

Longueur et grandeurs dimensionnelles

Length and dimensional quantities

1. Introduction

Les travaux menés en 2007 dans les domaines de la longueur et des grandeurs dimensionnelles ont fait intervenir deux laboratoires nationaux de métrologie : le LNE-INM au CNAM dont l'activité est orientée sur les longueurs d'ondes et le LNE/CMSI dont l'activité est principalement orientée sur les grandeurs dimensionnelles, et plus spécifiquement sur les étalons matériels.

2. LNE-INM

2.1. Extension des possibilités du système femtoseconde pour la matérialisation du mètre

Le domaine d'utilisation du système femtoseconde a été étendu pour améliorer l'incertitude d'étalonnage des lasers à 543 nm. Cette longueur d'onde est notamment utilisée sur les dispositifs interférométriques du LNE pour l'étalonnage des cales étalons au meilleur niveau d'incertitude. Un banc de détection de battement de fréquences permettant de comparer le laser à colorant à 543 nm du LNE-INM avec le laser femtoseconde a été développé. L'utilisation des recommandations du CIPM pour les étalonnages réalisés sur les lasers à 543 nm du LNE conduisait à des incertitudes de 500 kHz. L'incertitude liée à la mesure avec le laser femtoseconde est de 80 kHz, la principale source d'incertitude provenant de la reproductibilité de fréquence du laser à colorant asservi sur l'iode. La composante d'incertitude liée à l'exactitude de la référence du laboratoire passera donc de 500 kHz ($9,1 \cdot 10^{-10}$) à 80 kHz ($1,5 \cdot 10^{-10}$). Ce niveau d'incertitude permet de couvrir les besoins d'étalonnage des lasers à 543 nm utilisés pour les applications en métrologie dimensionnelle.

2.2. Mesure de grande distance par interférométrie superhétérodyne

En 2007, les travaux du laboratoire ont été orientés vers la mesure de très grandes distances (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres). En effet ce domaine n'est pas couvert aujourd'hui et il existe un intérêt croissant pour un tel sujet au sein de la communauté scientifique et industrielle. Cette thématique couvre également les besoins exprimés dans le cadre de la mise en orbite de groupe de « satellites en formation » (projet Darwin par exemple), et figure parmi les actions

recommandées dans les feuilles de route d'iMERA. Une des techniques proposées pour réaliser des mesures de très longues distances dans le vide ou dans l'air avec une incertitude meilleure que 10^{-7} en valeur relative, consiste à développer le concept de la création de longueurs d'onde synthétiques centimétriques à partir du mélange de deux faisceaux laser issus de lasers stabilisés sur deux fréquences différentes. Une première expérience, basée sur l'utilisation d'un interféromètre de Michelson homodyne avec fabrication de deux signaux déphasés pour mesurer, en temps réel, le déphasage de la longueur d'onde synthétique après parcours de la distance à mesurer, a permis de valider le principe de la mesure. En second lieu le principe d'interférométrie hétérodyne, déjà exploité dans le cadre du projet balance du watt pour le contrôle de la vitesse de déplacement de la bobine, peut également être appliqué aux longueurs d'onde synthétiques avec, pour conséquence, une plus grande facilité de mesure du déphasage et sans doute une meilleure exactitude. Une première étude de faisabilité a été effectuée. Enfin les mesures interférométriques dans l'air nécessitant de connaître l'indice de l'air avec une exactitude compatible avec l'incertitude visée sur les mesures de distances, des études préliminaires avec pour objectif la diminution de l'incertitude de mesure du réfractomètre compact du LNE-INM ont été réalisées. Ces études ont conduit à proposer une méthode de mesure avec une incertitude relative visée sur la mesure en temps réel de l'indice de l'air de quelques 10^{-9} .

L'ensemble de ces travaux a permis d'élaborer un projet européen qui a été retenu dans le cadre de l'EMRP. Ce projet coordonné par le LNE-INM fait intervenir 9 laboratoires nationaux de métrologie européens.

3. LNE/CMSI

3.1. Mesure des états de surface

La mise en œuvre d'une référence nationale de mesure des états de surface a été poursuivie au LNE/CMSI. Après une première phase de mise au point avec la société Nanojura, le laboratoire a engagé la qualification de l'équipement en 2007. Celle-ci a conduit à identifier et quantifier les différentes composantes d'incertitudes entrant dans le bilan d'incertitudes des résultats associés aux différents paramètres normalisés. Les études ont porté en particulier sur les composantes issues de l'étalonnage du capteur ainsi que sur celles issues de la correction de

guidage de la table. Une attention particulière a été portée sur la propagation des incertitudes au travers des différents traitements réalisés lors du calcul des paramètres : filtrages et application des formules de calcul. Cette démarche est nouvelle, du moins par rapport aux pratiques françaises du domaine. Ces travaux ont été évalués par un expert de l'INRIM (Italie) et le laboratoire a été accrédité par le Cofrac en fin d'année 2007.

L'adaptation de l'équipement aux mesures avec palpeur optique et en trois dimensions constituera la prochaine étape de ce programme de développement. Notons enfin que cet instrument a fait l'objet d'un accord de partenariat industriel et que sa diffusion auprès d'autres laboratoires nationaux de métrologie est ainsi envisagée.

3.2. Nanométrie dimensionnelle

Le développement d'un microscope à force atomique (AFM) métrologique a débuté en septembre 2006, dans le cadre d'un travail de thèse. Le cahier des charges de cette étude est le suivant : réaliser un AFM dont les mesures à l'échelle nanométrique soient raccordées au mètre, avec une incertitude de positionnement de 1 nm et une course de déplacement de 100 μm dans le plan de l'échantillon et de 10 μm dans la direction perpendiculaire.

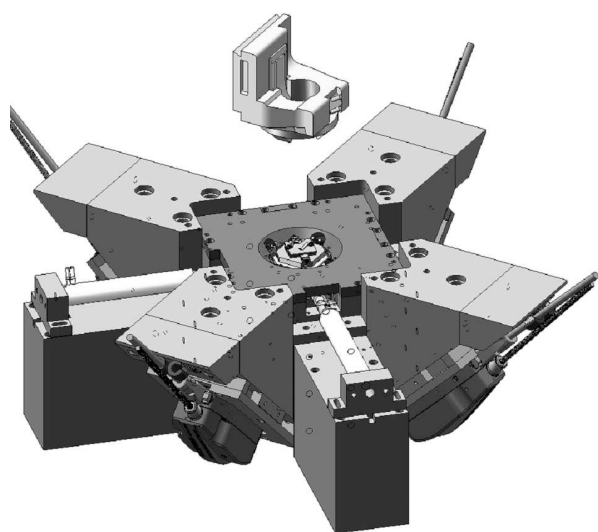


Fig. 1. – Vue CAO de l'AFM métrologique.

Afin d'optimiser les chaînes métrologiques, le laboratoire a opté pour une conception basée sur une tête AFM immobile. Les mesures sont ainsi réalisées en déplaçant l'échantillon sous la pointe, selon les trois directions, à l'aide de la platine qui supporte l'échantillon.

Ceci permet ainsi de dissocier la chaîne de mesure de celle du déplacement et d'utiliser en particulier de manière optimale la sensibilité de la tête AFM.

Le premier prototype de platine XY a été réalisé par électroérosion d'un bloc d'aluminium, qui est présenté en figure 2. Il s'agit d'une platine monobloc constituée de 4 pantographes à lames flexibles qui autorisent les déplacements dans les deux axes parallèles à l'échantillon d'analyse, tout en verrouillant les autres degrés de liberté. Les déplacements sont assurés par deux actionneurs piézoélectriques. La mesure du déplacement est effectuée par quatre interféromètres différentiels.

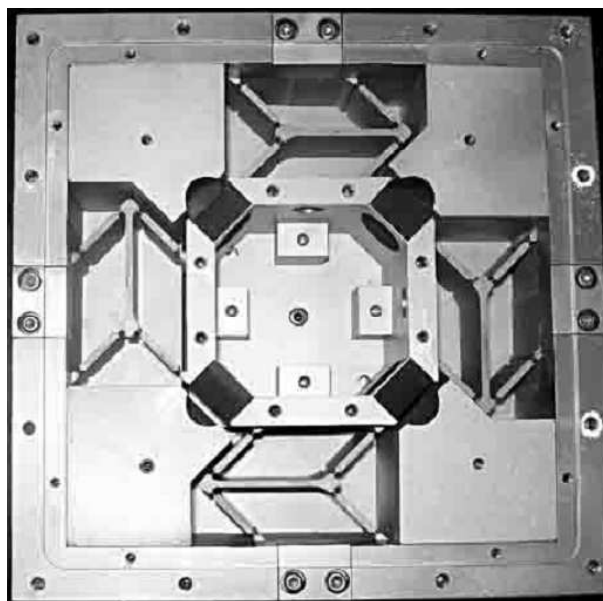


Fig. 2. – Platine de balayage XY à pantographes.

Une caractérisation préliminaire de ce prototype a été effectuée en fin d'année. Ces premiers résultats démontrent que le prototype répond de manière très satisfaisante au cahier des charges fixé initialement. Les rotations parasites ont été évaluées à 1,5 μrad pour une course de 90 μm ; le comportement dynamique est également très correct, avec un temps de montée de l'ordre de 5 ms.

Le prochain exercice sera consacré à l'étude de l'intégration du second étage de la platine (maîtrisant les déplacements selon l'axe perpendiculaire à l'échantillon), ainsi qu'à la mise en œuvre de l'asservissement de l'ensemble.