



HAL
open science

Etude et réalisation d'une platine porte-échantillon aux performances nanométriques. Application à la microscopie en champ proche.

Ahmad Sinno

► **To cite this version:**

Ahmad Sinno. Etude et réalisation d'une platine porte-échantillon aux performances nanométriques. Application à la microscopie en champ proche.. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2010. Français. NNT: . tel-00741942

HAL Id: tel-00741942

<https://theses.hal.science/tel-00741942>

Submitted on 15 Oct 2012

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.



THÈSE DE DOCTORAT

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

Spécialité
Optoélectronique

Présentée par
Ahmad SINNO

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'Université de
Versailles Saint-Quentin en Yvelines

*Étude et réalisation d'une platine porte-
échantillon aux performances nanométriques.*
Application à la microscopie en champ proche

Soutenance le 29 Juin 2010

Devant le jury composé de :

Y. ALAYLI	PR	Université de Versailles Saint-Quentin – LISV	Directeur de thèse
S. RÉGNIER	PR	Université Pierre et Marie Curie – ISIR	Rapporteur
P. JUNCAR	PR	Conservatoire National des Arts et Métiers – LNE/INM	Rapporteur
G. LÉRONDEL	PR	Université de Technologie de Troyes – ICD/LNIO	Examineur
P. RUAUX	MCF	Université de Versailles Saint-Quentin – LISV	Examineur

SOMMAIRE

<i>INTRODUCTION</i>	1
<i>1. CHAPITRE I</i>	5
<i>PLATINES DE DÉPLACEMENT MILLIMÉTRIQUES EN NANOMÉTROLOGIE DIMENSIONNELLE</i>	5
1.1. Introduction	7
1.2. Systèmes séries – systèmes parallèles.....	8
1.3. Exemples de systèmes « longue-course » séries.....	11
1.3.1. La nanopositioning and nanomeasuring machine (NMM).....	12
1.3.2. La Molecular Measuring Machine.....	14
1.3.3. La μ -CMM du METAS.....	15
1.4. Exemples de systèmes longue-course parallèles.....	17
1.4.1. Le Delta Cube de l'EPFL.....	17
1.4.2. La machine du LNE	18
1.4.3. La machine de mesure de géométrie du NIST.....	20
1.5. Systèmes de balayage dédiés aux microscopes à sonde locale	21
1.6. Techniques de microscopie sur grande étendue	24
1.6.1. Intégration d'un SPM à un autre microscope.....	24
1.6.2. Intégration d'un SPM à une CMM.....	25
1.6.3. Les SPM associés à un actionneur longue-course.....	26
1.6.4. Les SPM à pointes multiples – les matrices de pointes	32
1.7. Conclusion.....	34
1.8. Bibliographie du 1 ^{er} chapitre.....	35

2. CHAPITRE II	43
ARCHITECTURE DE LA PLATEFORME DOUBLE-ÉTAGE	43
2.1. Introduction	45
2.2. L'étage de déplacement longue-course	45
2.2.1. Le guidage par roulements à billes	46
2.2.2. Le guidage sur palier à air	46
2.2.3. Le guidage par lames flexibles	46
2.2.4. Le moteur électromagnétique linéaire	46
2.2.5. L'étage de déplacement millimétrique choisi	47
2.3. L'étage de déplacement piézoélectrique	48
2.3.1. Les actionneurs piézoélectriques simples	48
2.3.2. Les moteurs piézoélectriques linéaires	49
2.3.3. Les étages piézoélectriques guidés par des lames flexibles	49
2.3.4. L'étage de déplacement piézoélectrique choisi	52
2.4. Association des deux étages grossier et fin	53
2.5. L'interféromètre hétérodyne à double passage Zygo	54
2.5.1. La source laser	55
2.5.2. L'interféromètre hétérodyne double passage	56
2.5.3. Le châssis de comptage électronique	57
2.5.4. Limitations de l'interféromètre Zygo	57
2.5.5. Contrôle du déplacement basé sur l'interférométrie hétérodyne	58
2.6. Le montage expérimental	58
2.7. Les sources d'erreurs en interférométrie laser	59
2.8. Conclusion	62
2.9. Bibliographie du 2ème chapitre	63
3. CHAPITRE III	65
CONTRÔLE DU DÉPLACEMENT DES DEUX ÉTAGES	65
3.1. Introduction	67
3.2. Avantages d'un système double-étage	67
3.3. Méthodologies de conception d'un contrôleur double-étage	68
3.3.1. Les méthodologies classiques SISO	69
3.3.2. Les méthodologies de contrôle modernes	73
3.4. Principe de la boucle d'asservissement de l'étage piézoélectrique	74

3.4.1.	Résultats expérimentaux selon une dimension	77
3.4.2.	Extension à deux axes.....	79
3.4.3.	Contrôle en vitesse.....	82
3.5.	Contrôle du déplacement des deux étages.....	82
3.5.1.	Procédure d'alignement des axes	83
3.5.2.	Contrôle de la plateforme double-étage par logique floue.....	89
3.6.	Conclusion.....	94
3.7.	Bibliographie du 3ème chapitre	95
4.	<i>CHAPITRE IV</i>	97
	<i>IMAGERIE LONGUE COURSE</i>	97
4.1.	Introduction	99
4.2.	Le microscope à force atomique – Éléments constitutifs	99
4.3.	Le microscope à force atomique à champ de vue étendu.....	100
4.3.1.	Schéma de principe.....	101
4.3.2.	Intégration de l'actionneur XY sous l'AFM	101
4.3.3.	La boucle d'asservissement en Z.....	103
4.3.4.	Préréglages et analyse d'une première image topographique à titre d'exemple	104
4.3.5.	Topographie d'un guide d'onde en forme de serpent	114
4.4.	Application de la plateforme à la microscopie optique en champ proche.....	117
4.4.1.	Objectifs et applications.....	117
4.4.2.	Mise en place du sSNOM longue-course à partir d'un AFM.....	117
4.4.3.	L'échantillon à échange d'ions utilisé.....	118
4.4.4.	Une détection du signal optique adaptée aux grands déplacements	119
4.4.5.	Résultats expérimentaux du s-SNOM longue-course.....	120
4.4.6.	Conclusion.....	123
4.5.	Conclusion du 4 ^{ème} chapitre.....	124
4.6.	Bibliographie du 4 ^{ème} chapitre.....	125
	<i>CONCLUSION</i>	127
	<i>ANNEXE A</i>	129
	<i>ANNEXE B</i>	135
	<i>PUBLICATIONS</i>	143

INTRODUCTION

Les nanosciences et les nanotechnologies sont actuellement en plein essor ; elles se développent très rapidement et représentent des enjeux économiques et stratégiques importants. De nombreux domaines sont concernés, la physique, la biologie, la chimie, les matériaux, d'une manière générale les sciences mais également des domaines de sciences humaines et sociétales. Les USA viennent de lancer le National Nanotechnology Initiative, programme destiné à faire de ce pays le leader dans ces nouvelles technologies. En Allemagne, en Grande Bretagne, et plus largement en Europe, des instituts de recherche dédiés aux nanotechnologies ainsi que des programmes spécifiques destinés à faire émerger des projets à vocation industrielle sont mis en place. En France, sous l'impulsion du Ministère de la recherche et de l'industrie, le Réseau Micro et Nanotechnologies ainsi que quatre grandes centrales technologiques dédiées aux nanotechnologies ont été créés.

Le 6ème Programme Cadre européen (2002 – 2006) positionne officiellement les nanotechnologies comme axe prioritaire de recherche et de développement au travers de la thématique « Nanotechnologies et nano sciences, matériaux multifonctionnels, nouveaux procédés et production ».

Les travaux de recherche et de développement dans les micro et nanotechnologies vont concerner des domaines aussi variés que l'électronique, les télécommunications, l'optique, la mécanique, la chimie, la biologie, la santé, l'environnement, les transports ou bien encore les sources d'énergie. Les développements et les transferts industriels qui vont être mis en place sont tous conditionnés par la capacité à mesurer des dimensions avec une incertitude de quelques nanomètres. Malgré la présence d'outils de mesure très performants tels que les

microscopes électroniques et à champ proche, cette capacité de mesure constitue aujourd'hui, et encore plus demain, un véritable verrou technologique pour les industriels qui vont être confrontés à la fabrication en grand volume de micro et nano systèmes.

Dans les laboratoires de recherche et chez les industriels de la microélectronique, la caractérisation géométrique et dimensionnelle de motifs critiques submicroniques réalisés avec des tolérances nanométriques est assurée à l'aide de microscopes électroniques, optiques et depuis quelques années par des microscopes à force atomique. La recherche de la réduction des dimensions et des tolérances conduit à devoir caractériser de plus en plus finement les objets en vue de leur assemblage.

Le raccordement au mètre étalon, ainsi que la caractérisation rigoureuse des instruments de mesure est aujourd'hui un problème majeur posé par les industriels en France, en Europe et dans le monde. En effet, il n'existe pas d'étalons de référence d'exactitude suffisante adaptés aux contraintes géométriques et dimensionnelles des motifs issus des technologies de fabrication actuelles.

De plus, l'étude et la caractérisation de composants en nanotechnologies doit impérativement se faire sur une gamme d'échelles à la fois nanométrique, mais également millimétriques, notamment pour comprendre les phénomènes de propagation sur plusieurs échelles. On peut citer les problématiques suivantes : mesures et suivis des fissures du verre, caractérisation des propagations dans les optiques guidées (dimensions des composants millimétriques) par exemple. Or garantir des résolutions et des répétabilités de déplacement nanométriques sur des étendues millimétriques apporte des contraintes mécaniques, métrologiques et instrumentales (temps d'acquisition, vitesse de déplacement et d'asservissement, etc) qui restent de nos jours rédhibitoires pour des systèmes commerciaux.

Nous présentons dans ce manuscrit un système de déplacement et de balayage ayant des performances nanométriques au niveau résolution et répétabilité, avec des étendues de mesures millimétriques. Le système est autonome et opérationnel indépendamment de l'appareillage utilisé. Ce système est essentiellement dédié à la microscopie en champ proche, et peut s'adapter à un certain nombre d'appareils commerciaux utilisés en nanotechnologies, tels que les microscopes en champs proches (AFM – SNOM). Aujourd'hui ce type d'appareils ne peut balayer que sur des dimensions de quelques dizaines de micromètres maximum, avec des résolutions dégradées (typiquement 100 nm à pleine échelle ou 1 nm sur des courses très réduites). Pouvoir réaliser des gravures de motifs sur des tailles millimétriques tout en conservant des propriétés et des définitions nanométriques peut ouvrir la porte à la conception de nouvelles structures. La caractérisation par imagerie AFM ou optique peut ensuite permettre de mieux connaître les propriétés des composants ou des matériaux à des échelles nanoscopiques ou millimétriques. Nous verrons dans ce manuscrit la nécessité de coupler ces deux échelles, par exemple pour déterminer les phénomènes de propagation dans des macro-composants.

Il faut noter qu'il ne s'agit pas ici de développer des appareils dits « métrologiques », par exemple AFM-métrologiques mais uniquement de garantir la résolution et la répétabilité du système de balayage associé. Le fait que ce système puisse s'adapter aisément sur différents types d'appareillages est un point central de la problématique. Nous pensons en effet que la démonstration rapide de faisabilité peut ensuite ouvrir de nouveaux champs applicatifs car les domaines des nanotechnologies sont parfois encore contraints par la complexité des systèmes instrumentaux.

Ce manuscrit est composé de quatre chapitres.

Dans **le premier chapitre**, nous présentons quelques projets développés dans différents laboratoires de métrologie internationaux associés à la problématique de nanositionnement sur grande étendue. Nous montrons les instruments construits dans ces laboratoires et nous les classons selon leur architecture série ou parallèle. La microscopie en champ proche étant l'application à laquelle nous avons eu recours afin de démontrer les performances de notre plateforme de nanositionnement de course de déplacement étendue, nous exposons les différentes techniques permettant de réaliser des microscopies de grande étendue, tout en mettant l'accent sur la technique d'association d'un système de nanositionnement de grande course à un microscope, qui est la technique que nous avons choisi.

Le deuxième chapitre est dédié à la description de la plateforme de nanositionnement 2D à course étendue que nous avons développée. Nous présentons son architecture double-étage, et montrons les éléments composant chacun de ces deux étages – l'étage de déplacement longue-course et l'étage de positionnement fin. Différents capteurs de déplacement de haute précision peuvent répondre aux exigences que nous visons, notamment en termes d'étendue de mesure et de répétabilité. Nous avons choisi comme capteur de déplacement un interféromètre hétérodyne de Michelson à double passage. Nous décrivons dans une deuxième partie de ce chapitre cet interféromètre, ses limitations et les erreurs engendrées pendant une mesure de dynamique millimétrique effectuée à l'aide du système double étage.

Le troisième chapitre est consacré à la description de la méthode d'asservissement de l'actionneur du second étage. Cette méthode, développée au laboratoire, est basée sur l'asservissement de la phase optique du signal hétérodyne de l'interféromètre Zygo. Nous montrons les résultats de déplacements asservis effectués à l'aide de cet actionneur. La plateforme de nanositionnement développée ayant une architecture en double-étage, un contrôleur capable de coordonner les déplacements des actionneurs de chacun des étages afin de suivre au mieux le profil d'une trajectoire désirée est nécessaire. Ce chapitre présente dans une deuxième partie les méthodologies de contrôle d'un système double-étage puis sont exposés les résultats expérimentaux de déplacements sous un contrôle par logique floue.

Le quatrième chapitre est dédié à la présentation des performances de la plateforme de nanositionnement à course étendue. Pour ceci, nous avons choisi d'intégrer la plateforme à des microscopes à sonde locale, en l'occurrence un microscope à force atomique (AFM) et un microscope optique en champ proche (SNOM) dans le but d'en faire un « AFM longue-course » et un « SNOM longue-course ». Les résultats de ces microscopies à champ de vue étendues sont donc présentés dans ce chapitre. Ces mesures ont été effectuées en collaboration avec le Laboratoire de Nanotechnologies et d'Instrumentation Optique (LNIO) de l'Institut Charles Delaunay de l'Université de Technologie Troyes.

Nous résumons en conclusion les performances de la méthode et décrivons les améliorations à apporter à notre système.

1. CHAPITRE I

PLATINES DE DÉPLACEMENT MILLIMÉTRIQUES EN NANOMÉTROLOGIE DIMENSIONNELLE

1.1.	Introduction	7
1.2.	Systèmes séries – systèmes parallèles.....	8
1.3.	Exemples de systèmes « longue-course » séries.....	11
1.3.1.	La nanopositioning and nanomeasuring machine (NMM).....	12
1.3.2.	La Molecular Measuring Machine.....	14
1.3.3.	La μ -CMM du METAS.....	15
1.4.	Exemples de systèmes longue-course parallèles.....	17
1.4.1.	Le Delta Cube de l'EPFL.....	17
1.4.2.	La machine du LNE	18
1.4.3.	La machine de mesure de géométrie du NIST.....	20
1.5.	Systèmes de balayage dédiés aux microscopes à sonde locale	21
1.6.	Techniques de microscopie sur grande étendue	24
1.6.1.	Intégration d'un SPM à un autre microscope.....	24
1.6.2.	Intégration d'un SPM à une CMM.....	25
1.6.3.	Les SPM associés à un actionneur longue-course.....	26
1.6.4.	Les SPM à pointes multiples – les matrices de pointes	32

1.7. Conclusion.....	34
1.8. Bibliographie du 1^{er} chapitre.....	35

1.1. Introduction

Les technologies avancées actuelles telles que la microélectronique, la micromécanique, l'optique, la biologie moléculaire, et l'ingénierie des matériaux par exemple demandent des dynamiques de déplacement croissantes, des exactitudes extrêmes, ainsi que du positionnement à grande vitesse.

Selon la feuille de route internationale de technologie des semi-conducteurs de 2003 [ITRS2003], les dynamiques de positionnement envisagées entre 2010 et 2014 vont couvrir une surface de 450 mm x 450 mm. Il sera nécessaire de mesurer et de fabriquer des structures de 35 nm de large avec des exactitudes nanométriques. Ces demandes extrêmes sont liées à des technologies telles que la lithographie à rayons X ou à faisceaux d'électrons. La lithographie à nano-impression qui est une nouvelle approche utilisée dans la fabrication de nanostructures va aussi exiger de grandes performances sur les technologies de positionnement. L'inspection des masques et des « wafers », le test des circuits, la microscopie à sonde locale sur grande étendue et de grande vitesse, l'ingénierie de précision, le traitement et l'assemblage de précision, le développement et l'analyse de nouveaux matériaux, la caractérisation de surface, les mesures tridimensionnelles de précision sont des techniques qui dépendent beaucoup de l'efficacité des systèmes de mesure et de positionnement. C'est en combinant les techniques de mesure et de positionnement, et en les adaptant aux tâches visées, que peuvent être atteintes les frontières des performances. Ces techniques de mesure nécessitent également souvent une traçabilité des mesures.

Le Tableau 1-1 donne une vue d'ensemble des conditions limites des demandes de positionnement. Ces besoins s'étendent sur plusieurs domaines applicatifs et ont recours à différentes techniques de positionnement.

	Technologie des MOEMS¹	Technologie des circuits intégrés	Nanotechnologie
Type de l'échantillon	Structures sur masques, pastilles...	Structures sur masques, pastilles...	Structures sur pastilles ou autre
Conditions ambiantes	Air ; vide	Air ; vide	Air ; vide ; liquide
Matériau	Silicium, substrats de masques, métaux...	Silicium, céramique, verre, métaux, plastique...	Silicium, céramique, métaux, matières organiques

¹ MOEMS : Micro-opto-electromechanical systems.

Type de mesure	3D	2D	3D
Volume de l'échantillon	50 mm x 50 mm épaisseur ~ 25 mm	150 à 300 mm ² épaisseur qq µm	10 mm x 10 mm épaisseur : qq mm
Dynamique de positionnement	50 mm x 50 mm vertical : 25 mm	175 mm x 175 mm vertical : qq 100 µm	10 mm x 10 mm vertical : 1 mm
Dynamique de mesure	50 mm x 50 mm vertical : 25 mm	175 mm x 175 mm vertical : qq 10 µm	10 µm x 10 µm vertical : 10 µm
Exactitude demandée	Centaines de nm	quelques nm	1 nm et moins

Tableau 1-1 : Exemples d'applications nécessitant un large volume de positionnement et de mesure dans différents domaines technologiques [Danzebrink2006]

Par exemple, les microscopes à force atomique sont utilisés pour les surfaces et revêtements plats avec un balayage lent, alors que les méthodes optiques ou les microscopies électroniques sont appliquées lorsqu'une inspection rapide est requise [Danzebrink2006].

Les volumes des échantillons sont parfois très grands, nécessitant des appareils de positionnement convenables pouvant parcourir plusieurs millimètres, voire parfois plusieurs centimètres. Cependant, ceci se fait souvent au prix d'une exactitude détériorée.

Une plateforme de déplacement de précision « longue-course » aurait une multitude d'applications dans ces divers domaines. Par exemple, l'invention de la microscopie en champ proche a permis à de nouveaux produits de voir le jour et a nécessité par la suite l'apparition de nouvelles techniques de fabrication et de validation. Le développement de ces applications repose sur le développement de plateformes de positionnement à l'échelle du nanomètre ayant une étendue de travail millimétrique.

1.2. Systèmes séries – systèmes parallèles

On recense deux types d'architectures dans les systèmes de positionnement multiaxes : la chaîne métrologique série et la chaîne métrologique parallèle.

Une chaîne série est réalisée par l'empilement en série de systèmes permettant chacun d'obtenir en principe un degré de liberté, translation ou rotation [Figure 1-1]. L'empilement de modules affaiblit la rigidité globale de la structure. La réalisation de mouvements complexes par combinaison de déplacements est possible, mais cela exige la présence d'un système de pilotage simultané de plusieurs déplacements.

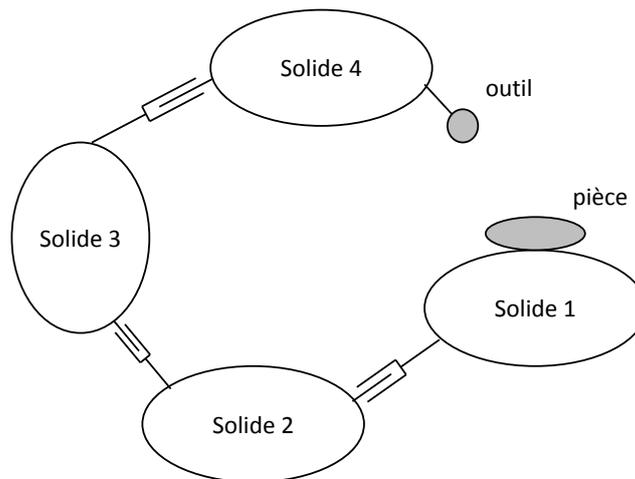


Figure 1-1 : Chaîne métrologique série [Lahousse2005]

La notion de chaîne métrologique met en évidence le fait que la distance outil/pièce, dont la valeur est très petite, subit les perturbations qui agissent sur une chaîne beaucoup plus longue. La qualité de la conception d'une machine à structure « série » passe donc par la simplicité et une envergure réduite de cette chaîne.

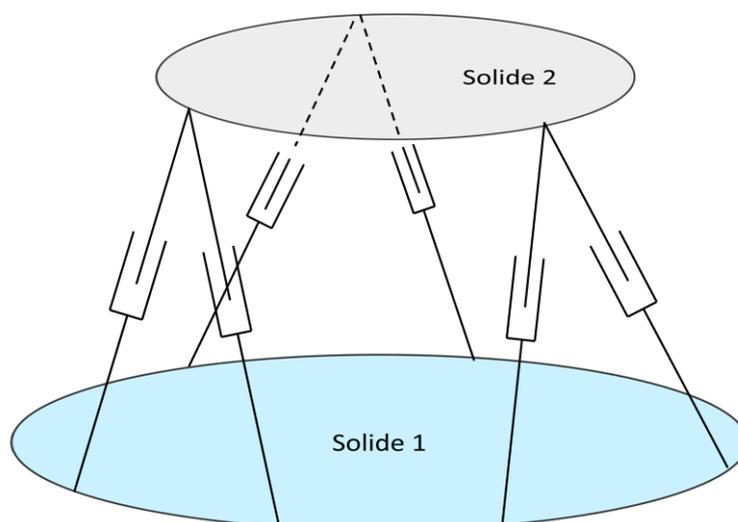


Figure 1-2 : Chaîne métrologique parallèle [Lahousse2005]

La structure d'une chaîne parallèle est généralement composée d'un seul étage avec la mise en œuvre de plusieurs liaisons identiques [Figure 1-2]. Ceci permet de faire varier plusieurs degrés de liberté. Le nombre de degrés de liberté est en général égal au nombre de liaisons. Tous les capteurs d'une chaîne parallèle mesurent la position de la plateforme en déplacement par rapport à une référence stationnaire. Ceci implique que tout mouvement est inclus dans la boucle d'asservissement, peu importe l'actionneur qui a provoqué le déplacement. Cette structure est idéale pour réaliser des corrections de position de faible amplitude suivant les six degrés de liberté. Elle permet d'éviter la sommation des erreurs de chaque liaison. La chaîne parallèle demande cependant une bonne conception des liaisons et une bonne maîtrise des phénomènes de frottement dans les articulations. Un exemple de chaîne métrologique parallèle est la plateforme de Stewart [Innocenti1990] disposant de six actionneurs permettant de maîtriser les six degrés de libertés dans l'espace. La chaîne parallèle présente un intérêt majeur sur le plan rigidité.

Le Tableau 1-2 récapitule quelques caractéristiques distinguant les chaînes séries des chaînes parallèles.

Chaîne série	Chaîne parallèle
Cumul des erreurs de guidage	Pas d'erreurs et dérives cumulées
Somme des résolutions des étages	Résolution de la plateforme
Erreurs des étages inférieurs amplifiés par des bras de leviers importants	Pas de bras de leviers par construction
Grande inertie	Faible inertie
Rapport masse sur raideur très faible	Rapport masse sur raideur élevé
Câblage mobile	Absence de câblage mobile

Tableau 1-2 : Comparaison entre chaîne série et chaîne parallèle



Figure 1-3 : Positionnement par chaîne parallèle [Symétrie]

Un exemple de machine parallèle est illustré sur la Figure 1-3 qui représente une sphère de 17 tonnes et de 5 mètres de diamètre. La position est réglable suivant les six degrés de liberté de l'espace, avec une incertitude de 0,01 mm par le moyen de 6 vérins étudiés par le LIRMM (Laboratoire d'Informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier) pour la société SYMÉTRIE [Symétrie].

Préalablement à la présentation de la plateforme de déplacement de précision que nous avons développée, nous présentons quelques systèmes développés dans les laboratoires de métrologie internationaux. Nous les classons selon leur architecture série ou parallèle.

1.3. Exemples de systèmes « longue-course » séries

Les systèmes de nanopositionnement longue-course sont multiples. Nous recensons : la « Nanostation 300 » [Dirscherl2006] [SIS], la « small CMM » du NPL [Lewis2003], la « 3D Micro Measuring Device » du PTB [Brand2002], la « Micro CMM » [Fan2006], et bien d'autres systèmes commerciaux. Nous détaillons ci-après quelques-uns de ces systèmes.

1.3.1. La nanopositioning and nanomeasuring machine (NMM)

Parmi les machines de déplacement de précision les plus connues, nous rencontrons la machine de nanopositionnement et de nanomesure développée par la société Allemande SIOS, et qui se retrouve dans nombre de laboratoires de métrologie dans le monde étant donné ses performances intéressantes à l'échelle du nanomètre.

Cette machine a été développée à l'institut de mesure des processus et de technologie des capteurs de l'Université de Technologie d'Ilmenau en Allemagne pour la société SIOS, et porte le nom de machine de nanopositionnement et de nanomesure (NMM pour *nanopositioning and nanomeasuring machine*) [Figure 1-4]. Elle peut atteindre une dynamique de mesure de 25 mm x 25 mm x 5 mm. La résolution de chacun des trois interféromètres à laser qui lui sont intégrés est de 0,1 nm. Cette machine est utilisée dans plusieurs laboratoires de métrologie dans le monde pour servir notamment de porte-échantillon pour les microscopes à sonde locale vu la facilité de lui intégrer et inter-changer un microscope ou un autre outil. La NMM permet de positionner, mesurer, balayer, traiter et manipuler des objets avec des exactitudes nanométriques et sur des surfaces spatialement étendues.

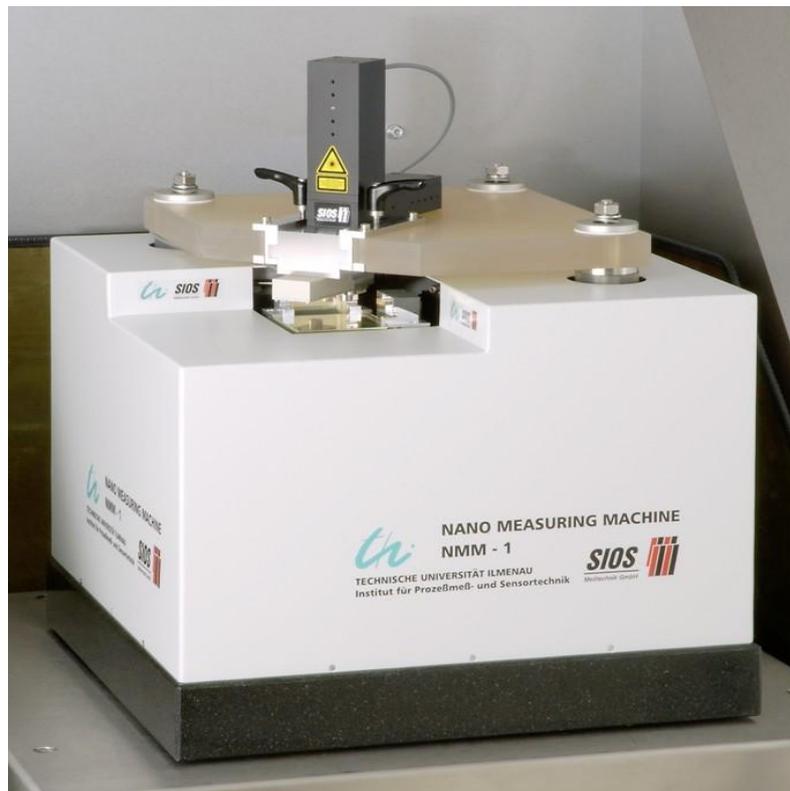


Figure 1-4 : La nanopositioning and nanomeasuring machine [SIOS]

La NMM a été conçue pour des fins métrologiques, et notamment afin d'éliminer toute erreur d'Abbe. Ceci est effectué en minimisant la distance entre le point d'intersection des axes de mesure des interféromètres et le point de mesure à effectuer (à l'aide de la pointe d'un microscope par exemple) sur l'échantillon comme illustré Figure 1-5 et Figure 1-6. Les interféromètres à laser mesurent les déplacements de trois miroirs mutuellement orthogonaux (formant un cube). L'échantillon est placé à l'intérieur de ce cube miroir de telle sorte que l'outil de mesure, en l'occurrence la pointe d'un microscope à sonde locale, coïncide avec le point d'intersection virtuel des trois axes de mesure interférométriques.

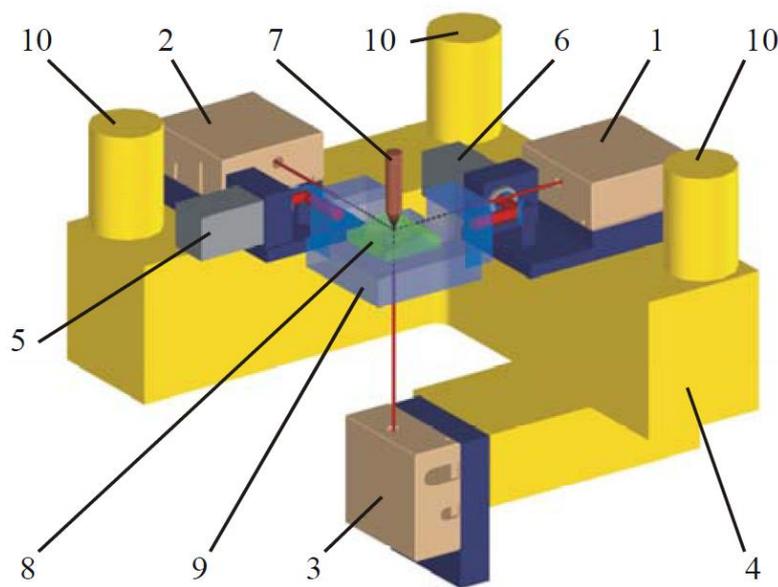


Figure 1-5 : Éléments constituant la NMM. 1- interféromètre de l'axe x, 2- interféromètre de l'axe y, 3- interféromètre de l'axe z, 4- cadre métrologique en Zérodur, 5- capteur angulaire de lacet et de roulis, 6- capteur angulaire de tangage et de lacet, 7- l'outil de sondage, 8- l'échantillon, 9- cube miroir, 10- points de support pour le système de sondage [Jäger2001] [Jäger2002].

Les facteurs contribuant au calcul d'incertitude des mesures de la NMM sont [Jäger2001] [Jäger2002] :

- La longueur d'onde des lasers He-Ne.
- Les déviations d'amplitude et de phase des interféromètres (erreurs périodiques).
- Les erreurs de quantification et d'arrondis durant la démodulation des signaux des interféromètres.

- L'incertitude du système de référence du cube miroir.
- L'incertitude sur le calcul de l'indice de réfraction de l'air.
- L'expansion thermique du cadre métrologique, des interféromètres et du système de sondage.
- L'incertitude sur les mesures de longueurs due aux erreurs angulaires.

L'incertitude combinée de la NMM (sans le système de sondage) est de 8 à 10 nm sur chaque axe.

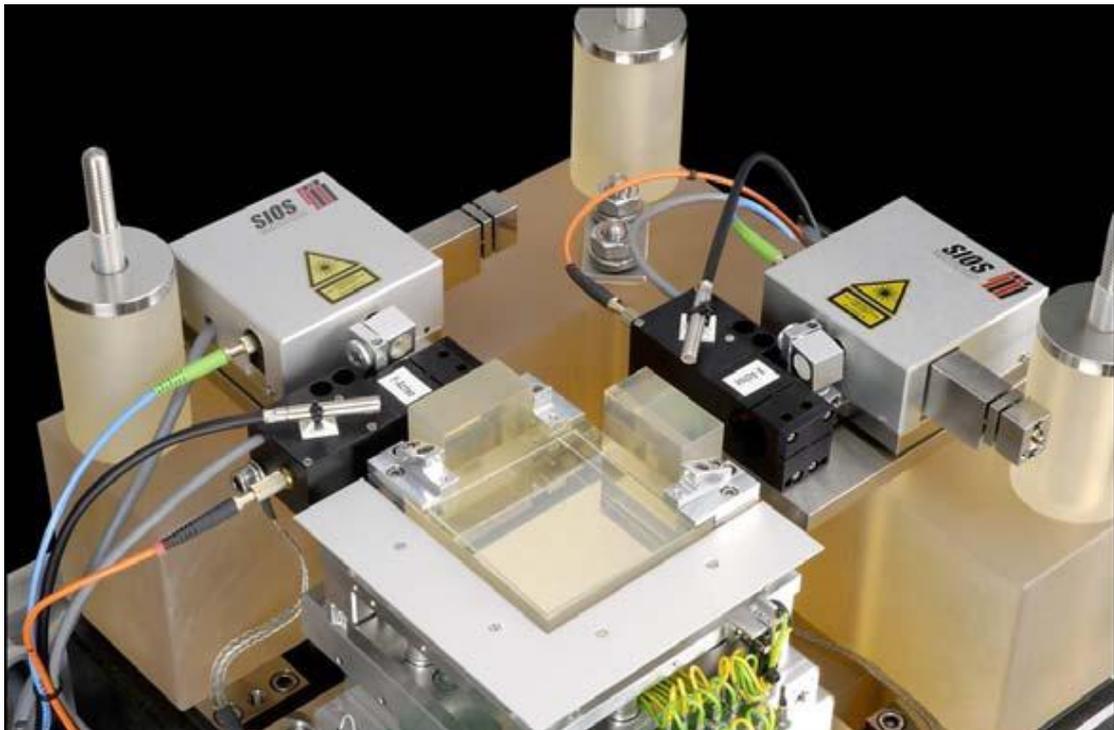


Figure 1-6 : Photo de la NMM

1.3.2. La Molecular Measuring Machine

Afin de répondre aux besoins des industries préparant la fabrication des futures générations des composants nanoélectroniques, le NIST (*National Institute of Standards and Technology*) a conçu et construit un instrument qu'il a nommé M^3 (*Molecular Measuring Machine*) [Figure 1-7] [Teague1989] [Kramar2005] dans le but de mesurer, avec 1 nanomètre d'incertitude standard, les positions de motifs localisés sur une surface de 50 mm x 50 mm. Atteindre les capacités de la M^3 a nécessité le développement et l'intégration de plusieurs technologies de pointe : des sondes de balayage avec une résolution sub-nanométrique, des interféromètres pour des mesures de positions avec exactitudes nanométriques, ainsi que des actionneurs générateurs de déplacements nanométriques. Ceux-ci ont été combinés dans un

environnement ultravide, une isolation des bruits mécaniques et acoustiques, et une stabilisation thermique.

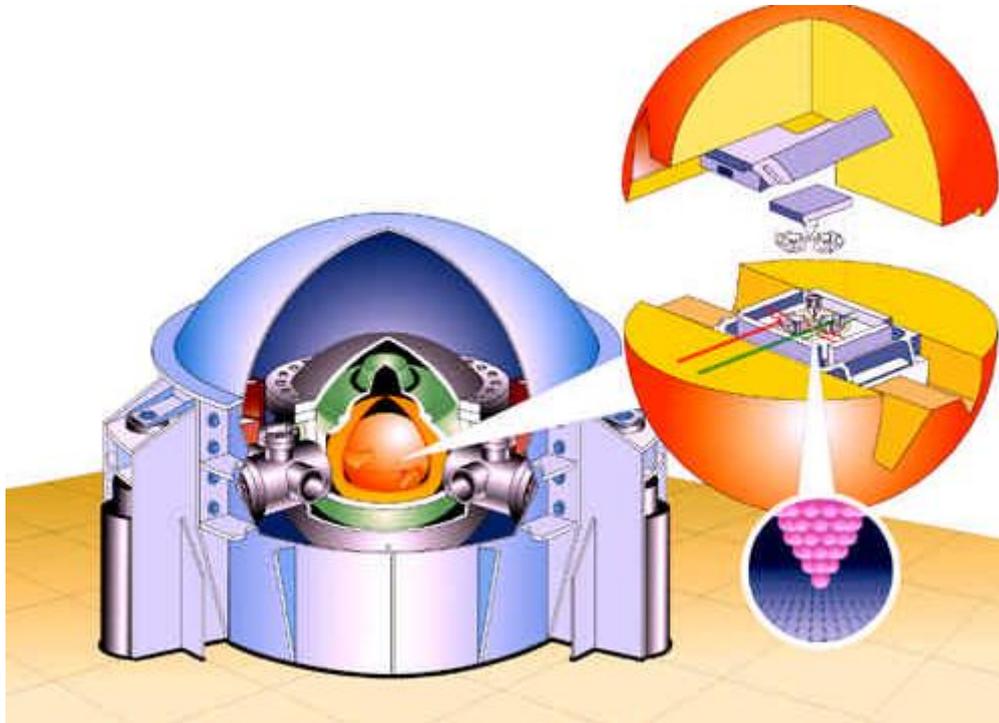


Figure 1-7 : La Molecular Measuring Machine [Kramar2005]. La figure montre les différents cadres métrologiques et un agrandissement du système de déplacement ainsi que de la sonde de mesure de l'axe vertical

Afin d'atteindre la dynamique et la résolution souhaitées, une configuration à double-étage a été utilisée : un étage « longue-course » et un étage pour le positionnement fin. Les déplacements de la sonde de mesure par rapport à l'échantillon étudié sont mesurés à l'aide d'interféromètres de Michelson. La M³ est dédiée à la microscopie à effet tunnel, mais des améliorations visent à lui intégrer une sonde d'un microscope à force atomique.

1.3.3. La μ -CMM du METAS

Afin de subvenir aux exigences futures de qualité et de précision en microtechnologie, l'office fédéral de métrologie suisse (METAS) a développé une nouvelle machine à mesurer 3D ultra-précise [Figure 1-8] [Küng2007] pour les pièces de petites dimensions. Elle est nommée μ -CMM (*micro Coordinate Measuring Machine*).



Figure 1-8 : La μ -CMM du METAS [Küng2007]

Son succès est essentiellement basé sur deux éléments clés : la tête de mesure qui a été développée lors d'un projet de recherche lancé par le METAS, en collaboration avec l'EPF de Lausanne et le partenaire industriel Mecartex SA, Losone ; son architecture à bras de flexion qui permet au palpeur d'avoir des forces de contact extrêmement faibles pour ne pas blesser les pièces à mesurer, tout en conservant une grande rigidité pour atteindre une exactitude de l'ordre du nanomètre.

La table de translation 3D ultraprécise à base de moteurs à coussins d'air a été développée par Philips CFT. Elle intègre tous les principes métrologiques permettant de s'affranchir ou de corriger au mieux toute erreur de déplacement. En particulier, le déplacement des trois axes est mesuré sans erreur d'Abbe du fait que les trois faisceaux des interféromètres de mesure de position pointent virtuellement sur le centre de la sonde comme montré sur la Figure 1-9.

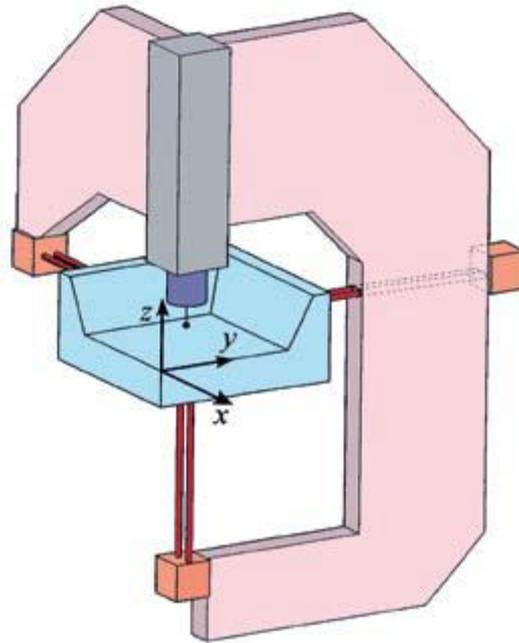


Figure 1-9 : Conception de la μ -CMM en respectant le principe d'Abbe [Küng2007]

Caractérisée dans ses moindres détails, la machine atteint une exactitude inégalée pour des mesures 3D : une répétabilité en 1 point inférieure à 5 nm et une exactitude inférieure à 80 nm dans tout son volume de travail de 80 mm x 80 mm x 39 mm. Son interface utilisateur intègre toutes les fonctionnalités de mesure par palpé et balayage, ce qui en fait un instrument aussi flexible que précis pour la recherche et l'industrie microtechnique.

1.4. Exemples de systèmes longue-course parallèles

1.4.1. Le Delta Cube de l'EPFL

Le Delta Cube de L'école Polytechnique Fédérale De Lausanne (EPFL) est un système de nanopositionnement 3D à structure parallèle basé sur des lames flexibles [Figure 1-10]. Ce robot est capable d'effectuer des déplacements répétables avec une résolution de 10 nm sur chaque axe dans un volume de $4 \times 4 \times 4 \text{ mm}^3$ ($\pm 2 \text{ mm}$ pour chaque axe). Il est utilisé pour la caractérisation de surface sur grande étendue [Balemi2004].

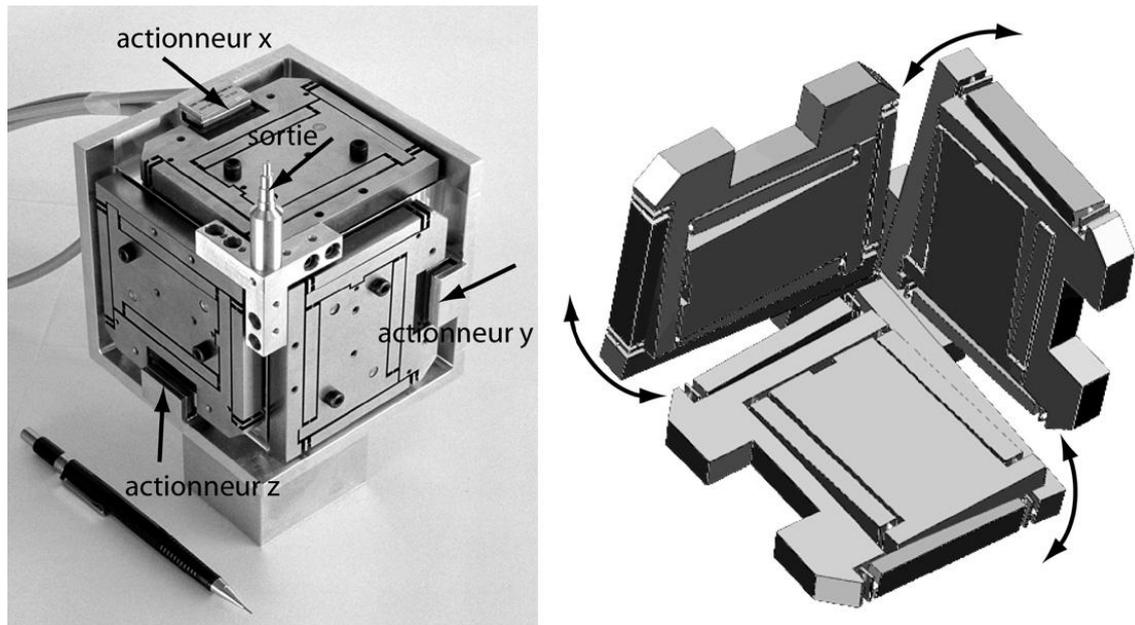


Figure 1-10 : Le « Delta Cube » basé sur des mécanismes de flexion et ayant une étendue de déplacement de 1 mm pour chaque axe [Balemi2004]

1.4.2. La machine du LNE

Le projet *Nanométrie* du Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) s'articule autour de la réalisation d'un nouvel instrument de mesure [Ducourtieux2005-1] [Ducourtieux2005-2] [Vailleau2005] [Lahousse2005]. Cette machine assure les fonctions d'une machine à mesurer tridimensionnelle spécialisée dans la mesure d'objets plats comme les masques qui sont les outillages fondamentaux de l'industrie des semiconducteurs. Cette machine a une étendue de mesure suivant les axes X et Y de 300 mm et de 50 μm suivant l'axe Z. Les incertitudes horizontales visées suivant X ou Y sont de 10 nm pour un déplacement de 10 mm, et de 30 nm pour un déplacement de 300 mm. L'incertitude verticale visée suivant l'axe Z est de 2 nm tant pour un déplacement de 10 mm en X, Y (rectitude X, Y) que pour un déplacement de 50 μm en Z. Sa photo et son schéma sont représentés Figure 1-11 et Figure 1-12.



Figure 1-11 : La machine du LNE [Lahousse2005]

Cette machine déplace un objet à mesurer sous un capteur (un instrument de palpé) interchangeable. Trois types de capteurs lui ont été intégrés : un microscope à force atomique, un microscope optique et un palpeur optique. Cependant, la conception de la machine autorise l'intégration de tout autre capteur.

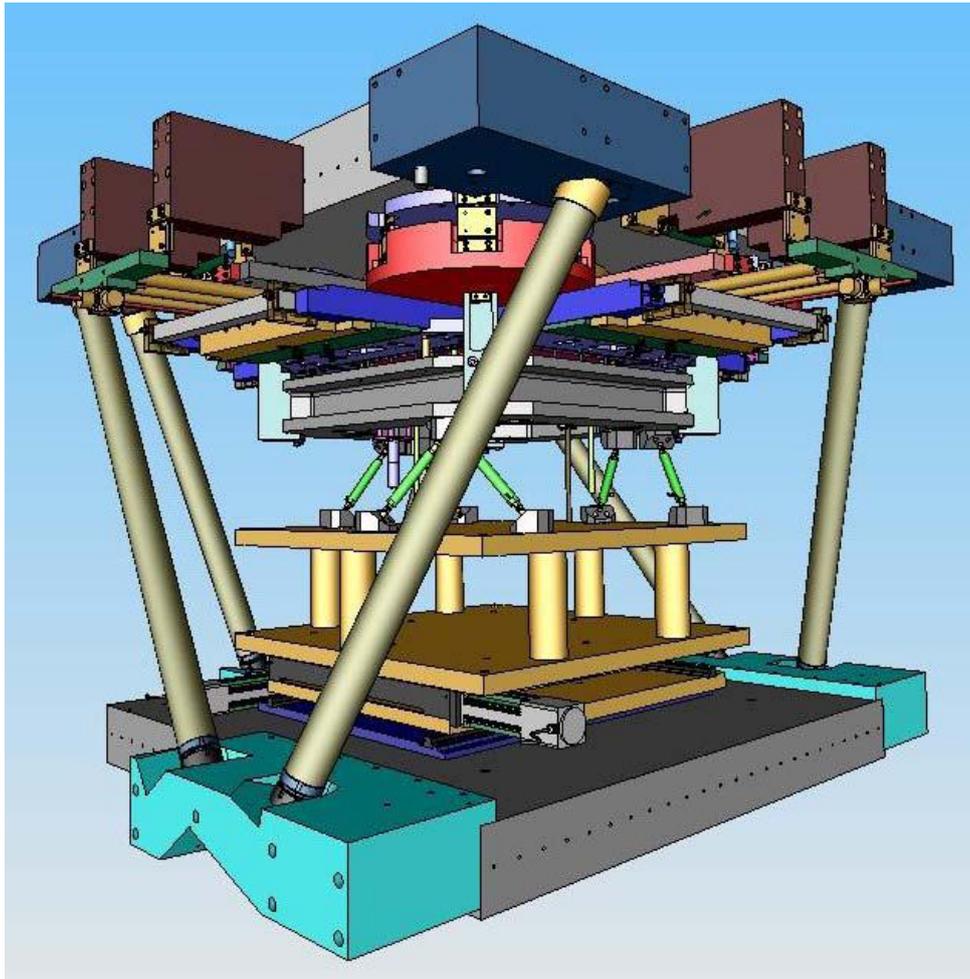


Figure 1-12 : Dessin assisté par ordinateur de la machine du LNE [Lahousse2005]

1.4.3. La machine de mesure de géométrie du NIST

La machine de mesure de géométrie (GEMM pour *GEometry Measuring Machine*) du NIST (*National Institute of Standards and Technology*) est utilisée comme profilomètre pour la mesure de formes bidimensionnelles. L'objectif de la GEMM [Kim2004] [Griesmann2005] [Machkour2006] est de pouvoir mesurer la géométrie locale d'une surface arbitraire, et de reconstruire la surface à partir des données collectées. Elle permet des mesures sur des pièces de 100 mm de diamètre.

La conception du prototype de la GEMM est montrée sur la Figure 1-13. La GEMM utilise un interféromètre à mesure de phase pour mesurer la surface locale de la pièce. Pendant la mesure de la surface, l'interféromètre doit être déplacé d'un point à un autre et il doit être possible d'ajuster son orientation de façon à ce que le faisceau de mesure reste normal à la surface de mesure. Ceci nécessite un actionneur à six degrés de liberté. Dans la GEMM, une plateforme de Stewart (hexapode) est utilisée pour orienter l'interféromètre. La plateforme de

Stewart se caractérise par sa rigidité et ses déplacements stables. La GEMM permet de positionner l'interféromètre avec une résolution de $1\ \mu\text{m}$ dans un volume de $80\ \text{mm} \times 80\ \text{mm} \times 25\ \text{mm}$ [Kim2004].

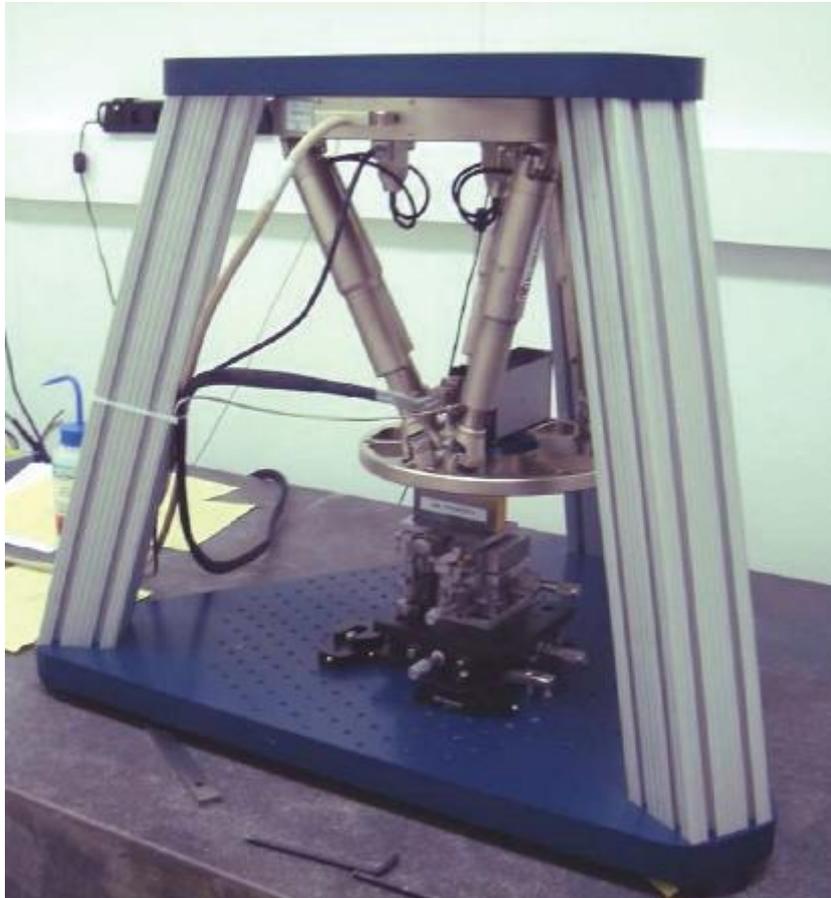


Figure 1-13 : Geometry Measuring Machine (GEMM) [Kim2004]

1.5. Systèmes de balayage dédiés aux microscopes à sonde locale

Selon leurs structures, les microscopes à sonde locale peuvent être divisés en microscopes à balayage tridimensionnel de la pointe, microscopes à balayage tridimensionnel de l'échantillon, et microscopes séparant le balayage dans le plan XY du balayage selon l'axe Z. Les microscopes déplaçant l'échantillon sont très répandus dans les microscopes commerciaux du fait de leur simplicité. Ils ont cependant des limitations de taille et de masse d'échantillon qui, si elles sont grandes, influencent la bande passante de l'actionneur portant l'échantillon. Comparés aux microscopes conventionnels à balayage 3D de la pointe tels que les microscopes équipés d'un actionneur piézoélectrique en tube, les microscopes séparant le

balayage XY du balayage selon Z (actionneur piézoélectrique 2D à lames flexibles pour XY, et actionneur piézoélectrique en tube pour Z par exemple) permettent une vitesse de balayage dix fois supérieure. Ces microscopes offrent plus de flexibilité ainsi que des dynamiques de balayage étendues pour le plan horizontal et pour l'axe vertical.

La linéarité des actionneurs est souvent améliorée par des algorithmes logiciels ou bien à l'aide de capteurs externes. Les instruments fonctionnant en boucle ouverte avec correction logicielle offrent une linéarité de 10%, alors que ceux équipés de capteurs capacitifs ou optiques peuvent réduire la non-linéarité à moins de 1%.

La course de déplacement latéral des microscopes peut aller de 0,5 μm jusqu'à 100 μm environ, avec une course verticale de l'ordre de 10 μm . Quelques microscopes offrent des actionneurs différents pour différentes courses de balayage afin de garder un ratio course/résolution constant. Les logiciels d'acquisition de données peuvent échantillonner des images avec des tailles allant jusqu'à 4096 x 4096 pixels ; de plus amples informations sont obtenues par des méthodes d'analyses quantitatives statistiques.

La calibration des microscopes est souvent effectuée grâce à des algorithmes appropriés. Selon leur domaine d'application, les appareils peuvent être divisés en deux groupes : ceux utilisés dans les laboratoires de recherche, et ceux utilisés dans l'industrie de fabrication. Les microscopes industriels sont des outils essentiels pour l'inspection dans l'industrie pour effectuer des mesures dimensionnelles telles que les mesures de rugosité de surface, de largeur de tranchée, des pentes... Ces microscopes offrent souvent des options de fonctionnement avancées. Ils peuvent, par exemple, trouver automatiquement les paramètres d'asservissement optimaux en fonction de la taille de l'échantillon. Ils offrent souvent aussi des courses de positionnement étendues. Nous pouvons trouver des microscopes équipés d'actionneurs XY avec des courses allant de 200 mm x 200 mm jusqu'à 1100 mm x 1300 mm pour les mesures des tranches de silicium par exemple [Veeco] [PSIA].

Le Tableau 1-3 montre les principales caractéristiques des microscopes à force atomique se trouvant dans plusieurs laboratoires de nanométrie internationale.

Institut de métrologie	Instrument			Remarques
	Etendue de mesure XYZ (μm^3)	Type de balayage	Traçabilité	
AIST/NMIJ, Japon [Misumi2003]	100 x 100 x 12	Échantillon : x/y/z	xyz : Interféromètres homodynes	Fait sur mesure
IMGC, Italie [Picotto2001]	30 x 30 x 18	Échantillon : x/y	Capteurs capacitifs calibrés par des interféromètres	Fait maison
KRISS, Corée [Kim2004]	100 x 100 x 12	Échantillon : x/y	xy : interféromètres hétérodynes, z : capteurs capacitifs calibrés	AFM commercial modifié
LNE, France [Lahousse2005]	300 000 x 300 000 x 50	Échantillon : x/y	xy : interféromètres et encodeurs optiques 2D, z : capteurs capacitifs	Fait maison
METAS, Suisse [Meli1998-1] [Meli1998-2] [Meli2001] [Meli2005]	70 x 70 x 5	Pointe : x/y/z	xyz : Interféromètres homodynes	AFM métrologique commercial avec platines linéaires longue-course
MIKES, Finlande [Korpelainen2004]	100 x 100 x 16	Échantillon : x/y/z	Capteurs de position calibrés par interférométrie, et réseaux 1D	AFM commercial modifié
NIM, Chine [Mingzhen2007]	50 x 50 x 2	Échantillon : x/y/z	xyz : Interféromètres homodynes	AFM commercial modifié
NIST, États-Unis [Dixson2000]	50 x 50 x 5	Échantillon : x/y/z	xy : interféromètres hétérodynes, z : capteur capacitif calibré	AFM commercial avec actionneur xy commercial
NMI-VSL, Pays-Bas [Dirscherl2005]	100 x 100 x 20	Échantillon : x/y/z	xyz : Interféromètres hétérodynes	AFM commercial avec actionneur xy commercial
NPL, Grande-	100 x 100 x 5	Échantillon :	xyz :	AFM

Bretagne [Haycocks2005]		x/y	Interféromètres homodynes	commercial modifié
PTB, Allemagne [Koenders2006]	25000 x 25000 x 5000	Échantillon : x/y/z	xyz : Interféromètres homodynes	AFM + étage piézoélectrique + NPM (Nano Positioning Machine)

Tableau 1-3 : Tableau montrant les étendues de positionnement des microscopes à force atomique pouvant être atteintes dans les instituts de métrologie internationaux. Différents types de balayage, de mesure de position et de méthodes de construction sont utilisés

Le Tableau 1-3 montre que la plupart de ces microscopes sont limités en course de déplacement à quelques dizaines de micromètres. Des courses de déplacement millimétriques peuvent être atteintes en associant un système de déplacement au microscope. Ces microscopes sont soit construits en laboratoire, soit des microscopes commerciaux modifiés. Nous notons ici l'importance de la traçabilité de la mesure, d'où l'utilisation le plus souvent d'interféromètres homodynes ou hétérodyne.

Le développement actuel des constructeurs de microscopes tend vers l'amélioration de l'exactitude tout en augmentant la vitesse de balayage et l'étendue de positionnement. Dans ce qui suit, nous montrons les techniques permettant d'atteindre ces objectifs.

1.6. Techniques de microscopie sur grande étendue

Afin d'étendre le champ de vue des microscopes à sonde locale, différentes techniques sont apparues. Certains constructeurs combinent différents types de microscopes, d'autres associent le microscope à un système de déplacement ayant une grande dynamique pour remplacer l'actionneur faible course du microscope, et d'autres multiplient le nombre de sondes de mesure.

1.6.1. Intégration d'un SPM à un autre microscope

Le potentiel des microscopes à sonde locale SPM (*Scanning Probe Microscope*) peut être augmenté quand ils sont associés à d'autres instruments. Il existe une multitude d'exemples en métrologie dimensionnelle sur l'association d'instruments différents. Un exemple est l'association d'un AFM à un microscope à interférence optique [Danzebrink2003] [Tyrrell2003] [Tyrrell2004]. L'objectif de cette association est de pouvoir visualiser une large étendue de l'échantillon afin de sélectionner rapidement une région d'intérêt pour être mesurée avec l'AFM [Figure 1-14]. En plus de cette fonction de base, le système optique peut être utilisé pour obtenir des mesures dimensionnelles ou analytiques de l'échantillon. Dans ce cas, le faisceau optique est balayé rapidement afin de fournir une vue

globale de l'échantillon. Les stratégies de mesure avancées combinant les deux techniques résultent en une réduction du temps de mesure. Un autre instrument combine un AFM à un profilomètre optique [Sokolov2005].

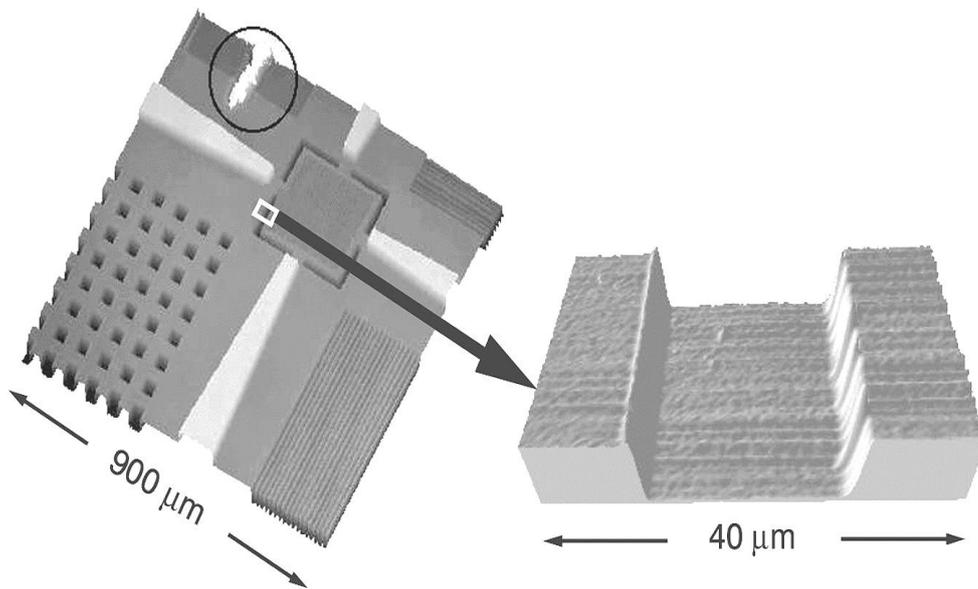


Figure 1-14 : AFM associé à un microscope optique [Tyrrell2004]. L'image de droite est une image AFM obtenue après sélection de la zone d'intérêt dans l'image optique de gauche

Différentes configurations ont permis l'association d'un SPM à un microscope optique [Suzuki1992] [Hipp1992] [DalSavio2002] [Nakano1998] [DME] [WITec] [CSM]. L'avantage principal d'une telle combinaison est la définition exacte de la relation géométrique entre l'image optique et l'image du microscope à sonde locale.

1.6.2. Intégration d'un SPM à une CMM

Afin d'étendre le champ de vue d'un microscope, il est monté sur une machine à mesurer tridimensionnelle (CMM pour *Coordinate Measuring Machine*) permettant ainsi le positionnement de la pointe du microscope dans l'espace couvert par la CMM [DeChiffre1999] [Kofod2002]. Ces systèmes intégrés sont utilisés pour cartographier des surfaces [Wyant1998] [Yanagi2002] [Huerth2003] [Bariani2004] [DeChiffre2004] [Hansen2005]. Une image est obtenue en découpant la surface de l'échantillon en zones qui sont balayées l'une à la suite de l'autre par le microscope SPM. Le microscope effectue une mesure (une image) correspondant à son étendue de mesure. La CMM est utilisée afin de

repositionner la pointe du microscope entre les mesures. Les images réalisées par le microscope se recouvrent partiellement afin de faciliter la reconstruction ultérieure de l'image. Les mesures obtenues sont ensuite recollées ensemble formant ainsi une grande image supérieure en taille à celle couverte par le champ de vue du microscope.

Cette technique de recollement (*stitching*, en anglais) présente quelques inconvénients liés au temps de mesure et à la nécessité d'un traitement d'image ultérieur. Elle est limitée aux échantillons présentant des motifs sur la surface. Un recollement correct est obtenu en coïncidant au mieux les parties communes de deux images adjacentes. Dans le cas réel, le recollement n'est jamais parfait. Une incertitude de 0,8 % a été obtenue pour une surface de 1,2 mm constituée de 49 images AFM recollées ensemble [Bariani2004] comme montré sur la Figure 1-15.

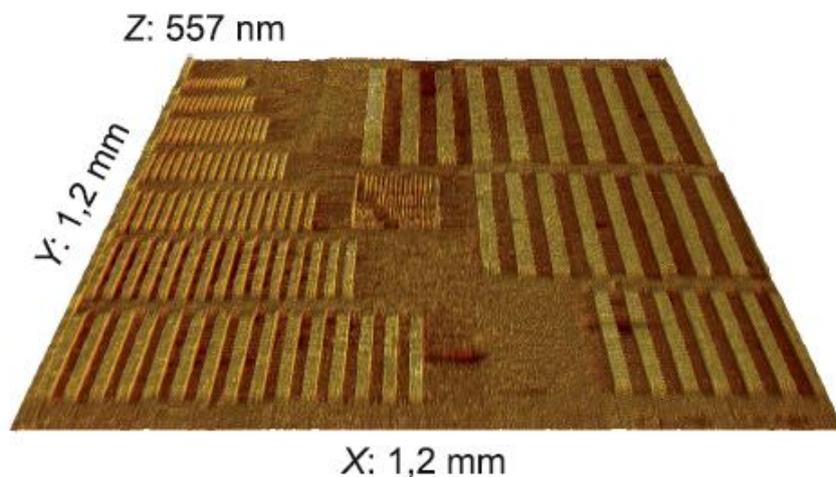


Figure 1-15 : Image AFM de dimensions 1,2 mm x 1,2 mm obtenue à partir de 49 sous-images AFM recollées ensemble [Bariani2004]. Le système de mesure est constitué d'un AFM intégré à une CMM

1.6.3. Les SPM associés à un actionneur longue-course

Plusieurs instituts de métrologie dans le monde ont, en cours de développement, des systèmes de déplacement ayant une grande dynamique, typiquement millimétrique, avec une intégration sous des microscopes à sonde locale. Le terme « SPM longue course » fait référence à des instruments permettant d'effectuer des images sur une étendue de plusieurs millimètres. Ces SPM (*Scanning Probe Microscope*) sont généralement constitués de :

- un système de positionnement (souvent commercial) pour le déplacement de la pièce de mesure et la mesure de sa position dans l'espace tridimensionnel [Hausotte2002] [Jaeger2004],
- une sonde SPM passive pour détecter la surface de la pièce de mesure,
- une électronique de contrôle et un logiciel pour la gestion du système, l'évaluation des données et la visualisation.

Un SPM longue-course nécessite un système de positionnement tridimensionnel doté d'un asservissement en boucle fermée des trois positions de l'espace, en plus d'une mesure de position traçable, des résolutions sub-nanométriques et une élimination des dérives dans la mesure du possible.

La sonde SPM passive, quant à elle, est utilisée afin de garder constante la distance pointe-échantillon et détecter ainsi la surface de l'échantillon. Le système de déplacement effectue un balayage de la sonde par rapport à l'échantillon (ou inversement) tout en échantillonnant la position verticale de points équidistants horizontalement. Le résultat est une matrice de positions verticales correspondant à une grille de points de mesure équidistants du plan horizontal.

Un exemple de SPM « longue course » est la M^3 (*Molecular Measuring Machine*) [Teague1989] [Kramar2005] qui consiste à combiner un système de déplacement longue course à un microscope à effet tunnel. La M^3 a été conçue pour effectuer des résolutions latérales sub-nanométriques sur une étendue de mesure de 50 mm x 50 mm. Elle permet aussi d'atteindre une incertitude de 1 nm pour un positionnement d'un point à un autre. Un autre exemple est le LORS (*LOng Range Scanning system*) [Holmes2000] constitué d'un étage de déplacement à six degrés de liberté suspendu magnétiquement. Sa course de déplacement est de 25 mm x 25 mm x 0,1 mm.

Une vue d'ensemble sur l'état de l'art en matière de SPM longue-course associant un système de positionnement montre que le système de positionnement le plus utilisé est la NMM (*nanopositioning and nanomeasuring machine*) [Figure 1-16] développée à l'Université de Technologie d'Ilmema [Hausotte2002], et qui a été décrite dans un paragraphe précédent.



Figure 1-16 : La NMM et les différentes sondes interchangeable qui lui ont été intégrées [SIOS]

L'intérêt de la NMM réside dans le fait que l'on peut lui intégrer différents types d'outils de sondage. La Figure 1-16 montre quelques-uns des outils qui ont été testés sur la NMM : un microscope à force atomique (AFM), un microscope à effet tunnel (STM), un microscope optique à interférence, et un capteur optique de focalisation.

a. AFM longue course avec la NMM

La Figure 1-17 montre une image AFM obtenue en intégrant une tête AFM à la NMM [Huser2005]. Les dimensions de l'image sont de 1 mm en longueur et 100 μm en largeur. La résolution est de 100 nm pour chaque axe de déplacement. Cette image a été obtenue sans

recours à la méthode de recollement avec recouvrement (*stitching*) utilisée dans les CMM. La Figure 1-18 montre la vue de dessus de l'image de la Figure 1-17, ainsi qu'un agrandissement d'une partie de cette image.

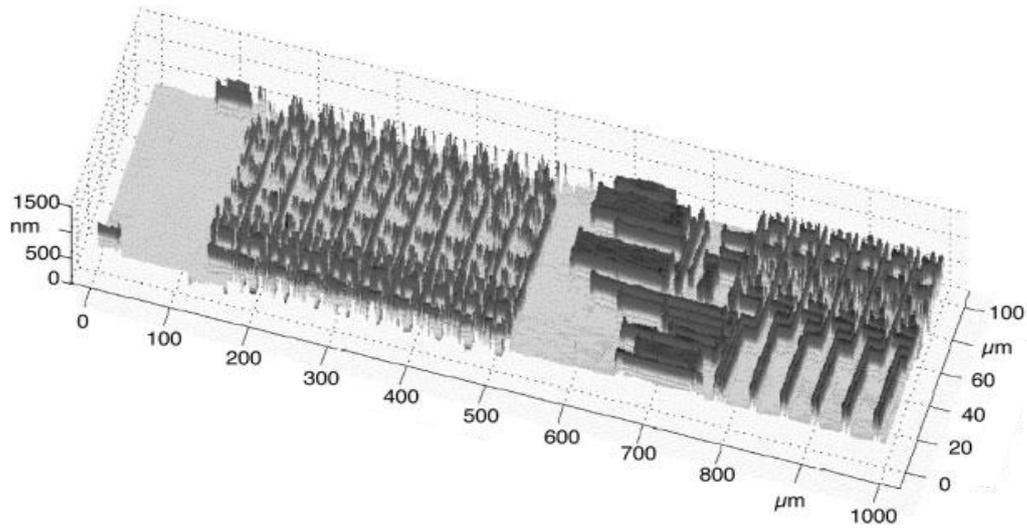


Figure 1-17 : Image AFM de 1 mm de longueur (axe de balayage rapide) et de 100 μm de largeur (axe de balayage lent), et une résolution de 100 nm pour chaque axe latéral, obtenue avec la NMM pendant un balayage sur 12 heures [Huser2005]

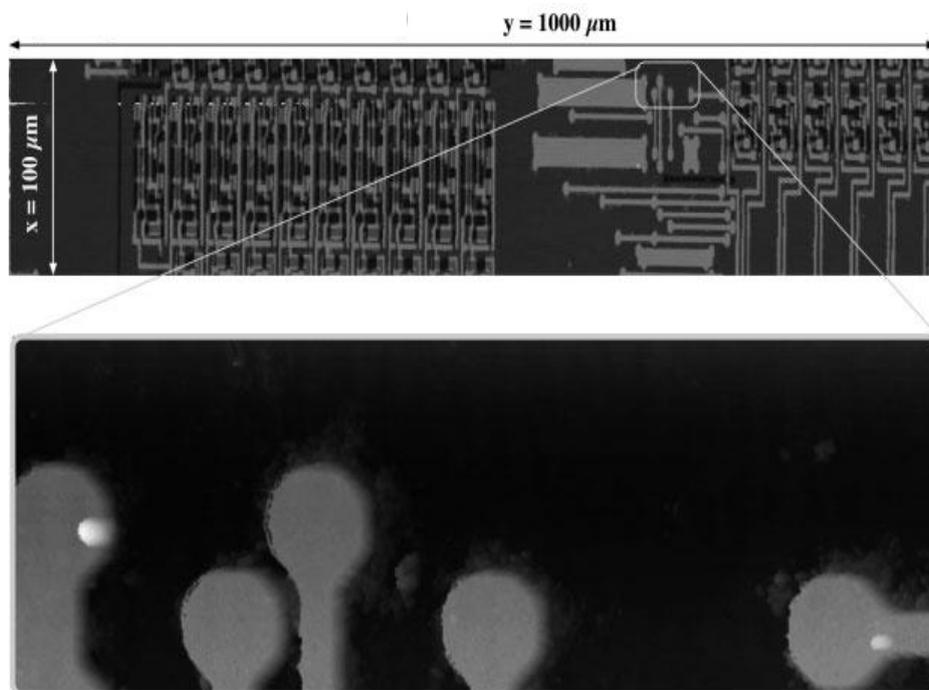


Figure 1-18 : Vue de dessus de l'image de la Figure 1-17 (haut), et un agrandissement (bas) montrant la haute résolution avec laquelle l'image a été acquise [Huser2005]

b. Long-Range Scanning Force Microscope

Un AFM longue-course nommé LR-SFM (*Long-Range Scanning Force Microscope*) a été développé avec un volume de mesure de 25 mm x 25 mm x 5 mm [Dai2004]. Afin d'obtenir la capacité de déplacement millimétrique, la LR-SFM utilise un système de déplacement en double-étage. Le premier étage consiste en un étage de déplacement piézoélectrique rapide montré sur la Figure 1-19, alors que le deuxième étage est la NMM [Jäger2001]. Dans la LR-SFM, les six degrés de liberté du système de déplacement sont mesurés directement à l'aide d'interféromètres ayant une résolution de 0,08 nm et des capteurs de mesure d'angles ayant une résolution inférieure à 0,01 arc seconde. Durant la mesure, la pointe AFM, et donc le point de mesure, est localisée à l'intersection de trois faisceaux de mesures issus de trois interféromètres. Ceci a pour objectif de minimiser les erreurs d'Abbe [Bryan1979].

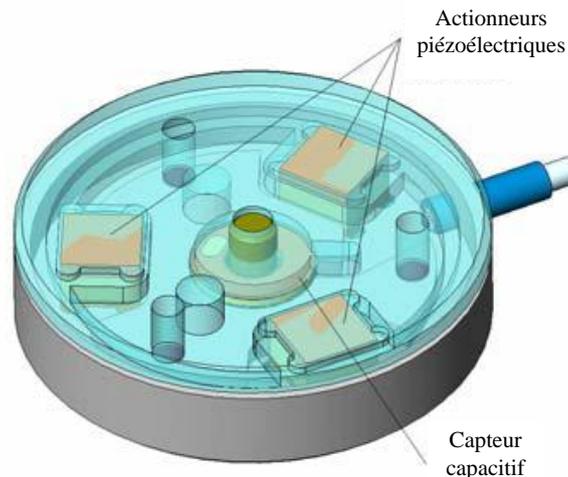


Figure 1-19 : L'actionneur piézoélectrique en Z de la LR-SFM

c. Long Range 3D Scanning Tunneling Microscope

Un autre exemple de SPM associé à un système de positionnement longue-course est le LR-STM (*Long Range 3D Scanning Tunneling Microscope*) [Weckenmann2007] qui est un microscope à effet tunnel longue-course possédant un volume de mesure de 25 mm x 25 mm x 5 mm avec une incertitude de moins de 10 nm, et une résolution de 0,1 nm pour chaque axe. Le système de positionnement utilisé est la NMM (*nanopositioning and nanomeasuring machine*) décrite précédemment ce qui confère à la LR-STM des mesures

traçables au mètre étalon, en plus de la suppression de l'erreur d'Abbe du fait que le point de mesure se situe à l'intersection des trois faisceaux des interféromètres de mesure de position.

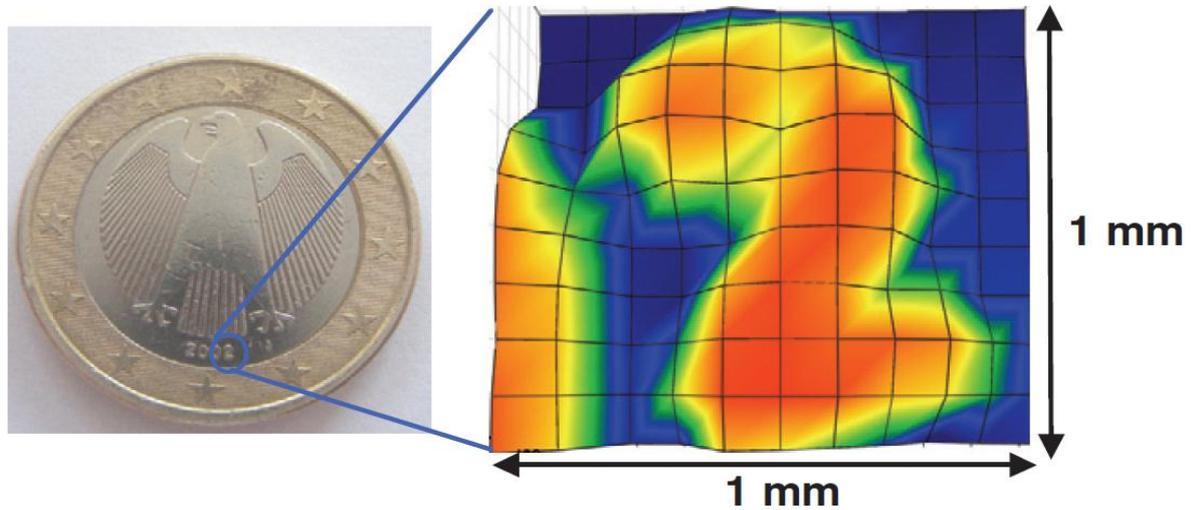


Figure 1-20 : Image STM longue course d'une pièce de 1 Euro obtenue avec le LR-STM [Weckenmann2007]

La Figure 1-20 montre une image de 1 mm x 1 mm d'une pièce de 1 Euro obtenue avec le LR-STM. La Figure 1-21 montre une autre image de 8 mm x 8 mm et des agrandissements successifs montrant la haute résolution de l'image.

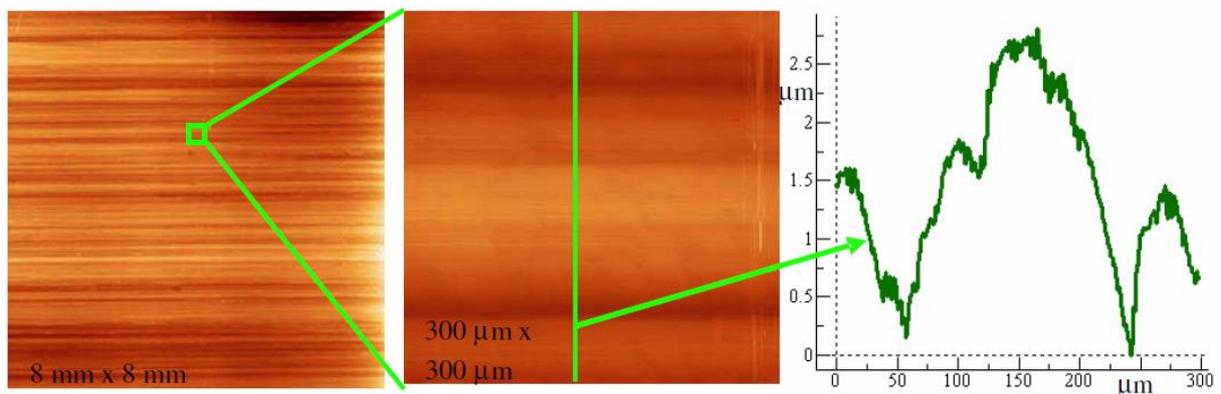


Figure 1-21 : Image de 8 mm x 8 mm obtenue avec le LR-STM, puis un agrandissement de 300 μm x 300 μm, puis une section droite de 300 μm de longueur [Weckenmann2008]

1.6.4. Les SPM à pointes multiples – les matrices de pointes

La réduction du temps de mesure est une demande nécessaire pour l'intégration des futurs microscopes à sonde locale dans les lignes de production industrielles. Une possibilité pour augmenter la vitesse de balayage est l'utilisation d'une matrice de pointes [Figure 1-22] de telle sorte que différents points sur la surface de l'échantillon soient mesurés en parallèle. Une condition nécessaire pour le fonctionnement de ces matrices de pointes est l'utilisation de pointes auto-actionnées ou auto-délectrices [Danzebrink2006].

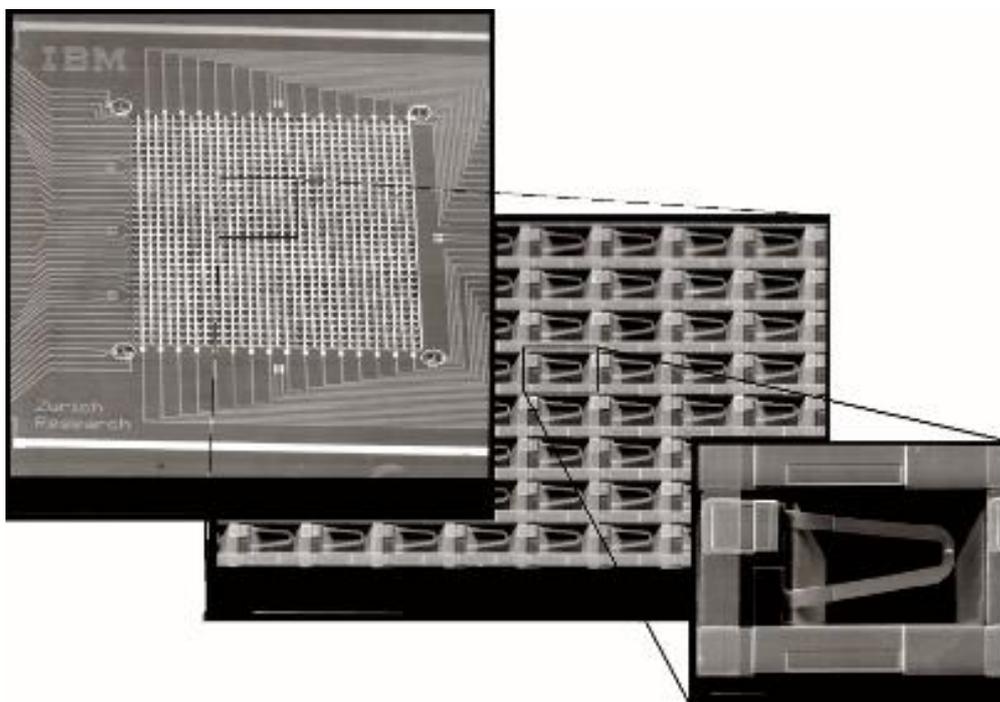


Figure 1-22 : Matrice de pointes du projet Millipède, et deux agrandissements consécutifs pour arriver à une seule pointe [Vettiger2000]

Les pointes auto-délectrices convertissent directement leur flexion en un signal électrique mesurable. Le principe de détection peut se baser sur des capteurs capacitifs [Göddenhenrich1990] [Brugger1992], sur des capteurs piézorésistifs [Tortonese1991] [Linnemann1995] [Jumpertz1998] ou piézoélectriques [Tansock1992] [Itoh1993] [Beck1998] intégrés. L'intégration des pointes auto-délectrices en matrice compacte est possible puisqu'il n'y a pas besoin de procédures supplémentaires d'alignement de faisceaux lumineux comme dans la détection de la flexion d'une pointe AFM classique par faisceau laser par exemple.

Ceci élimine le besoin d'aligner la pointe après l'avoir changée ou suite à des dérives mécaniques. Cette spécification est surtout utile dans le cas d'un fonctionnement sous vide ou dans des conditions de basse température. De plus, il est assuré que c'est le déplacement du levier qui est détecté, et non le déplacement du système de détection entier.

En plus de l'intégration d'un capteur au levier de la pointe, peut être intégré un actionneur excitateur pour l'asservissement en boucle fermée de la position verticale de la pointe. Divers systèmes utilisent pour l'asservissement vertical soit des actionneurs piézoélectriques, soit le même actionneur [Itoh1996] [Watanabe1996], soit un actionneur piézoélectrique additionnel [Minne1995-1] [Minne1998] pour la détection.

Un des premiers microscopes à force atomique comprenant un arrangement de plusieurs pointes était constitué de 5 pointes piézorésistives auto-détectrices [Minne1995-1]. Dans une étape suivante, le même groupe développa deux pointes contrôlées indépendamment et équipées d'actionneurs piézoélectriques intégrés pour l'axe Z [Minne1995-2]. Une ligne de 50 pointes, distantes de 200 μm l'une de l'autre, a permis une vitesse de balayage de 4 mm/s. Cependant, seulement 4 de ces 50 pointes étaient asservies par l'ordinateur à cette époque [Minne1998]. Dans un développement ultérieur, l'électronique de contrôle a été intégrée avec la matrice de pointes sur une même tranche en utilisant la technologie CMOS [Volden2005]. Ici aussi, 4 des 10 pointes étaient activement contrôlées.

Un exemple d'une matrice bidimensionnelle de pointes est le projet « Millipède » développé pour le stockage de l'information [Lutwyche2000] [Vettiger2000]. Cependant, les 1024 pointes (32 x 32), et récemment 64 x 64, ne sont pas activement contrôlées. La distance pointe-surface est déterminée en mesurant le transfert de chaleur à travers la pointe.

En plus du stockage des données, les pointes multiples peuvent servir pour les applications nécessitant un contrôle à distance d'un microscope à sonde locale [Phoenix2007], ou pour tester certaines propriétés [Lang1998].

1.7. Conclusion

Nous avons montré au travers d'exemples les différentes technologies utilisées afin d'améliorer les caractéristiques de nanositionnement sur grande étendue de déplacement en s'attardant sur les techniques spécifiques aux microscopes à sonde locale.

L'association d'une CMM à un SPM est une technique très courante en industrie car elle permet de mesurer les dimensions de pièces en 3D. Ces machines sont cependant volumineuses et mal adaptées à la mesure de microcomposants. De plus, la technique de recollement d'images utilisée dans les CMM induit une réduction de l'exactitude sur la position.

Aussi, nous avons vu dans les exemples présentés que l'association d'un microscope optique avec un SPM ne fournit pas un rapport course/résolution constant puisque seule la zone d'intérêt est balayée par le SPM. C'est uniquement dans cette zone d'intérêt que le rapport course/résolution n'est pas dégradé.

Les SPM à pointes multiples et matrices de pointes sont fabriqués sur des circuits type MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*). Cette technique augmente donc la vitesse de balayage au prix d'un coût de fabrication élevé. Aussi, l'exactitude n'est pas améliorée du fait de la reconstruction de l'image par recollement des sous-images acquises par les pointes.

L'association d'un système de déplacement longue-course à un SPM semble être une technique rassemblant vitesse de balayage, étendue de déplacement, haute résolution, exactitude de positionnement et traçabilité au mètre étalon dans un même instrument. Cette technique offre un intérêt vis-à-vis de la reconfiguration et de l'interchangeabilité.

Nous présentons dans ce manuscrit un système de nanositionnement longue-course 2D offrant une dynamique de déplacement millimétrique ainsi qu'une résolution et une incertitude de positionnement nanométriques. Ce système de déplacement possède une architecture en double-étage. L'intégration d'interféromètres à laser permet la traçabilité au mètre étalon nécessaire aux applications nanométriques. Cet instrument « simple » en construction permet une intégration facile dans différents domaines d'application tels que la microscopie à sonde locale, la lithographie ou la nanomanipulation. Nous nous sommes limités dans nos travaux aux microscopies à sonde locale AFM et SNOM. Nous montrons les travaux d'intégration qui ont mené à l'apparition d'un AFM longue-course et d'un SNOM longue-course.

1.8. Bibliographie du 1^{er} chapitre

[Balemi2004] : Balemi S., Moerschell J., Bregue J.-M, *Surface Inspection System for Industrial Applications, IEEE Mechatronics & Robotics, Aachen, 2004*

[Bariani2004] : Bariani, P., 2004, *Dimensional metrology for microtechnology*“, Ph.D. Thesis, Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark.

[Beck1998] : Beck, R. G., Eriksson, M. A., Topinka, M. A., Westervelt, R. M., Maranowski, K. D., Gossard, A. C., 1998, *GaAs/AlGaAs self-sensing cantilevers for low temperature scanning probe microscopy, Appl. Phys. Lett., 73:1149.*

[Brand2002] : Brand, U.; Yu, L.; Chang, C.; Lüßmann, H.; Schwenke, H., 2002, *Beginning of Operation and Optimisation of a 3D Micro Measuring Device, Proc. Euspen Conf., Eindhoven, 561 – 564*

[Brugger1992] : Brugger, J., Buser, R.A., Rooij, N.F., 1992, *Micromachined atomic force microprobe with integrated capacitive read-out, J. Micromech. Microeng., 2:218.*

[Bryan1979] : Bryan, J.B., 1979, *The Abbe Principle revisited: An updated interpretation, Prec. Eng., 1:129-132.*

[CSM] : CSM Instruments SA, Peseux, Switzerland, <www.csm-instruments.com>

[Dai2004] : Dai, G.; Pohlenz, F.; Danzebrink, H.-U.; Xu, M.; Hasche, K.; Wilkening, G., 2004, *Metrological large range scanning probe microscope. Rev. Sci. Instrum., 75/4:962-969.*

[DalSavio2002] : Dal Savio, C., Wolff, H., Dziomba, T., Fuß, H.-A., Danzebrink, H.-U, 2002, *A compact sensor-head for simultaneous scanning force and near-field optical microscopy, Precision Engineering, 26:199-203.*

[Danzebrink2003] : H.-U. Danzebrink, J.W.G. Tyrrell, C. Dal Savio, and R. Krüger-Sehm, 2003, *Combined optical and scanning probe microscopy, PTB-Bericht O-68, 112–123.*

[Danzebrink2006] : H.-U. Danzebrink, L. Koenders, G. Wilkening, A. Yacoot and H. Kunzmann, 2006, *Advances in Scanning Force Microscopy for Dimensional Metrology, CIRP Annals, vol. 55, No. 2, pp. 841-878*

[DeChiffre1999] : De Chiffre, L., Hansen, H.N., Kofod, N., 1999, *Surface topography characterization using an atomic force microscope mounted on a coordinate measuring machine, Annals of CIRP, 48/1: 463-466.*

[DeChiffre2004] : De Chiffre, L., Marinello, F., Bariani, P., Hansen, H.N., 2004, *Surface mapping with an AFM-CMM, Integrated system and stitching software*, *Proceedings of 4th EUSPEN International Conference*, 326-327.

[Dirscherl2005] : Dirscherl, K., Koops, K.R., 2005, *Traceable probing with an AFM*; in: *Nanoscale Calibration Standards and Methods*, G. Wilkening and L. Koenders (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 95-108.

[Dirscherl2006] : Dirscherl, Kai ; Slawomir, Czerkas ; Bosse, Harald ; Fuß, Hans-Joachim: *The Nanostation 300 - Development of an SPM for large objects. 7th Seminar on Quantitative Microscopy (QM) and 3rd Seminar on Nanoscale Calibration Standards and Methods, Nanoscale 2006, Bern-Wabern, Switzerland, 24-25, April, 2006*

[Dixson2000] : Dixson, R., Köning, R., Fu, J., Vorburger, T., Renegar, B., 2000, *Accurate dimensional metrology with atomic force microscopy*, *Proc. SPIE*, 3998:362-368

[DME] : DME - Danish Micro Engineering A/S, Herlev, Denmark, <www.dme-spm.dk>

[Ducourtieux2005-1] : S. Ducourtieux, S. Duhem, F. Larssonier, J. Salgado, G-P. Vaillau, L. Lahousse, J. David, 2005, "The LNE's nanometrology research and development program", *EUSPEN*, 2005, conference 5, volume 1, p 131-134, Montpellier

[Ducourtieux2005-2] : S. Ducourtieux, L. Lahousse, F. Larssonier, S. Duhem, J. Salgado, J. David, G-P. Vaillau, 2005, "Programme de recherche et développement du LNE en nanométrie : derniers résultats", *12e Congrès international de métrologie*, Lyon, juin.

[Fan2006] : K. C. Fan, Y. T. Fei, X. F. Yu, Y. J. Chen, W. L. Wang, F. Chen and Y. S. Liu, 2006, *Development of a low-cost micro-CMM for 3D micro/nano measurements*, *Meas. Sci. Technol.* **17** 524-532

[Göddenhenrich1990] : Göddenhenrich, Th., Lemke, H., Hartmann, U., Heiden, C., 1990, *Force microscope with capacitive displacement detection*, *J. Vac. Sci. Technol.*, 8:383.

[Griesmann2005] : Griesmann, U., Machkour-Deshayes, N., Soons, J., Kim, B. C., Wang, Q., Stoup, J. R., Assoufid, L., 2005, *Uncertainties in aspheric profile measurements with the geometry measuring machine at NIST*, *Proc. of SPIE*, 5878:112-124.

[Hansen2005] : Hansen, H.N., Bariani, P., De Chiffre, L., 2005, *Modelling and measurement uncertainty estimation for integrated AFM-CMM Instrument*, *Annals of the CIRP*, 55/2: These Proceedings.

[Hausotte2002] : Hausotte, T., 2002, *Nanopositionier- und Messmaschine*, Ph.D. thesis, Technische Universität Ilmenau; Ilmenau Verlag ISLE.

[Haycocks2005] : Haycocks, J., Jackson, K., 2005, *Traceable calibration of transfer standards for scanning probe microscopy*, *Prec. Eng.*, 29:168-175.

[Hipp1992] : Hipp, M., Bielefeldt, H., Colchero, J., Marti O., Mlynek J., 1992, A stand-alone scanning force and friction microscope, *Ultramicroscopy*, 42-44:1498-1503.

[Holmes2000] : Holmes, M., Hocken, R., Trumper D., 2000, The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probe microscopy, *Precision Engineering*, Volume 24, Issue 3, 191-209.

[Huerth2003] : Huerth, S.H., Hallen, H.D., 2003, Quantitative method of image analysis when drift is present in a scanning probe microscope, *J. Vac. Sci. Technol.*, 21/2:714-718.

[Huser2005] : Dorothee Huser, Ralph Petersen, and Hendrik Rothe, 2005, *Coordinate Measurements in Microsystems by Using AFM-Probing: Problems and Solutions*. in: *Nanoscale Calibration Standards and Methods*, G. Wilkening and L. Koenders (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 60-72.

[Innocenti1990] : C. Innocenti and V. Parenti-castelli, 1990, Direct position analysis of the stewart platform mechanism, *Mechanism and machine theory* vol. 25, No. 6 pp. 611-621

[Itoh1993] : Itoh, T. C., Suga, T., 1993, Development of a force sensor for atomic force microscopy using piezoelectric thin films, *Nanotechnology* 4:218-224.

[Itoh1996] : Itoh, T.C., Lee, C., Suga, T., 1996, Deflection detection and feedback actuation using a self-excited piezoelectric Pb(Zr,Ti)O₃ microcantilever for dynamic scanning force microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, 69:2036-2038.

[ITRS2003] : The international technology roadmap for semiconductors 2003, www.itrs.net

[Jäger2001] : Jäger, G., Manske, E., Hausotte, T., Büchner, H.-J., Grünwald, R., Schott, W., 2001, Nanometrology - nanomeasuring machines, *Proc. Annual meeting of ASPE*, Crystal City, Virginia, USA, 23-27.

[Jäger2002] : G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte, W. Schott: Operation and analysis of a nanopositioning and nanomeasuring machine, *Proceedings of the 17th Annual Meeting of the ASPE*, St. Louis, Missouri, USA, 2002, S. 299 – 304.

[Jaeger2004] : Jaeger, G., Gruenwald, R., Manske, E., Hausotte, T., Fuessl, R., 2004, A Nanopositioning and Nanomeasuring Machine: Operation – Measured results, *Nanotechnology and Precision Engineering* 2/2004(2), pp. 81 - 84, Tianjin, China.

[Jumpertz1998] : Jumpertz, R., Schelten, J., Ohlsson, O., Saurenbach, F., 1998, Bridge configuration of piezoresistive devices for scanning force microscopes. *Sensors and Actuators A*, 70:88.

[Kim2004] : Kim, J., Kim, J.W., Park, B.C., Eom, T.B., Kang, C., 2004, Pitch measurement of one-dimensional gratings using a metrological atomic force microscope, *Proc. of the 4th Euspen conference, Glasgow, Scotland, May 31th-June 2nd*, 248:249.

[Koenders2006] : Koenders, L., Klapetek, P., Meli, F., Picotto, G.B., 2006, Comparison on step height measurements in the nano and micrometre range by Scanning Force Microscopes“, *Metrologia Technical Report 43:04001*.

[Kofod2002] : Kofod, N., 2002, Validation and industrial application of AFM, *Ph. D Thesis, Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark and Danish Fundamental Metrology*.

[Korpelainen2004] : V. Korpelainen and A. Lassila, Self calibration of non-linearities of laser interferometer and capacitive sensor combination for interferometrically traceable AFM device, in *Proc. Euspen 2004*, 256-257.

[Kramar2005] : John A Kramar, 2005, Nanometre resolution metrology with the Molecular Measuring Machine, *Meas. Sci. Technol.*, 16/11:2121-2128.

[Küng2007] : A. Küng, F. Meli, R. Thalmann, 2007, Ultra precision micro-CMM using a low force 3D touch probe, *Measurement Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 319–327

[Lahousse2005] : L. Lahousse, 2005, Contribution à la construction de machines de grande précision géométrique : le concept d'information dans l'amélioration des performances des machines, *Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieurs d'arts et métiers*.

[Lang1998] : Lang, H.P., Berger, R., Andreoli, C., Brugger, J., Despont, M., Vettiger, P., Gerber, Ch., Gimzewski, J.K., Ramseyer, J.P., Meyer, E., Güntherodt, H.-J., 1998, Sequential position readout from arrays of micromechanical cantilever sensors, *Appl. Phys. Lett.*, 72/3:383-385.

[Lewis2003] : Lewis A. J., 2003 A fully miniature CMM with sub-micrometre uncertainty *Proc. SPIE 5190* 256 – 276

[Linnemann1995] : Linnemann, R., Gotszalk, T., Hadjiiski, L., Rangelow, I.W., 1995, Characterisation of a cantilever with an integrated deflection sensor, *Thin Solid Films*, 264:159.

[Lutwyche2000] : Lutwyche, M. I., Despont, M., Drechsler, U., Dürig, U., Häberle, W., Rothuizen, H., Stutz, R., Widmer, R., Binnig, G. K., Vettiger, P., 2000, Highly parallel data storage system based on scanning probe arrays, *Appl. Phys. Lett.*, 77:3299.

[Machkour2006] : Machkour-Deshayes, N., Stoup, J., John Lu, Z. Q., Soons, J., Griesmann, U., Polvani, R., 2006, Form-Profiling of Optics Using the Geometry Measuring Machine and the M-48 CMM at NIST, *J. Res. NIST*, 111:373-384.

[Meli1998-1] : Meli, F., Thalmann, R., 1998, Long range AFM profiler used for accurate pitch measurements, *Meas. Sci. Technol.*, 9/7:1087-1092.

[Meli1998-2] : Meli, F. et al, 1998, Z-calibration of a metrology AFM scanner using an interferometer and a tilting device with linear stage, *Proc. of the Third Seminar on Quantitative Microscopy*, Lyngby, Denmark, PTB-F- 34:61– 67.

[Meli2001] : Meli, F. 2001, International comparison in the field of nanometrology: Pitch of 1D gratings (Nano4), *Proc. of 2nd Int. euspen Conference, Italy*, 1: 358-361.

[Meli2005] : Meli, F., 2005, Lateral and vertical diameter measurements on polymer particles with a metrology AFM. in: *Nanoscale Calibration Standards and Methods*, G. Wilkening and L. Koenders (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 361-374.

[Mingzhen2007] : Mingzhen Lu, Sitian Gao, Qihai Jin, Jianjun Cui, Hua Du and Hongtang Gao, 2007, An atomic force microscope head designed for nanometrology, *Meas. Sci. Technol.* 18 1735-1739.

[Minne1995-1] : Minne, S. C., Flueckiger, Ph., Soh, H. T., Quate C. F., 1995, Atomic force microscope lithography using amorphous silicon as a resist and advances in parallel operation, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 13:1380-1385.

[Minne1995-2] : Minne, S. C., Manalis, S.R., Quate C. F., 1995, Parallel atomic force microscopy using cantilevers with integrated piezoresistive sensors and integrated piezoelectric actuators, *Appl. Phys. Lett.*, 67:3918-3920.

[Minne1998] : Minne, S. C., Yaralioglu, G., Manalis, S.R., Adams, J. D., Zesch, J., Atalar, A., Quate C. F., 1998, Automated parallel high-speed atomic force microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, 72:2340-2342.

[Misumi2003] : Misumi, I., Gonda, S., Kurosawa, T., Takamasu, K., 2003, Uncertainty in pitch measurements of onedimensional grating standard using nanometrological atomic force microscope. *Meas. Sci. Technol.* 14:463-471.

[Nakano1998] : Nakano, K., 1998 A novel low profile atomic force microscope compatible with optical microscopes, *Rev. Sci. Instrum.*, 69/3:1406-1409.

[Phoenix2007] : Phoenix Mars Lander 2007:
<<http://phoenix.lpl.arizona.edu/technology/meca.php>>

[Picotto2001] : Picotto, G.B., M. Pisani, M., 2001, A sample scanning system with nanometric accuracy for quantitative SPM measurements, *Ultramicroscopy*, 86:247-254

[PSIA] : PSIA Corp., Sungnam, Korea, <www.psiainc.com>

[SIOS] : SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau, Germany, <www.sios.de>

[SIS] : Surface imaging systems, www.sis-gmbh.com

[Sokolov2005] : Sokolov, D.V.; Kasantzev, D.V., Tyrrell, J.W.G., Hasek, T. und Danzebrink, H.-U., 2005, *Combined optical and SPM probe sensor for nano-coordinate metrology*. in: *Nanoscale calibration standards and methods*, G. Wilkening and L. Koenders (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 131-143.

[Suzuki1992] : Suzuki, M., Fujii, T., Onuki, T., Miyashita, M., Matsushiro, M., 1992, *Scanning tunneling microscope coaxially arranged with an optical microscope*, *Ultramicroscopy*, 42-44:1553-1557.

[Symétrie] : Société Symétrie, www.symetrie.fr

[Tansock1992] : Tansock, J., Williams, C.C., 1992, *Force measurement with a piezoelectric cantilever in a scanning force microscope.*, *Ultramicroscopy*, 42:1464.

[Teague1989] : Teague, E. C., 1989, *The National Institute of Standards and Technology molecular measuring machine project: metrology and precision engineering design*, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 7/6:1898-1902.

[Tortonese1991] : Tortonese, M., Yamada, H., Barrett, R.C., Quate C.F., 1991, *Atomic force microscopy using a piezoresistive cantilever.*, *Proceedings of Transducers '91, IEEE 91, CH2817-5:448*.

[Tyrrell2003] : Tyrrell, J.W.G., Sokolov, D.V., Danzebrink, H.-U., 2003, *Development of a scanning probe microscope compact sensor head featuring a diamond probe mounted on a quartz tuning fork.*, *Meas. Sci. Technol.*, 14:2139-2143.

[Tyrrell2004] : Tyrrell, J.W.G., Dal Savio, C., Krüger-Sehm, R., Danzebrink, H.-U., 2004, *Development of a combined interference microscope objective and scanning probe microscope*. *Rev. Sci. Instrum.*, 75/4:1120-1126.

[Vailleau2005] : G-P. Vailleau, S. Ducourtieux, L. Lahousse, J. David, S. Leleu, "Application d'une nouvelle conception d'architecture à une machine de mesure de résolution nanométrique", *Revue française de métrologie*, 2005, vol 2005-4, n°4, p35-43

[Veeco] : Veeco Instruments, U.S.A., <www.veeco.com>

[Vettiger2000] : P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, W. Haberle, M. I. Lutwyche, H. E. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, G. K. Binnig, *The "Millipede" - More than one thousand tips for future AFM data storage*, *IBM J. RES. DEVELOP. VOL. 44 NO. 3 MAY 2000*

[Volden2005] : Volden, T., 2005, *CMOS-Integrated cantilevers for biosensing and probe microscopy*, *Ph.D. thesis, Diss. ETH No. 15984*.

[Watanabe1996] : Watanabe, S., Fujii, T., 1996, *Micro-fabricated piezoelectric cantilever for atomic force microscopy*. *Rev. Sci. Instrum.*, 67:3898.

[Weckenmann2007] : Weckenmann, A. and Hoffmann, J., 2007, *Long Range 3D Scanning Tunnelling Microscopy*, *Annals of the CIRP*, vol. 56.

[Weckenmann2008] : Albert Weckenmann, Jörg Hoffmann and Alexander Schuler, *Development of a tunnelling current sensor for a long-range nano-positioning device*, *Meas. Sci. Technol.* 19 (2008) 064002

[WITec] : WITec GmbH, Ulm, Germany, www.witec.de

[Wyant1998] : Wyant, J.C., Schmit, J., 1998, *Large field of view, high spatial resolution, Surface Measurements*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 38/5-6:691-698.

[Yanagi2002] : Yanagi, K., Hasegawa, M., Hara, S., 2002, *A computational method for stitching a series of 3D surface topography data measured by microscope-type surface profiling instruments*, *Proc. of 3rd euspen Int. Conference*, 2:653-656.

2. CHAPITRE II

ARCHITECTURE DE LA PLATEFORME DOUBLE-ÉTAGE

2.1.	Introduction	45
2.2.	L'étage de déplacement longue-course	45
2.2.1.	Le guidage par roulements à billes	46
2.2.2.	Le guidage sur palier à air	46
2.2.3.	Le guidage par lames flexibles.....	46
2.2.4.	Le moteur électromagnétique linéaire.....	46
2.2.5.	L'étage de déplacement millimétrique choisi.....	47
2.3.	L'étage de déplacement piézoélectrique	48
2.3.1.	Les actionneurs piézoélectriques simples	48
2.3.2.	Les moteurs piézoélectriques linéaires	49
2.3.3.	Les étages piézoélectriques guidés par des lames flexibles	49
2.3.4.	L'étage de déplacement piézoélectrique choisi	52
2.4.	Association des deux étages grossier et fin	53
2.5.	L'interféromètre hétérodyne à double passage Zygo.....	54
2.5.1.	La source laser	55
2.5.2.	L'interféromètre hétérodyne double passage	56
2.5.3.	Le châssis de comptage électronique	57

2.5.4.	Limitations de l'interféromètre Zygo	57
2.5.5.	Contrôle du déplacement basé sur l'interférométrie hétérodyne	58
2.6.	Le montage expérimental.....	58
2.7.	Les sources d'erreurs en interférométrie laser	59
2.8.	Conclusion.....	62
2.9.	Bibliographie du 2ème chapitre	63

2.1. Introduction

Mon travail porte sur un système de déplacement ayant une dynamique de l'ordre du millimètre et possédant une résolution et une répétabilité nanométriques. Comme dans tout système de déplacement asservi, nous disposons d'actionneurs générateurs de mouvement, de capteurs de déplacement, ainsi que du contrôleur responsable du suivi de la trajectoire désirée. Un ordinateur est utilisé pour centraliser les commandes et gérer l'ensemble.

Pour la conception de notre système de déplacement, nous avons opté pour une configuration en deux étages. Le premier étage est un étage dit « millimétrique » ou « grossier ». Cet étage est en effet destiné à entraîner le système sur une étendue de déplacement millimétrique sans avoir à se préoccuper des erreurs engendrées pendant le déplacement. C'est un deuxième étage, dit « nanométrique » ou encore « fin », qui a pour tâche de rectifier les erreurs du premier. L'étage « fin » est placé en dessus de l'étage « grossier » pour former un système série. Ce sont donc les performances du second étage ajoutées à la grande course de déplacement du premier qui confèrent à notre système de déplacement la nomination de « plateforme de nanositionnement de grande étendue de déplacement ». Ce système possède des performances nanométriques sur la totalité de son étendue de déplacement. Nous entendons par « performances nanométriques » une série de performances qui dépendent de l'application envisagée. De façon générale, le système de déplacement est conçu pour se déplacer avec une résolution et une répétabilité de déplacement nanométriques car dans beaucoup d'applications, la répétabilité est la qualité principale.

Ce chapitre est dédié à la description matérielle de ce système. Dans une première partie, je présente la conception mécanique du système de déplacement. L'interféromètre hétérodyne utilisé et ses principales sources d'erreurs sont ensuite présentés tout en décrivant le montage expérimental de l'ensemble.

2.2. L'étage de déplacement longue-course

La littérature recense différents concepts de platines de déplacement aptes à se déplacer sur une course de l'ordre de plusieurs millimètres. Cependant, chacune de ces platines fait preuve de certaines caractéristiques qui font que, selon l'application envisagée, une platine se prononce meilleure candidate qu'une autre. Nous exposons ici quelques-uns de ces types de platines de déplacement les plus répandus, puis nous commentons notre choix de la platine choisie.

Plusieurs éléments constituant une platine de déplacement, que ce soit le système d'entraînement, le système de transmission ou le système de guidage, définissent les performances que va subir une trajectoire suivie. Ce qui importe le plus dans une platine de déplacement est le système de guidage responsable du déplacement de la platine, mais aussi source d'erreur principale selon le type de guidage. Un bon système de guidage permet un déplacement souple en minimisant les frottements. Les systèmes de guidage les plus

communs parmi les platines de déplacement de précision sont les roulements à billes, le guidage sur palier à air, et le guidage à lames. Nous les décrivons ci-après, et montrons le système utilisé pour la platine double-étage.

2.2.1. Le guidage par roulements à billes

Les systèmes de guidage à base de roulements à billes réduisent les frottements du fait qu'ils remplacent le mouvement glissant par un mouvement par roulement. Des billes sont piégées dans des voies de guidage et sont soumises à une charge de précontrainte. Les frottements sont minimes ce qui conduit à un déplacement souple. Ces platines offrent une exactitude de l'ordre de quelques micromètres et une répétabilité de l'ordre du micromètre en général [Aerotech] sur des courses centimétriques.

2.2.2. Le guidage sur palier à air

Le principe de fonctionnement des moteurs à paliers à air consiste à injecter de l'air sous pression entre deux pièces afin de créer un coussin d'air et ainsi de les maintenir à distance l'une de l'autre. Ces guidages offrent une exactitude de positionnement allant de 200 nm à 2 μm , et une répétabilité de 50 nm à 500 nm [Aerotech] sur des courses centimétriques.

2.2.3. Le guidage par lames flexibles

Les tables de translation guidées par lames flexibles sont généralement formées d'un ensemble monobloc présentant des zones de faible rigidité appelées cols flexibles. L'utilisation d'éléments flexibles permet d'obtenir des mouvements de qualité nanométrique. Un exemple de ces tables de translation est celle développée au Laboratoire National d'Essais [Lahousse2005] et permettant un guidage linéaire de 24 mm de course maximale, une vitesse allant de 4 $\mu\text{m/s}$ à 75 $\mu\text{m/s}$, des erreurs de rectitude inférieures au micromètre et une répétabilité de l'ordre de 0,01 μm .

2.2.4. Le moteur électromagnétique linéaire

Les différents types de systèmes linéaires conventionnels sont actionnés par des servomoteurs rotatifs. Le mouvement rotatif est transformé en mouvement linéaire à l'aide d'engrenages, de crémaillères, de courroies ou de vis à billes. Le moteur électromagnétique linéaire, en outre, produit un déplacement linéaire sans qu'il n'y ait aucune pièce pour convertir un mouvement d'une autre nature en mouvement linéaire. Le moteur linéaire demande donc beaucoup moins d'adaptations, moins de pièces en mouvement et donc moins d'inertie, de friction et de jeux. La force est appliquée directement à la charge sans perte due aux systèmes de transmission et de conversion du mouvement. De ce fait, le moteur électromagnétique linéaire s'impose lorsque la vitesse, l'exactitude et la répétabilité importent.

Le moteur linéaire est plus avantageux qu'un moteur à entraînement rotatif. Dans un entraînement rotatif, le codeur se situe dans le moteur, il tient compte de la position angulaire, mais il ne peut pas déterminer la position exacte de la charge à cause des jeux des différents éléments d'entraînement. De plus, ces jeux ne se cumulent pas de la même façon dans les deux sens, varient suivant la température (dilatation) et évoluent dans le temps (rodage). Le moteur linéaire dispose normalement d'une tête de lecture optique ou magnétique d'un codeur linéaire situé sur le chariot de la bobine. La résolution de lecture de la position est bien inférieure au micromètre.

Cette caractéristique du moteur linéaire à présenter un minimum de jeux fait de lui le candidat le plus éligible pour notre application de déplacement de grande répétabilité. L'étage millimétrique doit en effet fournir un déplacement qu'on a caractérisé de grossier, mais les erreurs engendrées par le déplacement de cet étage doivent être minimales et ne doivent surtout pas dépasser la dynamique de déplacement de l'étage piézoélectrique de correction.

2.2.5. L'étage de déplacement millimétrique choisi

L'étage de déplacement « longue course » que nous avons choisi est constitué de deux moteurs linéaires (ANT-50) fournis par la société AEROTECH, et empilés orthogonalement l'un sur l'autre dans le plan X-Y de façon à fournir un déplacement millimétrique selon les deux directions du plan horizontal. L'orthogonalité des deux étages a été contrôlée avec un procédé interférométrique à mieux que 5 arcsec. Leur étendue de déplacement est de 50 mm et leur résolution de 10 nm. Cependant, ces moteurs présentent des erreurs de rectitude ainsi que d'hystérésis. Ce sont ces erreurs que le deuxième étage, agissant dans la direction orthogonale à la direction de déplacement du premier, rectifiera tout au long du déplacement. Le Tableau 2-1 résume les principales caractéristiques de ces platines de déplacement.

Ces caractéristiques, notamment la haute résolution et les faibles erreurs de tangage, de roulis, de lacet et de rectitude, montrent les raisons pour lesquelles nous avons choisi ces platines linéaires. Ces erreurs doivent en effet être corrigées par l'étage de déplacement piézoélectrique décrit par la suite, et ne devront pas dépasser son étendue de déplacement limitée.

Modèle	ANT-50L
Dynamique de déplacement	50 mm
Encodeur	Encodeur linéaire sans contact
Résolution	10 nm
Vitesse maximale de déplacement	250 mm/s
Charge maximale	2 Kg
Exactitude	$\pm 5 \mu\text{m}$
Répétabilité	$\pm 125 \text{ nm}$

Rectitude et planéité (déviation maximale)	$\pm 2 \mu\text{m}$
Tangage et roulis	$\pm 12 \text{ arc sec}$
Lacet	$\pm 8 \text{ arc sec}$
Matériau	Aluminium

Tableau 2-1 : Spécifications des platines de déplacement « longue course » ANT-50L

L'aluminium est l'élément constituant ces platines de déplacement. Ce matériau possède un coefficient de dilatation thermique relativement élevé. En revanche, il présente une haute conductivité thermique. Ce paramètre est primordial dans le cas des applications nécessitant une répartition rapide des gradients de température. L'aluminium possède la capacité de dissiper rapidement la chaleur, limitant ainsi les risques de distorsions dues à de grands gradients de température. Quant à la dilatation, l'aluminium constituant ces platines présente un coefficient d'expansion (dilatation) linéaire de $23,86 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Les platines présentent des dimensions de 140,7 mm en longueur et 88,9 mm en largeur. Ceci fait que ces platines vont se dilater de $3,357 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ en longueur et de $2,121 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ en largeur. Une telle dérive thermique va être vue et corrigée par la boucle d'asservissement conduisant ainsi à des artefacts de mesure ; d'où la nécessité d'un contrôle des conditions environnant la plateforme. Ajoutons que l'amplitude de ces dilatations ne doit pas dépasser l'étendue de déplacement de l'actionneur piézoélectrique qui prendra à sa charge la correction de toute dérive thermique. La dynamique de cet actionneur que nous détaillons dans la suite devra tenir compte de la correction des dérives thermiques mais aussi d'autres sources d'erreurs.

2.3. L'étage de déplacement piézoélectrique

La résolution sub-nanométrique et la réponse extrêmement rapide des actionneurs piézoélectriques ont fait d'eux l'élément de base pour les applications demandant des exactitudes nanométriques. Une grande variété d'actionneurs à base d'éléments piézoélectriques est disponible allant de l'actionneur piézoélectrique simple aux systèmes de nanopositionnement complexes guidés par des lames flexibles.

Nous exposons ici les différentes configurations sous lesquelles peut se retrouver un système de déplacement piézoélectrique. L'avantage des actionneurs piézoélectriques est que l'élément les constituant est une céramique, ce qui leur confère la possibilité d'opérer dans le vide.

2.3.1. Les actionneurs piézoélectriques simples

Les actionneurs piézoélectriques ont une résolution de déplacement sub-nanométrique. Leur dynamique est typiquement de quelques dizaines de micromètres. Cependant, ils peuvent atteindre des forces de l'ordre du kilo-newton (kN), des accélérations jusqu'à 10 000 fois l'accélération de la pesanteur, et ont des bandes passantes bien supérieures à d'autres types

d'actionneurs, ce qui leur permet de répondre à des commandes de contrôle plus rapidement. Les actionneurs multicouches sont l'état de l'art en matière d'actionneurs piézoélectriques simples et présentent un temps de réponse inférieur à la microseconde.

2.3.2. Les moteurs piézoélectriques linéaires

Les moteurs piézoélectriques linéaires fonctionnent selon deux modes : continu (moteurs piézoélectriques ultrasonores) ou pas-à-pas. Ils peuvent théoriquement atteindre une course de déplacement illimitée. Le premier mode est caractérisé par sa grande vitesse, alors que le mode pas-à-pas par sa haute résolution. Un des avantages des moteurs piézoélectriques linéaires est leur stabilité en régime statique.

Les moteurs ultrasonores sont composés d'un stator piézoélectrique guidé par deux électrodes, une de chaque côté. Ils peuvent produire des accélérations de l'ordre de 20 fois la gravité terrestre et des vitesses jusqu'à 800 mm/s. Une des limitations de ces moteurs réside dans leur impuissance à générer de grandes forces. Une autre limitation est la résolution qui est moins bonne que celle des actionneurs piézoélectriques simples et des étages piézoélectriques guidés par des lames flexibles. De plus, ces moteurs transfèrent le mouvement par friction ce qui pose un sérieux problème au niveau de la répétabilité.

Les moteurs piézoélectriques pas-à-pas, quant à eux, offrent une plus grande résolution. Les vitesses atteintes sont de l'ordre de plusieurs mm/s. Bien qu'ils offrent une résolution sub-nanométrique, ils n'offrent que des forces de quelques newtons. Ils sont aussi caractérisés par une petite durée de vie due à des usures micrométriques. Ceci limite donc aussi leur répétabilité. La nouvelle génération de ces moteurs utilisant un mécanisme de déplacement double-étage possède une durée de vie améliorée.

2.3.3. Les étages piézoélectriques guidés par des lames flexibles

Les étages piézoélectriques guidés par des lames flexibles [Figure 2-1] sont les meilleurs systèmes de déplacement en matière d'exactitude de positionnement. Leur très haute résolution et temps de réponse ont fait d'eux des éléments cruciaux pour les applications métrologiques. Ces actionneurs sont constitués de deux éléments principaux : un système de guidage et des actionneurs piézoélectriques simples générateurs de mouvement. Parfois on y retrouve intégré un capteur qui assure un fonctionnement en boucle fermée et améliore l'exactitude de positionnement.

Le système de guidage de ces étages de nanositionnement est basé sur la déformation élastique de lames flexibles. Ceci leur offre un déplacement libre de tout frottement, ce qui est avantageux en termes de répétabilité. Les lames flexibles ne requièrent ni maintenance ni lubrifiants et s'usent peu. Elles sont aussi compatibles avec une disposition multi-axes et peuvent amplifier le déplacement de l'actionneur piézoélectrique simple. Les lames flexibles se trouvent sous différentes configurations parfois complexes dans le but

d'améliorer la qualité du guidage. En effet, un actionneur agissant selon une direction ne doit pas induire de déplacement selon une autre.

Les premiers étages piézoélectriques multiaxes à base de lames flexibles possédaient une structure série [Figure 2-1a] [Figure 2-1b] où les actionneurs des différents axes étaient empilés l'un sur l'autre. Les avancées technologiques ont permis la fabrication d'étages monolithiques multiaxes à configuration parallèle [Figure 2-1c]. Dans cette configuration, les actionneurs de chaque axe agissent pour déplacer un seul bloc. Ceci réduit la taille de l'étage et donc l'inertie nécessaire pour le déplacement. Cet étage permet donc d'atteindre de grandes vitesses de balayage. Ils offrent aussi un temps de réponse inférieur à 0,1 milliseconde et de très bonnes résolutions.

Le Tableau 2-2 compare les caractéristiques principales de ces 3 types d'étages piézoélectriques guidés par lames flexibles.

	Caractéristiques
Structure série empilée [Figure 2-1a]	<ul style="list-style-type: none"> • Réponse lente (l'étage de dessous porte l'étage de dessus). • Fréquences de résonance non-symétriques (l'étage de dessous est plus lent que l'étage de dessus ; ceci nécessite des paramètres d'asservissement différents). • L'erreur d'orthogonalité est fonction du montage. L'erreur en cosinus d'un étage ne peut pas être mesurée ni contrôlée par le capteur de l'autre étage.
Structure série intercalée (monolithique) [Figure 2-1b]	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleure réponse que le montage à structure série empilée.
Structure parallèle [Figure 2-1c]	<ul style="list-style-type: none"> • Inertie très basse et identique pour les axes X et Y, donc une meilleure réponse et une performance indépendante de l'axe. • Orthogonalité indépendante du montage. • Erreur en cosinus réduite ; les capteurs d'un étage peuvent corriger les erreurs en cosinus de l'autre.

Tableau 2-2 : Comparaison entre les 3 types d'actionneurs piézoélectriques guidés par lames flexibles

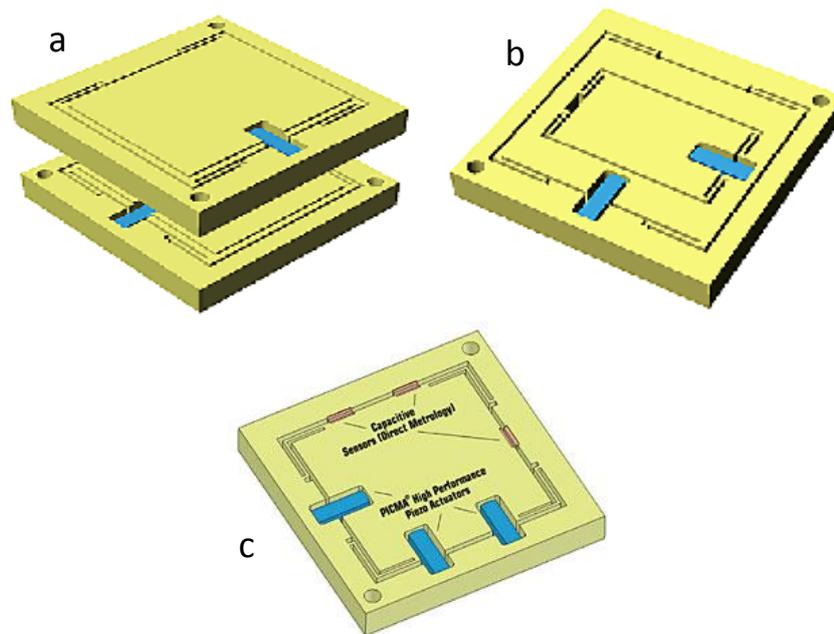


Figure 2-1 : Les classes des étages piézoélectriques 2D guidés par lames flexibles. En a : structure série empilée. En b : structure série intercalée. En c : structure parallèle [www.physikinstrumente.com]

Le Tableau 2-3 dresse une comparaison qualitative de ces trois types d'étages de positionnement piézoélectriques (PZT).

Paramètre vs actionneur	PZT simple	Moteurs PZT	PZT à lames flexibles
Résolution	Grande (Sub-nanomètre)	Faible (dizaine de nm)	Grande (Sub-nanomètre)
Dynamique	Faible (< 100 μm)	Grande (> 100 μm)	Grande (> 100 μm)
Temps de réponse	Rapide (microsecondes)	Faible (dizaine de ms)	moyenne (0,1 à 10 ms)
Force	Grande (Milliers de Newton)	Faible (Quelques Newton)	Faible (Quelques Newton)
Friction	Non	Oui	Non

Tableau 2-3 : Comparaison entre les différents types d'étages de nanopositionnement piézoélectriques

Les systèmes de positionnement piézoélectriques sont donc multiples. Le choix du bon actionneur dépend de l'application envisagée. Pour nos applications de microscopie qui seront présentées au dernier chapitre, nous avons choisi un étage de nanositionnement piézoélectrique à structure parallèle guidé par des lames flexibles et que nous présentons ci-après.

2.3.4. L'étage de déplacement piézoélectrique choisi

L'étage de déplacement nanométrique que nous avons sélectionné est un actionneur piézoélectrique à deux dimensions à structure parallèle guidé par des lames flexibles (modèle PXY 15 CDT de Jena) [Figure 2-2]. Il est constitué de deux actionneurs piézoélectriques simples agissant en « push-pull » pour chaque direction de déplacement du plan X-Y. Ces actionneurs simples sont associés à une structure à base de charnières à lames flexibles afin de former l'actionneur 2D PZTxy. Cet étage de déplacements « fins » permet des déplacements sub-nanométriques. Sa sensibilité est de 100 nm/volt, et son étendue de déplacement est de 15 μm pour chaque direction. Le bloc d'alimentation dont nous disposons fournit une tension de ± 15 volts ce qui fait que l'étage de déplacement piézoélectrique ne fournira que $\pm 1,5$ μm pour chaque direction du déplacement.

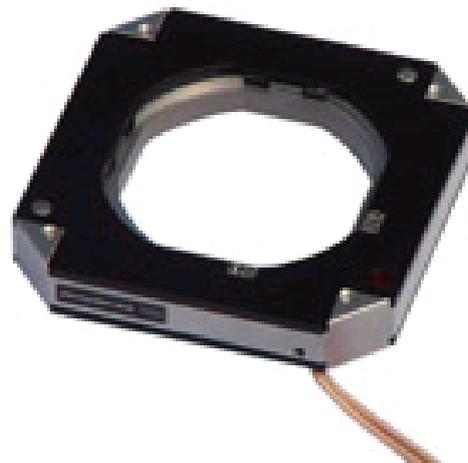


Figure 2-2 : Photographie de l'actionneur piézoélectrique 2D formant l'étage des déplacements fins [www.piezojena.com]

Le Tableau 2-4 résume les principales caractéristiques de cet étage de déplacement nanométrique.

Modèle	PXY 15 CDT
Dynamique de déplacement maximale pour X et Y	15 μm
Résolution	0,03 nm

Dimensions	X : 74 mm Y : 74 mm Z : 16 mm
Matériau	Acier inoxydable
Masse	211 g

Tableau 2-4 : Spécifications de l'actionneur 2D PZTxy

2.4. Association des deux étages grossier et fin

La plateforme de déplacement est architecturée en série [Figure 2-3]. Les deux étages de déplacement, grossier et fin, sont séparés par trois autres étages permettant d'aligner les différents axes du système selon les angles de tangage, lacet et roulis (notés platine de rotation et platines de tilt sur la Figure 2-3). L'alignement de ces axes à l'aide de ces trois étages sera traité dans le chapitre suivant. Un cube miroir fabriqué en Zérodur est empilé sur l'ensemble des étages de déplacement et d'alignement. Le Zérodur est un verre céramique dont le coefficient de dilatation est presque nul. Il est employé pour les substrats de miroirs nécessitant une très grande stabilité thermique. Deux miroirs adjacents de ce cube sont utilisés en guise de miroirs mobiles pour les interféromètres à lasers X et Y capteurs des déplacements de la plateforme, et qui seront développés dans la suite. L'orthogonalité entre deux faces adjacentes du cube a été contrôlée de l'ordre de 2 arcsec.

À noter que notre plateforme de déplacement double-étage n'est pas dotée de déplacement selon l'axe Z. Ceci est lié au fait que les applications que nous visons fournissent elles-mêmes le déplacement et l'asservissement verticaux. L'actionneur piézoélectrique en Z qui équipe le microscope à force atomique et le microscope optique en champ proche utilisés dans nos mesures expérimentales (exposées au dernier chapitre) assure lui-même le fonctionnement selon la direction verticale en même temps que notre système de déplacement assure les déplacements latéraux.

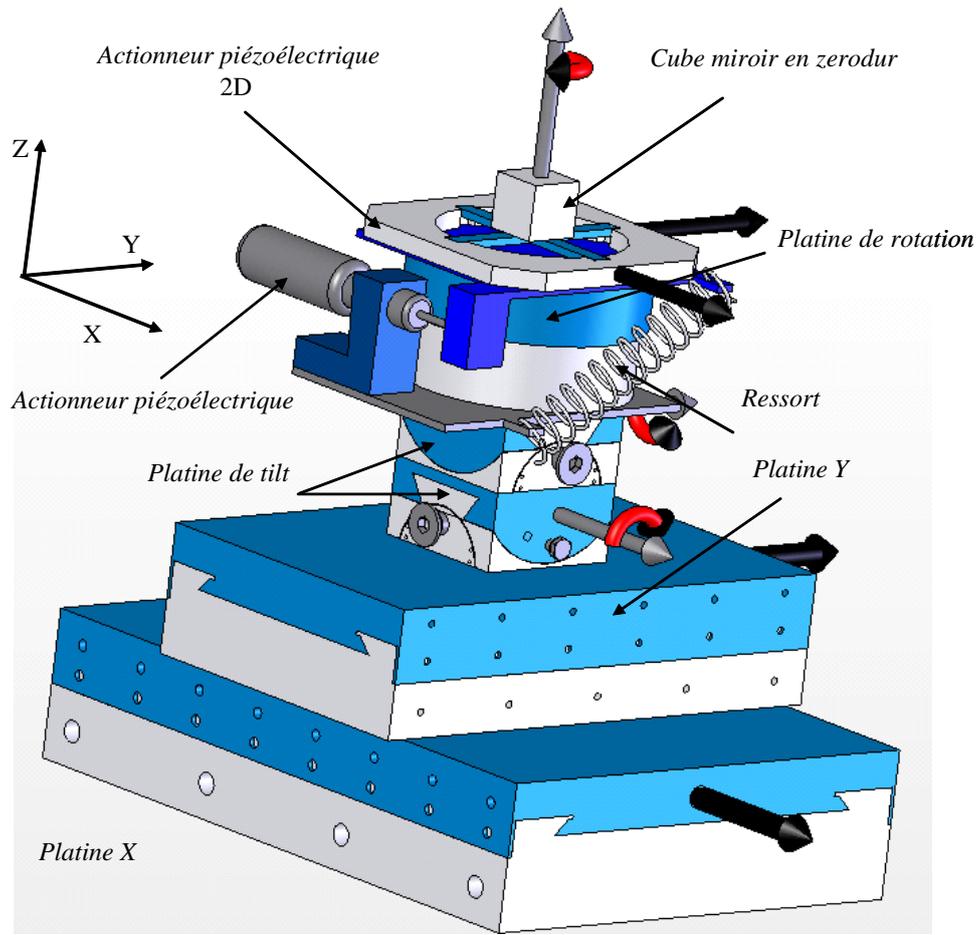


Figure 2-3 : Vue 3D de la plateforme de déplacement double-étage [Wakim2008]

2.5. L'interféromètre hétérodyne à double passage Zygo

Les interféromètres peuvent avoir des résolutions sub-nanométriques avec des temps d'intégration assez courts ce qui autorise des bandes passantes d'asservissement intéressantes. Deux principes d'interféromètres de Michelson 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 le contrôle de la position qui sera développé au chapitre III. En effet, l'information sur 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 un signal de référence à la fréquence hétérodyne permet de mesurer la position.

Le montage est représenté sur la Figure 2-4. Il est composé d'une source laser, d'un interféromètre hétérodyne double passage et d'un châssis d'électronique alimentant la source

laser et traitant le signal de mesure. Ce châssis est en communication avec un ordinateur qui pilote l'ensemble. Nous utilisons ce système interférométrique hétérodyne de Michelson ZMI-2001 de la société Zygo qui offre une résolution de 0,309 nm.

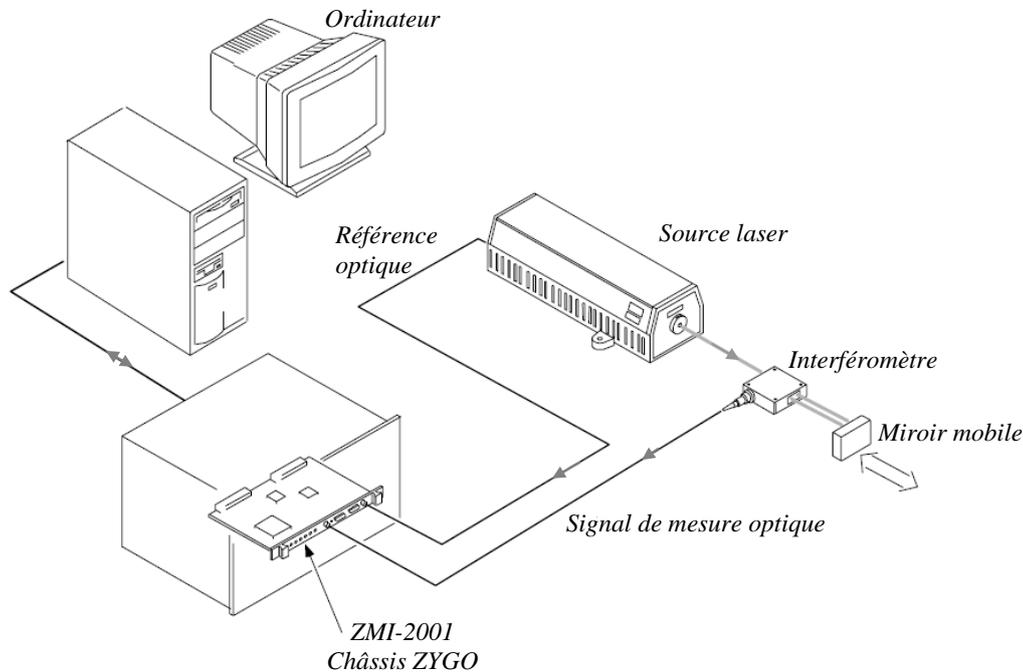


Figure 2-4 : Dispositif Zygo [Documentation Zygo]

Nous procédons à la description des composantes de ce système interférométrique de mesure.

2.5.1. La source laser

Une source laser He-Ne génère un faisceau polarisé à 45° qui passe dans un Modulateur Acousto Optique (MAO) alimenté par un signal oscillant à 20 MHz. À la sortie du MAO, deux faisceaux de fréquences différentes et de polarisations orthogonales sont superposés à l'aide d'un prisme biréfringent dont l'angle est calculé pour assurer cette superposition. Les deux faisceaux sont choisis de manière à avoir deux ordres de diffraction consécutifs et par conséquent 20 MHz de différence de fréquence. La fréquence de la source He-Ne est stabilisée avec une instabilité résiduelle inférieure à $1,6 \times 10^{-9}$ en valeur relative. La valeur de la longueur d'onde est l'une des valeurs conseillées par le BIPM² afin d'assurer une traçabilité par rapport à l'étalon primaire de longueur. Les deux composantes du faisceau laser en sortie du MAO ont pour longueur d'onde dans le vide $\lambda_1 = 632,991\,528$ nm et

² BIPM : Bureau International des Poids et Mesures.

$\lambda_2 = 632,991\ 501\ \text{nm}$. Ces valeurs ont été obtenues suite à un étalonnage par la méthode des battements optiques par rapport à une référence nationale (NIST-USA³).

2.5.2. L'interféromètre hétérodyne double passage

L'interféromètre de Michelson hétérodyne double passage est conçu de manière à assurer une mesure de position relative à la position d'un miroir fixe placé dans le même axe ; représentation dénommée DPMI (*Differential Plane Mirror Interferometer*) [DPMI2002]. Un tel système permet de diminuer la résolution et de s'affranchir des vibrations qui peuvent perturber la mesure dans le cas d'un interféromètre classique où les deux miroirs (miroir mobile et miroir de référence) sont placés d'une manière perpendiculaire. Le schéma de principe est représenté Figure 2-5.

Les faisceaux de pulsation « ω_1 » et « ω_2 » et de polarisations orthogonales sont séparés spatialement à l'aide d'une lame séparatrice de polarisation après avoir été collimatés le long du chemin optique entre la source laser et l'interféromètre. Dans l'interféromètre, les deux faisceaux suivent les trajectoires montrées sur la Figure 2-5. Le premier faisceau se réfléchit sur le miroir MR constituant le signal de référence. Après réflexion sur le miroir mobile, le deuxième faisceau est superposé avec le premier, constituant ainsi le signal optique utile portant l'information sur la position du miroir mobile codée dans la phase d'un signal à 20 MHz. Les deux faisceaux sont ensuite injectés dans une fibre multi-mode, qui permet le battement optique et le transport vers l'électronique de détection.

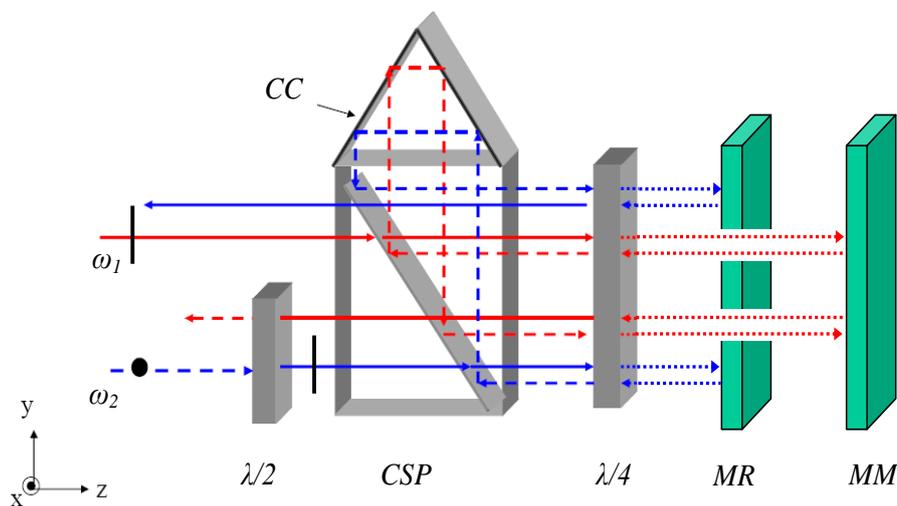


Figure 2-5 : Description de l'interféromètre Zygo - $\lambda/2$ lame demi-onde - CSP cube séparateur de polarisation - $\lambda/4$ lame quart-onde - MR miroir de référence - MM miroir mobile - CC coin de cube [Documentation Zygo]

³ NIST-USA : National Institute of Standards and Technology.

2.5.3. Le châssis de comptage électronique

Le signal optique utile obtenu à la sortie de la fibre est transformé en un signal électrique par un circuit photodétecteur. Ce signal électrique est un signal à 20 MHz. Il est démodulé grâce à un comparateur de phase en le comparant au signal de référence de fréquence égale à 20 MHz qui a servi à alimenter le MAO.

Grâce au double passage, un déplacement du miroir mobile de $\lambda/4$ décale la phase de 2π en sortie de l'interféromètre. L'électronique du châssis échantillonne la phase sur 9 bits permettant une résolution 512 fois meilleure [Demarest1998]. La résolution du système est alors donnée par :

$$Résolution = \frac{\lambda_{mes}}{4n} \times \frac{1}{2^9} = \frac{\lambda_{mes}}{2048n} \quad (2.1)$$

où n est l'indice du milieu, λ_{mes} est la longueur d'onde dans le vide du faisceau de mesure (λ_1 ou λ_2).

Compte tenu des valeurs des longueurs d'ondes étalonnées, la résolution obtenue vaut 0,309 nm dans l'air.

Une description détaillée du principe de fonctionnement de l'interféromètre hétérodyne Zygo à double passage se trouve dans [Haddad2004].

2.5.4. Limitations de l'interféromètre Zygo

Le système de mesure utilisé dans nos mesures expérimentales, l'interféromètre hétérodyne Zygo ZMI2001, 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 serait 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. Il serait intéressant de réaliser l'hétérodynage avec une autre technique pour minimiser les erreurs résiduelles qui peuvent être de l'ordre de quelques nanomètres.
- ✓ Le principe de l'hétérodynage du Zygo interdit le passage dans une fibre optique 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 serait intéressant de développer un système hétérodyne qui puisse être entièrement fibré au niveau de l'interféromètre.

- ✓ Le système de contrôle développé au LISV et qui sera introduit au chapitre III 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 qui permet d'apporter ces différents avantages a été proposée [Wakim2008]. Le développement expérimental est actuellement en cours.

2.5.5. Contrôle du déplacement basé sur l'interférométrie hétérodyne

L'information sur la position est contenue dans la phase du signal d'hétérodynage en sortie de l'interféromètre. Un système de contrôle du déplacement a été développé au LISV reposant sur cet interféromètre hétérodyne et une boucle d'asservissement en phase [Topçu2003] [Chassagne2005]. L'asservissement de la phase du signal d'hétérodynage sur la phase d'un signal électronique permet d'asservir la position d'un miroir mobile. Cette technique est utilisée pour l'asservissement de la position de l'étage piézoélectrique. Une autre technique est utilisée pour l'asservissement de l'étage grossier.

Cependant, la plateforme double étage est composée de plusieurs étages empilés les uns sur les autres. Ce sont dans l'ordre : les deux moteurs linéaires de déplacement millimétrique, deux étages pour le réglage des angles de tangage et de roulis, un étage pour le réglage de l'angle de lacet, l'étage de déplacement piézoélectrique 2D, et le cube miroir. Dans une telle architecture, le déplacement d'un étage entraîne le déplacement de tous les étages qu'il porte. Ceci est désavantageux du point de vue du réglage des contrôleurs. Chaque platine de déplacement porte un poids différent, et son contrôleur devra donc être paramétré différemment.

J'ai reporté la description de ces techniques d'asservissement de l'étage piézoélectrique et de la plateforme double-étage au chapitre suivant.

J'ai présenté l'interféromètre hétérodyne double passage Zygo utilisé durant les mesures expérimentales. Notons que j'ai eu l'occasion d'étudier deux autres interféromètres (décrits en Annexes A et B) pendant mon séjour d'un mois à l'Université Centrale Nationale (NCU) de Taiwan. Ces deux interféromètres peuvent être utilisés comme capteurs alternatifs au Zygo.

2.6. Le montage expérimental

Les capteurs de déplacement des axes X et Y sont des interféromètres hétérodynes à double passage ZYGO. Ces deux interféromètres sont disposés orthogonalement de telle façon à ce que les faisceaux lasers issus de chacun d'eux viennent se réfléchir sur deux facettes adjacentes du cube miroir en Zérodur.

La Figure 2-6 montre le schéma de principe de l'étage de métrologie X-Y. Le faisceau issu du laser hélium-néon traverse un cube séparateur 50/50 (CS) qui divise le faisceau en deux parties d'intensités égales. Chaque partie du faisceau est envoyée vers un interféromètre hétérodyne double passage (I_x et I_y). Les faces du cube miroir sont schématisées par deux miroirs plans. La sortie des interféromètres est envoyée à l'aide de fibres optiques vers une carte électronique de comptage (ZMI-2001) de la société ZYGO. Après comptage de franges et échantillonnage, l'information sur la position décodée de la phase du signal optique hétérodyne est envoyée vers un ordinateur. Une carte électronique contrôle la position de l'étage piézoélectrique par sauts de phase. La position des deux étages de déplacement est contrôlée à l'aide d'algorithmes d'asservissement en boucle fermée. La technique des sauts de phase et celle d'asservissement en boucle fermée des deux étages sont développées au chapitre suivant.

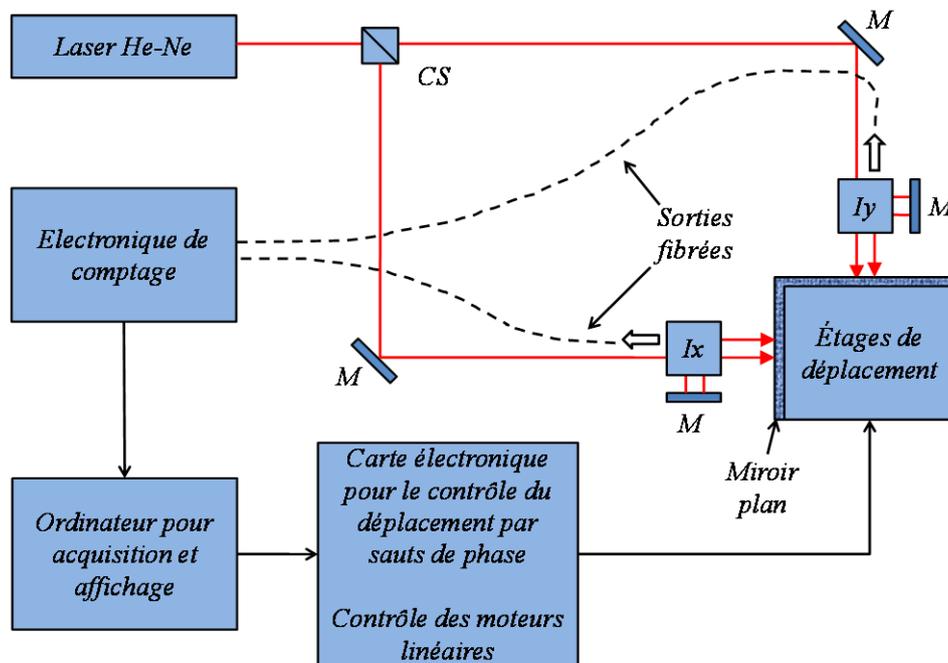


Figure 2-6 : Schéma de principe de l'étage de métrologie X-Y. CS : cube séparateur, M : miroir, I_x : interféromètre de l'axe X, I_y : interféromètre de l'axe Y

2.7. Les sources d'erreurs en interférométrie laser

L'objectif premier d'une mesure de déplacement par interférométrie laser est d'effectuer une mesure exacte et répétable. Les facteurs qui affectent l'exactitude, la linéarité et la répétabilité des mesures interférométriques à l'échelle nanométrique pour des déplacements dépassant le millimètre sont ici présentés.

Les erreurs recensées en interférométrie laser peuvent être divisées en 3 catégories : les erreurs dues au montage interférométrique, les erreurs dues à l'instrument (erreurs intrinsèques), et les erreurs d'origines environnementales [Bobroff1993].

Les erreurs dues au montage interférométrique peuvent être minimisées et même éliminées par le moyen d'un bon réglage de l'interféromètre. Ceci fait appel à des techniques d'alignement des éléments constituant l'interféromètre. L'erreur d'Abbe [Abbe1980] et l'erreur de cosinus font partie de cette catégorie. L'uniformité de la surface du miroir peut aussi influencer sur l'exactitude des mesures interférentielles. Les composants optiques utilisés dans les interféromètres à lasers ont normalement une planéité de surface de $\lambda/10$.

Dans la catégorie des erreurs dépendants de l'instrument on retrouve la stabilité de la fréquence de la source laser, les erreurs de l'électronique de comptage et des non-linéarités électroniques, l'erreur résultant du délai entre l'optique de l'interféromètre et l'échantillon de mesure, connue sous le nom incertitude sur l'âge des données, ainsi que les limitations en mesure de phase [Oldham1993] [Demarest1998] [Wu1996] [Wu1998] [Wu2003]. Les déviations périodiques résultant du mélange de polarisations proviennent de tout élément introduisant des polarisations non-idéales [Cosjins2002].

Parmi les erreurs associées à l'environnement, on retrouve l'influence thermique sur l'interféromètre, telle que l'expansion des composants optiques. Les variations de l'indice du milieu, normalement l'air, appartiennent également à cette catégorie d'erreurs. Cet effet peut être compensé par les formules d'Edlén modifiées [Edlén1966] [Edlén1994], et en mesurant la température, la pression, l'humidité, et le taux de dioxyde de carbone présent dans le milieu. En outre, l'influence des turbulences de l'air [Bobroff1993] doit être prise en considération puisque c'est un mouvement de gradients de température dans l'air à travers le chemin optique. L'effet des turbulences peut être minimisé en enveloppant les chemins optiques dans des tubes de protection.

La compensation de la longueur d'onde peut être effectuée par une mesure directe de l'indice de réfraction à l'aide d'un réfractomètre [Topçu2001], ou bien en utilisant des formules empiriques d'Edlén [Edlén1994]. Néanmoins, cette méthode donne une approximation de l'indice de réfraction, et a donc des limitations. L'exactitude de mesure des conditions atmosphériques ainsi que l'exactitude des formules empiriques détermineront l'exactitude sur le calcul de l'indice de réfraction. Néanmoins sur des courses petites, l'influence de l'indice de l'air reste négligeable. C'est pourquoi dans la suite nous n'effectuons pas systématiquement la compensation d'indice.

Dans un interféromètre de Michelson, les sources d'erreurs sont du même ordre de grandeur pour l'interféromètre homodyne et pour l'interféromètre hétérodyne sauf pour la non-linéarité optique. Wu [Wu1996] a estimé l'ordre de grandeur des non-linéarités optiques pour les deux types d'interféromètres. Pour l'interféromètre hétérodyne, les non-linéarités

optiques proviennent des défauts intrinsèques des éléments optiques et de leurs légers désalignements qui provoquent une recombinaison des faisceaux avant la sortie de l'interféromètre. En pratique, les états de polarisation ne sont pas parfaitement linéaires mais présentent une faible ellipticité [Hou2006] ce qui engendre quelques défauts résiduels. De plus, les deux états de polarisation ne sont pas tout à fait orthogonaux mais peuvent présenter un léger écart angulaire. Un battement parasite gêne alors le signal utile de sortie. Ceci induit une relation non-linéaire entre le déplacement et la variation de phase correspondante mesurée.

Wu a démontré que l'erreur de non-linéarité dans l'interféromètre homodyne est typiquement 20 fois plus petite que celle de l'interféromètre hétérodyne. Il existe des méthodes pour mesurer et compenser les non-linéarités optiques des interféromètres [Topçu2005]. Dans le cas de l'interféromètre Zygo, les non-linéarités sont de l'ordre de 2 nm s'il est bien réglé.

Des bilans exhaustifs de toutes ces erreurs peuvent être trouvés dans la littérature citée ci-dessus. Toutefois nous ne détaillons pas plus ici ces erreurs car dans notre cas la majorité est négligeable compte tenu des faibles courses visées. D'autre part, l'exactitude n'est pas le point clé recherché.

2.8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la plateforme de déplacement double-étage. Les différents éléments constituant la plateforme ont été décrits : les étages « grossier » et « fin », les étages d'alignement des axes, et le cube miroir.

Nous avons ensuite présenté l'interféromètre hétérodyne double passage ZYGO capteur des déplacements. Nous avons aussi présenté les limitations de cet interféromètre ainsi que les erreurs associées à une mesure interférométrique.

Le chapitre suivant décrit la méthode d'asservissement de l'étage piézoélectrique de la plateforme. Cette méthode repose sur un asservissement en phase. Aussi, le contrôle simultané des deux étages de la plateforme est présenté tout en décrivant les précautions à prendre lors d'une mesure 2D millimétrique effectuée à l'aide de la plateforme double-étage.

2.9. Bibliographie du 2ème chapitre

[Abbe1980] : E. Abbe. *Meß apparate für physiker. Zeitschrift für instrumentenkunde*, 10:446–448, 1890.

[Aerotech] : www.aerotech.com

[Bobroff1993] : N. Bobroff, *Recent advances in displacement measuring interferometry*, *Meas. Sci. Technol.* 4 907-926 (1993).

[Chassagne2005] : L. Chassagne, S. Topcu, Y. Alayli, P. Juncar, *Highly accurate positioning control method for piezoelectric actuators based on phase-shifting optoelectronics*, *Meas. Sci. Technol.* 16 No 9 (September 2005) 1771-1777.

[Cosjins2002] : S.J.A.G. Cosjins, H. Haitjema, P.H.J. Schellekens, *Prec. Eng.* 26 (2002) 448.

[Demarest1998] : F.C. Demarest. *High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics*. *Meas. Sci. Technol.*, 9:1024–1030, 1998.

[Documentation Zygo] : *ZMI 2000 System Manual OMP-0412J*.

[DPMI2002] : *DPMI Accessory Operating Manuel OMP-0223E*, Zygo (2002).

[Edlén1966] : B. Edlén, *The refractive index of air*, *Metrologia* 2 71-80 (1966).

[Edlén1994] : K.P. Birch and M.J. Downs. *Correction to the updated edlén equation for the refractive index of air*. *Metrologia*, 31:315–316, 1994.

[Haddad2004] : D. Haddad, *Mesure et contrôle de position et de vitesse à l'échelle nanométrique : application à la balance du watt*, Université de Versailles 2004

[Hou2006] : W. Hou, *Optical parts and the nonlinearity in heterodyne interferometers*, *Prec. Eng.*, Vol.30, pp337-346 (2006).

[Lahousse2005] : L. Lahousse, *Contribution à la construction de machines de grande précision géométrique : Le concept d'information dans l'amélioration des performances des machines*, *These de doctorat* (2005)

[Oldham1993] : N.M. Oldham, J.A. Kramar, P.S. Hetrick, and E.C. Teague. *Electronic limitations in phasemeter for heterodyne interferometry*. *Precision Engineering*, 15(3):173–179, July 1993.

[Topçu2001] : S. Topçu, *Étalon de longueur d'onde optique : Application à la réfractométrie et aux mesures interférométriques de distance dans l'air à l'échelle nanométrique*, *these de doctorat* (2001).

[Topçu2003] : S. Topçu, L. Chassagne, D. Haddad, Y. Alayli, P. Juncar, *Heterodyne interferometric technique for displacement control at sub-nanometric scale*, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol 74, n_11, pp4875-4880, nov. 2003.

[Topçu2005] : S. Topçu, L. Chassagne, Y. Alayli, P. Juncar, *Improving the accuracy of homodyne Michelson interferometers using polarization state measurement techniques*, *Optics Communications*, 247, pp 133-139, (2005).

[Wakim2008] : M. Wakim, *Contrôle de la position et de la vitesse d'une masse à l'échelle nanométrique : application à la balance du watt du LNE*, Thèse de l'université de Versailles Saint-Quentin (2008).

[Wu1996] : C. Wu, C. Su, *Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry*, *Meas. Sci. Technol.* 7 62-68 (1996).

[Wu1998] : C. Wu and R. Deslattes. *Analytical modeling of the periodic nonlinearity in heterodyne interferometry*. *Applied optics*, 37(28):6696–6700, October 1998.

[Wu2003] : C. Wu. *Periodic nonlinearities resulting from ghost reflections in heterodyne interferometry*. *Optics communications*, 215:17–23, 2003.

3. CHAPITRE III

CONTRÔLE DU DÉPLACEMENT DES DEUX ÉTAGES

3.1.	Introduction	67
3.2.	Avantages d'un système double-étage	67
3.3.	Méthodologies de conception d'un contrôleur double-étage	68
3.3.1.	Les méthodologies classiques SISO	69
3.3.2.	Les méthodologies de contrôle modernes	73
3.4.	Principe de la boucle d'asservissement de l'étage piezoélectrique.....	74
3.4.1.	Résultats expérimentaux selon une dimension	77
3.4.2.	Extension à deux axes.....	79
3.4.3.	Contrôle en vitesse.....	82
3.5.	Contrôle du déplacement des deux étages.....	82
3.5.1.	Procédure d'alignement des axes	83
3.5.2.	Contrôle de la plateforme double-étage par logique floue.....	89
3.6.	Conclusion.....	94
3.7.	Bibliographie du 3ème chapitre	95

3.1. Introduction

Ce chapitre décrit les méthodologies d'asservissement et de contrôle de notre système double-étage. Afin de contrôler les deux étages simultanément, une loi de commande coordonnant les déplacements et les vitesses des deux étages est nécessaire. Cette loi a comme tâche de contrôler les déplacements de l'étage longue-course, et les erreurs résiduelles sont corrigées par l'actionneur piézoélectrique. Ceci est effectué selon les deux directions du déplacement X et Y.

Nous présentons dans ce chapitre les boucles de contrôle de la plateforme double-étage : une partie sera dédiée à la technique des sauts de phases servant à asservir les déplacements de l'actionneur piézoélectrique 2D, puis une 2ème partie décrit le contrôle simultané des deux étages. Une partie sera aussi dédiée à l'alignement des axes de la plateforme.

3.2. Avantages d'un système double-étage

L'utilisation d'un actionneur double-étage permet d'augmenter la course de déplacement tout en augmentant l'exactitude de positionnement. Un bon contrôleur d'un système double-étage permet ensuite d'augmenter la rapidité du déplacement tout en gardant cette exactitude.

L'objectif du contrôle d'un système double-étage est de positionner un outil (ou objet) le plus rapidement possible et le plus proche possible de la position désirée, puis de compenser les erreurs et d'avoir ensuite une position finale la plus exacte possible.

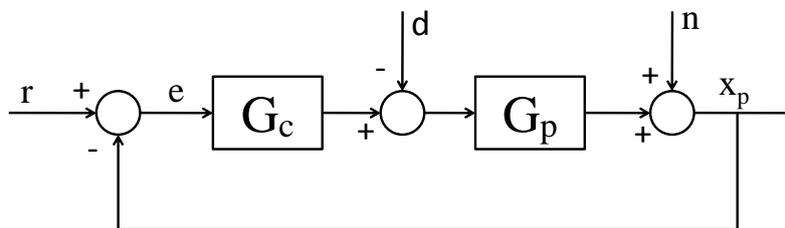


Figure 3-1 : Schéma de contrôle d'un système double-étage

La Figure 3-1 montre le schéma de contrôle d'un système double-étage. L'implémentation d'un contrôleur double-étage repose sur l'erreur de positionnement (e). d représente les perturbations externes et n le bruit dû à la mesure. Dans la Figure 3-1, G_p et G_c représentent l'actionneur double-étage et son contrôleur, respectivement ; r représente la position désirée ; x_p représente la position de l'outil.

L'erreur peut être formulée comme suit :

$$e = S(s)r + S(s)G_p(s)d - S(s)n \quad (3.1)$$

où $S(s)$ est la fonction de transfert du système en boucle fermée définie par :

$$S(s) = \frac{1}{1 + G_c(s).G_p(s)} \quad (3.2)$$

Plus la bande passante du système de contrôle est grande, plus l'atténuation de la fonction de transfert $S(s)$ est importante. Pour ceci, un des moyens les plus efficaces pour réduire l'erreur e est d'augmenter la bande passante du système de contrôle ; ceci peut être atteint à l'aide d'un système double-étage. La coopération entre l'actionneur du premier étage et celui du 2^{ème} étage offre la possibilité d'atteindre des bandes passantes plus grandes. En effet, une des tâches de base d'un actionneur double-étage est l'augmentation de la bande passante grâce au second étage. En plus de la bande passante, l'étage piézoélectrique permet d'effectuer un positionnement avec une très grande exactitude grâce à la technique des sauts de phase utilisée qui n'est pas une commande classique en tension.

3.3. Méthodologies de conception d'un contrôleur double-étage

Différentes architectures et méthodologies de contrôle ont été développées pour les systèmes double-étage. Celles-ci peuvent être classées selon deux catégories [Bhushan2006]:

- celles basées sur une conception découplée ou une conception séquentielle à une entrée et une sortie (SISO pour *Single Input Single Output*),
- et celles basées sur des méthodologies modernes de contrôle optimal telles que la commande LQG (*Linear Quadratic Control*), la commande LQG/LTR (*Loop Transfer Recovery*), la commande H_∞ , la synthèse μ et la logique floue.

Deux contraintes sont à prendre en considération lors de la conception d'un contrôleur double-étage. Premièrement, la contribution de chacun des deux actionneurs doit être proprement définie. L'actionneur du premier étage effectue les grands déplacements mais à basse fréquence, alors que l'actionneur du second étage qui possède une grande bande passante a la tâche des déplacements fins et de la dynamique du système. Deuxièmement, l'effet destructif dans lequel les deux actionneurs pourraient entrer en conflit entre eux-mêmes en se déplaçant dans des sens opposés est à éviter.

3.3.1. Les méthodologies classiques SISO

Différentes architectures et méthodologies ont été proposées afin de transformer la problématique du contrôle double-étage en un système découplé ou en une multitude de contrôleurs séquentiels de type SISO, telles que l'approche maître-esclave, le contrôle découplé [Mori1991], l'approche PQ [Schroeck2001], et le contrôle parallèle direct [Semba1999]. Les parties suivantes montrent les schémas blocs des modèles de conception de quelques-uns de ces contrôleurs double-étages. Dans ces schémas blocs, G_1 et G_2 représentent respectivement l'actionneur du premier étage (actionneur longue-course) et l'actionneur du deuxième étage (actionneur fin), x_l est la position de l'actionneur du premier étage ; x_r est la position relative de l'actionneur du deuxième étage par rapport à l'actionneur du premier étage ; x_p est la position totale ; r est la position d'entrée souhaitée (la consigne), et e est l'erreur de position telle que $e = r - x_p$.

a. L'approche maître-esclave

Dans une structure maître-esclave traditionnelle, l'erreur de position absolue est envoyée à l'actionneur du 2^{ème} étage, et la sortie du 2^{ème} actionneur est renvoyée à l'actionneur du 1^{er} étage comme montré sur la Figure 3-2. L'erreur de position est compensée par la grande bande passante du 2^{ème} actionneur. L'actionneur « longue course » va suivre l'actionneur du 2^{ème} étage afin d'éviter sa saturation.

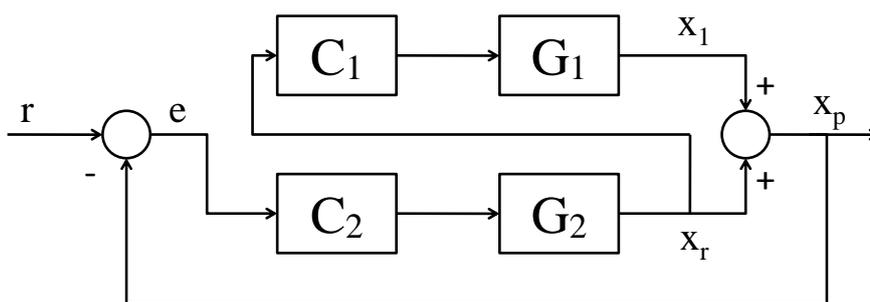


Figure 3-2 : Structure d'un contrôleur maître-esclave

b. Le contrôle découplé

La Figure 3-3 montre la structure d'un système de contrôle découplé, qui est semblable à la structure d'un contrôleur maître-esclave. Une caractéristique intéressante de ce schéma est que le système de contrôle est découplé en deux boucles de contrôle indépendantes, et la fonction de transfert du système est le produit des fonctions de transfert de chacune des boucles [Li2001]. Ceci fait que les deux contrôleurs C_1 et C_2 peuvent être conçus indépendamment.

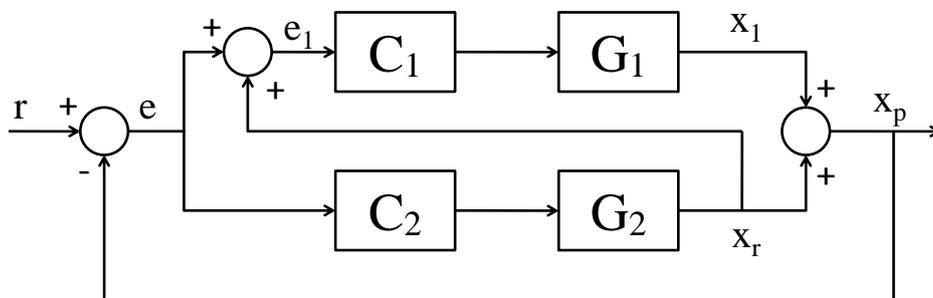


Figure 3-3 : Structure d'un contrôleur découplé [Bhushan2006]

Le contrôle maître-esclave et le contrôle découplé utilisent, tous les deux, la position relative de l'actionneur fin, x_r , par rapport à la position de l'actionneur long-course. Si la position relative n'est pas disponible, x_r peut être estimée à partir du modèle de l'actionneur du second étage.

c. L'approche PQ

La méthode PQ est une autre technique innovante pour le contrôle des systèmes en double-étage. Son schéma bloc de contrôle est montré sur la Figure 3-4.

Dans une approche PQ, P est défini par :

$$P = \frac{G_1}{G_2} \quad (3.3)$$

Et le contrôleur double-étage peut être conçu en deux étapes. La première consiste à concevoir un contrôleur auxiliaire Q pour le système P , et qui est défini tel que :

$$Q = \frac{C_1}{C_2} \quad (3.4)$$

Q est conçu dans le but de paramétrer la contribution relative de l'actionneur longue-course par rapport à l'actionneur du second étage. La pulsation de coupure et la marge de phase de la fonction de transfert en boucle ouverte PQ sont les paramètres à régler lors de la conception de Q . À des pulsations inférieures à la pulsation de coupure de PQ , la sortie est dominée par l'action de l'actionneur longue-course, alors qu'à des pulsations supérieures à la pulsation de coupure, c'est l'actionneur du second étage qui l'emporte. À la pulsation de coupure exactement, la contribution des deux actionneurs est égale. Une grande marge de phase va assurer que les deux actionneurs ne vont pas entrer en conflit lorsque leurs sorties sont proches en amplitude ; ce qui a pour but d'éviter tout effet destructif.

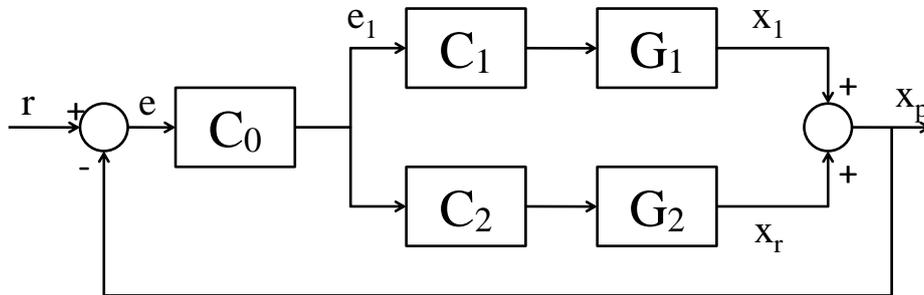


Figure 3-4 : Structure d'un contrôleur PQ [Bhushan2006]

La seconde étape dans la conception du contrôleur est la conception d'un contrôleur C_0 pour le système SISO PQ de telle sorte que la bande passante (pulsation de coupure), marge de gain et marge de phase du contrôleur global soient satisfaites.

d. Le contrôle parallèle direct

Il est aussi possible de concevoir le contrôleur d'un actionneur double-étage en suivant une structure parallèle telle que montrée sur la Figure 3-5, et en imposant certaines contraintes lors de la conception du contrôleur.

Les contraintes pour la conception d'un contrôleur double-étage en terme de fonction de transfert en boucle ouverte sont :

$$C_1(s)G_1(s) + C_2(s)G_2(s) \rightarrow C_2(s)G_2(s) \quad (3.5)$$

aux hautes fréquences, et

$$|C_1(s)G_1(s) + C_2(s)G_2(s)| \gg |C_2(s)G_2(s)| \quad (3.6)$$

aux basses fréquences.

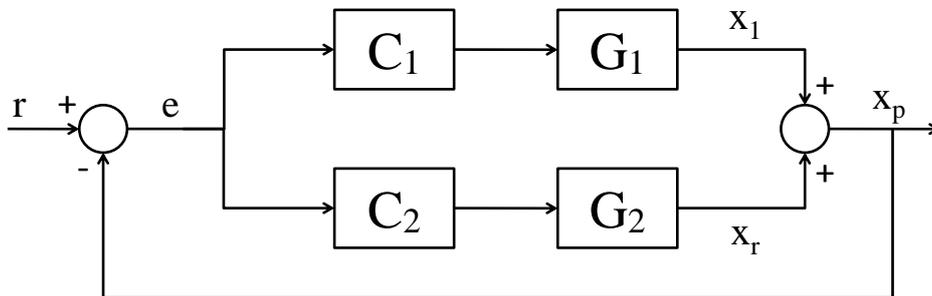


Figure 3-5 : Structure d'un contrôleur parallèle direct

La première contrainte implique que la réponse fréquentielle en boucle ouverte du système double-étage vaut approximativement celle de la boucle de contrôle de l'actionneur du second étage. Donc le contrôleur $C_2(s)$ peut être conçu indépendamment comme une problématique SISO afin de satisfaire une bande passante, une marge de gain et une marge de phase désirées pour le contrôleur du système double-étage.

La seconde contrainte assure que l'actionneur du second étage ne sature pas. Le contrôleur $C_I(s)$ peut être conçu de telle sorte que la stabilité globale du système soit satisfaite.

3.3.2. Les méthodologies de contrôle modernes

Puisqu'un système de contrôle double-étage est un système à plusieurs entrées et plusieurs sorties (MIMO pour *Multiple Input Multiple Output*), il est possible d'utiliser des méthodologies de contrôle optimales MIMO telles que LQG, LQG/LTR, H_∞ , et synthèse μ afin de concevoir le contrôleur double-étage. En général, un contrôleur MIMO optimal est basé sur le schéma d'un contrôleur parallèle de la Figure 3-5, avec, en plus, les modèles des perturbations et bruits externes ainsi que d'autres fonctions de pondération afin d'arriver aux performances souhaitées.

La commande LQG combine un filtre de Kalman et un asservissement optimal basé sur le principe de séparation. Cependant, le filtre de Kalman affaiblit la robustesse souhaitée de l'asservissement optimal. La commande LQG/LTR améliore la robustesse à l'aide d'un filtre de Kalman amélioré. Des exemples de contrôle de systèmes double-étages en utilisant les commandes LQG et LQG/LTR sont reportés dans [Suzuki1997] [Hu1999] [Suh2002].

Des exemples de contrôle de systèmes double-étages en utilisant la commande H_∞ , la synthèse μ , et une combinaison de H_2/H_∞ ont été reportés dans [Suzuki1997] [Hu1999] [Huang2004]. D'autres théories de contrôle avancées ont été appliquées aux systèmes double-étages telles que les modes glissants [Lee2000], les réseaux de neurones [Sasaki1998] et la logique floue.

La plupart des problèmes rencontrés sont modélisables mathématiquement. Mais ces modèles nécessitent des hypothèses parfois très restrictives, rendant délicate l'application au monde réel. Les problèmes du monde réel doivent tenir compte d'informations imprécises et incertaines.

Une approche fut développée à partir de 1965 par Lotfi A. Zadeh, professeur de l'université de Californie à Berkeley, basée sur la théorie des sous-ensembles flous, généralisant la théorie des ensembles classique. Dans la nouvelle théorie de Zadeh, un élément peut plus ou moins appartenir à un certain ensemble. Les imprécisions et les incertitudes peuvent ainsi être modélisées, et les raisonnements acquièrent une flexibilité que ne permet pas la logique classique.

De nombreuses applications ont alors été développées dans divers domaines, là où aucun modèle déterministe n'existe ou n'est pas pratiquement implémentable, ainsi que dans des situations pour lesquelles l'imprécision sur les données rend le contrôle par des méthodes classiques impossible.

La plateforme de nanositionnement double-étage que nous avons développée utilise deux techniques d'asservissement. L'étage piézoélectrique est contrôlé par une technique dite à « sauts de phase ». La participation de chacun des deux étages et la coordination de leurs déplacements sont contrôlées par logique floue.

3.4. Principe de la boucle d'asservissement de l'étage piézoélectrique

Nous présentons dans cette partie le principe de fonctionnement de la boucle d'asservissement de l'étage piézoélectrique. Le système interférométrique hétérodyne présenté au chapitre précédent utilise un laser émettant à une fréquence recommandée par le Comité Internationale des Poids et Mesures (CIPM) pour définir le mètre. Ceci permet de se raccorder directement à la définition du mètre, assurant ainsi la traçabilité des mesures effectuées à l'échelle nanométrique. La méthode de contrôle de l'étage piézoélectrique repose sur un asservissement en phase. Ceci permet de se passer des méthodes d'asservissement en tension nécessitant une modélisation de l'actionneur piézoélectrique non-linéaire.

La Figure 3-6 montre, le schéma de principe de la boucle d'asservissement (selon une seule direction pour des raisons de clarté). L'interféromètre hétérodyne ZYGO utilisé dans les mesures est basé sur la variation de la phase optique ; c'est un interféromètre à décalage de phase. Lorsque le miroir mobile composant un interféromètre de Michelson en double passage se déplace d'une distance de $\lambda/4$, la différence de phase entre les faisceaux optiques de mesure et de référence varie de 2π . Nous nous sommes servis de ceci afin de bâtir un asservissement en boucle fermée. La méthode consiste à contrôler la différence de phase entre deux signaux pour contrôler la position du miroir mobile. C'est aussi pour des raisons de clarté que nous présentons sur la Figure 3-6 un interféromètre simple passage avec des bras de mesure et de référence orthogonaux. L'interféromètre ZYGO que nous utilisons est à double passage et a ses deux bras dans le même axe ; ce système est conçu pour augmenter la résolution et diminuer l'effet des contraintes extérieures qui s'exercent sur les deux bras de l'interféromètre [DPMI2002].

Comme décrit au chapitre II dédié à la description de l'interféromètre hétérodyne double passage ZYGO, un laser hélium-néon fournit une source de lumière hétérodyne grâce à un modulateur acousto-optique (MAO). Deux signaux de fréquences f_1 et f_2 voisines de quelques mégahertz, et polarisés linéairement et orthogonalement l'un par rapport à l'autre en sortie du MAO sont séparés spatialement au niveau de l'interféromètre par un cube séparateur de polarisation pour parcourir des chemins optiques différents. Le faisceau de référence est réfléchi par le miroir de référence fixe (MR). Le faisceau de mesure est réfléchi par le miroir mobile (MM) monté sur un actionneur piézoélectrique, ce qui a pour effet de décaler sa fréquence par effet Doppler. À la sortie de l'interféromètre, les deux faisceaux sont mélangés à l'aide d'un polariseur générant une figure d'interférence. Le photodétecteur (PD) verra à son niveau une variation de la phase optique du signal de battement $S3$ proportionnelle à la différence du chemin optique entre les bras de mesure et de référence, et donc au

déplacement. Le signal $S3$ est sinusoïdal de fréquence 20 MHz qui est la fréquence de modulation du MAO.

Un générateur de fonctions (non représenté sur la Figure 3-6) génère deux signaux de référence $S1$ et $S2$ synchronisés et à la même fréquence de 20 MHz que $S3$. $S3$ est le signal résultant de l'interférence des deux faisceaux optiques de mesure et de référence, et contient l'information sur la position du miroir mobile. Ce faisceau laser $S3$ en sortie de l'interféromètre est divisé en deux par une lame séparatrice 50/50. Une partie du faisceau est envoyée vers le système d'acquisition (châssis ZYGO ZMI-2001) pour décoder l'information sur la position. L'autre partie est envoyée vers un comparateur de phase (C) pour faire partie de la boucle d'asservissement en position. Le comparateur de phase fournit en sortie une tension (ε) proportionnelle à la différence de phase entre $S2$ et $S3$. La tension ε est envoyée dans un module Proportionnel, Intégral (PI). La sortie du module PI servira pour asservir la position de l'actionneur piézoélectrique autour de la position zéro.

Il s'en suit que toute variation entre les phases de $S2$ et $S3$ va avoir comme effet le déplacement de l'actionneur piézoélectrique jusqu'à annulation de cette variation. Ceci est avantageux dans le cas d'une perturbation mécanique extérieure apparaissant au niveau du miroir mobile par exemple. Une telle perturbation va avoir comme effet la variation de la différence de phase entre les signaux $S2$ et $S3$, qui va être corrigée par le déplacement du miroir mobile. La boucle d'asservissement élimine de cette façon toute perturbation extérieure.

Supposons maintenant qu'un décalage de phase soit imposé sur le signal $S2$. Ce décalage de phase va être détecté par le comparateur C et corrigé par un déplacement de l'actionneur piézoélectrique. On en déduit que l'on peut faire déplacer l'actionneur piézoélectrique en imposant des décalages de phase bien déterminés sur le signal $S2$. Une électronique haute fréquence a été développée au sein du laboratoire pour ces fins [Haddad2004]. Cette carte électronique impose des décalages de phase quantifiés sur le signal $S2$ afin de déplacer l'actionneur piézoélectrique. Le déplacement est lié au décalage de phase $\Delta\phi$ par la formule suivante :

$$\Delta x = \frac{\lambda_0}{4n} \times \frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\lambda_0 \times \Delta\phi}{8\pi \times n} \quad (3.7)$$

où λ_0 est la longueur d'onde du laser dans le vide, et n l'indice de réfraction du milieu.

Un décalage de phase imposé sur le signal $S2$ déplacera l'actionneur piézoélectrique dans un sens. Afin de déplacer l'actionneur dans le sens opposé, la carte électronique haute fréquence impose, cette fois-ci, des décalages de phase sur le signal $S1$. Le signal $S1$ est le signal utilisé comme tension de référence, ou encore de modulation, de l'oscillateur modulant le modulateur acousto-optique. Décaler sa phase décalera la phase du signal de battement $S3$.

Ceci aura comme effet l'apparition d'une tension ε de signe opposé à celui qui apparaîtrait dans le cas d'un décalage imposé sur $S2$.

L'électronique haute fréquence a la possibilité de quantifier les décalages de phase imposés sur $S1$ ou $S2$ tels que $\Delta\phi = 2\pi/N$ où N est un entier. On parle alors de sauts de phase. À titre d'exemple, la carte électronique haute fréquence peut imposer des décalages de phase de $\Delta\phi = 2\pi/32$ ce qui conduit à des sauts de position de 4,945 246 313 nm.

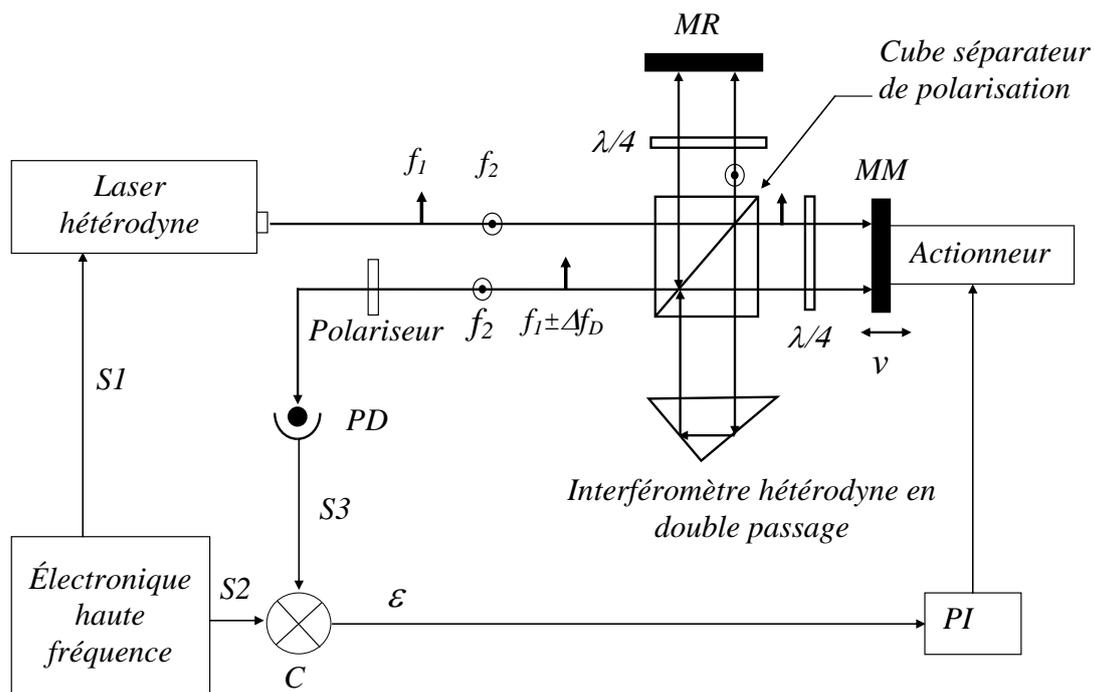


Figure 3-6 : Schéma de principe de l'asservissement en position. MR : Miroir de référence, MM : miroir mobile, PD : photodétecteur, $\lambda/4$: lame quart-d'onde, CP : comparateur de phase, $F(p)$: électronique d'asservissement, V : vitesse de déplacement du miroir mobile [Haddad2004]

Des améliorations ont été ensuite introduites sur la carte électronique haute fréquence afin de permettre des décalages de phases simultanés sur $S1$ et $S2$. Ceci permet d'effectuer des déplacements différentiels dans les deux sens avec une résolution de $\Delta\phi = 2\pi/612$ conduisant à des sauts de positions égaux à 0,258 nm [Chassagne2005].

J'ai utilisé ensuite un générateur de fonctions haute fréquence (AFG3102 de TEKTRONIX) doté d'un pouvoir de décalage de phase dans les deux sens, positif et négatif, ce qui a permis de simplifier le système. Le signal $S1$ est généré par le générateur de fonctions uniquement pour être utilisé comme référence pour l'oscillateur modulant le MAO. Des

décalages de phase positifs et négatifs sont maintenant induits uniquement sur $S2$ afin d'effectuer des déplacements dans le sens positif et négatif, respectivement. Ceci permet d'être plus agile et performant.

La résolution des décalages de phase du générateur de fonctions AFG3102 est de $0,01^\circ$. La résolution des déplacements théorique devient alors $0,004$ nm, ce qui est beaucoup mieux que la carte électronique haute fréquence. Néanmoins la résolution du capteur et le bruit mécanique limitent les performances.

Le générateur de fonctions est doté de deux voies, ce qui lui permet d'induire des décalages de phase positifs et négatifs qui sont utilisés pour les deux directions du déplacement X et Y.

En conclusion, nous avons construit une boucle d'asservissement qui, à la fois, élimine les vibrations mécaniques extérieures, mais aussi permet de déplacer l'actionneur piézoélectrique dans les deux sens avec des pas de déplacement sub-nanométriques et des qualités métrologiques de répétabilité, d'exactitude et de traçabilité.

3.4.1. Résultats expérimentaux selon une dimension

La Figure 3-7 montre le schéma de principe du montage expérimental pour un seul axe de déplacement, soit X. Le schéma est composé de l'étage de déplacement piézoélectrique PZT_{xy} , de l'interféromètre hétérodyne double passage ZYGO, de la boucle d'asservissement en phase ainsi que du circuit déclencheur des sauts de phase. Notons ici que les platines de déplacement longue course ne sont pas représentées sur cette figure puisqu'elles n'interviennent pas dans la boucle d'asservissement en phase. La boucle d'asservissement en phase décrite dans la partie précédente sert à contrôler l'étage de déplacement piézoélectrique PZT_{xy} uniquement. Pour l'instant, nous nous servons de cet actionneur pour effectuer des déplacements selon l'axe X, soit PZT_x . Une face du cube miroir en Zérodur (ZD) est utilisée comme miroir mobile pour l'interféromètre ZYGO de l'axe X. Puis un ordinateur intervient dans la boucle afin de gérer l'ensemble. Celui-ci reçoit l'information sur la position et envoie le bon nombre de sauts de phases nécessaires au déplacement.

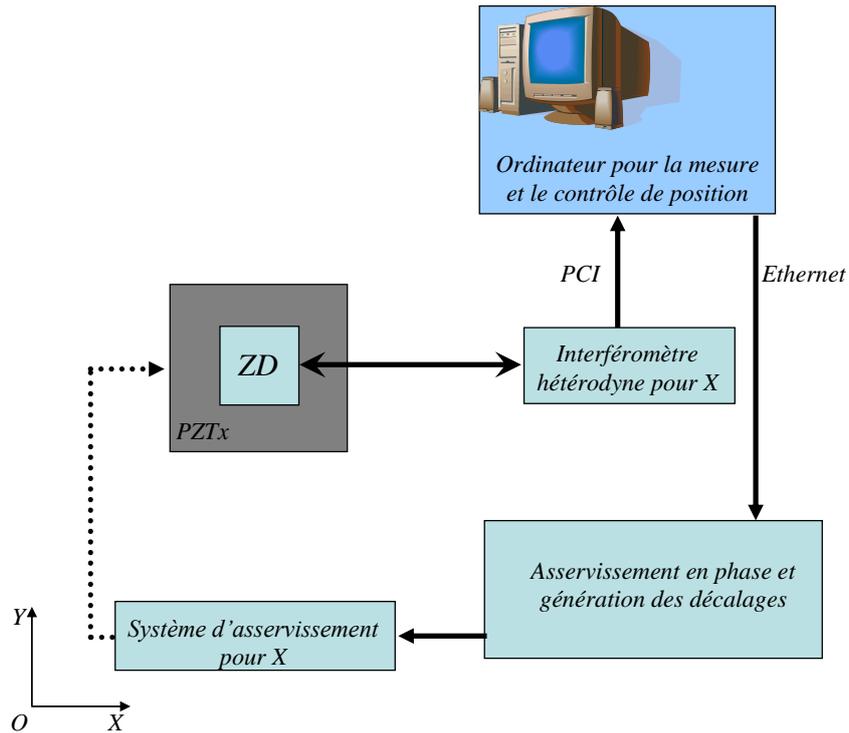


Figure 3-7 : Schéma du principe de montage pour un seul axe. PZTx : actionneur piézoélectrique de l'axe X. ZD : cube miroir en Zérodur [Wakim2008]

Les mesures brutes représentées sur la Figure 3-8 montrent des pas de déplacement effectués selon un seul axe et un seul sens. Ces pas de déplacement ont été effectués à l'aide de l'actionneur piézoélectrique avec la boucle d'asservissement en phase comme génératrice du mouvement.

Les pas montrés sur la Figure 3-8a correspondent à des sauts de phase de 5° , ce qui équivaut à 2,2 nm de déplacement. Chaque palier montre un niveau de bruit d'origine mécanique du même ordre de grandeur que les pas de déplacement ; des pas plus petits seront moins visibles avec un tel niveau de bruit. Pour illustrer la capacité de l'étage piézoélectrique à effectuer des déplacements de différentes amplitudes, nous montrons sur la Figure 3-8b des pas de déplacement correspondant à 10° de sauts de phase, et donc équivalents à 4,4 nm de déplacement.

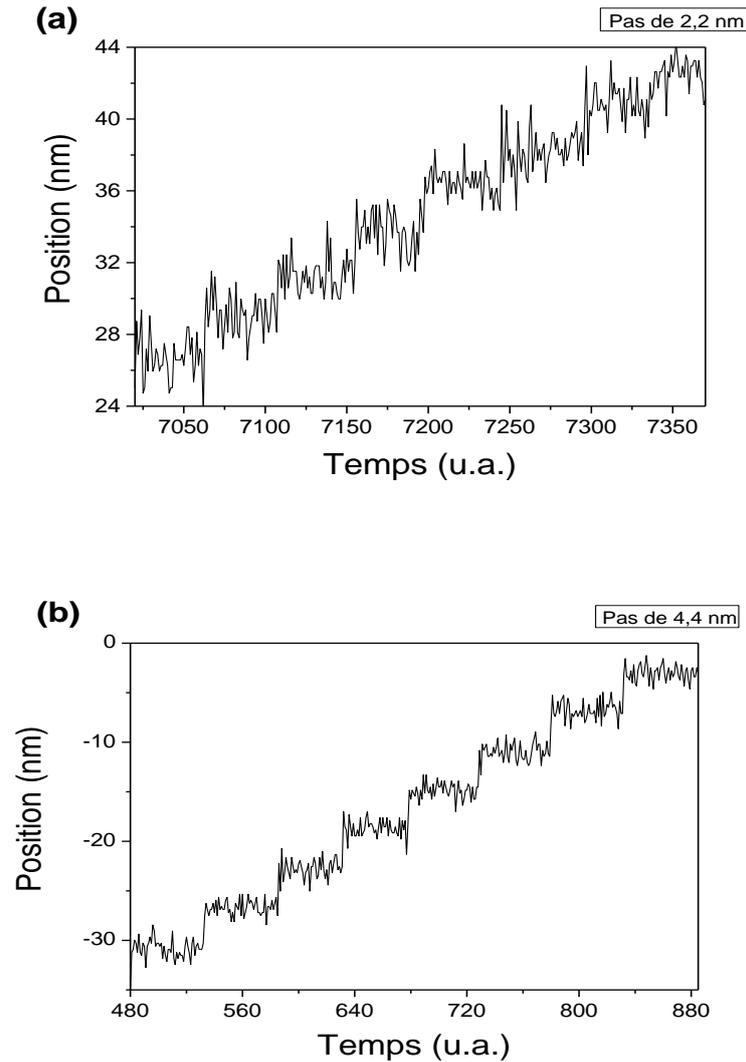


Figure 3-8 : Déplacements unidirectionnels de 2,2 nm (a) et 4,4 nm (b) effectués avec l'étage piézoélectrique en se servant de la boucle d'asservissement en phase

La boucle d'asservissement en phase est dupliquée afin d'assurer un contrôle de l'étage piézoélectrique dans le plan X-Y. Dans ce qui suit, nous montrons les résultats d'une telle configuration.

3.4.2. Extension à deux axes

Afin d'assurer des déplacements asservis dans le plan X-Y, nous avons dupliqué la boucle d'asservissement en phase décrite précédemment. La Figure 3-9 montre le schéma expérimental. Comme dans le cas d'un seul axe de déplacement, un interféromètre hétérodyne double passage ZYGO est utilisé pour mesurer la position du cube miroir pour chaque direction du déplacement. La boucle d'asservissement de la phase optique fournie par l'interféromètre sur la phase du signal électronique de référence vient ensuite asservir les

déplacements de l'étage piézoélectrique, et donc la position du cube miroir qu'il porte. Un ordinateur reçoit la position donnée par les interféromètres et assure le bon suivi de la trajectoire désirée.

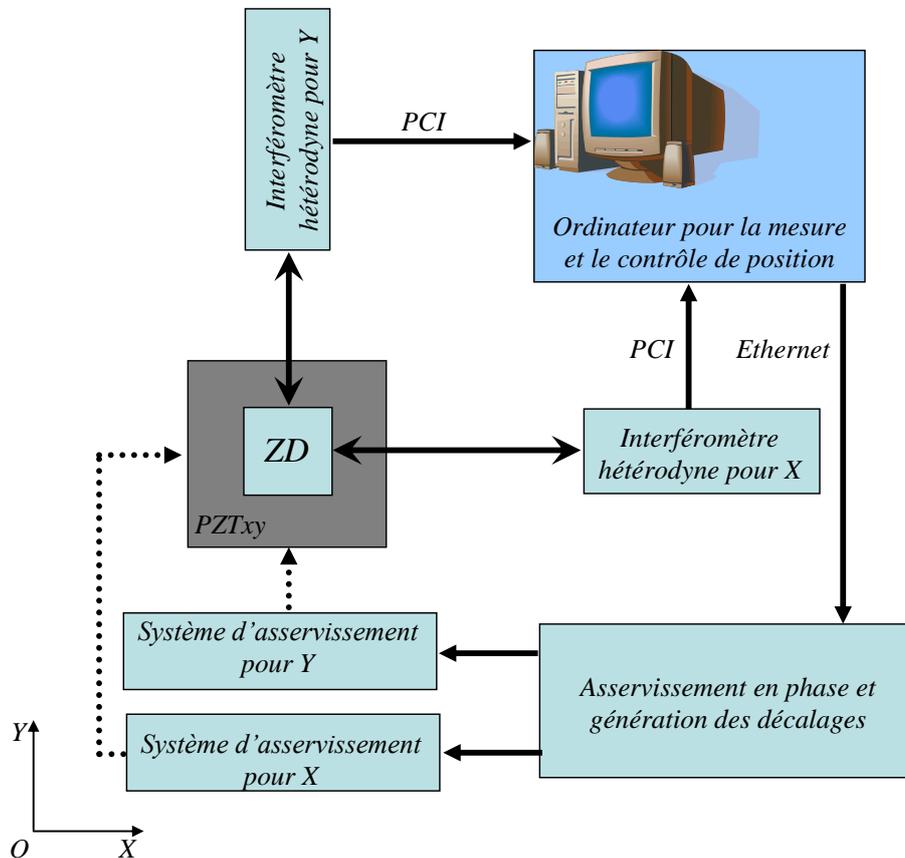


Figure 3-9 : Principe de l'asservissement en position 2D. ZD : cube en Zérodur aux faces polies miroir ; PZTxy : actionneur piézoélectrique deux axes [Wakim2008]

La Figure 3-10 montre un déplacement piézoélectrique dans le plan X-Y comprenant une série de figures géométriques : un mouvement préprogrammé exécute un carré puis un cercle puis un carré incliné. 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 droit 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).

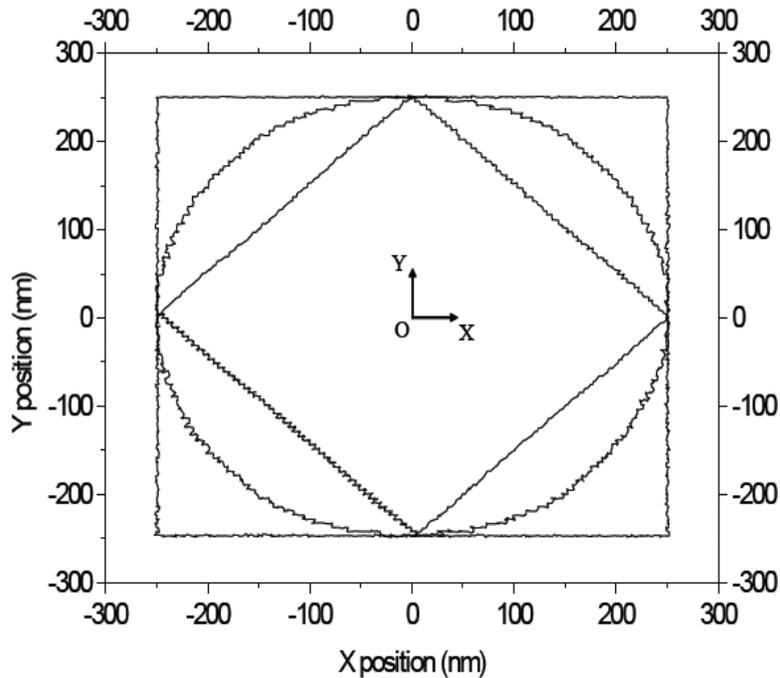


Figure 3-10 : Exemple d'un déplacement piézoélectrique 2D [Chassagne2007]

Les mesures présentées jusqu'ici ne sont pas exactes puisqu'elles sont effectuées à l'air libre. Pour être exacte, la valeur des pas de déplacement induits par décalage de phase doit être compensée par rapport à l'indice de l'air dans le cas où l'expérience n'est pas effectuée sous vide. Pour des déplacements sur petites étendues, les fluctuations de l'indice de l'air n'ont pas besoin d'être prises en compte. Néanmoins, le système de déplacement double étage, sujet d'étude dans cette thèse, est destiné à être utilisé sur une étendue de mesure millimétrique. Le LISV est équipé d'une station météorologique pour surveiller le changement d'indice. La station météorologique mesure la température, la pression, l'humidité et le taux de CO_2 dans l'optique de remonter à l'indice par l'intermédiaire des formules d'Edlén [Edlén1966]. Les diverses courbes qui seront présentées au dernier chapitre réservé aux résultats expérimentaux longue-course ont été effectuées dans une salle contrôlée en température.

Afin d'étendre les performances de l'étage piézoélectrique sur la course de déplacement des platines millimétriques, une coordination des déplacements et des vitesses des deux étages doit être envisagée. Chaque étage doit être doté de son contrôleur, et nous devons veiller à ce que les contrôleurs ne fonctionnent pas de façon destructive. Un algorithme pour le contrôle simultané des deux étages est nécessaire. Aussi, les contraintes mécaniques liées au fonctionnement du système double-étage, et notamment l'alignement des axes mécaniques et optiques sont à prendre en considération au préalable.

3.4.3. Contrôle en vitesse

Les décalages de phase imposés par la carte électronique haute fréquence peuvent servir pour asservir la vitesse du cube miroir mobile. Le contrôle en vitesse revient à imposer des sauts de position « Δp » d'une manière répétitive avec un taux de répétition contrôlé « τ ». Pour des applications métrologiques, ce taux peut être assuré par un générateur de fonctions synchronisé sur une horloge atomique d'instabilité relative de fréquence bien meilleure que 10^{-9} . La vitesse « v » peut être donnée par :

$$v = \frac{\Delta p}{\tau} \quad (3.8)$$

Dans le cadre des applications que nous visons, que ce soit la microscopie à force atomique ou la microscopie optique en champ proche, l'asservissement en vitesse n'est pas une préoccupation. Ce qui importe est l'exactitude et la répétabilité des pas de positionnement.

Contrôler les deux étages, longue-course et piézoélectrique, nécessite un contrôle simultané et non destructif de la position et de la vitesse de chacun des deux étages pour chaque axe du déplacement. En effet, nous souhaitons que les deux étages collaborent afin d'assurer un déplacement avec un bon suivi de la trajectoire désirée sur une étendue de déplacement millimétrique. Ceci s'effectuera par le moyen de l'étage piézoélectrique rectifiant les erreurs induites par les platines de déplacement longue-course. L'actionneur piézoélectrique ne disposant que d'une dynamique de $\pm 1,5 \mu\text{m}$, les platines devront assurer un minimum d'erreurs. L'actionneur piézoélectrique de son côté devra suivre la vitesse des platines pour ne pas saturer. La fréquence des sauts de phase sera donc importante à ce titre.

3.5. Contrôle du déplacement des deux étages

Dans les résultats exposés jusqu'ici, seul l'actionneur piézoélectrique 2D de l'étage « fin » était utilisé afin d'effectuer les déplacements ; les platines de déplacement longue-course sont restées inactives. Ceci est dû au fait que la carte électronique haute fréquence et sa boucle d'asservissement en phase ont été conçues pour le contrôle de l'actionneur piézoélectrique seul. Ici, nous ajoutons l'étage de déplacement millimétrique comme montré sur la Figure 3-11.

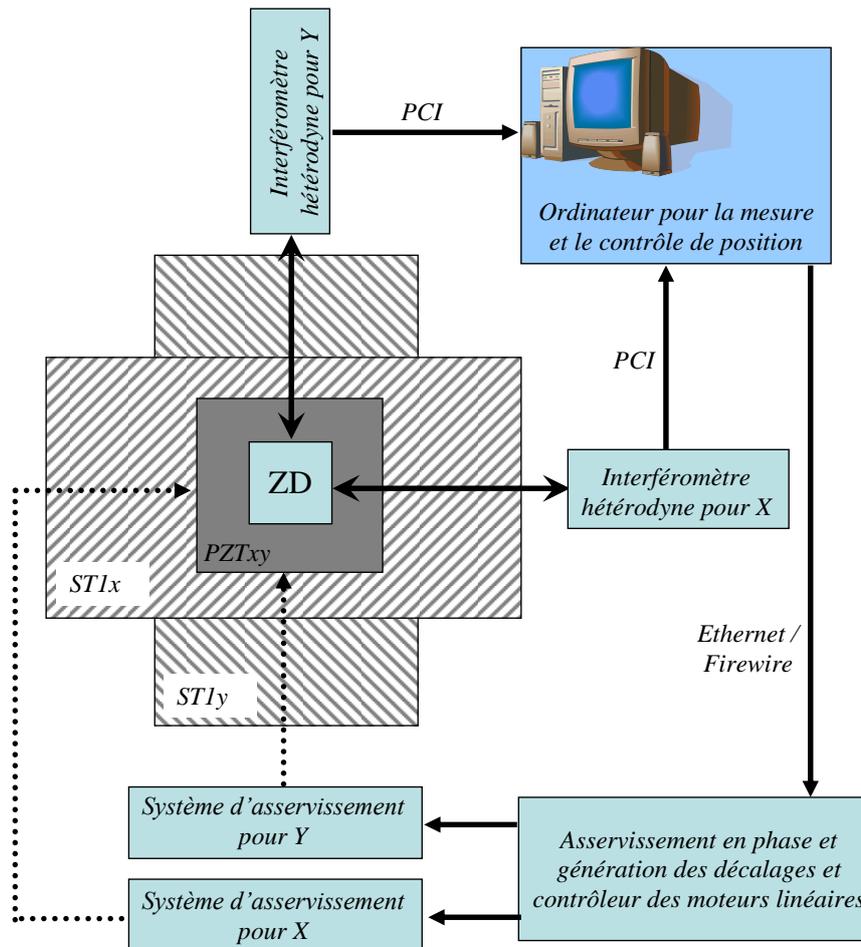


Figure 3-11 : Schéma de principe du montage expérimental 2D. ZD : cube en zérodur aux faces polies miroir ; PZTxy : actionneur piézoélectrique deux axes ; ST1x et ST1y : les platines de translation millimétrique des axes X et Y respectivement [Wakim2008]

3.5.1. Procédure d'alignement des axes

Avant de procéder aux mesures expérimentales, nous montrons les contraintes mécaniques liées au fonctionnement du système double-étage. Un tel système [Figure 3-12] est constitué des deux étages de déplacement, un étage millimétrique et un étage nanométrique, ainsi que du cube à faces miroirs servant de miroirs mobiles pour les bras de mesure des interféromètres X et Y. Nous avons empilé ces étages les uns sur les autres. Ces étages nécessitent que leurs axes soient colinéaires chacun à son homologue. Cela nous contraint à augmenter les degrés de liberté du système de déplacement en lui incorporant des étages d'alignement des axes. Ces étages sont insérés entre l'étage de déplacement longue course et celui de déplacement nanométrique. Ces axes doivent être alignés avant toute mesure à effectuer. Ceci est primordial notamment car le système devra effectuer des déplacements sur une étendue millimétrique, ce qui amplifierait toute erreur minime. Nous

présentons donc dans cette partie la procédure d'alignement des axes du système, et montrons les erreurs qui résulteront en cas d'occurrence d'un désalignement.

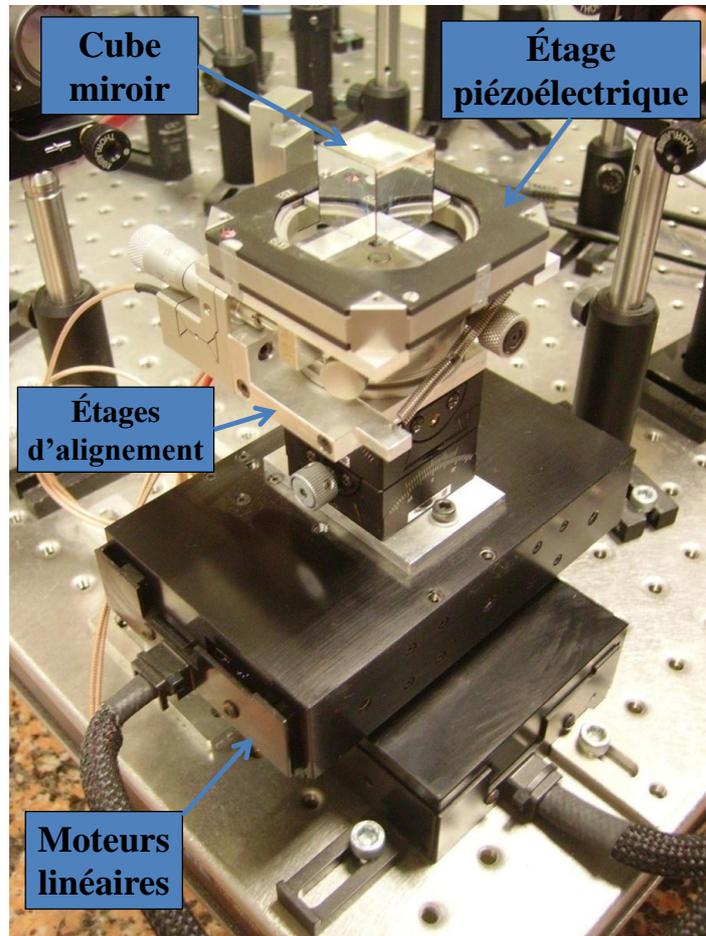


Figure 3-12 : Photo du système de déplacement double-étage

La Figure 3-13 présente la conception du système de déplacement XY. Elle montre une vue 3D des étages du système tout en montrant ses différents axes. Nous désignons par (X_m et Y_m) les axes de l'étage de déplacement longue-course selon les directions X et Y respectivement. De la même façon, (X_p et Y_p) sont les axes de l'étage piézoélectrique, et (X_o et Y_o) les axes optiques des faisceaux lasers des bras de mesure des interféromètres.

Notons « α » l'angle entre les axes des référentiels (X_m et Y_m) et (X_o et Y_o), et « β » l'angle entre les axes des référentiels (X_o et Y_o) et (X_p et Y_p). Nous supposons ici que les axes X et Y de chaque étage sont parfaitement orthogonaux. En effet, l'orthogonalité entre la platine longue-course se déplaçant selon X et celle se déplaçant selon Y a été corrigée avec très grande exactitude au moment de l'assemblage. De même pour les axes « X_p » et « Y_p » qui ont été assemblés orthogonalement au moment de la conception de l'étage de déplacement

piézoélectrique monolithique. Quant aux axes optiques, les interféromètres X et Y suivent l'orthogonalité des faces du cube miroir. Nous souhaitons avoir $\alpha = \beta = 0$.

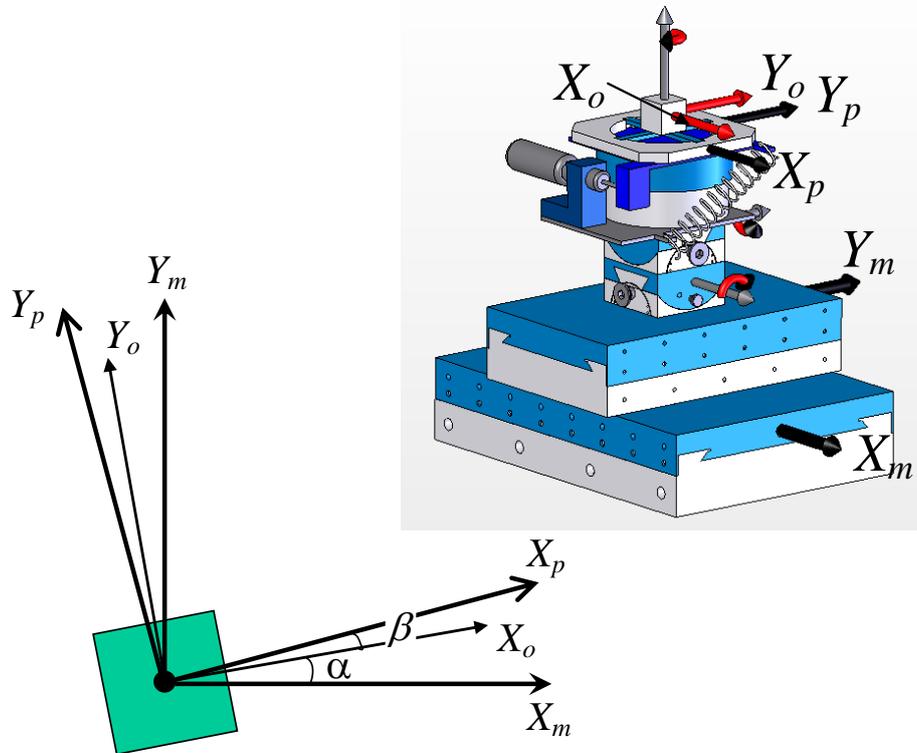


Figure 3-13 : Vue 3D du système et définition des axes de déplacement [Wakim2008]

Dans le cas réel, une erreur de positionnement selon l'axe i résulte d'un désalignement. On note « θ » l'angle entre l'axe optique et l'axe mécanique de déplacement (axe moteur ou axe piézoélectrique α ou β selon les cas). « L_i » est le déplacement effectué selon l'axe i (dans notre cas X_p , Y_p , X_m ou Y_m) et « L_o » le déplacement mesuré par l'interféromètre [Figure 3-14].

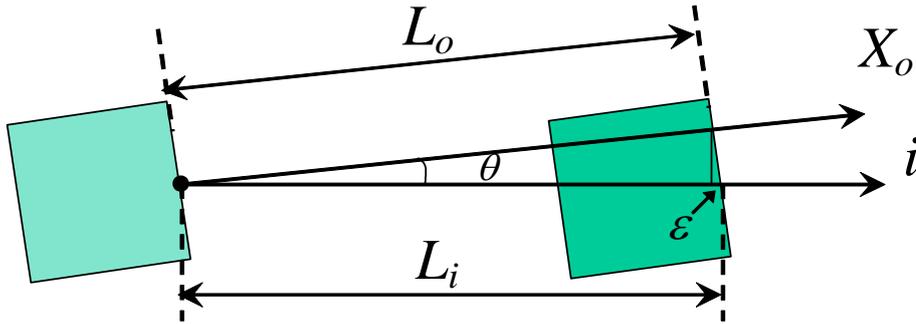


Figure 3-14 : Erreur d'alignement du cube miroir dans le cas où la mesure est dans la même direction du déplacement

L'erreur entre le déplacement réel et le déplacement mesuré est donné par $\varepsilon_i = L_i - L_o$. En considérant $\cos \theta = \frac{L_o}{L_i}$, on obtient $\varepsilon_i = L_i(1 - \cos \theta)$ ce qui donne au final :

$$\varepsilon_i = L_i \left(1 - \left(1 - \frac{\theta^2}{2} \right) \right) = L_i \times \frac{\theta^2}{2} \quad (3.9)$$

Cette erreur est négligeable pour un déplacement millimétrique et un angle inférieur à 1 mrad :

$$\varepsilon_i = (10^{-3}) \times \frac{(10^{-3})^2}{2} \approx 10^{-9} \text{ mm soit } 1 \text{ pm} \quad (3.10)$$

Or assurer un alignement meilleur que le milliradian lors du réglage de l'interféromètre double passage est tout à fait raisonnable.

Une autre source d'erreur existe quand le système se déplace suivant « X_m » ou « X_p » (axe « i ») par exemple si « Y_o » n'est pas parfaitement orthogonal [Figure 3-15]. Le système de mesure interprète le désalignement comme un déplacement sur « Y_m » ou « Y_p » (axe « j »).

Cette erreur tangentielle est donnée par :

$$\varepsilon_j = L_i \times \sin \theta \text{ soit } \varepsilon_j = L_i \times \theta \quad (3.11)$$

où « L_i » est le déplacement suivant « i », « ε_j » est l'erreur sur l'axe « j » perpendiculaire à « i » et « θ » est l'angle de désalignement.

Respectivement pour l'axe « j », on peut calculer une erreur « ε_i ».

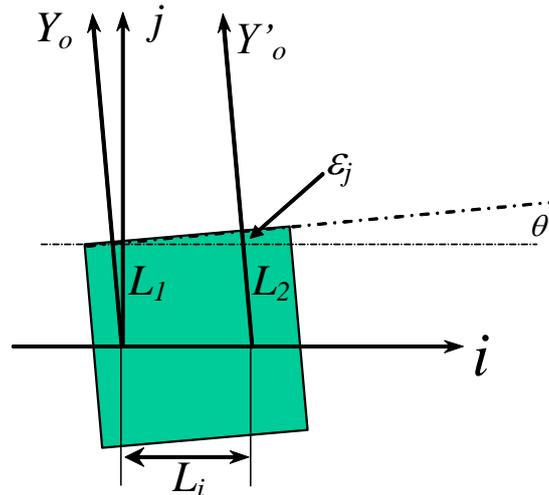


Figure 3-15 : Erreur d'alignement du cube miroir dans le cas où la mesure est perpendiculaire au déplacement

Si on effectue des applications numériques, on trouve que le désalignement entre (X_p, Y_p) et (X_o, Y_o) (angle β) est négligeable car la course de l'actionneur piézoélectrique est faible, tandis que l'alignement entre (X_m, Y_m) et (X_o, Y_o) (angle α) est très critique; il faut impérativement le minimiser.

Pour cela nous avons développé une platine rotative contrôlée par un actionneur piézoélectrique linéaire et de résolution inférieure à 100 nrad [Wakim2008]. La résolution de cette platine mène à une résolution sur « ε » inférieure à 0,5 nm pour une course de $L = 5$ mm. Cette platine nous permet de régler l'alignement par réglages itératifs.

La Figure 3-16 illustre un exemple de réglage de l'alignement des axes lors du déplacement de la platine de translation millimétrique X sur 5 mm, tout en mesurant le déplacement selon les directions X_0 et Y_0 . 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 de la platine persistent. Ces défauts peuvent être compensés en temps réel par l'asservissement sur l'actionneur piézoélectrique, et donc l'action des deux étages simultanément [courbe *c*].

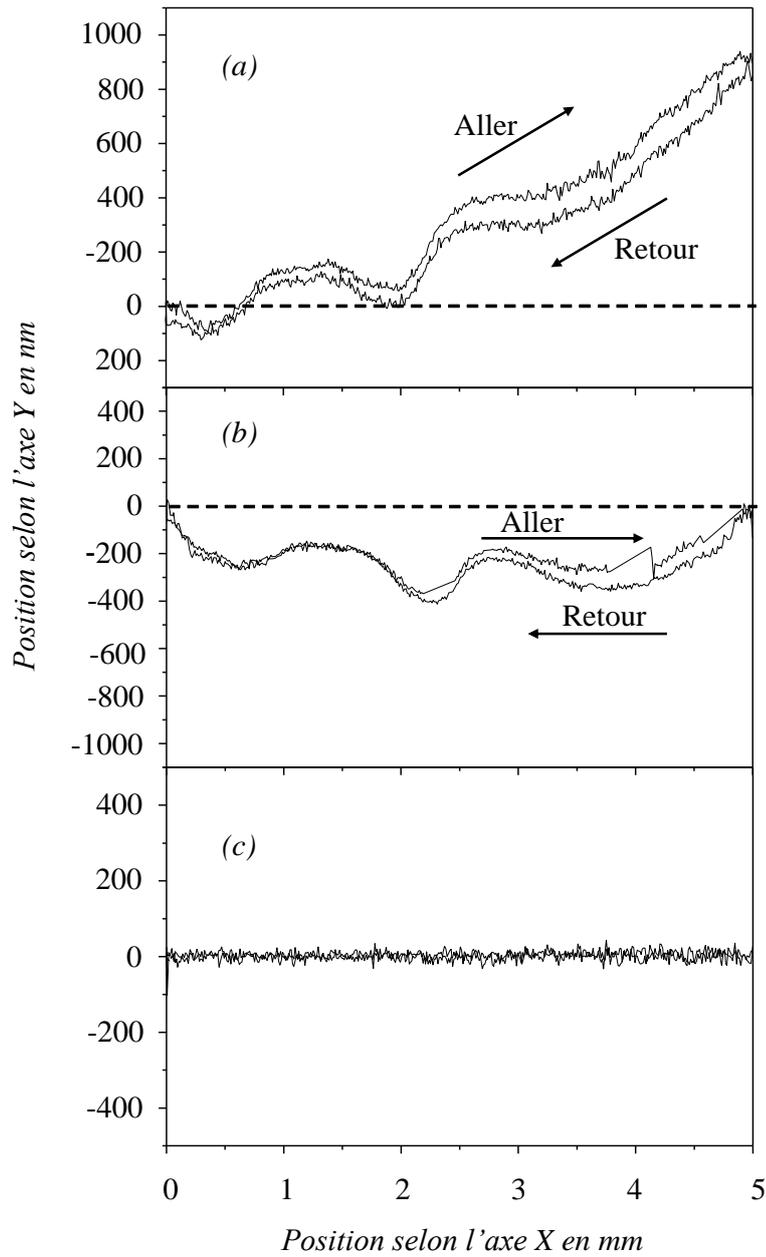


Figure 3-16 : Alignement des axes optiques et des axes de mesure interférométriques. Les lignes pointillées correspondent au chemin idéal [Chassagne2007]

3.5.2. Contrôle de la plateforme double-étage par logique floue

a. Besoin d'une loi de commande

Le besoin d'une loi de commande vient du fait que la technique des sauts de phase permet d'effectuer des pas de déplacements mais ne permet pas d'effectuer des mouvements tels que les trajectoires de X et de Y soient des fonctions.

La courbe de la Figure 3-17 montre une trajectoire en Lissajous de rapport de fréquences de 3/4. Cette courbe a été effectuée à l'aide de l'actionneur piézoélectrique contrôlé avec un contrôleur flou, les moteurs linéaires longue-course étant inhibés. Le contrôleur flou est utile ici du fait de la difficulté de modéliser l'étage piézoélectrique et sa boucle d'asservissement en phase qui lui est associée. Le contrôleur flou vient contrôler et répartir les commandes selon les axes X et Y de façon à suivre la trajectoire désirée. Cette courbe montre la capacité de plateforme à suivre une trajectoire quelconque.

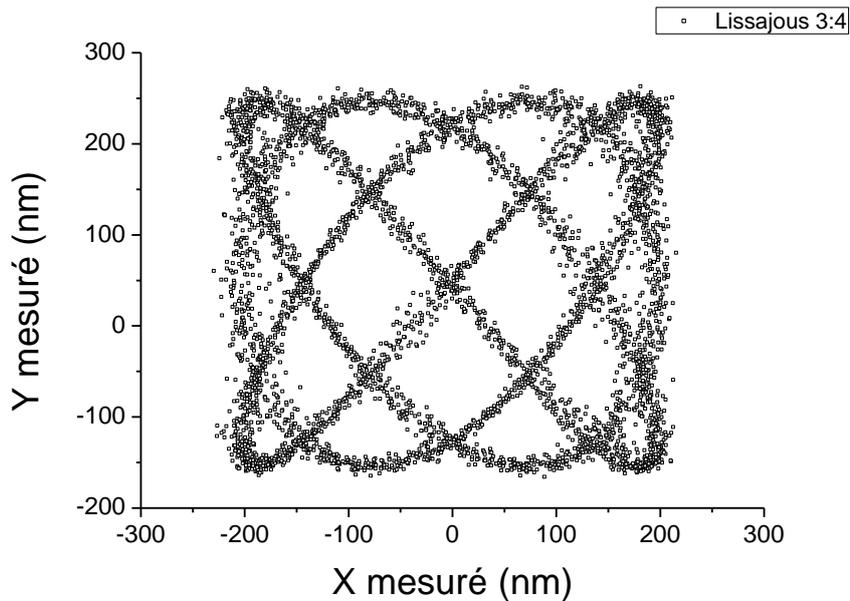


Figure 3-17 : Trajectoire en Lissajous de rapport de fréquences de 3/4 effectuée avec l'étage piézoélectrique uniquement sur une étendue de déplacement de 400 nm x 400 nm

Pour chaque axe du déplacement, le contrôleur flou reçoit en entrée la position mesurée par l'interféromètre Zygo, et qu'il compare à la consigne désirée afin de générer la bonne commande. Une commande consiste en un décalage de phase approprié.

Une autre raison du besoin d'une loi de commande est le besoin de coordonner les déplacements des deux étages simultanément.

b. Résultats expérimentaux du contrôle simultané des deux étages

Dans cette partie, nous exposons les résultats expérimentaux de déplacement et de collaboration des deux étages de la plateforme de nanositionnement dans le but de réaliser des suivis de trajectoires étendues. Nous ne cherchons pas à réaliser ces suivis de trajectoire le plus rapidement possible. Nous désirons, par contre, que notre trajectoire puisse être suivie avec une répétabilité nanométrique. Nous visons des applications telles que la microscopie à force atomique et la microscopie optique en champ proche. En effet, il s'avère parfois important en microscopie en champ proche de sélectionner une zone à balayer comme par exemple un guide d'onde de forme ondulatoire, triangulaire ou autre, s'étendant le long d'une puce de taille millimétrique. Balayer ce guide uniquement permet de gagner en temps. Cela permet aussi de s'affranchir d'un probable désalignement entre l'axe de balayage et l'axe principal du guide.

Afin de démontrer les performances de la plateforme de nanositionnement en termes de déplacements 2D vectoriels de grande étendue, nous avons ordonné à la plateforme le suivi d'une trajectoire circulaire de diamètre 10 μm . Le diamètre de 10 μm dépasse largement l'étendue de déplacement de l'actionneur piézoélectrique. Les deux étages de la plateforme de nanositionnement se déplacent simultanément pour le suivi de cette trajectoire. Cette trajectoire circulaire a été suivie 3 fois. La superposition des 3 cercles, mesurée à l'aide de l'interféromètre hétérodyne double passage Zygo, est montrée sur la Figure 3-18.

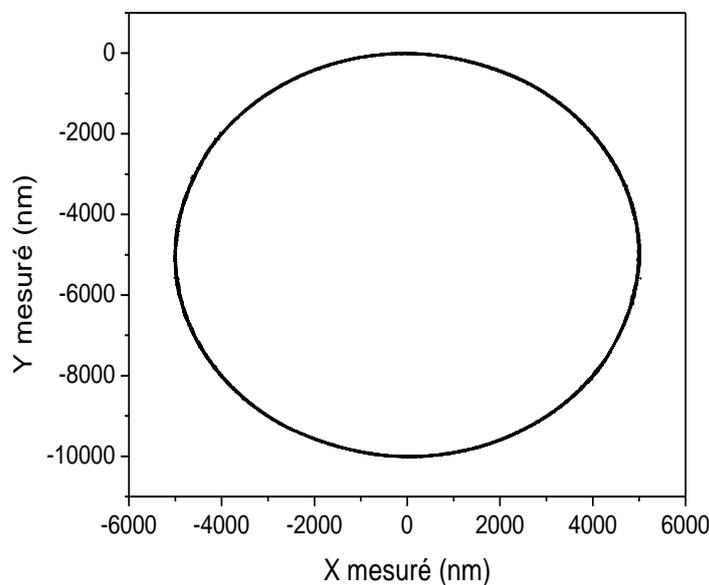


Figure 3-18 : Trajectoire circulaire répétée trois fois effectuée à l'aide de la plateforme de nanositionnement double-étage. Le cercle a un diamètre de 10 μm

Pour la réalisation de ces cercles, les étages, longue-course et piézoélectrique, de la plateforme de nanopositionnement ont suivi une trajectoire sinusoïdale selon l'axe X et une trajectoire en cosinus selon l'axe Y avec une vitesse de balayage de 20 $\mu\text{m/s}$ environ. Le contrôleur flou est composé de 6 sous-ensembles pour chaque règle de commande, et comprend deux entrées et trois sorties pour chaque axe du déplacement. La première entrée correspond à la position désirée. Cette position consigne est comparée à la position mesurée vue par l'interféromètre et correspondant à la position du cube miroir. La deuxième entrée impose à l'actionneur piézoélectrique de garder la position relative, x_r , inférieure à une certaine valeur désirée. Les sorties sont les commandes envoyées à l'étage des platines linéaires et à l'étage piézoélectrique. Les platines linéaires sont commandées en distance et en vitesse, alors que l'étage piézoélectrique est commandé en décalages de phase.

Afin de montrer les performances de déplacement de la plateforme de nanopositionnement, nous avons effectué un agrandissement autour d'un arc de cercle à la position (0 ; 0) [Figure 3-19a]. Nous remarquons dans les mesures un bruit égal au niveau du bruit mécanique extérieur d'amplitude égale à 20 nm environ. Un seul cercle est ensuite extrait [Figure 1-19b] montrant le même niveau de bruit.

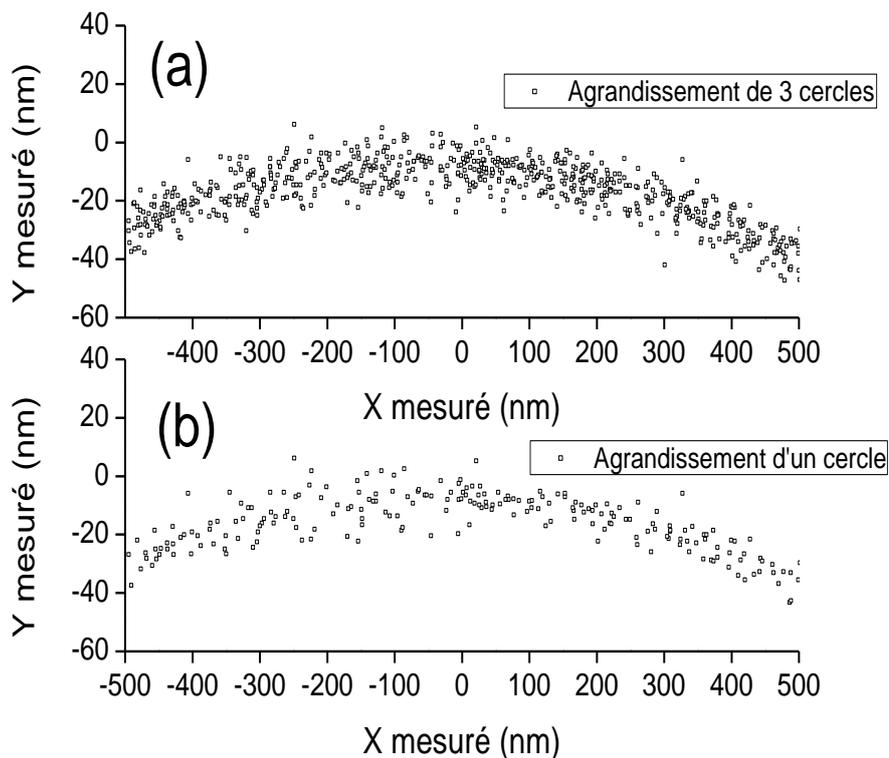


Figure 3-19 : Agrandissement dans la zone des sommets des trois cercles (a), et extraction d'un seul cercle (b)

C'est donc le contrôleur flou qui répartit les tâches de position et de vitesse entre les actionneurs de chacun des étages de la plateforme double-étage. La Figure 3-20a montre un agrandissement de la sinusoïde que suivent les actionneurs de l'axe X de la plateforme. La figure montre la pente ascendante de la sinusoïde pour les trajectoires de référence et de mesure. Nous remarquons que les deux courbes sont légèrement différentes. Cette différence est due à l'erreur de traînage. Afin de montrer cette erreur, nous avons soustrait la courbe mesurée de la courbe de référence. La Figure 3-20b montre que cette erreur est plus accrue lorsque la pente est grande.

Les mêmes résultats sont montrés sur la Figure 3-21 mais pour l'axe Y. L'erreur de traînage est plus grande pour l'axe X que pour l'axe Y ; elle varie en fonction de la pente des trajectoires suivies selon ces axes. Les signaux de commande en X et en Y étant en quadrature de phase, on retrouve une pente plus forte selon un axe à un instant donné.

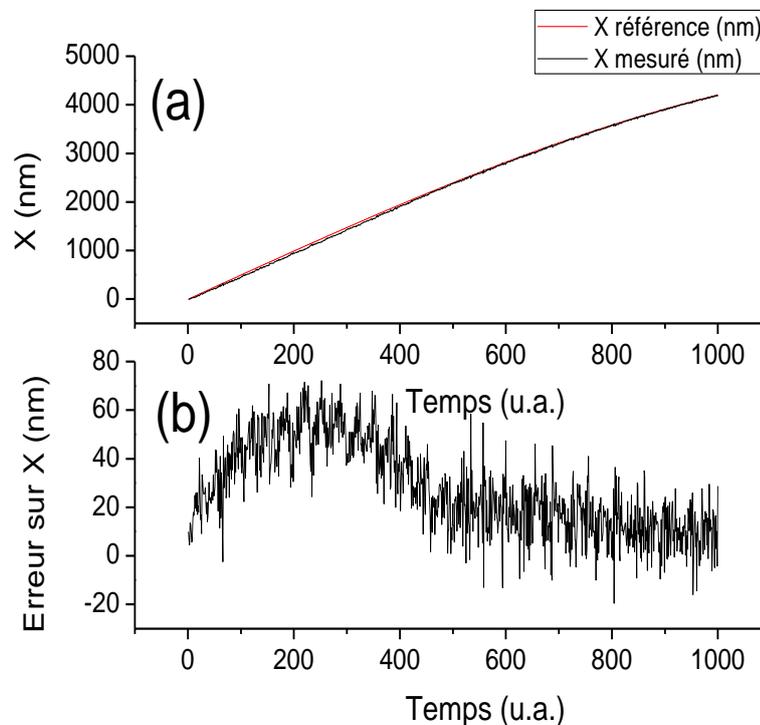


Figure 3-20 : (a) Signal de référence et signal mesuré des deux étages se déplaçant simultanément selon l'axe X pour suivre une sinusoïde. (b) l'erreur de traînage selon l'axe X. L'erreur est grande lorsque la pente est grande au début, et décroît avec l'atténuation de la pente au sommet de la sinusoïde

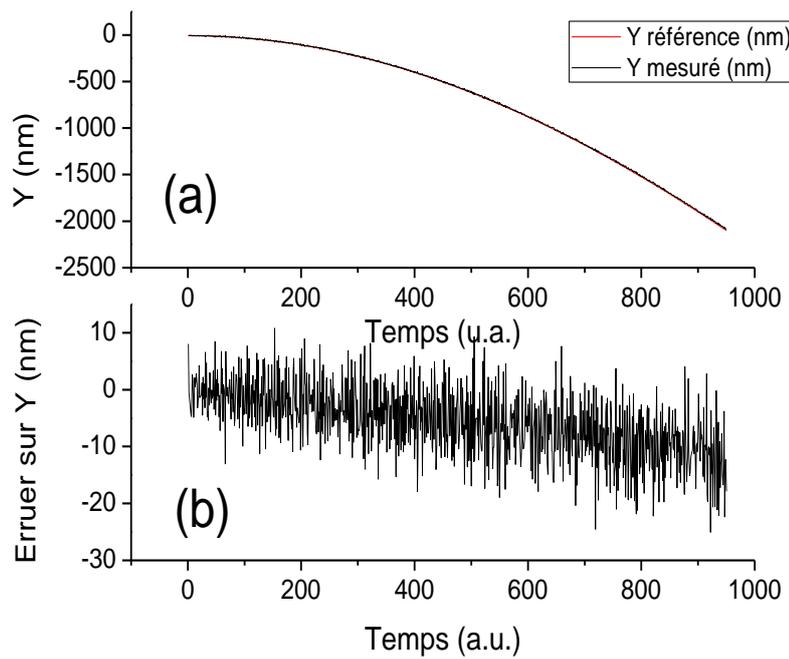


Figure 3-21 : (a) Signal de référence et signal mesuré des deux étages se déplaçant simultanément selon l'axe Y pour suivre une trajectoire en cosinus. (b) L'erreur de traînage selon l'axe Y. L'erreur s'accroît dans le sens négatif parce que les deux étages essaient de rattraper une pente croissante négative

3.6. Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre différentes méthodologies de contrôle d'un système double-étage. Il existe les méthodologies de contrôle classiques et les méthodologies de contrôle modernes. Nous avons utilisé pour le contrôle des deux étages de notre plateforme de nanositionnement un contrôleur flou. La logique floue a l'avantage de se passer du modèle des actionneurs. Cependant, l'étage piézoélectrique est contrôlé en comparant la phase du signal hétérodyne mesuré en sortie de l'interféromètre au signal de référence. Cet asservissement en phase permet des déplacements ayant une résolution et une répétabilité sub-nanométriques et de grande vitesse. Le contrôleur flou vient contrôler l'amplitude des décalages de phase pour permettre à l'étage piézoélectrique de suivre une fonction horaire. Le contrôleur flou contrôle aussi la répartition des commandes entre les deux étages grossier et fin.

Différentes trajectoires ont été suivies. Cela montre les performances de la plateforme en termes de nanositionnement sur une dynamique étendue. Ces performances peuvent être exploitées dans différentes applications telles que la nanomanipulation, la lithographie et la microscopie en champ proche. Le contrôleur flou a montré les performances attendues et la bonne coopération entre les deux étages.

Le chapitre suivant montre la plateforme double-étage adaptée pour effectuer des mesures sous un microscope à force atomique et un microscope optique en champ proche. Les résultats d'une telle intégration sont présentés et montrent les atouts apportés à la microscopie en champ proche tout en décrivant les contraintes rencontrées.

3.7. Bibliographie du 3ème chapitre

- [Bhushan2006] : Bhushan B., *Springer Handbook of Nanotechnology*, 2e edition, 2006.
- [Chassagne2005] : L. Chassagne, S. Topcu, Y. Alayli, P. Juncar, *Highly accurate positioning control method for piezoelectric actuators based on phase-shifting optoelectronics*, *Meas. Sci. Technol.* 16 No 9 (September 2005) 1771-1777.
- [Chassagne2007] : L. Chassagne, M. Wakim, S. Xu, S. Topçu, P. Ruaux, P. Juncar, Y. Alayli, *2D nano-positioning system with a sub-nanometric repeatability over millimetre displacement range*, *Measurement Science and Technology* 18 (2007) 3267-3272.
- [DPMI2002] : DPMI Accessory *Operating Manuel OMP-0223E*, Zygo (2002).
- [Edlén1966] : B. Edlén, *The refractive index of air*, *Metrologia* 2 71-80 (1966).
- [Haddad2004] : D. Haddad, *Mesure et contrôle de position et de vitesse à l'échelle nanométrique : application à la balance du watt*, Université de Versailles 2004
- [Hu1999] : X. Hu, W. Guo, T. Huang, B. M. Chen: *Discrete time LQG/LTR dual-stage controller design and implementation for high track density HDDs*, *Proc. Of American Automatic Control Conference (IEEE, Piscataway 1999)* pp. 4111–4115
- [Huang2004] : X. Huang, R. Nagamune, R. Horowitz, Y. Li: *Design and analysis of a dual-stage disk drive servo system using an instrumented suspension*, *Proc. Am. Control Conf. (IEEE, Piscataway 2004)* pp. 535–540
- [Lee2000] : S.-H. Lee, S.-E. Baek, Y.-H. Kim: *Design of a dual stage actuator control system with discrete-time sliding mode for hard disk drives*, *Proc. of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (IEEE, Piscataway 2000)* pp. 3120–3125
- [Li2001] : Y. Li, R. Horowitz: *Mechatronics of electrostatic microactuator for computer disk drive dual-stage servo systems*, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 6, 111–121 (2001)
- [Mori1991] : K. Mori, T. Munemoto, H. Otsuki, Y. Yamaguchi, K. Akagi: *A dual-stage magnetic disk drive actuator using a piezoelectric device for a high track density*, *IEEE Trans. Magn.* 27, 5298–5300 (1991)
- [Sasaki1998] : M. Sasaki, T. Suzuki, E. Ida, F. Fujisawa, M. Kobayashi, H. Hirai: *Track-following control of a dual-stage hard disk drive using a neuro-control system*, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 11, 707–716 (1998)
- [Schroeck2001] : S. J. Schroeck, W. C. Messner, R. J. McNab: *On compensator design for linear time-invariant dual input single-output systems*, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 6, 50–57 (2001)
- [Semba1999] : T. Semba, T. Hirano, L.-S. Fan: *Dual-stage servo controller for HDD using MEMS actuator*, *IEEE Trans. Magn.* 35, 2271–2273 (1999)

[Suh2002] : S.-M. Suh, C. C. Chung, S.-H. Lee: *Design and analysis of dual-stage servo system for high track density HDDs*, *Microsyst. Technol.* 8, 161–168 (2002)

[Suzuki1997] : T. Suzuki, T. Usui, M. Sasaki, F. Fujisawa, T. Yoshida, H. Hirai: *Comparison of robust track-following control systems for a dual stage hard disk drive*, *Proc. of International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment*, ed. by B. Bhushan, K. Ohno (Word Scientific, Singapore 1997) pp. 101–118

[Wakim2008] : M. Wakim, *Contrôle de la position et de la vitesse d'une masse à l'échelle nanométrique : application à la balance du watt du LNE*, *Thèse de l'université de Versailles Saint-Quentin* (2008)

4. CHAPITRE IV

IMAGERIE LONGUE COURSE

4.1.	Introduction	99
4.2.	Le microscope à force atomique – Éléments constitutifs	99
4.3.	Le microscope à force atomique à champ de vue étendu.....	100
4.3.1.	Schéma de principe.....	101
4.3.2.	Intégration de l'actionneur XY sous l'AFM	101
4.3.3.	La boucle d'asservissement en Z.....	103
4.3.4.	Préréglages et analyse d'une première image topographique à titre d'exemple	104
4.3.5.	Topographie d'un guide d'onde en forme de serpent	114
4.4.	Application de la plateforme à la microscopie optique en champ proche.....	117
4.4.1.	Objectifs et applications.....	117
4.4.2.	Mise en place du sSNOM longue-course à partir d'un AFM.....	117
4.4.3.	L'échantillon à échange d'ions utilisé.....	118
4.4.4.	Une détection du signal optique adaptée aux grands déplacements	119
4.4.5.	Résultats expérimentaux du s-SNOM longue-course.....	120
4.4.6.	Conclusion.....	123
4.5.	Conclusion du 4^{ème} chapitre.....	124
4.6.	Bibliographie du 4^{ème} chapitre.....	125

4.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats des mesures obtenues à l'aide de la plateforme de déplacement « longue course » décrite aux chapitres précédents. Afin de montrer ses performances, la plateforme a été intégrée à un microscope à force atomique (AFM) puis à un microscope optique en champ proche (SNOM). L'objectif étant de montrer, d'une part la capacité de la plateforme à acquérir des images topographiques et optiques hautement résolues et de grandes tailles et, d'autre part la facilité de son intégration à n'importe quel instrument, ce qui a pour effet d'augmenter ses domaines d'applications. L'étendue millimétrique sur laquelle se fait la caractérisation s'avère importante pour différentes applications.

Ce chapitre est découpé en plusieurs parties. Après une brève introduction et une première partie décrivant les éléments constitutifs d'un AFM classique, nous montrons le principe de l'intégration de la plateforme double-étage à un AFM. Ceci aboutit à l'apparition d'un AFM « longue course ». La partie suivante décrit les précautions à prendre, les pré-réglages à faire ainsi que les traitements nécessaires lors d'une mesure effectuée avec l'AFM « longue course ». Puis sont présentés les résultats expérimentaux de cette intégration. Nous montrons ensuite l'intégration de la plateforme double-étage à un SNOM. Nous abordons les microscopes optiques en champ proche et l'optique guidée au préalable et détaillons les modifications apportées à l'AFM pour en faire un SNOM à diffusion. Les résultats des mesures optiques obtenus avec ce SNOM et un principe de détection adapté aux mesures de longue étendue sont ensuite présentés.

4.2. Le microscope à force atomique – Éléments constitutifs

Les microscopes à force atomique sont des instruments conçus pour mesurer la topographie d'une surface avec une résolution spatiale nanométrique. Les AFM classiques ont été conçus pour cartographier la surface d'un échantillon plat. La tendance actuelle consiste à combiner les AFM à des instruments de mesure dimensionnelle. Les derniers AFM sont équipés de capteurs mesurant la position selon tous les degrés de liberté, ce qui conduit à une sorte de machine à mesurer tridimensionnelle donnant des informations tridimensionnelles sur l'échantillon. Les composants principaux d'un AFM sont donnés par le Tableau 4-1.

Le système de positionnement latéral est généralement constitué de deux étages : un étage de positionnement grossier et un autre pour le positionnement fin pour chaque axe de déplacement. L'étage de positionnement grossier possède une étendue de déplacement de plusieurs centimètres et est utilisé pour rapprocher la pointe du microscope de la zone d'intérêt. C'est l'étage de positionnement fin qui est utilisé pour le balayage de la surface de l'échantillon ; son étendue de déplacement est généralement de l'ordre de quelques dizaines de micromètres pour chaque axe. De même pour l'axe Z où un actionneur, typiquement un moteur pas à pas pouvant se déplacer sur une dizaine de millimètres, rapproche la pointe de la

surface de l'échantillon. Une fois proche de quelques micromètres, la pointe entre en interaction avec la surface grâce à un actionneur piézoélectrique en général.

Composant	Fonction
Sonde de mesure	Pointe fine servant à examiner la surface de l'échantillon
Capteur de position en Z	Détecte les déplacements de la sonde proportionnellement aux interactions pointe-échantillon
Actionneur Z	Garde la pointe sous des conditions constantes d'interaction pour le contrôle en boucle fermée
Actionneur X-Y	Fait balayer la pointe ou l'échantillon latéralement avec des pas équidistants ou une vitesse constante
Étage de positionnement grossier X-Y	Ramène la zone d'intérêt de l'échantillon jusqu'à la portée de l'actionneur X-Y
Étage de positionnement grossier Z	Ramène la pointe à une distance proche de l'échantillon pour permettre l'interaction pointe-échantillon

Tableau 4-1 : Composants d'un microscope à force atomique

Malgré la présence d'un actionneur X-Y pour le positionnement grossier, celui-ci n'est pas utilisé pendant l'acquisition de l'image du fait des défauts qu'il engendre pendant les déplacements, et la taille de l'image reste limitée par l'étendue de déplacement de l'actionneur fin. L'actionneur utilisé pour les déplacements dans un AFM est typiquement un actionneur piézoélectrique ayant une dynamique de déplacement de 100 μm x 100 μm . Un des défauts des microscopes AFM est la limitation de leur résolution où seuls 1024 points de mesures (pixels) sont échantillonnés par ligne de balayage. Ceci fait que l'image est mieux résolue quand la taille de l'image est petite. La résolution nanométrique n'est atteinte que lorsque la taille de l'image est inférieure au micromètre.

Pour contourner ceci, nous avons pensé à intégrer notre plateforme de positionnement à un AFM afin de permettre l'acquisition d'images topographiques étendues sur une course millimétrique et une résolution inter-pixels de l'ordre du nanomètre.

4.3. Le microscope à force atomique à champ de vue étendu

Nous avons choisi pour nos mesures topographiques un microscope à force atomique commercial [M5] dans le but de montrer la faisabilité d'intégrer la plateforme à différents types d'instruments et applications. Afin d'élargir latéralement le champ de vue du microscope et lui permettre d'effectuer des images plus étendues, nous avons procédé à certaines modifications touchant différentes parties du microscope.

4.3.1. Schéma de principe

La Figure 4-1 montre le schéma de principe du système. Cet « AFM longue course » est composé des parties suivantes :

- La plateforme de déplacement (1)
- Des interféromètres XY hétérodynes Zygo capteurs des déplacements (2)
- La carte électronique d'asservissement en phase (3)
- Les contrôleurs des platines longue-course (4)
- Le microscope à force atomique (5)
- Une carte électronique de synchronisation (6)
- Une carte d'acquisition du signal topographique (7)
- Un ordinateur centralisant la gestion et la commande (8)

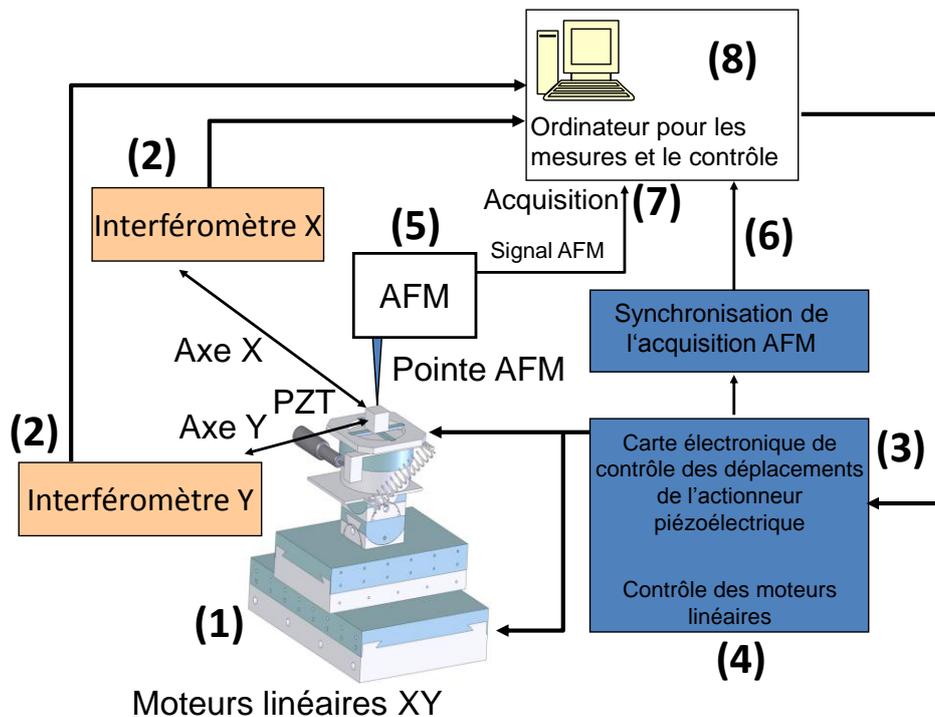


Figure 4-1 : Schéma du système complet montrant l'intégration de la plateforme de déplacement double-étage au microscope à force atomique. PZT : actionneur piézoélectrique

L'intégration de ces composants est détaillée ci-après.

4.3.2. Intégration de l'actionneur XY sous l'AFM

Le microscope à force atomique utilisé possède un actionneur piézoélectrique XYZ lui permettant de balayer un volume de $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$. Cet actionneur est fixé à la structure portant la pointe. C'est donc la pointe qui effectue les déplacements par rapport à un

échantillon fixe. L'échantillon dans ce microscope est, dans la configuration d'origine, placé sur une plaque porte-échantillon guidée par deux moteurs pas à pas permettant de positionner grossièrement la pointe latéralement en dessus de la zone d'intérêt.

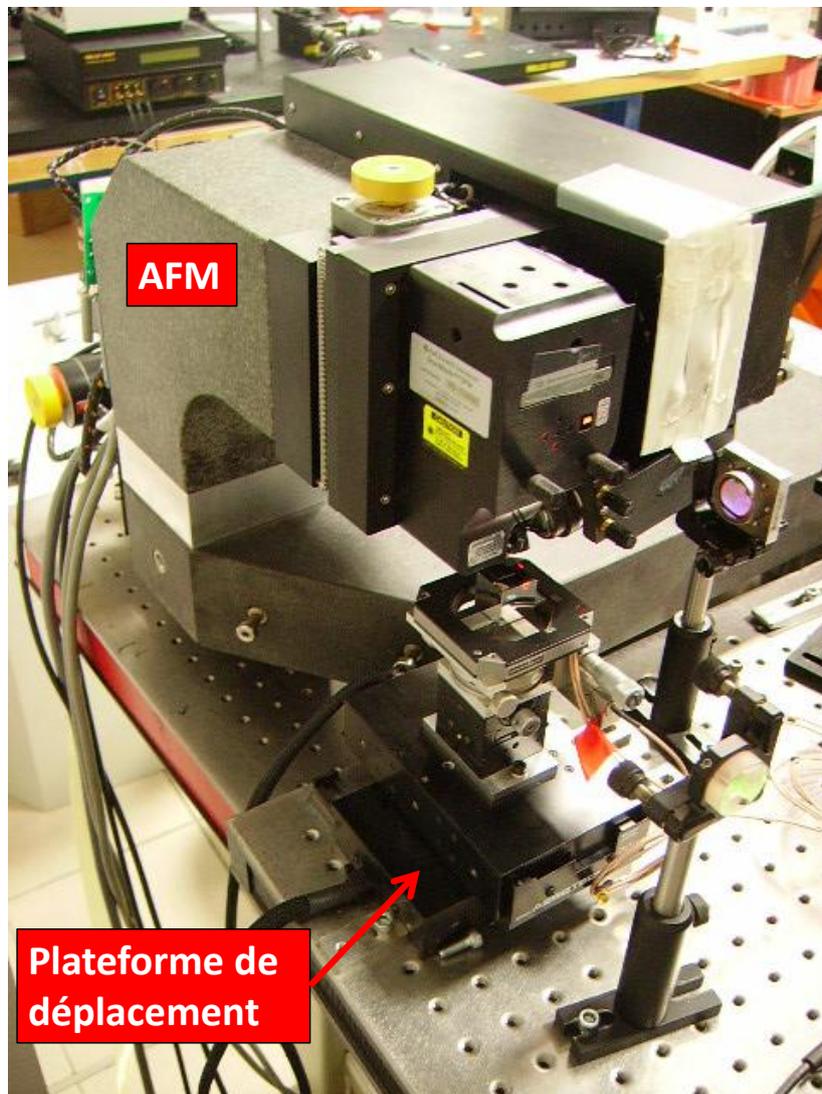


Figure 4-2 : La plateforme double-étage servant de porte-échantillon pour l'AFM. La pointe de l'AFM a été positionnée en dessus du cube miroir de la plateforme. Le cube miroir devient le porte-échantillon de l'AFM

Après une simple modification mécanique de la tête du microscope, nous avons positionné la pointe en dessus du cube miroir de notre plateforme double-étage. En plaçant la plateforme en dessous de l'AFM, nous nous en servons pour fournir les déplacements latéraux au microscope. L'actionneur piézoélectrique XY du microscope a été inhibé afin d'éliminer des conflits avec la plateforme. Le cube miroir de la plateforme double-étage porte l'échantillon sur sa face supérieure [Figure 4-2].

4.3.3. La boucle d'asservissement en Z

La plateforme de déplacement double-étage ne fournit pas de déplacement selon la direction verticale. C'est le microscope qui prend en charge les déplacements verticaux et l'asservissement en boucle fermée de la force atomique afin de cartographier la surface de l'échantillon.

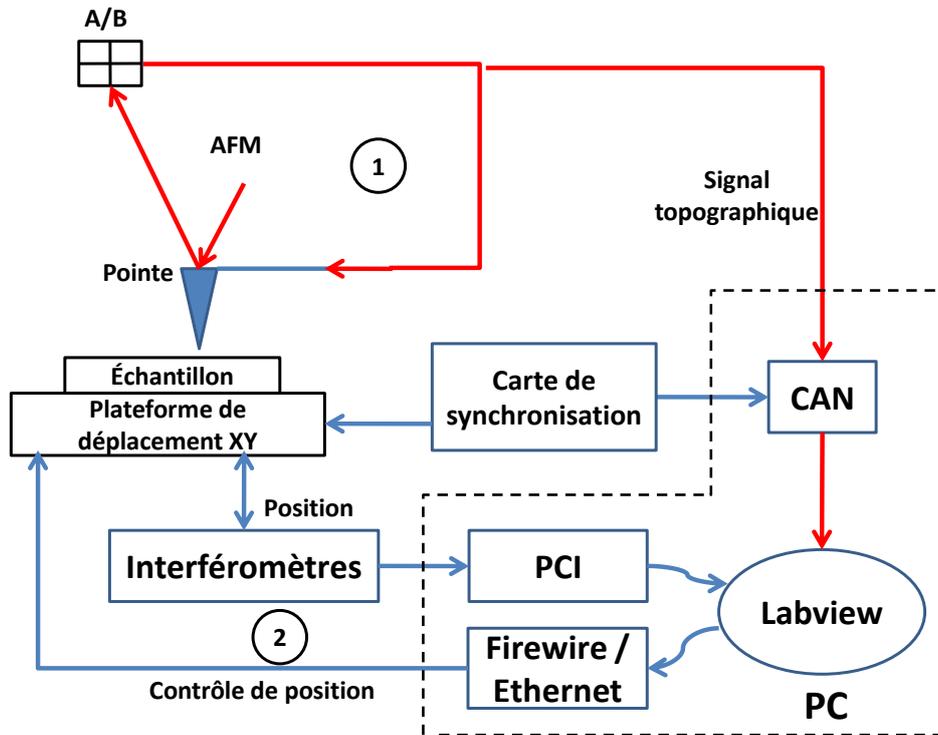


Figure 4-3 : Schéma bloc montrant les deux boucles principales d'asservissement de l'AFM « longue course ». La première est faite à l'aide du signal topographique servant à asservir la position de la pointe du microscope à distance constante de la surface de l'échantillon. La 2ème boucle est celle de la position XY de la plateforme double-étage. L'acquisition du signal topographique Z est synchronisée avec les déplacements XY. CAN : convertisseur analogique numérique 16 bits. PC : ordinateur

Cependant, la résolution de l'image est fonction du nombre de points échantillonnés pendant le balayage. Plus il y a de points échantillonnés, plus il y a de pixels sur l'image, et meilleure est la résolution. Les logiciels fournis par les constructeurs d'AFM fixent souvent le nombre de pixels quelle que soit la taille de l'image, ce qui est limitant pour la résolution. Le microscope que nous utilisons est limité à 1024 pixels x 1024 pixels indépendamment de la taille de l'image souhaitée. Ceci fait que la résolution des images est meilleure quand l'image est de petites dimensions (résolution de 1 nm environ pour course de 1 μm ; résolution de 100 nm environ pour 100 μm de course par exemple). Nous souhaitons balayer la surface de l'échantillon à l'aide de la plateforme par des lignes faisant au moins 1 mm de longueur. La

résolution de l'image serait dans ce cas de 1 μm environ. Cette résolution n'est pas suffisante pour la plupart des applications envisagées. Pour ces raisons, il a fallu remplacer le logiciel d'acquisition de l'AFM.

Une carte électronique permet la synchronisation des déplacements latéraux avec l'échantillonnage du signal topographique (signal en Z). Le signal topographique est la tension appliquée à l'actionneur piézoélectrique en Z. Une carte d'acquisition (CAN pour *convertisseur analogique numérique*) échantillonne cette tension. La carte électronique de synchronisation envoie des impulsions synchronisées avec le déplacement latéral de la plateforme. Ces impulsions servent à déclencher, par interruptions, l'acquisition de la tension en Z à l'aide de la carte CAN. De cette façon, le signal topographique est acquis de manière synchrone avec le déplacement de la plateforme [Figure 4-3].

Cet AFM longue-course a été utilisé afin d'effectuer des topographies d'échantillons de grandes dimensions. Nous montrons dans la partie suivante ces résultats et commentons les aspects métrologiques de ces mesures. Nous y discutons aussi les contraintes confrontées et leurs solutions proposées.

4.3.4. Préréglages et analyse d'une première image topographique à titre d'exemple

Avant toute mesure effectuée à l'aide d'un AFM, des réglages sont nécessaires. Nous montrons dans ce qui suit, et par un exemple de mesure topographique, les principaux réglages à effectuer ainsi que les principales précautions spécifiques nécessaires lors d'une mesure topographique de grande étendue.

Comme échantillon à cartographier, nous avons choisi un substrat de silicium sur isolant (SOI pour *Silicon On Insulator*) comportant des guides d'ondes émergeant en dessus de sa surface. Ces guides sont parallèles mais non-équidistants, et sont disposés sur un substrat faisant plusieurs millimètres carrés en surface. La largeur des guides est de 2,8 μm , et leur hauteur de 160 nm. Nous avons cartographié la surface de cet échantillon à l'aide de notre AFM longue-course. Pour cela, nous avons placé cet échantillon sur la face supérieure du cube miroir de la plateforme double-étage. L'échantillon a été collé sur le cube afin de le maintenir en sa position et éliminer la possibilité qu'il bouge suite à des perturbations (vibrations) différentielles de la plateforme par rapport à la pointe du microscope. Nous avons ensuite choisi une portion de la surface de l'échantillon pour l'étudier.

La plateforme se déplace sur une étendue millimétrique en effectuant une série de lignes parallèles ; la surface de l'échantillon est balayée par des lignes millimétriques parallèles et équidistantes. L'axe définissant ces lignes parallèles est nommé « axe de balayage rapide », alors que l'axe qui lui est perpendiculaire s'appelle « axe de balayage lent ». Ces nominations proviennent du fait que le système de déplacement latéral dépense plus de temps pour atteindre une ligne suivante que pour balayer une ligne unique. La distance interligne définit

la résolution selon l'axe lent et est fonction du saut que le système de déplacement effectue entre deux lignes.

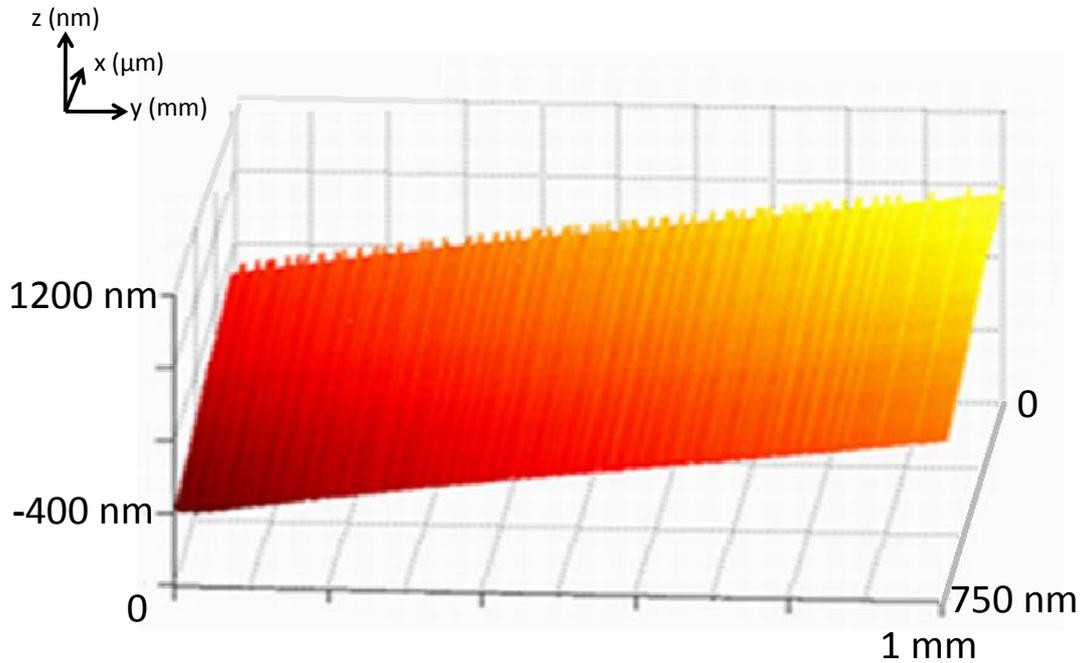


Figure 4-4 : Image AFM de 1 mm en longueur et 750 nm en largeur d'un substrat de Silicium sur isolant comprenant des guides d'ondes sur sa surface. La vitesse de balayage selon l'axe Y est de $30 \mu\text{m.s}^{-1}$ [Sinno2007]

La Figure 4-4 montre ce résultat qui est une image topographique obtenue à l'aide de l'AFM longue-course. Les dimensions de cette image sont de 1 mm selon l'axe rapide (axe Y) et 750 nm selon l'axe lent (axe X) avec une résolution de 25 nm selon l'axe X et 20 nm selon l'axe Y. Un total de 29 lignes parallèles ont donc été acquises. Le parallélisme des lignes est asservi par le contrôle en position par sauts de phase de l'actionneur piézoélectrique selon l'axe lent. La vitesse de balayage selon l'axe rapide est de $30 \mu\text{m/s}$. La Figure 4-4 est l'image topographique brute obtenue sous MATLAB. Cette image présente une pente selon les axes rapide et lent. Cette pente est représentée sur la figure par un gradient de couleurs, et est due à différents facteurs pour chaque axe.

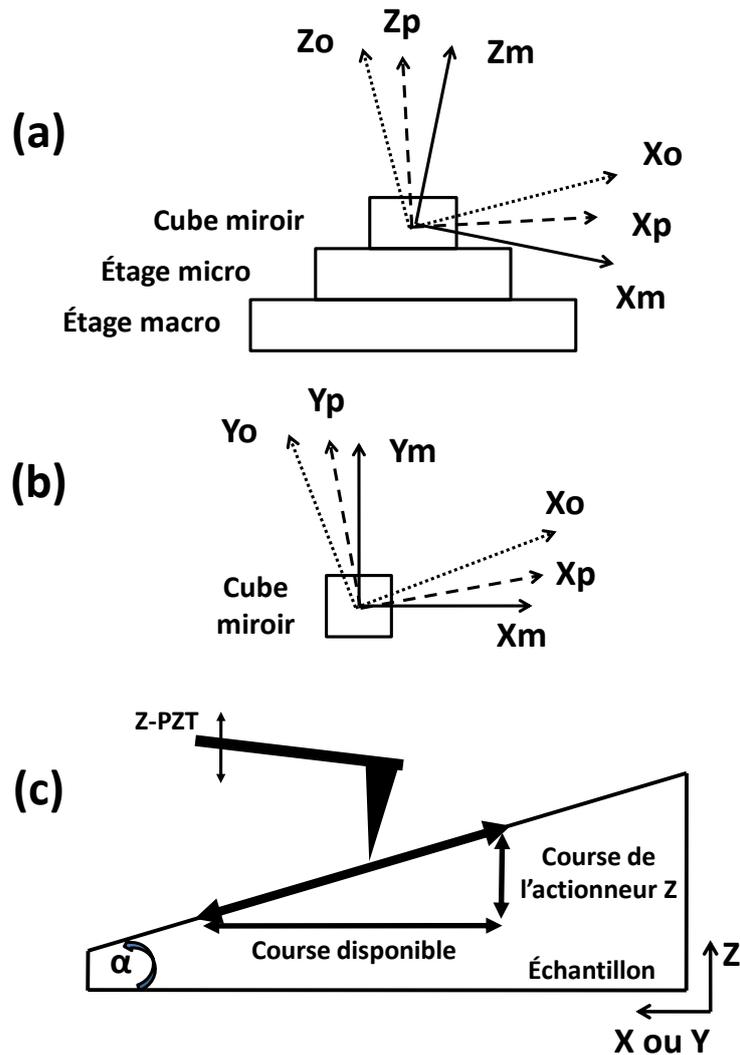


Figure 4-5 : (a) : Figure désignant la plateforme double-étage et ses axes vus de côté. Les étages macro et micro désignent l'étage des moteurs linéaires et l'étage de l'actionneur piézoélectrique de la plateforme double-étage respectivement. (b) : figure désignant les axes de la plateforme double-étage vus de dessus. (c) : figure montrant l'effet d'un désalignement « α » entre la surface de l'échantillon et le plan de travail de la plateforme double étage sur l'étendue d'une mesure

Les mesures ont été effectuées dans une salle contrôlée en température. Cependant, l'image a nécessité 30 minutes environ pour être effectuée. Cette durée est importante pour une image AFM. En effet, les microscopes à force atomique sont très sensibles aux variations des conditions de l'environnement, et en particulier aux perturbations thermiques. De plus, l'AFM longue-course que nous utilisons est constitué de l'association de deux entités indépendantes, la plateforme de déplacement et l'AFM, chacune constituée de différents types de matériaux. Cette configuration nécessite une très grande attention et une stabilisation thermique locale des différents éléments constituant l'instrument de façon à respecter le

principe de la chaîne de mesure. L'influence des dérives thermiques apparaît par la composante de la pente selon l'axe lent de l'image de la Figure 4-4. Cette pente est essentiellement due aux dérives thermiques qui sont dominantes selon l'axe lent, mais aussi à un désalignement du plan de déplacement de la plateforme par rapport à la surface de l'échantillon.

Contrairement à l'axe lent, la composante de la pente selon l'axe rapide est essentiellement due au désalignement du plan de travail de la plateforme par rapport à la surface de l'échantillon ; les dérives thermiques n'ont pas d'effet significatif selon cet axe puisqu'une ligne est balayée en 25 secondes environ.

Notons ici que la plateforme n'est pas dotée de capteur d'inclinaison. Les étages de réglage d'inclinaison (angles de tangage, lacet et roulis) dont est équipée la plateforme sont originellement utilisés afin d'aligner les axes de la plateforme ((X_m, Y_m) , (X_p, Y_p) et (X_o, Y_o)) chacun à son correspondant [Figure 4-5b], et surtout afin d'aligner les axes de déplacement de la plateforme ((X_m, Y_m) et (X_p, Y_p)) par rapport aux axes optiques (X_o, Y_o) des interféromètres de mesure de déplacement. Nous nous sommes servis de ces mêmes étages de réglage d'inclinaison afin d'effectuer un compromis entre l'alignement des axes d'une part, et l'alignement des axes de déplacement de la plateforme par rapport à la surface de l'échantillon d'autre part [Figure 4-5c]. Si l'on représente chaque plan par sa normale, il faut rendre colinéaires les axes Z_m, Z_p et Z_o [Figure 4-5a] afin d'éliminer ce désalignement. Un tel désalignement conduit le plus souvent donc, sur l'image topographique, à une pente selon les deux directions du déplacement latéral. C'est pour cette raison qu'il est difficile de quantifier et de séparer la participation des dérives thermiques et du désalignement des plans à la formation de la pente de la Figure 4-4.

Ce désalignement entre le plan de déplacement de la plateforme et la surface de l'échantillon nécessite une très grande attention dans le cas d'un AFM longue-course. En effet, tout désalignement α [Figure 4-5c] devra être compensé à l'aide de la pointe du microscope qui devra suivre dans un tel cas la surface inclinée. Au bout d'un déplacement latéral à l'échelle du millimètre, la pointe, limitée en course, ne pourra plus compenser cette erreur et sera endommagée ou hors d'atteinte de l'échantillon. À titre d'exemple, un désalignement $\alpha = 0,53$ degré induira une erreur résiduelle de $9 \mu\text{m}$ (course maximale de l'actionneur piézométrique de l'AFM) verticalement au bout d'un déplacement de la plateforme double-étage sur une course de 1 mm.

L'alignement des axes est donc très important avant toute mesure effectuée avec l'AFM longue course. En outre, des dérives des paramètres environnementaux, surtout thermiques, ont lieu pendant la mesure et nécessitent certaines précautions.

Effets thermiques

Il est important d'examiner le comportement d'un AFM vis-à-vis de la température afin de déterminer les besoins pour stabiliser la température, et le temps nécessaire au système AFM-porte échantillon pour atteindre la température d'équilibre [Zhao1998] [Dziomba2005]. Une méthode pratique pour étudier le comportement face à des dérives thermiques est de mesurer directement les dérives latérales et verticales en enregistrant l'image d'un échantillon. Les dérives thermiques selon l'axe lent peuvent être identifiées en mesurant un échantillon comportant des motifs droits (lignes, rainures ou bords droits) placés perpendiculairement à l'axe de balayage rapide. Une dérive thermique latérale se présenterait par des motifs non-droits. La difficulté de cette méthode réside dans la difficulté de placer les motifs exactement perpendiculaires à l'axe rapide. Elle reste aussi limitée à des échantillons avec des motifs droits.

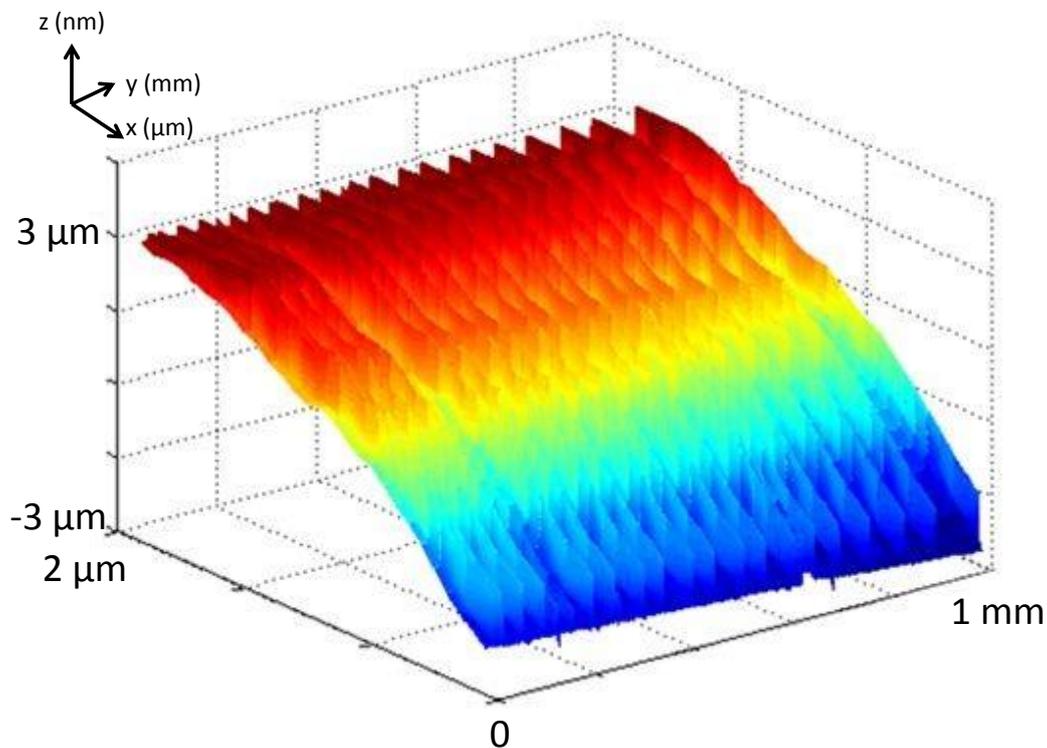


Figure 4-6 : Image topographique de 1 mm x 2 μm et résolue à 20 nm x 50 nm selon les axes rapide et lent respectivement effectuée à l'aide de l'AFM « longue course ». La mesure montre une dérive due au réchauffement des instruments au démarrage

Les dérives « initiales », telles que celles dues au réchauffement des instruments au démarrage, apparaissent sous la forme d'une courbure des motifs ; les motifs redeviennent droits une fois que les dérives diminuent. Un exemple est montré sur la Figure 4-6 qui montre

une mesure topographique effectuée à l'aide de l'AFM « longue course » dans une salle réglée en température. Les dérives thermiques étaient fortes du fait du réchauffement des instruments. Les dimensions de l'image sont de 1 mm selon l'axe rapide et de 2 μm selon l'axe lent. Elle a été effectuée avec des résolutions de 20 nm x 50 nm respectivement. La figure montre une dérive forte selon l'axe lent. Au bout de 30 minutes, l'actionneur Z de l'AFM a atteint sa limite de déplacement, ce qui nous a contraints à arrêter la mesure.

Une chambre acoustique comprenant un matériau isolant réduirait énormément les bruits et les dérives. L'inconvénient de cette technique est que cette chambre agit comme un isolateur thermique interdisant la diffusion vers l'extérieur de toute source de chaleur. Dans ce cas, les sources de chaleur et les constantes de temps des changements de température doivent être déterminées afin de prendre des mesures correctives opposées. Ces paramètres doivent être surtout déterminés pour connaître le temps nécessaire pour stabiliser la température une fois la chambre ouverte/fermée.

Identification du bruit dans les mesures

Une méthode pratique pour examiner la quantité du bruit est la méthode de mesure à l'arrêt. La pointe, mesurant un échantillon plat et stable, est asservie dans la direction verticale ; les actionneurs latéraux étant inhibés. Le signal topographique est échantillonné ; le temps faisant foi d'échelle pour les axes X et Y. Une image topographique tridimensionnelle résolue temporellement dans le plan horizontal est ainsi obtenue. Cette échelle temporelle peut être corrélée à une échelle spatiale en prenant en compte la vitesse de balayage. Cette image topographique du bruit peut être retranchée de l'image topographique d'un échantillon donnant une vision plus ou moins fidèle de la vraie topographie de l'échantillon.

Cette méthode est utilisée pour étudier l'influence des dimensions de l'image et des paramètres de la boucle d'asservissement verticale sur le taux du bruit dans une image topographique [Flemming2005].

Mise en forme logicielle

Cependant, une dérive, telle que celle de la Figure 4-4, qu'elle soit due à un désalignement ou à une dérive thermique, est souvent éliminée par les logiciels des AFM si elle est linéaire. Ces logiciels ont pour but de remettre en forme les images acquises par microscopie à force atomique. Ces logiciels traitent puis analysent les données. Les méthodes de traitement d'image AFM sont nombreuses. Nous en présentons ici quelques unes.

- Le premier traitement des données concerne la soustraction de l'inclinaison entre le plan XY de balayage (de la plateforme ou de la pointe) et la surface de l'échantillon. Cette inclinaison est typiquement comprise entre 0° et 5° . Cet angle est souvent compensé à l'aide d'algorithmes de correction d'inclinaison. Ceci est accompli en calculant et en soustrayant la valeur moyenne du plan de l'image

obtenue par AFM. Cette procédure conduit à une erreur en cosinus puisque l'image inclinée est projetée dans le plan horizontal. La procédure correcte consiste à effectuer une rotation du plan de l'image jusqu'à ce que sa valeur moyenne coïncide avec le plan horizontal. Ce type de correction concerne les petites valeurs de désalignement.

- Parfois les mesures sont corrigées de façon plus importante. C'est le cas de déviations basses fréquences, dans le plan de l'image topographique dues à différents facteurs : dérives basses fréquences de température, erreurs de tangage de la plateforme de déplacement ou de la pointe... Un tel désalignement conduit à des ondulations de l'image topographique. La correction dans ce cas se fait en remettant, dans un même plan, les lignes parallèles de balayage de l'axe rapide. Cette compensation s'effectue pratiquement par des algorithmes qui corrigent itérativement l'altitude de deux lignes adjacentes jusqu'à couvrir la totalité de l'image. À noter ici aussi que ce type de correction augmente l'incertitude des mesures selon l'axe lent. Pour être exactes, ces corrections doivent être corrélées aux facteurs qui les ont générés.
- La troisième correction consiste à éliminer le bruit en utilisant des méthodes statistiques : moyenne, filtrage... Ce type de correction est critique (désavantageux) dans le cas de mesures de rugosité si les paramètres de correction ne sont pas connus.
- Un autre type de correction effectuée par les logiciels des microscopes est le filtrage de Fourier. La méthode consiste à éliminer le bruit à certaines fréquences, comme par exemple l'élimination de fréquences parasites générées par le balayage selon l'axe rapide.

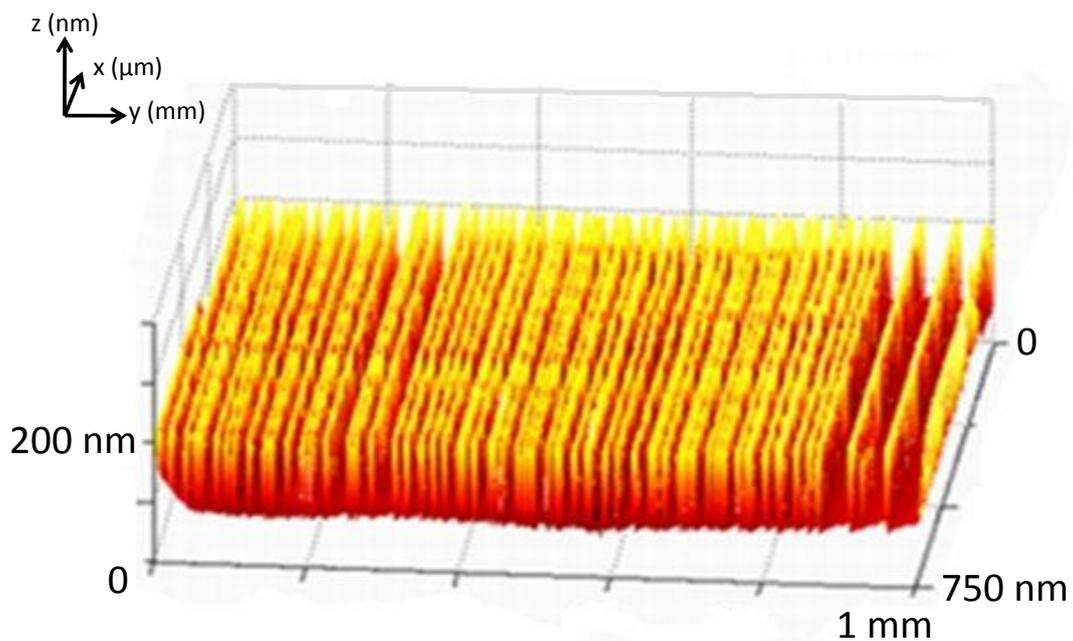


Figure 4-7 : Image topographique corrigée de l'image de la Figure 4-4. Ici, les guides d'onde sont mieux visibles [Sinno2007]

Pour la correction du désalignement de l'image de la Figure 4-4, une rotation du plan a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB afin de faire coïncider la valeur moyenne du plan de l'image avec le plan horizontal. La Figure 4-7 montre l'image topographique corrigée. Ici, les guides d'onde sont nettement plus visibles.

Afin de mieux explorer l'image de la Figure 4-4, nous avons procédé à une analyse dimensionnelle.

Analyse dimensionnelle

L'analyse dimensionnelle concerne la mesure de distance entre des objets, ou les mesures des dimensions de l'objet. Le calcul est souvent effectué de façon interactive avec le manipulateur du microscope qui choisit une zone de l'image pour l'étudier. Le résultat comprend donc souvent l'influence du facteur humain.

Les logiciels des microscopes effectuent souvent automatiquement des corrections sur l'image AFM brute, et fournissent par la suite une image plus ou moins exacte, surtout lorsque les paramètres des corrections ne sont pas connus, ou ne sont pas corrélés aux facteurs physiques. Pour ces raisons, et du fait de sa limitation en résolution, nous avons voulu prendre la main sur le logiciel fourni par le constructeur de notre AFM commercial.

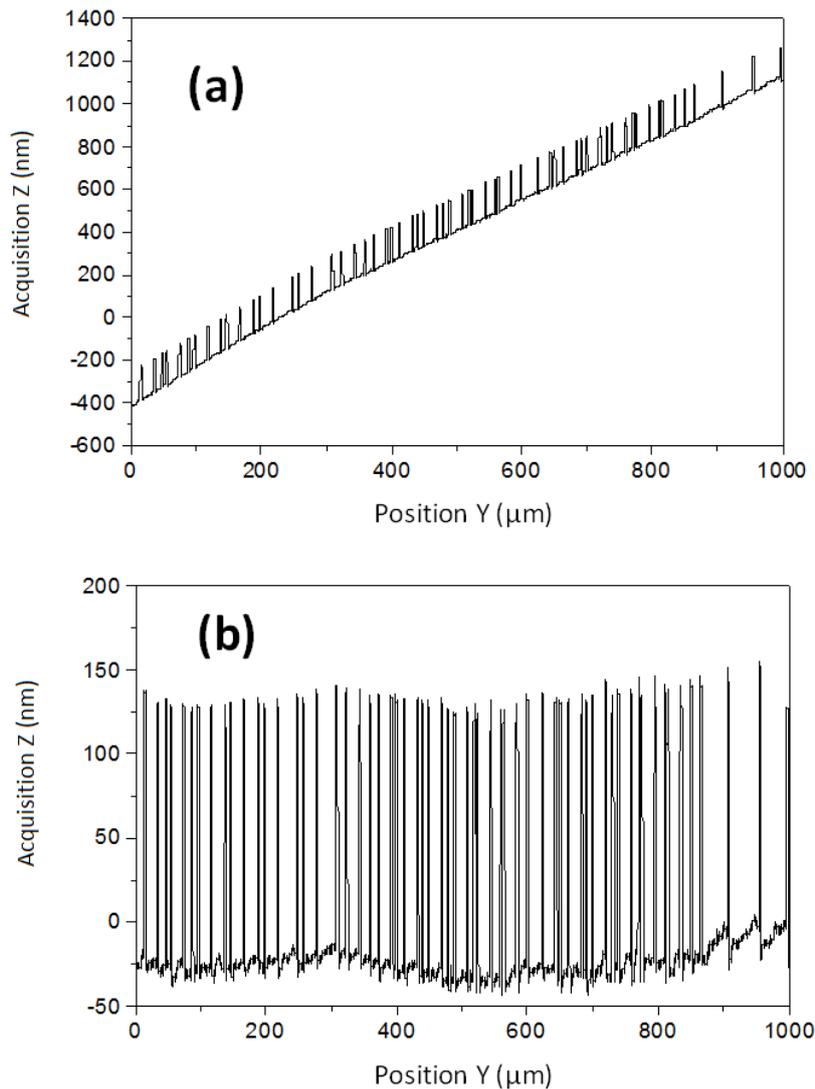


Figure 4-8 : (a) : Coupe selon l'axe rapide de l'image de la Figure 4-4. (b) : Coupe de l'image corrigée de la Figure 4-7. Cette coupe montre des fluctuations de la surface de l'échantillon [Sinno2007]

Une coupe a été effectuée selon l'axe rapide [Figure 4-8]. La Figure 4-8a montre la coupe de la Figure 4-4a, alors que la Figure 4-8b correspond à la coupe de l'image corrigée. La coupe non-corrigée montre clairement la pente selon l'axe rapide, c'est-à-dire celle due essentiellement à un désalignement. La coupe corrigée révèle des ondulations basses fréquences qui sont dues à différents facteurs tels que des ondulations probables de la surface de l'échantillon, et des défauts de guidage vertical de la plateforme.

Afin de montrer la haute résolution avec laquelle a été acquise l'image, nous avons effectué encore un agrandissement. La Figure 4-9a montre un guide d'onde unique. La Figure 4-9b montre la coupe de ce guide et ses dimensions.

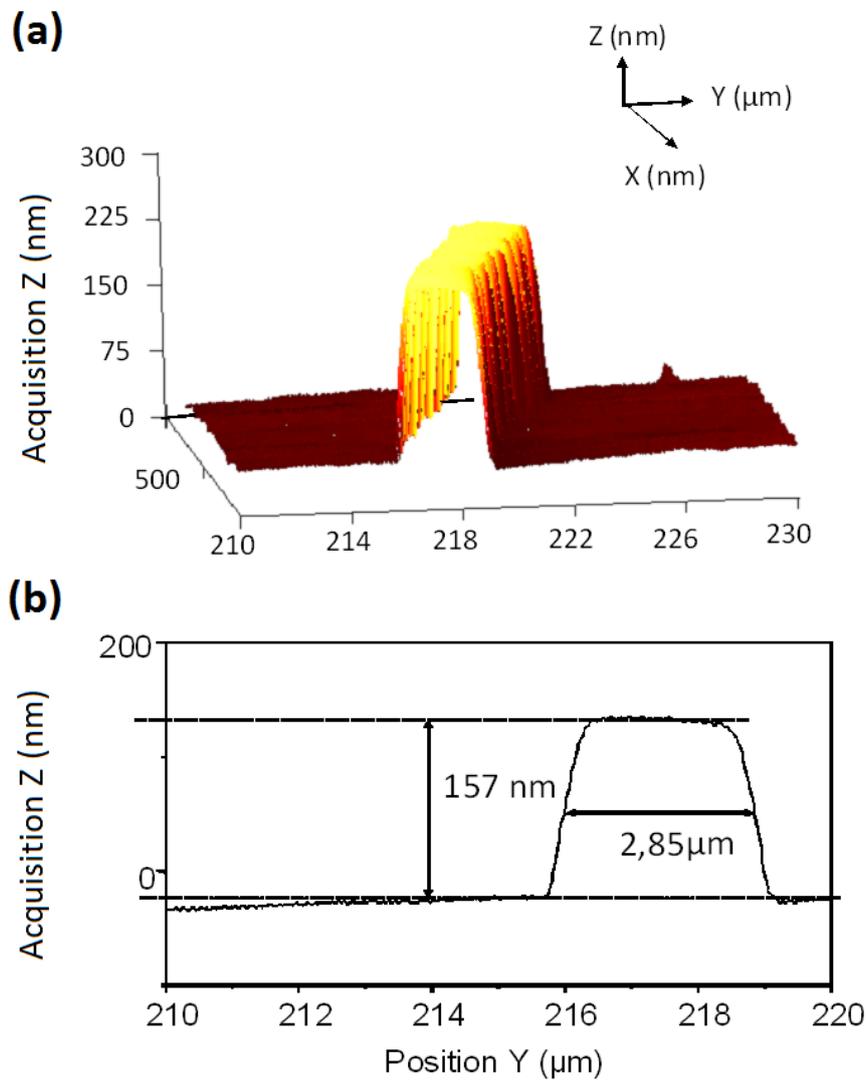


Figure 4-9 : (a) Image 3D d'un seul guide. (b) Coupe d'un guide montrant ses dimensions [Sinno2007]

Nous concluons de ce qui a été présenté dans cet exemple, que l'on peut, grâce à notre AFM grande-course, effectuer des agrandissements consécutifs à partir de l'image principale sans avoir à refaire le balayage de nouveau comme dans le cas des AFM classiques. Ces résultats montrent le succès de l'intégration de la plateforme à un AFM commercial. Cependant, ceci nécessite une très grande attention aux paramètres environnementaux, un pré-alignement des axes mécaniques, et un traitement des images.

La section qui suit montre une image topographique obtenue avec la même configuration précédente mais sur une dynamique beaucoup plus étendue.

4.3.5. Topographie d'un guide d'onde en forme de serpent

La Figure 4-10 montre une image topographique obtenue à l'aide de l'AFM longue-course. Le but de ce balayage est d'imager un guide d'onde, en forme de serpent, selon sa longueur. Ce guide est large à l'entrée, puis se rétrécit et devient un serpent. La taille de l'image est de 1,1 mm x 20 μm selon les axes rapide et lent respectivement. Les résolutions choisies sont de 20 nm et 100 nm selon les axes rapide et lent respectivement. De même que pour l'exemple précédent, ces résolutions sont un compromis entre plusieurs facteurs.

Afin de minimiser le temps de mesure et donc l'effet des dérives thermiques notamment selon l'axe lent, nous avons choisi d'augmenter la vitesse de balayage. La plateforme double-étage permet des vitesses allant jusqu'à 2 mm/s. Cependant, les spécifications de la pointe du microscope limitent la vitesse à quelques dizaines de $\mu\text{m/s}$. Une très grande vitesse peut être à l'origine de l'endommagement de la pointe. Une autre limitation de la vitesse est due au fait que le substrat que nous voulons étudier comprend des motifs sur sa surface. Leur image résultante est une corrélation entre le profil des motifs et la forme de la pointe. Nous avons opté pour un compromis avec une vitesse de 40 $\mu\text{m/s}$.

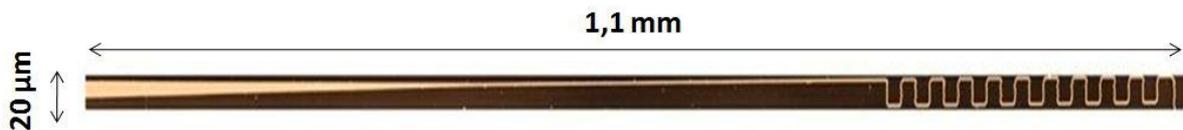


Figure 4-10 : Image topographique du guide d'onde en forme de serpent. Les dimensions de l'image sont de 1,1 mm x 20 μm et les résolutions de 20 nm x 100 nm selon les axes rapide et lent respectivement, ce qui donne 55000 points par ligne. La vitesse de balayage est de 40 $\mu\text{m/s}$

Nous avons choisi de faire fonctionner le microscope en mode contact intermittent (*tapping mode*). Le microscope utilisé propose une sortie en tension valant la valeur moyenne des oscillations de la pointe. Cette tension est donc une représentation fidèle de la topographie des guides d'ondes. C'est cette tension que nous avons échantillonnée à l'aide de la carte d'acquisition, en synchronisation avec les déplacements de la plateforme.

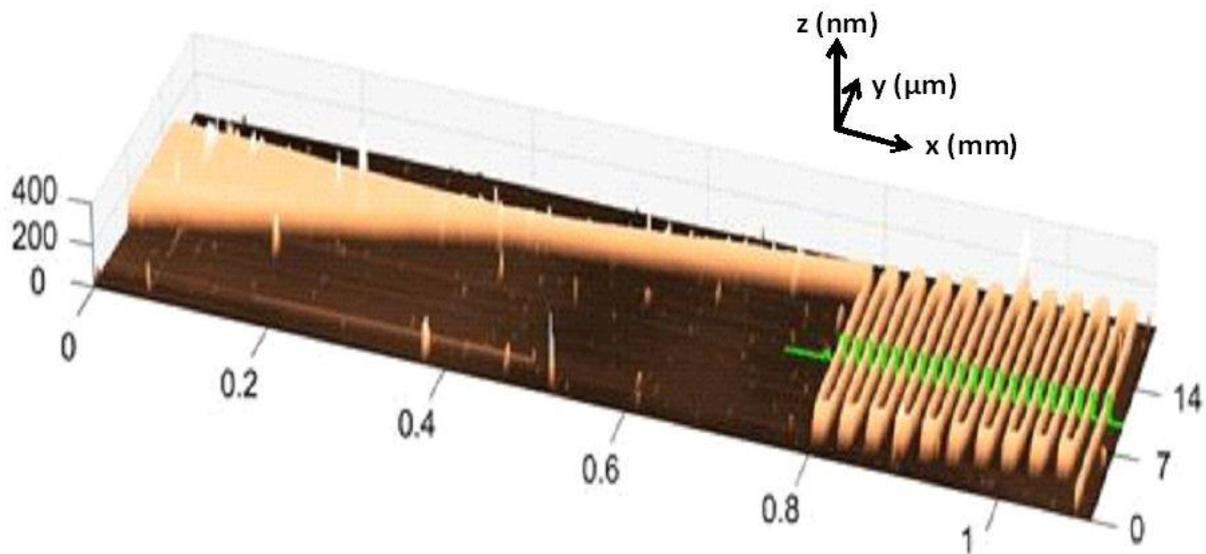


Figure 4-11 : Vue 3D de l'image de la Figure 4-10 montrant la topographie du guide. Le guide est large en entrée permettant un alignement facile avec une source optique, puis se rétrécit et se termine par un guide en forme de serpent

La Figure 4-11 montre une vue 3D du guide de la Figure 4-10 après redressement du plan de l'image. À noter que la plateforme de déplacement permet des déplacements beaucoup plus résolus. Les résolutions choisies pour cette image sont un compromis entre la résolution et la taille des données enregistrées. En effet, la tension en Z représentant la topographie de la surface est échantillonnée et stockée dans un fichier sur un ordinateur. De très grandes résolutions augmentent la taille du fichier, ce qui rend difficile son traitement ultérieur. Les résolutions choisies pour notre image de la Figure 4-10 aboutissent à une matrice de 55 000 pixels x 200 pixels codés sur 16 bits. Ces résolutions sont, de loin, non faisables avec un AFM classique pour une image de cette taille.

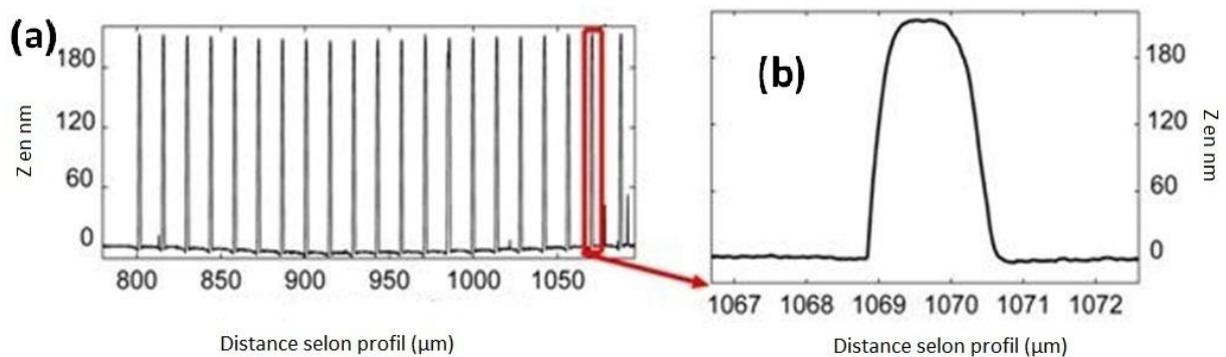


Figure 4-12 : (a) Coupe de l'image de Figure 4-11 montrant le profil du guide en forme de serpent. (b) Coupe d'un guide montrant ses dimensions

La Figure 4-12a montre une coupe selon l'axe rapide du guide d'onde en forme de serpent in après redressement. Cette coupe révèle l'allure du guide et de la surface de l'échantillon. La Figure 4-12b montre la coupe d'un seul guide permettant de révéler ses dimensions.

Les résultats obtenus montrent la capacité de la plateforme double-étage à produire des images AFM de taille millimétrique et des résolutions nanométriques. Or les conditions environnantes s'avèrent contraignantes pour des acquisitions AFM de taille supérieure. Les images du serpent in ont été effectuées en prenant de grandes précautions aux perturbations thermiques entourant la mesure. Malgré ceci, des dérives sont apparues pendant les mesures. Aussi, le désalignement entre le plan de déplacement de la plateforme et la surface de l'échantillon était présent. Nous avons traité l'image topographique du serpent in sous le logiciel MATLAB afin de le redresser et soustraire ces artefacts.

Outre les contraintes thermiques et mécaniques qui imposent des limitations sur la taille de l'image, des contraintes nous limitent pour augmenter la résolution des acquisitions. Une haute résolution implique une matrice de pixels très dense et une image difficile à traiter en l'absence d'un ordinateur puissant. Les résolutions choisies sont cependant largement suffisantes pour cette application car la largeur d'un guide est de 2 μm environ comme montré sur la Figure 4-12b.

La capacité de la plateforme double-étage est donc fonction des contraintes de l'application envisagée. Sa dynamique millimétrique peut parfois être sous-exploitée, et sa résolution arrêtée aux limitations techniques, tout en répondant aux exigences requises.

4.4. Application de la plateforme à la microscopie optique en champ proche

4.4.1. Objectifs et applications

La connaissance des structures d'indice, des profils des modes guidés, et des pertes optiques éventuelles est nécessaire pour la compréhension et l'amélioration des systèmes optiques qui sont développés de nos jours. Or, bien souvent, les processus de fabrication altèrent les structures sans que nous soyons à même de savoir en quelles proportions. Il apparaît donc qu'une mesure des modes guidés dans une structure est essentielle. C'est ce qu'a apporté la microscopie optique en champ proche au domaine de l'optique guidée.

L'étude des pertes dans les structures photoniques représente un enjeu majeur. La cartographie de champ localisée permet une bien meilleure analyse de ces pertes dans les structures, pouvant détecter la présence de défauts de très faibles tailles et mesurer les pertes associées. Bourzeix et al. ont pu calculer des pertes de 0,05 dB correspondantes à un défaut de 10 nm dans un guide de 2 μm de largeur [Bourzeix1998].

Afin d'augmenter la précision sur le calcul de l'indice effectif d'un guide d'onde droit, une méthode consiste à augmenter la taille de l'image obtenue par microscopie optique en champ proche, et donc à examiner les ondes stationnaires sur une longueur du guide plus étendue, tout en liant les résultats à des défauts de surface probables. L'augmentation de la taille de l'image permet d'améliorer la résolution de l'analyse par Fourier. Pour cette raison, nous avons intégré la plateforme double-étage à un SNOM afin d'étendre sa dynamique à l'échelle millimétrique, et nous avons appliqué la méthode pour imager un guide d'onde à échange d'ions.

4.4.2. Mise en place du sSNOM longue-course à partir d'un AFM

Le SNOM sans ouverture (aSNOM pour *apertureless SNOM*), connu aussi sous le nom « SNOM à diffusion » (sSNOM pour *scattering SNOM*), offre plusieurs avantages par rapport à un SNOM avec ouverture. Dans les sSNOM, une pointe fine diffuse une partie du champ local évanescent vers le champ lointain là où il sera détecté [Bachelot1995] [Bachelot2004] [Inouye1994]. L'avantage principal des pointes sans ouverture est que, puisque la lumière n'est pas collectée à travers une ouverture dans la pointe, le diamètre de la pointe peut être plusieurs fois plus petit que celui d'une pointe avec ouverture, et peut toujours générer un signal mesurable. Ceci augmente beaucoup la résolution spatiale des mesures optiques. Ces pointes sans ouverture sont donc mieux adaptées pour mesurer le champ proche à proximité des bords d'un guide d'onde.

Dans le but d'obtenir un microscope optique en champ proche, nous nous sommes servis du microscope à force atomique utilisé pour les mesures topographiques décrites dans les sections précédentes. La Figure 4-13 montre une vue schématique du microscope. La pointe

métallique de l'AFM est utilisée comme pointe diffusante sans ouverture pour le SNOM. La pointe du microscope à force atomique que nous utilisons a un rayon de 10 nm environ.

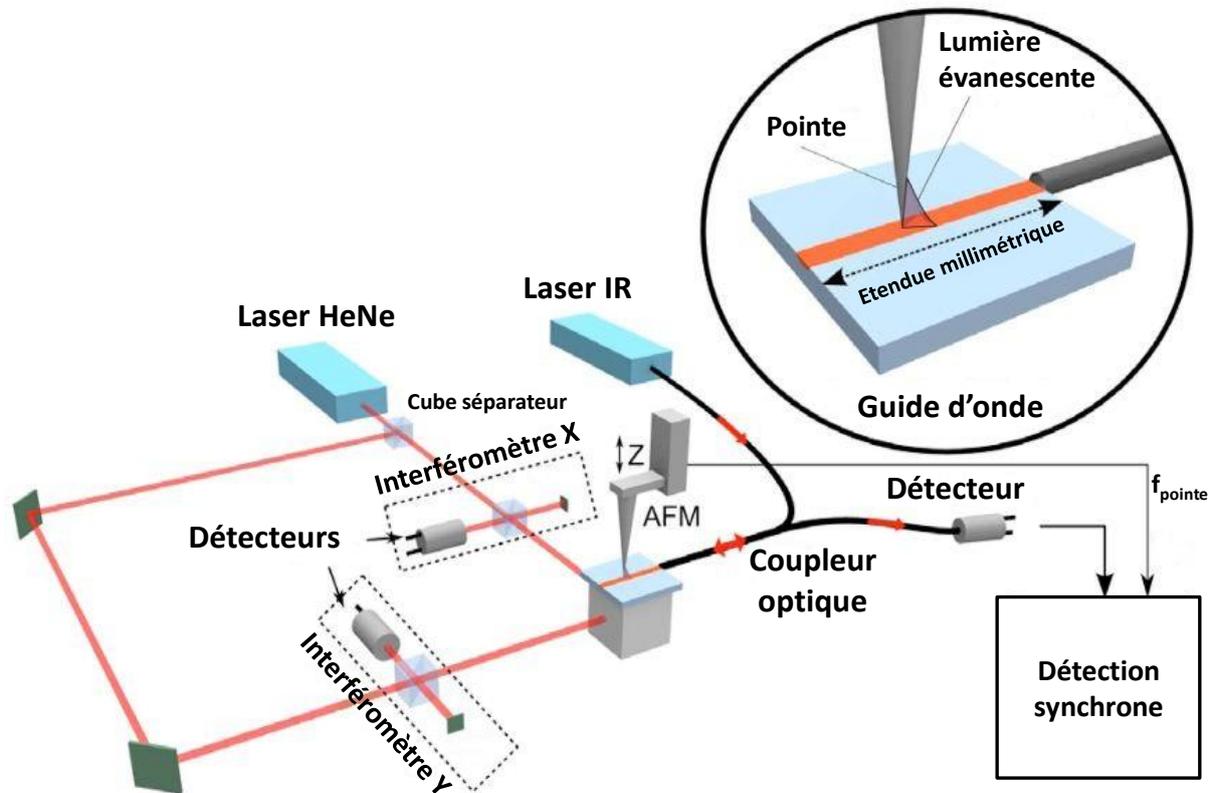


Figure 4-13 : Schéma du microscope optique en champ proche à champ de vue étendu. Le déplacement latéral est assuré à l'aide de la plateforme de déplacement double-étage et dont le déplacement est mesuré à l'aide des interféromètres hétérodynes X et Y. La pointe de l'AFM agit comme une pointe à diffusion. Les données optiques en champ proche sont collectées par un coupleur optique [Lérondel2009]

De la même façon que pour le microscope à force atomique, la plateforme de déplacement double-étage a été intégrée sous l'AFM transformé en sSNOM permettant ainsi d'obtenir des images optiques hautement résolues et de tailles millimétriques. L'échantillon étudié est placé sur la face supérieure du cube miroir de la plateforme, et la pointe du microscope est approchée de sa surface.

4.4.3. L'échantillon à échange d'ions utilisé

L'échantillon utilisé est un guide d'onde monomode intégré sur un substrat en verre à échange d'ions enterré à 3 μm en dessous de la surface. Le guide est droit et traverse le substrat d'un bout à l'autre sur une longueur de 2 centimètres environ. Le substrat est plat et ne présente aucune topographie sur sa surface. Une des extrémités du guide est métallisée afin

d'améliorer la réflexion de la lumière vers l'intérieur du guide et former des ondes stationnaires le long du guide.

Le guide a été fabriqué avec un procédé qui aboutit à un gradient d'indice qui ne peut être aisément mesuré dans l'environnement guidé. La variation d'indice est empiriquement estimée de l'ordre de 10^{-2} de la valeur de l'indice qui est de 1,51. Des détails sur la fabrication peuvent être trouvés dans [Broquin2001].

4.4.4. Une détection du signal optique adaptée aux grands déplacements

Dans une configuration sSNOM classique, la détection du champ lointain externe induit diverses difficultés : des champs d'arrière-plan, autres que ceux diffusés par la pointe, peuvent apparaître, tels que les champs diffusés par la présence de défauts de surface, et qui sont collectés en même temps que le champ lointain désiré. Différents travaux ont mentionné que les champs d'arrière-plan ne peuvent pas être supprimés entièrement [Taylor1998]. La nature interférométrique intrinsèque du signal sSNOM en présence de champs d'arrière-plan a déjà été étudiée [Aubert2003].

Séparer la lumière diffusée par la pointe des multiples sources d'erreurs nécessite des techniques de détection hétérodynes complexes [Gomez2006] [Stefanon2005]. Différentes méthodes ont été proposées afin d'extraire le signal faible issu de l'interaction locale entre la pointe et la surface de l'échantillon. Parmi celles-ci nous trouvons la modulation de la distance pointe-échantillon, la démodulation des harmoniques d'ordre supérieur que celles du signal de modulation [Wurtz1999], la détection hétérodyne [Hillenbrand2000] [Hillenbrand2002], et l'excitation d'une singularité du champ local [Sanchez1999].

En plus des champs d'arrière-plan non-désirés, les techniques classiques de détection de la lumière diffusée par la pointe du microscope ne sont pas adaptées aux longs déplacements ; la distance entre le détecteur de la lumière diffusée et la surface de l'échantillon variera au cours du déplacement du fait de probables défauts d'alignement.

Pour la détection du signal optique issu du microscope optique en champ proche, nous avons utilisé une technique récemment proposée [Robinson2006] et adaptée à notre expérimentation. Un coupleur optique en Y est utilisé pour injecter la lumière dans le guide d'onde, et pour collecter le signal réfléchi par la face métallisée. La source optique est un laser à cavité externe accordable (Tunics) ayant une incertitude absolue sur la longueur d'onde de ± 5 pm. La longueur d'onde utilisée pendant les mesures expérimentales est fixée à $\lambda_0 = 1,55000 \mu\text{m}$.

Le signal optique modulé par les oscillations de la pointe de l'AFM, fonctionnant en mode contact intermittent, est détecté en réflexion en utilisant le mode se propageant dans le sens opposé au signal injecté. Une détection synchrone permet de démoduler le signal en sortie de fibre.

4.4.5. Résultats expérimentaux du s-SNOM longue-course

4.4.5.1. Microscopie s-SNOM sur 100 µm du guide d'onde à échange d'ions

La Figure 4-14a montre une image optique de dimensions 100 µm x 8 µm obtenue à l'aide du SNOM « longue course ». L'échantillon comportant le guide d'onde à échange d'ions a été balayé en mode ligne par ligne où l'axe rapide de balayage de la plateforme de déplacement est celui de la propagation de la lumière dans le guide. La résolution de l'image est de 60 nm selon l'axe rapide où la plateforme se déplace à la vitesse de 5 µm/s. La distance interligne est de 300 nm définissant la résolution de l'image selon l'axe lent. Le temps d'intégration de la détection synchrone est de 5 ms. La modulation d'intensité peut être clairement observée le long de l'axe rapide.

La Figure 4-14b montre l'analyse par Transformée de Fourier Rapide (FFT) du signal selon la direction de propagation de la lumière dans le guide et moyennée sur les lignes. À partir de cette FFT, une analyse modale peut être effectuée, et d'importantes caractéristiques du guide d'onde peuvent être extraites comme l'indice effectif des modes optiques se propageant dans le guide [Blaize2003]. L'agrandissement de la Figure 4-14a illustre une modulation d'amplitude liée aux interférences entre l'onde transmise et l'onde réfléchi se propageant selon l'axe rapide. Le pic de la FFT montre une seule fréquence spatiale confirmant qu'il n'y a qu'un mode de propagation.

À partir de la position du pic de la FFT, la périodicité « p » de la modulation d'amplitude peut être mesurée ; ceci donne une longueur d'onde de la lumière propagée dans le guide égale à $\lambda_G = 2p = 1025 \pm 6$ nm. L'incertitude sur la mesure de la position du pic de la FFT est déduite de la largeur spectrale à mi-hauteur (FWHM pour *Full Width at Half Maximum*). En prenant en compte la longueur d'onde optique du laser ($\lambda_0 = 1,55000$ µm), l'indice effectif du mode et l'incertitude peuvent être calculés en utilisant les équations suivantes :

$$n_{eff} = \frac{\lambda_0}{\lambda_G} = \frac{\lambda_0}{2p} \quad (4.1)$$

$$\Delta n_{eff-FWHM} = \Delta \lambda_G \frac{\lambda_0}{\lambda_G^2} \quad (4.2)$$

où $\Delta \lambda_G$ est la largeur spectrale à mi-hauteur du spectre converti en longueur d'onde (6 nm). Ces équations donnent $n_{eff} = 1,512 \pm 0,009$.

L'incertitude est donc de l'ordre de 10^{-2} . Elle est directement liée à la finesse de la raie. La théorie de Fourier nous dit que pour augmenter la résolution du spectre, il faut augmenter la fenêtre de mesure, ici la longueur de l'image. Nous allons le voir très clairement sur une image plus grande.

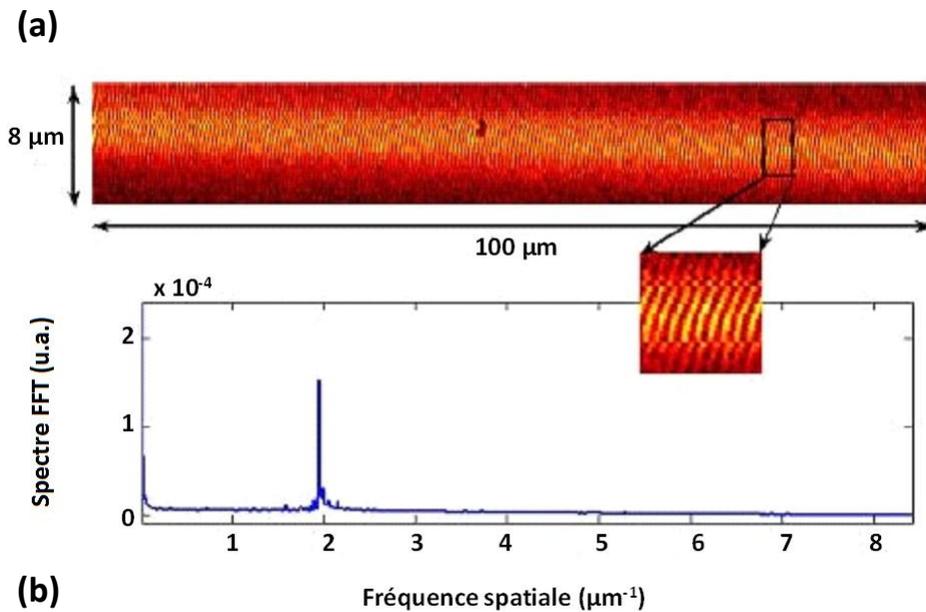


Figure 4-14 : (a) Image optique de $100 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ du guide d'onde obtenue à l'aide du SNOM « longue course » ainsi que (b) sa transformée de Fourier (FFT) [Léronde2009]

4.4.5.2. Microscopie s-SNOM sur 1,1 mm du guide d'onde à échange d'ions

La Figure 4-15a montre une image optique en champ proche de $1,1 \text{ mm} \times 30 \mu\text{m}$ obtenue avec la même configuration. À notre connaissance, il s'agit de la plus grande image en optique de champ proche réalisée, hormis une image réalisée par recollement d'images [Bachelot2004]. Les résolutions de l'image sont de 100 nm et 150 nm selon l'axe rapide et lent respectivement. La vitesse de balayage selon l'axe rapide est de $30 \mu\text{m/s}$, et le temps d'intégration de la détection synchrone de 2 ms . La Figure 4-15b montre la FFT moyennée des lignes de balayage de l'axe rapide. D'une manière identique à l'image précédente, l'information sur l'indice effectif peut être déduite mais avec une bien meilleure résolution grâce à la grande taille de l'image.

D'une manière étonnante, la FFT de la Figure 4-15b montre deux pics. À partir des mesures des positions des pics et de leurs largeurs à mi-hauteur, on peut retrouver les longueurs d'onde guidées. Le premier pic correspond à $\lambda_{G1} = 1026,5 \pm 0,8 \text{ nm}$ et $n_{\text{eff}1} = 1,510 \pm 0,001$, alors que le deuxième pic correspond à $\lambda_{G2} = 1024,6 \pm 0,6 \text{ nm}$ et $n_{\text{eff}2} = 1,5126 \pm 0,0009$. Avant de discuter de l'origine de ces deux pics, nous apportons quelques précisions sur les incertitudes de la mesure.

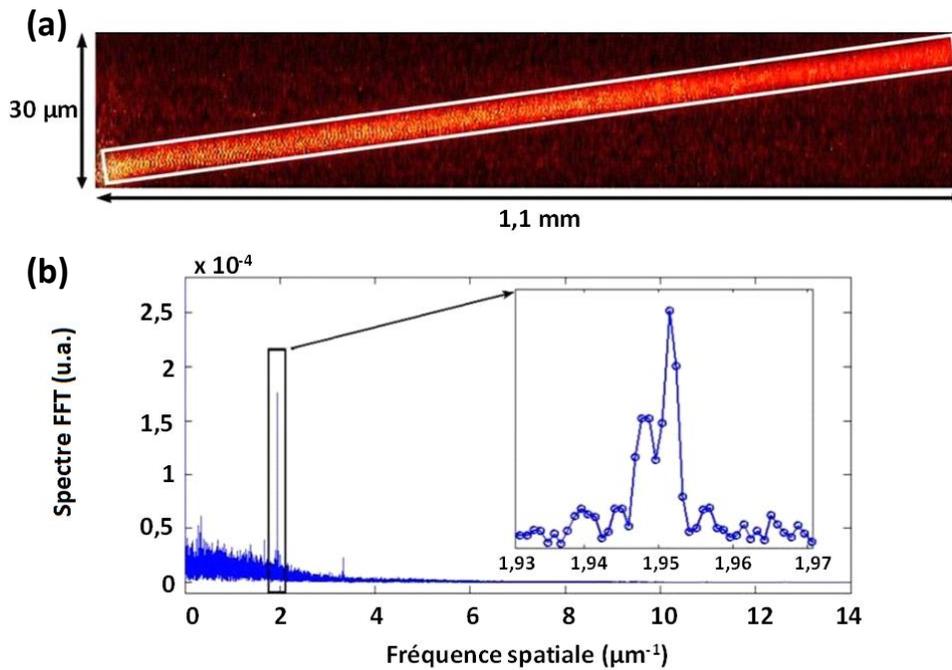


Figure 4-15 : (a) Image optique de 1,1 mm x 30 μm obtenue à l'aide du SNOM « longue course » ainsi que (b) sa transformée de Fourier [Léronde2009]

Avec une incertitude sur l'indice inférieure à 10^{-3} , l'analyse modale par technique SNOM apparaît clairement comme une solution alternative intéressante pour la caractérisation des paramètres optiques des guides d'onde. La résolution est directement liée à l'analyse FFT et à la longueur sur laquelle se fait le balayage selon l'axe rapide, tandis que la bande passante est limitée par la fréquence d'échantillonnage. Pour améliorer l'exactitude tout en conservant la bande passante de mesure, il faut donc augmenter l'étendue de balayage en conservant un échantillonnage fin.

Si l'on suppose que l'exactitude de la position du pic sur l'analyse FFT ($1/p$) est $1/L$ où L est la longueur du balayage, en utilisant l'équation (4.1), on démontre que la résolution sur l'indice est directement reliée à la longueur du balayage par la formule :

$$r = \frac{\lambda_0}{2L} \quad (4.3)$$

avec λ_0 la longueur d'onde dans l'air ($1,55000 \mu\text{m}$). L'incertitude sur la longueur d'onde est négligée. On peut vérifier ici que le théorème de Nyquist-Shannon est vérifié. L'intervalle d'échantillonnage pour les images des Figure 4-14 et Figure 4-15 est respectivement de 60 et 150 nm, à comparer avec la périodicité de l'onde stationnaire d'environ 500 nm. Grâce à la régularité de l'échantillonnage entre chaque ligne, le rapport signal à bruit peut être amélioré

en moyennant les différentes lignes parallèles de l'image. La moyenne n'a évidemment de sens que sur la partie active de l'image, à savoir celle correspondant au guide.

En utilisant l'équation (4.3), la résolution sur l'indice peut être estimée pour chaque image. Pour l'image de la Figure 4-14, on trouve $r = 0,008$, à comparer avec la mesure expérimentale déduite précédemment qui est de $0,009$. Pour l'image de la Figure 4-15, la résolution estimée est de $0,0007$, à comparer avec $0,0009$. Dans les deux cas, l'expérience est en bon accord. Comme discuté précédemment, il est nécessaire de prendre en considération de nombreux paramètres expérimentaux dans le cas d'image de grande taille, par exemple les fluctuations de température, la planéité de l'échantillon, l'alignement de l'échantillon par rapport aux axes de balayage.

Pour ce qui concerne la présence de deux pics sur l'analyse FFT de l'image de la Figure 4-15, on peut calculer la variation d'indice correspondante. On trouve $0,0027 \pm 0,00019$. Cette différence est attribuée à la biréfringence du guide d'onde. Lors de la fabrication du guide, un traitement thermique est réalisé et une dissymétrie peut subvenir sur le profil de l'indice, entraînant une biréfringence estimée de l'ordre de 10^{-3} [Ramaswamy1988].

4.4.6. Conclusion

Une image optique en champ proche d'un millimètre de long a pu être réalisée, en observant la propagation d'une onde guidée. En comparaison avec la microscopie en champ proche classique, l'imagerie optique sur une grande course associée à une analyse de Fourier permet un calcul avec une excellente exactitude (10^{-4}) des paramètres de propagation du guide. Une telle précision sur la mesure permet d'étendre le domaine d'utilisation de l'optique en champ proche en rendant la méthode sensible à la mesure de la biréfringence. Cette technique n'est évidemment pas limitée à ce type d'échantillon. Elle est pleinement compatible avec tous les types de SNOM. Ceci peut élargir les champs d'application en microscopie en champ proche et introduit la notion de métrologie en champ proche optique.

4.5. Conclusion du 4^{ème} chapitre

Les résultats de ce chapitre montrent la capacité de la plateforme double-étage à effectuer des mesures multi-échelles. Nous avons détaillé la possibilité d'extraire des informations et d'effectuer des agrandissements successifs d'une image, topographique ou optique, sans avoir à refaire la mesure comme dans le cas des microscopes classiques.

Les mesures obtenues possèdent des résolutions à l'échelle du nanomètre sur des étendues de déplacements millimétriques. Cependant, ces mesures nécessitent une très grande attention à l'alignement des axes mécaniques et optiques ainsi qu'une stabilisation des paramètres environnementaux. Des analyses sont aussi requises afin d'extraire l'information utile de l'image.

Nous nous sommes limités durant nos démonstrations expérimentales à la microscopie à sonde locale ; en l'occurrence, les microscopies AFM et SNOM. Cependant, d'autres applications sont envisagées telles que la lithographie et la nanomanipulation.

4.6. Bibliographie du 4^{ème} chapitre

[Aubert2003] : S. Aubert, A. Bruyant S. Blaize, R. Bachelot, G. Lerondel, S. Hudlet, and P. Royer, "Analysis of the interferometric effect of the background light in apertureless scanning near-field optical microscopy," *J. Opt. Soc. Am. B* 20, 2117–2124 (2003).

[Bachelot1995] : R. Bachelot, P. Gleyzes, and A.C. Boccara, "Near-field optical microscope based on local perturbation of a diffraction spot," *Opt. Lett.* 20, 1924-1926 (1995).

[Bachelot2004] : R. Bachelot, et al., "Probing photonic and optoelectronic structures by apertureless scanning near-field optical microscopy," *Microsc. Res. Tech.* 64, 441-452 (2004).

[Blaize2003] : Blaize S., Aubert S., Bruyant A., Bachelot R., Lerondel G., Royer P., Broquin J.E., Minier V., Apertureless scanning near-field optical microscopy for ion exchange channel waveguide characterization, *Journal of Microscopy*, 209 (3), 155-161, 2003.

[Bourzeix1998] : S. Bourzeix, et al., "Near-field optical imaging of light propagation in semiconductor waveguide structures," *App. Phys. Lett.* 73, 1035-1037 (1998).

[Broquin2001] : Broquin J.-E., Ion Exchange integrated devices, V. Giancarlo, C. Righini (Eds.), *Integrated Optics Devices Proceedings of SPIE*, vol. 4277, 105–115, (2001).

[Dziomba2005] : Dziomba, T., Koenders, L., Wilkening, G., Flemming, M., Duparré, A., 2005, Development of a calibration guideline for scanning probe microscopes, *Technisches Messen*, 72:295-307.

[Flemming2005] : Flemming, M., Roder, K., Duparré, A., 2005, Scanning force microscopy for optical surface metrology, *Proc. SPIE* 59650A/1:10

[Gomez2006] : L. Gomez, et al., "Apertureless scanning near-field optical microscopy: A comparison between homodyne and heterodyne approaches," *J. Opt. Soc. Am. B* 23, 823-833 (2006).

[Hillenbrand2000] : R. Hillenbrand, B. Knoll, and F. Keilmann, "Pure optical contrast in scattering-type scanning near-field microscopy," *J. Microsc. (Oxford)* 202, 77–83 (2000).

[Hillenbrand2002] : R. Hillenbrand, T. Taubner, and F. Keilmann, "Phonon enhanced light matter interaction at the nanometer scale," *Nature* 418, 159–162 (2002).

[Inouye1994] : Y. Inouye and S. Kawata, "Near-field scanning optical microscope with a metallic probe tip," *Opt. Lett.* 19, 159-161 (1994).

[Lérondel2009] : G. Lérondel, A. Sinno, L. Chassagne, S Blaize, P. Ruaux, A. Bruyant, S. Topçu, P.Royer, Y. Alayli, Enlarged near field optical imaging, *Journal of Applied Physics*, 106, 044913 (2009).

[M5] : *M5 de Parc Scientific Instruments.*

[Ramaswamy1988] : Ramaswamy R.V., Srivastava R., *Ion-exchanged glass waveguides: A review, Journal of Lightwave Technology*, 6 (6), pp. 984-1002, (1988).

[Robinson2006] : J. T. Robinson, S. F. Preble, and M. Lipson, *Opt. Express* 14, 10588 (2006).

[Sanchez1999] : E.J. Sanchez, L. Novotny, and X.S. Xie, "Near-field fluorescence microscopy based on two-photon excitation with metal tips," *Phys. Rev. Lett.* 82, 4014–4017 (1999).

[Sinno2007] : A. Sinno, P. Ruaux, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, G. Lerondel, S. Blaize, A. Bruyant, P. Royer, *2D Enlarged atomic force microscopy scanning scope: novel sample-holder device with millimetre range, Review of Scientific Instruments*, 78, 095107 (2007).

[Stefanon2005] : I. Stefanon, et al., "Heterodyne detection of guided waves using a scattering-type scanning near-field optical microscope," *Opt. Express* 13, (2005).

[Taylor1998] : R. S. Taylor, K.E. Leopold, M. Wendman, G. Gurley, and V. Elings, "Scanning probe optical microscopy of evanescent fields," *Rev. Sci. Instrum.* 69, 2981–2987 (1998).

[Zhao1998] : Zhao, X., 1998, *Scanning probe microscope with high resolution capacitive transducers*, PTB-Bericht-F-32, Braunschweig. Wirtschaftsverlag. NW, Verl. für Neue Wiss., Bremerhaven.

[Wurtz1999] : G. Wurtz, R. Bachelot and P. Royer, "Imaging a GaAlAs laser diode in operation using apertureless scanning near-field optical microscopy," *Eur. Phys. J.: Appl. Phys.* 5, 269–275 (1999).

CONCLUSION

Nous avons présenté les travaux effectués dans le cadre de cette thèse intitulée « *Étude et réalisation d'une platine porte-échantillon aux performances nanométriques. Application à la microscopie en champ proche* ». Des résultats significatifs ont été obtenus pour le positionnement de la plateforme double-étage sur une dynamique de déplacement millimétrique. Ces résultats ont été démontrés en application à l'imagerie de composants sous un microscope à force atomique et sous un microscope optique en champ proche. Ces résultats peuvent également intéresser d'autres domaines en nanotechnologie où les contraintes de positionnement et de contrôle à l'échelle nanométrique sont importantes tels que la lithographie et la nanomanipulation.

Les travaux se sont déroulés au sein du Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes (LISV) de l'Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines et en collaboration avec l'équipe « photonique et nano-optique » du Laboratoire de Nanotechnologies et d'Instrumentation Optique (LNIO) de l'Institut Charles Delaunay de l'Université de Technologie de Troyes (UTT).

La première partie a consisté à utiliser un interféromètre commercial associé à une méthode de contrôle de position grâce à laquelle une répétabilité et une résolution de déplacement nanométriques sont atteintes selon les deux directions du plan horizontal. Le dispositif de contrôle intégral est constitué, pour chaque axe de déplacement, d'un interféromètre hétérodyne associé à une platine de translation, un actionneur piézoélectrique, une électronique de contrôle de l'étage piézoélectrique et un algorithme pour le contrôle simultané des deux étages. L'actionneur piézoélectrique a pour tâche de corriger les erreurs engendrées par les platines pendant le déplacement.

Le système de contrôle de position a été adapté afin de contrôler le déplacement de la plateforme porte-échantillon sous des microscopes AFM et SNOM commerciaux. La plateforme double étage représente un système porte-échantillon non-encombrant, autonome et opérationnel indépendamment de l'appareillage utilisé, tout en ayant une résolution de

déplacement et une répétabilité de positionnement inférieures au nanomètre. Combinées à une dynamique de déplacement millimétrique et une grande vitesse de déplacement, ces caractéristiques permettent à la plateforme double-étage d'être utilisée dans différentes applications. Les résultats des mesures présentées au dernier chapitre de cette thèse montrent la capacité de la plateforme porte-échantillon à effectuer des caractérisations multi-échelles permettant de mieux exploiter un composant ou d'améliorer la mesure de certains paramètres.

Ces travaux sont couplés avec d'autres travaux du laboratoire où l'environnement de l'application est plus exigeant, par exemple la lithographie. Une source laser est en cours de développement afin d'augmenter la puissance émise et de minimiser les erreurs résiduelles dues aux imperfections des polarisations tout en permettant un fonctionnement sous vide.

Le projet « POsitionnement NAnométrique Multi-échelle » (PONAME – ANR Pnano2008) entre le laboratoire LISV, le laboratoire LNIO et le partenaire industriel « ISP System » vise à réaliser un prototype précommercial de platine porte-échantillon pour la microscopie à champ proche et la lithographie. L'objectif est d'étendre la gamme d'utilisation de ces deux champs applicatifs tout en conservant la finesse de déplacement. Les premières études visent à développer un capteur optique de faible encombrement pouvant être intégré dans la plateforme.

ANNEXE A

INTERFÉROMÈTRE HÉTÉRODYNE DE SPECKLE

1. Interférométrie hétérodyne par modulation d'une diode laser

L'interférométrie hétérodyne est très répandue dans les mesures dimensionnelles nécessitant de grandes exactitudes. Plusieurs techniques sont utilisées pour séparer les fréquences afin d'obtenir une source hétérodyne. Ces techniques reposent parfois sur la rotation d'un élément mécanique, ce qui engendre des erreurs, ou sur des composants optiques assez chers. Contrairement à ces techniques, moduler la longueur d'onde d'une diode laser représente une méthode facile et moins onéreuse pour obtenir une source hétérodyne.

Les diodes lasers sont intéressantes vu leur petite taille, leur grande efficacité et la possibilité de moduler à haute fréquence. Les diodes lasers peuvent être utilisées comme sources de lumière pour les mesures interférométriques. La longueur d'onde d'une diode laser peut être modulée en faisant varier le courant d'injection ou la température. Il en résulte la possibilité d'utiliser une diode laser modulée en fréquence dans les interféromètres à décalage de phase. La diode laser sert à la fois comme source de lumière ainsi que pour décaler la fréquence.

2. Description de l'interféromètre hétérodyne de Speckle

Dans cette partie, nous décrivons un système interférométrique pour la mesure de déplacement basé sur la modulation d'une diode laser permettant ainsi d'obtenir une source de lumière hétérodyne.

Le schéma de principe est montré sur la Figure 1. Une diode laser (*DL*) est modulée en courant ce qui fait moduler sa longueur d'onde. Le faisceau en sortie de la diode laser est séparé en deux parties à l'aide d'un cube séparateur non-polariseur (*CSNP*). Chaque partie du faisceau parcourt un chemin optique différent. Les deux chemins optiques sont légèrement

différents en longueur ; ceci est obtenu en envoyant le premier faisceau sur le miroir M_2 avant de l'envoyer sur le miroir M_3 . Ces deux faisceaux sont ainsi envoyés vers une surface de dispersion (S) claire et réfléchissante collée sur un actionneur déplaçant S selon l'axe X . Ces deux faisceaux sont ensuite réfléchis vers un photodétecteur D après collection à l'aide d'une lentille convergente L_3 . Le déplacement de l'actionneur et donc de la surface de dispersion va engendrer une variation de la phase optique. Le photodétecteur D capte l'intensité de l'interférence de speckle. Une carte d'acquisition (DAQ) échantillonne ce signal pour être traité par un ordinateur afin d'en extraire l'information sur la position.

Suite au déplacement d'un objet à la vitesse v , la fréquence vue par le photodétecteur D va changer par effet Doppler comme suit :

$$f_a = f_0 \times \left(1 + \frac{v \sin \theta}{c}\right) \quad (\text{A.1})$$

où f_0 est la fréquence initiale avant le mouvement, c la vitesse de la lumière, et θ l'angle d'incidence [Figure 2]. De même, pour le deuxième faisceau :

$$f_b = f_0 \times \left(1 - \frac{v \sin \theta}{c}\right) \quad (\text{A.2})$$

où $k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde. En raison de la variation de la fréquence, le nombre d'onde du premier faisceau peut s'écrire :

$$k_a = \frac{2\pi}{\lambda_a} = \frac{2\pi}{c/f_a} = \frac{2\pi}{c} f_0 \cdot \left(1 + \frac{v \cdot \sin \theta}{c}\right) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left(1 + \frac{v \cdot \sin \theta}{c}\right) \quad (\text{A.3})$$

De même pour le deuxième faisceau,

$$k_b = \frac{2\pi}{\lambda_b} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left(1 - \frac{v \cdot \sin \theta}{c}\right) \quad (\text{A.4})$$

Après réflexion sur la surface de dispersion, le champ électrique vu du premier faisceau est :

$$E_a = E_0 \cdot e^{i(k_a l_a + k_a l_D)} = E_0 e^{i \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} l_a + \frac{2\pi}{\lambda_0} \left(1 + \frac{v \cdot \sin \theta}{c}\right) l_D \right]} = E_0 e^{i \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} (l_a + l_D) + \frac{v \cdot \sin \theta}{c} l_D \right]} \quad (\text{A.5})$$

où l_a et l_b représentent respectivement les longueurs des deux bras de l'interféromètre entre la source laser et l'actionneur. l_D représente la distance parcourue par la lumière entre l'actionneur et le photodétecteur D .

Ce qui donne :

$$E_a = E_0 e^{i \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} (l_a + l_D) + x \cdot \sin \theta \right]} \quad (\text{A.6})$$

De même pour le 2ème faisceau :

$$E_b = E_0 e^{i \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} (l_a + l_D) - x \cdot \sin \theta \right]} \quad (\text{A.7})$$

L'intensité lumineuse d'interférence reçue par le photodétecteur D s'écrit donc :

$$I \propto 2E_0^2 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} (l_a - l_b) + \frac{4\pi}{\lambda_0} \cdot x \cdot \sin \theta \right] \right\} \quad (\text{A.8})$$

Dans ce signal, on peut voir la variation de la phase en fonction du déplacement :

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} x \sin \theta \quad (\text{A.9})$$

Le déplacement x peut donc être extrait de la variation de la phase par :

$$x = \frac{\lambda}{4\pi \sin \theta} \Phi \quad (\text{A.10})$$

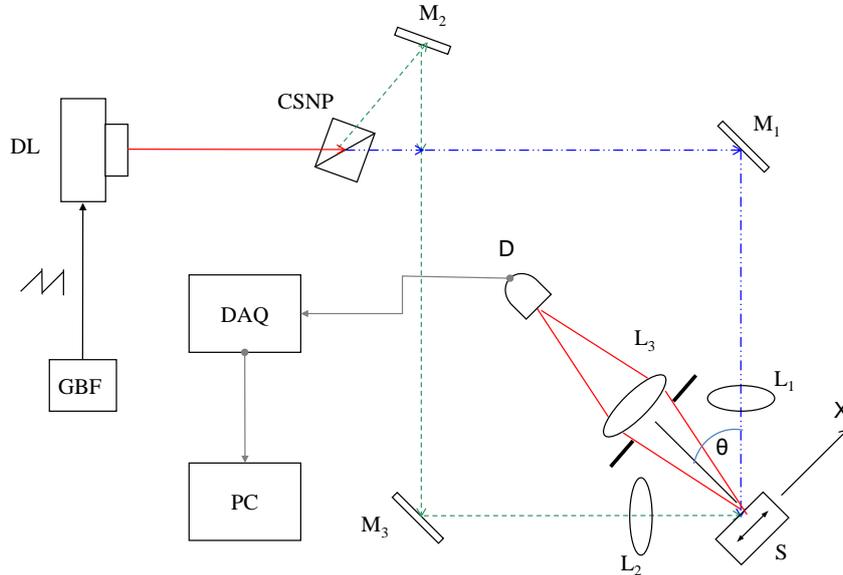


Figure 1 : Schéma de principe de l'interféromètre hétérodyne de Speckle – GBF : générateur basse fréquence, DL : diode laser, CSNP : cube séparateur non polariseur, DAQ : carte d'acquisition, PC : ordinateur, (M_1, M_2, M_3) : des miroirs, (L_1, L_2, L_3) : lentilles convergentes, S : surface de dispersion, D : photodétecteur [Lee2009]

La diode laser est modulée à l'aide d'un contrôleur en courant qui engendre la modulation de la longueur d'onde. Le signal de modulation utilisé est une dent de scie générée par un générateur basse fréquence. La variation de la longueur d'onde en fonction du temps est :

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \Delta\lambda.t \quad (\text{A.11})$$

où $\lambda(t + T) = \lambda(t)$; T étant la période du signal modulant.

L'allure du signal en sortie du photodétecteur D en fonction du temps peut être calculée de la manière suivante.

Le faisceau de la diode laser est séparé à l'aide d'un cube séparateur non polariseur ($CSNP$) en deux parties qui suivent deux chemins optiques différents. Le premier faisceau est envoyé sur le miroir M_1 pour se réfléchir vers la surface de dispersion. Le champ électrique de ce faisceau est :

$$E_1(t) = E_0 e^{ik(t).l_1} \quad (\text{A.12})$$

Le deuxième faisceau est envoyé d'abord vers le miroir M_2 puis est envoyé vers le miroir M_3 afin d'être réfléchi de même vers la surface de dispersion. Le champ électrique résultant est :

$$E_2(t) = E_0 e^{ik(t).l_2} \quad (\text{A.13})$$

où l_1 et l_2 sont les chemins optiques parcourus par les deux faisceaux, et $k(t) = 2\pi/\lambda(t)$ le nombre d'onde. Les deux faisceaux sont confondus sur la surface de dispersion à l'aide des lentilles convergentes L_1 et L_2 pour se réfléchir ensuite dans un photodétecteur D .

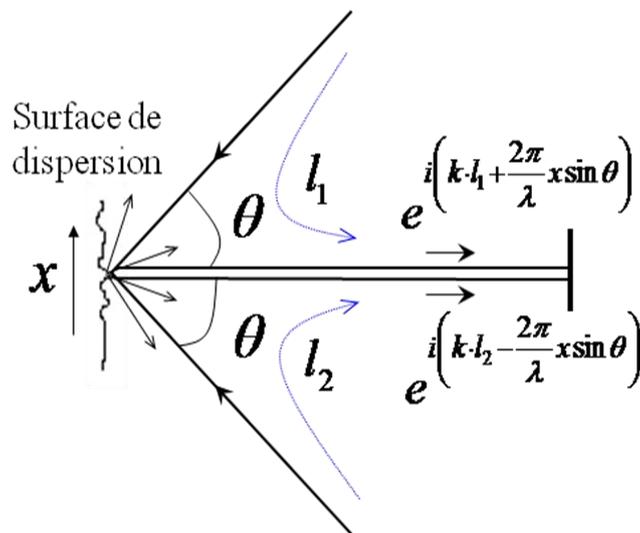


Figure 2 : Intensités lumineuses réfléchies par la surface de dispersion [Lee2009]

L'information sur le déplacement peut être extraite à partir de la variation de la phase optique. Le champ électrique du premier faisceau, suite à un déplacement, peut être exprimé par :

$$E_1(t) = E_0 e^{ik(t).l_1 + \phi_1} \quad (\text{A.14})$$

et celui du deuxième faisceau par :

$$E_2(t) = E_0 e^{ik(t).l_2 + \phi_2} \quad (\text{A.15})$$

où ϕ_1 et ϕ_2 sont les valeurs des variations des phases optiques introduites par le déplacement de l'actionneur. L'intensité lumineuse détectée par le photodétecteur D est exprimée par :

$$\begin{aligned} I(t) &\propto |E_1 + E_2|^2 = 2E_0^2 \{1 + \cos[k(t).(l_2 - l_1) + (\phi_2 - \phi_1)]\} \\ I(t) &\propto 2I_0 [1 + \cos(k(t).\Delta l + \Phi)] \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

où $\Delta l = l_2 - l_1$ est la différence du chemin optique, et $\Phi = \phi_2 - \phi_1$ la différence de phase à mesurer. La modulation de la longueur d'onde causée par la modulation en courant va avoir comme effet sur le courant du photodétecteur :

$$\begin{aligned} I(t) &\propto 2I_0 [1 + \cos(k(t).\Delta l + \Phi)] \\ I(t) &\propto 2I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\Delta l}{\lambda_0} - \frac{2\pi\Delta l.\Delta\lambda}{\lambda_0^2} t + \Phi \right) \right] \\ I(t) &\propto 2I_0 [1 + \cos(\phi_0 - wt + \Phi)] \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

où $\phi_0 = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda_0}$ est la phase initiale, et $w = \frac{2\pi\Delta l.\Delta\lambda}{\lambda_0^2}$ est le battement de fréquence.

Suite à la modulation en courant de la diode laser, le courant du photodétecteur D va varier de la même façon que le courant de modulation. Il suit que le courant dans le photodétecteur suit la forme suivante :

$$I(t) \propto (I_0 + \Delta I.t) [1 + \gamma \cos(\phi_0 - wt + \Phi)] \quad (\text{A.18})$$

Le signal obtenu possède la forme montrée sur la Figure 3.

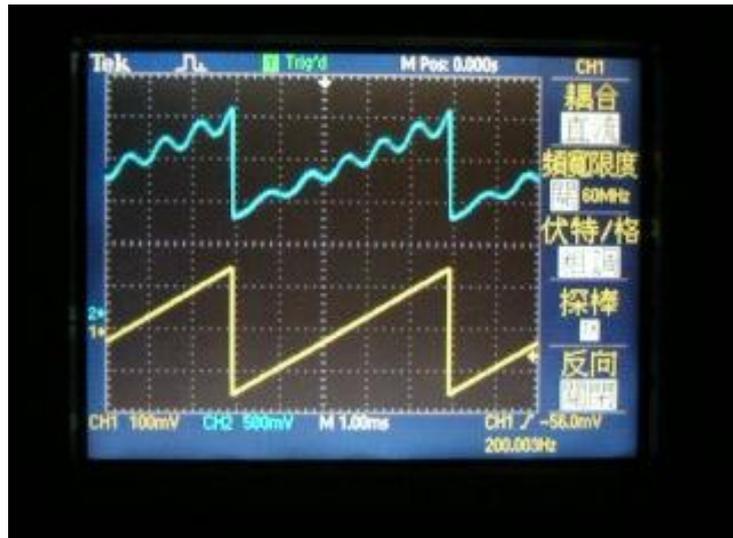


Figure 3 : Le signal détecté par le photodétecteur D en sortie de l'interféromètre (haut), et le signal modulant la diode laser (bas)

Le déplacement est obtenu par extraction de la variation de la phase du signal vu par le photodétecteur.

3. Bibliographie de l'annexe A

[Lee2009] : J.Y Lee, K.Y. Lin and S.H. Huang, Wavelength-modulated heterodyne speckle interferometry for displacement measurement, Proc. SPIE, Vol. 7389, 73892G (2009).

ANNEXE B

INTERFÉROMÈTRE HÉTÉRODYNE À RÉSEAU DE DIFFRACTION

L'interférométrie optique est un outil important pour la mesure de déplacements puisqu'elle permet une large étendue de mesure et une résolution nanométrique. La plupart des interféromètres sont à trajet non-commun, c'est-à-dire que les faisceaux de référence et de mesure ne traversent pas le même chemin. Ceci fait que ces interféromètres souffrent d'une multitude d'erreurs, notamment celles dues aux dérives thermiques et aux vibrations extérieures qui influent de manière différente sur chacun des bras de l'interféromètre. Ces erreurs sont de plus en plus accrues pour les mesures de déplacement de grande étendue. Ces interféromètres voient leur exactitude de mesure diminuer d'autant plus que l'étendue de mesure est grande ; d'où l'intérêt des interféromètres à trajet commun.

Nous décrivons un interféromètre hétérodyne à trajet quasi-commun basé sur le déplacement d'un réseau de diffraction. Cet interféromètre présente plusieurs avantages tels que la non-dépendance à la longueur d'onde du laser utilisé, ainsi que l'immunité contre les perturbations d'origine environnementale telles que les variations de température, de pression et d'humidité.

1. Variation de la phase optique lors du déplacement d'un réseau de diffraction

La Figure 4 montre un faisceau laser incident normalement sur la surface d'un réseau de diffraction sinusoïdal et unidirectionnel. La fonction de transmission T du réseau se déplaçant suivant x_0 à la vitesse v est :

$$T(x_0, t) = \frac{1 + \cos(2\pi(x_0 - vt)/d)}{2} \quad (\text{B.1})$$

où d est le pas du réseau et vt la distance parcourue par le réseau. La diffraction de Fraunhofer dans le champ lointain est :

$$E(x) = e^{ik(z+x^2/2z)} \int_{-\infty}^{\infty} T(x_0, t) e^{\frac{-ikxx_0}{z}} dx_0$$
$$E(x) = e^{ikl} \left[\delta\left(\frac{x}{\lambda z}\right) + \delta\left(\frac{x}{\lambda z} + \frac{1}{d}\right) e^{(-i2\pi/d)vt} + \delta\left(\frac{x}{\lambda z} - \frac{1}{d}\right) e^{(i2\pi/d)vt} \right] \quad (\text{B.2})$$

où $k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde, λ la longueur d'onde du faisceau incident et z la distance entre le réseau et l'écran. Si l'on considère que $l \approx z + x^2/2z$ est la distance de propagation du faisceau diffracté en sortie du réseau et que $\Delta x = vt$, on obtient :

$$E \propto e^{ikl+i2\pi\Delta x/d} \quad (\text{B.3})$$

Pour un ordre m quelconque du réseau de diffraction, on a :

$$E_m \propto e^{i(kd_m+\phi_m)} \quad (\text{B.4})$$

Où d_m est la distance parcourue par le faisceau diffracté d'ordre m .

Cette équation montre que lorsque le réseau traverse une distance Δx à la vitesse v , les phases optiques ϕ_m des ordres des faisceaux diffractés vont varier par effet Doppler selon la formule suivante :

$$\phi_m = \frac{2\pi\Delta x}{d} \quad (\text{B.5})$$

Le déplacement Δx peut donc être obtenu en mesurant la variation de la phase optique ϕ_m pour un réseau de diffraction ayant un pas d .

2. Interférométrie hétérodyne pour la mesure de la variation de la phase optique

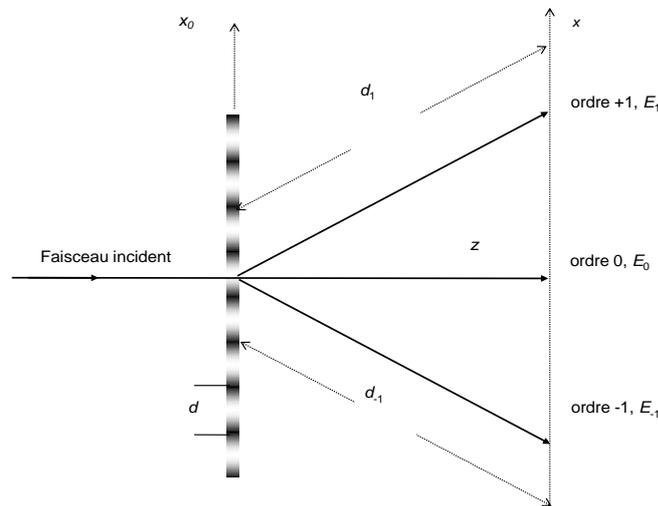


Figure 4 : Schéma représentant la diffraction dans le réseau [Lee2007]

Soit un faisceau laser polarisé linéairement à 45° par rapport à l'axe x . L'axe rapide du modulateur électro-optique est selon x . Quand ce faisceau polarisé linéairement traverse le

modulateur électro-optique, les phases des composantes horizontale p et verticale s varient. La différence de phase entre les composantes s et p dépend de l'amplitude de la tension V de modulation du modulateur électro-optique. Si ce retard de phase est π , la tension de modulation externe V est appelée *tension demi-onde*, et sera notée $V_{\lambda/2}$. Dans notre cas, le modulateur électro-optique est modulé avec une tension $V = V_{\lambda/2}$ alternative à la fréquence angulaire ω . Lorsque le faisceau polarisé linéairement passe à travers le modulateur électro-optique, une différence de fréquence ω entre les composantes s et p va apparaître. Le faisceau résultant constitue donc une source de lumière hétérodyne. Son vecteur de Jones est :

$$E_A = EOM(\omega t).E_{in} \propto \begin{pmatrix} e^{i\omega t/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\omega t/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{i\omega t/2} \\ e^{-i\omega t/2} \end{pmatrix} \quad (\text{B.6})$$

Ce faisceau est collimaté à l'aide de deux lentilles demi-cylindriques L_1 et L_2 placées en opposition de telle façon à avoir un faisceau plus large en sortie [Figure 5]. Une partie du faisceau élargi continue son chemin tandis que l'autre traverse une lame demi-onde. Cette lame demi-onde a pour but de tourner de 90° la polarisation du faisceau incident. La partie du faisceau traversant la lame demi-onde aura comme vecteur de Jones :

$$E_B = \begin{pmatrix} e^{-i\omega t/2} \\ e^{i\omega t/2} \end{pmatrix} \quad (\text{B.7})$$

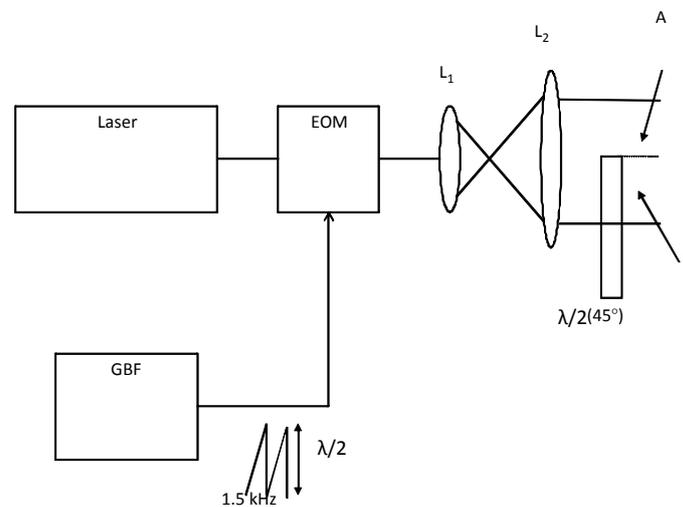


Figure 5 : Génération du faisceau hétérodyne. GBF : générateur basse fréquence. EOM : modulateur électro-optique. L_1 et L_2 : lentilles demi-cylindriques placées en opposition. $\lambda/2$: lame demi-onde, A et B : les deux parties du faisceau collimaté par L_1 et L_2 [Lee2007]

Les deux parties E_A et E_B sont ensuite recombinaées et convergent par le moyen d'une lentille convergente sur le réseau de diffraction [Figure 6]. La lentille convergente est

positionnée de telle sorte que ce soient les ordres adjacents diffractés en sortie du réseau de diffraction qui divergent et se recouvrent partiellement. De cette façon, l'ordre 0 du faisceau diffracté va recouvrir une partie de l'ordre +1 et produire une figure d'interférence. Cette partie commune du faisceau est ensuite séparée en deux parties à l'aide d'un cube séparateur (CS) pour être envoyée vers une détection hétérodyne. Après passage à travers des polariseurs $P(0^\circ)$ et $P(90^\circ)$ ayant leurs axes de transmission respectivement à 0° et à 90° , les faisceaux d'interférence sont détectés au niveau de deux photodétecteurs D_1 et D_2 .

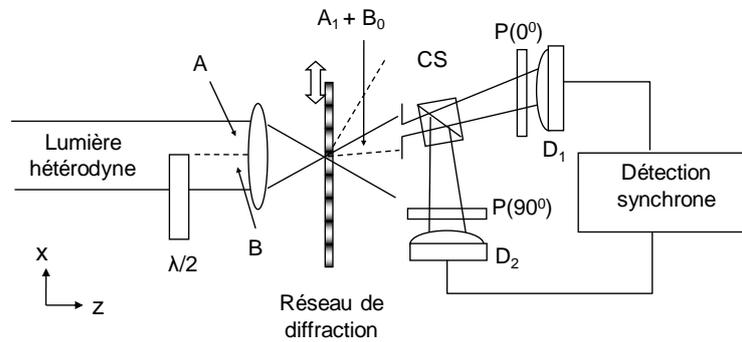


Figure 6 : Schéma de l'interféromètre hétérodyne à réseau de diffraction [Lee2007]

D'après le formalisme de Jones, l'intensité du faisceau d'interférence au niveau du photodétecteur D_1 est :

$$\begin{aligned}
 I_1 &\propto \left| P(0^\circ) \cdot (A_1 + B_0) \right|^2 \\
 I_1 &\propto \left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \left[\begin{pmatrix} e^{i\omega t/2} \\ e^{-i\omega t/2} \end{pmatrix} e^{i(kd_1 + \phi_1)} + \begin{pmatrix} e^{-i\omega t/2} \\ e^{i\omega t/2} \end{pmatrix} e^{i(kd_0 + \phi_0)} \right] \right]^2 \\
 I_1 &\propto \cos[\omega t + k(d_1 - d_0) + (\phi_1 - \phi_0)]
 \end{aligned} \tag{B.8}$$

Similairement, le faisceau d'interférence au niveau du photodétecteur D_2 s'écrit :

$$I_2 \propto \cos[\omega t - k(d_1 - d_0) - (\phi_1 - \phi_0)] \tag{B.9}$$

Les deux signaux l_1 et l_2 sont ensuite envoyés vers une détection synchrone qui fournira la différence de phase entre les deux signaux. Cette différence de phase Φ est donnée par :

$$\begin{aligned}\Phi &= [k(d_1 - d_0) + (\phi_1 - \phi_0)] - k(d_1 - d_0) - (\phi_1 - \phi_0) \\ \Phi &= 2k(d_1 - d_0) + 2(\phi_1 - \phi_0)\end{aligned}\quad (\text{B.10})$$

En supposant que les deux chemins optiques sont identiques ($d_1 = d_2$) et que $\phi_0 = 0$, cette différence de phase devient alors :

$$\Phi = 2\phi_1 = \frac{4\pi X}{p}\quad (\text{B.11})$$

où X est le déplacement et p le pas du réseau de diffraction. Cette équation montre que le déplacement peut être calculé étant donnés la différence de phase Φ et le pas du réseau p à l'aide de la formule :

$$X = \frac{p\Phi}{4\pi}\quad (\text{B.12})$$

3. Résultats expérimentaux

Un laser He-Ne émet un faisceau polarisé linéairement avec une longueur d'onde de 632,8 nm. Ce faisceau passe à travers un modulateur électro-optique (New Focus 4001) pour obtenir en sortie une source de lumière hétérodyne. La différence de fréquence des polarisations s et p est de 1,5 KHz. Le réseau de diffraction, ayant un pas de 1,6 μm , est monté sur un actionneur piézoélectrique tridimensionnel [Figure 7]. La différence de phase optique est mesurée à l'aide d'une détection synchrone ayant une résolution angulaire de $0,001^\circ$; ce qui fait que la résolution théorique du déplacement est de 2 pm.

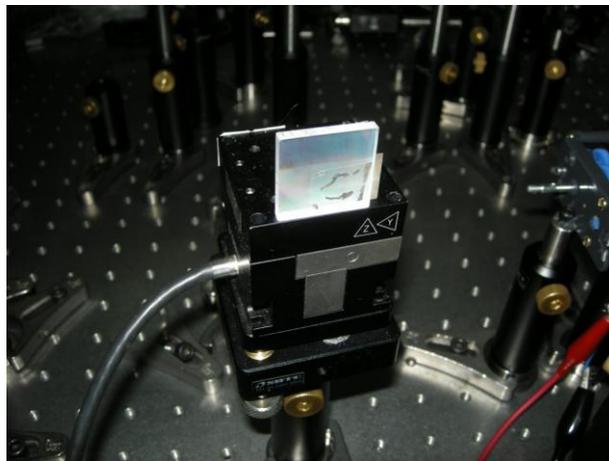


Figure 7 : Le réseau de diffraction monté sur un actionneur piézoélectrique

La Figure 8 montre un déplacement sinusoïdal de fréquence 0,5 Hz effectué avec l'actionneur piézoélectrique sur lequel est monté le réseau de diffraction. La Figure 8a montre un déplacement d'amplitude 1174 nm crête-à-crête mesuré avec l'interféromètre hétérodyne à réseau de diffraction. Afin de vérifier ces mesures, un capteur capacitif mesure en même temps que l'interféromètre. Les mesures prises avec le capteur capacitif sont montrées sur la Figure 8b.

Ces mesures montrent la haute résolution et la réponse rapide de l'interféromètre.

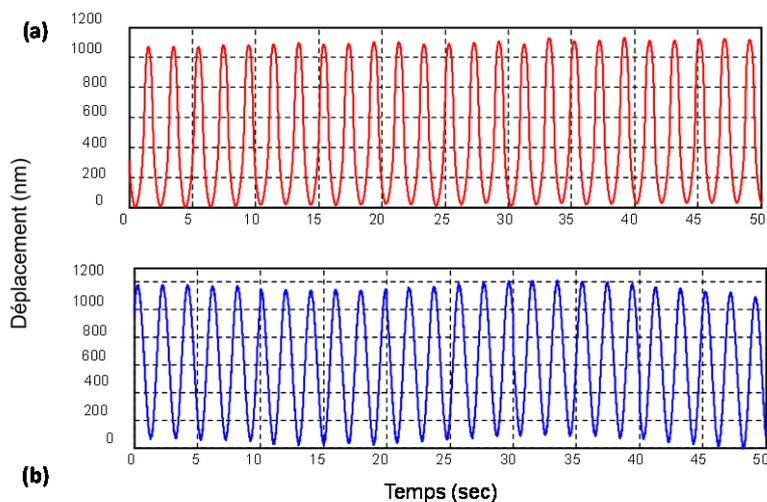


Figure 8 : Déplacement de courte étendue. (a) Déplacement sinusoïdal d'amplitude 1174 nm crête-à-crête mesuré avec l'interféromètre hétérodyne à réseau de diffraction. (b) Le même déplacement mesuré simultanément à l'aide d'un capteur capacitif

L'étage de déplacement a été ensuite déplacé sur une course micrométrique. La Figure 9 montre un déplacement sinusoïdal et un déplacement triangulaire de 22 μm crête-à-crête chacun, mesurés à l'aide de l'interféromètre hétérodyne à réseau de diffraction. Ces résultats montrent la capacité de cet interféromètre à effectuer des mesures sur des étendues de déplacement micrométriques.

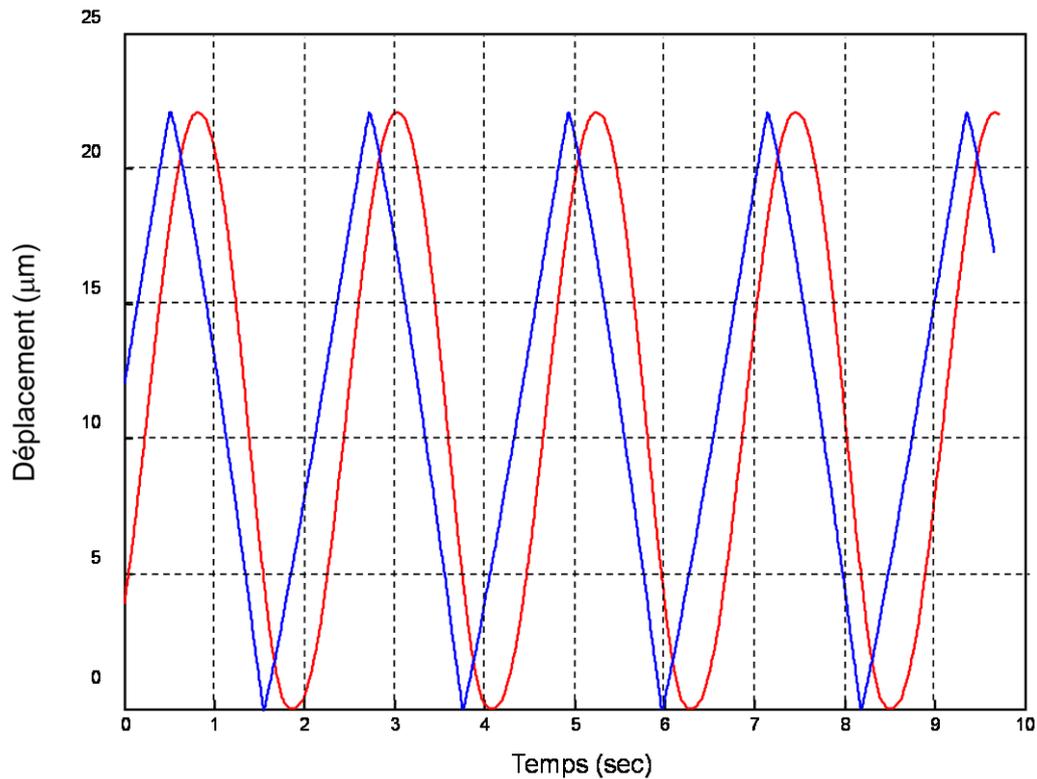


Figure 9 : Déplacements sinusoïdal (rouge) et triangulaire (bleu) d'amplitude $22 \mu\text{m}$ crête-à-crête mesurés à l'aide de l'interféromètre hétérodyne à réseau de diffraction.

Afin de mesurer la stabilité de l'interféromètre hétérodyne à réseau de diffraction, l'étage de déplacement a été maintenu stationnaire pendant une heure. La Figure 10 montre que l'interféromètre subit une dérive de 50 nm sur une heure. De plus, cette figure montre des altérations basses fréquences de 10 nm d'amplitude. Celles-ci sont probablement dues aux dérives thermiques.

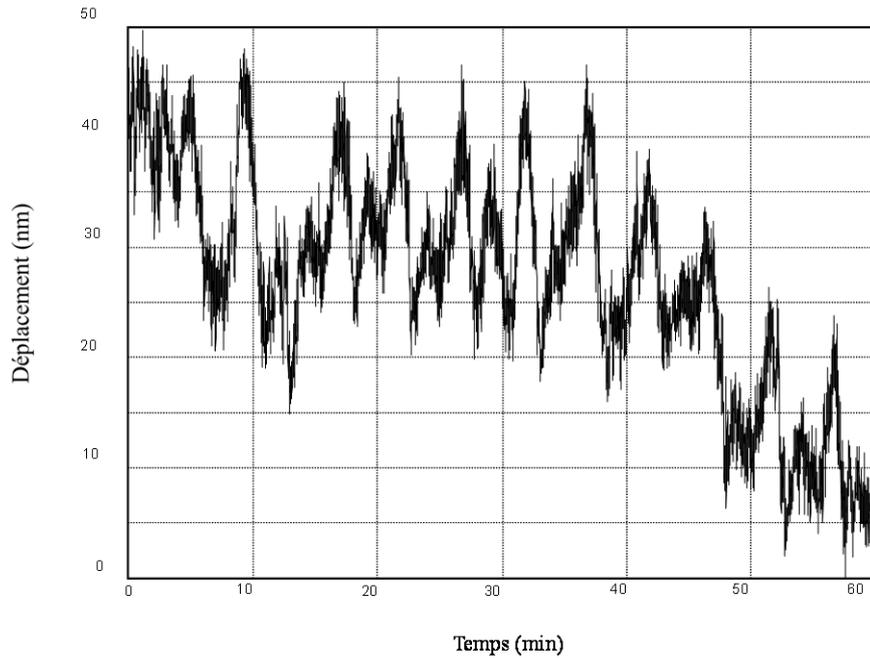


Figure 10 : Test de stabilité de l'interféromètre hétérodyne à réseau de diffraction

Dans la configuration de l'interféromètre hétérodyne à trajet quasi-commun à réseau de diffraction, les deux faisceaux traversent le même chemin sauf la partie qui passe à travers la lame demi-onde ; d'où la dénomination *trajet quasi-commun*. Cette caractéristique confère à cet interféromètre une immunité contre les effets non désirables dus aux variations des conditions environnantes.

4. Bibliographie de l'annexe B

[Lee2007] : Ju-Yi Lee, Hui-Yi Chen, Cheng-Chih Hsu, Chyan-Chyi Wu, *Optical heterodyne grating interferometry for displacement measurement with subnanometric resolution*, *Sensors and Actuators A* 137 (2007) 185–191

PUBLICATIONS

Revues internationales à comité de lecture

- G. Lérondel, **A. Sinno**, L. Chassagne, S. Blaize, P. Ruaux, A. Bruyant, S. Topçu, P. Royer, Y. Alayli, *Enlarged near field optical imaging*, Journal of Applied Physics, 106, 044913 (2009)
- **A. Sinno**, P. Ruaux, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, G. Lérondel, S. Blaize, A. Bruyant, P. Royer, *2D Enlarged atomic force microscopy scanning scope: novel sample-holder device with millimetre range*, Review of Scientific Instruments, 78, 095107 (2007)

Conférences internationales à comité de lecture et actes

- S. Topsu, L. Chassagne, **A. Sinno**, P. Ruaux, Y. Alayli, G. Lérondel, S. Blaize, A. Bruyant, P. Royer, *Millimeter scale topographical image of highly integrated optical structures using enlarged metrological atomic force microscope*, Oral communication at SPIE Photonics Europe 2010 conference (Bruxelles - Belgium), April 2010
- **A. Sinno**, L. Chassagne, P. Ruaux, Y. Alayli, G. Lérondel, S. Blaize, A. Bruyant, P. Royer, *Microscopie en champ proche multi-échelle : du nanomètre au millimètre*, Proc. 50 Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation C2I (Le Mans - France), January 2010
- **A. Sinno**, P. Ruaux, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, G. Lérondel, S. Blaize, A. Bruyant, P. Royer, *Enlarged sample-holder for optical AFM imaging: millimetre scanning with high resolution*, Oral communication at IEEE Eurocon 2009 Conference (Saint-Petersburg – Russia), CD ISBN 978 1-4244-3861-7/09, pp2070-2074, May 2009
- **A. Sinno**, L. Chassagne, P. Ruaux, S. Topçu, Y. Alayli, G. Lérondel, P. Royer, S. Blaize, I. Stefanon, *Platine porte-échantillon à course millimétrique pour la microscopie en champ proche*, Poster au 10^e Forum des microscopies à sondes locales, (Troyes - France), March 2007
- **A. Sinno**, P. Ruaux, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, G. Lérondel, P. Royer, S. Blaize, I. Stefanon, *Large area coverage sample-holder unit for enhanced near-field microscopy applications*, Proc. ISOT 6716-OP8, EPFL-Suisse, Oct 2007

Enlarged near-field optical imaging

G. Lérondel,^{1,a)} A. Sinno,² L. Chassagne,^{2,a)} S. Blaize,¹ P. Ruaux,² A. Bruyant,¹ S. Topçu,² P. Royer,¹ and Y. Alayli²

¹Laboratoire de Nanotechnologie et d'Instrumentation Optique, Institut Charles Delaunay, Université de Technologie de Troyes, CNRS FRE 2848, 12 rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes Cedex, France

²Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles, EA 4048, Université de Versailles Saint Quentin, 45 avenue des Etats Unis, 78035 Versailles Cedex, France

(Received 16 March 2009; accepted 6 July 2009; published online 31 August 2009)

Millimeter scale near-field optical microscopy is here reported. It is demonstrated in the near infrared by observing light propagating in an integrated glass waveguide. Enlarged near-field imaging was made possible thanks to the use of a homemade interferometric translation stage with nanometric scale repeatabilities combined with a commercial atomic force microscope. An integrated optical component was used as a representative example of multiscale components requiring large scale highly resolved optical mapping. By imaging stationary waves on a millimeter long range followed by Fourier analysis, an uncertainty of a few 10^{-4} on the waveguide modes effective index was obtained. While improving the optogeometrical parameter retrieval precision, millimeter scans make the technique sensitive to properties such as birefringence. © 2009 American Institute of Physics. [DOI: 10.1063/1.3200953]

I. INTRODUCTION

In conventional scanning near-field microscopy including atomic force microscopy and near-field optical microscopy, the use of piezoelectric stages limits the investigation scale to a few tens of micrometers. This almost prevents the multiscale observation of large nanostructured samples. Among these samples integrated optical waveguiding structures and related scanning near-field optical microscopy (SNOM) appear of special interest. By making possible to observe the light confined in the structure, SNOM is indeed a unique characterization tool for integrated optics and photonic materials. First demonstrated in 1994,¹ today's SNOM phase sensitive measurements allow for quantitative analysis of parameters such as effective index, insertion loss,² group velocity,³ and *in situ* local reflection coefficient⁴ retrieval. While the potential of the technique is now demonstrated, the measurement accuracy remains directly limited by the scanning area. In order to improve the accuracy and make the observation of the entire structure possible (chip scale), millimeter size near-field optical imaging is required. While this has been demonstrated by stitching micrometer scale images together,⁵ the stitching approach is, however, time consuming and the accuracy relies on topographical patterns (defects). Recently, we demonstrated by using a twofold equipment combining a commercial atomic force microscope (AFM) and a homemade piezomicrointerferometric stage that millimeter range AFM scanning is possible.⁶ While large scale AFMs are under development in the major worldwide metrological institutes,⁷⁻¹² large scale near-field optical imaging has not yet been reported. In this paper, we show that millimeter scale optical near-field imaging is also possible. As an example, the light propagation in a glass integrated

waveguide has been investigated. The numerous advantages of multiscale highly resolved optical imaging will be discussed based on experimental results.

II. EXPERIMENTAL DETAILS

Figure 1 shows a schematic view of the enlarged near-field optical microscope. The system consists in a homemade interferometric stage combined with a commercial AFM (Park Scientific Instrument). The AFM tip working in tapping mode provides the near-field information while a heterodyne laser interferometry allows to measure and to control the sample position with nanometric scale repeatabilities. Details of the homemade interferometric stage and its integration under the AFM can be found in Ref. 6. The optical laser source used in the experiment is a tunable external cavity laser (Tunics) allowing an absolute wavelength uncertainty of ± 5 pm. Observations were done at $1.550\,00\ \mu\text{m}$.

In order to test the enlarged scanning optical microscope, we characterized light propagation along a single-mode ion exchange waveguide. The sample was fabricated using a two-step Ag⁺/Na⁺ ion exchange process in a silicate glass substrate and buried $3\ \mu\text{m}$ beneath the glass top surface by means of a thermal rediffusion process. The guide was formed through a $1.7\ \mu\text{m}$ diffusion aperture width. The diffusion process produces a graded index profile which cannot be accurately measured for this type of confined waveguide. The index variation is empirically estimated to be of the order of 10^{-2} above the substrate refractive index value of 1.51. Further details on such sample and the fabrication process are given in Ref. 13.

The sketch in the insert in Fig. 1 shows the typical dimensions involved in the experiment. The sample under investigation is a 2 cm long straight waveguide while its width given by the diffusion aperture is only $1.7\ \mu\text{m}$. At last, the near-field information is provided via the AFM tip oscillating

^{a)}Authors to whom correspondence should be addressed. Electronic addresses: gilles.lerondel@utt.fr and luc.chassagne@uvsq.fr.

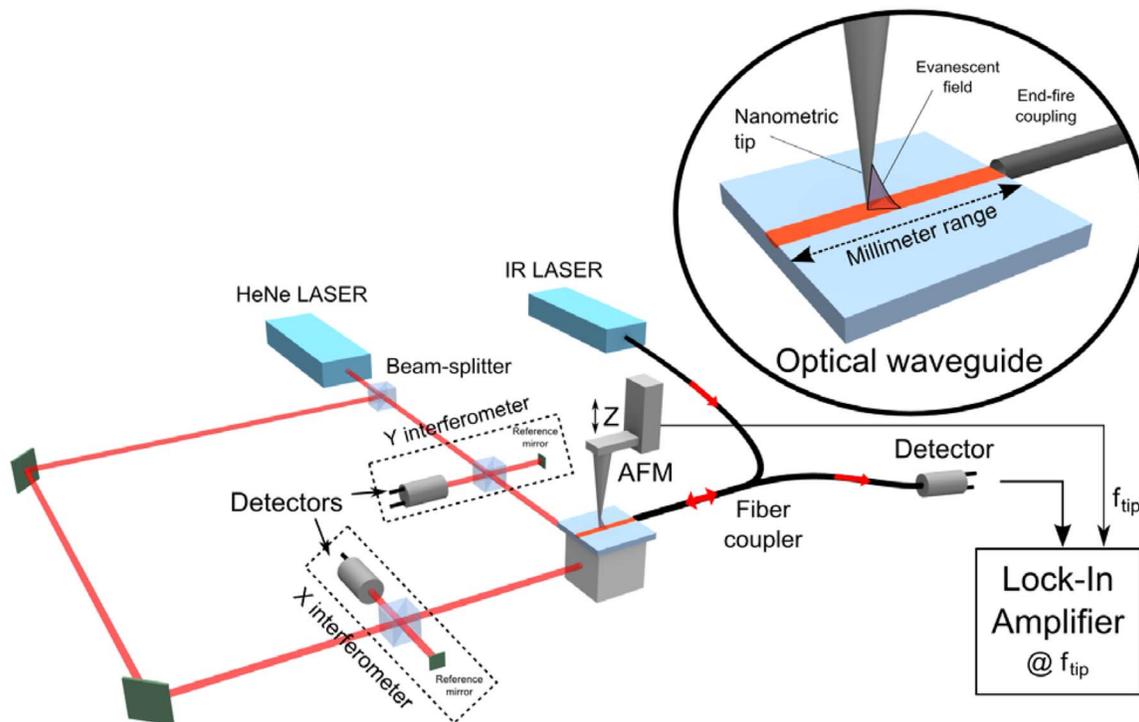


FIG. 1. (Color online) Schematic view of the long range near-field scanning optical microscope. The two dimensional (2D) millimeter scale displacement is achieved thanks to a two linear motors actuated X and Y stages whose positions are tracked in both directions using optical interferometers. A 2D piezoelectric actuator allows for displacement deviations to be corrected. The sample under investigation is a single-mode channel integrated waveguide. The optical near-field information (cf. insert) is provided using an AFM tip working in tapping mode (scattering type of SNOM).

with an amplitude of 100 nm. The waveguide is metallized at one extremity in order to enhance the reflexion at the exit of the waveguide and thus induce stationary waves within the guiding structure.

To simplify the optical detection scheme and following the idea of the recently proposed integrated detection transmission SNOM,¹⁴ the AFM-tip modulated signal is here detected in reflection using the counterpropagating mode as the modulated signal vector. As shown in Fig. 1, this is made possible thanks to a Y splitter used for both injection and collection.

As already discussed in Ref. 6 three possible scanning modes can be used for enlarged scanning near-field microscopy. The X and Y directions will thereafter refer to the fast and slow scanning directions, respectively. The so-called line by line mode was used. Scans in the X direction are performed with the linear motors without piezoelectric compensation along the displacement axis. The piezoelectric stage only compensates the straightness along the Y axis. Thanks to a fast acquisition board, the AFM acquisition is synchronized with the linear motor motion. This mode is not optimized for position control but for acquisition time.

Two scanning near-field optical images, hereafter referred to as A and B, are presented. The image A is composed of 27 $100\ \mu\text{m}$ long scans spaced by 300 nm. A scanning speed of $5\ \mu\text{m}/\text{s}$ and an acquisition interval of 60 nm were used. The image B is composed of 200 $1.1\ \text{mm}$ long scans spaced by 150 nm. A scanning speed of $30\ \mu\text{m}/\text{s}$ and an acquisition interval of 100 nm were used. The total fields of view for images A and B are thus 100×8 and $1.1 \times 30\ \mu\text{m}^2$, respectively. In the case of SNOM imaging the

optical signal to noise ratio has also to be considered. Images A and B have been obtained with integration times on the lock-in amplifier of 5 and 2 ms, respectively.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2(a) shows a typical $100\ \mu\text{m}$ long optical image (image A). A clear intensity modulation can be observed along the fast scan direction. Figure 2(b) shows the averaged fast Fourier transform (FFT) along that direction. From this type of Fourier transform, modal analysis can be performed and important optical characteristics of the waveguide can be retrieved such as the number and the effective index of the optical modes supported by the waveguide.¹⁵ The intensity modulation clearly observable on the inset corresponding to

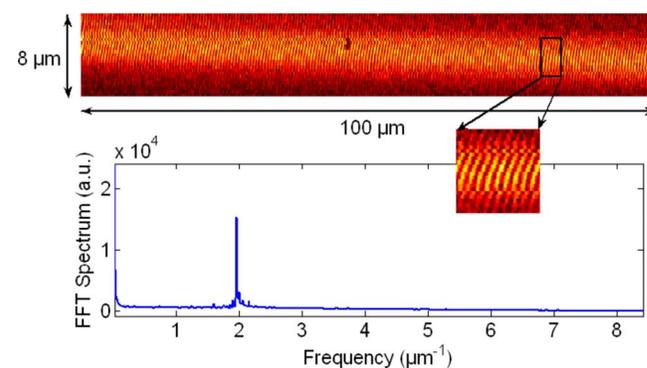


FIG. 2. (Color online) $100\ \mu\text{m}$ scale test sample image. (a) $100\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$ near-field optical image and (b) corresponding line by line averaged FFT analysis. FFT analysis allows for a precise measurement of the interference pattern (cf. zoom) periodicity.

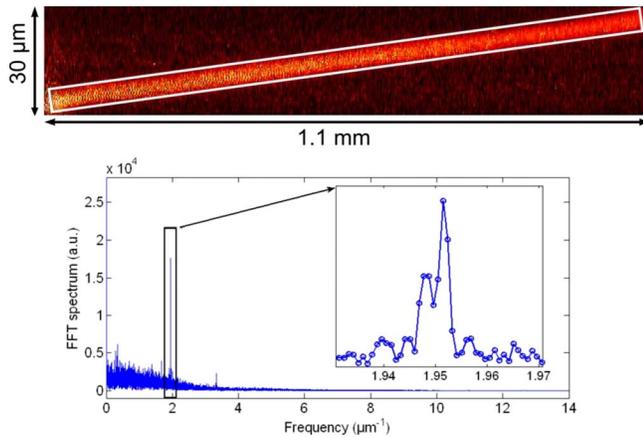


FIG. 3. (Color online) Millimeter scale image: (a) $1100 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ near-field optical image and (b) corresponding line by line averaged FFT analysis

a zoomed area evidences the interference of forward and backward propagating modes. The single peak on the FFT confirms that at $1.55 \mu\text{m}$ the waveguide only supports a single mode. From the FFT peak position, the intensity modulation periodicity p can be measured, and from there, the propagation wavelength of the guided light $\lambda_G = 1025 \pm 6 \text{ nm}$. The uncertainty on the peak position measurement is deduced from the spectral width [full width at half maximum (FWHM)] of the FFT. Taking into account the optical wavelength ($\lambda_0 = 1.5500 \mu\text{m}$) the effective index of the mode and uncertainty are straightforwardly obtained using the following equations:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\lambda_0}{\lambda_G} = \frac{\lambda_0}{2p}, \quad (1)$$

$$\Delta n_{\text{eff-FWHM}} = \Delta \lambda_G \frac{\lambda_0}{\lambda_G^2}, \quad (2)$$

where $\Delta \lambda_G$ is the FWHM measured on the curve. One finds here 1.512 ± 0.009 in agreement with previous SNOM based modal analysis.¹⁵

Figure 3(a) shows a 1.1 mm long near-field image (image B). To the best of our knowledge this is the largest near-field optical image ever realized. Actually, we already reported a 2 mm long mapping of a glass integrated Y junction but this was achieved by stitching 25 images of $50 \times 20 \mu\text{m}^2$ each.⁵ Besides being time consuming, the stitching approach is only possible if topographical details are available to ensure accurate stitching of the images together. Figure 3(b) shows the average Fourier transform of the adjacent scans. As for the previous image, similar information on the optogeometrical parameters can be retrieved but, due to a longer scan length, with a better resolution. Surprisingly, one finds here two peaks instead of one. As for the image 2(b), from the peak positions and FWHM the guided wavelengths can be retrieved; for the left peak, $\lambda_{G1} = 1026.5 \pm 0.8 \text{ nm}$ and $n_{\text{eff1}} = 1.510 \pm 0.001$, while for the right peak $\lambda_{G2} = 1024.6 \pm 0.6 \text{ nm}$ and $n_{\text{eff2}} = 1.5126 \pm 0.0009$. Before discussing the origin of these two peaks let us discuss the precision of the measurement.

With an uncertainty on the refractive index of less than 10^{-3} , SNOM based modal analysis appears definitively as an alternative qualitative characterization technique for integrated waveguiding samples.

Based on Fourier transform, the resolution of the modal analysis using SNOM is directly related to the scanning length while the bandwidth is limited by the sampling frequency. Therefore, to improve the accuracy while keeping the bandwidth the same, there is an obvious interest of increasing the scanning area while preserving the scan resolution.

If we assume that the accuracy on the FFT peak position ($1/p$) is $1/L$ (FFT sampling interval) with L the scan length, using Eq. (1), one can easily show that the effective index resolution r is directly related to the scan length by the following relation:

$$r = \frac{\lambda_0}{2L}, \quad (3)$$

with λ_0 the wavelength in air ($1.5500 \mu\text{m}$). The contribution of the laser source spectral width is here neglected. Dealing with a discrete measurement, we verify here that the Nyquist–Shannon sampling criterion is satisfied. The sampling intervals for images A and B were, respectively, 60 and 150 nm which have to be compared to the periodicity of the stationary wave of about 500 nm. At last, due to the sample symmetry, the measured signal to noise ratio can also be increased by averaging the FFT of the different scanned lines. It is important to note that averaging will only be efficient on the waveguiding area.

Using Eq. (3), the resolution of each scan length can be estimated. One finds for image A, corresponding to the $100 \mu\text{m}$ scan length, $r = 0.008$ which has to be compared with the experimental deviation deduced from the FFT linewidth, 0.009. For image B instead, corresponding to the 1.1 mm long scan length, the expected r is equal to 0.0007 which in this case has to be compared to 0.0009. In both cases, the experimental uncertainty was found to be almost equal to the expected theoretical resolution. As already discussed in Ref. 6, various issues have to be addressed when dealing with a millimeter scale near-field microscopy. These include temperature fluctuations that induced drifts, sample flatness, and sample alignment along the scanning direction. The remarkable agreement obtained between the experimental result and the theoretical calculation shows that none of these effects has strongly affected the measurement.

A last point to be addressed is the double peak structure revealed by the FFT of the millimeter scan [cf. Fig. 3(b)]. From the two peak positions, the effective index variation can be estimated and was found to be 0.0027 ± 0.0019 . This difference is attributed to the birefringence of the waveguide. Following the ion exchange process a thermal treatment is used to bury the waveguide, but due to a remaining refractive index profile asymmetry, a birefringence in the order of 10^{-3} is still expected in such waveguide.¹⁶

IV. CONCLUSIONS

A millimeter scale near-field optical mapping has been demonstrated by observing the light propagation within a centimeter long channel optical waveguide. Compared to conventional near-field microscopy, the enlarged near-field optical microscopy combined with a Fourier analysis allows for a more accurate retrieval of the optogeometrical parameters (10^{-4}). Such an accuracy enlarges the scope of near-field optical microscopy by making the technique also sensitive to extremely low birefringence. While millimeter scale near-field imaging has been demonstrated using a waveguiding sample, the technique is not limited to this type of samples neither to the integrated detection scheme. It is fully compatible with any type of SNOM mode including aperture types and scattering types. Besides chip scale characterization, the reported technique has the potential to broaden the field of near-field microscopy by making the multiscale light-matter interaction probing possible and introducing near-field optical metrology.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to Loic Le Cunf for his help preparing Fig. 1. This work was supported by the French

ministry for research through the “nano2m3” integrated project, the “Région Champagne-Ardenne,” and the European Regional Development Fund (ERDF).

- ¹A. G. Choo and H. E. Jackson, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 947 (1994).
- ²I. Stefanon, S. Blaize, A. Bruyant, S. Aubert, G. Lerondel, R. Bachelot, and P. Royer, *Opt. Express* **13**, 5553 (2005).
- ³M. L. M. Balistreri, H. Gersen, J. P. Korterik, L. Kuipers, and N. F. van Hulst, *Science* **294**, 1080 (2001).
- ⁴A. Bruyant, G. Lérondel, S. Blaize, I. Stefanon, S. Aubert, R. Bachelot, and P. Royer, *Phys. Rev. B* **74**, 075414 (2006).
- ⁵R. Bachelot, G. Lérondel, S. Blaize, S. Aubert, A. Bruyant, and P. Royer, *Microsc. Res. Tech.* **64**, 441 (2004).
- ⁶A. Sinno, P. Ruaux, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, G. Lerondel, S. Blaize, A. Bruyant, and P. Royer, *Rev. Sci. Instrum.* **78**, 095107 (2007).
- ⁷J. Haycocks and K. Jackson, *Precis. Eng.* **29**, 168 (2005).
- ⁸R. Leach, J. Haycocks, K. Jackson, A. Lewis, S. Oldfield, and A. Yaccot, *Nanotechnology* **12**, R1 (2001).
- ⁹G. Wilkening and L. Koenders, *Nanoscale Calibration Standards and Methods* (Wiley-VCH, New York, 2005).
- ¹⁰F. Meli and R. Thalmann, *Meas. Sci. Technol.* **9**, 1087 (1998).
- ¹¹M. Holmes, R. Hocken, and D. Trumper, *Precis. Eng.* **24**, 191 (2000).
- ¹²J. A. Kramar, *Meas. Sci. Technol.* **16**, 2121 (2005).
- ¹³J.-E. Broquin, *Integrated Optics Devices Proceedings of SPIE*, edited by V. Giancarlo and C. Righini, 2001 (unpublished), Vol. 4277, pp. 105–115.
- ¹⁴J. T. Robinson, S. F. Preble, and M. Lipson, *Opt. Express* **14**, 10588 (2006).
- ¹⁵S. Blaize, S. Aubert, A. Bruyant, R. Bachelot, G. Lerondel, P. Royer, J.-E. Broquin, and V. Minier, *J. Microsc.* **209**, 155 (2003).
- ¹⁶R. V. Ramaswamy and R. Srivastava, *J. Lightwave Technol.* **6**, 984 (1988).

Enlarged atomic force microscopy scanning scope: Novel sample-holder device with millimeter range

A. Sinno, P. Ruaux, L. Chassagne, S. Topçu, and Y. Alayli
LISV, University of Versailles, 45 Avenue des Etats Unis, 78035 Versailles, France

G. Lerondel, S. Blaize, A. Bruyant, and P. Royer
Laboratoire d'Instrumentation Optique et de Nanotechnologies, ICD, CNRS FRE 2848, Université de Technologie de Troyes, 12 Rue Marie Curie BP2060, 10010 Troyes, France

(Received 15 May 2007; accepted 29 July 2007; published online 27 September 2007)

We propose a homemade sample-holder unit used for nanopositioning in two dimensions with a millimeter traveling range. For each displacement axis, the system includes a long range traveling stage and a piezoelectric actuator for accurate positioning. Specific electronics is integrated according to metrological considerations, enhancing the repeatability performances. The aim of this work is to demonstrate that near-field microscopy at the scale of a chip is possible. For this we chose to characterize highly integrated optical structures. For this purpose, the sample holder was integrated into an atomic force microscope. A millimeter scale topographical image demonstrates the overall performances of the combined system. © 2007 American Institute of Physics.

[DOI: [10.1063/1.2773623](https://doi.org/10.1063/1.2773623)]

I. INTRODUCTION

With the development of nanotechnologies, scanning over large areas with a nanometer resolution is becoming more and more important. However, millimeter range scanning is not yet commercially available. This is because nanometer specifications such as resolution, positioning accuracy, and repeatability of the displacements are to meet all along the surface to cover. At the present time, with commercial systems, displacement is either limited to about a hundred of micrometers or possible on the millimeter scale but with limited accuracy and repeatability (typically in the order of the micrometers). Furthermore, repeatability is often neglected restricting the scope of applications. The technological progress of industrial apparatus makes us think this will be a serious challenge in the near future.¹ Yet, cutting-edge technologies are seeking new frontiers: microelectronics, near-field characterization of large scale structures, and electronic lithography for very large scale patterning, for example. The concepts of traceability, accuracy, and repeatability are thus essential. In this work, we report on a displacement system with a millimeter range and a nanometric positioning repeatability and traceability in both X and Y directions. In addition we show that this system is compatible with a commercially available atomic force microscopy (AFM) head.

This study was initially targeted toward applications in scanning probe microscopy (SPM). Surface inspection of optical components will require millimeter long scans along the light propagation axis. This is the case of lightwave device characterization where a combined AFM for topography imaging and a scanning near-field optical microscope (SNOM) for optical inspection is used. The aim is to observe the emitting or internal field of a structure according to its geometry.² Such a scan may reveal relevant information such as the

phase and amplitude of the profiles of the guided field and from there, the mode effective indexes or refractive index profiles and local diffraction losses. When combined with Fourier transform, long scans become necessary to increase the precision of the refractive index measurement.³ At the time being, SPM scans are only possible over $100\ \mu\text{m}$, which is the piezoelectric actuator (PZT) limit. Moreover, the electronic bandwidth of the PZT is quite low in these apparatus. The resolution is also limited by the acquisition system, which limits the number of points to typically 1024 in both directions. In this case, scanning over the full range of $100\ \mu\text{m}$ leads to a poor resolution of about $100\ \text{nm}$. Nanometric resolution can thus be obtained only for micrometric scans.

The method currently used to overcome the $100\ \mu\text{m}$ limit consists in stitching together overlapping elementary microscopic 2D scans.³ A typical overlapping percentage of about 30% on each side of the scanned area is necessary. The overlapping scans are afterwards glued together by means of image processing techniques based on the localization of distinguishable topography patterns or defects that would match on the overlapping area. This process is time consuming and limited to the presence of a significant number of signatures on the surface that would allow a precise matching. For these reasons, this method is rarely used. Another solution is to use an array of probes. In Ref. 4, an image of $2 \times 2\ \text{mm}^2$ was obtained but with a pixel size of $400\ \text{nm}$. This method requires to synchronously acquire the data from each probe, in addition to precisely mount the array of probes.

For positioning over millimeter ranges with high resolutions, the solution which appeared recently is the coupling of a mechanical displacement stage for long range motion with a precision stage for accurate positioning.⁵⁻⁷ Still under development for years to come, several metrology institutes in the world have launched projects of sample-holder systems

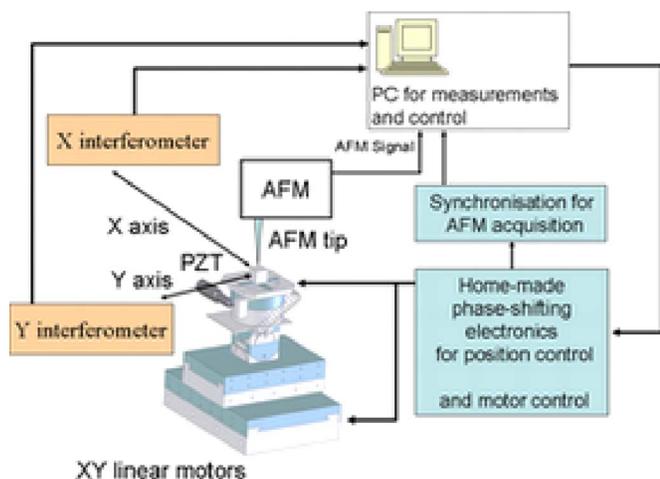


FIG. 1. (Color online) Sketch of the system. The double mechanical stage is composed of the XY linear motors and an XY piezoelectric actuator. Two interferometers allow real time position monitoring. The Personal computer (PC) unit controls the linear motors and the homemade electronic board that generates the phase-shift commands to control the piezoelectric actuators. AFM acquisition is synchronized with the XY displacements.

with nanometric resolution and accuracy over millimeter ranges: NIST (National Institute of Standards and Technology) in the USA,^{8,9} PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) in Germany,¹⁰ Metas in Switzerland,¹¹ NPL (National Physic Laboratory) in the United Kingdom,^{12,13} NIM (National Institute of Metrology) in China, and LNE (Laboratoire National de métrologie et d'Essais) in France.¹⁴ Furthermore, many works were initiated to develop an apparatus usually named metrological atomic force microscope¹⁵⁻²¹ (MAFM), but most of them still present some limitations with the traceability and the reproducibility of the imaging process; hysteresis and nonlinearity defects of the piezoelectric actuator induce problems of repeatability of the motion. It seems very difficult to cross the 100 nm barrier in accuracy without compensation.²² First, apparatus integrating these capabilities are being developed in laboratories. A first demonstration of a long scan was illustrated in Ref. 10, but with a resolution of only 100 nm and a very long time consumption budget where 12 h were necessary for a scan of 1 mm × 100 μm.

This article presents the system we proposed for precision scanning over millimeter range with high resolution. It is divided into two main sections. The first one is devoted to the scanning stage where after presenting the stage, hysteresis, mechanical, software and scanning methods issues are addressed. In the second section, imaging results are presented. The overall performances of the combined system are finally discussed.

II. EXPERIMENTAL SETUP

A. Sketch of the system

In previous works, we presented an optoelectronic system able to perform displacement steps over millimeter ranges with nanometric accuracy and repeatability.²³ In this article, we extend the principle to a double axes system (Fig. 1). This system includes a double moving stage for each

displacement axis. The first stage is a commercially available long range linear motor (Aerotech ANT-50) capable to move over 50 mm with a 10 nm resolution and a straightness of about 1 μm. The second stage comprising a piezoelectric actuator (PiezoSystem Jena) overcomes the defects of the first stage thanks to its subnanometric resolution and high bandwidth. Its full range is 15 μm but a low voltage amplifier limits its range to 3 μm. Position measurements are made with a frequency stabilized HeNe laser that ensures traceability and a double two-pass Michelson interferometer with a resolution of 0.31 nm. Such interferometers have a nonlinearity of 2 nm if finely adjusted.²⁴ A homemade high frequency electronic board equipped with a phase-shifting electronic (PSE) circuit acts as the core of the system.²⁵ It generates high frequency signals used as reference signals to synchronize the laser head and its measurement boards, the Zygo ZMI2001 boards. The PSE circuit controls the PZT actuators with subnanometric position steps by imposing well calibrated phase shifts between the reference signal and the measured signals. The performances of the electronic board in terms of positioning resolution and repeatability are at the nanometer scale. The phase shifts $\Delta\phi$ are configurable so that downscaled position steps Δd can be achieved according to the equation

$$\Delta d = \frac{\lambda_0 \Delta\phi}{8\pi n}, \quad (1)$$

where λ_0 is the wavelength of the laser source in vacuum and n the refractive index of air. The laser source was calibrated at the LNE. Its wavelength is equal to $\lambda_0 = 632.991\,528$ nm with a relative uncertainty of 1.6×10^{-9} (1σ). The displacement resolution can be programed down to 0.25 nm. This phase-shifting principle frees our displacements from the nonlinearity and hysteresis effects of the PZT actuator. Detailed description of the HF board can be found in Ref. 25. A Zerodur® mirror cube acting as a moving mirror for the laser interferometers is placed on top of the XY PZT actuator and serves us to carry a sample on its top face, making of our system a sample-holder unit (SHU). The SHU is adapted under an atomic force microscope (M5 Park Scientific Instruments) allowing sample surface inspection beyond the microscope's area coverage limit. The SHU ensures the XY displacements, whereas the AFM controller handles the z-axis movements and the atomic force feedback. The z actuator of the microscope is a 7 μm range PZT scanner. The tip of the microscope is brought in close proximity of the sample surface. The tip-to-surface distance is controlled by the atomic force regulation. The whole system is supervised and controlled through a LABVIEW interface. The sketch of the system is presented in Fig. 2 on the upper part and a photography on the lower part.

B. Hysteresis control

In classical AFM controllers, intrinsic nonlinearity defects of the PZT-driven scanner are software controlled. The inverse hysteresis model is usually used^{10,26} according to the equation

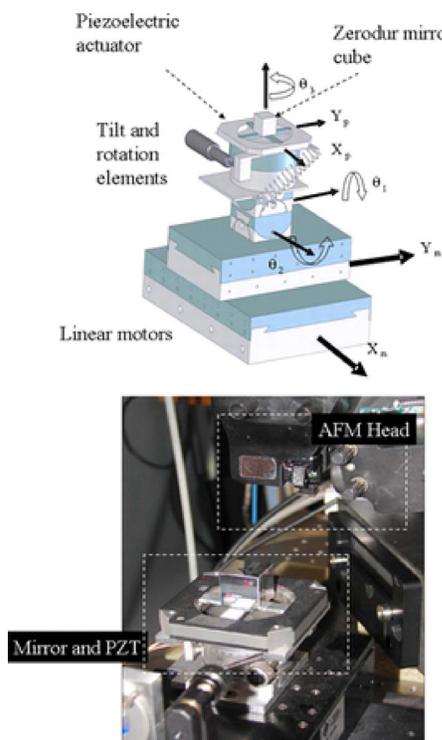


FIG. 2. (Color online) Top part: sketch and photography of the system. One can see the mirror cube where the sample is to be placed, the 2D piezoelectric actuator, the mechanical stages used for fine angles adjustments, the linear motors in addition to the AFM head on top of the displacement system. Tuning axes and angles are pointed out on the CAD design. (X_o, Y_o) optical axes, (X_p, Y_p) piezoelectric actuator axes, and (X_m, Y_m) linear motors axes must all be aligned previous to operation. Bottom part: photography of the AFM tip placed over the SHU.

$$V(x) = x^{-1}(V_0, x_0) \quad (2)$$

in order to calculate the desired control voltage V to apply to the PZT actuators to attain a position x as a function of the actual state (voltage V_0 and position x_0) of the actuator. This method presents two major drawbacks. The first one is that this equation encloses linearization coefficients that were defined under specific environmental conditions and implemented on board of the AFM controller. These coefficients and model will no more be valid if the conditions change and the PZT behavior will consequently not be the same. PZT actuators undergo aging with time and have a different behavior at each stable operating temperature. This makes the AFM displacements inaccurate, unless real time calibration is used. The SHU follows a different directive. The PZT in our system tries to keep track of the desired trajectory by locking the phase of the measured signal on the phase of the reference signal. This means that the PZT will contract/retract by the necessary distance until phase difference nulls, whatever the actual state of the PZT is and whatever the operating temperature at which the system has stabilized. Hysteresis, creep, and temporal instabilities of the PZT are eliminated which enhances the repeatability of the displacements. The second drawback is that Eq. (2) is usually software implemented in the AFM controller. Such equation usually incorporates a lot of coefficients and thus needs complex computation, especially when complex algorithms are used to better track the linear model.²⁷ This may have an annoying

effect on the bandwidth of the control loop. In our system, nonlinearity rectification is hardware implemented based on the phase locking principle and depends on the robustness of the analog servo loop controller that is implemented.

C. Mechanical adjustments

Since the SHU operates over millimeter ranges, tiny mechanical defects are magnified and may become uncontrollable. Preliminary alignments are thus necessary to minimize errors before operating the SHU. The orthogonality between two perpendicular faces of the mirror cube is certified to be less than 1 arc sec. The orthogonality between the two linear motors was controlled using interferometry with an accuracy of 5 arc sec. Furthermore, several rotational stages inserted between the linear motors and the piezoelectric actuators allow angles and axes tuning (Fig. 2). The optical axes of the interferometers (X_o, Y_o) , the mechanical axes of the linear motors (X_m, Y_m) , and the mechanical axes of the piezoelectric actuators (X_p, Y_p) are finely aligned with an uncertainty lower than 5 arc sec.²⁸ The remaining straightness defects can be compensated by the piezoelectric action using the electronic feedback lock-in system. The sample to investigate is centered on the top face of the mirror cube and thus practically on the intersection point of X_o and Y_o for an Abbe error-free configuration. Another error to overcome when dealing with millimeter ranges is the tilt that may arise between the XY plane of the moving stages and that of the sample being scanned. The greater the tilt and the longer the distance covered, the more the PZT actuator of the microscope will have to contract/retract in the z direction in order to track the surface of the sample. A microscope equipped with a 10 μm range PZT actuator in the z axis will unlock after traveling 1 mm in the XY plane if a tilt of 10 mrad exists. This tilt causes an artifact giving the impression that the two sample surfaces are not parallel to each other. As far as mechanical vibrations are concerned, the interferometers, mechanical stages, and AFM apparatus lay on an active antivibration table that eliminates external noise. Temperature of the room is controlled in order to prevent any drift on the laser measurements²⁹ and mechanical parts.

D. Software adaptation and acquisition

AFM controllers present many limitations. With classical AFM software, the scans are programable with two major dimensional parameters: the size of the scan (in micrometers) and the number of points to sample for each line. This directly induces the spatial resolution of the image. The maximal number of points per line is usually limited to 1024. For example, a scan of $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ displayed using 1024×1024 pixels leads to a resolution of about 100 nm in each direction. A scan of 1 mm long with 1024 sampled points would lead to a resolution of 1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. For this reason, we shunt the acquisition module of the AFM and take hand over it in order to increase the resolution especially for long range scans. A motion synchronized pulse firing controller (MSPFC) triggers the acquisition from the AFM synchronously with the SHU movements. The MSPFC pulses are derived from the signals of the optical encoders of the linear

motors and from the homemade phase-shifting board. Each time the SHU steps in the XY plane, the MSPFC launches an interrupt pulse toward a LABVIEW real time based data acquisition card that will acquire the z -position signal from the AFM. The analog to digital converter (ADC) of the acquisition board is a 16 bit converter and operates at sampling frequencies over 100 kHz. The MSPFC is able to output pulses which allow us to ally high speeds with high resolutions without altering the accuracy. The number of data points per line acquired is then only limited by the time resolution of the pulse incoming from the MSPFC synchronization board. The real limitation is, in fact, a software problem: the file system of the operating shell does not allow huge file indexation. For this, the acquisition software stores each set of lines in a file. A powerful computer able to handle the high speed flow of data when the SHU runs at high speeds and to process the resulting amount of data points is also needed. Furthermore, classical AFM softwares display the scanned surface in real time. This dramatically decreases the bandwidth of the acquisition since image nonlinearity corrections, among others, are processed online. Furthermore, the link between the AFM controller and the host computer used for display is usually an Ethernet connection³⁰ with a limited bandwidth that is not suitable for real time display of high speed data. In our system, data processing and displaying are made afterwards in order to visualize the three-dimensional (3D) topography image. The method we use produces data files containing the entire information, and any image processing script can be applied to reveal information about the sample such as artifact elimination or outlining specific features of the topography.

E. Scanning methods

Traditional AFM tips scan the surface of a sample in a zigzag trajectory mode by applying sweeping command signals on the piezoelectric actuators. A sweep is made to scan a line along the X axis, and a second slower sweep is made along the Y axis to compose the multiline profile. The SHU operates in a different manner. The XY controllers of the AFM are unused since the SHU is ensuring the XY displacements. The tip of the microscope is equipped with a PZT actuator that is acting only in the z direction. We then figured out three functional modes with different scanning strategies in order to move the sample relative to the tip over the millimeter range.

In the first mode, named “matrix by matrix” (MM mode), a multitude of elementary micrometric scans called matrices is achieved and jointed to compose the whole image—the mother matrix. An initialization phase is first made to mark a (0; 0) position in the (X ; Y) reference. Then a first elementary matrix is scanned by the piezoelectric actuators on micrometric range with preprogramed parameters such as speed, elementary area, and resolution. Elementary matrix area is limited to $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ since achieved using the PZT actuators only. Once this first scan is achieved, the PZT actuators which attained their stretching limit are released. The linear motors then move on to displace the sample and position it in a way a new elementary matrix can be scanned accurately next to the previous one. The piezoelectric actua-

tors can hence achieve several scans that are perfectly adjacent until an image composed of several elementary matrices is formed. Under MSPFC control, the acquisition points are synchronized with the phase-shifting system which ensures to be insensitive to the nonlinearities and defects of the piezoelectric actuators. The MSPFC launches an interrupt toward the AFM each time the PZT steps inside an elementary matrix. This mode resembles to the stitching process but no stitching is applied *a posteriori*. The phase-shifting positioning system ensures the accuracy of the connections between the elementary matrices; overlapping windows are not needed. The position uncertainty is programable, depending on the resolution of the positioning system which can be as low as 0.25 nm.²⁵ This mode is sufficiently accurate but its problem is that it is time consuming.

In the second mode, named “line per line” (LL mode), long lines are performed with the linear motors without piezoelectric compensation along the displacement axis. Only the straightness of the moving motor is controlled. The same initialization phase is made fixing a (0;0) position in the (X ; Y) reference. Then, a long line is directly performed by the linear motor along the X axis. The piezoelectric stage only compensates the straightness along the Y axis, but not the accuracy position defects along the X axis. When a line is done, the phase-shifting system repositions the sample for a second line strictly parallel to the previous one. This routine is applied until covering the whole area to scan. The resulting image is then accurate in the Y dimension. The length of the lines and the spacing between two lines are programable. The displacement resolution along the X axis is 10 nm since the linear motor is traveling alone without the help of the PZT stage. The MSPFC synchronizes the AFM acquisitions with the displacements of the linear motor. This mode is not optimized for position control but allows long scans easily and quickly. Speeds at the mm/s scale can be reached.

In the third mode, called “tracking trajectory mode” (TT mode), long lines are performed using the linear motors with real time piezoelectric compensation permanently activated on both axes. The linear motors and the PZT actuators cooperate together to travel long lines accurately. Each time the linear motor moves a step, the PZT actuator compensates its defects ensuring the positioning accuracy. This implies lower speeds. In fact, the PZT actuators have an open loop bandwidth of 2.5 kHz, but the closed loop control and the voltage amplifier scale it down to less than 1 kHz. Tests showed that a speed of $10 \mu\text{m/s}$ is the maximum value so that the PZT actuators can track. At the end of each line, the PZT actuators will have contracted/retracted by the amount of nonlinearities, straightness, hysteresis, and other intrinsic defects of the system that were cumulated all along a line. The same outcomes are then inherited from the LL mode: straight and accurately distanced long lines, but in addition to this, intrinsic defects of the linear motors are compensated at each point. The TT mode is the ultimate mode since accurate in both dimensions but lacks of speed in addition to being the most difficult to optimize for all the lock-in loops involved in this type of mode control.

III. MEASUREMENTS AND DISCUSSIONS

A. Parameters of the experiment

The sample investigated is a silicon-on-insulator (SOI) substrate with a waveguide structures pattern. The waveguides are parallel but irregularly set. Their width is about $2.8 \mu\text{m}$ and their height around 160 nm. In order to minimize the total scanning time, the speed of the scan has to be maximized. For this purpose, the LL mode is the most convenient. A speed of $40 \mu\text{m s}^{-1}$ was chosen. The SHU allows higher speeds but this upper limit is fixed by the AFM operation regulations: damage may, in fact, be caused to the AFM tip if this speed is larger. The AFM is functioning in tapping mode. This implies that the signal that represents the surface profile is the voltage applied to the z -PZT actuator to keep constant the distance from the sample and null the error signal of the AFM control loop. It is this signal that is sent to the LABVIEW acquisition card for sampling, triggered externally with the pulses coming from the MSPFC that are synchronous with the long axis displacements. For a scan of 1 mm long, each line takes 25 s, but the positioning process at nanometric accuracy when the SHU is changing the line can be time consuming and takes around 30 s, so the total time for a line scan is around 1 min.

The image presented in Fig. 3 is 750 nm width (X axis) and 1 mm long (Y axis). The resolutions are 25 nm for the X axis (29 lines) and 20 nm for the Y axis. So there is 50 000 points per line along the Y axis. This is not limited by the apparatus or by the acquisition system, but we preferred to limit the number of points to make the data treatment easier. The Z axis represents the AFM topography signal.

B. Results for long topography imaging

Figure 3 was obtained using MATLAB software. The upper part of the figure is presented without any post-treatment (raw image). Note that the long scan axis is Y , whereas X stands for the short scan direction. We can notice shading off of colors in the image because of the remaining tilts in X and Y axes. Due to the data high density, the image is not really easy to read. One can see the parallel waveguide structures along the X axis and their irregular layout. The lower part shows the same image but after background correction. Here, the background is mainly due to a residual tilt between the sample and the top face of the cube and a thermal drift during the acquisition process. A thermal drift acts to expand the metrological chain of the system. This chain includes the body of the microscope in addition to the multistacked elements of the SHU.

In order to analyze the data along the long scan axis Y , a cross section is pointed out in Fig. 4. The upper part is presented, also without any post-treatment (raw profile). The waveguide structures clearly appear here. They seem to be distorted, but it is only an artifact due to the disproportional representation of high density data on the Y axis with respect to the X axis. This cross section was flattened using a third order polynomial fit and is shown in the lower part of the figure. The equation used for the background correction is $Z = -390 + 1.96Y - 7.67 \times 10^{-7}Y^2 + 3.3 \times 10^{-13}Y^3$, where Y is expressed in micrometers. This correction may have several

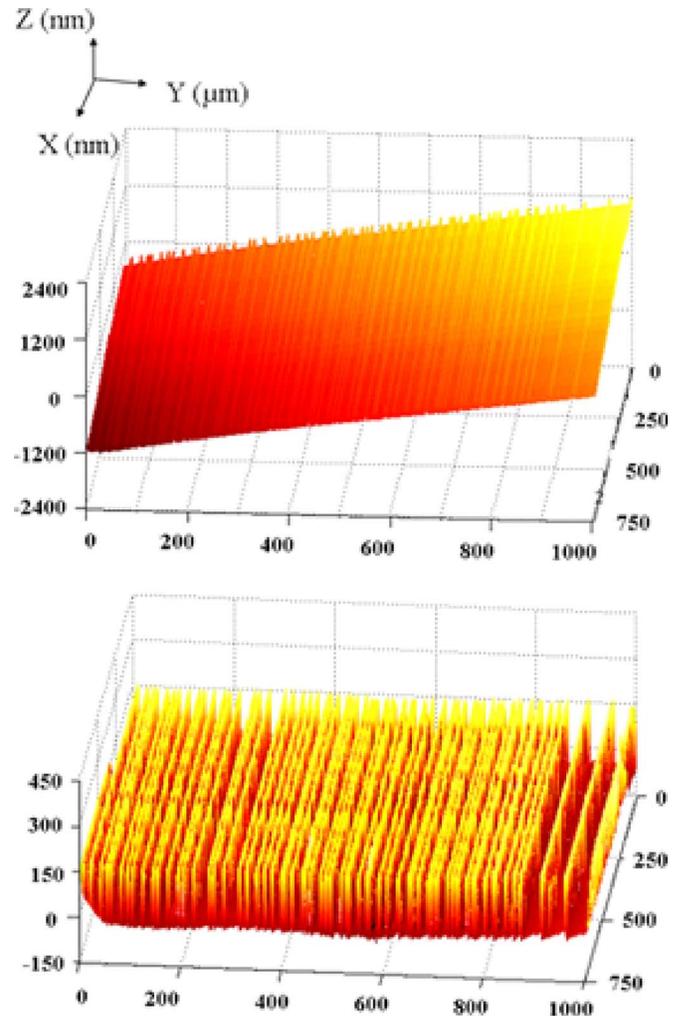


FIG. 3. (Color online) Long topographic image. This image is 750 nm wide (X axis) and 1 mm long (Y axis). The resolutions are 25 nm for the X axis (29 lines) and 20 nm for Y axis (50 000 points). The Z axis is the acquisition of the AFM signal. The entire image was achieved in about 25 min at a scan speed of $40 \mu\text{m s}^{-1}$. The upper part is presented without any treatment. We can see shading-off colors due to remaining tilts in X and Y axes; the waveguides are rather difficult to detect. The lower part is the same image after background adjustment; waveguide structures appear along X axis. The image reveals that on this sample, the structures are parallel but irregularly spaced (according to the design pattern).

origins. These include a vertical tilt between the translation stage and the sample, an eventual thermal drift along the z axis,¹⁰ in addition to a slight curved discrepancy due to either flatness defects of the SHU and the radius of curvature of the SOI sample. The waveguide structures seem distorted but this is still an artifact. One can note that the pedestals are asymmetrical. This artifact is due to scanning at a very high lateral speed of $40 \mu\text{m/s}$. It can be eliminated by the use of a convenient tip in addition to subtracting the effect of abrupt tip-sample interactions.

Figure 5 shows a zoom revealing a single structure at the Y position of $217 \mu\text{m}$. The upper part presents a 3D view in order to show a waveguide profile, while the lower part presents a cross section which allows appropriate measurements. With this zoom, the waveguide structure is not distorted anymore. The height and the width are compatible with those expected.

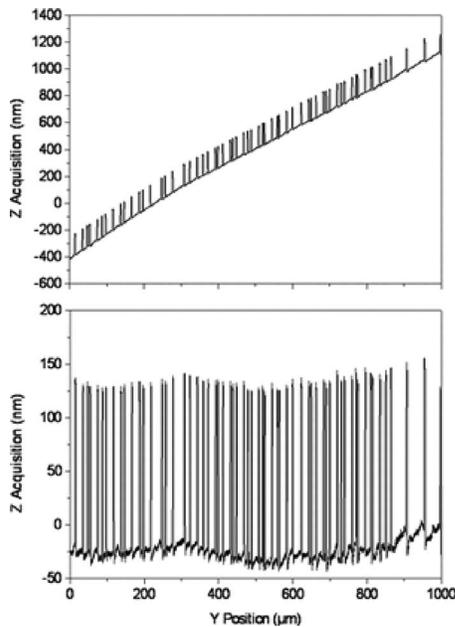


FIG. 4. Cross section of Fig. 3 along the Y axis. The upper part is presented without any treatment and points out the residual tilt. On the lower part, a third order polynomial fit was calculated and subtracted. The tilt that was subtracted corresponds to several cumulated effects: mainly the residual tilt but also the radius of curvature of the silicon substrate, slight flatness defects of the translation stages, and a probable thermal drift. Discrepancies at the base of the waveguide structure are artifacts due to the tip shape.

It is important to note that this zoom was obtained directly from the original image, while with a conventional AFM system, it would have been necessary to scan once again. The resolution is good enough to have a good repre-

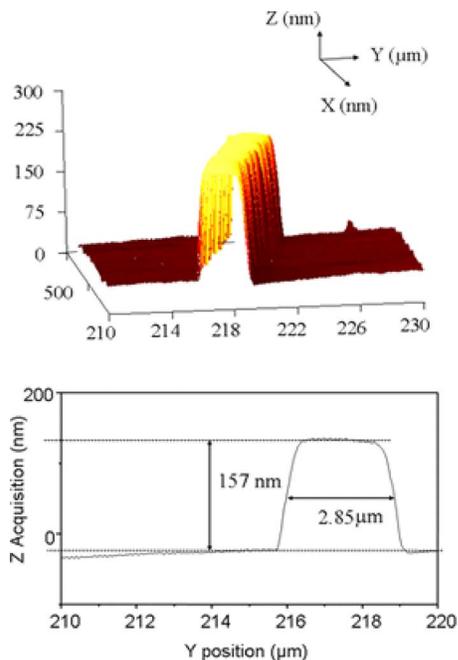


FIG. 5. (Color online) Zoom of one of the waveguide structure. It is obtained directly from the first image without scanning once again. The upper part presents a 3D view in order to show the waveguide profile, and the lower part presents a cross section which allows proper measurements. The figure illustrates one waveguide but statistics could be done over a set of structures.

sentation of the parameters of both the macro- and nano-structures. With the millimeter large image of Fig. 3, a lot of waveguides are included. It is hence possible to check out the homogeneity at the chip level by means of statistical measurements.

C. Discussions

The herein reported millimeter scale atomic force microscopy image was obtained by 1 mm single scans repeated 29 times with a 25 nm spacing. Although accurate in only one dimension, the line-per-line mode was used. This first result demonstrates the feasibility of large displacements while addressing the constraints related to two-dimensional (2D) large scale imaging. The LL mode allows, in fact, us to scope large areas easily and quickly. However, results showed the expected layout of the structure that was scanned. No XY drift was noticed all along the surface. Accuracy in the z direction is left to the AFM and depends on the sensitivity of the sensors the AFM uses. In this experiment, a quadquadrant photodetector associated with an optical lever arm scheme was used. To meet higher performances, the SHU will have to be endowed with a traceable measurement along the z axis. This can be obtained by integrating a third laser interferometer within the SHU system.

Moreover, environmental condition supervision is critical to prevent any drift on the resulting image. For the SHU measurements to be more accurate, drift supervision and control shall be incorporated.¹⁰ Refractive index measurements of the ambient air can also be taken into account with Édlen formula³¹ to improve the positioning accuracy.

In addition to this, we plan in future works to extend the imaging area covered by the SHU especially in the short scan direction and to demonstrate the performances of the different scanning methods previously described.

Finally, the reported results only concern topographical characterization. With the same kind of setup, additional information can potentially be retrieved. We are currently working on the integration of the SHU to a combined atomic force-scanning near-field optical microscope.² Further works will also include adapting the SHU to ultimate applications such as lithography using a scanning electron microscope (SEM). The SEM is, in fact, very constraining since it requires very high speeds, temperature stabilization in addition to operating in vacuum. For this, reducing the SHU volume is currently under study.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful toward E. Oseret from the Laboratoire de Parallélisme, Réseaux, Systèmes, et Modélisation (PRiSM) for his useful discussions about handling high density images. This project is cofunded by the French Government (ACI Nanosciences) and by the Ile-de-France region.

¹The International Technology Roadmap for Semiconductors, Metrology report, 2005, <http://www.itrs.net/Common/2005ITRS/Metrology2005.pdf>

²R. Bachelot, G. Lerondel, S. Blaize, S. Aubert, A. Bruyant, and P. Royer, *Microsc. Res. Tech.* **64**, 441 (2004).

³S. Blaize, S. Aubert, A. Bruyant, R. Bachelot, G. Lerondel, P. Royer, J. E. Broquin, and V. Minier, *J. Microsc.* **209**, 588 (2003).

⁴S. C. Minne, J. D. Adams, G. Yaralioglu, S. R. Manalis, A. Atalar, and C.

- F. Quate, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 1742 (1998).
- ⁵H. Liu, B. Lu, Y. Ding, Y. Tang, and D. Li, *J. Micromech. Microeng.* **13**, 295 (2003).
- ⁶J. Fu, R. D. Young, and T. V. Vorburger, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 2200 (1992).
- ⁷H.-C. Yeh, W.-T. Ni, and S.-S. Pan, *Control Eng. Pract.* **13**, 559 (2005).
- ⁸M. Holmes, R. Hocken, and D. Trumper, *Precis. Eng.* **24**, 191 (2000).
- ⁹J. A. Kramar, *Meas. Sci. Technol.* **16**, 2121 (2005).
- ¹⁰G. Wilkening and L. Koenders, *Nanoscale Calibration Standards and Methods*, (Wiley-VCH, New York, 2005).
- ¹¹F. Meli and R. Thalmann, *Meas. Sci. Technol.* **9**, 1087 (1998).
- ¹²J. Haycocks and K. Jackson, *Precis. Eng.* **29**, 168 (2005).
- ¹³R. Leach, J. Haycocks, K. Jackson, A. Lewis, S. Oldfield, and A. Yaccot, *Nanotechnology* **12**, R1 (2001).
- ¹⁴S. Ducourtieux, S. Duhem, F. Larssonier, J. Salgado, G. P. Vaillau, L. Lahousse, and J. David, in *Proceedings of the 5th Euspen International Conference, Montpellier, France, (2005) Vol. 1*, pp. 131–134 .
- ¹⁵C.-W. Lee and S.-W. Kim, *Precis. Eng.* **21**, 113 (1997).
- ¹⁶J. Schneir, T. H. McWaid, J. Alexander, and B. P. Wilfley, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**, 3561 (1994).
- ¹⁷M. Bienias, S. Gao, K. Hasche, R. Seemann, and K. Thiele, *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* **66**, 837 (1998).
- ¹⁸G. B. Picotto and M. Pisani, *Ultramicroscopy* **86**, 247 (2001).
- ¹⁹S. Gonda, T. Doi, T. Kurosawa, Y. Tanimura, N. Hisata, T. Yamagishi, H. Fujimoto, and H. Yukawa, *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 3362 (1999).
- ²⁰J. Haycocks and K. Jackson, in *Proceedings of the 2nd Euspen Conference, Torino, Italy, 2001*, p. 392.
- ²¹K. R. Kooops and K. Dirscherl, in *Proceedings of 3rd Euspen Conference, Eindhoven, The Netherlands, 2002* , pp. 525–528.
- ²²W. Gao, Y. Arai, A. Shibuya, S. Kiyono, and C. H. Park, *Precis. Eng.* **30**, 96 (2006).
- ²³S. Topçu, L. Chassagne, D. Haddad, Y. Alayli, and P. Juncar, *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 4876 (2003).
- ²⁴S. Topçu, L. Chassagne, Y. Alayli, and P. Juncar, *Opt. Commun.* **247**, 133 (2005).
- ²⁵L. Chassagne, S. Topcu, Y. Alayli, and P. Juncar, *Meas. Sci. Technol.* **16**, 1771 (2005).
- ²⁶K. Dirscherl, Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, Lyngby, 2000.
- ²⁷C.-L. Hwang, Y.-M. Chen, and C. Jan, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* **13**, 56 (2005).
- ²⁸N. Bobroff, *Precis. Eng.* **15**, 33 (1993).
- ²⁹F. C. Demarest, *Meas. Sci. Technol.* **9**, 1024 (1998).
- ³⁰Pacific Nanotechnology Inc., Nano-R atomic force microscope specifications, <http://www.pacificnanotech.com/nano-r-spm.html>
- ³¹K. P. Birch and M. J. Downs, *Metrologia* **30**, 155 (1993).

Titre : Étude et réalisation d'une platine porte-échantillon aux performances nanométriques. Application à la microscopie en champ proche.

Malgré la présence d'appareils très performants tels que les microscopes électroniques et en champ proche, les capacités à mesurer des dimensions nanométriques avec des incertitudes de quelques nanomètres constitue un véritable verrou technologique pour la fabrication en grand volume de composants de taille millimétrique mais aux caractéristiques nanométriques.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont pour but de contrôler avec des performances nanométriques, sur une plage de quelques millimètres, le positionnement d'un porte-échantillon, essentiellement dédié à la microscopie. Le système comprend des platines de déplacement mécanique, une mesure par interférométrie, une électronique haute-fréquence et des lois de commandes pour l'asservissement. Le système de déplacement est constitué de deux étages ; le premier est une platine de translation qui permet de faire des « longues distances », et le second est un actionneur piézoélectrique qui permet de corriger les défauts du premier. Le système ainsi réalisé permet des déplacements dans les deux directions du plan X-Y avec des résolutions et des répétabilités de l'ordre du nanomètre.

Ce dispositif a été intégré à un microscope à force atomique et à un microscope optique en champ proche dans le but de réaliser des images de tailles millimétriques et en même temps hautement résolues. Des images de topographie et des images optiques en champ proche de tailles supérieures à 1 mm de long viennent démontrer les performances du système.

MOTS-CLÉS : Nanopositionnement, Contrôle de position, Interférométrie, Optoélectronique, Métrologie dimensionnelle, AFM, SNOM.

Title: Development of a long-range nanopositioning system applied to near-field microscopy.

Despite the presence of high performance apparatus such as electronic and near-field microscopes, the capacity to measure nanoscale dimensions with uncertainties down to some nanometers constitutes a real technological obstacle for the mass production of millimeter scale components with nanoscale characteristics.

The work realized during this thesis is intended to control at the nanoscale level, over a range of some millimeters, the position of a sample-holder, mainly aimed to microscopy. The system comprises a mechanical translation stage, an interferometric position measurement, high-frequency electronics, and a closed loop control. The displacement system has a dual stage actuator architecture where the first stage is a long-range translation stage, and the second is a piezoelectric actuator allowing rectifying the positioning errors of the first stage. The system allows millimeter range displacements in the X-Y plane with a resolution and repeatability at the nanoscale level.

The device was integrated into an atomic force microscope and a scanning near-field optical microscope in order to obtain, at the same time, millimeter-sized and highly resolved images. Topographic and near-field optical images with length higher than 1 mm have been realized in order to show the performances of the system.

KEYWORDS: Nanopositioning, Position control, Interferometry, Optoelectronic, Dimensional metrology, AFM, SNOM.

