



B. ROUGIÉ

Étalonnage de la sensibilité en éclairement de radiomètres par la méthode de balayage de faisceau

Radiometer calibration for irradiance responsivity by the scanning beam method

Bernard ROUGIÉ et Fatima TAYEB-CHANDOUL

Laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM (LCM), CNAM, 61 Rue du Landy, 93210 Saint Denis, France, bernard.rougie@cnam.fr.

Résumé

Dans la méthode « par balayage de faisceau » un faisceau monochromatique, de grande dimension et de répartition de flux uniforme, est synthétisé par la juxtaposition en de nombreuses positions d'un même faisceau. Un tel éclairement est impossible à obtenir avec un faisceau unique. L'article présente un dispositif d'étalonnage de la sensibilité en éclairement d'un radiomètre par balayage de faisceau. Sa particularité réside dans l'utilisation d'un faisceau monochromatique non cohérent, de profil non gaussien. Cette méthode a été optimisée par un calcul numérique simulant cette opération puis validée à $1,7 \times 10^{-3}$ près par comparaison à une méthode classique. Le dispositif a été mis en œuvre pour la mesure de la sensibilité en éclairement d'une thermopile. Malgré des variations de sa sensibilité spatiale de plus de 10 %, la sensibilité moyenne a été mesurée avec une incertitude meilleure que 0,35 %. La valeur est parfaitement cohérente avec les résultats obtenus depuis une vingtaine d'années par une méthode plus classique mais a permis la division par 2 des incertitudes. Ce type de mesure, capable de prendre en compte de telles variations de sensibilité locale en éclairement, pourra être étendu à d'autres instruments.

MOTS CLÉS : MÉTROLOGIE OPTIQUE, RAYONNEMENT OPTIQUE, BALAYAGE DE FAISCEAU, ÉTALONNAGE, ÉCLAIREMENT, THERMOPILE, SENSIBILITÉ, DÉTECTEUR.

Abstract

By the scanning beam method a large monochromatic and uniform synthetic beam is obtained from the juxtaposition of a same beam at several places close together. Such an irradiance cannot be obtained by a single beam. We report here a improvement of a setup for irradiance responsivity calibration of detector. The special feature of this work is the use of an incoherent monochromatic beam with a non gaussian profile. The method has been qualified by a numerical simulation of the

measurement process then validated by comparing the results with a classical method. This setup has been implemented for the irradiance responsivity measurement of a thermopile. Then, despite of the 10% local variation, its responsivity has been measured at 0.35% uncertainty level. The value agrees the previous measurements with an other method of this thermopile over 20 years. Furthermore it shows an uncertainty which is half the previous one. We plan to extend this method to other instruments such as mosaic photometer because of its ability to take into account large local responsivity variations.

KEY WORDS: OPTICAL METROLOGY, OPTICAL RADIATION SCANNING BEAM, IRRADIANCE CALIBRATION, THERMOPILE, RESPONSIVITY, DETECTOR.

1. Introduction

L'éclairage, lumineux ou énergétique, est une grandeur très fréquemment utilisée et requiert donc un étalonnage des instruments qui lui sont dédiés. Les surfaces éclairées sont généralement beaucoup plus grandes que la surface même de mesure ; ce qui ne rend pas nécessaire une grande homogénéité de la sensibilité des instruments. Il n'en est pas de même pour leur étalonnage.

Dans le cas général de détecteurs de sensibilité spatialement peu homogène, mais aussi de sensibilité variable selon la longueur d'onde, il faudrait pouvoir disposer pour les étalonner convenablement d'un faisceau à la fois monochromatique et très homogène sur toute la surface du détecteur. Un tel faisceau n'existe pas.

1.1. La méthode classique, ses limites

Un procédé classique pour réaliser une référence d'éclairement consiste à mesurer séparément la sensibilité en flux et la surface du diaphragme. C'est de cette manière que sont étalonnés les photomètres et les radiomètres à filtre destinés à la mesure de la densité spectrale d'éclairement produit par des sources. Pour s'assurer de la validité de la méthode il faut caractériser les variations locales de sensibilité et, le cas échéant, effectuer des corrections qui doivent rester faibles, voire nulles. C'est cette méthode qui est la méthode de référence au LCM.

1.2. La mesure de l'éclairement : les outils de la mesure

Toutefois, certains instruments de mesure d'éclairement présentent des grandes variations locales de leur sensibilité comparativement aux incertitudes d'étalonnage. Les radiomètres à filtre, particulièrement dans l'UV, les thermopiles et les photomètres de type « mosaïque » ont cette particularité. Pourtant ces variations de sensibilité locale n'affectent pas leur capacité à mesurer précisément un éclairement à condition qu'il soit lui-même très homogène dans le champ de mesure. Dans un tel cas, l'étalonnage revient à mesurer la sensibilité moyenne de l'instrument.

1.3. Le cas particulier des thermopiles

Un cas particulier de détecteurs souvent peu homogènes est celui des détecteurs thermiques dont la réponse peut être considérée comme constante à toute longueur d'onde du domaine spectral couvert, soit de 300 nm à 2500 nm. Les radiomètres à substitution électrique à température ambiante sont des détecteurs de ce type qui ont longtemps été utilisés comme étalons pour les mesures de flux. En plaçant un diaphragme de surface connue en avant de ce détecteur, on en fait aussi une référence de mesure d'éclairement. Il peut être comparé à un détecteur de même type, spectralement plat, en plaçant l'un et l'autre dans le même éclairement uniforme. Un tel éclairement est réalisable par une source placée à une distance suffisante mais il n'est pas monochromatique car une source suffisamment puissante et monochromatique n'est que très exceptionnellement disponible. La source utilisée est donc à spectre large, cependant, la similitude des sensibilités spectrales des détecteurs permet de s'affranchir de la monochromaticité du champ d'éclairement, de même que l'homogénéité du champ d'éclairement rend possible la comparaison de la valeur moyenne de la sensibilité de détecteurs présentant des inhomogénéités spatiales. Cette méthode a été appliquée au LCM en utilisant comme étalon de flux un radiomètre à détection thermique étalonné par substitution électrique (à température ambiante). Le radiomètre cryogénique remplace maintenant ces radiomètres à température ambiante. Il est devenu la référence de mesure de flux. Bien que théoriquement utilisable pour l'étalonnage de thermopiles comme évoqué ci-dessus, la disposition de la cavité réceptrice dans l'enceinte cryogénique rend

très délicats autant l'installation d'un diaphragme que le guidage d'un faisceau large jusque dans la cavité. Il est pourtant indispensable de raccorder toutes les mesures radiométriques à la référence nationale, le radiomètre cryogénique, en raison de son très bon niveau d'incertitude, de l'ordre de 1×10^{-4} en valeur relative. C'est pour cela que nous avons mis en place une nouvelle méthode de mesure de la sensibilité en éclairement des détecteurs.

1.4. Comment obtenir la monochromaticité et l'homogénéité d'un faisceau ?

La méthode dite « par balayage de faisceau » a été introduite dès 1998 [1] dans les mesures de rayonnement d'abord pour mesurer les surfaces de diaphragme et ensuite pour mesurer les éclairements. Cette méthode peut créer un éclairement que nous qualifions de « synthétique » qui est à la fois homogène, monochromatique et de grandes dimensions transverses. De plus, la valeur de l'éclairement de ce faisceau se calcule à partir des mesures de flux et de distance.

2. Les mesures de sensibilité en éclairement

Nous présentons le dispositif de mise en œuvre de la méthode « classique » puis nous décrivons la nouvelle méthode, dite « par balayage de faisceau », qui a été adaptée à ce dispositif.

Dans le cas général, la sensibilité moyenne d'un radiomètre a pour valeur :

$$S = \int_x \int_y S(x, y) \cdot dx \cdot dy. \quad (1)$$

La réponse du radiomètre à un éclairement $E(x, y)$ est $S = \int_x \int_y S(x, y) \cdot E(x, y) \cdot dx \cdot dy$.

$S(x, y)$ est la sensibilité locale dont l'intégrale est limitée à une zone définie soit par un diaphragme placé en avant du détecteur, soit par la surface sensible du détecteur lui-même. Cette relation se simplifie si la sensibilité est identique en tout point de la surface, hypothèse raisonnable et vérifiable dans de nombreux cas.

Le principe de la méthode de référence se place dans la situation définie ci-dessus. Il est mis en œuvre sur un banc de référence de mesure de la sensibilité en flux de détecteurs.

2.1. Banc de référence de mesure de flux

Le flux mesuré est celui d'un faisceau produit par un arc xénon-mercure ou par une lampe quartz halogène puis filtré par un monochromateur double (prisme et réseau). A la sortie du monochromateur, le dispositif optique à miroir focalise sur le détecteur une image de forme elliptique d'une dimension ajustable jusqu'à $(4 \times 5) \text{ mm}^2$. La répartition de la lumière est sensiblement homogène au

centre et la décroissance sur les bords est suffisamment rapide pour qu'il n'y ait plus de lumière au-delà de 6 mm.

Le flux du faisceau est mesuré par un détecteur étalonné par comparaison au radiomètre cryogénique. Il s'agit d'un détecteur piège constitué de trois diodes au silicium. Son diaphragme d'entrée a un diamètre de 16 mm, donc supérieur à la taille du faisceau. Le détecteur en test et celui de référence sont placés sur une même table de déplacement de 200 mm de course, de façon à être placés alternativement devant le faisceau qu'ils interceptent en totalité.

2.2. L'application aux mesures de sensibilité en éclairement

La méthode de référence consiste à étalonner séparément la sensibilité en flux du radiomètre (exprimée en A/W) et la surface du diaphragme A (en m^2), puis à en faire le produit pour déterminer la sensibilité en éclairement $S_{E,r}$ selon la relation (2).

$$S_{E,r} = \frac{R_r}{\Phi} \cdot A. \quad (2)$$

La sensibilité en flux est mesurée par le banc de mesure de flux décrit ci-dessus. Elle est le rapport de la réponse R_r du détecteur et du flux Φ étalon. L'indice r est utilisé pour repérer la méthode de référence. Pour s'assurer de l'homogénéité de la sensibilité celle-ci est mesurée en plusieurs points de la surface. La sensibilité en flux est prise égale à la moyenne de la sensibilité en tous ces points, mais ces points ne représentent qu'une fraction de la surface utile du radiomètre. Une condition nécessaire à l'utilisation de cette méthode est donc que les variations de sensibilité locale du radiomètre à étalonner soient inférieures à l'incertitude d'étalonnage. Ces variations sont d'ailleurs une des composantes de l'incertitude sur la sensibilité.

La surface du diaphragme est mesurée en repérant, grâce à un microscope muni d'un réticule, les coordonnées du bord du diaphragme placé sur une table de déplacement micrométrique à deux axes perpendiculaires. La forme du diaphragme étant très proche d'un cercle, on l'assimile à un cercle dont on calcule le diamètre par une méthode des moindres carrés. Pour assurer la traçabilité de cette mesure dimensionnelle, les deux axes de la table de déplacement sont étalonnés par une règle graduée de référence. Cette méthode sans contact a été validée par une comparaison internationale de mesure de surface de diaphragmes [2].

2.3. Méthode « par balayage de faisceau » et notion d'éclairement synthétique

2.3.1. Définition et valeur de l'éclairement synthétique

À partir du faisceau produit par le dispositif que nous venons de décrire un éclairement synthétique est généré par la somme, en chaque point du plan, du flux d'un même faisceau successivement juxtaposé en des positions

régulièrement espacées. Ce procédé est habituellement appelé « méthode par balayage de faisceau ».

Ces positions sont repérées par les coordonnées (x_i, y_j) , i et j étant des entiers. Les valeurs de x_i et y_j sont espacées de la distance h . À cet éclairement synthétique correspond une réponse synthétique qui est la somme des réponses du détecteur en chaque position du faisceau. Nous faisons l'hypothèse de la linéarité parfaite du détecteur.

La réponse synthétique du détecteur est :

$$R = \sum_i \sum_j R(x_i, y_j).$$

Lorsque le faisceau balaye les positions (x_i, y_j) , chaque maille (surface ayant pour côté le pas du déplacement h) de la surface du détecteur « voit » successivement une fraction du flux du faisceau dont la somme représente tout le flux. Ceci est vrai si le balayage est assez étendu, c'est-à-dire étendu jusqu'à ce que la réponse du détecteur puisse être considérée comme nulle.

Dans chaque maille de surface h^2 , l'éclairement synthétique constitué de la somme des éclairements produits en déplaçant le faisceau de flux Φ est égal à Φ/h^2 .

On a ainsi réalisé un éclairement synthétique dont la moyenne sur la maille de côté h est parfaitement constante. La sensibilité en éclairement du détecteur est alors calculée selon l'équation (3) :

$$S_E = \sum_i \sum_j h^2 \frac{R(x_i, y_j)}{\Phi} \quad \text{ou} \quad S_E = R \cdot \frac{h^2}{\Phi}, \quad (3)$$

avec :

R : réponse synthétique ;

Φ : flux du faisceau ;

h : pas horizontal ou vertical de déplacement du faisceau.

Pour être convenablement mesurée, cette moyenne doit être mesurée dans un champ d'éclairement homogène, obtenu, soit avec un éclairage à grand champ, soit avec un éclairement synthétique comme présenté ci-dessus.

Cette formule présente des similitudes avec l'équation (1) correspondant au calcul de la moyenne de sensibilité. Nous allons expliquer et évaluer les écarts à la moyenne exacte.

2.3.2. Évaluation des performances de la méthode par calcul théorique et numérique

2.3.2.1. Explication pratique des écarts

L'éclairement synthétique S_E obtenu par la méthode de balayage de faisceau, équation (3), est le résultat d'une

somme discrète. Il est donc inévitable que S_E présente un écart à la valeur S qui est une intégrale continue, équation (1). Nous cherchons à évaluer cet écart en valeur relative : $e = \frac{S - S_E}{S}$. On peut comprendre cet écart de façon intuitive : si l'éclairement synthétique est identique pour chaque maille cela ne signifie pas qu'il est constant en tout point, mais seulement que sa moyenne dans la maille est constante. Lorsqu'un détecteur est limité par un diaphragme, le plus souvent circulaire, le bord de ce diaphragme va découper quelques-unes des mailles en périphérie. Or l'éclairement d'une fraction de maille n'est en général pas égal à l'éclairement moyen, de telle sorte que sur les mailles situées en limite du détecteur, l'éclairement ne peut pas être considéré comme constant.

En connaissant la répartition du flux dans le faisceau réel, il est possible de calculer numériquement en tout point du plan la valeur de l'éclairement synthétique. On observe alors les variations de l'éclairement synthétique et on retrouve bien la constance aux points (x_i, y_j) tel que démontrée plus haut. On poursuit le calcul pour simuler les réponses et évaluer ainsi les écarts e induits sur la sensibilité par les variations de l'éclairement synthétique.

2.3.2.2. Validation du calcul à partir des résultats expérimentaux et théoriques

Nous avons réalisé le calcul numérique de la valeur de la sensibilité obtenue par la méthode de balayage de faisceau en utilisant un programme implémenté avec le logiciel MATCAD. Le logiciel calcule les réponses $R(x_i, y_j)$ en faisant le produit de convolution de l'éclairement dans le faisceau et de la sensibilité du détecteur. Le calcul se poursuit ensuite pour les valeurs théoriques comme pour les valeurs mesurées, équation (2).

Nous avons appliqué ce calcul à des résultats expérimentaux et aux calculs numériques publiés par Lassila [3]. L'objectif de la mesure dans cette publication est la mesure de la surface de diaphragmes par balayage de faisceau mais elle ressemble très exactement à la mesure d'éclairement. L'expérience consiste en un faisceau laser gaussien de rayon 0,7 mm à 13 % ($1/e^2$) du maximum explorant un diaphragme de rayon 1,5446 mm. Le résultat obtenu est la mesure de la surface du diaphragme. Il résulte de l'application du même calcul selon l'équation (3), en remplaçant Φ par le flux laser mesuré au centre du diaphragme. Les résultats de calcul sont en accord avec les résultats publiés avec une incertitude inférieure à 5×10^{-4} , limite de la connaissance des valeurs publiées.

2.3.2.3. Etude théorique

Cette méthode par balayage de faisceau peut être traitée comme un problème d'échantillonnage tel que l'a proposé Shrama [4]. Appelons « e » l'écart relatif entre la valeur obtenue S_E et la valeur théorique S .

$$e(h) = 1 - \frac{S_E(h)}{S}$$

e est évalué en fonction de h à partir des composantes de fréquences spatiales $\mathcal{E}(k_m)$ et $\mathcal{S}(k_m)$ des transformées de Fourier de la répartition d'éclairement $E(x, y)$ et de la sensibilité locale $S(x, y)$ du détecteur.

$$e(h) = \sum_{m1 \neq 0, m2 \neq 0} \mathcal{E}(k_{m1, m2}) \cdot \mathcal{S}(k_{m1, m2}), \quad (4)$$

où (m_1, m_2) est l'ensemble de couples de valeurs entières ;

$$(k_{m1}, k_{m2}) = \frac{2\pi}{h} (m_1, m_2).$$

Dans les situations de l'expérience, la méthode développée par Shrama offre une perception quantitative et qualitative. La sensibilité étant celle d'un détecteur circulaire de rayon a , sa transformée de Fourier $\mathcal{S}(k_{m1, m2})$ possède des zéros et ses composantes décroissent vers les hautes fréquences spatiales.

$$\mathcal{S}(k_{m1, m2}) = 2 \times \frac{J_1(|k| \cdot a)}{|k| \cdot a},$$

où $J_1(k)$ est une fonction de Bessel.

Elle confirme, ce que l'intuition suggère, que l'écart diminue avec le pas du balayage h et prévoit que cet écart s'annule pour certaines valeurs du pas. Ces valeurs dépendent bien sûr de la répartition du flux dans le faisceau. Il apparaît aussi que les fréquences spatiales de la répartition d'éclairement doivent être limitées le plus possible vers les hautes fréquences. Cette constatation conduit à deux conséquences non intuitives. Une première limitation des hautes fréquences spatiales de la répartition de flux peut être obtenue simplement par défocalisation de l'image formée sur le détecteur. Une deuxième limitation est obtenue par l'augmentation de la taille du faisceau. Dans les deux cas, un compromis doit être trouvé pour ne pas avoir à accroître excessivement la surface de balayage, c'est-à-dire la durée de la mesure et pour que le flux du faisceau soit mesuré dans sa totalité par le détecteur de référence. Il faut remarquer que le profil de faisceau idéal pour cette mesure est tout l'opposé de celui qui est utilisé dans la méthode classique exposée ci-dessus lors de l'exploration de l'analyse de la sensibilité locale.

2.3.2.4. Étude des écarts de la méthode dans les conditions expérimentales

Le calcul de simulation ayant été validé, nous l'avons appliqué à notre l'expérience avec ses paramètres propres. La répartition d'éclairement dans le faisceau décrit dans le paragraphe 3.2, est représentée par une fonction symétrique par rapport au centre (fig. 1). La fonction est polynomiale, d'ordre 4 pour des valeurs comprises entre 0 et Rf (paramètre ajustable de la fonction), raccordée à une fonction polynomiale d'ordre 2 de Rf à $1,1 \times Rf$, puis nulle au-delà. La variable Rf représente donc à peu près le rayon du faisceau. Les sections verticale et horizontale du faisceau ont la même forme mais leurs dimensions sont dans le rapport 1,25.

La tolérance de calcul de la simulation de mesure par balayage de faisceau a du être limitée à 2×10^{-4}

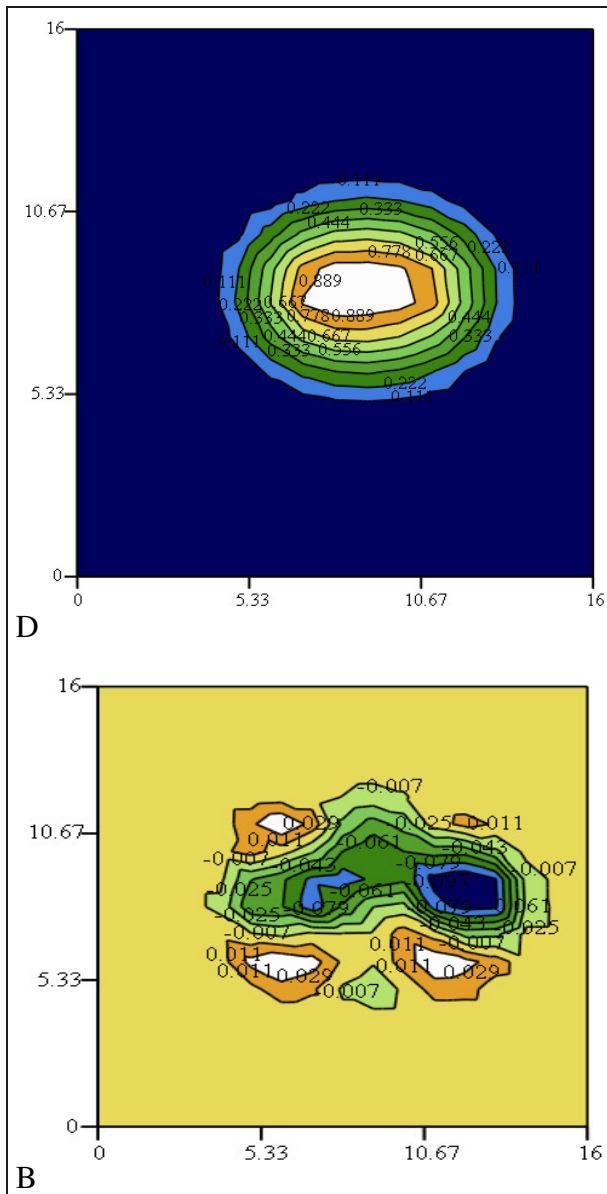


Fig. 1. – En haut (D) : profil du faisceau mesuré avec un détecteur de rayon 1 mm ; en bas (B) : écarts de ce profil par rapport à la fonction polynomiale utilisée pour représenter le faisceau dans les calculs numériques.

pour garder un temps de calcul acceptable. L'incertitude estimée d'après la répétition des calculs pour des paramètres assez proches pour n'avoir théoriquement aucune influence sur le résultat, montre que l'incertitude due au calcul est en réalité de 5×10^{-4} . La figure 2 montre, pour trois valeurs du rayon du faisceau R_f (1 mm, 2 mm et 2,5 mm), la sensibilité comparée à sa valeur théorique ($50,26 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{mm}^2$) en fonction du pas du balayage h pour un détecteur circulaire de rayon $r = 4 \text{ mm}$ ayant une sensibilité constante égale à $1 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$.

Les variations pour les faibles valeurs de h sont noyées dans l'incertitude du calcul. La théorie montre que cet écart doit s'annuler pour certaines valeurs de h . On observe bien ces zéros mais leur position est affectée par de faibles variations du diamètre du faisceau.

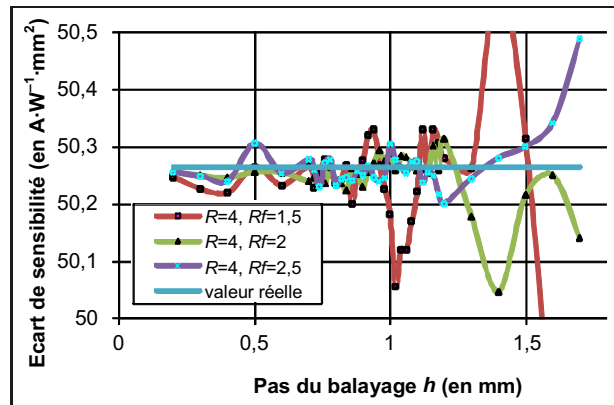


Fig. 2. – Écart de sensibilité dû à la méthode par balayage de faisceau en fonction du pas h , pour le rayon $R = 4 \text{ mm}$ du radiomètre et diverses valeurs de la taille du faisceau.

Nous attribuons ce fait à la forme elliptique du faisceau. L'écart e n'est pas significativement différent de la valeur exacte pour les valeurs de h inférieures à 0,9 mm et même de 1,2 mm pour un rayon du faisceau de 2,5 mm.

Nous avons fait le même calcul pour une répartition de flux de même section mais de symétrie circulaire et nous n'avons pas observé de variation significative entre les deux calculs pour les valeurs de h inférieures à 0,9 mm.

2.4. Mise en œuvre

2.4.1. Adaptation du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental mis en place pour la méthode par balayage est une extension du banc de mesure de la sensibilité en flux. Le balayage de faisceau consiste en un mouvement relatif du faisceau et du détecteur éclairé. Il est donc équivalent de déplacer le détecteur devant un faisceau fixe ou de déplacer le faisceau devant le détecteur fixe. Le dispositif qui génère le faisceau étant volumineux, c'est donc le détecteur qui sera déplacé. Seul un mouvement vertical a été ajouté au support du détecteur en test. La combinaison de ce mouvement et de celui de la table servant à la substitution du détecteur de test et de référence offre le déplacement suffisant pour explorer avec le faisceau toute la surface requise.

Le déroulement des mesures est fortement modifié : Pour les mesures de flux, le centre du détecteur de référence et du détecteur en test sont placés alternativement dans le faisceau. Pour les mesures d'éclairement par balayage, plus d'une centaine de mesures est effectuée avec le détecteur en test en autant de points différents. L'exploration du détecteur en test se fait ligne par ligne ; la mesure du flux par le détecteur de référence est répétée périodiquement en début et en fin de chaque ligne afin de compenser l'augmentation des dérives dues à l'allongement de la durée des mesures.

2.4.2. Traçabilité

Les deux grandeurs de référence à utiliser pour cette mesure sont le flux et la longueur. L'étalon de flux est le

même détecteur piège que celui utilisé pour la méthode de référence. La longueur h est déterminée par les tables à déplacements croisés qui assurent le positionnement du détecteur.

3. Validation de la méthode : comparaison à la méthode de référence

La sensibilité en éclaircissement $A/(W \cdot m^{-2})$ d'un radiomètre à filtre, mesurée par la méthode de balayage de faisceau, a été comparée à la valeur obtenue par notre méthode de référence. Cette méthode a été elle-même validée lors de comparaisons internationales de mesure d'éclaircissement [5]. La validation a été faite lors de la mise en place de l'expérience puis, récemment, après l'automatisation complète de l'expérience dans des conditions différentes.

3.1. Les deux instruments utilisés pour la validation

Le premier est un radiomètre construit avec un diaphragme de précision de diamètre $D = 10$ mm, un filtre passe-bande (assemblage de verres colorés centré sur 496 nm, de 25 nm de largeur à mi-hauteur) et une photodiode au silicium. Il est maintenu à température constante dans un fourreau métallique lui-même thermostaté. Le deuxième instrument est un détecteur piège, sans filtre, d'ouverture 16 mm, limité par un diaphragme de diamètre 8 mm. Dans les deux cas, la surface du diaphragme a été mesurée par une méthode sans contact. (§ 2.2).

3.2. La mesure selon la méthode par balayage de faisceau

Lors d'une première mise en œuvre de la méthode, la taille du faisceau de forme elliptique, a été évaluée visuellement à 4 mm × 5 mm et le pas d'exploration a été fixé à 1,5 mm. Sur la ligne centrale, 13 points ont été mesurés. Ce nombre de points a diminué pour les autres lignes jusqu'à trois points pour les lignes extrêmes totalisant ainsi 109 points différents. Ceci réduit d'un tiers le temps de mesure par comparaison à une mesure qui aurait balayé la surface carrée dans laquelle s'inscrit la zone à balayer.

Lors d'une deuxième mise en œuvre de cette mesure, bien que la conclusion de l'analyse théorique de la méthode conduise plutôt à une augmentation de la taille du faisceau, cette surface a du être réduite afin de garantir que le faisceau soit entièrement intercepté par le détecteur piège, autant celui de référence que celui servant à la validation. Pour un flux correspondant à 50 % du flux central, le faisceau a une section transversale sensiblement elliptique de petit axe et de grand axe valant respectivement 1,2 mm et 1,9 mm. Pour adapter la mesure à cette surface, le pas d'échantillonnage a été lui aussi diminué à 0,7 mm de façon à réduire l'erreur de la méthode à 5×10^{-4} , erreur évaluée d'après l'étude numérique (fig. 2). Le nombre de mesures a été augmenté à 19 lignes et colonnes, totalisant ainsi 361 points différents.

À chaque ligne le flux du faisceau est mesuré par le détecteur de référence. Le signal délivré par un détecteur en l'absence de flux est qualifié de « zéro ». Le zéro de chaque détecteur est lui aussi mesuré à chaque ligne.

3.3. Corrections et incertitudes

La correction de « zéro » et le rapport entre la réponse des deux détecteurs faits ligne par ligne prennent en compte l'essentiel de la dérive du flux du faisceau pendant la mesure. La variation moyenne relative du flux d'une ligne d'exploration à la suivante est de 2×10^{-4} . Dans le cas le plus défavorable d'une dérive monotone, cette variation de flux serait responsable d'une erreur de 1×10^{-4} , valeur que nous intégrons dans l'incertitude de reproductibilité.

Le rapport des sensibilités résultant des deux méthodes (la méthode de référence et la méthode par balayage de faisceau) se calcule d'après les équations (2) et (3). Ce rapport ne dépend pas du flux étalon car il est commun aux deux méthodes.

$$\frac{S_r}{S} = \frac{R_r \cdot A}{R \cdot h^2} \quad (5)$$

L'incertitude de ce rapport est une combinaison quadratique de l'incertitude relative de chacune des composantes que l'on complète avec le terme $u(e)$ dû à la méthode par balayage de faisceau elle-même.

$$u^2\left(\frac{S_r}{S}\right) = \frac{u^2(R)}{R^2} + \frac{u^2(R_r)}{R_r^2} + \frac{u^2(A)}{A^2} + 2\frac{u^2(h)}{h^2} + \frac{u^2(e)}{e^2}$$

Les incertitudes sur les réponses R (méthode par balayage de faisceau) et R_r (méthode de référence) sont de 0,05 % et celle sur A (surface du diaphragme) est de 0,02 %.

L'incertitude sur h est celle qui est fournie par le constructeur des tables de déplacement servant au balayage du faisceau, soit 0,01 mm. Mais l'incertitude relative sur h est calculée comme étant $u(h)/D$, D étant le diamètre du diaphragme. Ceci se justifie par le fait que le signal ne varie pas significativement pour une variation de position de 0,01 mm (valeur de $u(h)$) lorsque le faisceau balaye le centre du détecteur mais il varie près des bords. L'incertitude relative de h est donc de $u(h)/D$. Les axes X et Y de déplacement étant jugés indépendants, l'incidence sur la mesure d'éclaircissement est de $\sqrt{2} \times \frac{u(h)}{D}$.

La composante $u(e)$ évaluée par répétition du calcul sur des valeurs de paramètres très proches conduit à des écarts maximum de 0,15 % donc une incertitude type estimée à 0,05 %. Cette erreur pourrait être rendue beaucoup plus petite en choisissant un pas plus petit. Mais ce choix, grand consommateur de temps de mesure, n'offrirait pas de gain d'incertitude au regard des autres composantes.

L'incertitude type globale est de 0,17 % et 0,19 % dont l'essentiel provient de l'incertitude sur le déplacement des tables. Les écarts relatifs entre les deux méthodes observés avec le radiomètre à filtre ou avec le

Tableau 1

Écart d'étalonnage obtenu pour chacun des instruments étalonnés selon les méthodes utilisées.

Radiomètre à filtre	0,14 %
Détecteur piège avec diaphragme	0,11 %

Tableau 2

Incertitudes relatives de la comparaison des méthodes ; 1^{re} ligne : pour le radiomètre à filtre ; 2^e ligne : pour le détecteur piège.

$u(R)$	$u(R_c)$	$\sqrt{2}u(h)$	$u(A)$	$u(e)$	$u(S_r/S)$
0,05	0,05	0,14	0,02	0,05	0,17
0,05	0,05	0,17	0,02	0,05	0,19

détecteur piège sont l'un et l'autre inférieurs à l'incertitude. La méthode est donc validée au niveau d'incertitude de 0,17 %, valeur d'incertitude de la comparaison.

4. Mesure de la sensibilité en éclairissement d'une thermopile

Une thermopile est un détecteur de type thermique sensible dans un très large spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge. Sa détectivité est faible comparativement aux détecteurs quantiques et son temps de réponse est de plusieurs secondes. La robustesse de ce type de détecteur, leur stabilité à très long terme et leur spectre large en font tout de même des instruments très utilisés. La thermopile considérée ici est de marque Kipp et Zonen. Sa tension de sortie est mesurée par un microvoltmètre. Sur un barillet rotatif sont disposés 4 diaphragmes à bord mince qui viennent se placer à 1 mm environ en avant de la surface sensible. Elle est utilisée avec son diaphragme de 8 mm de diamètre. Sa surface présente des variations de sensibilité pouvant dépasser 10 %. Comme expliqué, la méthode de mesure d'éclairissement par balayage de faisceau est bien adaptée à l'étalonnage de ce genre de détecteur dont l'homogénéité de sensibilité locale est médiocre.

4.1. Traçabilité des mesures au radiomètre cryogénique

Deux thermopiles ont été suivies pendant de nombreuses années avec une référence basée sur un radiomètre à substitution électrique à température ambiante décrite précédemment. Aujourd'hui ce radiomètre n'est plus maintenu dans le laboratoire qui a progressivement raccordé toutes les mesures au radiomètre cryogénique. Il était donc nécessaire de compléter le raccordement de ces mesures sur les thermopiles au radiomètre cryogénique.

4.2. Spécificité de la mesure d'une thermopile

Le processus est très semblable à celui utilisé pour le radiomètre à filtre mais, pour tenir compte de la dimension et la sensibilité du détecteur, la taille du faisceau a été réduite de 4 mm × 5 mm à 3 mm × 4 mm, le pas d'échantillonnage a été réduit de 1,5 mm à 1 mm et la durée de chaque mesure sur la thermopile a été fixée à 40 s. La longueur d'onde de 365 nm correspond à une raie du

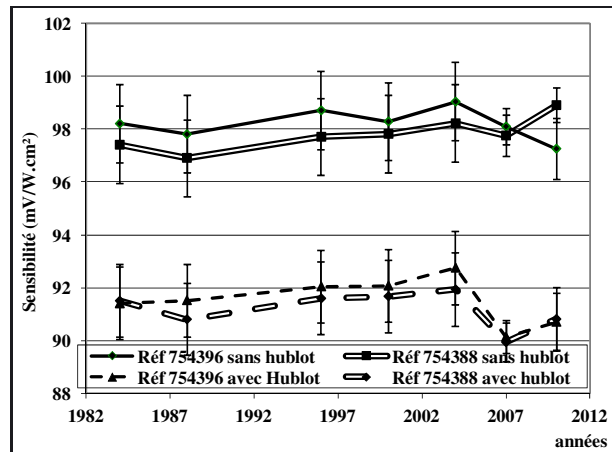


Fig. 3. – Mesures de sensibilité d'une thermopile avec leurs incertitudes ($k = 2$) sur 25 ans.

mercure et, par conséquent, à une forte intensité de l'arc à mercure « haute pression » servant de source sur le banc de mesure. Elle a été choisie dans l'ultraviolet car c'est dans ce domaine que la thermopile est utilisée. La largeur de la bande passante du monochromateur est de 4 nm. Le flux dans le faisceau est de l'ordre de 1 mW.

4.3. Résultats

Les variations de sensibilité sont très prononcées selon l'un des axes de balayage. Elles dépassent 10 % à une distance de 1 mm du centre. Cependant l'incertitude de la mesure d'éclairissement moyen est meilleure que 0,35 %, dont l'essentiel provient, non des variations spatiales de la sensibilité, mais du rapport signal/bruit de la mesure.

Le rapport signal/bruit d'une thermopile n'est pas très élevé pour un flux de l'ordre de 1 mW disponible dans le faisceau monochromatique. Il s'ensuit un temps de mesure long (> 1 h). Toutefois la quasi-constance de la sensibilité en fonction de la longueur d'onde ne nécessite pas un grand nombre de longueurs d'onde d'étalonnage.

La sensibilité a été mesurée par la méthode par balayage de faisceau à 365 nm. La sensibilité au centre de la thermopile a été mesurée pour quelques longueurs d'onde entre 297 nm et 578 nm. La sensibilité reste constante à l'exception de celle à 297 nm.

Cette thermopile est suivie depuis 25 ans dans le laboratoire. Elle a été très stable pendant cette période. Sur la figure 3, les deux dernières mesures ont été faites avec la méthode par balayage de faisceau. L'incertitude augmente pour la dernière mesure due à un environnement thermique instable. Cependant la valeur obtenue maintenant (les deux dernières sur la fig. 3) par la méthode par balayage de faisceau montre une continuité de la valeur de sensibilité sans hublot et une variation moyenne de -2,1 % pour les mesures avec hublot. Cette variation correspond à la décroissance de -2,1 % de la transmission du hublot entre la longueur d'onde de comparaison de 700 nm (moyenne pour les mesures avant 2007) et la longueur d'onde actuelle de 365 nm. Nous avons

aussi amélioré l'incertitude d'un facteur 2, celle-ci restant essentiellement limitée par le rapport signal/bruit de la thermopile.

5. Conclusion

Une mesure d'éclairement énergétique spectrique par balayage de faisceau, déjà mise en œuvre dans d'autres laboratoires avec un faisceau cohérent, a été adaptée à un faisceau monochromatique incohérent. Les études théoriques du processus ont déjà mis en évidence la grande influence sur la justesse du résultat, de la répartition du flux dans la section transverse du faisceau. La forme gaussienne est très favorable mais n'est pas réalisable avec un faisceau issu du type de dispositif spectroradiométrique très répandu semblable à celui du LCM. Nous avons retrouvé ces résultats par simulation numérique. En prenant en compte l'allure du faisceau, nous avons montré que nous pouvons trouver des valeurs du pas de déplacement du faisceau qui soient assez grandes pour que le nombre de points, donc le temps de mesure, soit acceptable tout en n'apportant pas d'écart à la valeur de la sensibilité en éclairage supérieur à $0,5 \times 10^{-3}$ en valeur relative.

Dans les conditions ainsi définies, nous avons validé les résultats à un niveau d'incertitude relative de $1,4 \times 10^{-3}$ en comparant les résultats obtenus par cette méthode et une méthode classique éprouvée par ailleurs.

Ceci a permis de mettre à profit l'intérêt le plus remarquable de cette méthode, à savoir son utilisation pour étalonner des détecteurs présentant des variations importantes de leur sensibilité locale en éclairage. Des thermopiles présentant des variations de sensibilité locale

Article reçu le 30 mai 2012, version révisée reçue le 15 mars 2013.

supérieures à 10 % ont été étalonnées en sensibilité globale en éclairage. L'incertitude obtenue est de 0,35 %. Les résultats sont en accord avec les mesures obtenues jusqu'alors avec une incertitude qui est réduite d'un facteur 2 et la traçabilité est plus directe à la référence nationale, le radiomètre cryogénique.

L'utilisation plus routinière de cette méthode devra être associée à une mesure fine de la répartition du flux dans le faisceau. Le choix du pas d'échantillonnage sera ajusté à partir de ce résultat et de celui du diamètre du diaphragme du détecteur en effectuant les calculs numériques utilisés ici pour la validation de la méthode.

Références

- [1] IKONEN E., TOIVANEN P. et LASSILA A., "A new optical method for high-accuracy determination of aperture area", *Metrologia*, **35**, 1998, 369–372.
- [2] RAZET A. et BASTIE J., "Uncertainty evaluation in non-contact aperture area measurements", *Metrologia*, **43**, 5, 2006, 361–366.
- [3] LASSILA A., TOIVANEN P. et IKONEN E., "An optical method for direct determination of the radiometric aperture area at high accuracy", *Meas. Sci. Technol.*, **8**, 1997, 973–977.
- [4] SCHRAMA C.A. et al., "Sampling criterion method in a scanning beam method", *Applied Optics*, **39**, 10, 2000.
- [5] GOEBEL R. et STOCK M., "Report on the comparison CCPR-K2.b of spectral responsivity measurements in the range 300 nm to 1000 nm", *Metrologia*, **41**, Tech. Suppl., 2004.