlling the Microwave Amplitude in Optically Pumped Cesium Beam Frequency Standards,
IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol 46, N°2, pp 407-413, March 1999.
- [P2] F. Hamouda, C. Audoin, L. Chassagne, R. Barillet,
Transient Response Following Frequency or Amplitude Switching in a Cesium Beam Tube,
IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol 46, N°4, pp 861-866, July 1999.

2001

- [P3] L. Chassagne, F. Hamouda, G. Théobald, P. Cérez,
Implementation of beam reversal technique on small cesium clocks : towards an improvement in accuracy,
IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol 48, N°6, pp 1513-1516, November 2001.

Revue issues des travaux d'enseignant-chercheur

2003

- [P4] S. Topçu, L. Chassagne, Y. Alayli
A new type of fiber-optic-based interferometric ellipsometer for in-situ and real-time measurement,
Review of Scientific Instruments, Vol 74, N°10, pp 4442-4447, October 2003.

[P5] S. Topçu, L. Chassagne, D. Haddad, Y. Alayli, P. Juncar,
Heterodyne interferometric technique for displacement control at the nanometric scale,
Review of Scientific Instruments, Vol 74, N°11, pp 4876-4880, November 2003.

[P5b] S. Topcu, L. Chassagne, D. Haddad, Y. Alayli, P. Juncar,
Heterodyne interferometric technique for displacement control at the nanometric scale, Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, www.vjnano.org, Vol 8, Issue 19,
November 2003 (Reference 5 sélectionnée par le site www.vjnano.org qui l'a mis en ligne).

2004

[P6] Y. Alayli S. Topçu, D. Wang, R. Dib, L. Chassagne,
Applications of a high accuracy fiber optic displacement sensor to vibrometry and profilometry,
Sensors and Actuators A : Physical, Vol A116 (2004), 85-90.

[P7] S. Topçu, L. Chassagne, D. Haddad, Y. Alayli, Patrick Juncar,
High accuracy velocity control method for the French moving coil watt balance,
Review of Scientific Instruments, Vol 75, N°11, pp 4824-4827, November 2004.

2005

[P8] S. Topçu, L. Chassagne, Y. Alayli, P. Juncar,
Improving the accuracy of homodyne Michelson interferometers using polarisation state measurement techniques,
Optics Communications, Vol 247 pp:133-139, March 2005.

[P9] Y. Alayli, S. Topçu, L. Chassagne, J. Viennet,
Compensation of the thermal influence on a high accuracy optical fibre displacement sensor,
Sensors and Actuators A : Physical, Vol 120, Issue 2, pp343-348, May 2005.

[P10] L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P. Juncar,
Highly accurate positioning control method for piezoelectric actuators based on phase-shifting optoelectronics,
Measurement Science and Technology 16 (2005) 1771-1777.

2006

[P11] M. Wakim, S. Topçu, L. Chassagne, J. Nasser, Y. Alayli, P. Juncar,
Highly accurate laser wavelength meter based on Doppler effect,
Optics Communications, 262 (2006) 97-102.

[P12] D. Haddad, M. Wakim, L. Chassagne, S. Topçu, P. Juncar, Y. Alayli,
Position and velocity control at the nanometric scale in the LNE watt balance project,
Revue française de Métrologie n°6, 2006-2.

[P13] G. Genevès, P. Gournay, F. Villar, P. Pinot, P. Juncar, M. Lecollinet, L. Chassagne, A. Clairon, A. Landragin, D. Holleville, F. Pereira Dos Santos, J. David, M. Besbes, F. Alvès, S. Topçu, D. Haddad, A. Gosset,
The watt balance: toward a new definition of the mass unit ?,
Revue française de Métrologie accepted, to be published in 2006.

Revue soumise en 2006 :

M. Wakim, S. Xu, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli,
Long range two axis displacement system for large scale nanopositioning applications,
Precision Engineering.

K. Ouedraogo, S. Topsisu, L. Chassagne, J. Nasser, Y. Alayli,
Compact and accurate laser wavelength meter based on ellipsometry,
Review of Scientific Instruments.

Special Issue

- [S1] G. Genevès, P. Gournay, A. Gosset, M. Lecollinet, F. Villar, P. Pinot, P. Juncar, A. Clairon, A. Landragin, D. Holleville, F. Pereira Dos Santos, J. David, M. Besbes, F. Alves, L. Chassagne, S. Topçu
The watt balance project,
IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, Special Issue on CPEM 2004, Vol 54 N°2, (ISSN0018-9456) pp 850-853, April 2005.

Brevet d'invention

- [B1] Procédé de contrôle de l'amplitude du signal micro-onde appliqué à une horloge atomique et dispositif d'asservissement pour la mise en œuvre de ce procédé,
Brevet européen n°9713572, C. Audoin, F. Hamouda, L. Chassagne, R. Barillet
- [B2] Procédé et système de mesure de la longueur d'onde d'une onde laser,
Brevet français n°06/03830, K. Ouedraogo, S. Topçu, L. Chassagne, Y. Alayli

Communications dans des congrès avec publications des actes

Communications issues des travaux de thèse

1997

- [C1] B. Boussert, P. Cérez, L. Chassagne, G. Théobald,
Frequency Evaluation of a Miniature Optically Pumped Cesium Beam Clock,
Proceedings of 11th European Frequency and Time Forum (Neuchâtel - Switzerland), pp 58-62, 1997.

1998

- [C2] C. Audoin, F. Hamouda, L. Chassagne, R. Barillet,
Some Properties of an Optically Pumped Cesium Beam Tube Depending on the microwave Amplitude,
Proceedings of 12th European Frequency and Time Forum (Varsovie - Poland), pp 43-48, 1998.

1999

- [C3] L. Chassagne, F. Hamouda, G. Théobald, P. Cérez, C. Audoin,
Comparison of Methods Aimed at Determining the Residual Cavity Phase Shift in Short Cs Beam Clocks,
Poster at Joint Meeting of the 13th European Frequency and Time Forum and 1999 IEEE International Frequency Control Symposium (Besançon - France), Vol 1, pp 70-72, 1999.

2000

- [C4] V. Hermann, F. Hamouda, G. Théobald, L. Chassagne, C. Audoin, P. Cérez, F. Mescherberger, F. Boust, F. Deyzac,
Multilambda cylindrical Rabi cavities for thermal cesium beam frequency standards ; optimization of the performances,
Poster at 14th European Frequency and Time Forum 2000 (Torino - Italy), pp454-457, March 2000.
- [C5] L. Chassagne, F. Hamouda, G. Théobald, P. Cérez,
Determination of Residual Cavity Phase Shift in Small Cesium Clocks,
Oral communication at 14th European Frequency and Time Forum 2000 (Torino - Italy), pp28-31, March 2000.

Communications issues des travaux d'enseignant-chercheur

2001

- [C6] V. Hermann, L. Chassagne, T. Zanon, C. Audoin, P. Cézé, G. Théobald,
Current status of the miniature optically pumped cesium beam frequency standards at LHA,
Poster at the 6th Symposium Frequency Standard and Metrology (Saint Andrews - Scotland), pp 475-477, September 2001.

2002

- [C7] S. Guérandel, V. Hermann, R. Barillet, P. Cézé, G. Théobald, L. Chassagne, C. Sallot, J. Delporte,
Compact cesium beam clocks : improvements towards $10^{-12} \tau^{1/2}$,
Oral communication at 16th EFTF 2002 (St Pétersbourg - Russia), April 2002.
- [C8] S. Guérandel, V. Hermann, R. Barillet, P. Cézé, G. Théobald, C. Audoin, L. Chassagne, C. Sallot, J. Delporte,
Operation of a compact cesium beam tube : how to improve the stability towards the $10^{-12} \tau^{1/2}$ level,
Oral communication at 6th Frequency Control Symposium (New-Orleans -United-States), Proceedings pp 480-483, May 2002.
- [C9] S. Topçu, J-P Wallerand, L. Chassagne, P. Juncar, Y. Alayli,
An high precision interferometric system for nanodeplacement measurements,
Oral communication at 2nd IEEE Conference on Nanotechnology, Washington D.C., Proceedings pp 41-43, August 2002.

2003

- [C10] D. Haddad, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P Juncar,
Measure and Control of a Translation Stage,
Oral communication at IEEE Computing Enginnering in Systems Applications (Lille - France), sur CD-ROM ISBN n°2-9512309-5-8, 9-11 July 2003.
- [C11] D. Haddad, S. Topçu, L. Chassagne, Y. Alayli, P Juncar,
New Heterodyne Interferometric Method of Displacement Measure and Control with a Sub-nanometric Precision over a range of several millimetres,
Oral communication at 18th Annual Meeting of American Society for Precision Enginnering, (Portland US) 26-31 October 2003.
- [C12] D. Haddad, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P. Juncar,
Technique interférométrique hétérodyne de mesure de position à l'échelle nanométrique d'un système mécanique en translation sur une grande étendue : application à la balance du watt,
Poster at Métrologie 2003 (Toulon – France), sur CD-ROM, October 2003.
- [C13] F. Alves, M. Besbes, A. Clairon, L. Chassagne, J. David, A. Gosset, P. Gournay, D. Holleville, P. Juncar, A. Landragin, M. Lecollinet, F. Pereira Dos Santos, P. Pinot, S. Topçu, F. Villar, G. Genevès,
La balance du watt du BNM : état d'avancement,
Oral communication at Métrologie 2003 (Toulon – France), sur CD-ROM, October 2003.
- [C14] D. Haddad, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P. Juncar,
Système de contrôle de déplacement par interférométrie hétérodyne,
Oral communication at 4^o Colloque de Contrôle et mesures Optiques pour l'Industrie, (Belfort – France), Proceeding Vol. 1, pp 33-37, November 2003.
- [C15] S. Topçu, D. Haddad, L. Chassagne, Y. Alayli, P. Juncar,
Displacement control method with sub-nanometric accuracy : application to the French watt balance project,
International Conference on Laser Applications and Optical Metrology, (Delhi - India), Proceeding ISBN 81-88342-25-4, Anamaya Publishers, 2003.

2004

- [C16] Y. Alayli, S. Topçu, L. Chassagne, D. Wang, P. Juncar,
Caractérisation in-situ des surfaces usinées par profilométrie à fibre optique,

Oral communication at 3° Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation C2I2004 (Cachan – France), January 2004.

- [C17] S. Topçu, L. Chassagne, D. Haddad, Y. Alayli, P. Juncar,
Mesure et contrôle de position et de vitesse à l'échelle nanométrique. Application à la balance du watt,
Oral communication at 3° Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation C2I2004 (Cachan – France), January 2004.
- [C18] L. Chassagne, S. Topçu, D. Haddad, Y. Alayli, P. Juncar,
Nano-displacement control with optical heterodyne interferometry,
Oral communication at SPIE's International Photonics Europe 2004 (Strasbourg- France), Proc Vol 5457 pp574-580, ISBN 0-8194-5379-X, April 2004.
- [C19] L. Chassagne, S. Topçu, D. Haddad, Y. Alayli, P. Juncar,
Control of a moving system at sub-nanometric scale for microfabrication,
Poster at International Symposium of Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (Montreux – Switzerland), Proceedings ISBN n° 2-84813-026-1, pp223-226, May 2004.
- [C20] G. Genevès, P. Gournay, M. Lecollinet, F. Villar, M. Besbes, F. Alvez, A. Clairon, A. Landragin, D. Holleville, J. David, L. Chassagne, A. Gosset, P. Juncar, F. Pereira Dos Santos, P. Pinot, S. Topçu,
The BNM watt balance project,
Oral conference at Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM2004, (London, UK), 27 June – 2 July 2004.
- [C21] S. Topçu, L. Chassagne, D. Haddad, Y. Alayli, P. Juncar,
High accuracy velocity control method for the French moving-coil watt balance,
Poster at Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM2004 (London – UK), June 2004.

2005

- [C22] L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P. Juncar, G. Lerondel, S. Blaize, A. Bruyant, I. Stefanon, P. Royer,
Development of a long range nanometric precision stage for near field characterization,
Poster at 5th International Conference European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN) (Montpellier - France), May 2005.
- [C23] L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P. Juncar, G. Lerondel, S. Blaize, A. Bruyant, I. Stefanon, P. Royer,
Near field characterization of millimeter long wave guiding structures using a high accuracy optoelectronic control system holding the sample,
Oral communication at SPIE's International Symposium Optical Metrology 2005 (Munich - Germany), vol 5858, 13-17 June 2005.

2006

- [C24] K. Ouedraogo, S. Topçu, L. Chassagne, Y. Alayli,
Lambdamètre polarimétrique,
Oral communication at 7° Colloque de Contrôle et mesures Optiques pour l'Industrie, (Mulhouse – France), November 2006.
- [C25] M. Wakim, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli,
Système de déplacement deux axes dédié au applications de nano-déplacements,
Oral communication at 7° Colloque de Contrôle et mesures Optiques pour l'Industrie, (Mulhouse – France), November 2006.

Conférences invitées

2006

- [CI1] L. Chassagne,
Mesure et contrôle subnanométrique d'un déplacement de grande course,
Micronora, Besançon, septembre 2006.

Communications dans des congrès sans publications des actes

2003

- [CS1] D. Haddad, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P. Juncar,
Mesure et contrôle de position et de vitesse à l'échelle nanométrique : Application à la balance du watt,
Oral communication at 1^o Congrès International sur les Modélisations Numériques Appliquées,
(Beyrouth - Lebanon), November 2003.
- [CS2] Y. Alayli, S. Topçu, D. Haddad, L. Chassagne, P. Juncar,
La balance du watt du BNM,
Oral communication at Congrès International sur les Modélisations Numériques Appliquées, (Beyrouth
- Lebanon), November 2003.
- [CS3] Y. Alayli, D. Wang, R. Dib, S. Topçu, L. Chassagne,
Application of a high accuracy fiber optic sensor to vibrometry and profilometry,
Oral Communication at 8th ILLA/LTL Conference (Plovdiv - Bulgaria), September 2003.
- [CS4] D. Haddad, S. Topçu, L. Chassagne, Y. Alayli, P. Juncar,
Oral Communication at 8th ILLA/LTL Conference, (Plovdiv - Bulgaria), 9-11 September 2003.
- [CS5] D. Haddad, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P. Juncar,
Mesure et contrôle de positionnement à l'échelle sub-nanométrique d'un système mécanique en translation sur une grande course,
Forum 2003 des Microscopies à Sondes Locales (Montpellier – France), March 2003.
- [CS6] D. Haddad, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P. Juncar,
Club Nanotechnologie 2003, Acte de la Journée Nanotechnologie 2003, Paris, France, 16 January 2003.

2005

- [CS7] J.P. Loisel, R. Sarrouf, V. Sousa, T. Badr, S. Topçu, L. Chassagne, J.J. Zondy, J.P. Wallerand, J. Nasser, Y. Alayli, P. Juncar, P.R. Dahoo,
Using the transition $4d^{10} 5s^2 S_{1/2} \leftrightarrow 4d^9 5s^2 D_{1/2}$ of Ag as an optical frequency standard,
SFP September 2005.

2006

- [CS8] P. Ruaux, M. Wakim, S. Xu, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli,
Platine de déplacement 2 axes à résolution nanométrique sur course millimétrique,
Micronora, Besançon, September 2006.

Revue de vulgarisation

- [V1] S. Guérandel, L. Chassagne, V. Hermann, R. Barillet, P. Cérez, G. Théobald, C. Audoin,
Travaux de recherche en France dans le domaine des horloges compactes à jet de césium pompé optiquement, dans Annales françaises des microtechniques et de chronométrie, Tome 51-52, années 2002-2003, pp 25-53.

4. ANNEXES SCIENTIFIQUES

4.1. Alignement du système double axe XY (Chapitre 2)

Le miroir mobile est un cube en zérodur (ZD) poli de 2 cm de côté dont on utilise deux faces orthogonales. Dans le cas d'application type porte-échantillon, la face du dessus peut servir de support. L'angle a été contrôlé après polissage comme étant égal à 90° avec une tolérance de 1 sec d'arc ($4,8 \mu\text{rad}$). Le cube est ajusté sur l'actionneur piézoélectrique. Deux réglages de tilt permettent d'ajuster finement les axes de rotation selon X et Y. Un étage de rotation supplémentaire permet une rotation de l'ensemble cube-PZT_{XY}. Cet étage a été conçu pour pouvoir être réglé manuellement avec une vis micrométrique et très finement par un actionneur piézoélectrique, ce qui permet d'avoir une sensibilité de réglage bien inférieure à $1 \mu\text{rad}$.

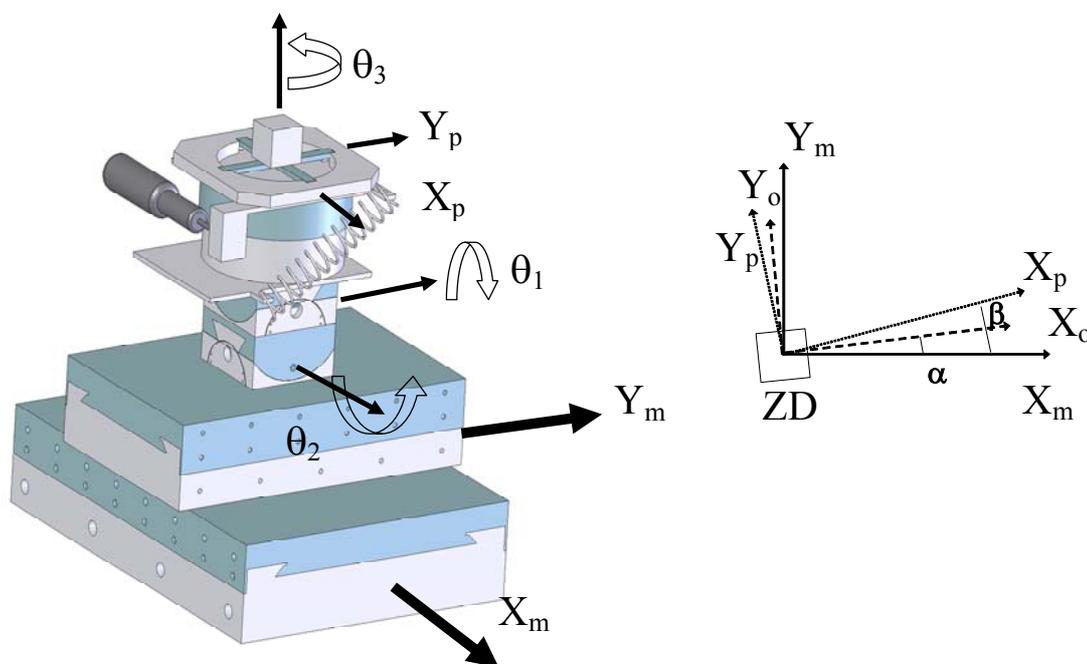


Figure 22 : Schéma mécanique et principe de l'alignement entre les axes X et Y. (X_m - Y_m) représentent les axes mécaniques de déplacement de l'étage grande course ; (X_p - Y_p) représentent les axes mécaniques de déplacement de l'étage piézoélectrique ; (X_o - Y_o) représentent les axes optiques perpendiculaires aux faces du cube miroir (ZD)

Sur la Figure 22, une vue géométrique de dessus explicite les divers axes importants. On distingue (X_m, Y_m) les axes orthogonaux qui correspondent à l'axe mécanique de translation des platines grande course. On suppose X_m et Y_m parfaitement orthogonaux dans le raisonnement suivant par souci de simplicité, nous verrons qu'effectivement la tolérance de $24 \mu\text{rad}$ peut se négliger. Les axes de poussées de l'actionneur piézoélectrique sont notés (X_p, Y_p) et les axes optiques, c'est-à-dire les perpendiculaires aux faces du cube, (X_o, Y_o). Ces

trois couples d'axes doivent être alignés au mieux, on note α et β les angles de désalignement entre $(X_m; Y_m)$ et $(X_o; Y_o)$, et $(X_m; Y_m)$ et $(X_p; Y_p)$ respectivement.

Il est essentiel que les axes optiques correspondent aux axes mécaniques pour deux raisons. Premièrement, si ce n'est pas le cas, quand un déplacement L est effectué, une erreur sur la distance mesurée en cosinus classique apparaît :

$$\varepsilon = L\theta^2 / 2 \quad (8)$$

où θ est l'angle de désalignement. Pour des déplacements millimétriques et des angles inférieurs à 1 mrad, cela reste négligeable. La deuxième raison est plus contraignante. Lorsqu'un déplacement est réalisé, par exemple sur X_m ou X_p , si l'axe Y_o n'est pas parfaitement orthogonal, le système de mesure interprète le désalignement comme un déplacement selon l'axe Y ce qui se traduit par une erreur de type tangentiel

$$\varepsilon_Y = L_X\theta^2 \quad (9)$$

où L_X est le déplacement selon l'axe X . Le raisonnement est bien sûr valable symétriquement pour une erreur ε_Y .

Par exemple, si $\theta = 17$ mrad (1°) et que l'on considère un déplacement lié à l'actionneur piézoélectrique, $L_X = 3 \mu\text{m}$, ε_Y reste inférieure à 51 nm. L'alignement entre $(X_p; Y_p)$ et $(X_o; Y_o)$ n'est donc pas crucial car la faible course rend de désalignement facile rattrapable. Par contre si le déplacement est plus long, par exemple $L_X = 5$ mm, ε_Y est égal à 85 μm ce qui ne peut pas être rattrapé par l'actionneur piézoélectrique. L'alignement entre $(X_m; Y_m)$ et $(X_o; Y_o)$ est donc primordial ce qui justifie le réglage avec la platine de rotation. Cet alignement doit être contrôlé régulièrement mais il n'est pas nécessaire qu'il soit sujet à un asservissement temps réel ce qui demanderait un troisième capteur.

4.2. Nouvelle source optique (Chapitre 3)

Le système de mesure actuellement utilisé qui permet la boucle d'asservissement est un interféromètre hétérodyne Zygo ZMI2001. Il présente certains inconvénients :

- ✓ la source utilisée est un laser He-Ne faible puissance stabilisé en fréquence. Si l'on veut mesurer plusieurs axes simultanément pour remonter en temps réel aux défauts de déplacements, le signal à bruit s'en trouve nettement diminué. Il est intéressant d'avoir une source stabilisée en fréquence de plus forte puissance.
- ✓ Le faisceau laser est composé de deux composantes de polarisations linéaires et orthogonales entre elles et décalées en fréquence de 20 MHz. En pratique, des non-linéarités et des imperfections sur les polarisations entraînent des erreurs comme on l'a vu au chapitre précédent. Il est intéressant de réaliser l'hétérodynage avec une autre technique pour minimiser les erreurs résiduelles qui peuvent être de l'ordre de quelques nanomètres. Ceci est surtout une perspective plus long terme pour la lithographie UV par

Le système est composé d'une source laser verte (Yag doublé) de longueur d'onde stabilisée et calibrée (542 nm) de forte puissance. La stabilisation se fait sur une raie atomique d'iode à l'aide des techniques d'absorption classiques. Le faisceau passe dans 2 modulateurs acousto-optique (MAO) pour être affecté par des signaux respectivement à 80 et 85 MHz avant que chacun soit injecté dans une fibre. Le premier faisceau qui constitue le bras de référence est réfléchi sur un miroir avant d'être injecté dans la fibre. Une source OL (oscillateur local) génère un signal de fréquence égale à 640 MHz. Un circuit diviseur divise cette fréquence par 8 pour obtenir un signal à 80 MHz alimentant le premier MAO. Un second circuit divise par 128 afin d'avoir un signal de référence à 5MHz. Les faisceaux guidés par les fibres à maintien de polarisation passent sous vide en gardant les mêmes caractéristiques. Les fluctuations de phase du bras de référence sont asservies sur la phase du signal à 5 MHz de référence, et la position du miroir est contrôlée en jouant sur les phases respectives des deux signaux de références.

Ce principe à deux MAO et deux signaux de référence électrique est inspiré du système existant actuellement au LISV, mais le fait d'avoir deux signaux de référence permet de s'affranchir des fluctuations de phase du signal de référence liées aux imperfections des composants.

La fréquence d'hétérodynage est choisie ici à 5 MHz mais peut être configurable, ce qui permet d'accéder à des résolutions théoriques très nettement inférieures au nanomètre.

Il est prévu de réaliser l'ensemble dans une optique la plus intégrée possible grâce à une mécanique de précision, ceci afin de limiter les erreurs d'alignement. Le prototype final (courant 2007) sera donc une source relativement compacte et transportable qui pourra s'adapter à n'importe quelle mesure sous vide.

4.3. Principe de la balance du watt (Chapitre 4)

L'expérience se déroule en deux phases : une phase statique et une phase dynamique :

✓ *Phase statique* (Figure 24) :

L'utilisation d'une balance composée d'un fléau (dans la balance du watt du LNE spécifiquement) permet de disposer d'une masse de tarage qui équilibre le montage à l'instant initial. Lors de cette étape, l'étalon de 1 kg est placé du côté de la bobine. La masse de tarage étant égale à la masse du montage, le fléau va se déséquilibrer d'une quantité correspondant à 1 kg. Un conducteur de longueur l placé dans un champ magnétique radial \vec{B} est parcouru par un courant I de façon à ce que la force de Laplace engendrée soit verticale. Cette force orientée vers le haut compense l'abaissement du fléau et donc le poids de la masse étalon. Elle est égale à :

$$F = m \times g = B \times l \times I \quad (10)$$

où m est la masse étalon, g l'accélération de la pesanteur, B la valeur de l'induction magnétique. Pour obtenir une incertitude relative de 10^{-8} sur m , il faut mesurer chaque paramètre avec une incertitude moindre. Cependant, le produit $B \times l$ ne peut être déterminé

avec une incertitude relative de 10^{-8} . Une phase dynamique doit être effectuée afin d'éliminer ce produit.

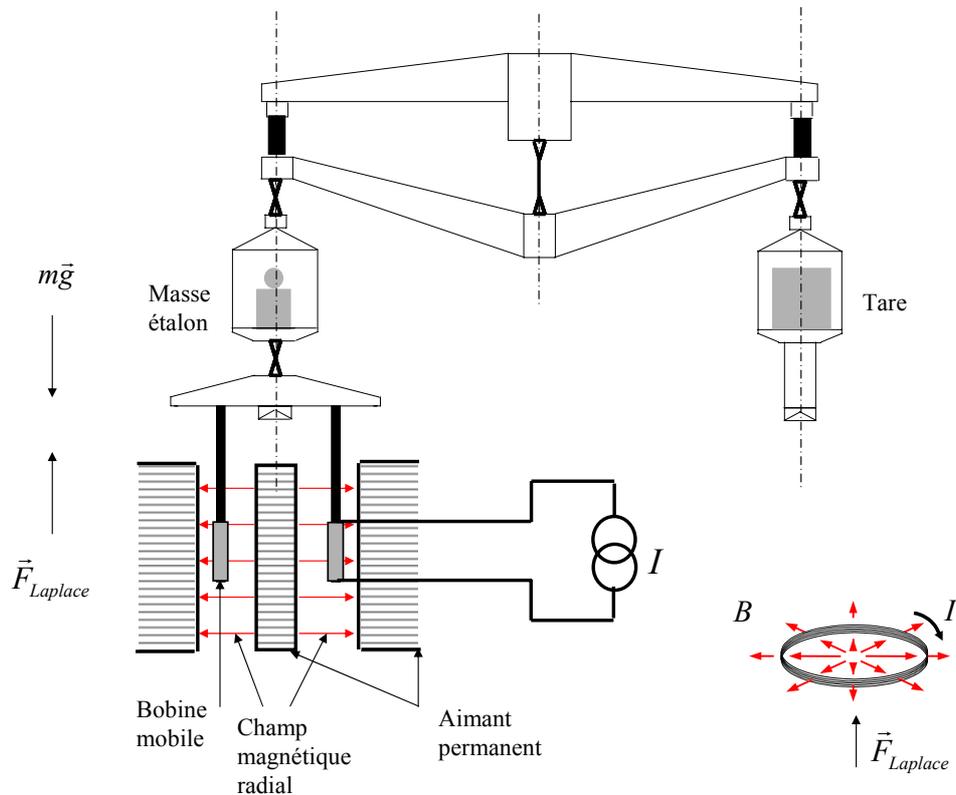


Figure 24 : Mesure en phase statique

✓ Phase dynamique (Figure 25) :

Durant la phase dynamique, l'ensemble de la balance est déplacé, dans le même champ magnétique, sur l'axe vertical à la vitesse v . La tension induite ε qui apparaît aux bornes de la bobine s'exprime par :

$$\varepsilon = B \times l \times v. \quad (11)$$

Le produit $B \times l$ peut être reporté dans l'équation de la phase statique, donnant une relation qui relie une puissance mécanique dans le premier terme et une puissance électrique dans le second :

$$m \times g \times v = \varepsilon \times I. \quad (12)$$

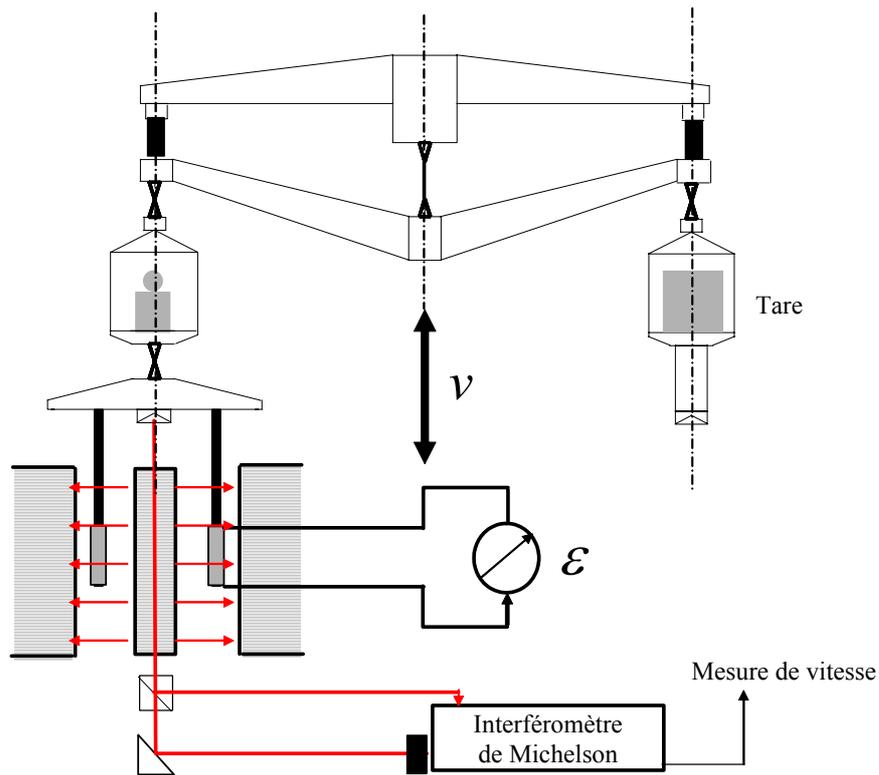


Figure 25 : Mesure en phase dynamique

Cette expérience requiert une excellente stabilité de l'induction B pendant le déroulement des deux phases ($\sim 10^{-4}$). Si le courant I est mesuré par la chute de tension V aux bornes d'une résistance R , l'expression (5) devient :

$$m \times g \times v = \frac{\varepsilon \times V}{R}. \quad (13)$$

→ Définition du kilogramme basée sur la constante de Planck

La différence de potentiel V et la tension induite ε peuvent être déterminées par comparaison à un étalon de tension à effet Josephson :

$$\varepsilon = n_1 f_1 / K_J \quad V = n_2 f_2 / K_J. \quad (14)$$

La résistance R est comparée à un étalon quantique de résistance :

$$R = k R_K / i, \quad (15)$$

où k est un facteur dû à la méthode d'étalonnage.

On peut ainsi obtenir la relation

$$m \times g \times v = \frac{A}{K_J^2 R_K} \quad A = \frac{n_1 n_2 f_1 f_2 i}{k} \quad (16)$$

Les expressions de $K_J = 2e/h$ et $R_K = h/e^2$ donnent lieu à l'équation qui relie la masse m de l'étalon à la constante de Planck h :

$$\frac{m}{h} = \frac{A}{4gv} \quad (17)$$

La connaissance de la masse m permet de déterminer la constante de Planck et l'invariance de cette constante constitue une référence de stabilité de l'étalon de masse. Les travaux qui ont déjà été menés ont montré qu'une incertitude relative de 10^{-8} peut être atteinte. Mais pour cela, il faut que l'on puisse mesurer avec une incertitude inférieure chaque terme de l'équation.

L'objectif de la balance du watt est double. Elle permet d'améliorer la connaissance des grandeurs électriques par la détermination de constantes fondamentales liées à l'électricité et de caractériser l'évolution du kilogramme étalon en fonction de ces constantes [64][65].

4.4. Réglage d'alignement et mesure de longueur d'onde (Chapitre 4)

Si l'on suppose un angle d'inclinaison nommé α sur le miroir mobile (Figure 26), il s'ensuit un angle α entre le faisceau laser aller et le faisceau laser retour. Les faisceaux lasers aller et retour ne sont pas parfaitement colinéaires ce qui entraîne une erreur en cosinus.

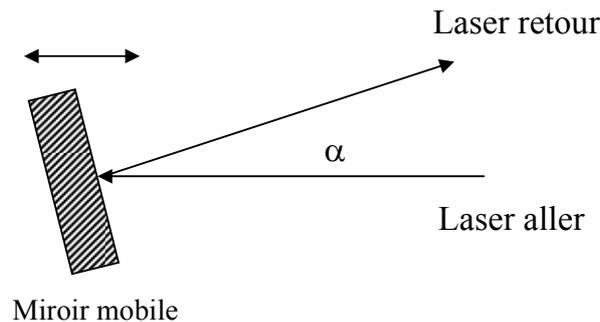


Figure 26 : Erreur d'alignement du miroir mobile

La technique envisagée est de se servir d'un deuxième laser dans une phase préliminaire de réglage :

- ✓ un premier faisceau laser d'interférométrie est utilisé pour asservir la position du miroir par notre méthode. Il existe alors un angle α inconnu,
- ✓ un deuxième faisceau est envoyé sur le miroir. **De même longueur d'onde ou pas, cela n'a pas d'importance.** Ce faisceau laser est biaisé d'un angle β différent de α et inconnu.

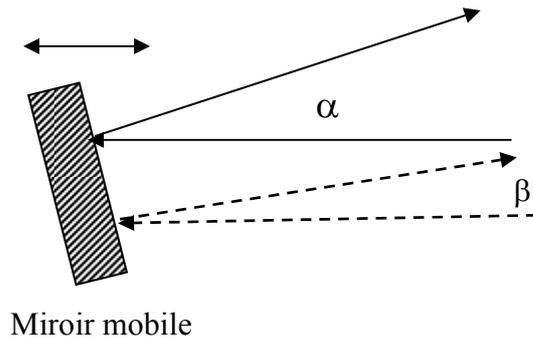


Figure 27 : Compensation de l'erreur par double mesure

Sur la figure, on a choisit $\beta < \alpha$ mais cela peut évidemment être l'inverse. Il est nécessaire que les faisceaux se réfléchissent au même point du miroir ; pour plus de clarté la figure les représente séparés,

- ✓ le faisceau que l'on appellera α asservit le miroir à une position fixe. Puis le système platine + actionneur piézoélectrique est démarré pour arriver à une vitesse raisonnable. On peut alors mesurer la fréquence Doppler f_α avec une bonne exactitude. Elle est évidemment faussée par l'angle. De même pour le faisceau β ; on mesure sa fréquence Doppler f_β , entachée d'une erreur liée à β . On recommence plusieurs fois en réglant le miroir afin de trouver f_β maximale qui correspond à $\beta = 0$. On ne pourrait pas le faire avec le faisceau α car il sert à l'asservissement, on est donc aveugle par rapport à l'erreur due à α . Les mesures doivent se faire en moyennant pour obtenir la résolution escomptée de 10^{-9} en relatif,
- ✓ en final, le faisceau β est correctement réglé et devient par la suite le faisceau utile, on peut enlever le faisceau α ou intervertir les rôles si on veut optimiser ce dernier.

Cette technique sera implantée sur la balance. Nous l'avons testée en prenant la problématique inverse. Si la longueur d'onde du deuxième faisceau est inconnue, le principe peut servir pour mesurer sa longueur d'onde (avec une exactitude qui dépend alors de la qualité d'alignement) en effectuant deux mesures de fréquence Doppler et en effectuant le rapport :

$$\lambda_u = \frac{f_{Doppler-Reference}}{f_{Doppler-Inconnue}} \times \lambda_R \times \frac{n_R}{n_u} \quad (18)$$

où λ_u est la longueur d'onde du deuxième laser, supposée inconnue λ_R est la longueur d'onde du premier laser, supposée connue, n_R et n_u les indices respectifs des lasers connus et inconnus, et les fréquences Doppler mesurées respectives.

Ceci a fait l'objet d'un montage expérimental, de mesures et d'un article [P11]. Cette technique peut paraître assez lourde comparée aux lambdamètres existants, elle présente toutefois certains avantages, notamment d'être différente des principes des lambdamètres commerciaux qui fonctionnent typiquement par comptage de franges.

5. COPIES D'ARTICLES

J'ai choisi de mettre ici en copie les articles suivants :

S. Topçu, L. Chassagne, D. Haddad, Y. Alayli, P. Juncar,
Heterodyne interferometric technique for displacement control at the nanometric scale,
Review of Scientific Instruments, Vol 74, N°11, pp 4876-4880, Nov 2003.
On peut noter que cet article à été sélectionné par le site www.vjnano.org qui l'a mis en ligne.

S. Topçu, L. Chassagne, Y. Alayli, P. Juncar,
Improving the accuracy of homodyne Michelson interferometers using polarisation state measurement techniques,
Optics Communications, Vol 247 pp:133-139, March 2005.

Y. Alayli, S. Topçu, L. Chassagne, J. Viennet,
Compensation of the thermal influence on a high accuracy optical fibre displacement sensor,
Sensors and Actuators A : Physical, Vol 120, Issue 2, pp343-348, May 2005.

L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P. Juncar,
Highly accurate positioning control method for piezoelectric actuators based on phase-shifting optoelectronics,
Measurement Science and Technology 16 (2005) 1771-1777.

M. Wakim, S. Topçu, L. Chassagne, J. Nasser, Y. Alayli, P. Juncar,
Highly accurate laser wavelength meter based on Doppler effect,
Optics Communications, 262 (2006) 97-102.