



J.-M. COUTIN

Caractérisation et validation d'un nouveau radiomètre cryogénique au LNE-LCM

Characterization and validation of a new cryogenic radiometer at the LNE-LCM

Jeanne-Marie COUTIN et Bernard ROUGIE

Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam (LNE-LCM), Cnam, 61 rue du Landy, 93210 La Plaine-Saint-Denis, France, jeanne-marie.coutin@cnam.fr.

Résumé

Le laboratoire national de métrologie LNE-LCM utilise un radiomètre cryogénique comme référence primaire pour réaliser ses échelles radiométriques et photométriques. Cet instrument est un radiomètre à substitution électrique qui fonctionne à très basse température (4,2 K). Il permet d'effectuer des mesures absolues de la puissance de faisceaux lasers avec une incertitude type de l'ordre de 5×10^{-5} . Un nouveau radiomètre cryogénique a été installé au laboratoire, et le présent article décrit sa caractérisation métrologique complète qui permet d'atteindre ce niveau d'incertitude.

MOTS CLÉS : RAYONNEMENT OPTIQUE, RADIOMÈTRE CRYOGÉNIQUE, RÉFÉRENCE PRIMAIRE, SENSIBILITÉ SPECTRALE.

Abstract

The French National Metrology Laboratory, the LNE-LCM, uses a cryogenic radiometer as the basis for its optical radiation measurement scales. This instrument is an absolute radiometer operating at 4.2 K based on the electrical substitution method. It allows absolute measurements of the optical power of laser beams with a relative standard uncertainty in the range of 5 parts in 10^5 . A new cryogenic radiometer was installed in the laboratory and the present paper describes its complete metrological characterization which allows to achieve this level of uncertainty.

KEY WORDS: OPTICAL RADIATION, CRYOGENIC RADIOMETER, PRIMARY REFERENCE, SPECTRAL RESPONSIVITY.

1. Introduction

Aujourd'hui, dans les laboratoires nationaux de métrologie, la référence primaire pour les mesures des rayonnements optiques est un radiomètre à substitution électrique cryogénique, refroidi à très basse température

en utilisant de l'hélium liquide et communément appelé « radiomètre cryogénique » [1]. Le laboratoire national de métrologie français dispose depuis le début des années 1990 d'un radiomètre cryogénique pour réaliser ses échelles radiométriques et photométriques. Les travaux en cours ont pour objectif d'améliorer la traçabilité métrologique des mesures des différentes grandeurs radiométriques et photométriques en utilisant comme référence finale de chaque chaîne d'étalonnage, le radiomètre cryogénique. Les chaînes d'étalons comprennent des détecteurs de transfert, raccordés en sensibilité spectrale absolue au radiomètre cryogénique.

Le radiomètre cryogénique (RC) permet la mesure absolue de la puissance d'un faisceau laser avec une incertitude de l'ordre de 5×10^{-5} [2]. Il est utilisé pour l'étalonnage des détecteurs pièges étalons secondaires en sensibilité spectrale absolue avec une incertitude type de 1×10^{-4} à 2×10^{-4} , toujours en utilisant des faisceaux lasers [3]. Ces étalonnages ne sont réalisés qu'à certaines longueurs d'onde discrètes du domaine visible, entre 454 nm (laser argon) et 633 nm (laser hélium-néon).

Les détecteurs de transfert sont étalonnés en sensibilité spectrale absolue par comparaison aux détecteurs pièges étalons secondaires, aux mêmes longueurs d'onde lasers que celles utilisées avec le RC, mais ces détecteurs ont besoin d'être étalonnés également sur tout leur domaine spectral d'utilisation. Les valeurs à d'autres longueurs d'onde, entre 200 nm et 2 000 nm, sont obtenues au LCM par diverses méthodes d'interpolation ou d'extrapolation des points de mesures absolues, qui conduisent à une dégradation importante

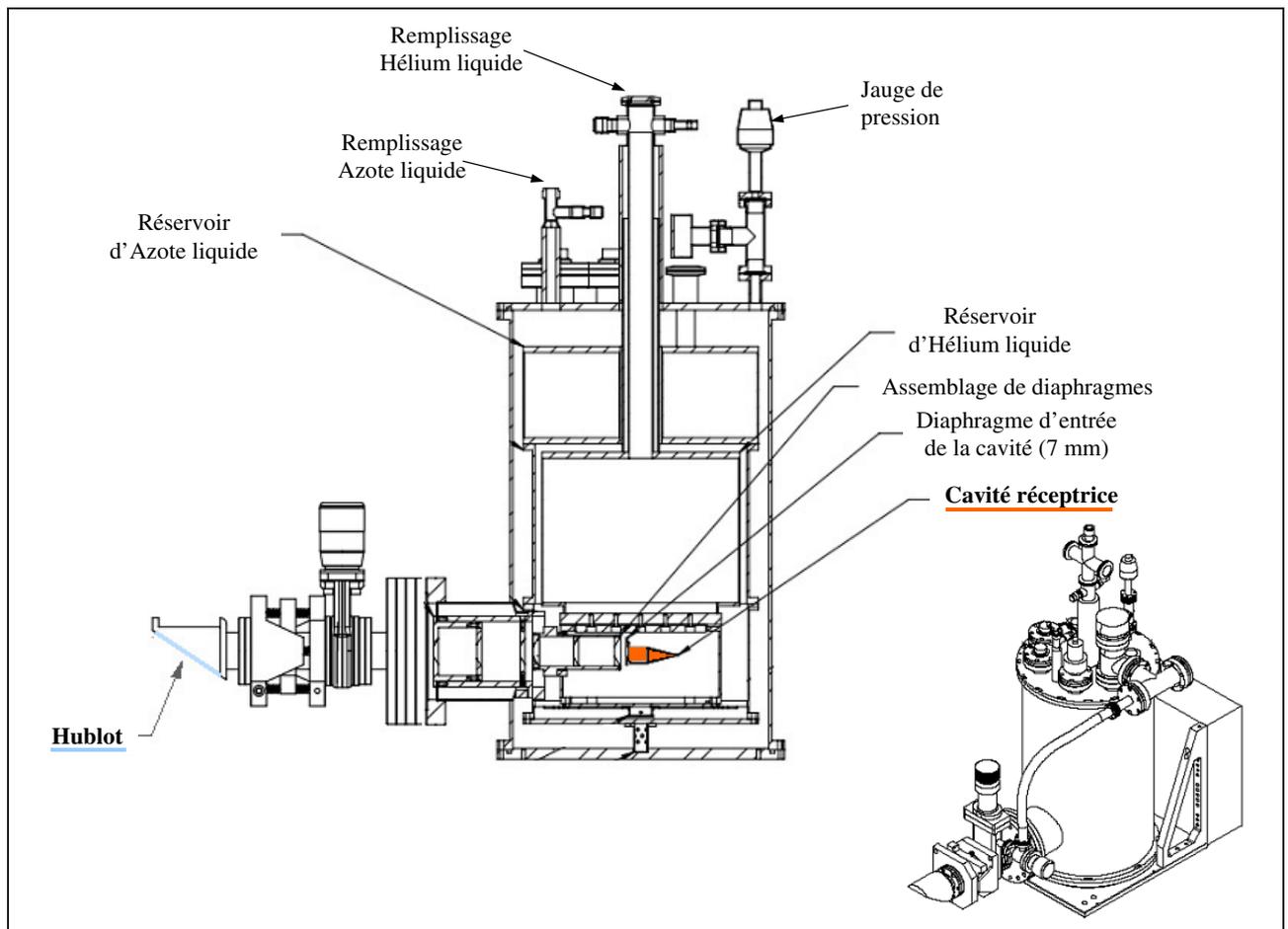


Fig. 1. – Schéma du radiomètre cryogénique CryoRad-II (en médaillon, vue en 3 dimensions du radiomètre).

de l'incertitude. Dans ces conditions, le raccordement au radiomètre cryogénique des détecteurs de transfert n'est réalisé qu'avec une incertitude supérieure à 10^{-3} entre 200 nm et 2 000 nm [4].

Pour répondre à la demande des industriels, dans des secteurs tels que la santé (radiométrie UV, photothérapie), l'environnement (mesures du rayonnement solaire, mesures radiométriques pour l'observation de la Terre depuis l'espace), il est devenu nécessaire d'améliorer les incertitudes de raccordement des dispositifs de mesures radiométriques et photométriques. Ceci ne peut se faire qu'en augmentant le nombre de points de raccordement direct au radiomètre cryogénique vers les domaines spectraux ultraviolet et infrarouge.

Cependant, pour pouvoir effectuer avec le RC des mesures au plus haut niveau de performance, au delà du domaine visible, il est nécessaire de le caractériser aux nouvelles longueurs d'onde utilisées. Cette caractérisation consiste à mesurer le facteur de transmission du hublot et le facteur d'absorption de la cavité du radiomètre cryogénique qui dépendent de la longueur d'onde.

Mais, suite à un dysfonctionnement du radiomètre cryogénique installé au LCM et à des difficultés de réparation, le laboratoire s'est équipé d'un nouveau RC. Ce nouveau RC a été complètement caractérisé, du point

de vue optique, mais également du point de vue électrique, pour pouvoir disposer d'une référence primaire au meilleur niveau d'exactitude possible. Cette caractérisation a été effectuée dans les domaines spectraux visible, proche infrarouge et ultraviolet.

2. Description du radiomètre cryogénique

Le radiomètre cryogénique est un radiomètre à substitution électrique qui permet de réaliser les mesures absolues des grandeurs caractérisant les rayonnements optiques. Cette méthode consiste à comparer le flux énergétique (puissance optique) transporté par un rayonnement optique à une puissance électrique, et la mesure de cette puissance électrique donne alors directement la valeur du flux du rayonnement optique.

2.1. Principe de fonctionnement

L'élément principal du radiomètre cryogénique est une cavité absorbante, placée au fond du cryostat, et refroidie à la température de l'hélium liquide (fig. 1). Ce cryostat, placé sous vide poussé, est fermé par un hublot pour permettre au rayonnement d'entrer dans la cavité. Par conséquent, le système ne peut fonctionner qu'avec des faisceaux directs, donc des faisceaux lasers.

Le rôle de la cavité est de transformer le rayonnement incident en chaleur. Le rayonnement optique entrant dans la cavité génère une élévation de la température de la cavité qui peut être mesurée. Puis un chauffage électrique, fourni par une résistance chauffante placée sur la cavité absorbante, est substitué au chauffage radiatif de façon à provoquer la même élévation de température. Alors, la puissance optique à mesurer est égale en première approximation à la puissance électrique dissipée dans le circuit de chauffage. Mais, dans la pratique, l'équivalence « puissance électrique-puissance optique » ne peut pas être réalisée parfaitement et, même si le fait de travailler à des températures cryogéniques réduit considérablement les principales causes d'erreur, il est nécessaire d'appliquer un certain nombre de corrections à la mesure directe de la puissance P_{RC} faite avec le radiomètre comme indiqué dans la relation (1) :

$$P_{opt} = \left(\frac{N \cdot P_{RC}}{\alpha \cdot \tau} \right) \quad (1)$$

où :

- P_{opt} est la puissance optique transportée par le rayonnement ;
- N est le facteur qui prend en compte la non-équivalence entre les deux modes de chauffage ;
- τ est le facteur de transmission du hublot d'entrée du radiomètre ;
- α est le facteur d'absorption de la cavité absorbante du radiomètre.

Du point de vue optique, ces corrections résultent du facteur de transmission du hublot du radiomètre cryogénique et du facteur d'absorption de sa cavité : ces deux facteurs ne sont pas exactement égaux à 1, et ils varient suivant la longueur d'onde. Il est donc nécessaire de les mesurer précisément aux longueurs d'onde utilisées.

2.2. Caractéristiques du nouveau radiomètre cryogénique : le système CryoRad-II

Le principal fournisseur au monde de radiomètres cryogéniques, pour équiper les laboratoires nationaux de métrologie (LNM), est la société américaine L-1 Standards and Technology. Elle construit maintenant le système CryoRad-II, qui constitue une nouvelle génération de radiomètres à substitution électrique cryogéniques. Le LNE-LCM est l'un des premiers laboratoires nationaux de métrologie à s'en être équipé.

Cependant, aucun saut technologique particulier n'a permis une amélioration notable des performances de ces instruments, depuis leur apparition à la fin des années 1980 : l'incertitude annoncée, de 5×10^{-5} , correspond à celle obtenue avec le système utilisé auparavant (LaseRad) sur la mesure d'une puissance optique de $100 \mu\text{W}$. Néanmoins, des améliorations ont été apportées au niveau du fonctionnement et pour faciliter l'utilisation. Elles portent essentiellement, pour le système

CryoRad-II, sur une autonomie en froid plus grande, pouvant aller jusqu'à 72 h, au lieu de 15 h auparavant : le cryostat comprend maintenant deux réservoirs, l'un de 2,5 L rempli d'azote liquide avec un système automatique de remplissage, qui entoure le second réservoir de 4,4 L contenant l'hélium liquide (fig. 1). La sensibilité du système a également été optimisée : elle atteint maintenant $3,28 \text{ K}\cdot\text{mW}^{-1}$ pour le radiomètre installé au LCM, au lieu de $0,9 \text{ K}\cdot\text{mW}^{-1}$ avec l'ancien système. Les dispositifs électroniques de contrôle du radiomètre, utilisés pour l'asservissement en température du système et l'acquisition des données, ont été également améliorés, pour diminuer le temps de réponse du système. Les cartes électroniques sont maintenant contrôlées par un logiciel développé sous l'environnement LabView, ce qui facilite l'implémentation du système dans le processus de mesure utilisé pour l'étalonnage des détecteurs pièges en sensibilité spectrale absolue.

Pour ce qui concerne la caractérisation métrologique du système, la mesure du facteur d'absorption du hublot est simplifiée car le hublot peut maintenant être enlevé plus facilement, sans remise du système à température ambiante. L'absorption de la cavité a été améliorée et le facteur d'absorption à 633 nm est désormais de 0,999 982, au lieu de 0,999 89 sur le précédent système.

Le diamètre d'entrée de la cavité est maintenant de 7 mm (fig. 1), au lieu de 5 mm sur le LaseRad, ce qui facilite le centrage des faisceaux lasers dans le radiomètre.

3. Présentation du banc de comparaison des détecteurs au radiomètre cryogénique

La caractérisation du radiomètre cryogénique doit être effectuée dans les conditions d'utilisation du radiomètre cryogénique. Elle a donc été faite sur le banc de mesure utilisé pour la comparaison des détecteurs au radiomètre cryogénique, sur lequel les faisceaux lasers sont mis en forme.

Pour pouvoir faire des mesures avec la meilleure exactitude avec le radiomètre cryogénique, il est nécessaire de mettre en forme soigneusement le faisceau laser utilisé, pour l'adapter aux conditions d'utilisation du radiomètre cryogénique [5] : le diamètre du faisceau doit être de l'ordre de 1 mm à une hauteur de $1/e^2$ du profil spatial, et la lumière diffusée autour du faisceau doit être limitée au maximum. La puissance doit également être stabilisée au niveau de 10^{-5} .

3.1. Montage expérimental pour la mise en forme du faisceau laser

Le schéma du montage expérimental, utilisé pour la comparaison des détecteurs au radiomètre cryogénique, est présenté sur la figure 2. Les détecteurs à étalonner sont montés à côté du radiomètre cryogénique sur une même table de translation, ce qui permet de les amener successivement dans le faisceau émis par les différents lasers

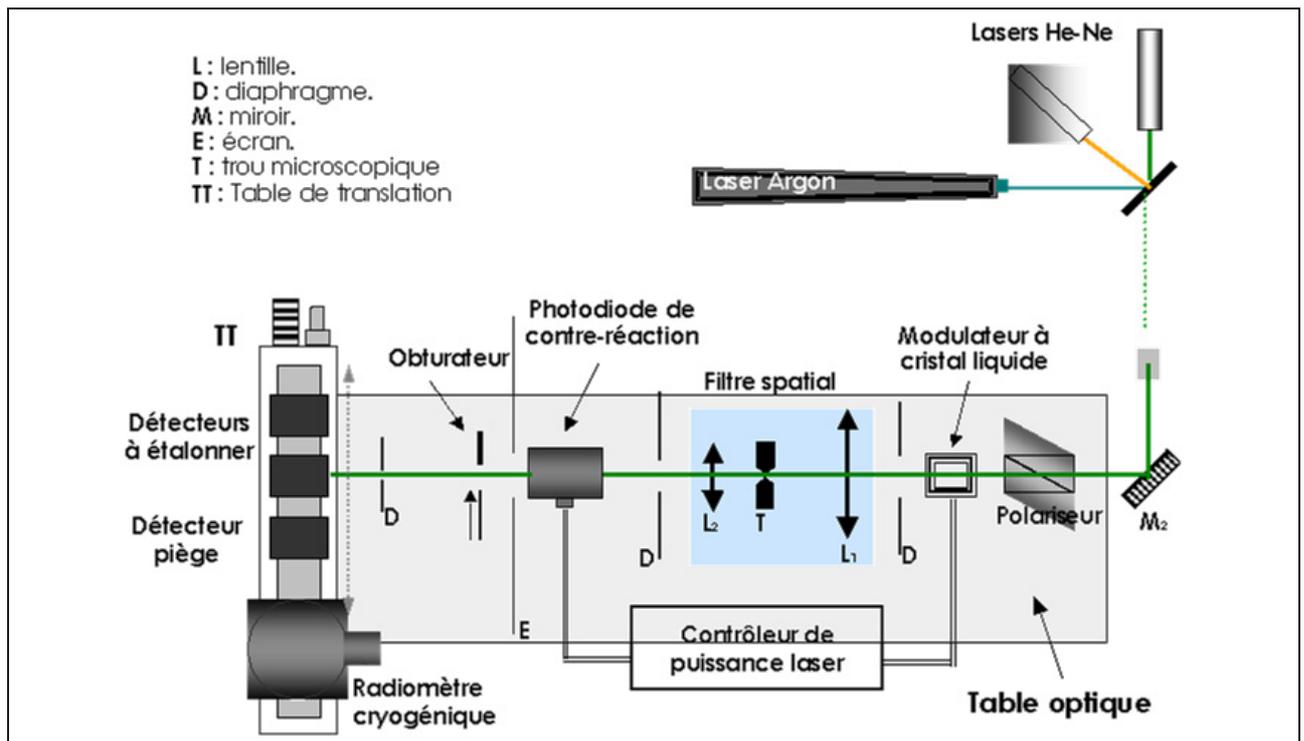


Fig. 2. – Schéma du montage expérimental utilisé pour l'étalonnage des détecteurs avec des faisceaux lasers.

utilisés. Ils sont positionnés de façon à ce que leur surface active se trouve dans le plan de la cavité absorbante du radiomètre cryogénique.

La mise en forme du faisceau se fait au moyen d'un filtre spatial. Il est constitué par un système afocal composé de deux lentilles convergentes, dont les focales sont déterminées à partir des caractéristiques du faisceau incident. Le filtrage à proprement parler du faisceau laser est obtenu à l'aide d'un trou microscopique dont le diamètre est adapté à la taille de la tache de focalisation formée par la première lentille. Cette technique permet d'améliorer considérablement la qualité des faisceaux lasers en réduisant, voire en supprimant la lumière parasite diffusée autour de ces faisceaux. Le rôle de la seconde lentille de ce filtre spatial est de réduire la taille du faisceau du laser incident, de façon à obtenir un diamètre de l'ordre de 1 mm à 2 mm, compatible avec le diamètre d'entrée du radiomètre cryogénique, celui-ci étant désormais de 7 mm.

La stabilisation en puissance du faisceau laser est assurée par un modulateur à cristaux liquides, qui permet en outre d'ajuster le niveau de puissance. Il est généralement fixé à environ 100 μ W pour l'étalonnage des détecteurs pièges, et la stabilité de la puissance est dans ces conditions de 3×10^{-5} pendant 15 min, temps qui correspond à la durée d'un cycle de comparaison.

3.2. Installation des sources lasers

Plusieurs sources lasers sont utilisées pour avoir différents points d'étalonnage des détecteurs. L'installation de ces sources lasers est schématisée sur la figure 3. Elles

sont montées sur des tables optiques, juxtaposées à la table sur laquelle est installé le montage de comparaison des détecteurs au radiomètre cryogénique (fig. 2). Les faisceaux sont renvoyés à l'aide d'un périscope et de miroirs sur l'axe optique défini pour les mesures.

Toutes ces sources sont montées de façon permanente devant le radiomètre cryogénique, pour pouvoir disposer alternativement de tous les faisceaux lasers lorsque le RC est opérationnel. Le montage se décompose en trois voies de mesure, correspondant aux trois domaines spectraux couverts : visible, ultraviolet et proche infrarouge. Les éléments optiques de mise en forme des faisceaux sont adaptés à chaque domaine spectral.

Pour le domaine visible, un laser à argon ionisé accordable permet d'obtenir huit longueurs d'onde réparties entre 454 nm et 514 nm, et trois lasers hélium-néon fournissent respectivement une longueur d'onde de 543 nm, 612 nm et 633 nm.

Pour le domaine ultraviolet, deux lasers ont été installés (laser Yag quadruplé à 266 nm, laser hélium-cadmium à 325 nm).

Pour le domaine infrarouge, le laboratoire possède un laser Ti :saphir, utilisé jusqu'à présent autour de 800 nm, et deux lasers He-Ne, émettant à 1 150 nm et à 1 523 nm.

4. Caractérisation du radiomètre cryogénique

La caractérisation métrologique complète du radiomètre cryogénique consiste principalement en l'étalonnage électrique du dispositif de la mesure de la puissance

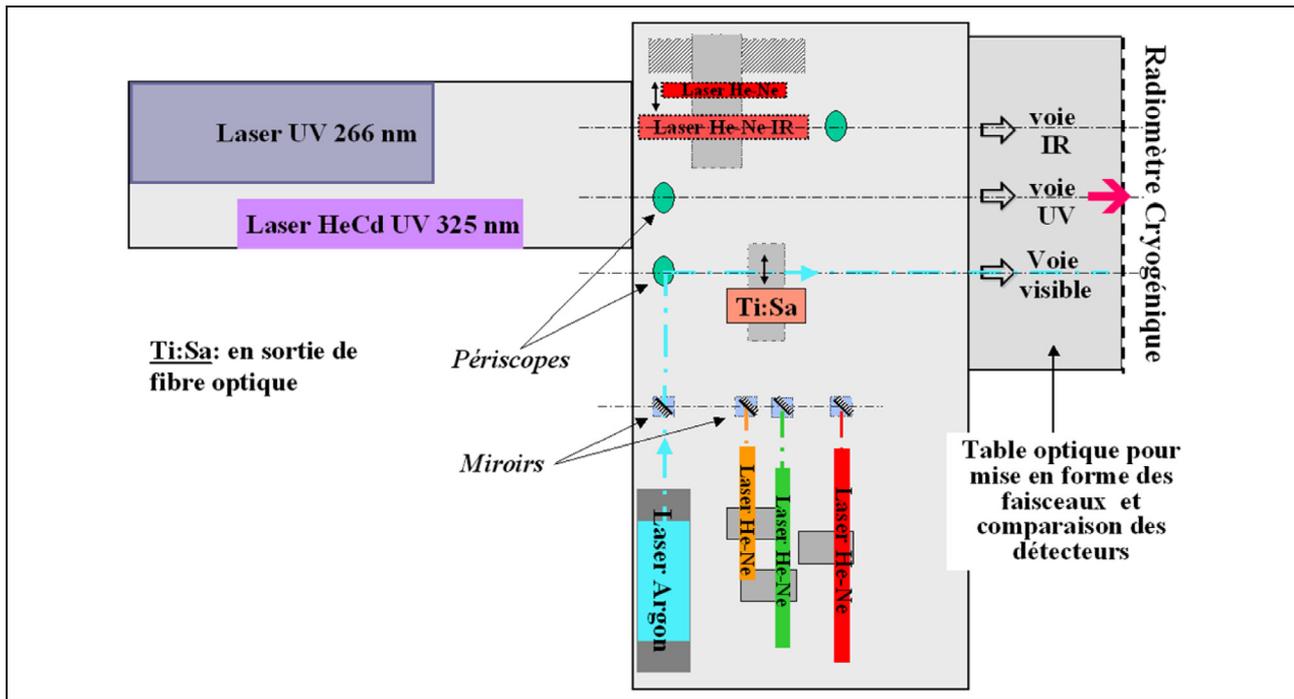


Fig. 3. – Montage des lasers pour l'utilisation avec le radiomètre cryogénique.

et en la détermination des corrections à appliquer à la mesure directe de la puissance (Eq. (1)) avec les incertitudes les plus faibles possibles, pour pouvoir effectuer des mesures de puissance optique avec une incertitude type relative de quelques 10^{-5} .

4.1. Mesure du facteur d'absorption de la cavité absorbante du radiomètre cryogénique

La mesure du facteur d'absorption de la cavité peut se faire sur une cavité factice, ce facteur n'évoluant pas dans le temps. Cette étude a été faite dans ces conditions à la PTB [6], en s'inspirant de la méthode développée au LCM (anciennement INM) pour le radiomètre cryogénique LaseRad [7], mais qui avait été faite en démontant la cavité du radiomètre.

Une cavité absorbante, provenant du même lot de fabrication que celle installée dans le nouveau radiomètre cryogénique (fig. 4) a été fournie en complément du radiomètre. Elle est construite en cuivre et elle a une épaisseur de $50 \mu\text{m}$. Elle a un diamètre extérieur de 19 mm et un diamètre d'entrée de 7 mm , excentré. La valeur donnée par le fabricant pour le facteur de réflexion est $16,66 \times 10^{-6}$ à la longueur d'onde de 633 nm , avec une incertitude type de $0,83 \times 10^{-6}$. La valeur du facteur d'absorption est donc de $0,999\,983$, d'après le constructeur.

Le facteur d'absorption α de la cavité est déterminé à partir de la mesure du facteur de réflexion diffuse ρ avec $\alpha = 1 - \rho$.

Le montage de mesure du facteur de réflexion, développé pour le premier radiomètre cryogénique, avait été adapté à la mesure de facteurs de l'ordre de $0,000\,2$ avec une incertitude type de 2×10^{-5} . Ceci signifie donc

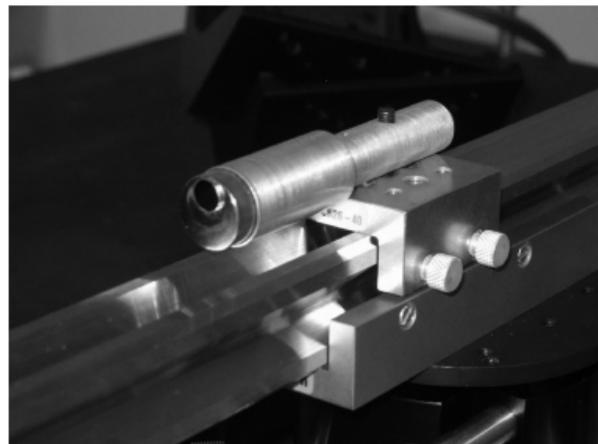


Fig. 4. – Cavité test, identique à celle installée dans le radiomètre cryogénique, montée dans un support.

que pour la nouvelle cavité, le facteur de réflexion est de l'ordre de l'incertitude obtenue sur la cavité précédente, et qu'il peut s'avérer alors inutile de mesurer maintenant ce facteur. Cependant, comme le fabricant ne donne la valeur du facteur de réflexion que pour une seule longueur d'onde, nous avons décidé de le vérifier et de le mesurer à d'autres longueurs d'onde.

4.1.1. Principe de la mesure du facteur de réflexion diffuse de la cavité du radiomètre cryogénique

Une sphère intégratrice est utilisée pour mesurer le rayonnement diffus qui ressort de la cavité lorsqu'elle est éclairée par un faisceau laser. Cette sphère (fig. 5) comporte trois trous : un trou d'entrée pour le faisceau laser incident, un second diamétralement opposé sur lequel

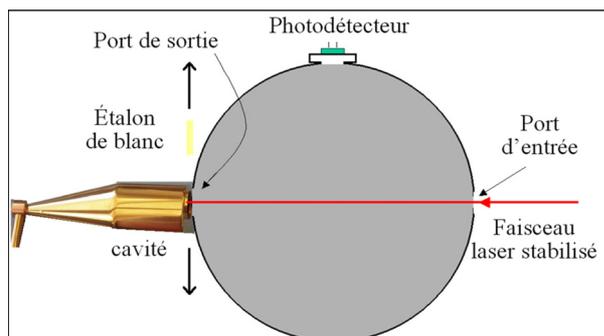


Fig. 5. – Méthode de mesure du facteur de réflexion de la cavité absorbante du radiomètre cryogénique.

sont placés alternativement la cavité ou un étalon de blanc, et un troisième pour placer un détecteur de rayonnement. Le facteur de réflexion de la cavité ρ_c est obtenu, en première approximation, à partir de la relation (2) suivante :

$$\frac{S_c - S_0}{S_E - S_0} \approx \frac{\rho_c}{\rho_E} \quad (2)$$

où S_c et S_E sont les signaux délivrés par le détecteur avec respectivement la cavité ou l'étalon de blanc placés au niveau du trou de sortie, et ρ_E est le facteur de réflexion de l'étalon de blanc. Les signaux S_c et S_E sont corrigés du signal S_0 pour éliminer la part de lumière diffusée : S_0 est mesuré quand la cavité est placée loin de la sphère.

4.1.2. Caractérisation d'un nouveau système de mesure

Compte tenu de la faible valeur du facteur de réflexion de la nouvelle cavité, nous avons dû adapter le système de mesure développé pour le LaseRad [7], principalement en remplaçant la sphère intégratrice.

Pour faciliter les mesures, une nouvelle sphère intégratrice a été étudiée. Il s'agit d'une sphère modulaire réalisée par Labsphère, de diamètre 50 mm, avec un port d'entrée de diamètre 4 mm. Elle est équipée d'un port de sortie de diamètre 7 mm, mieux adapté à celui de la cavité absorbante, de deux détecteurs différents, pour pouvoir couvrir le domaine spectral allant de 190 nm à 2 600 nm et d'un étalon de blanc en Spectralon facilement repositionnable (fig. 6).

Différentes études ont été réalisées avec cette nouvelle sphère pour déterminer les conditions optimales pour pouvoir effectuer des mesures correctes mesure du facteur de réflexion.

4.1.2.1. Détermination de la position optimale de la cavité par rapport au port de sortie

La distance entre la cavité et le port de sortie est très critique pour la mesure du facteur de réflexion car le détecteur monté dans la sphère est sensible à la position de la cavité par rapport au port de sortie de la sphère. Pour déterminer la position optimale pour les mesures, le signal du détecteur a été mesuré en fonction de cette distance, pour différentes longueurs d'onde. Sur la figure 7

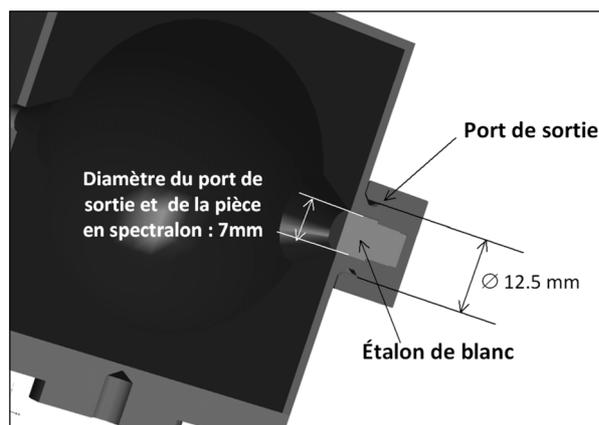


Fig. 6. – Schéma de la sphère intégratrice développée pour les mesures de réflectivité de la cavité du radiomètre cryogénique.

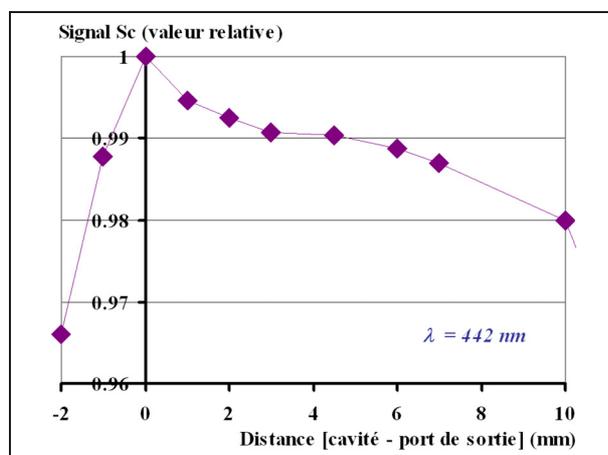


Fig. 7. – Réponse du détecteur de la sphère intégratrice en fonction de la distance entre la cavité et le port de sortie de la sphère.

sont représentés les résultats obtenus avec le laser He-Cd à 442 nm. On observe effectivement d'importantes variations. Pour les positions -1 mm et -2 mm, le bord du diaphragme de la cavité (fig. 5) est « encastré » dans le port de sortie de la sphère, ce qui contribue à une forte diminution du signal. Et lorsque la cavité est éloignée de la sphère, le signal diminue progressivement. À partir de cette étude, la position de la cavité par rapport à la sphère pour laquelle le signal est maximal a été définie comme étant la position optimale pour les mesures de réflectivité (car conduisant à la plus grande valeur du facteur de réflexion qui cependant reste toujours très faible, de l'ordre de 10^{-5}).

4.1.2.2. Mesure de la lumière diffusée et de la lumière parasite

Pour mesurer la lumière diffusée, la cavité du radiomètre est placée à différentes distances du port de sortie de la sphère. La figure 8 présente l'évolution de la réponse du détecteur en fonction de la distance entre la cavité et la sphère, obtenue avec le laser argon à 488 nm. À partir d'une distance de 10 cm, le signal atteint une valeur

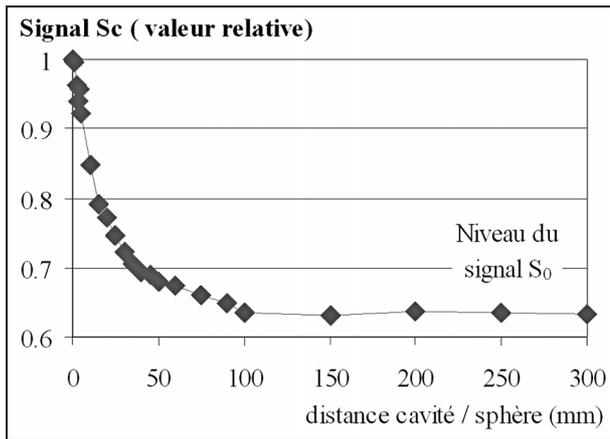


Fig. 8. – Réponse du détecteur de la sphère en fonction de la distance entre la cavité et la sphère.

Tableau 1

Résultats des mesures du facteur d'absorption de la cavité test et valeurs du facteur d'absorption.

Longueur d'onde (nm)	Puissance (mW)	Facteur réflexion ($\times 10^{-6}$)	Écart type sur les mesures ($\times 10^{-6}$)	Facteur absorption
800	5	17,30	0,65	0,999 983
633	3 à 5	16,96	0,57	0,999 983
612	0,8	17,57	0,37	0,999 982
543	0,350	14,67	0,39	0,999 985
514	3	22,54	0,99	0,999 977
488	5 à 10	14,66	0,49	0,999 985
442	5	14,02	0,37	0,999 986
325	3 à 5	10,60	0,35	0,999 989
266	5	16,73	1,36	0,999 983

quasi constante. Le signal résiduel provient principalement de la lumière diffusée, incluant l'offset de l'électronique ainsi que la lumière parasite. Ce signal correspond au signal S_0 (Eq. (2)) qui est soustrait des mesures faites avec l'étalon de blanc et la cavité, respectivement. Les mesures de la lumière diffusée ont alors été faites en plaçant la cavité à une distance de l'ordre de 40 cm de la sphère, pour toutes les longueurs d'onde.

4.1.3. Résultats de la mesure du facteur de réflexion diffuse dans le domaine ultraviolet et proche infrarouge

Dans le tableau 1 sont présentés les principaux résultats de mesures obtenus d'abord dans le domaine visible : la différence avec la valeur donnée par le fabricant est de $0,3 \times 10^{-6}$, ce qui est tout à fait acceptable. Ensuite, ces mesures ont été étendues dans l'ultraviolet et dans le proche infrarouge. Pour l'infrarouge plus lointain (1 523 nm) les mesures n'ont pas été possibles, car le niveau de puissance du laser n'est que de 0,5 mW ce qui n'est pas suffisant pour ce type de mesures.

Ces mesures sont difficiles à réaliser car la valeur du facteur de réflexion est en fait du même ordre de grandeur

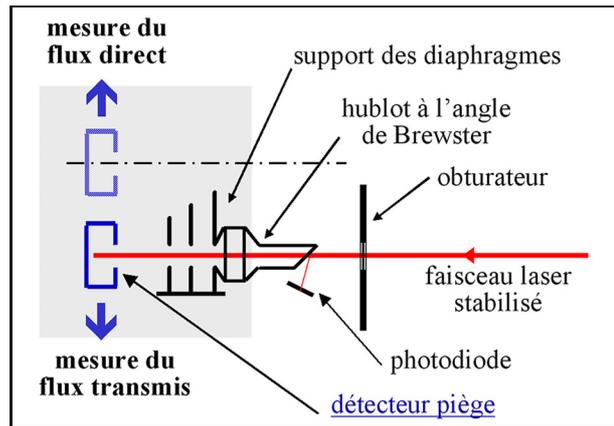


Fig. 9. – Dispositif pour la mesure du facteur de transmission du hublot du radiomètre cryogénique.

que l'incertitude, qui est estimée à 2×10^{-5} . Mais l'intérêt de cette étude est de s'assurer que le facteur d'absorption de la nouvelle cavité est très proche de l'unité sur tout le domaine spectral utilisé.

4.2. Mesure du facteur de transmission du hublot du radiomètre cryogénique

Le cryostat du radiomètre cryogénique est fermé par un hublot en silice. Pour minimiser les pertes par réflexion, ce hublot est ajusté à l'incidence de Brewster, et l'emploi de faisceaux lasers polarisés permet d'avoir une transmission très voisine de 1. Cependant, cette transmission peut être une source d'erreur importante qui limite l'exactitude des mesures ; elle doit donc être connue avec une incertitude aussi faible que possible.

Le constructeur du radiomètre cryogénique fournit la valeur du facteur de transmission uniquement à la longueur d'onde de 633 nm : elle est de 0,999 763 avec une incertitude type de 0,000 031. Il est donc indispensable de déterminer la valeur de ce facteur aux autres longueurs d'onde utilisées avec le radiomètre cryogénique. Ces mesures sont effectuées dans les mêmes conditions d'utilisation du faisceau que lors de l'étalonnage des détecteurs, et la transmission doit être vérifiée à chaque fois que le radiomètre est utilisé.

4.2.1. Principe de la mesure du facteur de transmission du hublot

Pour faire cette étude, le hublot du radiomètre cryogénique est démonté et mis en place sur le montage spécifique utilisé avec le système précédent (fig. 9). Ce montage est installé à côté du radiomètre cryogénique, sur la table de translation utilisée pour comparer les détecteurs au radiomètre. La table de translation permet d'amener ou de retirer le hublot du faisceau laser afin de mesurer, à l'aide d'un détecteur piège placé derrière, respectivement le flux transmis et le flux direct. Et la transmission τ du hublot est définie comme étant le rapport des deux flux obtenus avec et sans hublot. Une photodiode placée sous

le hublot permet également de mesurer la réflexion spéculaire résiduelle qui subsiste.

L'objectif à atteindre est d'avoir une valeur de τ la plus proche de 1, c'est-à-dire que la valeur mesurée est par expérience supérieure à 0,999 5, et la réflexion résiduelle ρ inférieure à 5×10^{-5} . L'obtention de ces valeurs signifie que le hublot est parfaitement propre, correctement aligné et donc qu'il n'y a pas de diffusion, ce qui permet de mesurer τ avec une incertitude de l'ordre de 2×10^{-5} . Il faut également vérifier l'homogénéité du hublot en étudiant la transmission en plusieurs points car, lors des mesures de la puissance optique avec le radiomètre, le faisceau ne passe pas systématiquement par le centre du hublot quand la cavité est centrée.

4.2.2. Difficultés rencontrées au cours de l'étude de la transmission du hublot

L'une des difficultés majeures pour cette étude est d'obtenir une propreté impeccable du hublot. Mais une fois celle-ci *a priori* atteinte, la valeur de τ est devenue supérieure à 1, ce qui physiquement était impossible !

De nombreuses hypothèses ont été envisagées pour essayer de comprendre ces résultats ; elles ont conduit à d'importantes vérifications, et finalement à des améliorations, au niveau de la mise en forme du faisceau (vérification de la polarisation, de la lumière parasite et diffusée), des éléments de l'acquisition des données (changement de détecteur piège, vérification de la sensibilité locale du détecteur. . .), sans pour autant modifier le résultat.

Finalement, en contrôlant la puissance du faisceau devant le hublot, il s'est avéré que celle-ci variait de quelques 10^{-4} suivant les positions du hublot sur la table de translation, ce qui affectait la valeur du facteur de transmission. Ces perturbations proviennent en fait de contraintes mécaniques sur la table optique, produites par le poids plus élevé du nouveau radiomètre : le déplacement de la table et donc du RC entraîne une variation de quelques 10^{-4} de la puissance du faisceau laser en sortie du module du contrôleur de puissance laser (fig. 2). Cette variation s'explique par un déplacement du faisceau laser séparé sur la photodiode de contre-réaction du module, ce qui modifie la valeur de la puissance asservie, à cause des variations de sensibilité locale sur la surface active de la photodiode.

Pour s'en affranchir, différents contrepoids ont été installés sur la table optique pour compenser les effets liés au poids du radiomètre cryogénique. Les mesures ont alors pu être effectuées dans des conditions acceptables avec une reproductibilité tout à fait satisfaisante.

4.2.3. Résultats de l'étude de la transmission du hublot du radiomètre cryogénique CryoRad-II

Dans le tableau 2 sont reportées les valeurs du facteur de transmission τ du hublot, ainsi que celles du facteur de réflexion ρ obtenues pour différentes longueurs d'onde, avec les incertitudes type associées. La valeur obtenue

Tableau 2
Valeurs du facteur de transmission du hublot du radiomètre cryogénique CryoRad-II.

Longueur d'onde	Facteur de transmission τ	Incertitude type	Facteur de réflexion ρ	Incertitude type
454 nm	0,999 862	0,000 033	$5,4 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-6}$
472 nm	0,999 886	0,000 029	$5,0 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-6}$
488 nm	0,999 884	0,000 048	$5,4 \times 10^{-5}$	$4,1 \times 10^{-6}$
514 nm	0,999 895	0,000 033	$4,4 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-6}$
543 nm	0,999 893	0,000 031	$4,4 \times 10^{-5}$	$2,1 \times 10^{-6}$
612 nm	0,999 912	0,000 030	$2,9 \times 10^{-5}$	$4,4 \times 10^{-6}$
633 nm	0,999 879	0,000 031	$3,4 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-6}$
800 nm	0,999 890	0,000 033	$5,4 \times 10^{-5}$	$4,5 \times 10^{-6}$

à 633 nm est supérieure de $1,2 \times 10^{-4}$ à celle donnée par le constructeur. Cependant, ces valeurs ont été obtenues dans les conditions d'utilisation du radiomètre cryogénique, et après avoir soigneusement nettoyé le hublot ; de plus on retrouve les valeurs initiales obtenues au laboratoire sur le hublot du RC précédent : la valeur de τ était de 0,999 87 et celle de ρ de 2×10^{-5} [8].

4.3. Étalonnage électrique du radiomètre cryogénique

Comme indiqué dans la Section 2.1, la mesure de la puissance du rayonnement optique est réalisée à partir de la mesure d'une puissance électrique. Le dispositif utilisé pour générer et mesurer la puissance électrique fournie à la résistance chauffante pour chauffer électriquement la cavité absorbante est un dispositif autonome. Pour assurer sa traçabilité aux unités électriques, il est nécessaire de l'étalonner périodiquement, la dérive de la mesure de la puissance, observée sur six mois, atteignant 5×10^{-5} .

La procédure d'étalonnage consiste à étalonner les gains des amplificateurs et à mesurer les décalages à zéro des amplificateurs du circuit de chauffage, à l'aide d'une tension de référence et d'une résistance étalon de 1 k Ω qui sont raccordées aux étalons électriques nationaux. Une seconde procédure est ensuite utilisée pour vérifier que la puissance électrique est mesurée correctement. Celle-ci consiste à chauffer électriquement la cavité, à lire la puissance électrique mesurée numériquement par le module d'acquisition du RC lui-même ($P_{\text{radiomètre}}$), et à la comparer à la puissance ($P_{\text{étalon}}$) mesurée analogiquement à l'aide d'un circuit électrique externe. Ce dernier utilise un voltmètre et la résistance étalon de 1 k Ω .

Un exemple des résultats de l'étalonnage électrique est présenté dans le tableau 3. La vérification est effectuée pour différents niveaux de puissance prédéterminés, ce qui permet de vérifier le fonctionnement des différents éléments du module de mesure. L'écart relatif obtenu entre les mesures des deux puissances ($P_{\text{radiomètre}}$ et $P_{\text{étalon}}$), est égal à quelques 10^{-5} , il est du même ordre de grandeur que la répétabilité des mesures. L'incertitude type relative associée à cet étalonnage électrique est estimée à 2×10^{-5} .

Tableau 3

Résultat de l'étalonnage électrique du radiomètre cryogénique.

Puissance programmée (μW)	$P_{\text{radiomètre}}$ (μW)	$P_{\text{étalon}}$ (μW)	Écart relatif
100	99,995	99,995	$-0,1 \times 10^{-5}$
200	199,990	199,994	$2,0 \times 10^{-5}$
400	399,988	399,988	$0,0 \times 10^{-5}$
800	799,998	800,006	$1,1 \times 10^{-5}$
1 000	999,950	999,985	$3,5 \times 10^{-5}$

Tableau 4

Facteurs de correction et budget d'incertitude de mesure avec le radiomètre cryogénique ($\lambda = 633 \text{ nm}$).

Source d'erreur	Correction	Incertitude type relative
Absorption de la cavité	0,999 98	1×10^{-5}
Transmission du hublot	0,999 88	2×10^{-5}
Réflexion sur le hublot	0,000 034	$0,4 \times 10^{-5}$
Non-équivalence chauffage	1,000 00	1×10^{-5}
Étalonnage électrique	1,000 00	3×10^{-5}
Répétabilité des mesures	1	3×10^{-5}
Correction globale	0,999 83	5×10^{-5}

4.3.1. Mesure de la correction de non-équivalence de chauffage

La cavité a été conçue de façon à réduire le facteur de non équivalence à un niveau négligeable. Il faut cependant s'assurer que cette propriété est bien vérifiée. Pour cela, la cavité est équipée de deux résistances chauffantes, l'une placée sur le fond de la cavité, l'autre à l'opposé, près de l'entrée, et la vérification s'effectue en chauffant la cavité alternativement par l'une ou l'autre des résistances.

Pratiquement, grâce à un système de basculement entre les deux résistances chauffantes, on mesure le flux d'un faisceau laser alternativement avec chacune des deux résistances. La correction de non-équivalence de chauffage est déduite du rapport des deux réponses du radiomètre cryogénique. Ce rapport a été trouvé égal à 1,000 00 avec une incertitude type estimée à 2×10^{-5} .

4.4. Bilan des incertitudes liées au fonctionnement du radiomètre cryogénique

La correction globale, à appliquer à la mesure de la puissance du rayonnement optique faite par le radiomètre cryogénique, est composée par les différentes corrections étudiées précédemment (Eq. (1)). Celles-ci sont regroupées, à titre d'exemple pour la longueur d'onde de 633 nm dans le tableau 4 avec les incertitudes qui leur

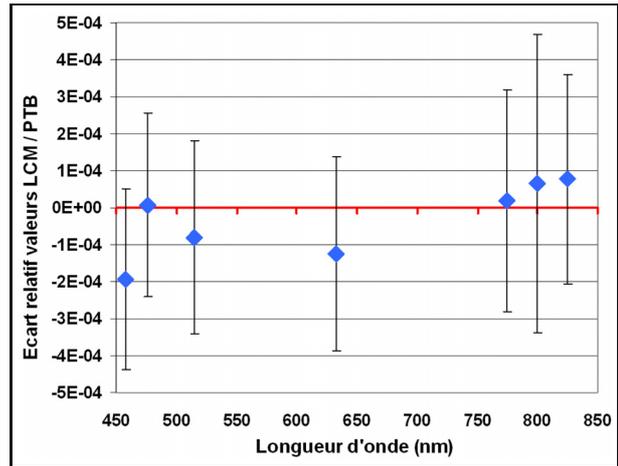


Fig. 10. – Comparaison des étalonnages du détecteur PTB-T8 effectués à la PTB et au LNE-LCM.

sont associées. La répétabilité des mesures de la puissance effectuée par le radiomètre cryogénique est également indiquée dans ce tableau : elle est globalement de 3×10^{-5} et dépend essentiellement de la stabilité du faisceau laser. Dans le cas présenté, l'écart relatif entre la valeur mesurée et la valeur supposée exacte est de $1,7 \times 10^{-4}$, et l'incertitude type globale sur la mesure de la puissance estimée à 5×10^{-5} .

5. Vérification et validation du raccordement au radiomètre cryogénique

Lors de la première utilisation de ce nouveau radiomètre cryogénique pour le renouvellement du raccordement des détecteurs pièges, un détecteur piège de la PTB a également été étalonné par rapport au RC. Ce détecteur avait été mis à disposition du LCM pour les mesures pyrométriques, dans le cadre du projet commun Euromet n° 872 « *Absolute characterisation of the radiation thermometer LP3* » [9], et pour lequel nous avons un certificat d'étalonnage (certificat d'étalonnage n° 7.3-1.21-10-04-Frankreich).

La sensibilité spectrale absolue de ce détecteur a été mesurée à sept longueurs d'onde entre 458 nm et 825 nm. Les mesures ont été effectuées avec une puissance de faisceau de l'ordre de $100 \mu\text{W}$. Les résultats sont présentés sur la figure 10 qui présente les écarts entre les valeurs de sensibilité spectrale mesurées au LCM et celles données par la PTB, ainsi que les incertitudes relatives élargies ($k = 2$) sur ces écarts.

Ce graphique met en évidence l'accord entre les mesures réalisées au LCM et les valeurs données par la PTB, puisque l'écart relatif entre ces valeurs, pour toutes les longueurs d'onde, est inférieur aux incertitudes cumulées.

Cette étude a donc permis de valider l'installation et l'utilisation de ce nouveau radiomètre cryogénique en tant que référence primaire pour le domaine des rayonnements optiques. De plus, elle valide l'extension du

domaine spectral vers le proche infrarouge pour la mesure directe de la sensibilité spectrale absolue.

6. Conclusion

La caractérisation métrologique du nouveau radiomètre cryogénique, le CryoRad-II, a été complètement réalisée, aussi bien du point de vue optique qu'électrique. Il a été utilisé pour vérifier la sensibilité spectrale absolue des détecteurs pièges étalons secondaires, en les comparant directement au radiomètre cryogénique. Ces détecteurs sont utilisés pour assurer le raccordement au RC des dispositifs de mesure des différentes grandeurs radiométriques et photométriques réalisées au LCM. Les étalonnages des détecteurs ont été effectués à plusieurs longueurs d'onde comprises entre 458 nm et 825 nm, alors qu'avec l'ancien RC, les mesures n'étaient effectuées que dans le domaine visible. Les mesures effectuées dans le proche infrarouge ont été utilisées en pyrométrie optique pour la détermination de la température thermodynamique du point fixe de température du cuivre et des nouveaux points fixes de température à base d'eutectiques métal-carbone.

Le radiomètre cryogénique a également été utilisé pour la détermination de la sensibilité spectrale de détecteurs RT-PQED (*Room Temperature-Predictable Quantum Efficient Detector*), dans le cadre du Joint Research Project (JRP) NEWSTAR (*New primary Standards and traceability for radiometry*) [10] de l'*European Metrology Research Programme* (EMRP). L'objectif de ce JRP est la mise en œuvre d'une référence de sensibilité spectrale à partir de détecteurs dont on peut prédire la sensibilité à 10^{-6} près. Ces mesures ont été réalisées à 633 nm (laser He-Ne) et à 488 nm (laser argon).

Article reçu le 10 avril 2015, version révisée reçue le 23 juillet 2015.

Références

- [1] MARTIN J.E., FOX N.P. et KEY P.J., "A Cryogenic Radiometer for Absolute Radiometric Measurements", *Metrologia*, **21**, 1985, 147-155.
- [2] TOUAYAR O., COUTIN J.-M. et BASTIE J., « Le radiomètre cryogénique : référence primaire du BNM-INM pour les mesures de rayonnements optiques », *Bulletin du BNM*, **117**, 1999, 35-44.
- [3] COUTIN J.-M., TOUAYAR O. et BASTIE J., "The using conditions of the BNM-INM cryogenic radiometer as the basis for the french optical radiation measurement scales", Proceedings of the 24 session of the CIE, Varsovie, 24-30 juin 1999, vol. 1, part. 1, pp. 729-732.
- [4] TAYEB-CHANDOU L. F., COUTIN J.-M. et BASTIE J., « Méthode de mesure de la sensibilité spectrale des détecteurs pièges de référence », *Revue française de métrologie*, **25**, 2011, 45-54.
- [5] COUTIN J.-M., TOUAYAR O. et BASTIE J., "The using conditions of the BNM-INM cryogenic radiometer as the basis of for the French optical radiation scales", Proceedings of the 24th session of the CIE, 1999, CIE-133, 22.
- [6] LÓPEZ M., HOFER H. et KÜCK S., "Measurement of the absorptance of a cryogenic radiometer cavity in the visible and near infrared", *Metrologia*, **42**, 2005, 400-405.
- [7] TOUAYAR O., ROUGIÉ B., COUTIN J.-M. et BASTIE J., "Measurement of the reflectance of the INM cryogenic radiometer cavity at several wavelengths", *Metrologia*, **35**, 1998, 387-391.
- [8] TOUAYAR O. et BASTIE J., "Measurement of the LaseRad window transmission and reflection losses", EUROMET Workshop on cryogenic radiometer, 11-12 novembre 1996, NPL.
- [9] SADLI M., "Absolute characterisation the radiation thermometer LP3", 872_THERM_Final.doc.
- [10] RASTELLO M.-L., Publishable JRP Summary Report for JRP SIB57 NEWSTAR "New primary standards and traceability for radiometry", <http://www.inrim.it/Newstar/>.