

Longueur et grandeurs dimensionnelles

Length and dimensional quantities

1. Introduction

Les travaux menés en 2005 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

2.1. Système de mesure de fréquence optique femto-seconde pour la matérialisation du mètre

L'accent a été mis cette année sur le développement d'un système femto-seconde qui permettra le raccordement direct des étalons de fréquence optiques aux horloges micro-onde.

Cette nouvelle référence est maintenant quasiment opérationnelle : le montage optique (fig. 1) et l'électronique d'asservissement sont réalisés. Le décalage du peigne de fréquences est mesuré par un battement de fréquences entre la partie verte du peigne (aux alentours de 532 nm) et la partie rouge doublée en fréquence par simple passage dans un cristal de KTP. L'asservissement du décalage du peigne est réalisé avec un modulateur acousto optique permettant de modifier la puissance du laser de pompe. L'électronique d'asservissement du taux de répétition fonctionne et une version définitive est en cours de réalisation. La traçabilité sera assurée par la baie SYREF réalisée par l'Observatoire de Besançon. Celle-ci est en cours d'installation au LNE-INM. Les travaux effectués en 2005 ont permis de réaliser un premier battement de fréquences avec un des lasers YAG doublé en fréquence aux alentours de 532 nm.

2.2. Sources laser solides pour la mise en pratique

L'étude des performances métrologiques de l'étalon à 515 nm basé sur un laser à fibre doublé en fréquence et asservi sur l'iode a été poursuivie cette année. Les travaux engagés en 2004 avaient montré qu'il était possible d'atteindre une stabilité de $2 \cdot 10^{-13} \cdot \tau^{-1/2}$, qui correspond à une valeur maximale limitée par la stabilité du peigne de fréquences utilisé pour la mesure. Une mesure de la transition a_3 de la raie P13 à un an d'intervalle a donné un écart de 750 Hz entre les deux mesures. Ceci donne une

bonne idée de la reproductibilité à long terme du laser, de l'ordre de $1,3 \cdot 10^{-12}$ en valeur relative. Ces mesures concernent une transition recommandée par le CIPM pour la mise en pratique de la définition du mètre. D'autres études ont été effectuées sur une transition proche de la P13, plus intense, et accessible grâce au laser à fibre. La fréquence de toutes ses composantes hyperfines a été mesurée avec une incertitude de 1,5 kHz ($2,6 \cdot 10^{-12}$ en valeur relative). Les différents paramètres d'influence ont été identifiés et leur impact sur l'incertitude finale a été étudié. L'ensemble de ces travaux est soumis à publication.

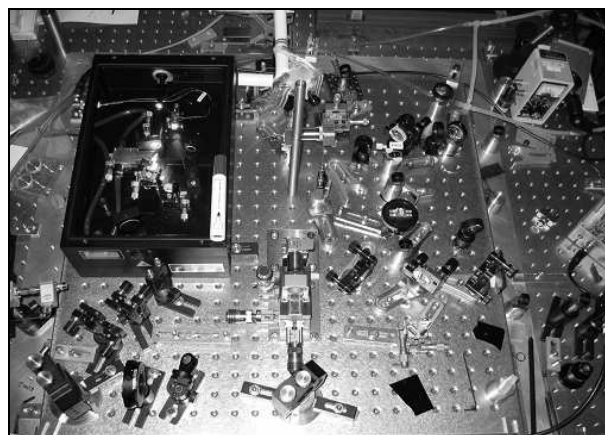


Fig. 1. – Vue du système femto-seconde.

Les travaux sur la seconde source laser YAG doublée en fréquence par un cristal de PPLN en simple passage (fig. 2) ont été poursuivis. Ce laser permet d'atteindre toutes les transitions recommandées à 532 nm pour la mise en pratique de la définition du mètre. Des mesures de battement entre les deux étalons du laboratoire ont permis d'établir que la stabilité relative de ce laser est de l'ordre de $7 \cdot 10^{-14} \cdot \tau^{-1/2}$.

2.3. Mesure du rapport h/m

Les travaux de recherche destinés à la mesure du rapport h/m et réalisés par l'ENS-LKB ont été très fructueux en 2005 : une campagne de mesures en géométrie verticale (faisceaux Raman et faisceaux de Bloch sont maintenant verticaux) a permis la mesure de la constante de structure fine α via la mesure du rapport h/m avec une incertitude relative de $6,7 \cdot 10^{-9}$ ce qui constitue la

meilleure incertitude expérimentale à ce jour pour la mesure de cette constante.

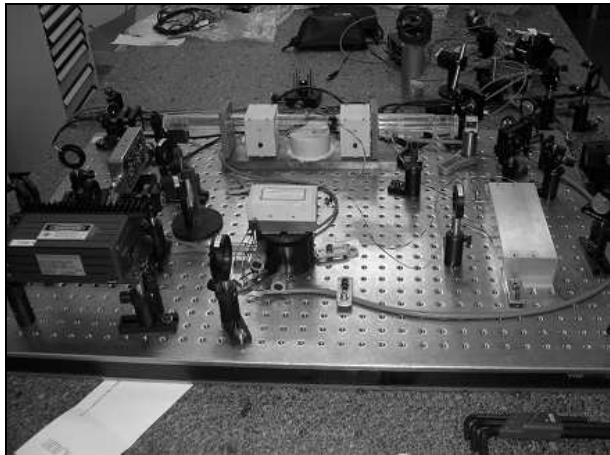


Fig. 2. – Seconde source laser YAG aux alentours de 532 nm.

3. LNE/CMSI

3.1. Banc d'étalonnage des micromètres objet

Le laboratoire a engagé le remplacement du microscope photo-électrique par un microscope optique associé à une caméra CCD. La première étape de ce projet a consisté à mettre au point un nouveau banc dédié aux étalonnages de micromètres objets sur une course de 10 mm qui soit capable de recevoir les deux technologies de détection de traits (fig. 3).



Fig. 3. – Vue d'ensemble du banc d'étalonnage des micromètres objets avec en premier plan à gauche la platine de translation à lames flexibles surmontée par un microscope photo-électrique.

Cette première étape a permis de définir une architecture nouvelle de banc et de mettre au point les procédures d'alignement de l'interféromètre laser sur des courses de quelques millimètres. La seconde étape, en

cours, consistera à définir la meilleure stratégie de détection de traits, tant du point de vue de la position des traits que de la façon d'interpréter les images en cherchant en particulier à conserver la continuité des mesurandes entre les deux technologies.

3.2. Nanométrie dimensionnelle

Durant l'année 2005, les travaux ont porté principalement sur l'environnement de la machine ainsi que la caractérisation et l'étalonnage des axes de mesure X, Y et Z.

Concernant l'environnement, les études se sont focalisées sur la recherche et la réduction des principales sources de perturbation de la machine. Ainsi la majorité des sources de chaleur qui perturbaient la machine ont été éliminées et les bruits électriques réduits considérablement. Une source de perturbation à 3 Hz de la machine par le massif en béton et les dérives des systèmes de mesure interférométriques implantés sur la machine ont été mises en évidence. Dans le cadre de l'étude thermique, les résultats ont permis de faire un état des lieux de la situation. Les résultats, obtenus sans qu'aucune protection particulière n'ait été mise en place, sont encourageants et ont permis l'étude des flux de chaleur au sein de l'équipement et avec l'environnement. La compréhension de ces échanges thermiques s'appuie sur la connaissance des puissances dissipées et sur le comportement thermique de la structure de la machine. Les sources de chaleur ne pouvant être déplacées ont été caractérisées (AFM, système de mesure Heidenhain, interféromètres). Des expériences sur des dispositifs dédiés ont montré le potentiel d'amélioration possible par la mise en place d'un caisson en alliage d'aluminium. La modélisation de l'effet du dispositif a permis le dimensionnement d'un caisson qui sera mis en place sur la machine et évalué en 2006.

Pour la partie caractérisation et étalonnage des axes de mesures XY, les travaux ont essentiellement porté sur l'intégration et le réglage du système de mesure interférométrique puis sur la mise en place de la procédure d'étalonnage de la machine pour ces deux axes. La procédure concerne notamment l'étalonnage de la rectitude des miroirs utilisés par les interféromètres, la mesure de l'orthogonalité des axes laser et l'étalonnage des grilles Heidenhain. Des premiers résultats expérimentaux encourageants ont été obtenus sur la mesure de la rectitude des miroirs. Pour la partie caractérisation et étalonnage de l'axe de mesure Z, le bilan des défauts de guidage de la partie mobile et des défauts liés à la chaîne métrologique Z a été établi. Concernant l'étalonnage de l'axe Z, les études ont été centrées sur la validation par simulation de la technique de mesure par propagation des défauts de forme à l'échelle nanométrique des références de planéité en utilisant une matrice de capteurs capacitifs. Ces simulations ont permis de valider les choix faits et permettent d'être confiant sur la méthode.