

STÉPHANE SOLVE  
DEA LASERS - MÉTROLOGIE - COMMUNICATIONS  
CNAM - UNIVERSITÉ PARIS XIII

---

RÉALISATION DE L'UNITÉ  
DE FLUX LUMINEUX PAR  
LA MÉTHODE ABSOLUE DE  
LA SPHERE INTÉGRANTE

---



STAGE DE DEA - MAI-SEPTEMBRE 2002



## Remerciements

J'ai eu la très grande chance d'effectuer cette étude dans un laboratoire de photométrie que je connais bien, au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres. Je remercie Monsieur **T. J. Quinn**, directeur du BIPM de m'avoir permis de réaliser ce stage dans le cadre de mes attributions professionnelles.

Mes remerciements vont également à Monsieur **M. Stock**, responsable de la section radiométrie-photométrie-thermométrie du BIPM, pour la confiance et le soutien qu'il m'a témoignés.

Je tiens tout particulièrement à exprimer ma gratitude à Monsieur **R. Goebel**, physicien à la section radiométrie-photométrie-thermométrie pour sa disponibilité, sa patience, et ses précieux conseils et remarques qui m'ont permis d'enrichir considérablement mes connaissances en optique à travers la découverte de la métrologie du flux lumineux.

Enfin je voudrais adresser mes remerciements à tous mes collègues du BIPM qui m'ont toujours témoigné une attention constructive, et apporté, en toute circonstance, leur assistance.

« Je vis que la Terre ayant besoin de la lumière, de la chaleur, et de l'influence de ce grand feu, elle se tourne autour de lui pour recevoir également en toutes ses parties cette vertu qui la conserve. »

**Cyrano de Bergerac**, in «Les Etats et Empires de la Lune»

## Résumé

La mesure du flux lumineux par la méthode absolue de la sphère intégrante est basée sur le principe suivant:

Une partie du flux lumineux produit par une source externe est introduit dans une sphère intégrante à travers un diaphragme circulaire de dimensions connues. Le flux lumineux ainsi généré est métrologiquement parfaitement défini. Il peut alors être comparé au flux lumineux issu d'une lampe à étalonner, fixée au centre de la sphère, émettant dans l'angle solide  $4\pi$  stéradian. Dans cette méthode, la sphère et le photomètre qui lui est associé sont donc des instruments de transfert.

En effet, la relation entre le "flux étalon"  $\phi_e$  (lampe externe et diaphragme) et le flux à déterminer  $\phi_i$  (lampe à l'intérieur de la sphère) est donné par la relation:  $\phi_i = C_f \times \phi_e \times (s_i / s_e)$ , où

- $s_i$  et  $s_e$  sont les signaux de réponse du photomètre associé à la sphère au flux de la source interne et au flux de la source externe respectivement;
- $C_f$  est un coefficient de correction qui prend en compte les comportements spatiaux et spectraux non idéaux de la sphère, relativement aux sources lumineuses choisies.

Ce document décrit en détail, avant de les quantifier, les différentes composantes dont est constitué le coefficient de correction  $C_f$ . Dans une seconde partie, une comparaison des résultats de la méthode est faite avec le lot de lampes constituant la référence internationale de flux lumineux de 1985.

Cette comparaison nous conduit à constater un écart relatif de 0,55 % entre les deux méthodes et laisse envisager que le lot de lampes de référence puisse être remplacé par un lot de photomètres étalons pour réaliser l'unité de flux lumineux [lumen]. En effet, les photomètres sont aujourd'hui des instruments de mesure qui peuvent être étalonnés périodiquement au moyen de références traçables au radiomètre cryogénique ; il est alors possible de suivre avec une grande exactitude la stabilité de ces instruments. Toutefois, une telle décision nécessiterait quelques développements techniques et informatiques en vue d'automatiser certaines opérations répétées au cours de la détermination du flux lumineux par la méthode absolue de la sphère intégrante.

## Abstract

Measurement of luminous flux by the absolute integrating sphere method progresses as following:

The intensity of a luminous source is introduced into an integrating sphere through a circular diaphragm of well-known dimensions. The luminous flux so produced is perfectly defined. It should be then compared to the luminous flux created by a lamp to be calibrated placed at the centre of the sphere. (integration of the luminous intensity in a  $4\pi$  steradian solid angle).

In this method, the integrating sphere and its associated photometer are then used as transfer instruments. It is nevertheless necessary to describe their relative spectral responsivity, if the colour temperatures of the two sources are different. Indeed, the relation between the known amount of flux  $\phi_e$  (external lamp and diaphragm) and the luminous flux  $\phi_i$  to be determined (internal source in the sphere) is given by:

$$\phi_i = C_f \times \phi_e \times (s_i / s_e), \text{ where}$$

- $s_i$  and  $s_e$  are the photometer response (associated with the sphere) to the luminous flux from the internal source and the source from the external source, respectively;
- $C_f$  is a correction coefficient which takes into account the non-ideal spatial and spectral behaviour of the sphere relative to the chosen sources.

This document describes and quantifies in details, each component of the correction factor  $C_f$ .

In a second part, same lamps were calibrated against the world mean luminous flux value of the international group of reference lamps (1985). This comparison reveals a relative difference of just 0,55 % between the two methods. This could allow us to replace the group of reference lamps defining the luminous scale by a group of calibrated photometers, which stability could be known when they are periodically calibrated against a cryogenic radiometer.

If such a decision were accepted, it would be necessary to develop some techniques to simplify (automation) some of the repeated operations needed to determine the luminous flux by the absolute integrating sphere method especially the experimental operations provided to calculate the luminous flux introduced in the sphere.

## TABLE DES MATIERES

### Première partie : Présentation de la méthode

1	Introduction.....	7
2	Métrologie du flux lumineux.....	7
3	Approche théorique de la méthode absolue de la sphère intégrante.....	10

### Seconde partie : Mesures par la Méthode Absolue

4	Caractéristiques de la sphère.....	14
5	Le diaphragme.....	16
6	Facteur de correction de couleur.....	22
7	Paramètres de la source interne.....	29
8	Paramètres de la source externe.....	31
9	Conclusion générale.....	38

### Annexes :

1	Grandeurs Photométriques.....	39
2	Caractéristiques utiles des lampes utilisées.....	45
3	Bibliographie.....	46

## LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX:

- ◆ Figure 1: Variation du facteur de réflexion avec la longueur d'onde pour différents revêtements.
- ◆ Figure 2: Schéma général de la manipulation.
- ◆ Figure 3: Principe de la sphère intégrante.
- ◆ Figure 4: Mesure du gain absolu de l'amplificateur.
- ◆ Figure 5: Pertes par diffraction.
- ◆ Figure 6: "Balayage" de la sphère intégrante.
- ◆ Figure 7: Réponse spatiale de la sphère intégrante du BIPM.
- ◆ Figure 8: Réponse spatiale du "hot spot" de la sphère intégrante du BIPM.
- ◆ Figure 9: Luminance du corps noir et fonction  $V(\lambda)$ .
- ◆ Figure 10: Montage expérimental de mesure du spectre de la lampe interne.
- ◆ Figure 11: Effets des multi-réflexions sur les parois de la sphère.
- ◆ Figure 12: Réponse système interne (source, photomètre, sphère).
- ◆ Figure 13: Variation du  $\alpha_f$  « sphère, photomètre et sources internes » avec la température de couleur de la source.
- ◆ Figure 14: Coefficients de transmission expérimental et théorique.
- ◆ Figure 15: Montage optique de la mesure de l'uniformité de la source externe.
- ◆ Figure 16: Maillage retenu pour la mesure de l'uniformité de la source externe.
- ◆ Figure 17: Mesure de l'uniformité spatiale de la source externe.
- ◆ Figure 18: Sensibilités spectrales relatives de l'œil humain.
- ◆ Figure 19 : Définition de la luminance.
- ◆ Figure 20 : Définition de l'étendue géométrique.
- ◆ Figure 21 : Infrastructure pour une mesure de flux lumineux par méthode goniophotométrique
- ◆ Tableau 1 : Mesure de la sensibilité de la sphère (photomètre interne).
- ◆ Tableau 2 : Tableau résumé des résultats de la mesure de flux par la méthode de la sphère intégrante.
- ◆ Tableau 3 : Budget d'incertitudes.
- ◆ Tableau 4 : Définitions des différents flux.
- ◆ Tableau 5: Unités photométriques du SI.
- ◆ Tableau 6: Caractéristiques utiles des lampes constituant le groupe primaire de flux lumineux.
- ◆ Tableau 7: Caractéristiques utiles des lampes constituant le groupe usuel de flux lumineux du BIPM.

# PREMIERE PARTIE : PRESENTATION DE LA METHODE

---

## 1 INTRODUCTION

---

L'optique est principalement l'ensemble des phénomènes perçus par l'œil. La cause de ces phénomènes, la lumière, a été étudiée très tôt dans l'histoire des sciences, si bien que tous les principes sur lesquels reposent l'optique géométrique et l'optique ondulatoire sont connus depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle.

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, l'introduction du photon (particule de lumière) pour expliquer l'effet photoélectrique apporta une nouvelle approche de la lumière. La lumière présente donc fondamentalement deux aspects : l'un ondulatoire, l'autre corpusculaire.

La photométrie est plus particulièrement la discipline qui concerne la caractérisation théorique et expérimentale des rayonnements optiques perceptibles à l'œil humain. Elle a pour objet les grandeurs qui définissent ces rayonnements, les lois qui en régissent l'émission, la propagation et la détection, de même que les moyens de mesure correspondants.

Le développement des communications via les réseaux optiques, de l'optronique du spatial, du médical, de l'éclairage, et de l'industrie de l'image impliquent le développement de références photométriques définies par des incertitudes de plus en plus fines et maîtrisées.

Ce document présente une méthode de réalisation scientifique de la grandeur photométrique appelée flux lumineux. Lorsqu'on fera référence au flux lumineux d'une source étalon, il s'agira implicitement du flux total émis dans  $4\pi$  sr, tel qu'il peut être mesuré au moyen d'un instrument dont la sensibilité spectrale est celle de l'œil humain moyen [24].

---

## 2 MÉTROLOGIE DU FLUX LUMINEUX

---

### 2.1 LA MÉTHODE GONIOPHOTOMÉTRIQUE

Le flux lumineux total d'une source lumineuse peut être obtenu soit par intégration sur l'angle solide ( $4\pi$  sr) de l'intensité lumineuse de cette source, soit par l'intégration de son éclairement à travers une surface connue [23], [25]. Les goniophotomètres sont traditionnellement utilisés pour établir l'unité de flux lumineux (lumen). Un goniophotomètre est constitué d'un photomètre monté sur un système mécanique capable de mesurer l'intensité lumineuse produite par une source dans toutes les directions, sur  $4\pi$  sr (Cf. Annexes § 2.); celui-ci peut réaliser la mesure du flux lumineux par ces deux méthodes et suivant le cas, le flux lumineux est donné par:

$$\Phi_v = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I_v(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (\text{eq.1}),$$

par rapport à la distribution d'intensité lumineuse ou,

$$\Phi_v = R^2 \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} E_v(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \text{ (eq.2),}$$

par rapport à la distribution d'éclairement, si  $R$  est le rayon de la surface sphérique,  $\theta$  est l'élévation, et  $\varphi$  est l'azimut.

Remarque : l'ensemble des définitions des grandeurs photométriques, ainsi que les relations entre celles-ci, utilisées dans ce document, sont détaillées dans la partie du document intitulée ANNEXES (§1) [7].

Pour une mesure de flux lumineux la plus exacte possible, il est indispensable de conserver fixe la position de la lampe, donc de proscrire toute rotation de la lampe autour d'un photomètre fixe afin d'éviter toute détérioration de la lampe, en particulier, lorsqu'elle est allumée. Il est également souhaitable de réduire au maximum les angles morts entre les instruments.

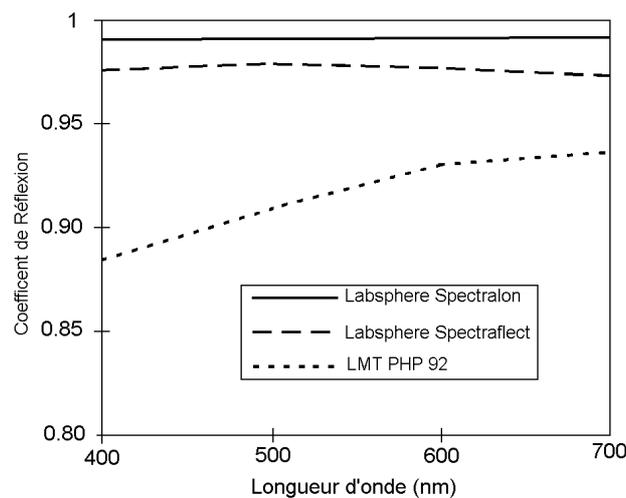
Un mesurage du flux lumineux par cette méthode est long et difficile à mettre en œuvre, en particulier dans le soin à apporter dans l'exactitude du positionnement mécanique du goniophotomètre mais également par l'inévitable dérive de la lampe lorsque la mesure est très longue.

L'évaluation du flux total d'une source à partir de la mesure de son diagramme d'émission dans toutes les directions de l'espace est donc une entreprise difficile à réaliser. Si la connaissance de la loi angulaire d'émission n'est pas exigée, il est plus simple et recommandé d'utiliser une sphère intégrante, qui est une sphère creuse avec une paroi interne recouverte d'un revêtement diffusant à facteur de réflexion élevé; en effet, on montre que, si on place la source à l'intérieur d'une telle sphère, l'éclairement (ou la luminance) de la paroi interne de la sphère est, dans certaines conditions proportionnel au flux global de la source, la constante de proportionnalité ne faisant intervenir que l'albédo et le rayon de la sphère (Cf. §3.2). Il suffit d'une seule mesure, en éclairement, ou en luminance, pour en déduire le flux global de la source.

Remarque : les propriétés angulaires du flux réfléchi ou transmis par une surface diffusante diffèrent complètement de celles qui caractérisent un flux après réflexion ou réfraction sur une surface optique, qui restitue la géométrie du rayonnement incident dans la direction imposée par les lois de l'optique géométrique (lois de Snell-Descartes). En effet, cette répartition angulaire est fonction de la direction du faisceau incident, de la longueur d'onde, et de l'état de la surface, de sa composition chimique. Chacun de ces composants imprime donc son "empreinte spectrale" sur les faisceaux lumineux lors de phénomènes tels que réflexion, transmission, atténuation, absorption, diffusion, turbulence [1], [3].

Remarque: les matériaux les plus couramment utilisés pour la réalisation du revêtement interne de la sphère sont, dans le visible et le très proche infrarouge, la magnésie [MgCO<sub>3</sub>, MgO] ou, préférentiellement, le sulfate de baryum [BaSO<sub>4</sub>] ( $\rho \approx 97\%$ ) associé à un liant chimique, la magnésie présentant l'inconvénient d'être hydrophile et de perdre rapidement son caractère lambertien [6].

La sphère du BIPM est recouverte de Labsphere spectraflect™ (BaSO<sub>4</sub>), dont le facteur de réflexion varie très peu avec la longueur d'onde dans le domaine du visible, (Cf. Figure 1).



◆ Figure 1: Variation du facteur de réflexion avec la longueur d'onde pour différents revêtements.

## 2.2 LA MÉTHODE DE LA SPHÈRE INTÉGRANTE

Cette méthode a été développée et réalisée par le Dr. Y. Ohno au laboratoire de métrologie primaire des Etats-Unis (NIST) en 1995 [13-17]. Elle est basée sur l'utilisation d'une sphère intégrante associée à un photomètre étalonné en éclairage lumineux et se déroule suivant la procédure suivante :

- un flux lumineux connu est introduit par une ouverture dans la sphère, et le signal produit par le photomètre intégré à la sphère est mesuré;
- La source de flux à étalonner est alors placée au centre de la sphère, et le signal mesuré.
- Le résultat d'étalonnage de la lampe de flux est ainsi obtenu par comparaison des deux résultats, aux corrections près.

Celles-ci sont essentiellement dues aux imperfections spectrales de l'instrument de comparaison (photomètre), aux propriétés spatiales et spectrales des sources lumineuses, mais surtout bien sûr au comportement de la sphère intégrante.

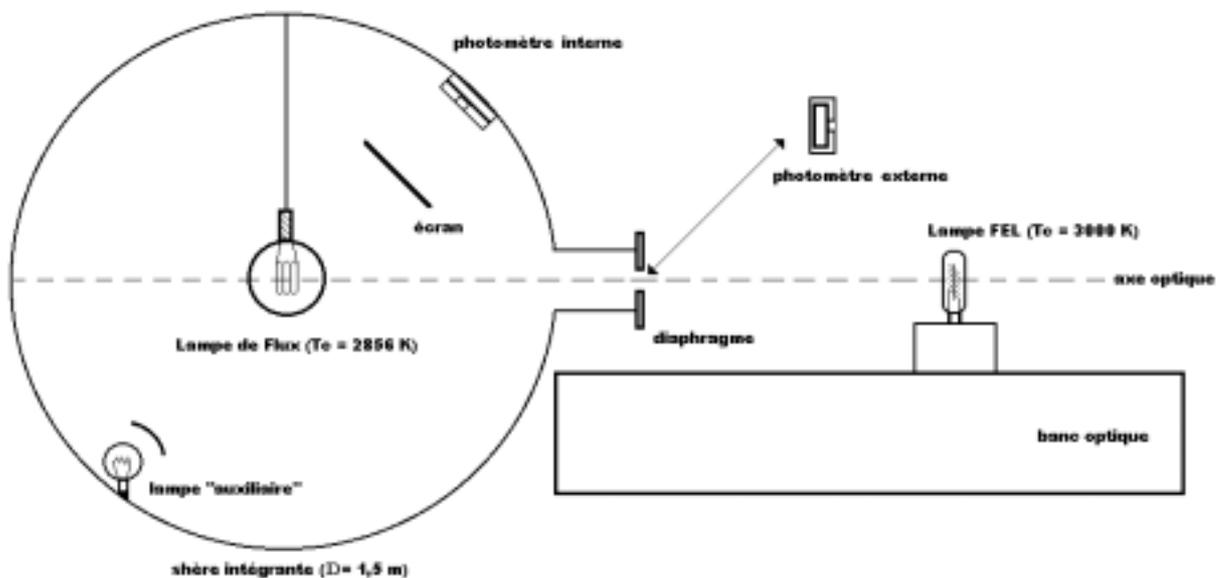
Dans la suite de ce document, nous développerons l'aspect théorique de la méthode ainsi que les expériences que nous avons conduites pour évaluer les corrections qui mèneront au résultat final, à savoir,

la différence relative entre les résultats d'étalonnage de lampes de flux par comparaison à des lampes étalons et les résultats de l'étalonnage de ces mêmes lampes par la méthode absolue.

### 3 APPROCHE THÉORIQUE DE LA MÉTHODE ABSOLUE DE LA SPHERE INTEGRANTE

#### 3.1 INTRODUCTION

La Figure 2 représente l'infrastructure que nous avons utilisée au BIPM, pour la réalisation du lumen par la méthode de la sphère intégrante. Cette sphère a été installée au laboratoire de photométrie en 1941; son diamètre est de 1,5 m. Une ouverture circulaire (d'un diamètre de 90 mm) est accessible depuis un banc optique. Les réglages préliminaires consistent à définir l'axe optique. Celui-ci, matérialisé par un laser, passe par le centre de la source externe (lampe FEL), le centre de l'ouverture circulaire, le centre de la lampe de flux à étalonner (General Electric Company type LV 200 W) confondu avec le centre de la sphère. De plus, le plan de l'ouverture dans la sphère est parallèle au plan d'onde de la source externe.



◆Figure 2: Schéma général de la manipulation.

Un écran « protège » le photomètre interne de l'éclairement direct de la source interne. En effet, seul le flux transmis par la surface de la sphère doit être mesuré : c'est le principe même de la méthode (Cf. §3.2).

Le flux issu de la source externe  $\phi_e$  [lm] est donné par la relation  $\phi_e = E \times A$  où  $E$  [lux] est l'éclairement moyen de la source externe mesuré par le photomètre externe (instrument étalon en éclairement) placé devant l'ouverture dans la sphère, dans le plan du diaphragme et  $A$  est la surface du diaphragme.

Le flux lumineux de la source interne  $\phi_i$  [lm] est obtenu par comparaison au flux introduit dans la sphère :

$\phi_1 = C_f \times \phi_e \times (i_i / i_e)$  où  $i_i$  et  $i_e$  sont les signaux de réponse du photomètre associé à la sphère au flux de la source interne et au flux de la source externe respectivement;  $C_f$  est un coefficient de correction qui prend en compte les comportements spatiaux et spectraux (par rapport aux sources choisies) non idéaux de la sphère. Ce coefficient est défini comme la combinaison de plusieurs composantes qui seront décrites dans la seconde partie de ce document.

### 3.2 PRINCIPE PHYSIQUE DE LA SPHÈRE INTÉGRANTE

Lorsque la source est à l'intérieur de la sphère, chaque zone de la paroi interne reçoit un éclairage direct en provenance de la source mais aussi un éclairage indirect dû aux diffusions multiples de la lumière sur le reste de la sphère. Pour un flux global donné, l'éclairage direct varie fortement d'une source à une autre en fonction du diagramme de rayonnement de la source.

Pour calculer l'éclairage indirect  $E'_1$  en un point  $A'$  (Cf. Figure 3) de la face interne de la sphère, évaluons la contribution en flux reçue par l'élément d'aire  $dA'$  centré en  $A'$  et provenant d'un élément d'aire  $dA$  centré en un autre point quelconque  $A$  : si cet autre élément reçoit un flux  $d\phi$ , sa luminance est [7]:

$$L_1 = \frac{\Re}{\pi} \frac{d\phi}{dA} \text{ (eq.3), où } \Re \text{ est le facteur de réflexion local;}$$

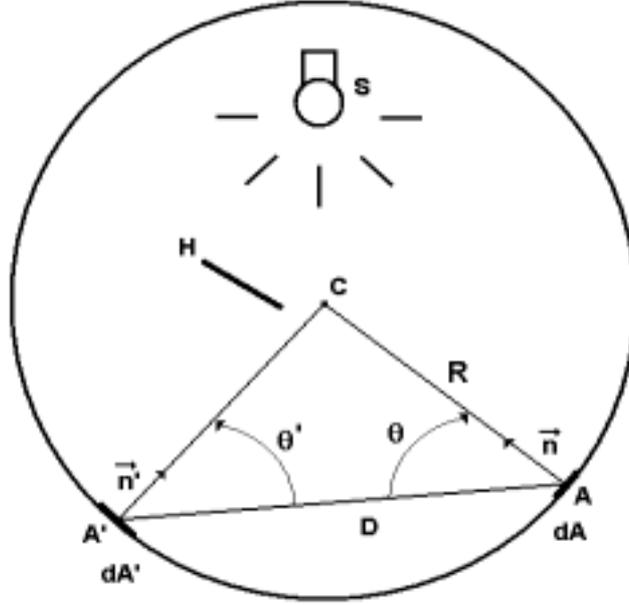
le flux élémentaire  $d^2\phi_1$  reçu par l'aire  $dA'$  en provenance de  $dA$  est alors:

$$d^2\phi_1 = L_1 d^2G = L_1 \frac{dA \cdot \cos\theta \cdot dA' \cdot \cos\theta'}{D^2} \text{ (eq.4);}$$

$d^2G$  est appelé l'étendue géométrique ; Or  $\theta = \theta'$  et  $\frac{D}{2} = R \cdot \cos\theta$ , d'où

$$dE'_1 = \frac{d^2\phi_1}{dA'} = L_1 \frac{dA}{4 \cdot R^2} = \frac{\Re}{4 \cdot \pi \cdot R^2} d\phi \text{ (eq.5)}$$

On voit donc qu'un élément quelconque de la sphère reçoit de tout autre élément une contribution en éclairage qui est indépendante de leur positions relatives.



◆ Figure 3: Principe de la sphère intégrante.

Si l'on néglige les perturbations qui sont apportées par la présence de la source, mais qui demeurent faibles si les dimensions de cette dernière sont petites par rapport au rayon de la sphère, l'éclairement créé en  $A'$  par l'ensemble de la lumière diffusée en provenance de l'intérieur de la sphère est:

$$E'_1 = \iint_{\text{surf. sphère}} dE'_1 = \frac{\Re}{4.\pi.R^2}.\phi \text{ (eq.6)}$$

où  $\phi$  est le flux incident sur toute la surface de la sphère. Pour évaluer correctement ce flux, il faut ajouter au flux initial émis par la source les flux réfléchis successivement après une, deux, trois,... $n$  réflexions successives sur la paroi de la sphère. Ainsi, le flux issu de la surface de la sphère est lié au flux de la source par:

$$\phi = \phi_s(1 + \Re + \Re^2 + \dots + \Re^n + \dots) = \frac{\phi_s}{1 - \Re} \text{ (eq.7)}$$

Si maintenant, on intercale un écran entre la source et le point  $A'$ , l'éclairement en ce point ne provient que de l'éclairage indirect par les autres parties de la sphère, soit:

$$E'_{\text{indirect}} = \sum_{n=1}^{\infty} E'_n = \frac{\Re}{1 - \Re} \times \frac{1}{4.\pi.R^2}.\phi_s \text{ (eq.8)}$$

Cette équation ne fait intervenir que la valeur du flux global de la source (hors albédo et rayon de la sphère, qui sont supposés connus).

Puisque le revêtement interne à la sphère est lambertien, la luminance en  $A'$  de la paroi interne de la sphère est égale à:

$$L' = \frac{\Re \times E'_{\text{indirect}}}{\pi} = \frac{\Re^2}{1 - \Re} \times \frac{1}{4.\pi^2.R^2}.\phi_s \text{ (eq.9)}$$

Par conséquent, une mesure de cette luminance en  $\mathcal{A}'$  conduit elle aussi à une détermination du flux total de la source.

Les formules ci-dessus montrent que le flux qui se propage à l'intérieur de la sphère est le flux de la source multiplié par un terme  $1/(1-R)$ , qui est très supérieur à l'unité si  $R$  est proche de 1. Ce terme multiplicatif peut varier énormément d'une longueur d'onde à l'autre si l'albédo spectral de la peinture n'est pas parfaitement neutre, et provoquer par conséquent, une déformation très importante du spectre du rayonnement qui se propage à l'intérieur de la sphère par rapport à celui de la source.

Une surface orthotrope ou lambertienne réfléchit ou transmet, non plus la totalité, mais une fraction du flux incident, avec une luminance uniforme. Cette fraction est dénommée, suivant les cas, facteur de réflexion (ou albédo) ou encore facteur de transmission de la surface.

Remarque : il arrive souvent que l'on cherche à obtenir des éclairagements uniformes à partir de sources non uniformes, soit parce qu'elles ne sont pas lambertiennes, soit parce qu'elles ne remplissent pas tout le champ. Les sphères intégrantes permettent donc d'obtenir un éclairage et une luminance très uniformes, même lorsqu'elles sont éclairées par une source directive ou non uniforme.

# SECONDE PARTIE : MESURES PAR LA MÉTHODE ABSOLUE

L'ensemble des facteurs de corrections va être décrit de manière plus détaillée, et quantifié dans les paragraphes suivants. Il est à noter qu'il y a autant de sources d'incertitude sur le résultat final de la mesure de flux lumineux par la méthode de la sphère intégrante. Il sera donc possible de dresser un bilan d'incertitude, comportant une composante pour chacun des facteurs de correction. La combinaison de l'ensemble de ces composantes conduira à la détermination de l'incertitude globale sur le mesurande.

---

## 4 CARACTÉRISTIQUES DE LA SPHÈRE

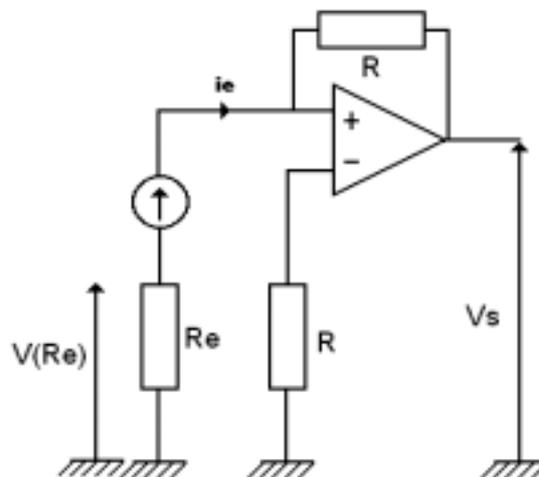
---

### 4.1 COEFFICIENT DE SENSIBILITÉ BRUTE SPHÈRE - PHOTOMÈTRE INTERNE

Il existe un écart considérable entre le flux lumineux provenant de la source externe (1,5 lumens) et le flux lumineux issu de la source interne (2500 lumens). Il est par conséquent indispensable de vérifier que le photomètre interne (associé à la sphère) réagit linéairement dans cet intervalle de mesure.

### 4.2 VÉRIFICATION DE LA VALEUR ABSOLUE DU GAIN ET DE LA LINÉARITÉ DE L'AMPLIFICATEUR

Le signal produit par le photomètre (courant photoélectrique) est converti en tension électrique (signal utile) par l'intermédiaire d'un convertisseur courant-tension associé à un amplificateur de précision. En utilisant des résistances fixes étalons et un voltmètre, nous avons contrôlé la valeur absolue du gain de l'amplificateur ( $G = 10^4$  à  $G = 10^7$ ) (Cf. Figure 4) ; La source de courant du montage est, quant à elle, la même source utilisée pour l'alimentation des lampes.



◆Figure 4: Mesure du gain absolu de l'amplificateur.

Les mesures successives des tensions  $V_{Re}$  et  $V_s$  permet d'obtenir la valeur du gain de l'amplificateur  $G$  à partir de la relation :  $G = V_s / i_c = V_s / (V_{Re}/R_e)$ .  $G$  est appelé gain composite, il est homogène à une résistance:  $G = R_e \times (V_s / V_{Re})$ . La valeur du gain est  $10^7$  pour la mesure du flux externe et  $G=10^5$  pour la mesure du flux interne. Pour ces deux valeurs nous mesurons une différence relative de  $10^{-3}$  entre la valeur théorique et la mesure absolue. D'autre part, la vérification de la linéarité de l'amplificateur entre ces deux valeurs de gain nous donne une différence relative de  $1,5 \cdot 10^{-3}$ . Nous confirmons ainsi l'excellente qualité de l'amplificateur.

#### 4.3 CALCUL DU COEFFICIENT DE SENSIBILITÉ DE LA SPHÈRE

Ce coefficient  $k$  (nA/lm) est obtenu par le rapport du signal du photomètre au flux issu de la source externe. Nous mesurons tout d'abord l'éclairement au niveau du diaphragme d'entrée de la sphère :

$E = i'_c / s$ , où  $i'_c$  le courant de mesure du photomètre externe (BIPM 5) (signal – signal d'obscurité) et  $s$  est la sensibilité du photomètre (nA /lux) issu du dernier étalonnage. Le flux lumineux issu de la source externe est alors  $\phi = E \times A$ , où  $A$  est la surface du diaphragme.

La sensibilité « brute » de la sphère est obtenue par le rapport du signal mesuré par le photomètre interne (BIPM 2) sur la valeur du flux entrant dans la sphère.  $k = i_c / \phi$ .

Pour mettre en évidence des effets de parallaxe et de diffraction (dus à la forme du faisceau à l'entrée de la sphère), s'ils sont décelables, nous réalisons la mesure pour deux positions de la source externe. Nous obtenons les résultats suivants (Cf. tableau 1):

d (source - diaphragme) (m)	E (lux)	$\phi$ (lm)	$S_2$ (A)	s (nA /lm)
1,00	1538,8	3,00	$0,1443 \cdot 10^{-6}$	48,07
1,60	629,5	1,23	$0,0059 \cdot 10^{-6}$	48,09

◆Tableau 1 : mesure de la sensibilité de la sphère (photomètre interne).

Cette expérience nous permet de confirmer que d'une part la sensibilité propre du photomètre est linéaire et d'autre part que les pertes de flux par diffraction sont négligeables pour des distances (source-diaphragme) supérieures à 1 m. D'autre part, il est important de souligner que le coefficient de sensibilité de la sphère ne change que de 0,04% lorsque le flux entrant est divisé par deux et que les conditions géométriques d'entrée sont modifiés.

D'autre part, la linéarité du photomètre de la sphère a été confirmée par des expériences antérieures [26] à notre étude (méthode de superposition des flux). Cette étude a montré que la non linéarité était négligeable pour ce niveau d'éclairement.

---

## 5 LE DIAPHRAGME

---

### 5.1 MESURE DE LA SURFACE DU DIAPHRAGME

De nombreuses applications photométriques (mesure de luminance et d'éclairement) exigent la connaissance de la surface des diaphragmes utilisés dans les montages optiques avec la plus grande exactitude possible. Il existe, pour cela, de nombreuses méthodes aujourd'hui, lesquelles se sont affinées au fil des années. Les résultats les plus exacts sont obtenus par des méthodes optiques [4] (sans contact physique avec les contours du diaphragme) basées sur le balayage de la surface à mesurer par un faisceau laser [5].

Le diamètre du diaphragme que nous avons utilisé a été mesuré à partir d'une "machine à mesurer tridimensionnelle", donc par l'intermédiaire d'un palpeur mécanique. Cette méthode nous donne une connaissance de la surface du diaphragme suffisante pour notre application. L'incertitude associée est la combinaison de l'incertitude de mesurage de l'appareil et d'une composante de répétabilité de la mesure (écart type de 10 mesurages consécutifs).

$$D = (49,8376 \pm 0,0024) \text{ mm, soit encore}$$

$$A = (1950,76 \pm 0,24) \text{ mm}^2,$$

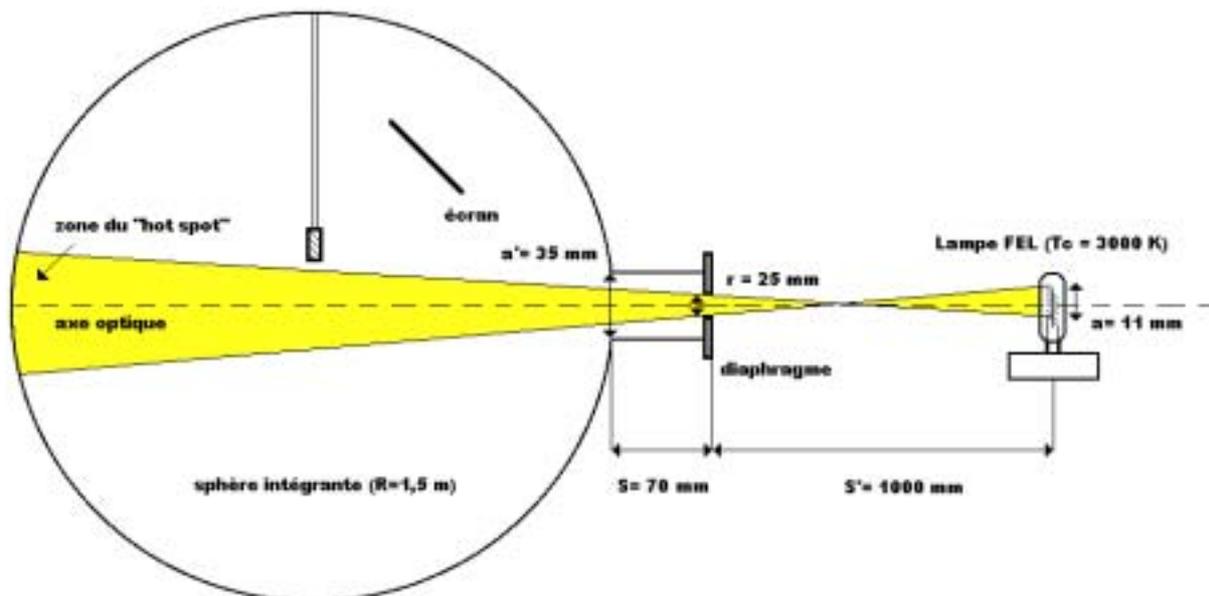
soit une incertitude relative de  $1,2 \cdot 10^{-4}$  sur la mesure de la surface du diaphragme.

### 5.2 PERTES DE FLUX PAR DIFFRACTION

Le phénomène de diffraction sur le diaphragme d'entrée de la sphère, (Cf. Figure 5) associé à la longueur du cylindre qui sert de support au diaphragme, conduit à une perte de flux lumineux entrant dans la sphère. Quantitativement, l'effet de ces pertes par diffraction peut être obtenu à partir de la formule de Steel et Bell [20].

$$\varepsilon(u, w, w') = -\frac{1}{2\pi \cdot w} \ln \frac{(w'+w)^2 - u^2}{(w'-w)^2 - u^2} \text{ (eq. 10), où } u = \frac{2\pi}{\lambda} r^2 \left( \frac{1}{S'} + \frac{1}{S} \right) \text{ et } w = \frac{2\pi}{\lambda} r \left( \frac{a}{S} \right), w' = \frac{2\pi}{\lambda} r \left( \frac{a'}{S'} \right)$$

Pour une longueur d'onde moyenne ( $\lambda = 555 \text{ nm}$ ) et pour les distances retenues (Cf. Figure 5), nous obtenons  $\varepsilon = 1,1 \cdot 10^{-5}$ . L'effet des diffractions peut donc être considéré comme négligeable pour des distances  $S'$  supérieures ou égales à 1 m.



◆ Figure 5: Pertes par diffraction.

Remarque: les bords du diaphragme sont biseautés de manière à limiter également les phénomènes de diffraction [1].

### 5.3 NON UNIFORMITÉ SPATIALE DE LA SPHÈRE

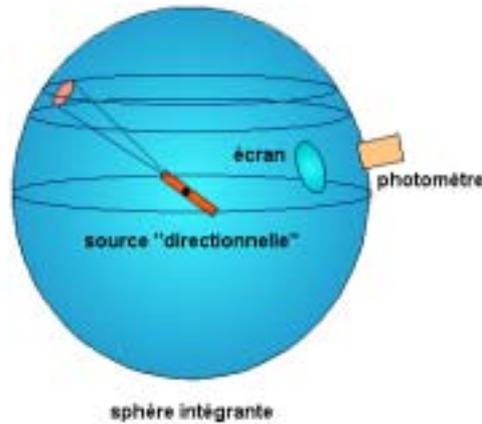
#### 5.3.1 INTRODUCTION

Le caractère non idéal de l'uniformité spatiale de la sphère vient de plusieurs causes:

- la sphère est mécaniquement divisée en deux hémisphères, qui sont joints lorsque l'on ferme la sphère. Cette jonction n'est pas idéale. Nous avons d'ailleurs démontré expérimentalement que le comportement de la sphère se modifie suivant la force de serrage des vis de fermeture (la variation relative atteint  $5 \cdot 10^{-3}$  pour la sphère du BIPM entre les deux cas extrêmes);
- A l'intérieur de la sphère, différents composants, comme les trous et les écrans en modifient l'uniformité;
- Enfin, la présence de défauts géométriques dans le revêtement, la présence de poussière contribuent également à changer le comportement spatial de la sphère.

Pour mesurer la réponse spatiale de la sphère, il est commode d'utiliser un étroit faisceau lumineux, dont la source est placée au centre de la sphère, et balaye l'ensemble de la surface de la sphère. Pour chaque position repérée de ce balayage, le signal du photomètre interne est enregistré et normalisé au signal obtenu pour une position de référence (Cf. Figure 6).

Remarque : Le flux émis par cette source ne dépend pas de son orientation.



◆Figure 6: "Balayage" de la sphère intégrante.

### 5.3.2 FACTEUR DE RÉFLEXION

Le facteur de réflexion d'un élément de surface de la zone de la sphère éclairé par le faisceau s'écrit:

$d\rho(\theta, \varphi) = \frac{\phi_{out}(\theta, \varphi)}{\phi_{in}(\theta, \varphi)}$  (eq.11), où  $\phi_{in}$  est le flux lumineux incident sur l'élément de surface et  $\phi_{out}$  est le

flux réfléchi. Les angles  $\theta$  (élévation) et  $\varphi$  (azimut) représentent les coordonnées sphériques de l'élément de surface. Pour l'ensemble de la surface de la sphère, l'équation devient:

$$\rho = \frac{\iint_A \phi_{out}(\theta, \varphi) \cdot dA}{\iint_A \phi_{in}(\theta, \varphi) \cdot dA} = \frac{\int_0^{+\pi} \int_0^{+2\pi} \phi_{out}(\theta, \varphi) \cdot R^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi}{\int_0^{+\pi} \int_0^{+2\pi} \phi_{in}(\theta, \varphi) \cdot R^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi} \quad (\text{eq.12}), \text{ où } R \text{ est le rayon de la sphère.}$$

En faisant intervenir le facteur de réflexion pour une unique réflexion  $\rho_i$ , et pour un flux incident  $\phi_{in}$  constant, tel que  $\phi_{out} = \rho(\theta, \varphi) \cdot \phi_{in}$ , nous obtenons finalement:

$$\rho = \phi_{in} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \rho_u(\theta, \varphi) \cdot R^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi / \phi_{in} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} R^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \text{ (eq.13);}$$

Une mesure correcte du facteur de réflexion impose que la lumière émise par le spot de balayage soit spatialement uniforme. Si ce n'était pas le cas, le résultat serait un coefficient de réflexion pondéré par la distribution spatiale de l'intensité lumineuse de la source de balayage.

Remarque:  $\rho$  est en fait le facteur de réflexion moyen issu des multi-réflexions pour un rayon lumineux sur l'ensemble de la sphère.

### 5.3.3 FONCTION DE DISTRIBUTION DE LA RÉPONSE SPATIALE (SRDF)

Cette fonction, appelée  $K(\theta, \varphi)$ , décrit la réponse de la surface de la sphère obtenue par le balayage du spot lumineux.  $K^*(\theta, \varphi)$  est la SRDF (*Single Reflexion Distribution Function*) normalisée relativement à la mesure du photomètre pour une position du spot choisi comme référence; pour la présente manipulation, nous avons choisi le point  $A$  ( $0^\circ, +30^\circ$ ) donc:

$$K^*(0^\circ, 30^\circ) = 1 \text{ et } K^*(\theta, \varphi) = K(\theta, \varphi) / K(0^\circ, 30^\circ).$$

Cette normalisation sert essentiellement à s'affranchir des dérives de la source pendant le balayage Sur toute sa surface, la réponse de la sphère à une distribution spatiale d'intensité lumineuse est donnée par :

$$S = \int_{\Omega} d\Omega I(\theta, \varphi) \cdot K(\theta, \varphi) \text{ (eq.14)}$$

Si la distribution d'intensité lumineuse dans la sphère était uniforme et si la sphère était parfaite

$I(\theta, \varphi) = I$  (constante), nous obtiendrions:

$$S = I \int_0^{+\pi} d\varphi \int_0^{+2\pi} d\theta \cdot \sin \theta \times K(0, 30) = K(0, 30) \times 4\pi \times I$$

La sphère n'étant pas parfaite, la SRDF permet alors de définir les corrections spatiales associées aux sources lumineuses:

Pour la source interne, le facteur de correction  $scf_i$  est tel que :

$$scf_i = \frac{1}{\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I_{rel}^*(\theta, \varphi) \cdot K^*(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi} \quad (\text{eq.15}), \text{ où } I_{rel}^* \text{ représente la distribution de l'intensité}$$

lumineuse telle que :  $I_{rel}^* = \frac{I_{rel}(\theta, \varphi)}{\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I_{rel}(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi}$  (eq.16) avec  $I_{rel}$  est la distribution de l'intensité

lumineuse de la source interne au point  $(\theta, \varphi)$ . Nous considérons que celle-ci est suffisamment

uniforme pour que  $I_{rel}^* = 1$ , alors  $scf_i = \frac{1}{\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} K^*(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi}$ . Une intégration à partir des

résultats de mesures nous donne  $scf_i = 0,99999775$ .

Pour la source externe, nous réalisons un balayage de la zone située en face de l'ouverture de la sphère (*Hot Spot*) avec un pas de balayage plus fin ( $2,5^\circ$  au lieu de  $5^\circ$ ). La variation d'angle pour la zone ainsi balayée est suffisamment faible pour que le sinus de l'intégrale soit négligé (Cf. Figure 8), alors, le

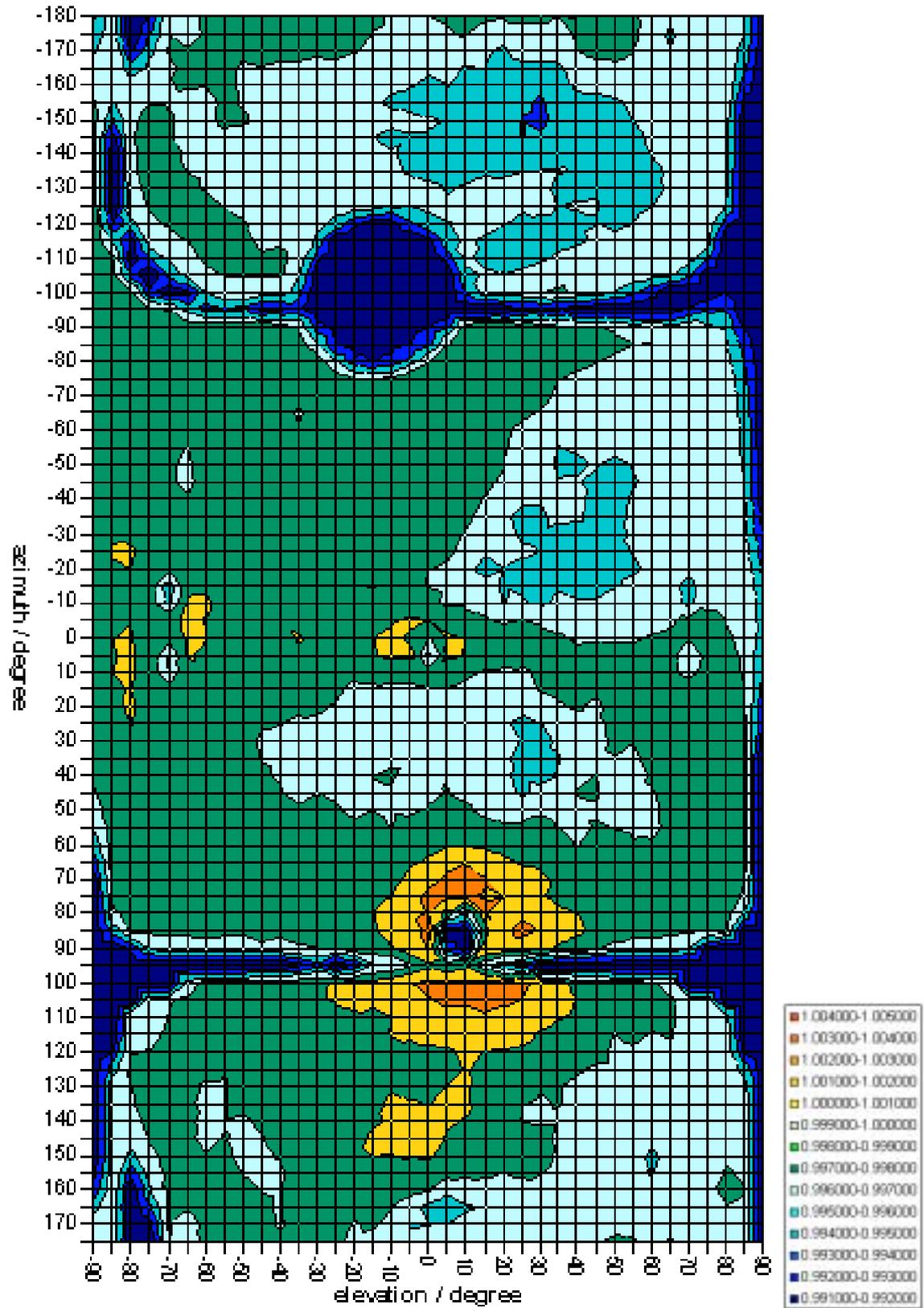
facteur de correction  $scf_e$  est tel que :  $scf_e = \frac{1}{K^*(\theta_e, \varphi_e)} = \frac{K(0,30)}{K(\theta_e, \varphi_e)}$  (eq.17);

Remarque : les coordonnées  $(\theta_e, \varphi_e)$  désignent la zone de la sphère sur laquelle arrive le flux issu de la source externe, où a lieu la première réflexion. Cette zone est appelée *Hot Spot*.

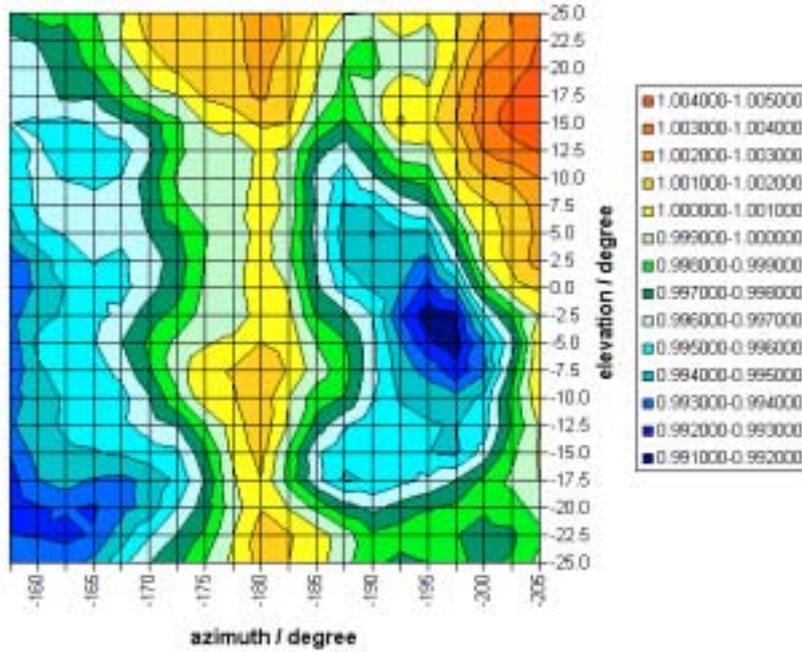
Pour la sphère du BIPM, l'expérience sur l'uniformité spatiale de la sphère a donné les résultats suivants :  $scf_e = 0,9985$ . Le facteur de correction de l'uniformité spatiale de la sphère est alors défini par:  $C_{sp} = scf_i / scf_e = 1,0015$ .

Sur la carte de la réponse spatiale de la sphère (Cf. Figure 7), il est possible de reconnaître:

- la zone de séparation des deux hémisphères ;
- l'écran circulaire qui protège le photomètre interne de l'éclairement direct de la lampe;
- la zone d'entrée de la sphère (au centre) ainsi que différents petits défauts comme des trous (anciens supports d'écran).



◆ Figure 7: Réponse spatiale de la sphère intégrante du BIPM.



◆Figure 8: Réponse spatiale du "hot spot" de la sphère intégrante du BIPM.

La figure 8 représente la vue détaillée de la zone où a lieu la première réflexion du flux externe (*Hot Spot*).

---

## 6 FACTEUR DE CORRECTION DE COULEUR

---

### 6.1 DÉFINITION

Le facteur de correction de couleur,  $ccf(T_c)$  caractérise l'efficacité spectrale d'un système optique comparé à un détecteur idéal avec une sensibilité spectrale identique à  $V(\lambda)$ , pour le rayonnement émis par un corps noir à la température  $T_c$ . Le facteur de correction de couleur est défini par la relation suivante:

$$ccf(T_c) = \frac{\int_{\lambda} V(\lambda).L_{\lambda}(T_c, \lambda).d\lambda}{\int_{\lambda} s(\lambda).L_{\lambda}(T_c, \lambda).d\lambda} \text{ (eq. 18), où}$$

- $V(\lambda)$  est l'efficacité spectrale lumineuse de l'œil humain définie par la CIE (Cf. Annexes § 1);
- $L_{\lambda}$  est la luminance spectrique du corps noir idéal à la température  $T_c$ , et,
- $s$  est la sensibilité spectral du système optique étudié, normalisée à 555 nm :  $s(555) = 1$ .

Il nous est possible de diviser notre système optique en deux sous-parties : le système que nous appellerons interne (sphère + photomètre interne + source interne) et le système externe (photomètre externe + source externe). Pour ces deux systèmes, nous calculons le facteur de correction de couleur.

En effet celui-ci doit être pris en compte dans les termes correctifs de notre expérience parce que nous avons choisi une source lumineuse externe pour son intensité lumineuse élevée (FEL N°4 – 1000 W) mais dont la température de couleur diffère de celle pour laquelle les autres instruments du montage sont étalonnés:

- Le photomètre externe est en effet étalonné pour  $T_c = 2856$  K. Sa sensibilité à 3000 K est différente et doit donc être calculée;
- D'autre part, les flux lumineux des lampes à étalonner sont eux aussi définis pour une température de couleur de 2856 K. Il est également nécessaire de calculer la sensibilité spectrale du système interne à 3000 K.

Dans les paragraphes suivants, nous allons calculer les *ccf* des systèmes interne et externe à 2856 K à titre d'exemple. En effet, seule la variation relative des *ccf* entre 2856 K et 3000K nous intéresse pour définir un terme correctif. Celui-ci sera calculé à la fin du paragraphe.

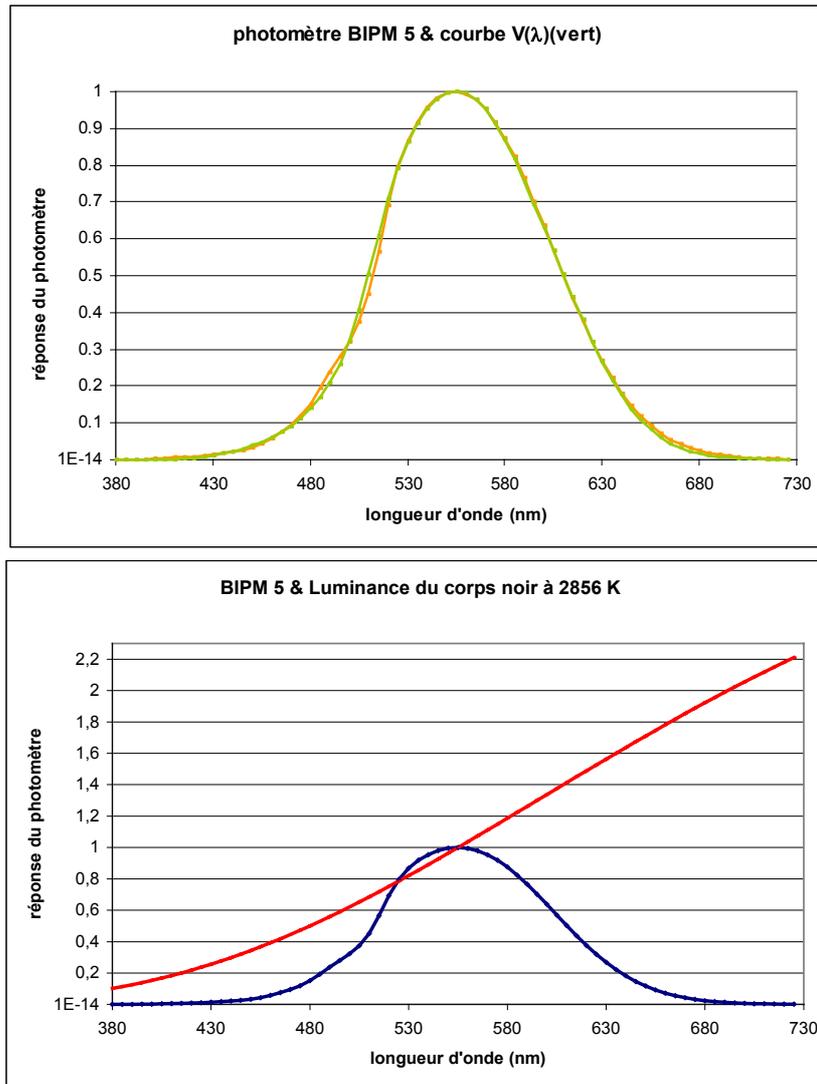
## 6.2 DÉTERMINATION PRATIQUE DU $CCF_E$

Pratiquement, le facteur de correction de couleur du système « photomètre – source » externe (photomètre BIPM 5 et lampe FEL N°4) est calculé de la façon suivante :

A partir des résultats d'étalonnage, la réponse spectrale du photomètre  $s(\lambda)$  est normalisée à la longueur d'onde  $\lambda = 555$  nm (maximum de la réponse) ; (Cf. courbe bleue de la Figure 9)

La luminance du corps noir idéal (Planck)  $L(\lambda)$  (Cf. Annexes §1) est calculée pour la température de couleur de la source ( $T_c = 2856$  K). Elle est également normalisée à  $\lambda = 555$  nm;

La fonction  $V(\lambda)$  est normalisée à  $\lambda = 555$  nm.



◆Figure 9: Luminance du corps noir et fonction  $V(\lambda)$ .

Le  $ccf_e$  du système (source – photomètre) est alors obtenu par intégration (méthode des trapèzes) par

la relation suivante :  $ccf_e = \frac{\sum_{j=1}^{J-1} (L_j \times V_j) \cdot d\lambda}{\sum_{j=1}^{J-1} (L_j \times s_j) \cdot d\lambda}$  (eq. 19), où  $j$  est la référence de la longueur d'onde,  $J$  est la

borne supérieure du domaine utile et  $d\lambda$  le pas d'intégration égal à 5 nm pour cette étude. Nous obtenons

$$ccf_e(2856K) = 0,9908.$$

Remarque: Les photomètres que nous avons utilisés (BIPM 2 et BIPM 5) ont été étalonnés en 2001 par une méthode spectrophotométrique : comparaison à un détecteur piège (étalon) pour des longueurs d'ondes comprises entre 380 nm et 725 nm ; Les rayonnements étant générés par un monochromateur.

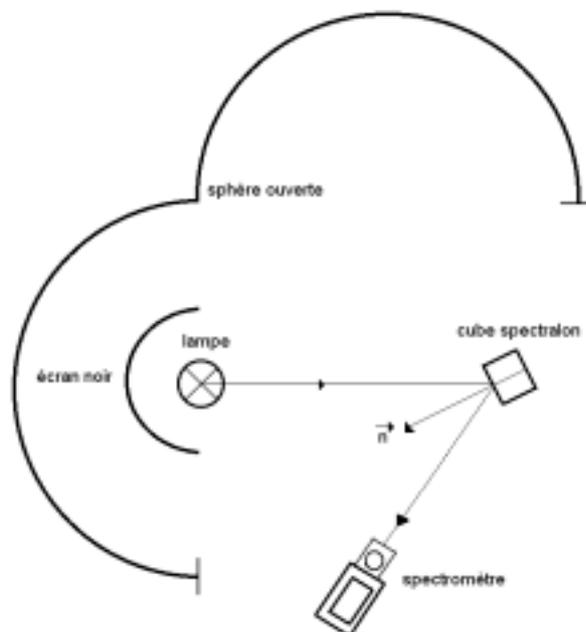
Remarque 2: les photomètres sont réglés en température en particulier car le filtre  $V(\lambda)$  est spectralement sensible aux variations de température. Il est donc nécessaire de les laisser atteindre leur température optimale de fonctionnement avant de débiter les mesures (mise sous tension typiquement deux heures avant le début des mesurages).

### 6.3 DÉTERMINATION PRATIQUE DU $CCF_I$

Pour étudier le comportement spectral du « système de mesure interne » (photomètre BIPM 2 et lampe N°135), il est pratique d'utiliser un spectromètre (caméra CCD) :

#### 6.3.1 MESURE DU SPECTRE DE LA LAMPE

Le spectromètre n'est pas adapté à la mesure directe du spectre de la lampe du fait de son intensité lumineuse trop élevée et de sa non-uniformité spatiale. De plus, nous souhaitons connaître la réponse spectrale après réflexion du flux incident sur le revêtement de la sphère. Compte tenu de ces conditions, nous utilisons le montage expérimental suivant (Cf. Figure 10) :



◆Figure 10: Montage expérimental de mesure du spectre de la lampe interne.

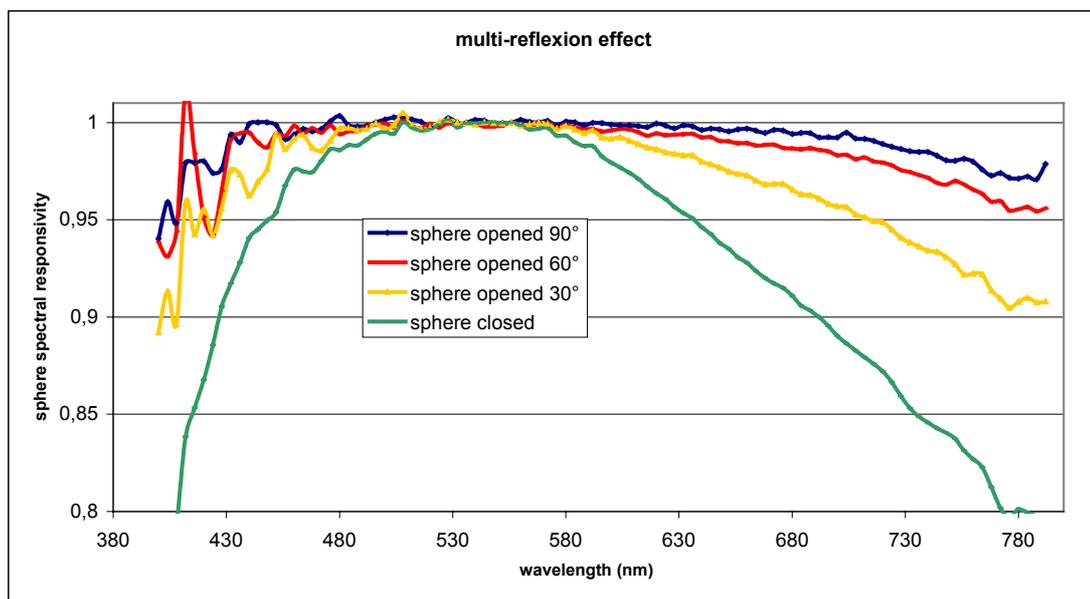
Description du montage expérimental :

La sphère est ouverte (ouverture maximale), la lampe est fixée au centre de la sphère puis alimentée. Un cube composé de spectralon™ est disposé sur un support à environ 1 m de la source et le spectromètre « vise » la surface du cube directement exposé au flux lumineux. Le spectromètre est réglé de manière à ce que l'angle défini par l'axe de son objectif et la normale de la face du cube exposée soit identique à l'angle défini par l'axe optique du montage et la normale de la face du cube exposée. Un voile noir est disposé afin d'éviter les réflexions parasites sur l'hémisphère situé en arrière de la lampe.

Le résultat de cette expérience nous permettra de normaliser la réponse spectrale du système à celui de la lampe.

### 6.3.2 MESURE DE LA TRANSMISSION DE LA SPHÈRE

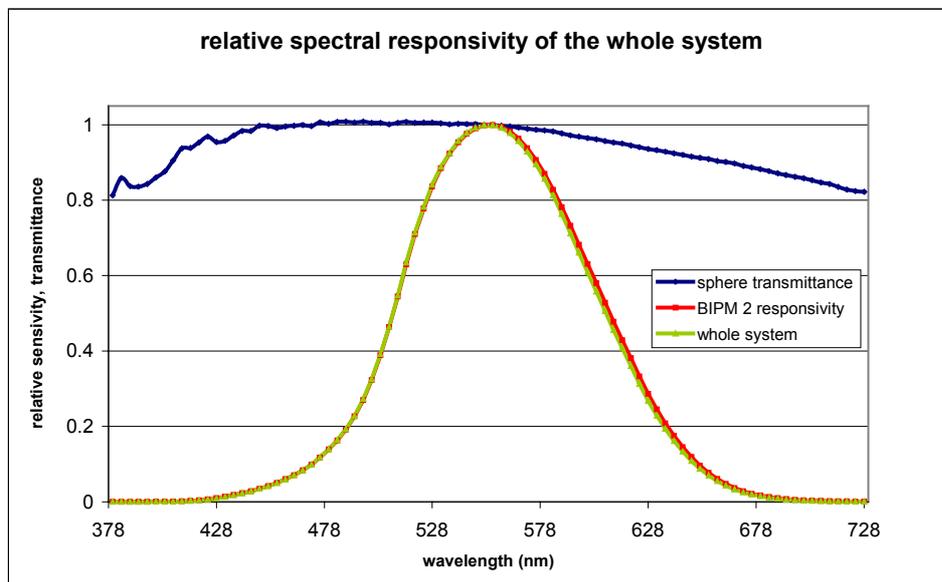
La sphère est à présent totalement fermée, la lampe est alimentée et la caméra est disposée de manière à viser une zone de la surface depuis l'orifice dans lequel est habituellement fixé le photomètre. La réponse obtenue, normalisée au spectre de la lampe se trouve sur la courbe verte de la figure 11.



◆ Figure 11: Effets des multi-réflexions sur les parois de la sphère.

Remarque : Afin de mettre en évidence le rôle de la sphère (Cf. § 3.2), nous avons réalisé l'expérience décrite précédemment pour différents « états » d'ouverture de la sphère. Les résultats obtenus sont représentés sur les courbes de la figure 9. Nous observons qu'à mesure que l'on ferme la sphère, le spectre de réponse du système se « resserre » sur la bande de longueurs d'onde du spectre de la source. L'effet des multi-réflexions des rayons lumineux est ainsi mis en évidence.

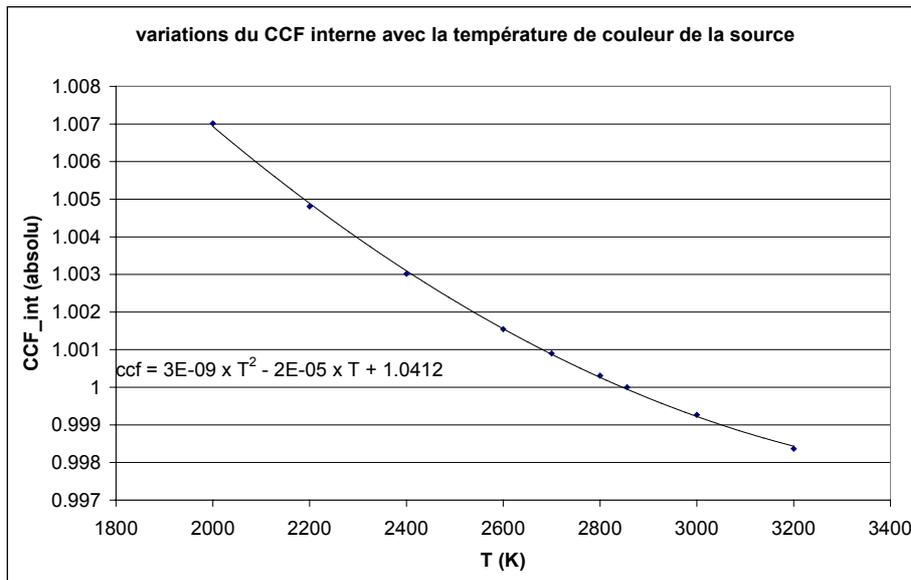
La réponse spectrale du système est alors calculé à partir de l'étalonnage du photomètre BIPM 2 (Cf. Figure 12).



◆ Figure 12: Réponse spectrale du système « sphère, photomètre et source internes ».

Le  $\alpha f_i$  est alors obtenu à partir de l'équation 19, pour une luminance du corps noir idéal calculée pour la température de couleur de la source de flux ( $T_c = 2856$  K), pour un pas d'intégration  $d\lambda = 4$  nm. Nous obtenons  $\alpha f_i(2856K) = 1,0198$ .

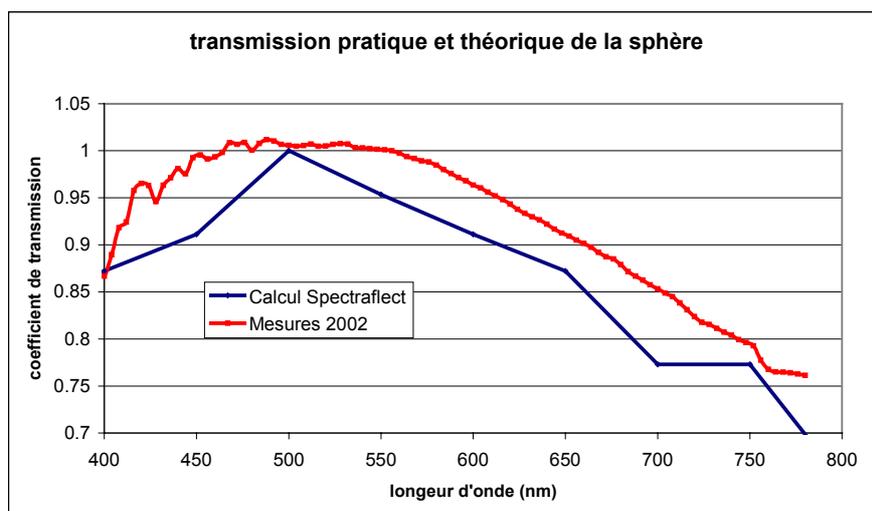
Si nous représentons sur une courbe l'évolution de  $\alpha f_i$  en fonction de la température de couleur de la source interne (Cf. Figure 13), nous remarquons qu'une variation de  $\pm 100$  K de la température autour de 2800 K n'entraîne qu'une variation relative de 0,06%. Cette variation est très faible comparée à la valeur absolue du  $\alpha f_i$  calculé au paragraphe précédent, qui correspond à correction relative de 2% par rapport au cas d'un système spectralement idéal.



◆ Figure 13: variation du ccf « sphère, photomètre et sources internes » avec la température de couleur de la source.

D'autre part, nous comparons les courbes de transmission du spectraflect™ théorique et expérimental, nous remarquons une très bonne homogénéité des comportements, en particulier aux extrémités et au milieu du spectre (Cf. Figure 14).

Remarque: la courbe théorique du coefficient de transmission du spectraflect™ est obtenue en calculant le terme  $[\rho / (1-\rho)]$  qui définit l'effet des multiréflexions dans la sphère (eq.9 et 10) à partir du coefficient de réflexion du revêtement.



◆ Figure 14: Coefficients de transmission expérimental et théorique.

### 6.3.3 CONCLUSION

Pour obtenir la variation relative du  $ccf$  des deux systèmes entre 2856 K et 3000K, il faut à présent calculer les  $ccf$  des systèmes à 3000 K. En appliquant l'équation 19, nous obtenons :

$$ccf_i(3000K) = 1,0191 \text{ et } ccf_e(3000K) = 0,9914.$$

Dès lors le calcul du coefficient correctif pour les « facteurs de correction de température de couleur »

revient à appliquer l'équation suivante: 
$$\frac{ccf(T_{ext})}{ccf(T_{int})} = \frac{\int_{\lambda} s(\lambda).L_{\lambda}(T_{ext}, \lambda).d\lambda}{\int_{\lambda} s(\lambda).L_{\lambda}(T_{int}, \lambda).d\lambda} \times \frac{\int_{\lambda} V(\lambda).L_{\lambda}(T_{int}, \lambda).d\lambda}{\int_{\lambda} V(\lambda).L_{\lambda}(T_{ext}, \lambda).d\lambda}.$$

Expérimentalement, le rapport est calculé à partir des fichiers de données discrètes de la réponse spectrale de la sphère pour le système interne et de la sensibilité de BIPM 5 pour le système externe.

Nous obtenons:

$$\frac{ccf_i(T_{ext})}{ccf_i(T_{int})} = \frac{\sum_{j=1}^{J-1} (L_j(3000K) \times s_j).d\lambda}{\sum_{j=1}^{J-1} (L_j(2856K) \times s_j).d\lambda} \times \frac{\sum_{j=1}^{J-1} (L_j(2856K) \times V_j).d\lambda}{\sum_{j=1}^{J-1} (L_j(3000K) \times V_j).d\lambda} = 0,9993$$

$$\frac{ccf_e(T_{ext})}{ccf_e(2856K)} = \frac{\sum_{j=1}^{J-1} (L_j(3000K) \times s_j).d\lambda}{\sum_{j=1}^{J-1} (L_j(2856K) \times s_j).d\lambda} \times \frac{\sum_{j=1}^{J-1} (L_j(2856K) \times V_j).d\lambda}{\sum_{j=1}^{J-1} (L_j(3000K) \times V_j).d\lambda} = 1,0006.$$

Finalement donc,  $ccf_i(T_{ext})/ccf_i(T_{int}) = 0,9993$  et  $ccf_e(2856)/ccf_e(T_{ext}) = 1,0006$

## 7 PARAMÈTRES DE LA SOURCE INTERNE

### 7.1 VARIATION DE LA TEMPÉRATURE À L'INTÉRIEUR DE LA SPHÈRE

La température de l'air à l'intérieur de la sphère varie typiquement de plusieurs degrés entre une mesure de flux interne (réchauffement du revêtement par l'intermédiaire de la lampe) et une mesure de flux externe (très faible flux). Des expériences ont été effectuées au BIPM, par le passé, pour évaluer les conséquences de cet effet [11].

Celles-ci ont montré que la réponse de la sphère diminue de 0,15 % lorsqu'une lampe est allumée, à l'intérieur de la sphère. De plus, alors que l'effet de l'augmentation de la température apparaît dès que la lampe est allumée, le retour aux conditions initiales nécessite un temps plus long (10 minutes environ).

Nous définissons par conséquent un coefficient de correction des erreurs de mesures dues aux modifications du comportement thermique du milieu, à l'intérieur de la sphère:

$$C_t = s_i(\text{sphère "chaude"}) / s_i(\text{sphère "froide"}) = 1,0015.$$

## 7.2 AUTO-ABSORPTION DE LA LAMPE

La source interne n'étant pas une source ponctuelle, en particulier à cause de l'enveloppe de verre de la lampe qui absorbe une partie du flux incident, il est nécessaire d'apporter une correction au comportement spatial de la sphère en présence ou non de la lampe en son centre. Nous utilisons pour cela une petite lampe auxiliaire ( $U=24\text{ V}$  ;  $I=1,04\text{ A}$ ) dont l'éclairement (Cf. Figure 2) dans la sphère est mesuré avec puis sans lampe (lampe N° 135) en son centre. Le rapport des mesures du photomètre interne nous donne une correction d'auto-absorption de la lampe:

$$C_a = s_i(\text{avec lampe}) / s_i(\text{sans lampe}) = 0,963.$$

Ce facteur de correction est propre à chacune des lampes puisque directement fonction des caractéristiques physiques (qualité du verre, transparence, défaut de l'enveloppe, etc.) de celle-ci.

Remarque : Si la source interne restait dans sa position (éteinte) lors de la mesure de flux externe, la correction d'auto-absorption ne serait pas nécessaire. Cependant, l'axe optique que nous avons défini passe par le centre de la sphère, qui est confondu avec le « centre » de la lampe interne. Par conséquent le flux introduit dans la sphère est physiquement corrélé à la présence de la lampe interne.

Remarque 2: en choisissant une axe optique différent (oblique), il se peut que le phénomène de diffraction au niveau du trou d'entrée de la sphère devienne prépondérant. Une étude supplémentaire serait alors souhaitable.

## 7.3 CORRECTION DU TROU D'ENTRÉE DE LA SPHÈRE (« WHITE CAP »)

Cette correction est appliquée pour tenir compte de la différence du comportement spatial de la sphère lorsque celle-ci est totalement fermée, par rapport à son comportement lorsque le trou d'entrée permet le libre passage du flux externe.

Expérimentalement, nous disposons la lampe à étalonner (lampe N° 135) au centre de la sphère et nous réalisons une mesure de flux (photomètre interne) dans les deux cas, et ce, deux fois (répétabilité). Nous constatons que la différence moyenne est de 3,67%. La sphère perd donc rapidement ses propriétés quand elle se « déforme ». Si nous calculons la différence relative entre la surface du bouchon blanc et la surface totale de la sphère, nous obtenons un résultat de 0,1 %: une

petite variation d'uniformité de la surface conduit à une importante variation de la réponse spectrale. Nous définissons le coefficient  $C_w = s_i$  (avec bouchon) /  $s_i$  (sans bouchon) =1,0367.

Remarque:  $C_w$  est supérieur à l'unité car l'absence du bouchon blanc « prive » le photomètre interne d'une partie du flux incident. La correction  $C_w$  est donc destinée à « rajouter » le flux manquant.

---

## 8 PARAMÈTRES DE LA SOURCE EXTERNE

---

### 8.1 STABILITÉ DE LA SOURCE EXTERNE

Les sources lumineuses sont alimentées par des sources de courant très stables. Un temps de chauffe est nécessaire pour permettre aux lampes d'atteindre leur régime d'équilibre de fonctionnement (les caractéristiques techniques des lampes utilisées lors des manipulations sont données en Annexes §2).

Néanmoins, pour prendre en compte l'instabilité de la source externe dans le temps de la manipulation, une séquence de mesurage se déroule chronologiquement de la façon suivante :

- mesure du flux introduit dans la sphère  $i_{e1}$  (photomètre interne);
- mesure de l'éclairement à l'entrée de la sphère (photomètre externe);
- nouvelle mesure du flux introduit dans la sphère  $i_{e2}$  (photomètre interne).

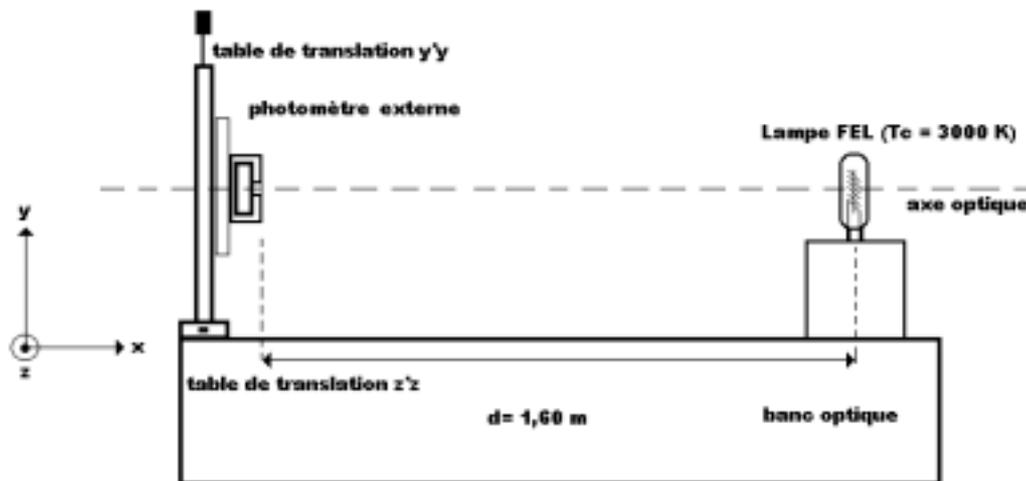
Ainsi le résultat de la mesure du flux introduit dans la sphère est calculé à partir de la moyenne arithmétique des signaux  $i_{e1}$  et  $i_{e2}$ :  $i_e = (i_{e1} + i_{e2})/2$

### 8.2 UNIFORMITÉ DE LA SOURCE EXTERNE

Une lampe à filament de tungstène fournit un éclairage dont l'uniformité peut être assez bonne angulairement, mais faible spatialement, au moins dans les zones proches d'une image du filament. Des travaux [8] ont montré que des erreurs de ce type pouvaient atteindre 0,1 % en valeur relative pour des types de lampes interne et externe différentes (ce qui est notre cas).

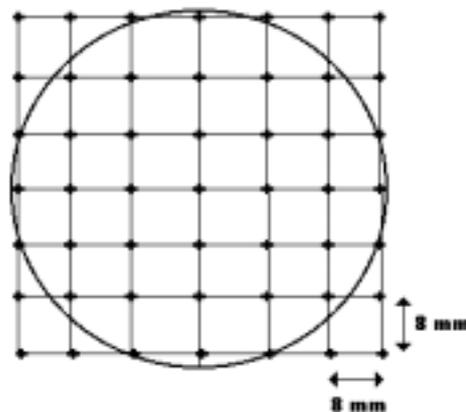
Remarque : L'un des matériaux terrestres les plus réfractaires est le tungstène, qui lorsqu'il est utilisé au plus près de sa température de fusion ( $T_f=3655$  K), présente un spectre d'émission assez riche dans le visible.

De plus, la surface du diaphragme est de  $1950$  mm<sup>2</sup> contre  $50$  mm<sup>2</sup> pour la surface de la fenêtre du photomètre, d'où la nécessité d'uniformiser le signal du photomètre sur toute la surface du diaphragme. Pour dresser la « carte » de l'uniformité spatiale de la source externe et en déduire un facteur correctif  $C_u$ , sur une surface équivalente à celle du diaphragme, nous réalisons le montage suivant (Cf. Figure 15) :



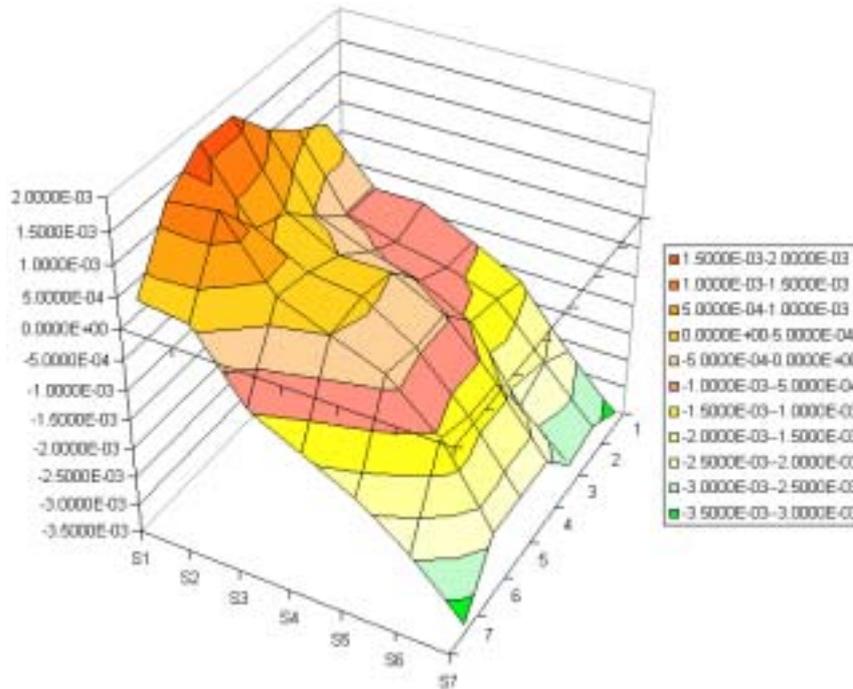
◆ Figure 15: Montage optique de la mesure de l'uniformité de la source externe.

Sur un maillage carré de  $48$  mm de côté, nous réalisons une mesure d'éclairement en chaque point des mailles unitaires ( $8$  mm de côté, équivalent au diamètre de la fenêtre du photomètre). Le point de référence choisi est le centre de cette surface qui est confondu avec le centre de l'ouverture de la sphère. Ce point est mesuré trois fois au cours du balayage total de la surface (Cf. Figure 16).



◆ Figure 16: Maillage retenu pour la mesure de l'uniformité de la source externe.

Les résultats obtenus (normalisés par rapport à la valeur de l'éclairage au centre du maillage) permettent de tracer l'uniformité spatiale de l'éclairage de la lampe (Cf. Figure 17).



◆Figure 17: Mesure de l'uniformité spatiale de la source externe.

Nous remarquons que l'éclairage de la lampe diminue de manière régulière d'un bord à l'autre de la surface balayée; l'amplitude crête à crête de cette décroissance est faible cependant et égale à 0,5%.

En choisissant de ne conserver que les points relatifs à l'ouverture circulaire et en calculant la correction relativement à la position centrale, nous obtenons un facteur de correction  $C_u = 0,9995$ .

### 8.3 CONCLUSION

#### 8.3.1 RÉSULTATS DES MESURES

La référence métrologique des flux lumineux du BIPM est encore aujourd'hui définie par la moyenne arithmétique des flux lumineux d'un groupe de lampes (appelé groupe primaire et constitué de 6 lampes). Les résultats d'étalonnage ont été établis par des laboratoires primaires de métrologie lors d'une comparaison internationale du lot en 1985.

Une vérification annuelle du lot de lampes usuelles du BIPM, que nous avons utilisé pour cette étude, est réalisé par comparaison au groupe de lampes primaire. Nous avons effectué cet étalonnage à la suite de cette étude. Les résultats obtenus nous autorisent à relier le groupe primaire aux résultats de

mesure de flux par la méthode absolue, c'est à dire calculer la différence relative entre la moyenne du "flux lumineux international" et la méthode absolue de la sphère intégrante [2], [9], [10].

L'ensemble de ces résultats est présenté dans le tableau ci-contre (Cf. tableau 2). Pour le calcul du flux lumineux par la méthode absolue, nous rappelons en détail la formule utilisée, mettant ainsi en évidence le principe de mesure ainsi que les différents facteurs de correction décrits dans les paragraphes précédents:

$$\phi_i = \frac{i_{int}}{i_{ext}} \times \phi_e \times \frac{ccf_i(T_{ext})}{ccf_i(T_{int})} \times C_{sp} \times C_t \times C_a \times \frac{1}{C_w} \text{ (eq. 20), où le flux lumineux externe est défini}$$

$$\text{par : } \phi_e = E \times A = \frac{i'_{ext}}{s} \times C_u \times \frac{ccf_e(2856K)}{ccf_e(T_{ext})} \times A \text{ (eq. 21), où}$$

$i'_{ext}$  est l'intensité du courant du photomètre externe obtenu en réponse au flux lumineux externe;

$A$  est la surface du diaphragme;

$s$  est la sensibilité en éclairnement du photomètre externe (étalonnage);

$C_u$  est le facteur de correction de non-uniformité spatiale de la source externe.

$ccf_e(2856K) / ccf_e(T_{ext})$  est le coefficient de correction du facteur couleur du "photomètre externe" vis à vis du flux lumineux externe;

$i_{int}$  est l'intensité électrique du photomètre interne obtenu en réponse au flux lumineux interne;

$i_{ext}$  est l'intensité électrique du photomètre interne obtenu en réponse au flux lumineux externe;

$C_{sp}$  est la correction de non-uniformité spatiale de la sphère;

$ccf_i(T_{ext}) / ccf_i(T_{int})$  est le coefficient de correction du facteur couleur du système "sphère + photomètre interne" vis à vis du flux lumineux externe;

$C_t$  est le facteur de correction du aux effets thermiques dans la sphère;

$C_a$  est le coefficient d'auto-absorbition des lampes internes;

$C_w$  est le coefficient de correction du bouchon blanc;

surface du diaphragme (m <sup>2</sup> )	0.00195076			
<b>paramètres de la source externe</b>				
temperature de couleur de la source externe (K)	3000			
non-uniformité de la source dans le plan du diaphragme	0.9995			
facteur de correction de couleur du photomètre externe	1.0006			
courant du photomètre externe (A)	9.9266E-06			
sensibilité du photomètre externe (BIPM 5) (A/lux)	1.5769E-08			
Flux externe (lm)	1.2281			
<b>Caractéristiques de la sphère</b>				
Hot Spot et non uniformité spatiale de la sphère	1.0015			
rapport des facteur de correction de couleur (2856 K-3000 K)	0.9993			
effets thermique dans la sphère	1.0015			
courant du photomètre interne en réponse au flux externe (A)	5.8857E-08			
correction du bouchon blanc	1.0367			
réponse spectrale de la sphère (A/lm)	4.9569E-08			
<b>paramètres de la source interne</b>				
N° série Lampe	135	144	153	156
correction d'auto-absorption	0,962739	0,961262	0,961616	0,965531
courant du photomètre interne en réponse au flux interne	1,25785E-04	1,26304E-04	1,26672E-04	1,22942E-04
<b>Flux lumineux de la lampe (1985) (lm)</b>	<b>2660,27</b>	<b>2674,55</b>	<b>2681,28</b>	<b>2592,78</b>
<b>Flux lumineux méthode (absolu) (lm)</b>	<b>2635,79</b>	<b>2650,75</b>	<b>2657,49</b>	<b>2568,77</b>
<b>différence relative par lampe</b>	<b>0,0092</b>	<b>0,0089</b>	<b>0,0089</b>	<b>0,0093</b>
<b>valeur moyenne du groupe Usuel (lm) BIPM 85</b>	<b>2652.22</b>			
<b>valeur moyenne du groupe Usuel (lm) méthode absolue</b>	<b>2628.20</b>			
<b>différence relative de la moyenne</b>	<b>0,0091</b>			

◆ Tableau 2 : Résultats de la comparaison du flux lumineux méthode absolue – lot de référence 1985 .

A la différence relative des flux lumineux entre la méthode absolue et le lot de lampe de référence de 1985, il est nécessaire d'appliquer la correction décidée par la recommandation P1 du CCPR (2001) (Comité Consultatif de Photométrie Radiométrie) et ratifiée par le CIPM lors de sa 90<sup>ème</sup> session (2001). Celle-ci prévoit l'ajustement de la valeur du flux lumineux du lot de lampe de référence 1985 par une diminution de 0,36% de la valeur attribuée en 1986 (Cf. tableau 2). Cet ajustement est issu des résultats de la comparaison clé de flux lumineux ayant eu lieu en 1997-1998 (CCPR-K4) [21].

Finalement, en appliquant cet ajustement, la différence relative entre les deux méthodes (comparaison aux lampes BIPM 85 et méthode absolue) atteint **0,55%**.

### 8.3.2 BILAN D'INCERTITUDE

Nous donnons dans le tableau suivant (Cf. tableau 3) les composantes retenues pour dresser le bilan d'incertitude sur la mesure de flux lumineux par la méthode de la sphère intégrante. Il s'agit d'un bilan type pour lequel nous n'avons pas pu déterminer toutes les composantes. Dans ce cas, nous avons reporté les valeurs numériques du bilan proposé par Y. Ohno en 1995 (ces composantes sont marquées d'un astérisque). Chacune des composantes est numériquement présentée pour un facteur d'élargissement  $k=2$ .

COMPOSANTES	INCERTITUDE RELATIVE ÉLARGIE (K=2) [%]
<b>Incertitude sur la détermination de <math>\Phi_e</math></b>	<b>0,54</b>
Incertitude sur la réalisation de l'échelle d'éclairement au BIPM (BIPM 5)	0,51
Alignement source-photomètre*	0,05
Positionnement du photomètre* (avant et après l'insertion du diaphragme)	0,06
Surface du diaphragme	0,03
Uniformité spatiale de la source externe	0,15
Dérive de l'éclairement de la source pendant la mesure	0,08
Pertes par diffraction	0,02
<b>Incertitude sur la détermination de <math>\Phi_i</math></b>	<b>0,41</b>
Uniformité spatiale de la sphère*	0,40
Facteur de correction de couleur*	0,03
Auto-absorption des lampes	0,04
Linéarité du photomètre interne	0,05
Répétabilité des lampes de flux	0,08
<b>Incertitude globale</b>	<b>0,68</b>

◆Tableau 3: Budget d'incertitude.

---

## 9 CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Dans cette étude, nous avons réalisé l'unité de flux lumineux par la méthode de la sphère intégrante. Celle-ci est basée sur l'utilisation d'une sphère de grande dimension, recouverte d'un revêtement de fort albédo et associée à un photomètre. Ce système est utilisé comme instrument de transfert pour comparer un flux lumineux parfaitement défini introduit dans la sphère, au flux d'une source placée à l'intérieur de celle-ci.

Nous avons calculé l'ensemble des facteurs de corrections nécessaires à la méthode de mesure. Ceux-ci sont essentiellement dus aux imperfections spatiales (orifices, uniformité du revêtement, poussières, effets thermiques, etc.) et spectrales de la sphère, du fait que nous avons utilisé deux sources lumineuses de température de couleur différentes. (source externe,  $T_c=3000$  K et source interne,  $T_c=2856$  K).

L'intérêt de l'utilisation d'une sphère intégrante dans la mise en évidence de l'effet des multi-réflexions a été démontré.

Enfin, la différence relative de flux lumineux entre la moyenne internationale, représentée par le groupe primaire de lampes de flux de 1985 et la méthode absolue a été quantifiée à  $\delta=(0,55 \pm 0,68) \%$  ( $k=2$ ).

Dans ces conditions, il est envisageable dans l'avenir de substituer à ce groupe un lot de photomètres. Bien qu'il ne soit pas démontré que ce type d'instrument soit métrologiquement plus stable qu'une lampe à filament de tungstène, les photomètres peuvent être étalonnés périodiquement avec une grande exactitude (radiomètre cryogénique).

Pour cela, il est tout d'abord nécessaire de vérifier la répétabilité dans la mesure de la différence relative entre les deux méthodes de mesure.

En particulier, nous avons remarqué que la sensibilité spectrale de la sphère pouvait changer au cours du temps (un délai d'un mois suffit pour le constater). Par conséquent, toutes les fois que nous souhaiterons réaliser un étalonnage en flux lumineux par la méthode absolue de la sphère intégrante, nous serons contraint de mesurer la sensibilité spectrale de la sphère. Il serait dans ces conditions souhaitable d'automatiser certaines tâches dans la mesure du flux externe comme la substitution commandée du diaphragme au photomètre, ou la mesure de l'uniformité spatiale de la source (pilotage par logiciel).

Enfin les composantes d'incertitudes relatives à cette méthode de mesure doivent être considérées avec plus d'attention. Le budget d'incertitude est effectivement une garantie de la maîtrise acquise dans la réalisation cette méthode expérimentale.

# ANNEXES:

---

## 1 GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES

---

La plupart des systèmes optroniques s'articulent autour des quatre fonctions suivantes : émissions du signal lumineux, propagation, réception et mode d'exploitation, chacune de ces fonctions sont traduites par un ensemble de spécifications :

- propriétés spatiales, spectrales et temporelles de la source,
- Caractéristiques des milieux de propagation et des surfaces rencontrées par la lumière,
- Caractéristiques de l'optique et du détecteur associé (champ, ouverture, qualité,...).

### 1.1 UNITÉ DU SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS

L'unité du SI pour le flux lumineux est le lumen. C'est une unité dérivée du SI, l'unité de base de la photométrie étant l'unité d'intensité lumineuse : la candela (1979) [23]:

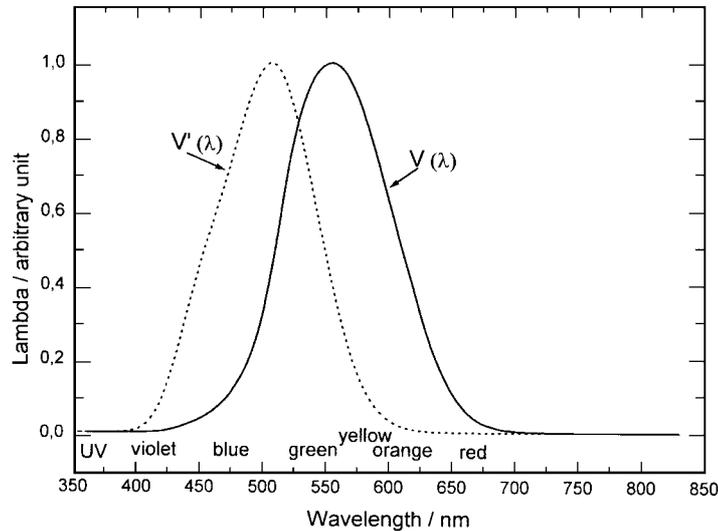
"La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l'intensité est  $1/683$  watt par stéradian."

Cette définition ne donne aucune indication de la manière dont la candela doit être réalisée, ce qui représente le grand avantage de permettre de faire appel à de nouvelles techniques pour réaliser la candela sans avoir à changer la définition de l'unité de base. Aujourd'hui, les laboratoires nationaux de métrologie réalise la candela au moyen de méthodes radiométriques. Cependant, les lampes étalons sont toujours utilisées pour conserver les unités photométriques: elles fournissent soit une intensité lumineuse connue , dans une certaine direction, soit un flux lumineux connu.

La définition de la candela mentionnée au paragraphe précédent est exprimée en termes strictement physiques. L'objectif de la photométrie , toutefois, est de mesurer la lumière comme une grandeur perceptible à l'œil humain, qui fut le premier le capteur optique et donc le plus utilisé. De cette façon, le résultat de cette mesure doit être le plus proche possible de la sensation visuelle d'un observateur humain (domaine du visible, entre  $0,4 \mu\text{m}$  et  $0,7 \mu\text{m}$ ). Pour l'œil humain , on distingue trois différents types de vision :

- la vision photopique quand l'œil est soumis à des luminances élevées (impression subjective de la luminosité),
- la vision scotopique quand l'œil est soumis à de faibles niveaux de luminance et,
- la vision mésopique est relative aux niveaux intermédiaires de luminance.

Pour cela, la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) a introduit deux fonctions particulières :  $V(\lambda)$  (1924) et  $V'(\lambda)$ (1931) qui décrivent la sensibilité spectrale relative de l'œil humain en vision photopique et scotopique respectivement (Cf. Figure 18).



◆ Figure 18: sensibilités spectrales relatives de l'œil humain.

La sensibilité spectrale relative est ici le rapport de l'intensité de perception du stimulus optique à la puissance du rayonnement incident en fonction de la longueur d'onde (et normalisée à 1 au maximum de la fonction pour  $\lambda = 555$  nm) [25].

## 1.2 DÉFINITIONS

### 1.2.1 FLUX

Flux énergétique ( $\phi_e$ ) et flux photonique ( $\phi_p$ )

Dans la pratique, il n'est pas toujours aisé de relier les propriétés photométriques d'un rayonnement quelconque aux paramètres de la théorie ondulatoire (vecteur de Poynting). Aussi sans négliger l'aspect ondulatoire de la lumière, la radiométrie optique s'appuie plus volontiers sur les propriétés énergétiques d'un rayonnement: chaque photon transporte, à la vitesse de la lumière, une énergie individuelle  $u$ , proportionnellement à la fréquence  $\nu$  de son onde associée (théorie ondulatoire) suivant la relation de Planck:

$$u = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda_0}, \text{ où } h \text{ est la constante de Planck } (6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) \text{ et } \lambda_0 \text{ la longueur d'onde dans le vide.}$$

Pour une lumière quasi-monochromatique, la relation entre les deux flux est donc :  $\phi_e = \phi_p \times u$ .

Flux lumineux ou visuel ( $\phi_L$ ):

Enfin, à cause de l'importance et de la spécificité de l'œil humain en tant que capteur optique, on a défini un troisième type de flux appelé flux lumineux, dont l'unité est le lumen, pour quantifier les simulations visuelles des rayonnements sur un observateur humain dit "standard".

Si le flux monochromatique a une valeur  $\phi_e$  dans le système énergétique, sa valeur  $\phi_L$  dans le système lumineux est:

$$\phi_L(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda), \text{ en vision photopique, avec } K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{ et}$$

$$\phi_L(\lambda) = K'_m \cdot V'(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda), \text{ en vision scotopique, avec } K'_m = 173 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}.$$

Les valeurs numériques des coefficients de transfert  $K_m$  et  $K'_m$  ont été choisies de façon à raccorder au mieux le système actuel des grandeurs lumineuses avec le système précédent qui était basé sur la définition de la candela comme intensité lumineuse de  $1/60 \text{ cm}^2$  de corps noir à la température de solidification du platine (2042 K).

Les dénominations, définitions et unités des différents flux sont rappelées dans le tableau ci-après:

FLUX	NOTATION	DÉFINITION	UNITÉ
Energétique	$F_e$	Débit énergétique par unité de temps	watt [W]
Photonique	$F_p$	Débit de photons par unité de temps	seconde <sup>-1</sup> [s <sup>-1</sup> ]
Lumineux	$F_L$	"Stimulation visuelle"	lumen [lm]

◆ Tableau 4 : définitions des différents flux.

### 1.2.2 INTENSITÉ

L'intensité  $I$  d'un émetteur dans une direction donnée est le flux qu'il émet par unité d'angle solide dans la direction considérée. Dans le système d'unités énergétiques, l'intensité est exprimée en [W.sr<sup>-1</sup>].

$$I(\theta, \varphi) = \frac{dF_s(\theta, \varphi, d\Omega_s)}{d\Omega_s}$$

Pour chaque direction, la notion d'intensité caractérise le rayonnement de l'émetteur dans son ensemble, mais elle ne donne pas de renseignements sur la géométrie de la source elle-même (forme, dimension, répartition spatiale des contributeurs à ce rayonnement...). Ainsi deux rayonnements peuvent avoir la même intensité, le premier à partir de plusieurs petits émetteurs, et le second à partir d'un seul émetteur plus important.

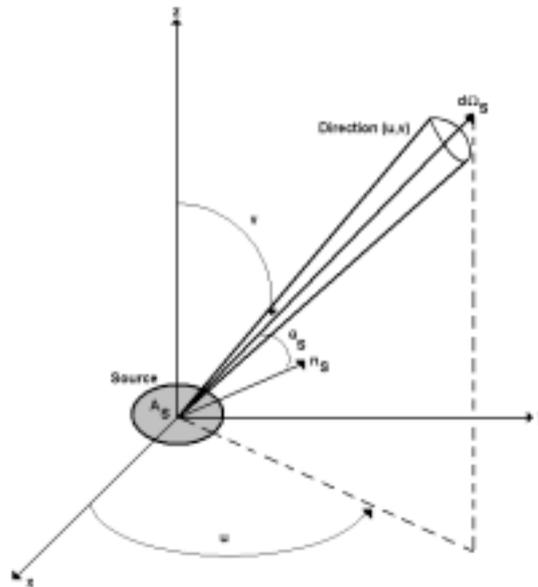
### 1.2.3 LUMINANCE (L)

Pour aller plus loin dans la caractérisation d'un rayonnement pour accéder à la fois à ses propriétés spatiales et angulaires, il faut isoler chacun des contributeurs individuels qui la composent et caractériser son émission, indépendamment des autres. Pour une surface émissive par exemple, il est possible d'isoler au moyen d'un diaphragme un petit élément d'aire  $dA_s$ , dont l'intensité élémentaire dans la direction  $(\theta, \varphi)$  est donné par l'expression suivante:

$$dI(x, y, z, \theta, \varphi) = \frac{d^2\phi_s(x, y, z, \theta, \varphi, d\Omega_s)}{d\Omega_s} [cd]$$

Par définition, la luminance au point (x,y) et dans la direction (θ,φ) est l'intensité par unité de surface apparente dans cette direction, soit:

$$L(x, y, z, \theta, \varphi) = \frac{d^2\phi_s(x, y, z, \theta, \varphi, d\Omega_s)}{dA_s \cos \theta_s d\Omega_s} [cd.m^{-2}]$$



◆ Figure 19 : Définition de la luminance

#### 1.2.4 ECLAIREMENT (E)

L'éclairement  $E$  d'un plan en un point donné est le flux incident par unité de surface de ce plan au point considéré.

$$E(x, y) = \frac{d\phi(x, y)}{dA_R} [lm.m^{-2}]$$

#### 1.2.5 EXITANCE (M)

L'exitance  $M$  d'une surface émissive en un point est le flux émis dans un demi-espace par unité d'aire de la surface émissive centrée en ce point.

$$M(x, y) = \frac{d\phi(x, y)}{dA_s} [lm.m^{-2}]$$

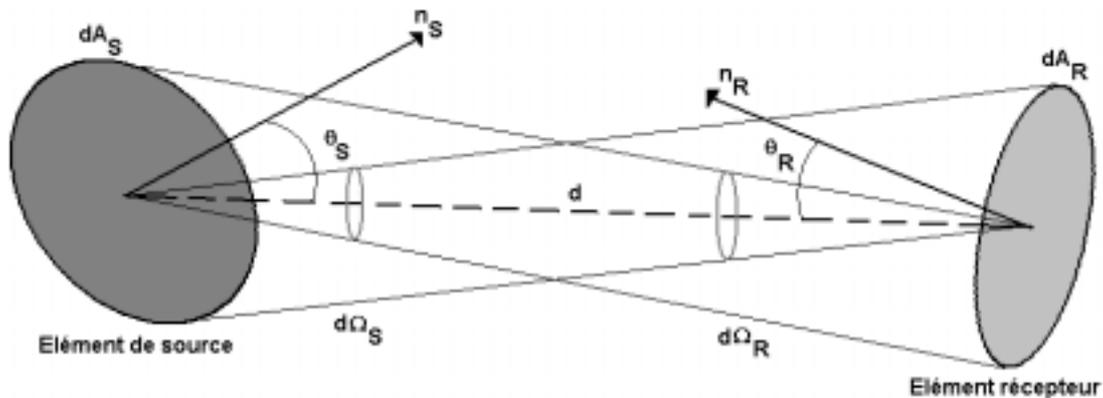
Le tableau suivant résume les principales unités radiophotométriques du Système international que l'on doit utiliser pour quantifier les grandeurs énergétiques, photoniques et lumineuses d'un rayonnement optique:

GRANDEUR	UNITÉS		UNITÉS LUMINEUSES
	ÉNERGÉTIQUES	PHOTONIQUES	
Flux	W (Power)	$s^{-1}$	lumen (lm) (Flux)
Intensité	$W.sr^{-1}$ (Intensity)	$s^{-1}.sr^{-1}$	candela (cd) (Intensity)
Luminance	$W.m^{-2}.sr^{-1}$ (Radiance)	$s^{-1}.m^{-2}.sr^{-1}$	$cd.m^{-2}$ (Luminance)
Exitance	$W.m^{-2}$ (Exitance)	$s^{-1}.m^{-2}$	$lm.m^{-2}$
Eclairement	$W.m^{-2}$ (Irradiance)	$s^{-1}.m^{-2}$	lux (Illuminance)
Quantité de lumière	J	Nbre de photons	$lm.s$
Exposition	$J.m^{-2}$ (Fluence)	Nbre de photons $m^{-2}$	$lux.s$

◆ Tableau 5: unités photométriques du SI.

### 1.3 RELATION ENTRE GRANDEURS

Ce paragraphe présente brièvement les relations de base entre certaines des grandeurs photométriques présentées dans les paragraphes précédents.



◆ Figure 20 : Définition de l'étendue géométrique

Le flux élémentaire émis par un petit élément de la source d'aire  $dA_S$  à l'intérieur de l'angle solide  $d\Omega_S$  est égale à :

$$d^2\phi_S = L_S . dA_S \cos\theta_S . d\Omega_S$$

Il est donc proportionnel d'un part à la luminance du rayonnement à cet endroit et pour la direction considérée et, d'autre part, à la grandeur  $d^2G = dA_S \cos\theta_S . d\Omega_S$ , qui est une caractéristique de la géométrie du montage, c'est à dire de la surface émissive de la source et de l'angle solide à l'intérieur duquel est évalué le flux. Cette grandeur est appelée l'étendue géométrique dans le cas du pinceau de lumière considéré. L'angle solide qui apparaît dans cette équation est celui sous lequel la source voit

le récepteur. On constate alors que l'étendue géométrique d'un pinceau lumineux défini par deux diaphragmes d'aire  $dA_S$  et  $dA_R$  situés à la distance mutuelle  $d$  peut s'exprimer de trois manières :

$$d^2G = \frac{dA_S \cos \theta_S \times dA_R \cos \theta_R}{d^2} = dA_S \cos \theta_S \cdot d\Omega_S = dA_R \cos \theta_R \cdot d\Omega_R$$

où  $d\Omega_R$  est l'angle solide sous lequel la source, d'aire élémentaire  $dA_S$ , est vue depuis le second diaphragme, et  $d\Omega_S$  l'angle solide sous lequel le récepteur, d'aire élémentaire  $dA_R$  est vu depuis le premier diaphragme. Dans la pratique, l'utilisation de ces trois formules plutôt que d'une autre sera dictée par la facilité de mise en œuvre.

### 1.3.1 FLUX ET INTENSITÉ

La définition de l'intensité lumineuse (Cf. §1.1) conduit à définir le flux émis dans l'angle solide  $\Omega_S$  par [22]:

$$\phi_{\Omega_S} = \int_{\Omega_S} I(u, v) \cdot d\Omega_S$$

### 1.3.2 ECLAIREMENT ET INTENSITÉ: LOI DE BOUGUER

Soit une source quasi-ponctuelle (ou très petite vis à vis de la distance du point de mesure). S'il n'y a pas de pertes en cours de propagation, le flux élémentaire, issu de la source et reçu par une surface plane d'aire élémentaire  $dA_R$  permet d'exprimer l'éclairement de cette surface:

$$E_R = \frac{dF_R}{dA_R} = \frac{I(u, v) \cdot \cos \theta_R}{d^2}$$

### 1.4 TEMPÉRATURE DE COULEUR ET LOI DE PLANCK

La température de couleur  $T_c$  d'une source thermique dans un domaine spectral donné est la température du corps noir dont le rayonnement a la même composition spectrale relative que celle de la source à l'intérieur de ce domaine.

Ainsi pour chaque  $\lambda$  appartenant à l'intervalle  $[\lambda_1; \lambda_2]$ :  $\left[ \frac{dL_e}{d\lambda} \right]_X^T (\lambda) = k \cdot \left[ \frac{dL_e}{d\lambda} \right]_{CN}^{T_c} (\lambda)$

où  $T$  est la température vraie et  $T_c$  la température de couleur recherchée.

La luminance du corps noir est alors donnée, pour une température  $T$ , par la relation de Planck :

$$\left[ \frac{dL_e}{d\lambda} \right]_{CN}^T (T, \lambda) = \frac{2 \times h \times c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \times c}{\lambda \times k \times T}} - 1}$$

---

## 2 CARACTÉRISTIQUES UTILES DES LAMPES UTILISÉES

---

### 2.1 GROUPE DE LAMPES DE FLUX PRIMAIRES : MOYENNE INTERNATIONALE DE 1985

La référence de flux lumineux est matérialisée par la moyenne des flux lumineux du lot de lampes dites primaires. Pour ces lampes, la moyenne du flux est  $\Phi = 2467,93 \text{ lm}$ .(Cf. tableau 6)

GROUPE :	PRIMAIRE 85					
N° Lampe :	162	163	168	496	499	500
Préchauffage (min)	6	6	6	6	6	6
Courant (A):	2.0051	2.0492	2.0252	1.97068	1.95932	1.95
Flux (lm):	2397.8	2654.3	2458.7	2443	2419	2434.8

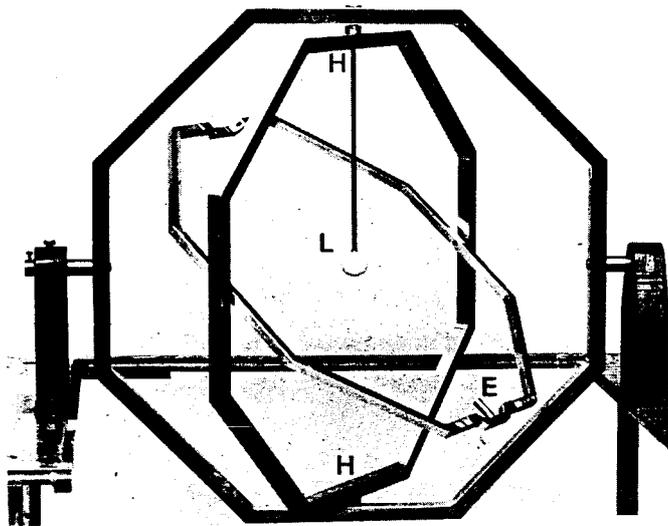
◆Tableau 6: caractéristiques utiles des lampes constituant le groupe primaire de flux lumineux.

### 2.2 GROUPE DE LAMPES ÉTALONS USUELLES DU BIPM

Au BIPM, les étalonnages en flux lumineux sont réalisés avec un groupe de lampes dit usuel dont la moyenne du flux est  $\Phi = 2653,5 \text{ lm}$ .(Cf. tableau 7)

GROUPE :	USUEL 97			
N° Lampe :	135	144	153	156
Préchauffage (min)	7	7	7	7
Courant (A):	2.0495	2.0522	2.04487	2.0278
Flux (lm):	2661	2675.5	2685.2	2592.3

◆Tableau 7: caractéristiques utiles des lampes constituant le groupe usuel de flux lumineux du BIPM.



◆ Figure 21 : Infrastructure pour une mesure de flux lumineux par méthode goniophotométrique

- [1] **Blevin W. R.**, *Diffraction Losses in Radiometry and Photometry*, Metrologia, 1970-**2**, pp. 39-44.
- [2] **Bonhoure J.**, *Sixth Comparison of National Standards of Luminous Intensity and Flux (1985)*, Metrologia, 1987-**24**, pp. 157-162.
- [3] **Desvignes F.**, *Rayonnements optiques, radiométrie-photométrie*, Masson, 1991.
- [4] **Hartmann J. et al.**, *A non-contact technique providing improved accuracy in area measurements of radiometric apertures*, Metrologia, 2000-**37**, pp. 637-640.
- [5] **Ikonen E.**, *A New optical method for high-accuracy determination of aperture area*, Metrologia, 1998-**35**, pp. 369-372.
- [6] **Lathi K.**, *Realization of luminous flux scale using the absolute integrating sphere method*, Metrologia, 2000-**37**, pp. 595-598.
- [7] **Meyzonnette J-L., Lépine T.**, *Bases de Radiométrie optique (seconde édition)*, Cépaduès Editions, 2001.
- [8] **Ohno Y., Lindermann M., Sauter G.**, *Analysis of Integrating Sphere Errors for Lamps having different Intensity distributions*, Journal of IES, 1996, pp. 107-114.
- [9] **Ohno Y., Goodmann T., Sauter G.** *Trilateral intercomparison of National Standards Units maintained at NIST, NPL, and PTB*, Journal of Research of NIST, **1**, 104, 1999, pp. 47-57.
- [10] **Ohno Y., Sauter G.**, *1993 Intercomparison of Photometrics units Maintained at NIST and PTB*, Journal of Research of NIST, **3**, 100, 1995, pp. 227-239.
- [11] **Ohno Y., Köhler R., Stock M.**, *An AC / DC technique for the absolute integrating sphere method*, Metrologia, 2000-**37**, pp. 583-586.
- [12] **Ohno Y.**, *NIST Measurements services: photometrics calibrations*, NIST Special Publication **250-37**, 1997, 66p.
- [13] **Ohno Y.**, *Detector-Based Luminous flux calibration Using the Absolute Integrating Sphere Method*, Metrologia, 1998-**35**, pp. 473-478.
- [14] **Ohno Y.**, *Improved Photometric Standards and Calibration Procedures at NIST*, , Journal of Research of NIST, **3**, 102, 1997, pp. 323-331.
- [15] **Ohno Y.**, *Integrating Sphere Simulation: application to flux scale realization*, *Applied Optics*, **33**, N°13, 1994, pp. 2637-2647.
- [16] **Ohno Y.**, *Detector-Based Integrating Sphere Photometry*, CIE 24<sup>th</sup> session, 1999, pp.155-160.
- [17] **Ohno Y.**, *Realization of NIST Luminous Flux Scale Using an Integrating Sphere with an external source*, CIE 23<sup>th</sup> session, 1995, pp. 87-90.

- [18] **Parr A.**, *The Candela and Photometric and Radiometric Measurements*, Journal of Research of NIST, **1**, 106, 2001, pp. 150-186.
- [19] *Handbook of Applied Photometry*, Casimer DeCusatis, 1997, AIP Editions.
- [20] **Steel W. H., De M., Bell J. A.**, *Diffraction Corrections in Radiometry*, Journal of the Optical Society of America, **62-9**, 1972, pp.1099-1103.
- [21] **Stock M.**, *Adjustement of the photometric standarts maintained at the BIPM*, Metrologia, 2002-**39**, pp. 113-114.
- [22] **Pérez J-P**, *Optique : Fondements et Applications*, Masson Sciences, 2000, 6<sup>ème</sup> édition, Dunod.
- [23] **Parr A.**, *The Candela and Photometric and Radiometric Measurements*, Journal of Research of NIST, **1**, 106, 2001, pp. 150-186.
- [24] Le Système International d'Unités, BIPM 7<sup>ème</sup> édition, 1998, pp. 20-21.
- [25] CIE Technical Report N° 84, *The measurement of luminous flux*, 1<sup>ère</sup> édition, 1989.
- [26] **Zabarel P.**, *Mise en œuvre d'un banc de comparaison de photomètres et études de leurs caractéristiques*, Rapport de stage DESS Physique et systèmes de mesures (Université Paris VII), 1996, 40 pp.