

Rayonnements optiques

Optical radiation

1. Introduction

Dans ce domaine, les activités pour la « métrologie française » sont effectuées par deux laboratoires : le LNE-INM au CNAM/Saint-Denis et le LNE/CMSI à Trappes. Elles recouvrent la réalisation des références nationales et leur transfert vers l'industrie dans les domaines spectraux ultraviolet, visible et infrarouge pour les grandeurs relatives aux caractéristiques des sources, des détecteurs ou des matériaux.

2. LNE-INM

Toutes les grandeurs sont interdépendantes et les travaux effectués au cours de ces dernières années ont eu pour but de les rendre cohérentes en les raccordant toutes à une référence unique, le radiomètre à substitution électrique cryogénique qui constitue actuellement la meilleure référence connue de mesure de rayonnement optique.

2.1. Utilisation d'une source laser accordable sur un large domaine spectral

Pour mesurer la sensibilité spectrale de détecteurs avec une incertitude de 10^{-4} à l'aide des mesures de flux par le radiomètre cryogénique, il est nécessaire d'avoir des faisceaux laser de faibles dimensions et très stables en puissance. En 2006, il a été décidé d'utiliser une source laser accordable afin d'étendre la gamme spectrale d'étalonnage en sensibilité spectrale et aussi pour mesurer la température thermodynamique de corps noirs par raccordement au radiomètre cryogénique. Cet objectif implique une caractéristique supplémentaire pour la source laser : une finesse spectrale et une bonne connaissance de la longueur d'onde de mesure.

Le projet de développement de cette source laser accordable sur un large domaine spectral est organisé sur 5 ans, afin d'intégrer au mieux les besoins exprimés en radiométrie et en pyrométrie. L'étude porte sur la mise en œuvre d'une source laser spectralement fine ($< 0,001$ nm) accordable sur une large gamme spectrale, d'une bonne stabilité de flux ($< 10^{-4}$ en relatif), d'une puissance minimale de 50 mW. Le faisceau doit être très fin et directif pour son utilisation avec le radiomètre cryogénique ou au contraire dispersé avec une sphère intégrante pour le rendre spatialement et angulairement large et homogène.

Le laser titane-saphir, mis en place pour ce projet, est accordable de 700 nm à 1 000 nm. Les premières mesures indiquent qu'il fournit une puissance supérieure à 200 mW entre 670 nm et 880 nm, avec un maximum de 700 mW à 790 nm. La stabilité en longueur d'onde sans asservissement est meilleure que 0,001 nm sur plusieurs minutes ; ce qui satisfait les besoins.

Pour obtenir une source laser accordable entre 200 nm et 1 000 nm, le laser titane-saphir sera complété par un oscillateur paramétrique optique (OPO) fonctionnant dans des plages spectrales entre 1 000 nm et 4 000 nm puis par un dispositif doublant et triplant la fréquence pour atteindre le domaine 200 nm à 500 nm. L'aptitude du laser à servir de pompe d'un OPO a été vérifiée.

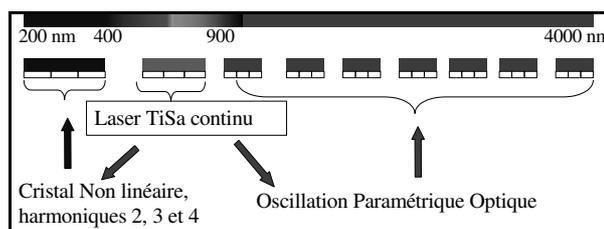


Fig. 1. – Schéma de réalisation d'une source laser accordable, entre 200 nm et 4 μ m.

Pour l'étalonnage en luminance énergétique, il est nécessaire d'avoir un faisceau étendu et homogène de la source. Cela est réalisé par l'injection du flux laser dans une sphère intégrante à l'aide d'une fibre optique. Le *speckle*, créé par la fibre, engendre une inhomogénéité du faisceau. En 2006, un dispositif de stabilisation et d'homogénéisation du flux a été réalisé, permettant d'atteindre une stabilité de 10^{-5} sur plus de 1 000 s ; Cette stabilité est satisfaisante pour ces étalonnages.

2.2. Validation de méthode par une constante fondamentale

Une détermination de la constante de Planck a été faite à partir de mesures radiométriques utilisant un détecteur fonctionnant en régime de comptage de photons par deux méthodes radiométriques absolues. Le nombre de photons incidents N est directement lié à la puissance P reçue par le détecteur : $P = N \cdot h \cdot c \cdot \lambda^{-1}$, où λ est la longueur d'onde arrivant sur le détecteur, c la vitesse de la lumière dans le vide et h la constante de Planck. La méthode utilisant une source de photons corrélés donne accès à N et le

radiomètre cryogénique mesure la puissance du faisceau monochromatique P .

La valeur obtenue pour la constante de Planck est de $6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s avec une incertitude type de $2,3 \cdot 10^{-35}$ J·s soit 3,4 %. Ce résultat est en accord avec la valeur de la constante de Planck donnée dans le Codata et a permis la validation de la mesure radiométrique de flux par deux méthodes différentes.

2.3. Déménagement du laboratoire

Le LNE-INM a déménagé en 2006 de la rue Saint Martin/Paris 3^e à la rue du Landy/La plaine Saint-Denis. Cela a été l'occasion pour l'équipe des « Rayonnements optiques » de réorganiser l'installation des bancs de mesure de manière plus fonctionnelle et de réviser l'état de fonctionnement de différents éléments.

De nombreuses mesures de validation ont été faites avant et après le déménagement. Les travaux les plus importants ont concerné le radiomètre cryogénique avec une nouvelle configuration d'installation des sources lasers, le banc de sensibilité spectrale avec une vérification complète du monochromateur et des miroirs, et pour la photométrie, mise en état de fonctionnement du goniophotomètre après révision complète de la mécanique et mise à jour du suivi des photomètres et des lampes pour la candela.

3. LNE/CMSI

3.1. Évaluation du banc de mesure par interférométrie en lumière incohérente (OLCR)

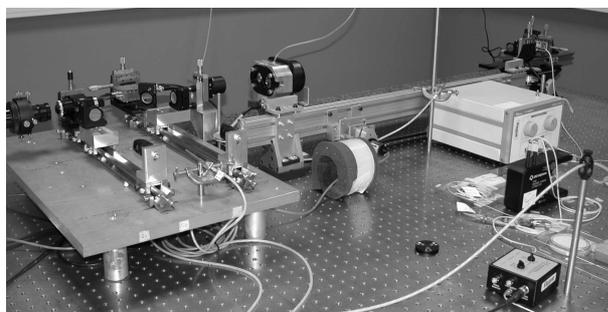


Fig. 2. – Banc de mesure OLCR.

Afin d'évaluer la reproductibilité des mesures, une analyse statistique a été faite sur 8 séries de 10 mesures successives sur un tronçon de fibre. Chaque série a été obtenue après un intervalle d'au minimum une semaine et après avoir déconnecté puis connecté la fibre et le détecteur, éteint et allumé la source et ajusté sa puissance. Une mesure est l'acquisition de deux interférogrammes correspondant aux réflexions sur les deux extrémités de la fibre.

Ces données ont également été exploitées pour déterminer la reproductibilité de la mesure de la dispersion chromatique. Elle est de $0,13 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ sur une valeur moyenne de $17,29 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$.

3.2. Spectroradiométrie UV

Le banc d'étalonnage en éclairage énergétique spectrique de sources UV, par comparaison à une lampe étalon, est opérationnel. Il fonctionne entre 240 nm et 400 nm avec une largeur spectrale d'analyse inférieure à 4,6 nm. Le calcul d'incertitude a été fait selon deux méthodes, en utilisant la loi de propagation des incertitudes (méthode du GUM) et en utilisant la loi de propagation des distributions (méthode de Monte Carlo). Le résultat est présenté sur la figure 3.

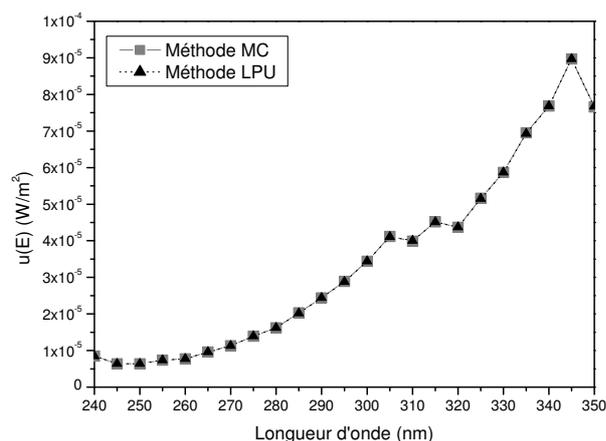


Fig. 3. – Incertitudes calculées selon la méthode classique (LPU) et selon la méthode de Monte Carlo (MC).

3.3. Spectrophotométrie des matériaux

L'objectif est la réalisation d'un dispositif de mesure absolue du facteur de réflexion spectral. En 2006, deux luminancemètres à filtres interférentiels ont été construits. Le système optique qui focalise le rayonnement de la source externe à l'intérieur de la sphère intégrante a été amélioré pour augmenter le flux et réduire la lumière parasite.

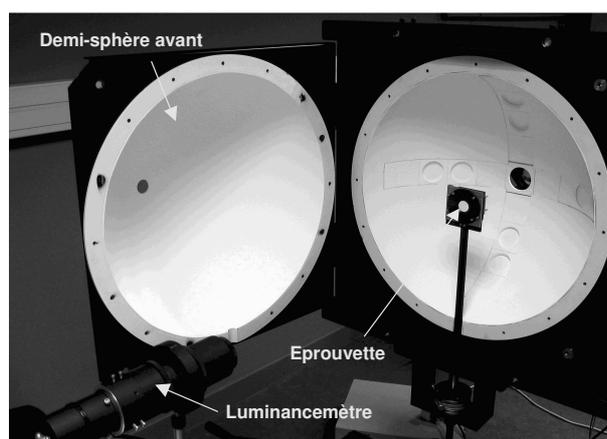


Fig. 4. – Sphère intégrante du banc de mesure absolue du facteur de réflexion.

La variation de la luminance incidente en fonction de la direction a été mesurée. Elle est de l'ordre de 2 % ; Elle est trop grande pour obtenir une incertitude relative sur la

mesure du facteur de réflexion inférieure à 0,5 %. Le fait que la dispersion de la luminance ne dépende pas de la configuration de mesure conduit à penser que cela provient d'un défaut d'uniformité de la peinture de la demi-sphère avant (qui éclaire l'échantillon). Le revêtement va donc être refait.

3.4. Radiométrie infrarouge

Cette année, les travaux ont essentiellement porté sur l'étalonnage en sensibilité spectrale de détecteurs. En particulier, une procédure a été mise en place pour étalonner, par comparaison, des détecteurs de sensibilités très différentes. Elle consiste à intercaler un filtre neutre atténuateur. Ce filtre est étalonné systématiquement *in situ*.

3.5. Radiométrie infrarouge : étalonnage de fluxmètres

Les capteurs dits « fluxmètres » utilisés pour les essais de résistance au feu mesurent des éclairagements énergétiques. Ils peuvent être étalonnés au LNE/CMSI sur deux bancs. Le premier est constitué d'un corps noir de forme cavité cylindrique et fonctionne sous vide, limitant ainsi les échanges thermiques de type convectif. Le second est constitué d'un corps noir sphérique fonctionnant à la pression atmosphérique.

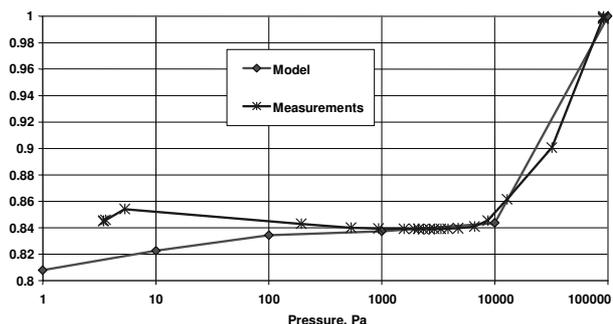


Fig. 5. – Variation relative de la densité de flux convectif, à 500 °C ; * : mesures, \diamond : modèle.

En 2005, le corps noir sous vide a été totalement révisé et son fonctionnement a été évalué en 2006. Les amplitudes des défauts d'uniformité en température de la cavité ont été réduites de 20 % en relatif pour les températures inférieures à 300 °C et divisées par 2 vers 500 °C et par 3 à 800 °C.

3.6. Mesure de l'indice de réfraction d'un matériau

La procédure d'étalonnage a été modifiée pour limiter les dégradations des fluxmètres aux très basses pressions

et aux forts éclairagements. Désormais, les étalonnages sont effectués entre 100 Pa et 10 kPa. En effet, sur ce domaine de pressions, la variation de la densité de flux est faible (fig. 5) et le coefficient de convection est quasiment linéaire en fonction du logarithme de la pression.



Fig. 6. – Goniomètre pour la mesure absolue de l'indice de réfraction.

À la suite de l'arrêt de l'activité d'étalonnage de l'IOTA, le LNE a acquis deux goniomètres. Ils fonctionnent selon deux méthodes, fonction de la géométrie du matériau et du niveau d'incertitude :

- mesure absolue par la méthode du minimum de déviation ; elle est utilisée pour les prismes et permet d'obtenir une incertitude de mesure estimée à quelques 10^{-6} ;
- mesure par comparaison un à prisme d'indice connu par la méthode du faisceau à incidence rasante ; elle est utilisée pour les lames de verres et l'incertitude de mesure est estimée à quelques 10^{-5} .

Une évaluation de ces équipements a été faite et le LNE/CMSI a conclu que certaines adaptations étaient nécessaires pour en faire des instruments de référence opérationnels :

- le goniomètre, pour la méthode absolue, nécessite des modifications en raison de l'existence d'une lumière parasite importante au niveau de la lunette autocollimatrice ;
- sur le réfractomètre, pour la méthode comparative, il est envisagé la mise en place d'un codeur angulaire afin de remplacer le système de lecture des angles et ainsi d'améliorer les incertitudes de mesure.