

# Rayonnements optiques

## Optical radiation

### 1. Introduction

Dans ce domaine de métrologie, les missions sont réparties entre deux laboratoires nationaux de métrologie : le LNE-INM au CNAM et le LNE. Elles recouvrent la réalisation des références et leur transfert en photométrie et en radiométrie (ultraviolet, visible et infrarouge) suivant une approche détecteurs, sources ou matériaux, tant en espace libre qu'en optique guidée.

### 2. LNE-INM

#### 2.1. Amélioration de la traçabilité au radiomètre cryogénique et du transfert en utilisant des détecteurs pièges

La traçabilité des mesures radiométriques au radiomètre cryogénique est assurée par l'utilisation de détecteurs pièges étalons secondaires, raccordés directement au radiomètre cryogénique à un certain nombre de longueurs d'onde lasers. Au cours de l'année 2004, ces points de raccordement ont été étendus dans le bleu en utilisant deux longueurs d'onde supplémentaires du laser argon : 472 nm et 454 nm.

L'utilisation de ces détecteurs étalons secondaires, pour les étalonnages des détecteurs de transfert, a mis en évidence une amélioration possible de l'incertitude sur ces étalonnages en associant un convertisseur courant-tension à un détecteur étalon secondaire, et en étalonnant l'ensemble par rapport au radiomètre cryogénique.

Sur le graphique de la figure 1 sont représentés les résultats obtenus pour un nouveau type de détecteur piège, développé en 2004 à partir des photodiodes au silicium (Si-S8552). Ces photodiodes ont été développées récemment par la société Hamamatsu, pour avoir des performances optimisées pour l'ultraviolet et sont utilisables sur le domaine spectral 190 nm – 1 000 nm.

Les résultats obtenus sont tout à fait encourageants pour l'utilisation du détecteur en tant que détecteur étalon secondaire pour l'ultraviolet, car les variations de sensibilité spectrale en fonction de la longueur d'onde sont relativement linéaires, à mieux que  $10^{-3}$ , sur l'ensemble des points de mesures. De plus, les valeurs obtenues sont très proches de la courbe théorique des détecteurs pièges, qui correspond à un rendement quantique égal à 1.

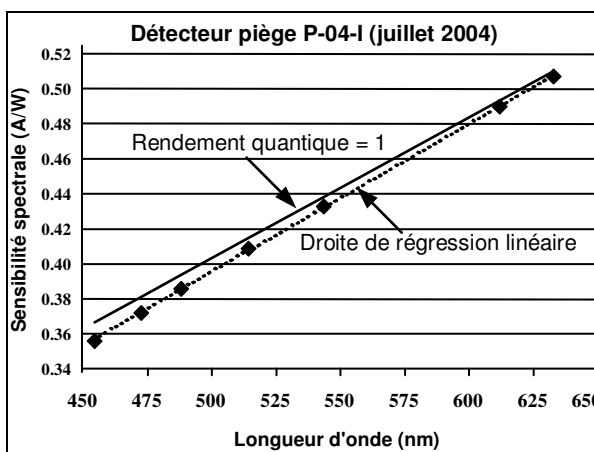


Fig. 1. - Résultats de l'étalonnage d'un détecteur piège par rapport au radiomètre cryogénique.

Dans le but d'améliorer la traçabilité au radiomètre cryogénique dans les domaines spectraux visible et proche ultraviolet, de nouveaux détecteurs pièges de grande surface ont été développés à partir de photodiodes au silicium mieux adaptées à la modélisation des courbes de sensibilité spectrale des détecteurs pièges. Ils ont été étalonnés en sensibilité spectrale absolue aux longueurs d'onde lasers, par comparaison aux détecteurs étalons secondaires.

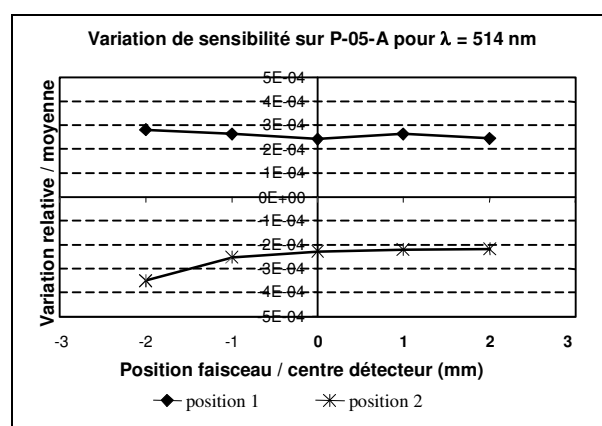


Fig. 2. - Résultats des mesures de sensibilité spectrale sur les détecteurs pièges de grande surface.

Pour prendre en compte les éventuels défauts de sensibilité locale, et se rapprocher des conditions d'utilisation des détecteurs, qui correspondent à une surface beaucoup plus largement éclairée que lors de l'étalonnage avec des faisceaux lasers, la sensibilité

spectrale a été mesurée en différents points autour du centre de la zone active des détecteurs, pour deux positions perpendiculaires des détecteurs. L'utilisation de cette nouvelle méthode d'étalonnage a permis de mettre en évidence un écart de la sensibilité spectrale entre les deux positions de mesures des détecteurs (fig. 2).

Cependant, l'incertitude type sur la valeur globale de la sensibilité spectrale est de l'ordre de  $10^{-4}$ ; ce qui conduit à une incertitude globale sur l'étalonnage de  $2 \cdot 10^{-4}$  à  $3 \cdot 10^{-4}$ , ce qui est tout à fait acceptable.

## 2.2. Etalon de luminance et d'éclairement monochromatique accordable (sur 20 nm)

L'objectif du projet est la réalisation d'un étalon de luminance et d'éclairement monochromatique accordable (sur 20 nm), destiné à l'étalonnage des radiomètres dans le proche infrarouge, ainsi qu'à la mesure de la température thermodynamique des points fixes de l'échelle de température du LNE-INM (dans la gamme des hautes températures). Cet étalon est composé de deux éléments :

- une source monochromatique lambertienne accordable sur 20 nm ;
- un luminancemètre.

La source lumineuse est une diode laser à cavité étendue accordable de 815 nm à 835 nm, injectée dans une sphère intégrant au moyen d'une fibre optique multimode agitée par ultra sons. La luminance en sortie de sphère est ainsi quasi lambertienne, non polarisée, sans speckle (la cohérence transverse du laser est détruite par mélange des modes de propagation dans la fibre) et très stable (quelques  $10^{-5}$  sur 5 h). Sa surface émissive est déterminée par un diaphragme qui lui est associé.

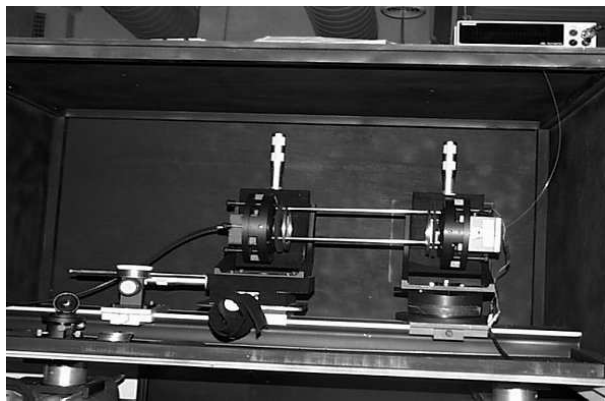


Fig. 3. - La source accordable et le luminancemètre.

Le luminancemètre est constitué d'un détecteur piège au silicium de très faible réflexion à cette longueur d'onde qui peut être étalonné en sensibilité spectrale à  $10^{-4}$  près avec le radiomètre cryogénique du LNE-INM et une source laser développée spécialement pour cet usage. Il lui est associé un diaphragme similaire à celui de la source laser lambertienne. Le système entier réside dans un capotage étanche à la lumière extérieure (fig. 3).

La source laser réalisée pour étalonner le détecteur piège présente un diamètre de faisceau inférieur à 1,2 mm sur une longueur de 1,20 m, une stabilité du flux de  $5 \cdot 10^{-5}$  sur 15 min, une polarisation rectiligne avec un taux d'extinction de  $3 \cdot 10^{-5}$ , une longueur d'onde de 852,231 nm avec une largeur de raie de 6 MHz. Elle est donc parfaitement adaptée aux étalonnages avec le radiomètre cryogénique.

Pour une distance séparant les diaphragmes de 31 cm, les inter-réflexions entre leurs supports causent une erreur de mesure de 3,49 %. L'utilisation de diaphragmes supplémentaires permet de réduire considérablement ces inter-réflexions mais elle introduit de nouvelles inter-réflexions et surtout de la diffraction. L'étude des effets diffractifs sur la mesure de luminance a été approfondie

Lors de la mesure de luminance, les diaphragmes utilisés pour réduire les inter-réflexions ont un diamètre de 8 mm et sont situés chacun à 5 cm de la source et du détecteur, chacun d'eux contribue à une augmentation de signal de 0,077 %, soit une augmentation globale du signal issu du luminancemètre de 0,15 %. Il est donc logique de penser que ces diaphragmes ont réduit 95 % des inter-réflexions. La modélisation des inter-réflexions avec le diamètre du diaphragme interposé est en cours. En doublant la distance entre la source et le détecteur, les inter-réflexions sont estimées par calcul à 0,23 %. L'emplacement des deux diaphragmes à 20 cm de la source et du détecteur devrait ramener la contribution des inter-réflexions à 0,01 %. Néanmoins, la diffraction qu'ils engendrent devrait globalement augmenter le signal du luminancemètre de 0,15 %, ce qui rendrait la diffraction prédominante sur les inter-réflexions.

La correction de la luminance mesurée associée à la diffraction n'est donc pas négligeable du tout et conduit à une réduction de la luminance réelle de la source de 0,15 % par rapport à la mesure. D'autre part, la source laser à diode a été remplacée par une source laser solide titane saphir plus largement accordable (400 nm) et plus puissante (2 W continu).

## 3. LNE

### 3.1. Radiométrie UV et visible

L'objectif de l'étude est la construction d'un nouveau banc d'étalonnage de détecteurs en sensibilité spectrale afin de remplacer l'ancien banc en améliorant en particulier les performances dans l'UV. Les références sont des détecteurs étalonnés au LNE-INM.

Ce nouveau dispositif a été installé dans une salle dédiée à l'étalonnage des détecteurs et des sources. Un capotage a été réalisé autour des détecteurs. Les logiciels de pilotage des éléments du banc ont été développés. Le monochromateur (réseau suivi d'un prisme) a été modifié pour obtenir une meilleure finesse spectrale et une meilleure efficacité aux courtes longueurs d'onde. Il s'en est suivi une mise au point de la procédure de réglage des positions angulaires du

réseau et du prisme. En sortie du monochromateur, l'optique de mise en forme du faisceau permet d'obtenir une surface éclairante circulaire ou rectangulaire.

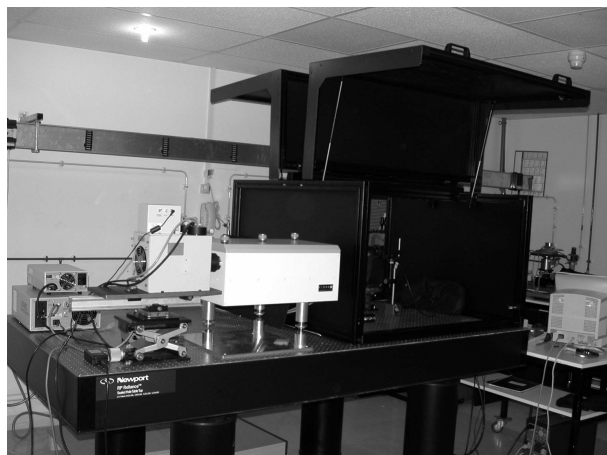


Fig. 4. - Banc de radiométrie UV.

Le boîtier source est actuellement constitué d'une lampe deutérium et d'une lampe halogène. Elles ont été caractérisées en stabilité de flux spectral. Bien que la stabilité à court terme soit relativement bonne, il est prévu de modifier la partie optique « sources » du banc pour notamment augmenter le flux arrivant sur les détecteurs et pour envisager l'utilisation d'autres types de sources.

Ce banc est opérationnel pour l'étalonnage des détecteurs en sensibilité spectrale. Ce banc sera aussi utilisé pour l'étalonnage de sources après quelques modifications. En complément des étalonnages, ce banc pourra également permettre les vérifications périodiques de la stabilité des filtres étalons de transmission spectrale régulière.

### 3.2. Spectrophotométrie des matériaux en transmission et en réflexion

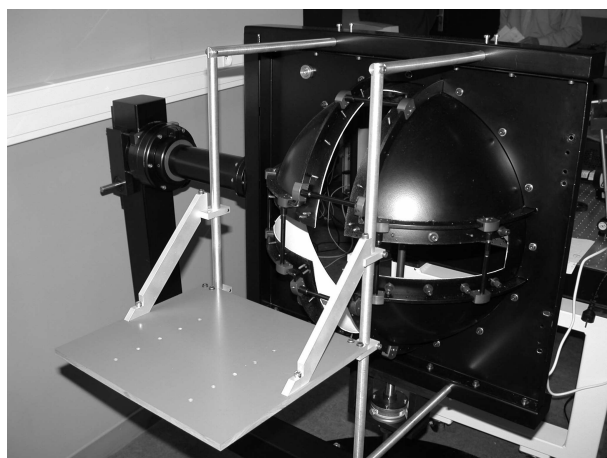


Fig. 5. - Banc de mesure absolue du facteur de réflexion hémisphérique directionnel spectral.

La construction d'un banc de mesure du facteur de réflexion hémisphérique directionnel spectral de matériaux opaques, avec une incertitude de l'ordre de 0,5 %, a débuté en 2004. L'ensemble support goniométrique et sphère a été réalisé. La sphère est orientable pour permettre les mesures de réflexions à différentes directions et l'analyse spatiale de la luminance incidente. L'optique de la source a été adaptée pour focaliser le rayonnement entrant sur le diffuseur.

### 3.3. Radiométrie IR

Afin de caractériser les détecteurs et les sources entre 1  $\mu\text{m}$  et 20  $\mu\text{m}$ , le LNE dispose d'un ensemble de moyens complémentaires exploitant les techniques habituellement développées en radiométrie classique, radiométrie laser et de l'interférométrie. Les références sont soit un détecteur silicium raccordé au radiomètre cryogénique du LNE-INM et un détecteur pyroélectrique, soit un radiomètre laser.

En 2004, des mesures sur des corps noirs à haute température (800  $^{\circ}\text{C}$  – 1 600  $^{\circ}\text{C}$ ) ont été entreprises à l'aide d'un spectro-radiomètre à monochromateur. La température de luminance des corps noirs a été déterminée par rapport à celle d'un corps noir de référence. Les premières mesures ont permis de déceler des instabilités dues à des défauts de répétabilité, pour une configuration donnée du monochromateur, et des défauts de reproductibilité, pour une même longueur d'onde mais des configurations différentes du monochromateur. Une modification de la procédure de mesure a permis de réduire le niveau de bruit. L'amélioration des performances de mesure sur les sources sera poursuivie par l'optimisation du choix des filtres d'ordre utilisés sur le spectro-radiomètre.

### 3.4. Fibronique

En 2004, tout le laboratoire de métrologie en optique guidée a été déménagé de Fontenay-aux-Roses (92) à Trappes (78). En particulier, le banc de mesure par interférométrie en lumière incohérente (OLCR) a été installé en prenant soin de réduire les sources de vibrations mécaniques. La stabilité et la dynamique du banc ont été améliorées à cette occasion.

Plusieurs fibres optiques « spéciales » ont été caractérisées avec le banc OLCR : fibres à cristal photonique, fibres à réseaux de Bragg, fibres à mode d'ordre supérieur. Ces travaux s'effectuent en collaboration avec l'ENST de Paris, le laboratoire PhLAM de l'Université de Lille, l'Ircom de Limoges et le METAS (Suisse). L'ensemble de ces mesures a mis en évidence le potentiel de la technique de l'OLCR pour mesurer l'indice de groupe, la réflexion, la longueur, le coefficient d'absorption, la dispersion chromatique et la biréfringence de fibres courtes (ou composants fibrés) avec de faibles incertitudes de mesure et donc de valider l'objectif d'en faire un outil métrologique essentiel.