

Mise en pratique de la définition de la candela et des unités dérivées associées pour les grandeurs photométriques et radiométriques dans le Système international d'unités (SI)

Document préparé par le Sous-groupe de travail 5 (mise en pratique)
du Groupe de travail du CCPR sur la stratégie

Juillet 2015

TABLE DES MATIÈRES

0. Introduction

1. Définition de la candela et relations entre la photométrie, la radiométrie et les grandeurs exprimées en nombre de photons

1.1 Photométrie, radiométrie et candela

1.2 Photométrie et grandeurs exprimées en nombre de photons

1.3 Différentes approches concernant la réalisation des unités photométriques, des unités radiométriques et de la candela

2. Réalisation pratique des unités radiométriques

2.1 Traçabilité radiométrique fondée sur le détecteur

2.2 Traçabilité radiométrique fondée sur la source

3. Réalisation pratique des unités exprimées en nombre de photons

4. Réalisation pratique des unités photométriques

4.1 Voies de traçabilité pour la réalisation pratique des unités photométriques

4.1.1 Traçabilité photométrique fondée sur le détecteur

4.1.2 Traçabilité photométrique fondée sur la source

4.2 Réalisation pratique de la candela (cd), unité de base du SI d'intensité lumineuse, I_v

4.3 Réalisation pratique du lumen (lm), unité dérivée du SI de flux lumineux, ϕ_v

4.4 Réalisation pratique du lux (lx), unité dérivée du SI d'éclairement lumineux, E_v

4.5 Réalisation pratique de la candela par mètre carré (cd m^{-2}), unité dérivée du SI de luminance lumineuse, L_v

5. Considération sur l'incertitude de mesure

Références

0. Introduction

L'objectif de la présente mise en pratique, préparée par le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) du Comité international des poids et mesures (CIPM) et approuvée par le CIPM, est de donner des indications sur la manière de réaliser en pratique la candela et les unités associées en photométrie et radiométrie. Le champ d'application de la mise en pratique souligne le fait que les domaines de la photométrie et de la radiométrie, ainsi que leurs unités, sont étroitement liés par l'actuelle définition de l'unité de base du SI pour la grandeur photométrique intensité lumineuse : la candela.

Contrairement à la précédente version de la mise en pratique de la candela, cette version mise à jour ne couvre pas uniquement la réalisation de la candela mais traite aussi de la réalisation d'autres unités associées pour les grandeurs photométriques et radiométriques. Les récents progrès effectués en matière de génération et de manipulation de photons individuels s'avèrent très prometteurs en ce qui concerne la production de flux énergétiques avec un nombre bien établi de photons. Ainsi, la présente mise en pratique comprend également des informations sur la réalisation pratique d'unités de grandeurs photométriques et radiométriques fondée sur des techniques dépendant du nombre de photons. Dans les pages suivantes, le terme plus court d'« unités photométriques et radiométriques » sera utilisé pour désigner les unités utilisées pour les grandeurs photométriques et radiométriques.

La Section 1 décrit la définition de la candela qui introduit une relation étroite entre les unités photométriques et celles radiométriques. Les Sections 2 et 3 décrivent la réalisation pratique des unités radiométriques et des unités exprimées en nombre de photons, respectivement. La Section 4.1 explique comment les unités photométriques sont, de façon générale, dérivées d'unités radiométriques. Les Sections 4.2 à 4.5 traitent des conditions géométriques particulières pour réaliser certaines unités photométriques spécifiques. Enfin, la Section 5 évoque de façon très succincte l'évaluation de l'incertitude de mesure dans le domaine de la photométrie.

1. Définition de la candela et relations entre la photométrie, la radiométrie et les grandeurs exprimées en nombre de photons

1.1. Photométrie, radiométrie et candela

La candela est l'unité de base du SI pour la grandeur photométrique intensité lumineuse. Dans le SI, la définition de la candela établit la relation entre les unités photométriques et celles radiométriques pour les configurations géométriques communes aux deux domaines de mesure. La candela, cd, l'unité d'intensité lumineuse, telle qu'adoptée par la CGPM à sa 16^e réunion (1979), est définie comme suit [1] :

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

Il en résulte que l'efficacité lumineuse, K_{cd} , d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz est égale à exactement 683 lorsqu'elle est exprimée en unités du SI $cd \cdot sr/W = lm/W$.

Cette définition, exprimée en termes strictement physiques, est donnée pour une seule fréquence de rayonnement électromagnétique. L'objectif de la photométrie est de mesurer la lumière de façon à ce que le résultat de mesure soit en corrélation avec la sensation visuelle de luminosité ressentie par un observateur humain pour le même rayonnement. La plupart des sources lumineuses émettent un vaste spectre de fréquences. Ainsi, la Commission internationale de l'éclairage (CIE) a défini un ensemble de fonctions de pondération spectrales ou spectres d'action, connues sous le nom de fonctions d'efficacité lumineuse spectrale, qui décrivent la sensibilité spectrale relative de l'œil humain moyen dans des conditions de vision spécifiques. Ces fonctions sont définies en fonction de la longueur d'onde dans l'air normal (air sec à 15 °C et 101 325 Pa, contenant 0,03 % par volume de dioxyde de carbone [2]) et sont normalisées à la valeur un à leur maximum. La constante, K_{cd} , associée aux fonctions d'efficacité lumineuse spectrale, permet de relier les grandeurs photométriques aux grandeurs radiométriques pour établir un système cohérent du point de vue métrologique.

En 2007, le CIPM a conclu un accord avec la CIE, dans lequel les deux organisations reconnaissent que :

- le CIPM est responsable de la définition des unités photométriques dans le SI,
- la CIE est en charge de la normalisation des fonctions d'efficacité lumineuse spectrale de l'œil humain.

Pour plus de détails sur les fonctions d'efficacité lumineuse spectrale de l'œil humain et sur les définitions des grandeurs photométriques associées, veuillez consulter la publication commune au CIPM et à la CIE : *Principes régissant la photométrie*, 2^e édition [2].

En photométrie, il est de pratique courante d'indiquer la longueur d'onde, λ , dans l'air. Toutefois, la manière la plus sûre d'identifier un rayonnement monochromatique dans le spectre est d'indiquer sa fréquence, f , puisque la fréquence ne dépend pas du milieu dans lequel la lumière se propage. Les valeurs de f et λ sont liées comme suit :

$$f\lambda = c/n_a(\lambda) \quad (1)$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide et équivaut à $2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$, et $n_a(\lambda)$ l'indice de réfraction de l'air. À noter que la valeur de $n_a(\lambda)$ dépend de la pression partielle de chaque constituant de l'air, ainsi que de la longueur d'onde [3]. Dans l'air normal, tel que défini ci-dessus [2], l'indice de réfraction de l'air, $n_a(\lambda)$, est proche de 1,000 28 pour tout le spectre visible.

Pour une source lumineuse pratique, c'est-à-dire toute source lumineuse qui n'émet pas uniquement à la longueur d'onde correspondant à $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$, les grandeurs photométriques correspondantes sont définies en termes strictement physiques comme des grandeurs physiques proportionnelles à l'intégrale de la distribution de puissance spectrale de la source lumineuse (déterminée pour une configuration géométrique appropriée), pondérée selon une fonction d'efficacité lumineuse spectrale particulière et convertie en valeurs photométriques absolues à l'aide de l'efficacité lumineuse, telle que définie pour la candela.

Ainsi, les grandeurs photométriques (fondées sur un observateur humain) sont liées aux grandeurs radiométriques par des relations simples. La forme générale de l'équation reliant une grandeur radiométrique spectrale donnée, $X_{e,\lambda}(\lambda)$, à sa grandeur photométrique correspondante, $X_{v,x}$, est indiquée ci-après :

$$X_{v,x} = \frac{K_{cd}}{V_x(\lambda_a)} \int_{\lambda} X_{e,\lambda}(\lambda) V_x(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

où $\lambda_a = 555,017 \text{ nm}$ est la longueur d'onde dans l'air normal [3] à la fréquence $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ donnée dans la définition de la candela et $V_x(\lambda)$ l'une des fonctions d'efficacité lumineuse spectrale de la CIE, l'indice « x » précisant la fonction en question.

Parmi ces fonctions visuelles, la plus importante est la fonction d'efficacité lumineuse de l'œil humain en vision photopique (adaptée à la lumière), $V(\lambda)$, qui est définie par la CIE dans le domaine de longueurs d'onde compris entre 360 nm et 830 nm à intervalles de 1 nm. Lorsque des valeurs intermédiaires par rapport à ces longueurs d'onde définies sont nécessaires, elles sont calculées par interpolation linéaire [2,4]. La valeur maximale pour cette fonction est située à une longueur d'onde λ d'exactly 555 nm dans l'air normal [4]. Dans des conditions d'obscurité, la CIE a normalisé la fonction d'efficacité lumineuse spectrale scotopique, $V'(\lambda)$: elle est similaire par sa forme à $V(\lambda)$ mais atteint sa valeur maximale à une longueur d'onde plus courte par rapport à la courbe photopique.

La CIE a récemment défini un système de fonctions d'efficacité lumineuse spectrale correspondant aux niveaux de luminance situés entre les conditions photopiques et celles scotopiques, c'est-à-dire la région mésopique, ce qui permet d'avoir des fonctions visuelles normalisées pour tous les états d'adaptation visuelle. Les définitions détaillées de ces fonctions et d'autres fonctions importantes d'efficacité lumineuse spectrale de la CIE sont présentées dans la publication commune au CIPM et à la CIE récemment mise à jour : *Principes régissant la photométrie* [2]. La présente mise en pratique et les *Principes régissant la photométrie* sont des documents interdépendants qui décrivent de façon exhaustive l'actuel système de photométrie physique pratique.

Les équations de base qui relient des grandeurs photométriques spécifiques (selon différentes géométries de mesure) aux grandeurs radiométriques correspondantes sont données en [2]. Étant donné les niveaux de puissance et le domaine de longueurs d'onde impliqués, les concepts classiques, pour le rayonnement électromagnétique, de sources incohérentes et de faisceaux de rayonnement élémentaires (optique géométrique) sont utilisés pour décrire les grandeurs photométriques. En plus des aspects spectraux, il est important de noter que la définition des grandeurs photométriques et radiométriques repose aussi sur la propagation de la lumière dans l'espace, de sorte qu'il est nécessaire pour définir ces grandeurs de définir également les paramètres géométriques intrinsèques considérés comme essentiels dans le domaine de la photométrie physique [2].

Pour la définition de la candela, ces paramètres géométriques sont la direction donnée du flux énergétique en un point donné d'une surface irradiante réelle ou fictive, ainsi que l'angle solide propagé par le faisceau et contenant cette direction donnée. Pour les unités photométriques dérivées, il est essentiel de préciser d'autres paramètres géométriques, tels que l'aire d'une section du faisceau au point donné (source ou détecteur) et l'angle entre la normale et l'élément de la surface contenant le point (source ou détecteur).

1.2 Photométrie et grandeurs exprimées en nombre de photons

Les grandeurs exprimées en nombre de photons sont des grandeurs de rayonnement optique exprimées en fonction d'un nombre de photons, ou flux de photons, connu. En raison de la dualité du rayonnement électromagnétique, les grandeurs photométriques et/ou énergétiques spectrales peuvent également être exprimées en fonction de grandeurs fondées sur un nombre de photons. Pour les longueurs d'onde dans l'air, la relation entre une grandeur énergétique spectrale à une longueur d'onde donnée, $X_{e,\lambda}(\lambda)$, et la grandeur correspondante exprimée en nombre de photons, $X_{p,\lambda}(\lambda)$, est la suivante :

$$X_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{hc}{\lambda} \cdot n_a(\lambda) \cdot X_{p,\lambda}(\lambda) \quad (3)$$

où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière dans le vide, et $n_a(\lambda)$ l'indice de réfraction dans l'air à la longueur d'onde donnée, λ .

Ainsi, en combinant les équations 2 et 3, la forme générale de l'équation reliant une grandeur photométrique donnée, $X_{v,x}$, à sa grandeur correspondante exprimée en nombre de photons, $X_{p,\lambda}(\lambda)$, est donnée ci-après :

$$X_{v,x} = K_{p,x} \int_{\lambda} X_{p,\lambda}(\lambda) \frac{n_a(\lambda) V_x(\lambda)}{\lambda} d\lambda \quad (4)$$

où

$$K_{p,x} = \frac{K_{cd} hc}{V_x(\lambda_a)} \quad (5)$$

où $K_{p,x}$ est le facteur de conversion des grandeurs photométriques en grandeurs exprimées en nombre de photons pour la fonction d'efficacité lumineuse spectrale, $V_x(\lambda)$.

1.3 Différentes approches concernant la réalisation des unités photométriques, des unités radiométriques et de la candela

En général, l'expression « réaliser une unité » signifie établir la valeur (dans les limites de l'incertitude associée) d'une grandeur de même nature que l'unité, en respectant la définition de l'unité. S'il est généralement exact que toute méthode respectant les lois de la physique et la définition de l'unité de base du SI peut être utilisée pour réaliser une unité de base ou une unité dérivée du SI, des considérations particulières s'imposent dans le cas de la photométrie afin de s'assurer que l'unité réalisée est appropriée pour mesurer des sources lumineuses pratiques, c'est-à-dire des sources qui n'émettent pas uniquement à la longueur d'onde correspondant à la fréquence 540×10^{12} Hz. La liste des méthodes données dans le présent document ne constitue pas une liste exhaustive des possibilités de mise en pratique mais plutôt une liste des méthodes les plus simples à mettre en œuvre et/ou celles permettant d'obtenir les incertitudes les plus faibles. De plus amples détails sur les méthodes existantes pour réaliser les unités photométriques et radiométriques sont donnés en [5].

Étant donné que la définition de la candela relie les unités photométriques aux unités radiométriques, la réalisation pratique de la candela et des unités photométriques dérivées se fonde presque toujours sur une réalisation pratique d'unités radiométriques. Ainsi, le présent document commence, en toute logique, par une description des méthodes de réalisation pratique des unités radiométriques afin de fournir les bases nécessaires pour décrire la mise en pratique de la candela.

2. Réalisation pratique des unités radiométriques

Il existe deux types de méthodes primaires couramment utilisées pour réaliser les unités radiométriques, en fonction de l'étalon primaire utilisé : celles fondées sur le détecteur et celles fondées sur la source.

2.1 Traçabilité radiométrique fondée sur le détecteur

Un radiomètre absolu est un instrument de détection qui mesure la quantité de rayonnement optique incident de façon directe par rapport à un autre phénomène physique mesurable (habituellement par une voie de traçabilité aux unités électriques du SI, ce qui permet une mesure présentant une incertitude plus faible par rapport à d'autres méthodes de mesure de la puissance optique). Un radiomètre absolu s'auto-étalonne : il n'est pas nécessaire de réaliser un étalonnage externe par rapport à un autre instrument de mesure de la puissance optique ou à une autre source de référence. Il existe deux types de radiomètres absolus, chacun assurant la traçabilité des mesures à des unités électriques du SI :

- Les radiomètres à substitution électrique : leur principe est que l'effet thermique provoqué par le rayonnement optique correspond à celui d'une puissance électrique substituée mesurée. Cette méthode éprouvée est désormais le plus couramment réalisée avec des instruments refroidis à des températures cryogéniques ($< \sim 20$ K), ce qui permet de réduire de façon significative de nombreuses sources d'incertitude ; ces instruments sont appelés « radiomètres cryogéniques ». Plus de détails à ce sujet sont donnés en [5-7].
- Les photodiodes d'efficacité quantique prévisible : ces photodiodes sont constituées de semi-conducteurs à faible perte, généralement en silicium, et sont fondées sur un modèle précis de conversion de photons en électrons et de leur détection, afin de déterminer la quantité de rayonnement optique incident à partir de la mesure du courant photo-électrique généré. Bien qu'initialement fondée sur un auto-étalonnage de photodiodes simples, cette méthode a gagné en importance grâce à la construction de « détecteurs pièges » qui augmentent l'efficacité de la détection par la création de pièges à lumière à réflexion multiple entre un certain nombre de photodiodes à sorties combinées électriquement. Plus de détails à ce sujet sont donnés en [5,8,9].

Il est à noter que les radiomètres absolus sont sensibles à un large domaine spectral et ne peuvent en eux-mêmes fournir d'informations sur la distribution de puissance spectrale de la source mesurée. Il est nécessaire d'ajouter un élément spectralement sélectif (tel qu'un filtre) pour obtenir des informations spectrales. Par ailleurs, cet élément doit être étalonné de façon

indépendante en ce qui concerne les valeurs absolues de transmittance régulière spectrale afin que le radiomètre soit considéré comme « absolu ». Dans la pratique, la réalisation de la définition de la candela implique souvent d'effectuer des mesures radiométriques à un certain nombre de longueurs d'onde, à l'aide de sources lumineuses fondées sur un laser ou un monochromateur. En outre, il doit être noté que les radiomètres absolus mesurent généralement la quantité de flux énergétique absorbé, sans tenir compte des aspects géométriques de la lumière qui sont particulièrement importants en photométrie.

2.2 Traçabilité radiométrique fondée sur la source

Une source absolue est une source dont on peut prédire la quantité de rayonnement optique émis en mesurant d'autres paramètres physiques. Le rayonnement optique produit par toute autre source peut alors être mesuré par comparaison directe avec la source absolue. Il existe deux types de sources qui peuvent être considérées comme absolues sous certaines conditions :

- Le radiateur de Planck : Pour une cavité de forte émissivité (proche de un), il est possible de déterminer la luminance énergétique spectrale émise à partir de la température thermodynamique de la cavité à l'aide de la loi de Planck sur le rayonnement du corps noir. Dans ce cas, la traçabilité est assurée à l'unité de température du SI, le kelvin. Pour de nombreuses applications de haute exactitude, la température thermodynamique de la cavité est mesurée à l'aide d'un détecteur à filtre étalonné à l'aide d'une méthode radiométrique (appelé « radiomètre à filtre ») ; dans ce cas, il est considéré de façon plus appropriée que la traçabilité, qui est assurée aux unités électriques du SI, repose sur le détecteur, comme décrit à la section 2.1. Si la distribution de luminance de la source est constante dans toutes les directions, il est possible, en plaçant un diaphragme de précision devant le radiateur de Planck, à une distance suffisante et dans une certaine direction, de convertir la luminance énergétique spectrale calculée en intensité énergétique spectrale prévisible.
- L'anneau de stockage d'électrons produisant un rayonnement synchrotron : Les électrons relativistes sur une orbite circulaire émettent un rayonnement synchrotron. Dans certaines conditions, cette source peut être considérée comme absolue et, dans ce cas, l'intensité énergétique spectrale (en W rad^{-1}) du rayonnement synchrotron émis peut être déterminée à partir de paramètres connus et mesurés de l'anneau de stockage et de paramètres géométriques en utilisant l'équation de Schwinger [10]. Dans ce cas, la traçabilité est assurée aux unités de longueur et aux unités électriques du SI. Le rayonnement synchrotron couvre une large gamme dynamique de flux de photons allant jusqu'à 12 décades, ce qui permet d'adapter le flux de photons à la sensibilité du système de détection à l'étude, sans changer la forme du spectre émis. Cela est réalisé en ajustant de façon adéquate le nombre d'électrons stockés, du courant maximum à un unique électron.

3. Réalisation pratique des unités exprimées en nombre de photons

Les unités exprimées en nombre de photons, notamment pour les grandeurs flux photonique (nombre de photons par seconde) ou éclairage photonique (nombre de photons par seconde par unité de surface) dans le cas d'applications radiométriques de faible flux, peuvent être réalisées en pratique à l'aide des méthodes radiométriques fondées sur le détecteur ou la source, précédemment décrites, et du facteur de conversion des grandeurs radiométriques en grandeurs exprimées en nombre de photons en utilisant l'équation 3. Toutefois, il est également possible d'utiliser des sources produisant des photons uniques à un débit connu ainsi que le comptage de photons comme méthode primaire de réalisation des unités exprimées en nombre de photons associées. Dans le présent document, l'expression « dépendant du nombre de photons » fait référence à cette approche.

Récemment, il s'est avéré pratique, en particulier dans le cas d'applications émergentes telles que l'optique quantique, de considérer la nature quantique du rayonnement électromagnétique comme une voie primaire de traçabilité au SI. Chaque photon pouvant être considéré comme un quantum d'énergie dépendante de sa fréquence, il est simple, sur le plan conceptuel, de corrélérer le nombre de photons à une quantité d'énergie ou de puissance. Des photons individuels peuvent être générés (à l'aide notamment de matériaux non linéaires ou de sources optiques et électriques à photon unique) et comptés (à l'aide notamment de photomultiplicateurs, de diodes avalanche à photon unique, de détecteurs à nanofils supraconducteurs et de capteurs TES (Transition Edge Sensors)). Plus de détails sur les méthodes permettant d'assurer la traçabilité des unités de grandeurs radiométriques à l'aide de techniques dépendant du nombre de photons sont donnés en [5].

4 Réalisation pratique des unités photométriques

4.1 Voies de traçabilité pour la réalisation pratique des unités photométriques

La Section 2 décrit les voies de traçabilité pour la réalisation pratique des unités radiométriques. Comme précisé à la Section 1, les unités radiométriques étayent la réalisation des unités associées aux grandeurs photométriques (telles que l'intensité lumineuse, la luminance lumineuse, l'éclairage lumineux, le flux lumineux) par l'utilisation des fonctions d'efficacité lumineuse spectrale (afin de fournir une pondération spectrale) et de l'efficacité lumineuse à la fréquence 540×10^{12} Hz, comme indiqué dans la définition de la candela. Actuellement, l'incertitude la plus faible lors de la réalisation d'unités photométriques est obtenue lorsque que la chaîne de traçabilité repose dès le début sur un détecteur absolu mais cela pourrait aussi être le cas, dans le futur, avec une source absolue ou une méthode de comptage de photons. Les références [5] et suivantes apportent plus de détails à ce sujet.

4.1.1 Traçabilité photométrique fondée sur le détecteur

La méthode la plus courante pour réaliser les unités photométriques consiste à mesurer la grandeur photométrique associée à une source lumineuse de qualité métrologique (décrite de façon plus détaillée à la Section 4.2) dans la configuration géométrique souhaitée à l'aide d'un détecteur photométrique de référence dont la sensibilité spectrale, qui correspond à la fonction

d'efficacité lumineuse désirée, a été spectralement étalonnée pour un éclairage énergétique absolu traçable à un radiomètre absolu (voir Section 2.1) ; ce détecteur est équipé d'un diaphragme de précision et d'une surface étalonnée traçable à l'unité de longueur du SI. L'unité photométrique ainsi réalisée est ensuite transférée aux autres sources étalons normalisées (ou, dans une seconde étape, aux autres détecteurs photométriques), qui deviennent des sources (ou détecteurs) étalons photométriques secondaires pour la grandeur photométrique associée. Dans ce cas, la traçabilité, qui est assurée aux unités électriques du SI, repose sur le détecteur. Cette méthode requiert en général un étalonnage spectral supplémentaire pour établir la relation (erreur spectrale) entre la courbe de sensibilité spectrale du détecteur et la fonction d'efficacité lumineuse spectrale de la CIE appropriée. Afin de quantifier l'impact de cette erreur spectrale, il est aussi nécessaire d'effectuer un étalonnage spectral relatif de la source lumineuse. Si des grandeurs exprimées en nombre de photons sont mesurées de façon expérimentale comme décrit à la Section 3, elles peuvent être converties dans la grandeur photométrique associée à l'aide de l'équation 4, bien qu'il soit plus courant d'utiliser une intégrale pondérée par rapport à la fréquence plutôt que par rapport à la longueur d'onde.

4.1.2 Traçabilité photométrique fondée sur la source

Une autre méthode permet de réaliser directement les unités photométriques à partir d'une source absolue, dont la grandeur photométrique (dans la configuration géométrique appropriée) est calculée à l'aide de principes fondamentaux à partir des caractéristiques de la source elle-même. Dans ce cas, la traçabilité au SI repose sur la source. La source absolue (calculable) la plus courante est un corps noir (cavité à haute émissivité) à haute température dont on peut déterminer le flux énergétique émis à partir de la température thermodynamique de la cavité à l'aide de la loi de Planck sur le rayonnement. Dans ce cas, la traçabilité est assurée à l'unité de température du SI, le kelvin. Toutefois, aux températures élevées habituellement requises pour les applications photométriques, la température thermodynamique est généralement déterminée par inversion de la loi de Planck à l'aide d'une mesure quasi-monochromatique du flux énergétique absolu émis par le radiateur, effectuée avec un ou plusieurs détecteurs à bande étroite qui ont été étalonnés par rapport à un radiomètre absolu de référence, tel que décrit à la Section 2.1. Dans ce cas, il est considéré de façon plus appropriée que la traçabilité, qui est assurée aux unités électriques du SI, repose sur le détecteur.

4.2 Réalisation pratique de la candela (cd), unité de base du SI d'intensité lumineuse, I_v

La candela (cd) est le plus souvent réalisée à l'aide d'une lampe étalon dont la conception physique est optimisée pour une utilisation dans une direction donnée afin d'obtenir une source lumineuse (filament) de petite taille par rapport à la distance entre la source et le diaphragme de limitation de la surface active du détecteur, de façon à ce que la lampe étalon puisse être considérée comme un point source dans cette direction spécifique. Dans le cas d'une lampe étalon à filament de tungstène (forme la plus couramment utilisée), les paramètres électriques de fonctionnement de la source sont habituellement choisis de façon à

ce que l'émission spectrale de la source s'approche de l'illuminant A normalisé de la CIE [11], qui a la même émission relative spectrale qu'un radiateur de Planck fonctionnant à une température d'environ 2 856 K. La configuration géométrique est établie en fonction de la relation pour l'intensité énergétique dans une direction donnée, $I = \Phi / \Omega$, et de l'approximation de l'angle solide pour de grandes distances, $\Omega = A / r^2$, où Φ est le flux énergétique produit par la source d'intensité énergétique I passant dans le diaphragme d'aire A , et r la distance entre la source et le diaphragme. Il est à noter que, comme l'angle solide (Ω) est une grandeur sans dimension, l'intensité énergétique a la même dimension que le flux énergétique (Φ), exprimé en watts (W), unité dérivée du SI, ce qui peut prêter à confusion lorsque l'intensité énergétique est exprimée uniquement en unités de base du SI, c'est-à-dire en mètres (m), kilogrammes (kg) et secondes (s). Il est ainsi recommandé d'inclure de façon explicite l'unité dérivée du SI, sr, comme indiqué à la Section 1.1 dans la définition de K_{cd} , afin d'établir clairement la dépendance géométrique de la grandeur. L'équation 2 permet de convertir l'intensité énergétique en intensité lumineuse à l'aide de la fonction d'efficacité lumineuse spectrale de la CIE appropriée et de la constante photométrique, K_{cd} [2].

En principe, il est possible de réaliser la candela à l'aide d'une lampe monochromatique de référence stable émettant à la longueur d'onde, λ_a , correspondant à la fréquence indiquée dans la définition de la candela (Section 1.1), et montée sur un banc photométrique à une distance connue, r , du diaphragme de limitation (aire A) d'un radiomètre absolu mesurant le flux énergétique. Cette configuration permet de calculer l'intensité énergétique à cette longueur d'onde, $I_e(\lambda_a)$. L'intensité lumineuse de la lampe est ensuite obtenue à l'aide de la relation : $I_v = K_{cd} V(\lambda_a) I_e(\lambda_a)$. Toutefois, cette réalisation de la candela serait peu utile pour les mesures de sources pratiques à large bande. Ainsi, la réalisation pratique de la candela s'effectue principalement à l'aide de l'une des deux méthodes suivantes, en fonction des voies de traçabilité décrites aux Sections 4.1.1 et 4.1.2 :

- Méthode A : elle repose sur une source polychromatique suffisamment petite et formant un champ de rayonnement presque isotrope dans la direction de mesure. La source est généralement une source incandescente dont la répartition spectrale relative d'énergie est proche de celle de l'illuminant A normalisé de la CIE. Pour utiliser la source comme lampe de référence concernant l'intensité lumineuse, il est nécessaire de caractériser le spectre. L'intensité énergétique spectrale, $I_e(\lambda)$, dans une direction donnée est mesurée, de façon typique, à une distance suffisamment grande, r , en utilisant plusieurs radiomètres à filtre de référence étalonnés, dont la sensibilité à l'éclairement énergétique est connue, à quelques longueurs d'onde du domaine visible entre 360 nm et 830 nm ou en utilisant un spectroradiomètre avec un dispositif optique d'entrée approprié pour l'éclairement énergétique, qui a été étalonné de manière absolue pour la sensibilité à l'éclairement énergétique. Pour ces mesures, la lampe doit être réglée selon des conditions de fonctionnement spécifiques (orientation de la lampe, direction de la mesure et du courant de la lampe) et il est nécessaire de connaître avec précision et de contrôler la distance, r , entre la source et l'aire du diaphragme de limitation du détecteur, A . L'intensité énergétique de la source polychromatique est mesurée sur l'ensemble du domaine visible de longueurs d'onde, soit directement à intervalles réguliers rapprochés, soit à un nombre suffisant de longueurs d'onde fixes pour permettre une

interpolation et une extrapolation à d'autres longueurs d'onde à l'aide du modèle physique approprié. Ces valeurs peuvent ensuite être multipliées par la fonction d'efficacité lumineuse spectrale de la CIE souhaitée et intégrées spectralement pour obtenir l'intensité lumineuse correspondante.

- **Méthode B** : elle repose sur un luminancemètre de référence, qui est un radiomètre à filtre dont la sensibilité spectrale relative est conçue pour être très proche des caractéristiques spectrales de la fonction d'efficacité lumineuse spectrale de la CIE souhaitée. Ce radiomètre à filtre, généralement utilisé en combinaison avec un diaphragme de précision, est étalonné par rapport à un radiomètre absolu pour connaître sa sensibilité à l'éclairement ($A \text{ lm}^{-1}\text{m}^2$). Dans la plupart des cas, cet étalonnage par rapport à un radiomètre absolu permet de déterminer la sensibilité à l'éclairement spectral absolu ($A \text{ W}^{-1} \text{ m}^2 \text{ nm}^{-1}$) à des longueurs d'onde fixes et il est accompagné de mesures effectuées par rapport à d'autres détecteurs de référence (tels que des détecteurs pièges en silicium ou des détecteurs d'efficacité quantique prévisible) afin de permettre une interpolation à intervalles réguliers du domaine visible de longueurs d'onde. Ces valeurs spectrales sont ensuite converties en sensibilité à l'éclairement (pour une source spécifique) par intégration. Le luminancemètre de référence ainsi étalonné peut ensuite être utilisé pour étalonner une lampe étalon en termes d'intensité lumineuse dans une direction donnée au moyen d'un banc photométrique, ce qui permet de contrôler avec soin la grandeur géométrique de distance, r , entre la source et l'aire d'ouverture de limitation du luminancemètre, A , ainsi que l'alignement de la lampe et la direction de la mesure. Un étalonnage spectral de la source lumineuse peut aussi être nécessaire pour corriger une erreur spectrale entre le luminancemètre et la fonction d'efficacité lumineuse spectrale de la CIE requise.

4.3 Réalisation pratique du lumen (lm), unité dérivée du SI de flux lumineux, ϕ_v

Le lumen (lm ou $\text{cd}\cdot\text{sr}$) peut être dérivé d'une réalisation de l'unité du SI d'intensité lumineuse, I_v , la candela, et de l'unité d'angle solide, Ω , le stéradian. Pour une source d'intensité uniforme dans l'angle solide défini, il est possible de déterminer le flux lumineux, Φ_v , à l'aide simplement de la relation $\phi_v = I_v \Omega$. Pour le cas plus courant d'une source dont l'intensité varie en fonction de la direction, le flux lumineux est obtenu à partir de l'intégration angulaire de la distribution d'intensité lumineuse de la source, $I_v(\theta, \varphi)$, mesurée sur une surface sphérique en fonction de la relation : $\Phi_v = \iint I_v(\theta, \varphi) \sin \theta \, d\varphi \, d\theta$, où θ est l'angle polaire et φ l'angle azimutal dans un système de coordonnées sphériques ; l'intégration est effectuée sur $0 \leq \theta \leq \pi$ et $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Ainsi, le lumen peut également être réalisé par une mesure effectuée à l'aide d'un luminancemètre de référence, comme décrit dans la Méthode B (Section 4.2). Plusieurs configurations géométriques peuvent être utilisées :

- (a) Le flux lumineux émis par une source lumineuse au travers du diaphragme d'aire A connue peut être établi en effectuant une approximation de l'angle solide pour de grandes distances, $\Omega = A/r^2$, et en plaçant le diaphragme A à une distance r connue de la source d'intensité lumineuse.

(b) Le flux lumineux émis dans un angle solide plus large que celui utilisé pour réaliser l'intensité lumineuse pour une lampe de référence connue peut être déterminé à l'aide de plusieurs méthodes d'intégration spatiales de sections plus petites. Pour chacune de ces méthodes d'intégration spatiale, le détecteur utilisé doit être soit un photomètre dont la sensibilité spectrale est proche de la fonction d'efficacité lumineuse spectrale souhaitée et dont la sensibilité au flux lumineux a été étalonné à l'aide de la configuration (a) précédemment décrite, soit un luminancemètre de référence qui a été étalonné tel que décrit dans la Méthode B (Section 4.2). L'intégration du flux lumineux est effectuée à l'aide de l'un des dispositifs suivants :

- un goniophotomètre pour des mesures sur un angle solide défini de la source : si le flux lumineux total émis par la source lumineuse est requis, l'intégration est effectuée sur l'ensemble de l'angle solide $0 \leq \theta \leq \pi$ et $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Il est à noter que si un luminancemètre étalonné selon les méthodes de la Section 4.4 est utilisé, l'intégration spatiale de la source est réalisée sur un angle solide qui est défini par la sensibilité à l'éclairement du détecteur (dans un certain angle solide où l'intensité lumineuse doit être constante) et la distance entre le détecteur et la source.
- une sphère intégrante associée à un détecteur, dont la sensibilité spectrale pour la combinaison sphère/détecteur est proche de la fonction d'efficacité lumineuse spectrale souhaitée et qui a été étalonné, par exemple, en introduisant une quantité connue (mesurée dans la configuration (a) précédemment présentée) de flux lumineux dans la sphère. Le flux lumineux émis à partir d'une section choisie de la source est mesuré en introduisant seulement cette partie du flux dans la sphère. Si l'on souhaite mesurer le flux lumineux cumulé de la source pour un angle solide de 4π sr, ce flux lumineux total (de la source) est déterminé en plaçant entièrement la source à l'intérieur de la sphère. Comme la distribution angulaire de la source est généralement très différente du faisceau lumineux utilisé pour étalonner la sphère, l'effet de non-uniformité spatiale de la sphère doit être caractérisé et corrigé à l'aide d'une méthode appropriée. Afin de prendre en considération les non-uniformités spectrales et spatiales de la sphère, qui ont une influence sur les résultats de mesure si diverses sources ou géométries sont comparées, d'autres corrections doivent être appliquées. Par ailleurs, la linéarité du système doit être caractérisée pour tenir compte des niveaux de flux très différents de la source à l'extérieur et à l'intérieur de la sphère.

Plus de détails sur la mesure du flux lumineux sont donnés en [12].

4.4 Réalisation pratique du lux (lx), unité dérivée du SI d'éclairement lumineux, E_v

Le lux (lx or $cd \cdot sr \cdot m^{-2}$) peut être dérivé d'une réalisation de la candela et de l'unité de longueur, à l'aide de la relation : $E_v = I_v \Omega_0 / r^2$, où r est une distance choisie de manière appropriée par rapport à la source de l'intensité lumineuse I_v , à laquelle l'éclairement lumineux, E_v , est tel que l'aire de la surface courbe de la sphère, A_s , est presque identique à l'aire de la projection en deux dimensions, A , c'est-à-dire $A_s \cong A$ (voir Section 4.3a), ce qui ne serait pas le cas si A_s était simplement remplacé par A . Plus de détails à ce sujet sont donnés en [13].

Le lux peut également être réalisé directement à partir d'un radiomètre absolu dont la sensibilité à l'éclairement spectral est étalonnée (voir Section 2.1) ou à partir d'une source à corps noir calculable. Comme une telle source est principalement une source de luminance énergétique ou de luminance, l'éclairement lumineux incident sur une surface à une distance r du diaphragme de sortie de la source dépend de l'aire du diaphragme de sortie de la source, de la distance r , et de l'aire de la surface recevant le flux. L'éclairement lumineux de la source à corps noir est déterminé en multipliant l'éclairement énergétique spectral du corps noir par la fonction d'efficacité lumineuse spectrale de la CIE souhaitée et en effectuant une intégration spectrale, à l'aide de l'équation de réalisation des échelles d'éclairement énergétique spectral à partir des sources absolues de luminance énergétique données en [14, équation 24].

4.5 Réalisation pratique de la candela par mètre carré ($cd \cdot m^{-2}$), unité dérivée du SI de luminance lumineuse, L_v

L'unité de luminance lumineuse ($cd \cdot m^{-2}$) dans une direction donnée peut être réalisée à l'aide d'une source lambertienne diffuse soit en calculant la luminance lumineuse d'une source lumineuse elle-même, comme un radiateur à corps noir, soit en mesurant la luminance lumineuse dans une direction spécifique à partir d'une surface uniformément diffusante produite par une sphère intégrante ou d'une surface blanche à réflexion diffuse.

- La réalisation de l'unité de luminance lumineuse à l'aide d'un corps noir requiert de calculer la luminance énergétique absolue spectrale du diaphragme du corps noir à l'aide de la loi de Planck et de la température thermodynamique du corps noir. La luminance lumineuse correspondante du corps noir est ensuite directement calculée à partir de sa luminance énergétique spectrale et de la fonction d'efficacité lumineuse spectrale appropriée de la CIE, tel que décrit à la Section 1.
- Pour la réalisation de l'unité de luminance lumineuse à l'aide d'une configuration avec sphère intégrante, la luminance lumineuse au port de sortie est déterminée soit à partir du flux lumineux dirigé vers l'avant, c'est-à-dire le flux lumineux partiel (la définition du flux lumineux partiel est donnée en [15]) du port à travers le diaphragme d'un photomètre étalonné tel qu'indiqué à la Section 4.2, soit à partir de l'éclairement lumineux au diaphragme d'entrée d'un photomètre de référence étalonné à l'aide de la relation donnée à la Section 4.4. Le flux lumineux partiel / l'éclairement lumineux au photomètre étalonné dépend de la

luminance lumineuse du diaphragme de la sphère et d'un facteur géométrique qui est fonction de la distance r , ainsi que des aires du diaphragme du port de la sphère et du diaphragme d'entrée du photomètre [12,14]. Une autre source de luminance lumineuse suffisamment uniforme peut être utilisée au lieu de la configuration avec sphère intégrante.

- Pour la réalisation de l'unité de luminance lumineuse à l'aide de la configuration fondée sur une surface à réflexion diffuse, la luminance lumineuse est calculée à partir de l'éclairement lumineux produit par la source d'intensité lumineuse sur l'étalon réfléchissant (voir la Section 4.4) et du facteur de réflectance lumineuse pour l'étalon blanc à réflexion diffuse, déterminé à l'aide d'une méthode spectrophotométrique dans les mêmes conditions géométriques que celles utilisées pour la mesure de la luminance lumineuse [14].

5 Considération sur l'incertitude de mesure

Toute valeur de mesure doit être exprimée avec une incertitude de mesure associée. Une description générale de la façon d'évaluer et d'exprimer les incertitudes en photométrie est donnée en [16, 17].

Références

- [1] Brochure sur le SI : Le Système international d'unités (SI), 8^e édition, 2006 ; mise à jour en 2014, Bureau international des poids et mesures, F-92310 Sèvres, France.
- [2] Principes régissant la photométrie, 2^e édition, publication commune au CIPM et à la CIPM (en préparation).
- [3] Ciddor P.E., Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Appl. Optics*, 1996, **35**, 1566-1573.
- [4] CIE (Commission internationale de l'éclairage), Norme commune à l'ISO et à la CIE : Photométrie – Le système CIE de photométrie physique, ISO 23539:2005(E)/CIE S 010/E:2004.
- [5] Zwinkels J.C., Ikonen E., Fox N.P., Ulm G., and Rastello M.L., Photometry, radiometry and “the candela”: evolution in the classical and quantum world, *Metrologia*, 2010, **47**, R15-R32.
- [6] Martin, J.E., Fox, N.P., and Key, P.J., A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements, *Metrologia*, 1985, **21**, 147-155.
- [7] Hoyt C.C. and Foukal, P.V., Cryogenic radiometers and their application to metrology, *Metrologia*, 1991, **28**, 163-167.
- [8] Sildoja M. et al., Predictable Quantum Efficient Detector I: Photodiodes and predicted responsivity, *Metrologia*, 2013, **50**, 385–394.

- [9] Müller I. et al., Predictable Quantum Efficient Detector II: Characterization results, *Metrologia*, 2013, **50**, 395–401.
- [10] Schwinger, J., On the classical radiation of accelerated electrons”, *Physical Review*, 1949, **75**, 1912-25.
- [11] CIE (Commission internationale de l’éclairage), Norme commune à l’ISO et à la CIE : Colorimétrie – Partie 2 : Illuminants CIE normalisés, ISO/CIE 11664-2:2007(E)/CIE S 014-2/E:2006.
- [12] Ohno Y., Photometric Standards (Chapter 3), In Handbook of Applied Photometry, Casimir DeCusatis, (p. 55-99) American Institute of Physics Press, ISBN 1-56396-416-3, Woodbury, NY, USA. (1997).
- [13] CIE 210:2014 Photometry Using $V(\lambda)$ -Corrected Detectors as Reference and Transfer Standards.
- [14] Gaertner A.A., Optical Radiation Measurement (Chapter 9), in Modern Metrology Concerns, Luigi Cocco, InTech, ISBN 978-953-51-0584-8, Rijeka, Croatia (2012). En accès libre : <http://www.intechopen.com/articles/show/title/optical-radiation-measurements>
- [15] CIE (Commission internationale de l’éclairage) International Standard on Test Method for LED lamps, LED luminaires and LED modules, S025/E:2015.
- [16] CIE 198:2011 Determination of Measurement Uncertainties in Photometry.
- [17] JCGM 100:2008 Évaluation des données de mesure – Guide pour l’expression de l’incertitude de mesure.