

Longueur et grandeurs dimensionnelles

Length and dimensional quantities

1. Introduction

Les travaux menés en 2006 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 avant tout sur les longueurs d'ondes et le LNE/CMSI, dont l'activité est essentiellement orientée sur les grandeurs dimensionnelles, et plus précisément les étalons matériels.

2. LNE-INM

Système de mesure de fréquence optique femtoseconde pour la matérialisation du mètre

Jusqu'à présent, la traçabilité internationale des étalons de longueurs d'onde était assurée par des comparaisons internationales régulières entre lasers de même longueur d'onde. Dans cette approche la mesure absolue des fréquences des lasers est en pratique lourde à mettre en oeuvre. Maintenant, les systèmes de mesure à base de lasers femtoseconde à modes verrouillés en phase permettent la mesure directe et absolue de la fréquence de n'importe quel laser. Ces systèmes permettent de multiplier une fréquence de référence à 1 GHz par un facteur suffisant pour arriver jusqu'à la fréquence d'oscillation des lasers aux environs de 500 THz. Les laboratoires mettant en place ce type de dispositif peuvent donc assurer eux-mêmes leur traçabilité, pourvu que la traçabilité de leur référence de fréquence soit assurée.

Le principe de la mesure est de générer un peigne de fréquence dont on connaît la fréquence des diverses dents du peigne et de déduire la fréquence du laser à étalonner par la mesure d'un battement de fréquence avec la dent la plus proche. La traçabilité est assurée par la connaissance de la fréquence de décalage du peigne et la fréquence de répétition du laser femtoseconde.

Durant cette année 2006, les travaux ont porté plus précisément sur la mise en oeuvre de la référence de fréquence nécessaire à la maîtrise des fréquences de décalage et de répétition du peigne. Cette référence a été construite à partir d'un oscillateur à quartz asservi sur une horloge à rubidium. Cette conception a permis de réaliser un dispositif alliant la bonne stabilité à court terme de l'oscillateur à quartz et la bonne stabilité à long terme de l'horloge à rubidium. La stabilité de cette horloge a été caractérisée au Laboratoire de Physique des Lasers

(Université Paris 13 à Villetaneuse). La stabilité des différents composants et du montage final est présentée sur la figure 1. La valeur de la fréquence de cette référence est mesurée en permanence par un système SYREF (développé par l'Observatoire de Besançon) qui donne toutes les 15 min la différence de fréquence entre la fréquence du dispositif réalisé et le temps GPS. L'exactitude relative de cette comparaison est de $5 \cdot 10^{-12}$ pour un intervalle d'intégration de 15 min (3σ).

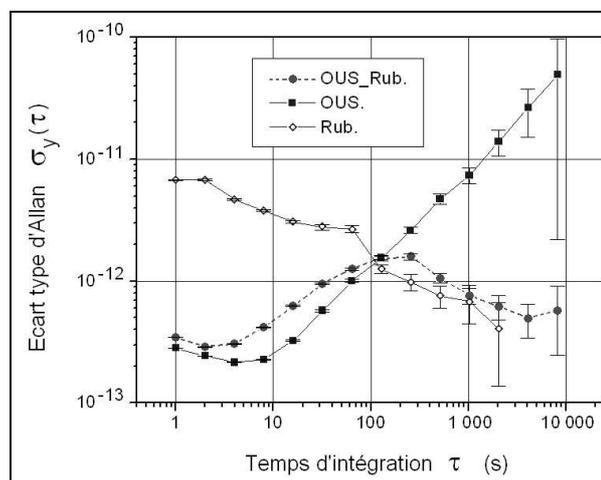


Fig. 1. – Stabilité relative du dispositif ; OUS : oscillateur ultra stable ; Rub : horloge à rubidium ; OUS_Rub. : association oscillateur et horloge, mesure sur le maser du LNE-SYRTE *via* lien optique.

Des battements ont été réalisés avec les lasers YAG, références nationales à 532 nm. La stabilité relative du battement sur 1 s est de l'ordre de 10^{-12} . L'instabilité dominante est liée à l'instabilité du taux de répétition puisque les lasers mesurés ont une stabilité relative de $7 \cdot 10^{-14}$ sur 1 s. Ce résultat est néanmoins très satisfaisant pour les besoins de traçabilité des étalons de longueur d'onde pour la mise en pratique de la définition du mètre. Plusieurs séries de mesures ont été effectuées et comparées à celles qui avaient été obtenues au LNE-SYRTE en 2001. Les valeurs obtenues sont présentées sur la figure 2. Les résultats en terme d'exactitude sont satisfaisants et compatibles avec les résultats obtenus au LNE-SYRTE en 2001. L'intervalle d'incertitude de 2,8 kHz présenté sur cette courbe correspond à l'incertitude liée au temps GPS pendant la période de mesure.

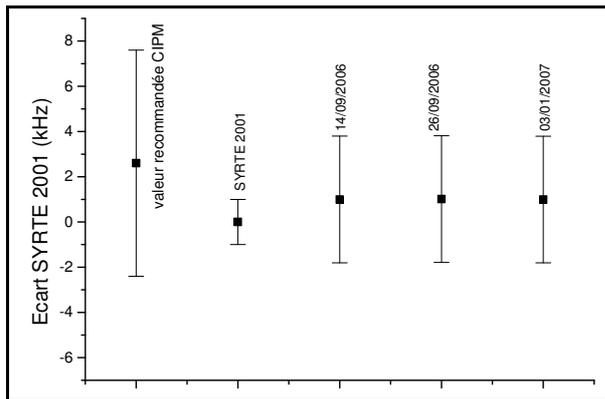


Fig. 2. – Résultats des mesures du laser YAG du LNE-INM (trois derniers points) ; Comparaison des différentes mesures.

3. LNE/CMSI

3.1. Étalonnage des micromètres objet

Au cours des exercices précédents, le laboratoire a développé une nouvelle structure mécanique capable de recevoir les deux technologies de détection de traits à savoir le microscope photoélectrique et le microscope optique avec caméra vidéo. Les travaux réalisés en 2006 ont permis de développer les algorithmes de traitement des images ainsi que la stratégie de capture des images permettant de prendre en compte les caractéristiques et imperfections liées au couple objectif – capteur CCD.

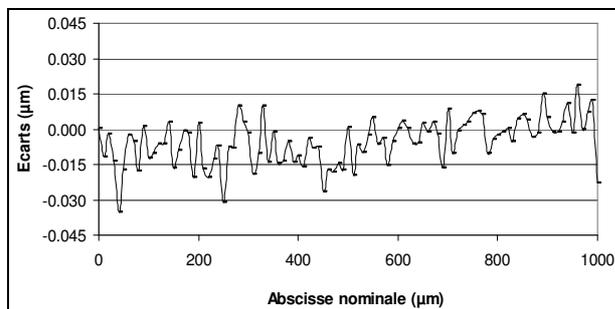


Fig. 3. – Écarts constatés pour des mesures en détection optique sur le banc micromètre et au Mikes ; La pleine échelle correspond à l'incertitude sur la différence.

La validation des résultats a été assurée d'une part au travers de comparaisons de résultats de mesures issus des deux technologies de détection et d'autre part par une comparaison avec un laboratoire national (fig. 3) utilisant une technique de détection similaire (MIKES en Finlande). Ces comparaisons ont permis de confirmer l'indépendance du mesurand vis-à-vis de la technologie de détection, ce point étant essentiel pour assurer la continuité des mesurandes, et d'autre part de maintenir voire d'aboutir à une légère réduction de l'incertitude de mesure.

3.2. Mesure des états de surface

L'objectif de cette étude commencée en 2005 est dans un premier temps de mettre en place des moyens de

transfert et une expertise dans le domaine des états de surface d'étalons selon les normes ISO relatives aux mesures par la méthode du profil. Dans un second temps il s'agira de répondre aux évolutions de la normalisation (mesures surfaciques, capteurs optiques, etc.).



Fig. 4. – Vue générale du banc de mesure des états de surface.

Une instrumentation dédiée à la mesure des états de surface a été réalisée. Celle-ci exploite un capteur inductif de marque Taylor-Hobson et le logiciel d'analyse de données MoutainsTM de Digital Surf. La réalisation de l'équipement a été confiée à la société Nanojura pour la partie mécanique et commande. L'équipement a été conçu de manière à respecter le principe d'Abbe et avec une chaîne métrologique la plus courte possible. Cette instrumentation ayant vocation à devenir une référence nationale, l'échantillon est placé sur une table XY dont la position horizontale est donnée par un axe interférométrique selon X pour assurer la traçabilité. D'autre part, la qualité du déplacement de la table est mesurée en permanence au moyen d'un axe interférométrique selon Z donnant des informations sur les défauts, en particulier de guidage, afin de corriger en temps réel les mouvements verticaux parasites. L'axe interférométrique selon Z permet également d'assurer le raccordement du capteur inductif. Ce dispositif a été réceptionné en fin d'année 2006. Celui-ci repose sur un ensemble de 4 pots à air posés sur un massif isolé (fig. 4). Ses caractéristiques sont conformes au cahier des charges et le programme de qualification et d'évaluation des incertitudes de mesure doit démarrer début 2007.

3.3. Mesure des diamètres

L'objectif de ce projet est de permettre de réduire les incertitudes de mesure des diamètres (afin d'obtenir une incertitude élargie de l'ordre de 0,06 µm à 0,08 µm contre 0,11 µm aujourd'hui) et aider à définir le cahier des charges d'un nouveau moyen de mesure destiné à intégrer les mesures de formes et de dimensions. Ceci afin de

couvrir en particulier les besoins d'amélioration des incertitudes pour la mesure des ensemble piston-cylindre des balances manométriques.

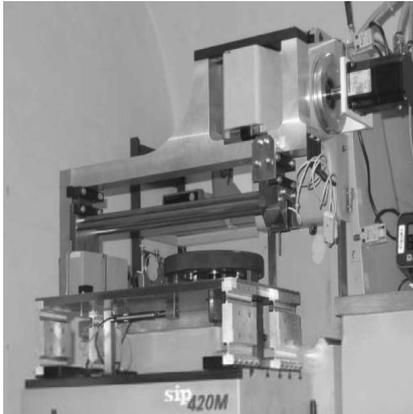


Fig. 5. – Machine SIP 420M en cours d'adaptation.

Le dispositif de mesure réalisé utilise comme base une machine SIP 420M. Celle-ci a été transformée afin d'optimiser la chaîne de mesure et d'automatiser certaines séquences de mesure (fig. 5). En particulier le gain en incertitudes a été traité au travers des améliorations suivantes :

- automatisation de certaines séquences de mesure : possibilité de répéter les mesures et de réduire l'influence de l'opérateur ;
- réalisation d'une chaîne métrologique indéformable pour éviter les corrections de déformation de bâti ;
- montage de l'interféromètre afin de respecter le principe d'Abbe quel que soit le plan de mesure ;
- amélioration des conditions d'acquisition en prenant en compte la valeur indiquée par le capteur en contact avec la pièce.

En 2006 les travaux ont essentiellement porté sur la phase d'automatisation de la machine. Les essais de comportement et de caractérisation mécanique doivent débiter au premier trimestre 2007.

3.4. Nanométrie dimensionnelle

En 2006 les travaux de l'équipe nanométrie ont porté sur la table croisée nanométrique.

Concernant l'environnement de la machine, la mise en œuvre du caisson de protection thermique (fig. 6) a permis d'atteindre des stabilités thermiques de l'ordre de 0,01 °C sur 10 h pour l'air autour de la machine et de 0,001 °C pour les pièces mécaniques critiques. Le caisson a aussi permis de limiter les flux d'air qui perturbaient les mesures de position par interférométrie.

Concernant la chaîne de mesure XY :

- les procédures d'alignement des lasers et des miroirs sur la machine ont été rédigées ;
- quatre dispositifs de compensation ont été conçus (un pour chaque interféromètre utilisé sur la machine, soit

2 en X et 2 en Y) dont l'objectif est de détecter et de compenser en temps réel les fluctuations de la mesure de position dues aux variations de l'indice de l'air ; ces dispositifs qui restent à intégrer, sont complétés d'une station météo de haute exactitude qui permet de déterminer l'indice de l'air absolu pour chaque interféromètre et de caler le système de compensation ;

- un dispositif constitué de deux grilles Heidenhain solidarisées par un barreau, dont l'objectif est de matérialiser une longueur stable dans le temps, a été défini pour étalonner l'orthogonalité des axes XY de la machine ;
- l'enregistrement de mesures permettant une meilleure compréhension du comportement de la machine a été poursuivi.

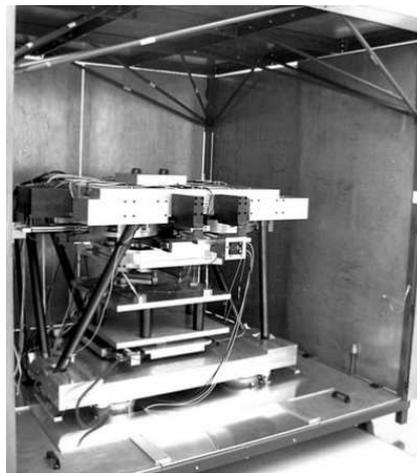


Fig. 6. – Machine XY et son caisson de protection thermique.

Concernant la chaîne de mesure Z, les travaux ont concerné essentiellement l'amélioration du banc de mesure de planéité installé à l'ENSAM de Lille afin de préparer le transfert sur la machine. Le programme de pilotage et d'acquisition du banc a été modifié pour permettre l'oscillation simultanée des deux niveaux nécessaires à l'amélioration de la résolution du dispositif. Des simulations numériques, sur la méthode d'amélioration de résolution des niveaux, ont été menées et ont donné des résultats très encourageants. La mécanique manquante pour réaliser cette oscillation a été conçue et réalisée. L'intégration est en cours.

Parallèlement à ces tâches, une enquête nationale visant à identifier de nouveaux besoins et acteurs en nanométrie dimensionnelle a été préparée et lancée à la fin de cette année auprès de 100 entités distinctes comprenant des laboratoires de recherche, des industriels, des institutionnels et des associations. A l'heure actuelle, cette enquête est un franc succès puisque le taux de réponse atteint 30 %. Le dépouillement de ces réponses est en cours.

Enfin, le laboratoire a engagé une étude concernant la conception d'un AFM métrologique au travers d'un stage et d'une thèse de doctorat démarrée en septembre 2006.