



G. OBEIN

Nouvelle réalisation de la candela au LNE-INM/CNAM

New realisation of the Candela at LNE-INM/CNAM

Gaël Obein¹, Laura González-Galván² et Jean Bastie¹

¹ LNE-INM, CNAM, 61 Rue du Landy, 93210 La Plaine Saint Denis, France, gael.obein@cnam.fr.

² CENAM, Km 4,5 Carretera a los Cués, Municipio el Marqués 76241 Querétaro, Mexique.

Résumé

La candela, unité d'intensité lumineuse, est l'une des sept unités de base du SI. Depuis la 16^e Conférence générale des poids et mesures en 1979 sa définition est reliée à l'unité de puissance, le watt. Il est possible de matérialiser la candela au moyen de photomètres raccordés directement ou indirectement à une référence radiométrique. Les meilleures références radiométriques actuellement disponibles en terme d'incertitude sont les radiomètres à substitution électrique cryogéniques.

Une « nouvelle » candela a été récemment réalisée au LNE-INM, l'institut national de métrologie français, afin d'améliorer la matérialisation de l'unité de base et d'accroître la qualité du transfert pour les mesures d'intensité et de flux lumineux. Cette réalisation de la candela est basée sur des photomètres étalons constitués de trois éléments principaux : un détecteur, un filtre et un diaphragme.

Cet article présente les différents équipements développés au LNE-INM pour la caractérisation complète des photomètres, depuis le radiomètre cryogénique jusqu'au dispositif de mesure de la surface des diaphragmes en passant par la mesure de la transmission des filtres et celles de la sensibilité spectrale et de la linéarité des détecteurs. Une attention particulière est apportée à la détermination du facteur d'adaptation spectrale du photomètre ainsi qu'aux différentes étapes permettant d'obtenir la sensibilité lumineuse des photomètres en fonction de la température de distribution de la source mesurée.

L'incertitude type relative (1σ) associée à la sensibilité lumineuse des photomètres est de $2,2 \cdot 10^{-3}$.

MOTS CLÉS : CANDELA, PHOTOMÈTRE.

Abstract

The candela is the SI base unit of luminous intensity. Since the 16th General Conference on Weights and Measures in 1979, the candela is defined from the watt. This enables to materialize it with a photometer, as long as this photometer is directly or indirectly traceable to a radiometric reference. Today, in term of uncertainties, the best

radiometric references available are the electrically calibrated cryogenic radiometers.

A "new" candela has been recently developed at the LNE-INM, the French national metrological institute, to update our realisation of the base unit and to increase the quality of our transfer facilities for luminous intensity and luminous flux measurements. That candela is based on a photometer made of 3 elements: a detector, a filter and an aperture.

We present here the different facilities that we have at LNE-INM for the complete characterization of our homemade traceable photometers, namely, the cryogenic radiometer, the transmittance and spectral responsivity measurement facilities, the aperture and the linearity measurement device. A dedicated part is focused on the evaluation of the mismatch correction factor and the steps allowing to obtain the absolute luminous responsivity according to the colour temperature of the source.

The standard uncertainty (1σ) associated to the luminous responsivity of our photometers is $2,2 \cdot 10^{-3}$.

KEY WORDS: CANDELA, PHOTOMETER.

1. Introduction

Utu, Shamash, Mithra, Hélios, Surya, Atoum, Jun, Tonatiuh, Râ, Belenos sont juste quelques exemples des différents noms donnés à la divinité solaire au cours des temps et à travers le monde. Ils mettent en évidence que la lumière est sans aucun doute l'une des choses les plus importantes pour les être humains. Bien que l'éclairage artificiel se soit développé très tôt dans l'histoire de l'humanité, il a fallu attendre la première moitié du 18^e siècle pour voir les premiers travaux scientifiques sérieux sur le sujet avec P. Bouguer et J.H. Lambert.

Depuis les travaux de Bouger et Lambert jusqu'à nos jours, nos connaissances sur la nature des rayonnements optiques et sur les principes et les grandeurs relatifs à leur mesure se sont affinés et précisés. Actuellement, la mesure des rayonnements optiques est séparée en deux domaines, la radiométrie et la photométrie. La radiométrie concerne la mesure des rayonnements optiques d'un point de vue purement physique, c'est à dire en liaison directe avec la puissance transportée, et les unités utilisées sont dérivées du watt. Le domaine d'application de la photométrie est strictement limité à la mesure des rayonnements optiques tels qu'ils sont perçus par l'œil d'un observateur. Tous les individus n'ayant pas le « même œil », pour pouvoir effectuer des mesures cohérentes, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a défini, en 1924, un observateur de référence photopique. Cet observateur de référence est essentiellement caractérisé par sa courbe d'efficacité lumineuse spectrale relative, $V(\lambda)$ [1,2].

L'unité de référence de la photométrie est la candela. La candela, unité d'intensité lumineuse, est l'une des sept unités de base du Système International d'unités, le SI. Depuis 1979, elle est définie de la manière suivante :

« La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de $1/683$ watt par stéradian. » [3].

Cette définition donne simplement la relation entre les unités photométriques et les unités radiométriques. Partant de là, il est possible de réaliser la candela par n'importe quelle méthode qui permet de passer d'un domaine à l'autre [4]. L'une des méthodes utilisée est l'emploi de photomètres traçables à une référence radiométrique. C'est la méthode qu'a adopté l'Institut National de Métrologie depuis 1983 [5,6,7].

Les travaux du LNE-INM effectués précédemment sur les photomètres ont mis en évidence un certain nombre de limitations liées à la technologie utilisée pour réaliser ces appareils. En particulier, l'utilisation d'un détecteur plan placé derrière le filtre $V(\lambda)$ produit des phénomènes d'interférence difficiles à maîtriser et à quantifier. D'autre part, la variation de sensibilité locale typique d'un détecteur plan est une autre composante non négligeable du budget d'incertitude.

Parallèlement, les études faites sur l'utilisation des détecteurs pièges dans la réalisation de radiomètres à filtre ont mis en évidence une amélioration importante des mesures radiométriques, en supprimant presque totalement les deux effets mentionnés précédemment. De plus, leur stabilité à court terme et à long terme est nettement supérieure à celle des détecteurs classiques. Pour toutes ces raisons, la réalisation de la nouvelle génération de photomètres au LNE-INM/CNAM est maintenant fondée sur l'utilisation de détecteurs pièges [8].

Cinq photomètres utilisant différents types de filtres et différentes tailles de détecteurs ont été réalisés. Cet article présente la conception et la réalisation des photomètres ainsi que la caractérisation de chacun des composants avec

son budget d'incertitude associé. Finalement, l'incertitude globale de cette nouvelle réalisation de la candela est présentée ainsi que l'écart par rapport à nos précédentes réalisations.

2. Conception générale des photomètres

Le photomètre est constitué de quatre parties principales : le détecteur piège, le porte filtre, le filtre et le diaphragme (fig. 1).

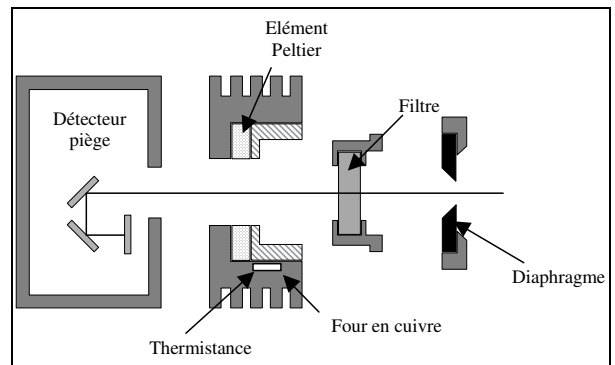


Fig. 1. – Conception générale des photomètres.

3. Détecteur piège

Le détecteur piège est constitué de trois photodiodes au silicium identiques, fabriquées par Hamamatsu. Elles sont orientées les unes par rapport aux autres de manière à minimiser les pertes par réflexion et les effets liés à la polarisation de la lumière. Deux tailles de détecteurs ont été utilisées :

- $(18 \times 18) \text{ mm}^2$, détecteur au silicium S6337-01 appelé « grande taille » ;
- $(10 \times 10) \text{ mm}^2$, détecteur au silicium S1337-10 appelé « petite taille ».

Quatre photomètres utilisent des photodiodes de « grande taille », un utilise des photodiodes de « petite taille ».

3.1. Linéarité

Pour les photodiodes de type S1337, les mesures de linéarité obtenues lors d'études précédentes ont été utilisées. En effet, ces photodiodes sont bien connues et largement utilisées au laboratoire depuis de nombreuses années. Par contre, les photodiodes de type S6337 étant apparues récemment sur le marché, leur linéarité a été mesurée sur notre installation de référence [9,10].

La méthode utilisée pour effectuer les mesures de linéarité est celle de l'addition des flux. Elle consiste à envoyer successivement sur le détecteur un flux Φ_a puis un flux Φ_b sensiblement égal à Φ_a et enfin les flux Φ_a et Φ_b simultanément. Les réponses du détecteur sont respectivement i_a , i_b et i_{a+b} . Si la réponse i_{a+b} est égale à $i_a + i_b$ le détecteur est linéaire. Dans le cas contraire, on

calculer un facteur de correction de non linéarité. Cette méthode est une méthode relative qui permet de déterminer la linéarité d'un détecteur dans un rapport de flux de deux. En répétant la mesure pour un certain nombre de niveaux de flux correctement choisis et en

cumulant les résultats, on détermine la linéarité du détecteur sur la dynamique souhaitée.

La figure 2 présente le schéma du montage optique utilisé pour réaliser l'addition des flux sur les détecteurs.

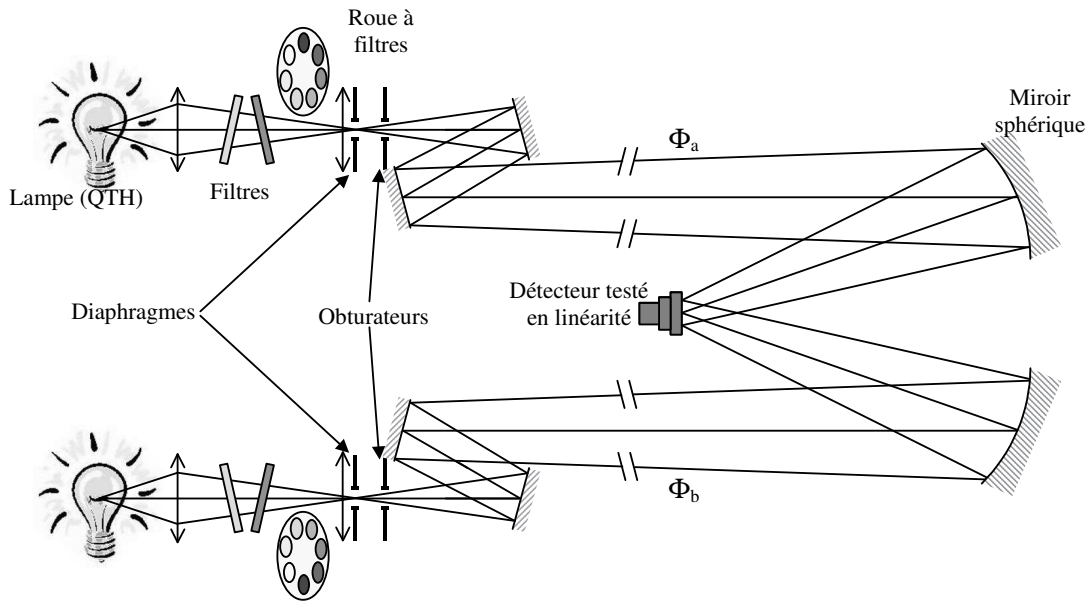


Fig. 2. – Montage de mesure de la linéarité.

Ce montage est constitué de deux voies identiques comprenant chacune :

- une lampe quartz halogène comme source de rayonnement ;
- un système optique constitué de deux lentilles en silice, d'un diaphragme, de deux miroirs plans et d'un miroir sphérique qui permettent de former l'image du diaphragme uniformément éclairé sur la surface sensible du détecteur ;
- un obturateur pour effectuer l'opération d'addition des flux ;
- un jeu de sept filtres neutres montés sur une roue motorisée pour réaliser des niveaux d'éclairage divisés par deux lorsque l'on passe d'un filtre au suivant ;
- un porte filtre pour ajouter des filtres neutres supplémentaires pour augmenter la dynamique de mesure ou des filtres sélectifs pour modifier la répartition spectrale du rayonnement sur le détecteur.

La gestion du montage est complètement automatisée.

Une mesure de linéarité s'effectue en deux étapes successives. Dans un premier temps, on fait varier le flux incident sur le détecteur dans le sens décroissant. Ensuite, on répète le même cycle de mesure mais dans le sens croissant.

La comparaison des résultats obtenus lors de ces deux mesures permet éventuellement de mettre en évidence des défauts du détecteur tels que dérive, effet de fatigue, effet de mémoire, effet de traînage, problème thermique, etc. Le

résultat de la mesure est la moyenne des valeurs obtenues lors des mesures dans le sens croissant et dans le sens décroissant.

Pour les détecteurs silicium de type S1337-10, les mesures ont mis en évidence une excellente reproductibilité et des écarts de linéarité inférieurs à l'incertitude des mesures sur le domaine d'utilisation des photomètres (de $1 \cdot 10^{-4} \mu A$ à $1 \cdot 10^2 \mu A$). Les incertitudes sur les mesures de linéarité sont détaillées dans le tableau 1.

Tableau 1
Incertitude sur les mesures de linéarité.

Source d'incertitude	Ecart type relatif (1σ)
Répétabilité	$3 \cdot 10^{-4}$
Stabilité du flux	$1 \cdot 10^{-4}$
Lumière parasite	$1 \cdot 10^{-4}$
Température	quelques 10^{-5}
Symétrie des faisceaux	négligeable
Incertitude relative totale sur la linéarité	$3,3 \cdot 10^{-4}$

3.2. Sensibilité spectrale absolue

L'étalonnage des détecteurs en sensibilité spectrale est effectué en deux étapes. Dans la première étape, le détecteur est étalonné en sensibilité spectrale absolue à quelques longueurs d'onde laser par comparaison directe ou indirecte au radiomètre cryogénique [11,12]. Le montage expérimental pour effectuer ces mesures est présenté sur la figure 3.

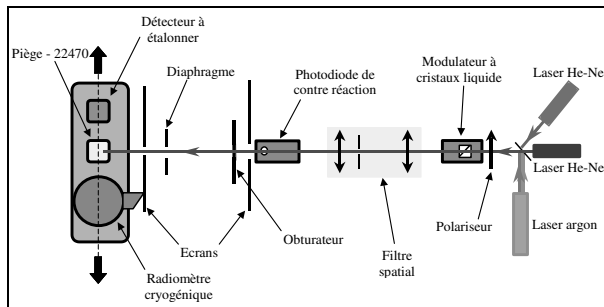


Fig. 3. – Montage expérimental pour l'étalonnage des détecteurs par rapport au radiomètre cryogénique.

Le rayonnement émis par le laser est stabilisé en puissance par un modulateur à cristaux liquide piloté par un détecteur de contrôle. La stabilité obtenue est de l'ordre de quelques 10^{-5} pendant la durée nécessaire à une comparaison de détecteurs, typiquement quinze minutes. Le filtre spatial ajuste le diamètre du faisceau et minimise la lumière parasite. Le détecteur à étalonner est comparé au radiomètre cryogénique ou à un détecteur piège étalon secondaire en plaçant successivement les deux détecteurs dans le faisceau laser à l'aide d'une table de translation motorisée. Un détecteur connu est étalonné en même temps de manière à vérifier le bon fonctionnement du montage et s'assurer de la validité des résultats obtenus. En général, les mesures sont effectuées à cinq longueurs

d'onde du domaine visible au minimum. Ces longueurs d'onde sont :

- 487,99 nm, 514,53 nm et 611,80 nm obtenues avec un laser argon accordable ;
- 543,36 nm et 632,8 nm obtenues avec deux lasers hélium-néon.

Dans une seconde étape, pour étendre le domaine spectral d'étalonnage du détecteur sur l'ensemble de son domaine d'utilisation, nous utilisons un montage de mesure de la sensibilité spectrale relative [13,14]. Cette mesure est effectuée en comparant la réponse du détecteur à étalonner à celle d'un détecteur non sélectif en longueur d'onde, lorsqu'ils sont éclairés par le même flux monochromatique. Le détecteur non sélectif utilisé est un détecteur thermique pyroélectrique en forme de cavité. Le montage expérimental est présenté sur la figure 4. Le monochromateur double à prisme et à réseau permet de couvrir le domaine spectral entre 250 nm et 2 500 nm en utilisant les ordres successifs du réseau.

Le montage optique a été soigneusement étudié de manière à obtenir l'image de la pupille d'entrée sur la surface du détecteur à étalonner. Les sources lumineuses utilisées sont soit une lampe quartz halogène (QTH) pour le domaine spectral visible et proche infrarouge, soit un arc xénon pour le domaine spectral proche ultraviolet et visible.

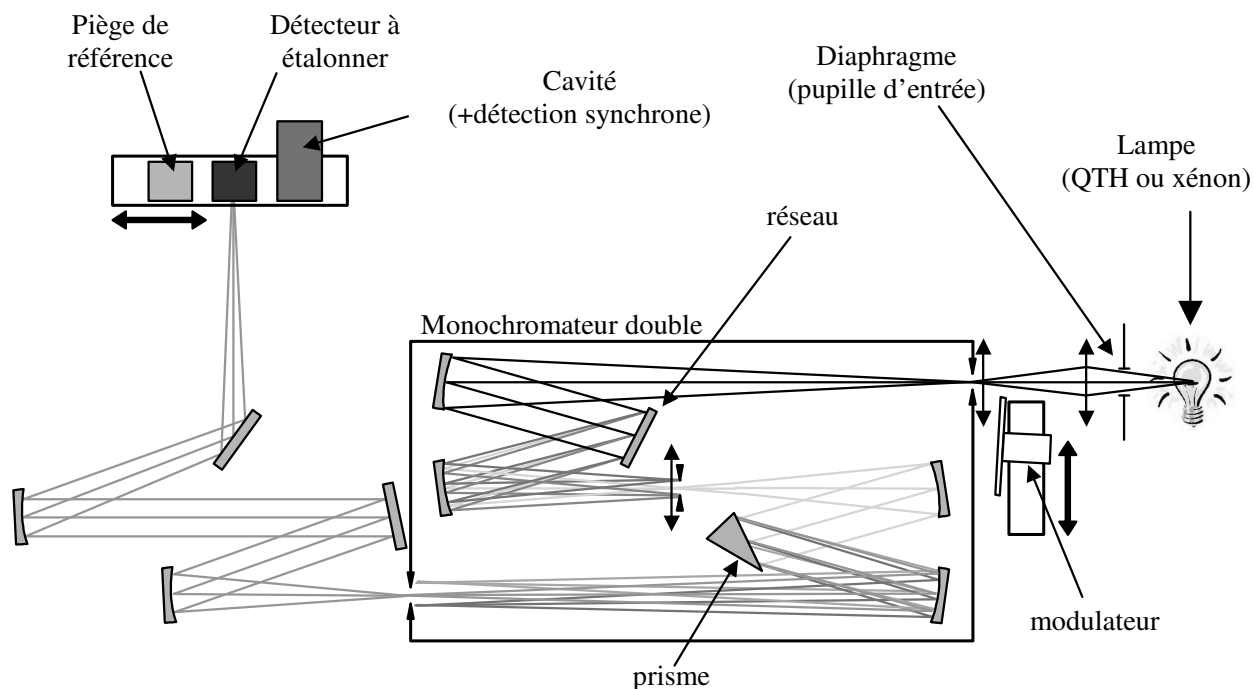


Fig. 4. – Montage expérimental pour la mesure de la sensibilité spectrale relative des détecteurs.

La sensibilité spectrale absolue du détecteur sur l'ensemble du domaine est obtenue en multipliant les sensibilités spectrales relatives par une constante. Cette constante est ajustée de manière à ce que les sensibilités spectrales absolues mesurées aux longueurs d'onde laser

par rapport au radiomètre cryogénique coïncident. L'incertitude type relative obtenue sur la sensibilité spectrale des détecteurs est de $7,3 \cdot 10^{-4}$. Le budget d'incertitude est détaillé dans le tableau 2.

Tableau 2
Budget d'incertitude pour la mesure de la sensibilité spectrale absolue des détecteurs.

	Source d'incertitude	Ecart type relatif (1σ)
Sensibilité absolue	Répétabilité	$1,0 \cdot 10^{-4}$
	Détecteur étalon secondaire	$1,4 \cdot 10^{-4}$
	Convertisseur Courant-Tension	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Sensibilité spectrale relative	Répétabilité	$4,8 \cdot 10^{-4}$
	Longueur d'onde	$3,0 \cdot 10^{-4}$
	Lumière parasite	$1,0 \cdot 10^{-4}$
	Bande passante	$1,0 \cdot 10^{-4}$
	Cavité	$2,0 \cdot 10^{-4}$
	Détection synchrone	$2,0 \cdot 10^{-4}$
	Convertisseur Courant-Tension	$1,0 \cdot 10^{-4}$
	Ajustement Relatif / Absolu	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Incertitude totale sur la sensibilité spectrale absolue		$7,3 \cdot 10^{-4}$

4. Filtre $V(\lambda)$

La sensibilité spectrale du photomètre est le produit de la transmission du filtre $V(\lambda)$ et de la sensibilité spectrale du détecteur. La transmission du filtre $V(\lambda)$ doit être telle que la courbe de sensibilité spectrale du photomètre soit aussi proche que possible de l'efficacité lumineuse relative spectrale $V(\lambda)$ définie par la CIE. Ainsi, connaissant la sensibilité spectrale du détecteur piège, il est possible de calculer la transmission idéale que devrait avoir le filtre. Trois types de filtres ont été calculés à partir de verres colorés de manière à être aussi proches que possible à la transmission du filtre idéal. Le filtre de type 1 est obtenu en superposant quatre verres et ceux de type 2 et de type 3 sont la superposition de trois verres. Les filtres calculés ont ensuite été réalisés, deux de type 1 repérés $V\lambda 1$ et $V\lambda 4$, deux de type 2 repéré $V\lambda 21$ et $V\lambda 22$ et un de type 3 $V\lambda 3$. Les caractéristiques de ces filtres sont présentées dans le tableau 3. La flèche sur le coté du tableau indique le sens de propagation de la lumière dans les filtres pour que les phénomènes de fluorescence potentiels soient éliminés.

La transmission des filtres réalisés a été mesurée sur le montage de référence pour ces mesures [15]. Le schéma de principe du montage expérimental est présenté sur la figure 5. Ce montage est constitué de quatre parties principales : les sources, le monochromateur, le système optique et le détecteur. Pour la mesure des filtres $V(\lambda)$ c'est la lampe QTH qui a été utilisée. Les deux lentilles forment l'image du filament de la lampe sur la fente d'entrée du monochromateur. Entre les deux lentilles, dans la zone où le faisceau est parallèle, des filtres non fluorescents sont interposés pour supprimer les ordres supérieurs et limiter la lumière parasite. Ces filtres Schott, de type SFK, sont des combinaisons de verres colorés « passe bande » ayant une largeur à mi-hauteur de l'ordre de 25 nm à 60 nm. Pour réduire la lumière parasite à l'intérieur de la bande passante du monochromateur, le

diaphragme est ajusté de manière à ce que qu'il n'y ait aucune lumière qui passe en dehors du réseau. La lumière parasite en dehors de la bande spectrale a été mesurée en utilisant des filtres « passe haut » à flanc raide à différentes longueurs d'onde.

La longueur d'onde de mesure est déterminée par un monochromateur simple Jobin Yvon à très haute résolution (THR). La distance focale des miroirs du montage Czerny-Turner est de 1 500 mm et l'ouverture numérique est de F/12. Le réseau utilisé est un réseau holographique de 2 000 traits par millimètre donnant une bande passante de 0,5 nm au niveau de la fente de sortie. La résolution en longueur d'onde, obtenue avec le moteur de déplacement pas à pas du réseau, est de 0,002 nm. Pour la caractérisation des filtres $V(\lambda)$ les mesures sont effectuées avec un pas de 5 nm.

Deux miroirs sphériques en montage en « Z » sont utilisés pour envoyer la lumière sur le détecteur et éliminer les aberrations chromatiques, la coma et les inter-réflexions.

Entre les deux miroirs le faisceau est collimaté et utilisé pour la mesure de la transmission du filtre. Le porte filtre est monté sur une table de translation qui permet les mesures successives du faisceau de référence (100 %), du filtre et du signal d'obscurité (0 %). Pour la mesure des filtres $V(\lambda)$, le diamètre de mesure sur le filtre était d'environ 10 mm.

La partie « détecteur » est constituée d'une sphère d'intégration et d'un détecteur. Les détecteurs utilisés pour les mesures sont soit un photomultiplicateur à photocathode S20, soit une photodiode au silicium, soit un détecteur piège.

Tableau 3
Caractéristiques des filtres $V(\lambda)$ réalisés.

Filtre	Combinaison	
	Référence du verre	Epaisseur (mm)
$V\lambda 1$ $V\lambda 4$	GG10	1,5
	BG 39	0,9
	FG 13	1,1
	VG 4	1
$V\lambda 21$ $V\lambda 22$	VG 4	1,1
	FG 13	1,3
	BG 39	1,1
$V\lambda 3$	VG 4	1,3
	FG 13	1,5
	BG 39	1

Comme la transmission du filtre dépend fortement de la température, les filtres $V(\lambda)$ sont montés dans un support de filtre régulé en température par un élément Peltier contrôlé par une thermistance. Dans ces conditions, la stabilité en température est meilleure que 0,1 °C. Toutes les mesures de transmission ont été effectuées à 23 °C.

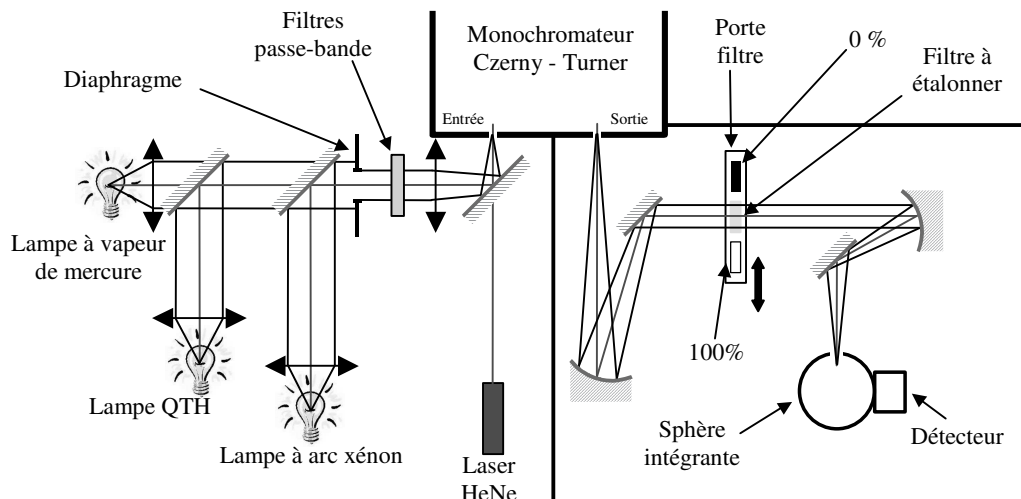


Fig. 5. – Schéma de principe du montage de référence pour la mesure de la transmission des filtres.

Le budget d'incertitude pour les mesures de transmission est détaillé dans le tableau 4.

Tableau 4
Budget d'incertitude pour la mesure de la transmission des filtres.

Source d'incertitude	Écart type relatif (1σ)
Répétabilité et reproductibilité	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Longueur d'onde	$3,0 \cdot 10^{-4}$
Lumière parasite	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Linéarité du détecteur	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Incertitude totale sur la transmission	$1,1 \cdot 10^{-3}$

5. Diaphragme

Le diaphragme limite le flux lumineux qui entre dans le photomètre et définit l'angle solide utilisé dans le calcul de l'intensité lumineuse. La mesure de sa surface est donc indispensable. Trois tailles de diaphragmes ont été utilisées : diamètre de 6 mm, 8 mm et 10 mm. La méthode utilisée pour effectuer leur mesure est une méthode sans contact pour éviter d'endommager le bord des diaphragmes [16,17].

Le montage pour la mesure du diamètre du diaphragme est constitué par un microscope de grandissement 60 muni d'un oculaire avec un réticule cruciforme et d'une table de translation micrométrique mobile suivant deux axes X et Y perpendiculaires entre eux et à l'axe du microscope (fig. 6).

Pour obtenir la surface du diaphragme, on relève les coordonnées x et y du bord du diaphragme tous les 10° environ. À partir de cette cartographie, on détermine le centre et le rayon du cercle par une méthode de moindre carré [18].

Les mesures ont été faites à 23°C , température d'utilisation des photomètres car la surface des diaphragmes dépend assez fortement de la température. Le budget d'incertitude pour la mesure des diaphragmes est donné dans le tableau 5.

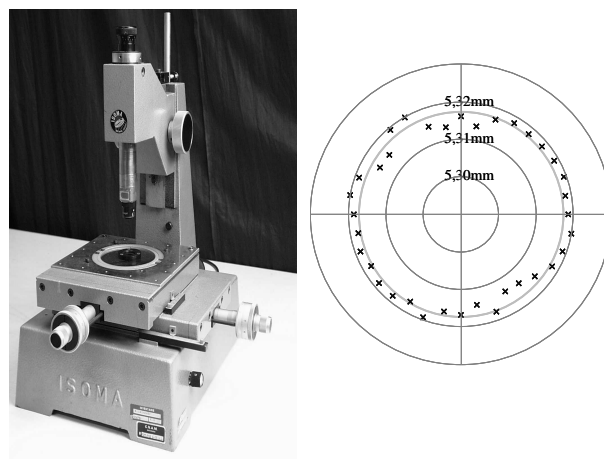


Fig. 6. – La mesure des diaphragmes ;
À gauche : table micrométrique pour la mesure de la surface des diaphragmes, à droite : un exemple de la dispersion des mesures (diaphragme 1Ph10 qui équipe le photomètre PH-04-A).

Tableau 5
Budget d'incertitude pour la mesure de la surface des diaphragmes.

Source d'incertitude	Écart type relatif (1σ)
Répétabilité et reproductibilité	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Température	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Planéité, Tables micrométriques X et Y	négligeable
Incertitude totale sur la surface	$1,2 \cdot 10^{-4}$

6. Sensibilité lumineuse des photomètres

Les détecteurs, les filtres et les diaphragmes ayant été caractérisés, les photomètres ont été assemblés et leur sensibilité lumineuse calculée. Cinq photomètres ont ainsi été réalisés en utilisant les différents composants disponibles. Le tableau 6 présente les éléments constitutifs des différents photomètres et la figure 7 est une photographie de l'un des photomètres réalisés [19].

Tableau 6
Caractéristique des photomètres réalisés.

Photomètre	Détecteur piège	Filtre $V(\lambda)$	Diaphragme
PH-04-A	Grande taille	Type 1	Ø 10 mm
PH-04-B	Grande taille	Type 1	Ø 8 mm
PH-04-C	Grande taille	Type 2	Ø 10 mm
PH-04-D	Grande taille	Type 2	Ø 8 mm
PH-04-E	Petite taille	Type 3	Ø 6 mm

6.1. Sensibilité spectrale des photomètres

La sensibilité spectrale des photomètres, $S(\lambda)$ est le produit de la sensibilité spectrale absolue du détecteur piège et de la transmission du filtre, sur le domaine spectral visible.

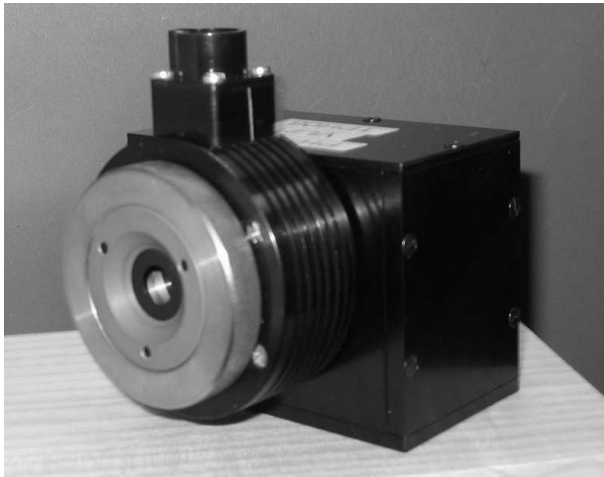


Fig. 7. – Photomètre réalisé avec un détecteur piège de grande taille.

6.2. Facteur d'adaptation spectral

Le facteur d'adaptation spectral (FAS) caractérise l'écart entre la courbe de sensibilité spectrale du photomètre et la courbe $V(\lambda)$. Il est donné par la formule suivante :

$$FAS = \frac{\int \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \Phi_e(\lambda) \cdot S_{555}(\lambda) \cdot d\lambda}, \text{ avec :}$$

- Φ_e le flux énergétique spectrique incident ;
- $S_{555}(\lambda)$ la sensibilité spectrale du photomètre normalisée à 555 nm.

Le FAS est égal à 1 pour un photomètre parfait. Ce facteur dépend non seulement de la sensibilité spectrale du photomètre mais aussi de la distribution spectrale de la source mesurée. La figure 8 présente la variation du facteur d'adaptation spectral des différents photomètres réalisés lorsque la source mesurée est un corps noir dont la température varie entre 2 000 K et 3 000 K.

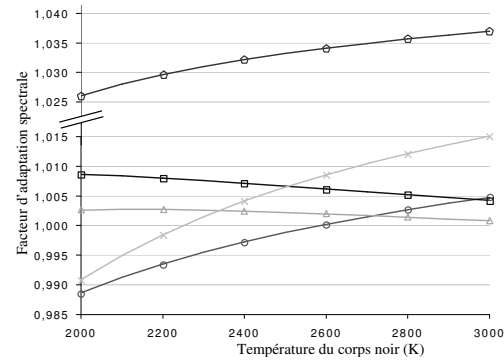


Fig. 8. – Évolution du facteur d'adaptation spectral des photomètres en fonction de la température de distribution de la source mesurée.

Tous les photomètres ont un facteur d'adaptation spectral très proche de 1 avec cependant une petite restriction pour le photomètre PH-04-E qui s'écarte un peu plus mais reste dans des valeurs tout à fait acceptables. Ce photomètre est monté avec un détecteur piège de petite dimension dont la sensibilité spectrale est légèrement différente de celle des pièges de grande dimension.

En ce qui concerne les autres types de photomètres on peut faire les remarques suivantes :

- Les photomètres PH-04-A et PH-04-B ont le même type de filtre, le filtre de type 1. Leurs facteurs d'adaptation spectraux sont très semblables et présentent une bonne constance en fonction de la température de distribution de la source mesurée ;
- Les photomètres PH-04-C et PH-04-D ont un filtre de type 2. La stabilité du facteur d'adaptation spectrale en fonction de la température de distribution de la source est nettement moins bonne que celle obtenue avec les filtres de type 1. Néanmoins, cette variation reste tout à fait acceptable puisqu'elle conduit à une incertitude relative de 0,025 % pour une source dont la température de distribution est connue à 10 K près (valeur typique pour les lampes étalons photométriques). De plus, au voisinage de la température de distribution de 2 856 K, (température de l'étalon A de la CIE utilisé pour les étalonnage en intensité lumineuse), leur facteur d'adaptation spectral est très proche de 1 [20].

6.3. Sensibilité lumineuse absolue des photomètres

La sensibilité lumineuse des photomètres est donnée par la relation suivante :

$$S_V = \frac{i}{E_V} = \frac{S(\lambda = 555\text{nm})}{K_m} \cdot \frac{A}{FAS} \quad [A \cdot lx^{-1}],$$

avec :

- i , le courant photoélectrique ;
- E_v , l'éclairement reçu par le détecteur ;
- S ($\lambda = 555 \text{ nm}$), la sensibilité spectrale absolue du photomètre à 555 nm ;
- K_m , l'efficacité lumineuse spectrale maximale égale à 683 lm/W par définition ;
- A , la surface du diaphragme ;
- FAS, le facteur d'adaptation spectral à la température de distribution considérée.

Le tableau 7 présente le budget d'incertitude globale sur la sensibilité lumineuse des photomètres.

Tableau 7
Budget d'incertitude pour la détermination de la sensibilité lumineuse des photomètres.

Source d'incertitude	Écart type relatif (1σ)
Sensibilité absolue du détecteur piège	$7,3 \cdot 10^{-4}$
Linéarité	$3,3 \cdot 10^{-4}$
Transmission du filtre	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Surface du diaphragme	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Incertitude totale relative sur la sensibilité lumineuse	$2,2 \cdot 10^{-3}$

7. Contrôle des photomètres

Il est possible de déterminer la sensibilité spectrale des photomètres par une autre méthode que celle décrite dans le paragraphe précédent. En effet, en utilisant le montage de mesure de sensibilité spectrale, nous pouvons mesurer directement la sensibilité spectrale absolue des photomètres et donc calculer la sensibilité lumineuse et le facteur d'adaptation spectral.

Pour cela, le détecteur non sélectif utilisé pour mesurer la sensibilité spectrale relative est remplacé par un détecteur piège au silicium dont la sensibilité a été déterminée de manière absolue. Le photomètre est alors étalonné directement par comparaison à ce détecteur. Compte tenu des caractéristiques des appareils utilisés, l'incertitude de cette seconde méthode est un peu plus élevée que celle de la première méthode mais reste très acceptable pour une vérification des résultats et ainsi s'assurer de la validité des mesures. La sensibilité spectrale absolue des photomètres complets a donc été mesurée selon cette seconde méthode et les valeurs obtenues ont été utilisées pour traiter les mesures d'intensité lumineuse effectuées avec les photomètres.

Les sensibilités lumineuses des photomètres obtenues par la première méthode (méthode de base) sont appelées « sensibilité calculée » car elles font intervenir le calcul du produit de la transmission du filtre par la sensibilité spectrale du détecteur et celles obtenues par la seconde méthode (méthode de contrôle) sont appelées « sensibilité mesurée » parce qu'elles sont établies à partir de la mesure directe de la sensibilité spectrale.

8. Mesure de l'intensité lumineuse

Si la distance entre la source lumineuse et le photomètre est suffisamment grande, la relation entre l'éclairement sur le photomètre et l'intensité lumineuse de la source est donnée par la formule suivante :

$$I_v = E_v \cdot d^2, \text{ avec :}$$

- I_v , l'intensité lumineuse ;
- E_v , l'éclairement lumineux ;
- d la distance entre la source de lumière et le photomètre.

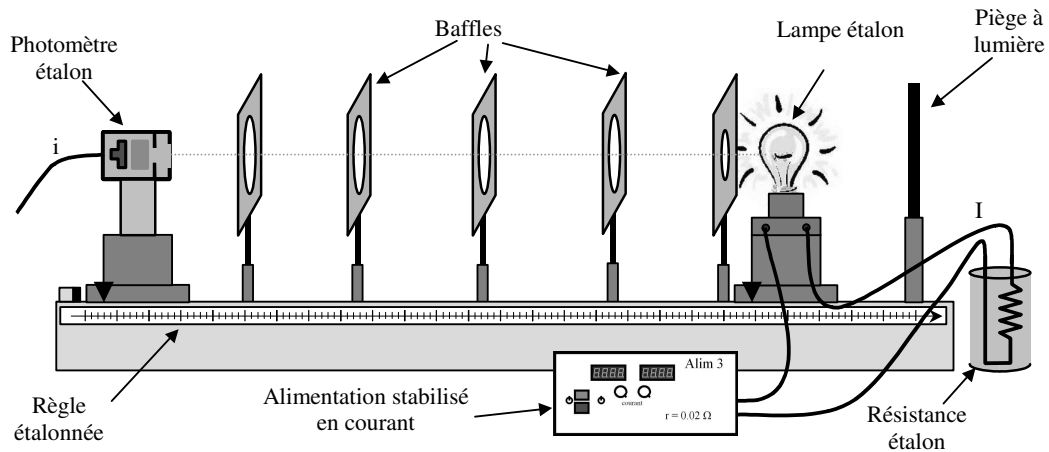


Fig. 9. – Banc photométrique pour la mesure de l'intensité lumineuse des lampes.

Pour les mesures d'intensité lumineuse, on utilise un banc photométrique d'une longueur de 4 m, sur lequel la source et le photomètre peuvent être déplacés (fig. 9). Cinq baffles sont placés entre la source et le photomètre

pour réduire la lumière parasite. La lampe et le photomètre sont soigneusement alignés à l'aide d'un support à cinq degrés de liberté. Le courant continu dans la lampe est ajusté et contrôlé grâce à une résistance étalon et un

voltmètre de haute qualité. Il est fourni par une alimentation dont la stabilité relative sur une heure est de l'ordre de 10^{-5} . Le budget d'incertitude pour ces mesures est présenté dans le tableau 8.

Tableau 8
Budget d'incertitude pour la mesure des intensités lumineuses.

Source d'incertitude	Écart type relatif (1σ)
Répétabilité	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Alignement	$6,0 \cdot 10^{-4}$
Distance	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Mesure de tension	$0,2 \cdot 10^{-4}$
Résistance étalon	$6,0 \cdot 10^{-4}$
Convertisseur courant-tension	$6,0 \cdot 10^{-4}$
Sensibilité du photomètre	$22,0 \cdot 10^{-4}$
Incertitude totale	$2,5 \cdot 10^{-3}$

Les photomètres ont été utilisés pour mesurer les intensités lumineuses d'un groupe de 5 lampes étalons. Ces étalons sont des lampes Polaron fonctionnant avec des courants électriques de l'ordre 25 A et ont des intensités lumineuses de l'ordre de 450 cd. Elles ont pour référence A 430, A 431, A 434, A 443 et A 447. Ces lampes ont été étalonnées par rapport à la précédente réalisation de la candela du laboratoire et servent à la conserver.

Pour chaque photomètre, nous avons calculé l'écart entre la valeur moyenne de l'intensité lumineuse mesurée sur les cinq lampes avec les nouveaux photomètres à la valeur moyenne de l'intensité lumineuse maintenue par les lampes et représentant la valeur de l'ancienne réalisation de la candela. Ce calcul a été fait en utilisant les valeurs de sensibilité lumineuse et les facteurs d'adaptation spectraux « calculés » et « mesurés ». Les résultats sont présentés sur le graphique de la figure 10

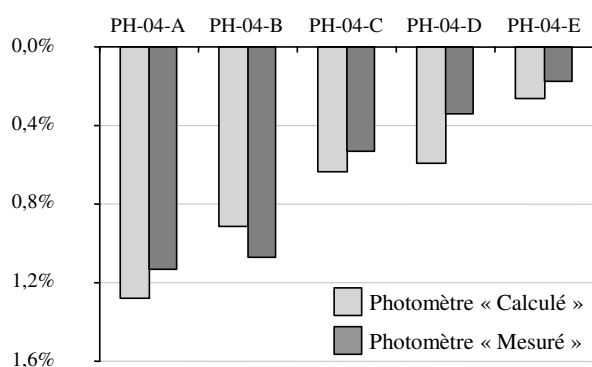


Fig. 10. – Écart entre l'ancienne et la nouvelle réalisation de la candela mesurée pour chacun des photomètres.

Ce graphique met en évidence le bon accord entre les valeurs obtenues avec la sensibilité lumineuse « calculée » et la sensibilité lumineuse « mesurée » pour chaque photomètre, les écarts constatés étant à l'intérieur des incertitudes types de mesure. Ceci permet de valider la cohérence des travaux effectués.

Les photomètres PH-04-A et PH-04-B qui ont le même type de filtre $V(\lambda)$ (type 1) donnent des résultats très proche l'un de l'autre, de même que les photomètres PH-04-C et PH-04-D qui eux aussi ont le même type de filtre $V(\lambda)$ (type 2). Par contre, l'écart entre les photomètres ayant des filtres $V(\lambda)$ différents est un peu plus grand qu'espéré mais il reste dans la limite des incertitudes types pour les quatre premiers photomètres du tableau. Le photomètre PH-04-E, qui s'écarte un peu plus des autres, est constitué d'une photodiode de petite taille et son comportement aura besoin d'être étudié plus en détail notamment au niveau des possibilités de vignettages à l'intérieur du détecteur piège.

En considérant les résultats donnés par les cinq photomètres, pour les intensités lumineuses déterminées en utilisant la sensibilité « calculée » du photomètre (méthode de base pour la réalisation de la candela), il apparaît que les lampes étalonnées par rapport à la nouvelle réalisation de la candela ont des intensités lumineuses en moyenne plus faibles de 0,73 % par rapport à la réalisation de la candela précédente. Cet écart est compatible avec les incertitudes des deux réalisations, 0,25 % et 0,50 % respectivement.

9. Conclusion

Les photomètres construits et caractérisés pour effectuer une nouvelle réalisation de la candela ont donné des premiers résultats tout à fait satisfaisants. Il reste à faire quelques études complémentaires sur le photomètre PH-04-E pour trouver l'explication de son comportement légèrement différent de celui des autres photomètres.

D'autres séries de mesures d'intensité lumineuse sur d'autres lampes étalons de différents types, en particulier des lampes OSRAM fonctionnant sous 5 A et ayant des intensités lumineuses de l'ordre de 250 cd seront effectuées afin de confirmer les premiers résultats.

L'incertitude sur la nouvelle réalisation de la candela est de 0,22 % en éclairage lumineux, et de 0,25 % en intensité lumineuse, soit plus de deux fois plus faible que celle sur la réalisation précédente.

Références

- [1] « Recueil des travaux et comptes rendus des séances », 6^e Session de la CIE, Genève, juillet 1924, 67.
- [2] CIE, «Photometry – The CIE system of physical photometry», S 010/E:2004, 2004.
- [3] BIPM, « Le système international d'unité, SI », 2006, 26.
- [4] BIPM, « Principes régissant la photométrie », Monographie du BIPM, 1983.
- [5] BASTIE J., « Conséquences pratiques du changement de définition de la candela », *LUX*, **145**, 1987, 9-15.
- [6] BASTIE J., « L'unité d'intensité lumineuse au Conservatoire National de Arts et Métiers », *Bulletin du BNM*, **99**, 1995, 65-71.

- [7] KATNAH A., COUTIN J.-M., HABAUZIT C. et BASTIE J., « Nouvelle matérialisation de la candela au BNM-INM », *9^e Congrès International de Métrologie*, Bordeaux, France, 18-21 octobre 1999, 265-268.
- [8] COUTIN J.-M., BRIAUDEAU S., CHANDOUL F. et BASTIE J., « Caractérisation des détecteurs pièges pour les mesures radiométriques au BNM-INM », *10^e Congrès International de Métrologie*, Saint Louis, France, 22-25 octobre 2001.
- [9] LECOLLINET P. et BASTIE J., “Photodetector linearity measurement over a wide dynamic range”, *XIIIth IMEKO World Congress*, Turin, Italie, 5-9 septembre 1994, 107-112
- [10] LECOLLINET P. et BASTIE J., « Mesure de la linéarité des détecteurs utilisés en radiométrie », *Bulletin du BNM*, **106**, 1996, 38-45.
- [11] 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.
- [12] COUTIN J.-M., TOUAYAR O. et BASTIE J., “The using conditions of the BNM-INM cryogenic radiometer as basis for the French optical radiation measurement scales”, *24^e Session de la CIE*, Varsovie, 1999, 222-224.
- [13] BASTIE J. et ANDASSE B., « Les détecteurs silicium et germanium étalons de transfert pour les mesures de rayonnement dans le domaine spectral 300-1600 nm », *5^e Congrès International de Métrologie*, Lyon, France, 17-19 septembre 1991, 343-348.
- [14] BASTIE J., ANDASSE B., MERCIER B. et TOUAYAR O., “The calibration of germanium photodetectors used for the measurements in the field of optical fibre telecommunications”, *SPIE*, **1712**, *14th Symposium on Photonic Measurements*, 1992, 63-72.
- [15] LECOLLINET P. et BASTIE J., « Mesure des facteurs de transmission de filtres optiques au BNM-INM », *8^e Congrès International de Métrologie*, Besançon, France, 20-23 octobre 1997, 343-348.
- [16] RAZET A. et BASTIE J., « Etalonnage de diamètres de diaphragmes pour des mesures radiométriques », *Bulletin du BNM*, **120**, 2001, pages 28-33.
- [17] RAZET A. et BASTIE J., “Uncertainty evaluation in non-contact aperture area measurements”, *Metrologia*, **43**, 2006, 361-366.
- [18] RAZET A., “Analytical resolution of least-squares applications for the circle in interferometry and radiometry”, *Metrologia*, **35**, 1998, 143-149.
- [19] GONZALEZ GALVAN L. P., « Matérialisation de la candela à l’aide de photomètres dont la chaîne de raccordement au radiomètre cryogénique primaire est parfaitement établie », *Thèse de Doctorat du Conservatoire National des Arts et Métiers*, 22 décembre 2005.
- [20] CIE, “Colorimetry – Part 2: CIE standard illuminants”, S014-2/E:2006, 2006.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Fatima Tayeb-Chandoul pour les mesures de sensibilité spectrales relatives, Jeanne-Marie Coutin pour les mesures de sensibilité spectrales absolues et Arnaud Richard pour les mesures de transmission des filtres.