

# Méthode de mesure de la sensibilité spectrale des détecteurs pièges de référence

## *Spectral responsivity measurement method of reference trap detectors*

Fatima TAYEB-CHANDOUL, Jeanne-Marie COUTIN et Jean BASTIE

Laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM, CNAM, 61 Rue du Landy, 93210 La Plaine-Saint Denis, France, fatima.chandoul@cnam.fr.

### Résumé

De nouveaux détecteurs pièges dits de « grande surface », construits à partir de photodiodes au silicium de  $(18 \times 18) \text{ mm}^2$ , ont été caractérisés pour être utilisés comme détecteur de référence pour la mesure de la sensibilité spectrale des détecteurs. Leur caractérisation a été effectuée sur un montage du laboratoire basé sur un monochromateur associé à des sources de rayonnement à spectres étendus. Le présent article décrit les détecteurs pièges réalisés, détaille la méthode de mesure de leur sensibilité spectrale relative et présente la méthode utilisée pour passer de la sensibilité spectrale relative à la sensibilité spectrale absolue.

**MOTS CLÉS :** DÉTECTEUR PIÈGE, SENSIBILITÉ SPECTRALE, ÉTALONNAGE.

### Abstract

*New "large area" trap detectors based on silicon photodiodes of  $(18 \times 18) \text{ mm}^2$  have been characterized to be used as standards for measuring the spectral responsivity of detectors. The study of these detectors was carried out on the experimental set-up of the laboratory based on a monochromator and sources of continuous spectral radiation. This article describes the developed trap detectors, details the method of measuring their relative spectral responsivity and presents the method used to change the relative spectral responsivity into the absolute spectral responsivity.*

**KEY WORDS:** TRAP DETECTOR, SPECTRAL RESPONSIVITY, CALIBRATION.

### 1. Introduction

La mesure de la sensibilité spectrale d'un détecteur de transfert s'effectuait jusqu'à présent au laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM (LCM) en deux étapes. L'une de ces étapes consiste à mesurer la sensibilité spectrale relative du détecteur sur l'ensemble du domaine

spectral considéré. L'autre étape consiste à mesurer la sensibilité spectrale absolue du détecteur par comparaison (directe ou indirecte) à un radiomètre cryogénique à quelques longueurs d'onde lasers [1, 2]. La superposition de ces deux opérations permet d'obtenir la sensibilité spectrale absolue du détecteur sur l'ensemble du domaine spectral considéré.

La mesure de la sensibilité spectrale relative d'un détecteur de rayonnement optique s'obtient en comparant, pour chaque longueur d'onde étudiée, la réponse du détecteur à étalonner à celle d'un détecteur thermique pyroélectrique non sélectif de forme cavité, lorsque les deux détecteurs sont soumis au même rayonnement monochromatique.

Compte tenu de la faible sensibilité du détecteur pyroélectrique utilisé, la répétabilité des mesures avec cette méthode est limitée et, pour obtenir une incertitude acceptable, il est nécessaire d'effectuer un grand nombre de séries de mesures. De plus, les variations de sensibilité locale de ce détecteur sont non négligeables ; ce qui nécessite de faire des mesures sur le détecteur thermique placé dans différentes positions. Toutes ces contraintes font que cette méthode est extrêmement lourde à mettre en œuvre et nécessite un temps de mesure important, elle ne peut donc pas être utilisée pour les étalonnages de routine. Elle est alors réservée à l'étalonnage des détecteurs étalons de transfert.

Pour la satisfaction des besoins industriels en étalonnage de haute qualité, nous avons été conduits à développer des détecteurs de référence d'un emploi plus aisé. Ces détecteurs permettent ainsi la simplification de la

méthode d'étalonnage des détecteurs en sensibilité spectrale, tout en conservant une incertitude très proche de celle qu'il est possible d'obtenir avec la méthode « initiale ». Pour cela, nous avons développé trois détecteurs de référence au silicium, de types différents, capables de conserver sur une période de temps assez longue leur étalonnage aussi bien en valeur relative qu'en valeur absolue. Ces détecteurs sont des détecteurs pièges en réflexion réalisés à partir de trois photodiodes au silicium de grande surface ( $18 \times 18$ ) mm<sup>2</sup>. Ils sont raccordés indirectement au radiomètre cryogénique. De plus, il est possible de modéliser leur sensibilité spectrale sur une partie relativement large de leur domaine spectral d'utilisation.

Les détecteurs pièges sont bien connus maintenant pour leur stabilité, leur linéarité et leur uniformité spatiale. Ils ont été validés par une comparaison internationale de radiomètres cryogéniques, organisée par le BIPM [3]. Il s'agissait d'une comparaison indirecte des radiomètres cryogéniques, réalisée par l'intermédiaire de détecteurs pièges utilisés comme détecteurs de transfert. Les résultats obtenus traduisent un écart relatif de sensibilité spectrale inférieur à  $2 \times 10^{-4}$  entre la plupart des laboratoires participants, ce qui met donc en évidence les performances des radiomètres cryogéniques pour les mesures radiométriques d'une part, ainsi que la stabilité des détecteurs pièges et leur aptitude à maintenir l'incertitude du radiomètre cryogénique d'autre part [4].

## 2. Description des détecteurs pièges développés au LCM

Les détecteurs pièges de référence développés au LCM sont dits « en réflexion » [5]. Les trois photodiodes sont montées de façon à former un piège à lumière : l'absorption quasi totale du rayonnement est réalisée en envoyant le rayonnement incident sur la première photodiode qui renvoie la partie non absorbée du rayonnement sur la seconde photodiode. Cette seconde photodiode renvoie la partie non absorbée du rayonnement sur la troisième photodiode. Cette troisième photodiode, placée perpendiculairement au faisceau incident, renvoie la partie non encore absorbée du rayonnement vers la seconde et la première photodiode. Dans ces conditions, le faisceau incident est absorbé et réfléchi cinq fois avant de ressortir du détecteur piège. Une étude du facteur de réflexion de ces détecteurs pièges a montré que les pertes par réflexion sont bien inférieures à 0,01 % [6].

De plus, les positions et les orientations des trois photodiodes utilisées pour réaliser ces détecteurs pièges sont telles que les effets liés à la polarisation du rayonnement incident sont minimisés [7,8]. La figure 1 présente la disposition des trois photodiodes dans les détecteurs pièges utilisés.

### 2.1. Photodiodes utilisées

Les détecteurs pièges réalisés au LCM sont constitués chacun à partir de trois photodiodes au silicium de grande surface ( $18 \times 18$ ) mm<sup>2</sup> fabriquées par Hamamatsu (Fig. 2). Celles qui sont optimisées pour le visible sont de type

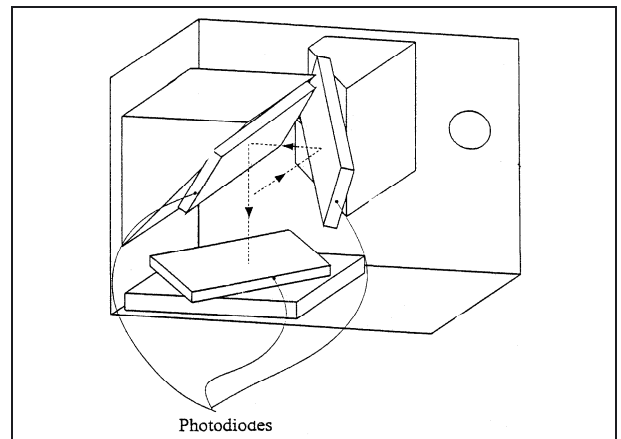


Fig. 1. – Schéma de principe d'un détecteur piège en réflexion (modèle développé par le *Metrology Research Institute of HUT* de Finlande en collaboration avec le département de physique de l'université de Tartu d'Estonie).



Fig. 2. – Intérieur d'un détecteur piège en réflexion construit avec des photodiodes de grande surface.

Si-3204-09 et Si-6337-01 (notés S3204 et S6337) et celles optimisées pour le proche ultraviolet sont de type Si-8553-53 (noté S8553). Les dimensions extérieures du détecteur piège sont :  $(80 \times 61,5 \times 46,5)$  mm<sup>3</sup>.

Ces photodiodes sont sans fenêtre et sont recouvertes d'une couche de passivation à base de nitrure de silicium d'indice optique  $n > 1,75$ .

Elles ont un rendement quantique interne  $\eta$  proche de 1 sur le domaine spectral 350 nm–900 nm [6] et une faible non linéarité. Ces photodiodes sont montées dans un boîtier rectangulaire et elles sont connectées électriquement en parallèle.

### 2.2. Caractéristiques d'un détecteur piège

L'absorption du rayonnement à l'intérieur d'un détecteur piège se fait en différents points de l'espace. Il est donc important que lors de la propagation des faisceaux à l'intérieur du piège il n'y ait pas de phénomène

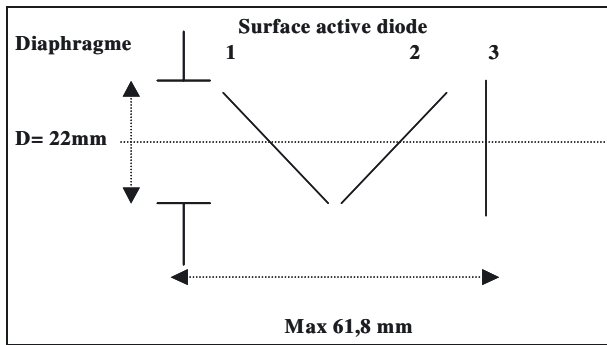


Fig. 3. – Schéma des caractéristiques géométriques d'un détecteur piège de grande surface.

de diaphragmation ou de vignettage qui entraînerait des pertes de flux. Les dimensions géométriques d'un détecteur piège, représentées sur le schéma de la figure 3, sont donc particulièrement importantes et doivent être prises en compte lors de l'étude des montages optiques avec lesquels les détecteurs sont utilisés. À titre d'exemple, sur la figure 3 est représentée la longueur du chemin optique dans un détecteur piège de grande surface : chaque trait représente la surface active de chaque photodiode.

### 2.3. Linéarité

L'étude de la linéarité des détecteurs pièges pose quelques difficultés du fait de leur géométrie. Mais on peut raisonnablement admettre que si les photodiodes qui composent le piège sont linéaires, le piège sera également linéaire et aura même probablement une linéarité meilleure que celle d'une photodiode isolée, puisque l'absorption du rayonnement est quasi totale. Une étude de linéarité a donc été faite sur une photodiode de type Si-3204-09 (repérée 99-Q) de même nature et caractéristique que celles qui constituent l'un des trois pièges réalisés. Les deux autres types de photodiodes avaient été étudiés précédemment pour d'autres usages [9].

La méthode utilisée pour cette étude est celle de l'addition de flux [10]. La linéarité est déterminée en lumière polychromatique, fournie par une lampe tungstène halogène fonctionnant à une température de répartition d'environ 3 000 K. La lumière est filtrée par un filtre froid Corion FR-400-S qui coupe l'infrarouge au-delà de 1 000 nm.

Le diamètre du faisceau sur la surface sensible du détecteur est de l'ordre de 15 mm. Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau 1 et sur le graphique de la figure 4.

Dans ce tableau, la première colonne donne le courant photoélectrique de la photodiode 99-Q. La deuxième colonne présente le facteur de correction de la linéarité en supposant une correction égale à 1 pour un courant de référence de 13,85  $\mu\text{A}$ .

Cette étude montre que l'écart à la linéarité de la photodiode étudiée est inférieur à  $8 \times 10^{-4}$  pour des courants photoélectriques compris entre 2,3 nA et 1,6 mA.

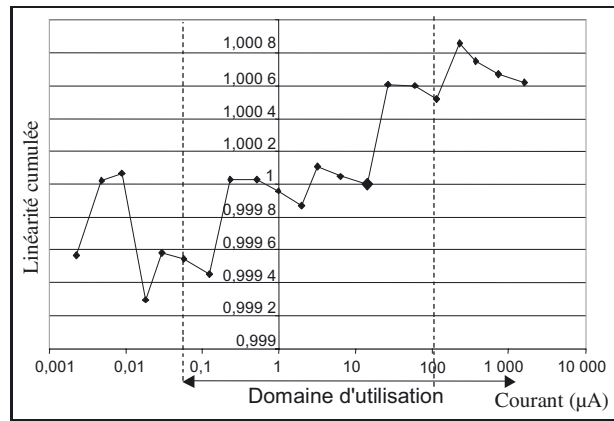


Fig. 4. – Facteur de correction de la linéarité pour la photodiode de grande surface 99-Q.

Tableau 1

Mesure de la linéarité de la photodiode 99-Q.

Courant détecteur ( $\mu\text{A}$ )	Linéarité : $I_{\text{ref}} = 13,85 \mu\text{A}$
2 731	2,492 00
3 070	1,108 00
1 605	1,000 62
724,6	1,000 67
375,4	1,000 75
231,3	1,000 86
113,4	1,000 52
60,55	1,000 60
26,51	1,000 61
<b>13,85</b>	<b>1,000 00</b>
6,252	1,000 05
3,236	1,000 11
1,994	0,999 87
0,977 2	0,999 96
0,521 9	1,000 03
0,236 7	1,000 03
0,125 1	0,999 45
0,056 72	0,999 55
0,029 34	0,999 58
0,018 16	0,999 30
0,008 97	1,000 07
0,004 89	1,000 02
0,002 25	0,999 57

L'incertitude type relative sur ces mesures est de l'ordre de  $2 \times 10^{-4}$ .

Ces résultats (Fig. 4) montrent que la photodiode est linéaire sur le domaine d'utilisation de ces détecteurs pièges (de 0,05  $\mu\text{A}$  à 100  $\mu\text{A}$ ).

## 3. Mesure de la sensibilité spectrale relative des détecteurs pièges

### 3.1. Principe de mesure

La mesure de la sensibilité spectrale des détecteurs est réalisée en comparant le détecteur piège à étalonner à

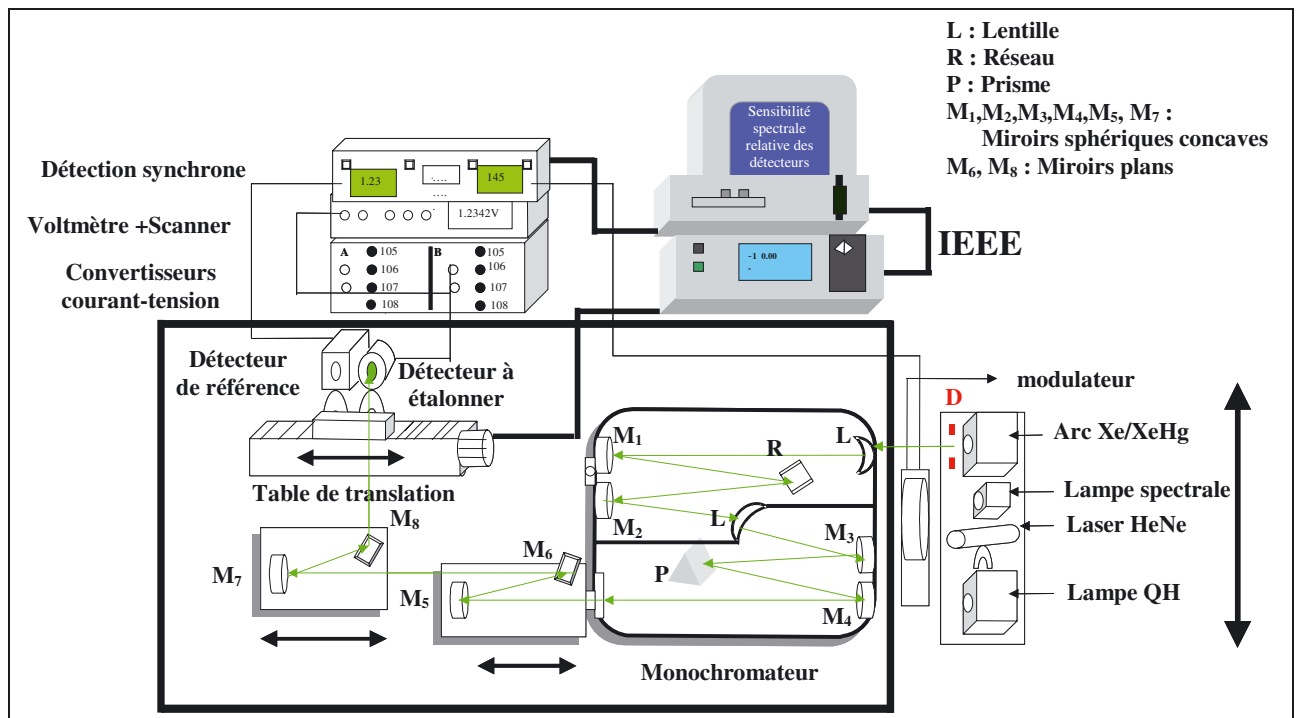


Fig. 5. – Schéma du montage de mesure de la sensibilité spectrale des détecteurs.

un détecteur de référence, en les plaçant successivement dans un faisceau monochromatique.

### 3.2. Montage expérimental

Le montage utilisé pour effectuer la comparaison du détecteur à un détecteur de référence est représenté sur la figure 5. Il est construit autour d'un monochromateur double (à prisme et à réseau) qui permet de couvrir le domaine spectral de 250 nm à 2 000 nm en utilisant plusieurs ordres du réseau. Les ordres sont séparés par le prisme ; ce qui permet d'avoir un taux de lumière parasite très faible.

Suivant le domaine spectral considéré, ce montage utilise différentes sources de rayonnement : une lampe quartz halogène pour les domaines spectraux visible et infrarouge et un arc xénon ou un arc xénon-mercure pour les mesures dans l'ultraviolet. D'autre part, une lampe à vapeur de mercure basse pression est utilisée pour l'ajustage en longueur d'onde du monochromateur et un laser hélium-néon permet l'alignement des éléments du montage, en particulier celui des détecteurs.

Le diaphragme D placé entre les sources et le monochromateur sert de pupille d'entrée au montage optique du système. Les lentilles de champ L, placées devant la fente d'entrée et la fente intermédiaire du monochromateur, permettent de former l'image de la pupille d'entrée respectivement sur le réseau et le prisme. À la sortie du monochromateur, le premier jeu de miroirs, sphérique M5 et plan M6, et, est fixe ; il permet d'avoir des images intermédiaires de la pupille d'entrée et de la fente de sortie du monochromateur convenablement

positionnées et de taille adaptée. Le second jeu de miroirs, sphérique M7 et plan M8, et est mobile et permet d'adapter la taille et la position de la pupille de sortie du système ainsi que celle de l'image de la fente de sortie du monochromateur, sans perte de flux.

### 3.3. Alignement des détecteurs

Les détecteurs sont placés sur une table de translation dans le faisceau mis en forme. Ils sont positionnés de façon à ce que leur diaphragme d'entrée soit perpendiculaire au faisceau.

Pour la mesure de la sensibilité spectrale relative, le détecteur de référence est un détecteur thermique pyroélectrique. En raison de sa forme cavité, il absorbe presque quasi parfaitement le rayonnement, quelle que soit la longueur d'onde. Il est donc non sélectif par construction.

Ce détecteur est positionné sur le montage de manière à ce que sa surface active soit située sur la pupille de sortie du système. La taille de cette pupille est ajustée à la surface du détecteur.

Pour les détecteurs pièges, le positionnement s'effectue de manière à ce que l'espace entre la pupille de sortie et l'image finale de la fente de sortie soit à l'intérieur du détecteur piège. Cette position permet d'éviter le vignettage des faisceaux car, dans cette zone, les faisceaux sont les plus fermés et les mieux définis. Sur la figure 6 est schématisée la position optimale du faisceau dans un détecteur piège : la position « 0 » correspond à la position de la pupille de sortie du montage optique obtenue sur la troisième photodiode, et les diodes « 2' et 1' » sont en fait

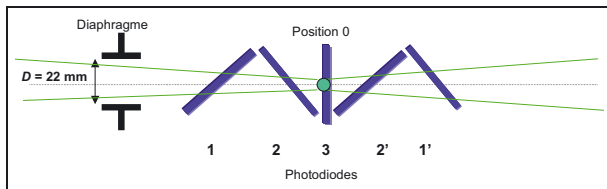


Fig. 6. – Schéma de la position du faisceau dans un détecteur piège.

respectivement les images des surfaces des photodiodes « 1 et 2 ».

### 3.4. Méthode de mesure

La table de translation motorisée permet de positionner dans le faisceau alternativement le détecteur de référence et le détecteur à étalonner. Le détecteur piège et le détecteur thermique sont reliés respectivement à un convertisseur courant-tension et à une détection synchrone dont les facteurs de conversion sont choisis en fonction de l'amplitude du signal.

Le cycle élémentaire de mesure utilisé pour la comparaison du détecteur piège au détecteur non sélectif est : pour une longueur d'onde donnée, une mesure sur le piège à étalonner encadrée par deux mesures sur le détecteur de référence. Ce cycle symétrique permet de s'affranchir de la partie linéaire de la dérive de l'installation.

Chaque mesure sur un détecteur comprend la mesure du courant photoélectrique aux bornes du détecteur, obtenue lorsque le détecteur est dans le faisceau, et par la mesure du signal d'obscurité, lorsque le détecteur est en dehors du faisceau.

Ce cycle élémentaire est répété pour toutes les longueurs d'onde à étudier.

À partir de ces mesures, on calcule pour chaque cycle élémentaire le rapport des réponses du détecteur piège et du détecteur cavité :

$$R(\lambda) = V_d(\lambda)/V_{\text{réf}}(\lambda), \quad (1)$$

$V_d(\lambda)$  et  $V_{\text{réf}}(\lambda)$  étant les signaux mesurés aux bornes respectivement du détecteur à étalonner et du détecteur de référence. Les valeurs sont corrigées du courant d'obscurité, du facteur de conversion du convertisseur courant-tension utilisé avec le détecteur piège, de l'échelle et du recouvrement des calibres de la détection synchrone utilisée avec le détecteur cavité.

Les mesures de la sensibilité spectrale relative d'un détecteur piège sont effectuées systématiquement en utilisant le détecteur pyroélectrique dans deux positions, à  $90^\circ$  l'une de l'autre, dans le but d'intégrer les variations de la sensibilité locale de ce détecteur dans l'incertitude déterminée par une méthode de type A. En fonction de l'incertitude finale recherchée, plusieurs séries de mesures sont effectuées.

Les mesures sont effectuées généralement avec un diamètre du faisceau incident, au niveau de la pupille de sortie du système optique, d'environ 3 mm. Les bandes passantes à mi-hauteur du monochromateur sont de l'ordre de :

- 2,5 nm pour  $\lambda \leq 280$  nm ;
- 3,3 nm pour  $287 \text{ nm} \leq \lambda \leq 380$  nm ;
- 5 nm pour  $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 644$  nm ;
- 6,25 nm pour  $\lambda > 644$  nm.

Ces conditions ont été utilisées pour les mesures dont les résultats sont présentés ci-après.

### 3.5. Traitement des résultats de mesure

#### 3.5.1. Méthode de normalisation des données

La mesure d'une sensibilité spectrale relative nécessite par définition de choisir une « longueur d'onde » de référence pour présenter les résultats. Compte tenu de la méthode de mesure utilisée, qui est la même quelle que soit la longueur d'onde, si l'on choisit arbitrairement une longueur d'onde particulière pour normaliser les résultats, cette longueur d'onde de normalisation prend un poids plus important que les autres dans le calcul des incertitudes, ce qui n'est pas souhaitable. Pour éviter cet inconvénient, il a été décidé d'utiliser une longueur d'onde de normalisation basée sur la moyenne de toutes les mesures effectuées dans une série de mesures. Ainsi on calcule la moyenne de tous les rapports des réponses et on divise chaque mesure individuelle par cette moyenne.

Pour regrouper et comparer plusieurs séries de mesures faites sur le même détecteur, mais dans des conditions différentes, la méthode de traitement des données qui vient d'être décrite peut être appliquée, à condition de n'utiliser que les longueurs d'onde communes à toutes les séries à comparer.

#### 3.5.2. Exemple de normalisation de deux séries de mesures

À titre d'exemple, les tableaux 2 et 3 présentent un extrait du traitement des données issues de deux séries de mesures. Il présente le passage des rapports des réponses des détecteurs aux rapports normalisés des réponses, pour chaque série de mesures. Il s'agit de l'étalonnage d'un détecteur piège, repéré P-05-A, construit à partir des photodiodes de type S6337.

Dans le tableau 3, la seconde et la troisième colonnes donnent les rapports des réponses normalisés par rapport à une longueur d'onde « non précisément connue » qui se situe entre 543 nm et 612 nm qui correspondent donc aux sensibilités spectrales relatives.

Cette méthode, appliquée ici sur deux séries de mesures, peut naturellement être étendue à un nombre plus important de séries. Ces séries de mesures de la sensibilité spectrale relative sont ensuite combinées entre elles en faisant la moyenne des courbes normalisées pour donner le résultat final de la mesure.

Tableau 2

Rapport des réponses du détecteur à étalonner et du détecteur non sélectif.

$\lambda$ (nm)	Rapport des réponses Série1	Rapport des réponses Série2
300,00	64,917	64,434
320,00	67,086	66,710
340,00	70,653	69,954
360,00	74,066	73,246
380,00	78,104	77,515
400,00	83,161	82,681
450,00	94,193	93,549
454,51	95,275	94,896
473,69	99,256	98,887
487,99	102,619	101,988
514,53	108,237	107,579
543,36	114,183	113,818
611,80	128,792	128,213
632,80	133,047	132,612
650,00	137,132	135,365
700,00	147,596	146,196
800,00	169,005	166,957
900,00	189,828	188,031
950,00	197,772	195,972
960,00	197,601	196,129
970,00	195,852	193,786
980,00	191,981	190,469
990,00	184,431	182,942
1 000,00	176,015	175,149
1 050,00	79,319	78,576
1 075,00	41,228	40,829
1 100,00	22,126	22,008
<b>Moyenne série</b>	<b>120,129</b>	<b>119,203</b>

### 3.6. Résultats de mesure de la sensibilité spectrale relative

Les courbes présentées sur la figure 7 donnent les résultats globaux des mesures de la sensibilité spectrale relative obtenus par comparaison au détecteur thermique, pour chaque détecteur de transfert étudié jusqu'à présent par le laboratoire.

### 3.7. Bilan d'incertitude d'étalonnage en sensibilité spectrale relative

Les composantes d'incertitude à prendre en compte, dans le cas de la comparaison d'un détecteur piège au détecteur thermique, sont présentées dans le tableau 4.

Les incertitudes  $u_1(\lambda)$ ,  $u_2(\lambda)$  et  $u_3(\lambda)$  sont des incertitudes calculées en fonction de la longueur d'onde. La composante d'incertitude  $u_1(\lambda)$  qui caractérise la reproductibilité des mesures est déterminée à partir du calcul de l'écart type sur la moyenne des différentes séries de mesures. La composante d'incertitude  $u_2(\lambda)$  prend en compte l'effet de l'incertitude sur l'ajustage en longueur d'onde du monochromateur sur la détermination de la sensibilité spectrale relative du détecteur. La valeur de cette composante d'incertitude dépend donc de la pente de la variation de la sensibilité spectrale du détecteur en

Tableau 3

Sensibilité spectrale relative du détecteur piège P-05-A.

$\lambda$ (nm)	Rapport des réponses normalisées Série1	Rapport des réponses normalisées Série2
300,00	0,540 4	0,540 5
320,00	0,558 5	0,559 6
340,00	0,588 1	0,586 8
360,00	0,616 6	0,614 5
380,00	0,650 2	0,650 3
400,00	0,692 3	0,693 6
450,00	0,784 1	0,784 8
454,51	0,793 1	0,796 1
473,69	0,826 2	0,829 6
487,99	0,854 2	0,855 6
514,53	0,901 0	0,902 5
<b>543,36</b>	<b>0,950 5</b>	<b>0,954 8</b>
<b>611,80</b>	<b>1,072 1</b>	<b>1,075 6</b>
632,80	1,107 5	1,112 5
650,00	1,141 5	1,135 6
700,00	1,228 7	1,226 4
800,00	1,406 9	1,400 6
900,00	1,580 2	1,577 4
950,00	1,646 3	1,644 0
960,00	1,644 9	1,645 3
970,00	1,630 4	1,625 7
980,00	1,598 1	1,597 8
990,00	1,535 3	1,534 7
1 000,00	1,465 2	1,469 3
1 050,00	0,660 3	0,659 2
1 075,00	0,343 2	0,342 5
1 100,00	0,184 2	0,184 6

Tableau 4

Budget d'incertitude pour la mesure de la sensibilité spectrale relative d'un détecteur piège de type S6337.

Source d'incertitude	Incertitude type relative ( $k = 1$ )
<b>Incertitude « type A »</b>	
Répétabilité / reproductibilité des mesures	$u_1(\lambda)$
<b>Incertitude « type B »</b>	
Uniformité spatiale du détecteur	$5 \times 10^{-4}$
Effet de la polarisation du faisceau	$5 \times 10^{-4}$
Effet de l'angle d'incidence	$1 \times 10^{-5}$
Linéarité du détecteur	$2 \times 10^{-4}$
Vignettage	$1 \times 10^{-5}$
Température	$3 \times 10^{-4}$ et $1 \times 10^{-3}$
Calage en longueur d'onde	$u_2(\lambda)$
Effet de bande passante	$1 \times 10^{-4}$
Lumière parasite	$1 \times 10^{-4}$
Mesures électriques :	
– convertisseur courant tension	$3,4 \times 10^{-4}$
– détection synchrone	$2 \times 10^{-4}$
Sélectivité du détecteur cavité	$u_3(\lambda)$
<b>Incertitude globale sur les mesures spectrales relatives</b>	$U_{rel}$

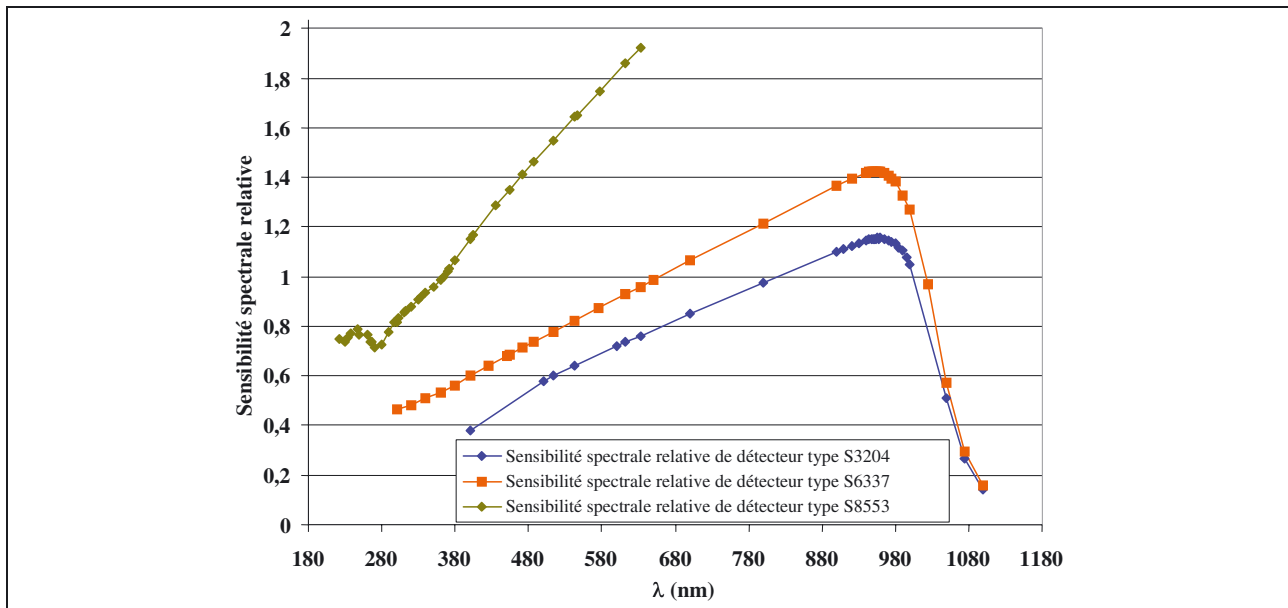


Fig. 7. – Résultats de mesure de la sensibilité spectrale relative, par rapport au détecteur thermique, pour trois détecteurs pièges de grande surface.

fonction de la longueur d'onde. La composante d'incertitude  $u_3(\lambda)$  prend en compte les légères variations du facteur d'absorption du détecteur cavité en fonction de la longueur d'onde. Elle est de l'ordre de :

- $4 \times 10^{-3}$  à  $5 \times 10^{-3}$  pour  $230 \text{ nm} \leq \lambda \leq 248 \text{ nm}$  ;
- $2 \times 10^{-3}$  pour  $250 \text{ nm} \leq \lambda \leq 297 \text{ nm}$  ;
- $10^{-3}$  pour  $300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 334 \text{ nm}$  ;
- $4 \times 10^{-4}$  à  $9 \times 10^{-4}$  pour  $340 \text{ nm} \leq \lambda \leq 380 \text{ nm}$  ;
- $2 \times 10^{-4}$  pour  $\lambda \geq 400 \text{ nm}$ .

L'incertitude globale sur la sensibilité spectrale relative  $U_{rel}$  est obtenue à partir de la somme quadratique des incertitudes de type A et des incertitudes de type B.

Pour un détecteur piège construit avec les photodiodes de type S6337, les incertitudes types relatives sur les valeurs de la sensibilité spectrale relative sont comprises entre  $1 \times 10^{-3}$  et  $6 \times 10^{-3}$  pour les mesures dans les domaines visible et infrarouge. Pour les mesures dans le domaine ultraviolet, entre 230 nm–290 nm, on utilise un détecteur piège constitué avec des photodiodes de type S 8553, qui sont optimisées pour l'ultraviolet. Les incertitudes relatives sont alors comprises entre  $5 \times 10^{-3}$  et  $5 \times 10^{-2}$ . La dégradation des incertitudes dans ce domaine spectral est due à la dispersion du prisme du monochromateur, à la faible sensibilité du détecteur pyroélectrique et également au manque de flux disponible à la sortie du monochromateur en dessous de 300 nm. Ces différentes conditions limites entraînent une mauvaise répétabilité des mesures.

#### 4. Mesure de la sensibilité spectrale absolue

La détermination de la sensibilité spectrale absolue des détecteurs pièges, sur tout leur domaine spectral

d'utilisation, s'effectue en recalant la courbe de la sensibilité spectrale relative à l'aide de plusieurs valeurs de la sensibilité spectrale absolue [11]. Ces valeurs absolues sont traçables au radiomètre cryogénique, référence primaire pour les mesures de flux des rayonnements optiques. Cette méthode de raccordement est présentée schématiquement sur la figure 8. Les longueurs d'onde utilisées pour ce raccordement sont celles émises par les lasers actuellement disponibles au laboratoire : 454,51 nm, 472,69 nm, 487,99 nm, 514,53 nm, 543,36 nm, 611,80 nm et 632,80 nm (longueurs d'onde dans l'air). Les mesures sont faites par rapport à des détecteurs étalons secondaires, raccordés eux-mêmes au radiomètre cryogénique à ces longueurs d'onde lasers. La méthode d'ajustage de la courbe relative par rapport aux valeurs absolues (Fig. 8), consiste à multiplier les valeurs de la courbe relative par un coefficient dit « coefficient de passage ». Ce coefficient de passage est obtenu en calculant la moyenne des rapports « absolu/relatif » pour les sept longueurs d'onde lasers.

L'écart type relatif calculé sur les « coefficients de passage » est de l'ordre de  $2 \times 10^{-4}$  ; ce qui met en évidence le bon accord entre les deux méthodes de mesure utilisées respectivement pour mesurer les sensibilités spectrales relatives et absolues.

L'incertitude type relative finale sur la mesure de la sensibilité spectrale absolue est la combinaison, sous forme quadratique, de l'incertitude  $U_{rel}$ , de l'incertitude type relative sur les mesures faites par rapport aux détecteurs étalons secondaires et de l'incertitude type relative calculée sur les « coefficients de passage ».

Les tableaux de la figure 9 présentent le passage de la sensibilité spectrale relative à la sensibilité spectrale absolue d'un des détecteurs pièges étudiés.

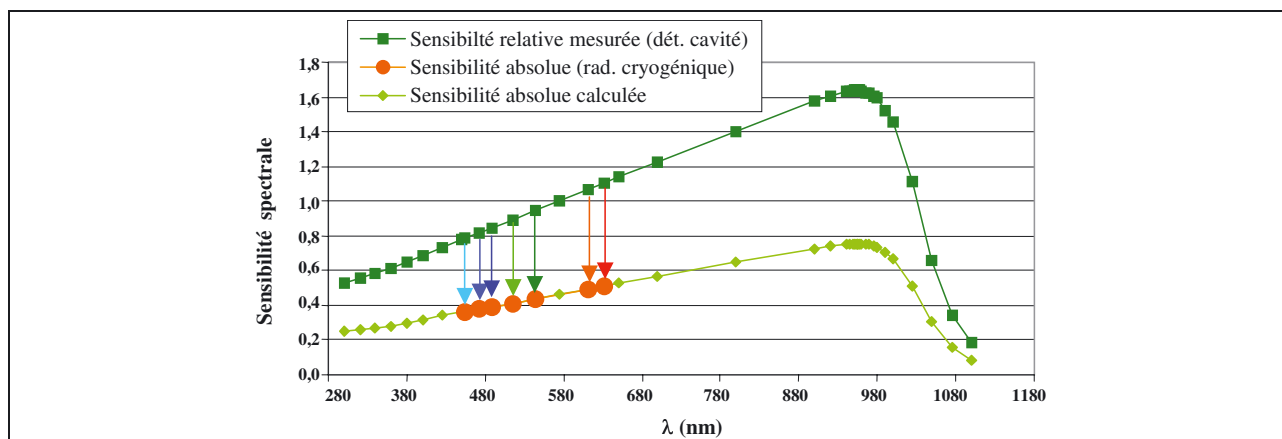
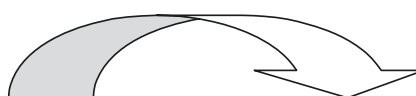


Fig. 8. – Principe d’ajustage des valeurs relatives en valeurs absolues.

$\lambda$ (nm)	Sensibilité relative	Incertitude relative $k = 1$
300,00	0,467 7	$3,6 \times 10^{-3}$
320,00	0,484 4	$1,4 \times 10^{-3}$
340,00	0,508 6	$1,2 \times 10^{-3}$
360,00	0,531 5	$1,4 \times 10^{-3}$
380,00	0,562 2	$1,1 \times 10^{-3}$
400,00	0,598 9	$1,1 \times 10^{-3}$
425,00	0,639 7	$1,5 \times 10^{-3}$
450,00	0,678 8	$1,0 \times 10^{-3}$
<b>454,51</b>	<b>0,686 1</b>	<b><math>1,2 \times 10^{-3}</math></b>
<b>472,69</b>	<b>0,714 2</b>	<b><math>1,3 \times 10^{-3}</math></b>
<b>487,99</b>	<b>0,738 2</b>	<b><math>1,4 \times 10^{-3}</math></b>
<b>514,53</b>	<b>0,779 1</b>	<b><math>1,1 \times 10^{-3}</math></b>
<b>543,36</b>	<b>0,823 8</b>	<b><math>1,4 \times 10^{-3}</math></b>
575,00	0,871 4	$1,0 \times 10^{-3}$
<b>611,80</b>	<b>0,928 2</b>	<b><math>1,1 \times 10^{-3}</math></b>
<b>632,80</b>	<b>0,960 1</b>	<b><math>1,3 \times 10^{-3}</math></b>
650,00	0,987 5	$1,7 \times 10^{-3}$
700,00	1,064 4	$1,4 \times 10^{-3}$
800,00	1,215 7	$1,8 \times 10^{-3}$
900,00	1,366 5	$9,8 \times 10^{-3}$
920,00	1,394 4	$1,4 \times 10^{-3}$
940,00	1,417 7	$1,4 \times 10^{-3}$
950,00	1,423 7	$1,4 \times 10^{-3}$
960,00	1,421 0	$1,4 \times 10^{-3}$
970,00	1,407 6	$1,5 \times 10^{-3}$
980,00	1,381 1	$1,5 \times 10^{-3}$
990,00	1,326 0	$1,7 \times 10^{-3}$
1 000,00	1,268 7	$2,4 \times 10^{-3}$
1 025,00	0,972 3	$3,6 \times 10^{-3}$
1 050,00	0,570 5	$5,6 \times 10^{-3}$
1 075,00	0,296 2	$6,5 \times 10^{-3}$
1 100,00	0,159 3	$8,7 \times 10^{-3}$



$\lambda$ (nm)	Sens. Rel.	Sens. abs. (A/W)	$U (\times 10^{-4})$ $k = 1$	Rapport abs/rel
<b>454,51</b>	<b>0,686</b>	<b>0,363 3</b>	<b>2,8</b>	<b>0,529 5</b>
<b>472,69</b>	<b>0,714</b>	<b>0,378 2</b>	<b>3,0</b>	<b>0,529 6</b>
<b>487,99</b>	<b>0,738</b>	<b>0,390 8</b>	<b>3,1</b>	<b>0,529 5</b>
<b>514,53</b>	<b>0,779</b>	<b>0,412 6</b>	<b>2,5</b>	<b>0,529 7</b>
<b>543,36</b>	<b>0,824</b>	<b>0,436 2</b>	<b>2,6</b>	<b>0,529 5</b>
<b>611,80</b>	<b>0,928</b>	<b>0,491 6</b>	<b>2,5</b>	<b>0,529 7</b>
<b>632,80</b>	<b>0,960</b>	<b>0,508 6</b>	<b>2,8</b>	<b>0,529 7</b>

Moyenne des rapports : **0,529 6**  
(coefficient de passage)

Écart type relatif :  **$1,6 \times 10^{-4}$**

$\lambda$ (nm)	Sensibilité absolue (A/W)	Incertitude Relative $k = 1$
300,00	0,247 7	$3,6 \times 10^{-3}$
320,00	0,256 6	$1,5 \times 10^{-3}$
340,00	0,269 4	$1,3 \times 10^{-3}$
360,00	0,281 6	$1,4 \times 10^{-3}$
380,00	0,297 8	$1,2 \times 10^{-3}$
400,00	0,317 2	$1,2 \times 10^{-3}$
425,00	0,338 9	$1,6 \times 10^{-3}$
450,00	0,359 6	$1,1 \times 10^{-3}$
<b>454,51</b>	<b>0,363 5</b>	<b><math>1,2 \times 10^{-3}</math></b>
<b>472,69</b>	<b>0,378 3</b>	<b><math>1,3 \times 10^{-3}</math></b>
<b>487,99</b>	<b>0,391 0</b>	<b><math>1,4 \times 10^{-3}</math></b>
<b>514,53</b>	<b>0,412 7</b>	<b><math>1,1 \times 10^{-3}</math></b>
<b>543,36</b>	<b>0,436 4</b>	<b><math>1,4 \times 10^{-3}</math></b>
575,00	0,461 6	$1,1 \times 10^{-3}$
<b>611,80</b>	<b>0,491 7</b>	<b><math>1,1 \times 10^{-3}</math></b>
<b>632,80</b>	<b>0,508 6</b>	<b><math>1,3 \times 10^{-3}</math></b>
650,00	0,523 1	$1,8 \times 10^{-3}$
700,00	0,563 8	$1,4 \times 10^{-3}$
800,00	0,644 0	$1,8 \times 10^{-3}$
900,00	0,723 9	$1,0 \times 10^{-3}$
920,00	0,738 6	$1,4 \times 10^{-3}$
940,00	0,751 0	$1,5 \times 10^{-3}$
950,00	0,754 2	$1,4 \times 10^{-3}$
960,00	0,752 7	$1,4 \times 10^{-3}$
970,00	0,745 7	$1,5 \times 10^{-3}$
980,00	0,731 6	$1,6 \times 10^{-3}$
990,00	0,702 4	$1,7 \times 10^{-3}$
1 000,00	0,672 1	$2,4 \times 10^{-3}$
1 025,00	0,515 0	$3,6 \times 10^{-3}$
1 050,00	0,302 2	$5,6 \times 10^{-3}$
1 075,00	0,156 9	$6,5 \times 10^{-3}$
1 100,00	0,084 4	$8,7 \times 10^{-3}$

Fig. 9. – Méthode de passage de la sensibilité spectrale relative à la sensibilité spectrale absolue : exemple pour un détecteur piège de type S6337.

Dans le premier tableau sont indiqués les résultats de mesure de la sensibilité spectrale relative. La première colonne de ce tableau contient les longueurs d’onde exprimées dans l’air en nanomètres, la seconde, les sensibilités spectrales relatives mesurées et la troisième, l’incertitude relative  $U_{rel}$  sur la sensibilité spectrale relative.

Le deuxième tableau présente la détermination du coefficient de passage des mesures relatives aux mesures absolues. La première colonne donne la longueur d’onde,

la deuxième et la troisième présentent respectivement les sensibilités spectrales relatives et absolues mesurées, la quatrième donne les incertitudes sur les mesures des sensibilités spectrales absolues et la cinquième le « coefficient de passage » calculé par le rapport de la sensibilité spectrale absolue à la sensibilité spectrale relative pour chaque longueur d’onde. Sous ce tableau sont présentés le coefficient de passage utilisé (moyenne de tous les coefficients de passage) ainsi que l’écart type relatif sur ce coefficient de passage.



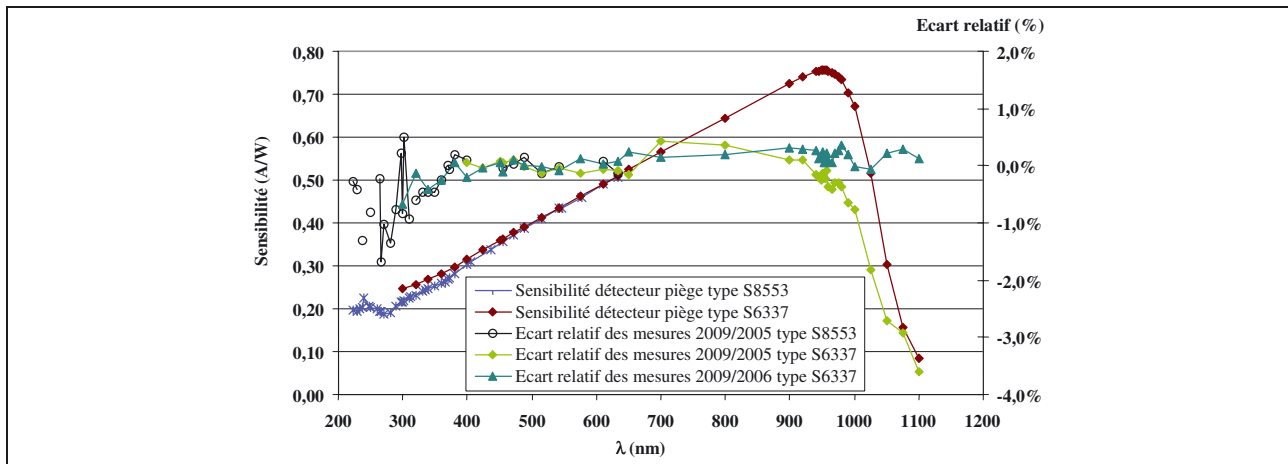


Fig. 10. – Évolution temporelle de la sensibilité spectrale des détecteurs pièges.

Le troisième tableau présente la sensibilité spectrale absolue du détecteur étudié. Dans la première colonne est indiquée la longueur d'onde, dans la seconde, la sensibilité spectrale absolue exprimée en ampère par watt et dans la troisième, l'incertitude type relative ( $k = 1$ ) sur cette sensibilité spectrale absolue.

## 5. Stabilité des détecteurs étudiés

La figure 10 présente le suivi des résultats d'étalonnage en sensibilité spectrale de détecteurs pièges utilisés comme détecteurs de transfert depuis 2005. Sur le graphique, sont superposées les courbes de la sensibilité spectrale des détecteurs pièges (échelle de gauche) ainsi que leur évolution dans le temps (échelle de droite).

La courbe des écarts montre la stabilité de deux détecteurs qui est très bonne sauf pour quelques longueurs d'onde dans le spectre ultraviolet pour le détecteur de type S8553, en raison du manque de flux disponible à la sortie du monochromateur en dessous de 300 nm.

Au-delà de 950 nm, pour le détecteur de type S6337, l'écart croît très rapidement avec la longueur d'onde et atteint près de 3 % au voisinage de 1 075 nm ; il devient nettement plus important que les incertitudes des mesures. Ce comportement peut s'expliquer par l'influence de la température sur les mesures.

## 6. Conclusion

Ces détecteurs pièges de « grande surface », caractérisés métrologiquement au sein du laboratoire, sont actuellement utilisés comme détecteurs de référence sur le banc de mesure de la sensibilité spectrale utilisant un monochromateur.

Du fait de leur excellente stabilité à long terme, de la bonne reproductibilité à court terme, de leur facilité d'utilisation et de leur sensibilité qui est du même ordre de grandeur que celle des détecteurs à étalonner, les détecteurs pièges ont permis d'améliorer la qualité des mesures

et d'obtenir un gain de temps considérable pour effectuer les étalonnages usuels, tout en conservant une incertitude extrêmement peu dégradée. Cependant, comme la caractérisation de ces détecteurs repose sur l'utilisation du détecteur pyroélectrique, détecteur limitant les incertitudes de type A à quelques  $10^{-3}$ , leur mise en œuvre ne permet pas pour l'instant d'améliorer l'étalonnage en sensibilité spectrale des détecteurs destinés aux utilisateurs demandant des incertitudes types relatives de l'ordre de  $10^{-4}$ .

Pour améliorer l'étalonnage des détecteurs pièges sur tout leur domaine spectral d'utilisation, plusieurs études sont actuellement en cours. Pour réduire largement les incertitudes dans le domaine ultraviolet, entre 200 nm et 300 nm, un nouveau banc de mesure de la sensibilité spectrale a été réalisé spécialement pour ce domaine spectral et est en cours de caractérisation. D'autre part, un nouveau détecteur thermique, de type bolomètre, plus performant que celui utilisé actuellement est en cours d'étude [12].

De plus, dans le laboratoire, une source laser accordable sur un domaine spectral allant de 200 nm à 4 000 nm est en cours de construction. L'utilisation de cette source avec le radiomètre cryogénique va permettre d'augmenter le nombre de points de raccordement de la sensibilité spectrale absolue des détecteurs pièges. En conséquence, l'interpolation et l'extrapolation des points absolus des détecteurs pièges de grande surface pourront être optimisées pour améliorer les incertitudes sur l'ensemble de leur domaine spectral d'utilisation.

## Références

- [1] 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* n° 117, 1999, 35-44.
- [2] 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", *24<sup>e</sup> Session de la CIE*, Varsovie, Pologne, 1999, Proc. 222-224.

- [3] KÖHLER R., GOEBEL R., STOCK M. et PELLO R., “An international comparison of cryogenic radiometers”, *SPIE Conference*, 1996, Proc. 2815, 22-30.
- [4] GOEBEL R., KÖHLER R. et STOCK M., Rapport BIPM-2000/9, BIPM Publications, 2000, <http://kcdb.bipm.fr/BIPM-KCDB/AppendixB/>.
- [5] FOX N., “Trap detectors and their properties”, *Metrologia*, **28**, 1991, 197-201.
- [6] BRIAUDEAU S., TAYEB-CHANDOUL F. et BASTIE J., « Interpolation de la sensibilité spectrale absolue de détecteurs pièges de 350 nm à 900 nm », *Colloque interdisciplinaire en instrumentation (C2I)*, 31 jan.–1<sup>er</sup> fév. 2001, CNAM, Paris, France.
- [7] COUTIN J.-M., TAYEB-CHANDOUL F. et BASTIE J., “Development of large area trap detectors for improving spectral responsivity measurement of detectors at BNM-INM”, *25<sup>e</sup> Session de la CIE*, San Diego, États-Unis d’Amérique, 2003, Proc., **1**, D2, 50-53.
- [8] COUTIN J.-M., BRIAUDEAU S., TAYEB-CHANDOUL F. et BASTIE J., « Caractérisation des détecteurs pièges pour les mesures radiométriques au BNM-INM », *10<sup>e</sup> Congrès international de métrologie*, 22–25 oct. 2001, Saint-Louis, France.
- [9] L.P. GONZALEZ GALVAN, « 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 CNAM*, spécialité Systèmes physiques, lasers et métrologie, Paris, 22 décembre 2005.
- [10] LECOLLINET P. et BASTIE J., « Mesure de la linéarité des détecteurs utilisés en radiométrie », *Bulletin du BNM*, n° 106, 1996, 37-45.
- [11] COUTIN J.-M. et TAYEB-CHANDOUL F., “Method of calibration of working standard detectors at the LNE-INM”, *10th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (Newrad 2008)*, Daejeon, Corée, 13–16 October 2008, Proc., 315-316.
- [12] DURANTE F., ROBBES D., GUILLET B. et BASTIE J., “Non selective thermal detector for low power measurements”, *9th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry, (Newrad 2005)*, Davos, Suisse, 17–19 octobre 2005, Proc., 221-222.

---

Article reçu le 10 juin 2010, version révisée reçue le 18 janvier 2011.