

Rayonnements optiques

Optical radiation

1. Introduction

Les activités de métrologie des rayonnements optiques sont effectuées par deux laboratoires : le LNE-INM au CNAM/Saint-Denis et le LNE/CMSI à Trappes.

Elles recouvrent le maintien à niveau et le développement des références nationales, leur comparaison au niveau international et leur transfert vers l'industrie, dans les domaines spectraux ultraviolet, visible et infrarouge, pour les grandeurs radiométriques et photométriques caractérisant des sources, des détecteurs ou des matériaux.

2. LNE-INM

Le programme de raccordement de toutes les grandeurs radiométriques et photométriques au radiomètre cryogénique s'est poursuivi et deux nouveaux projets ont débuté pour développer la métrologie de l'apparence visuelle avec l'arrivée sur le marché de nouveaux types de sources et pour prendre en compte les besoins croissants de caractérisation des matériaux.

2.1. Caractérisation du rendu des couleurs des DEL

L'objectif de ce nouveau projet est de caractériser un ou plusieurs paramètres pour quantifier le rendu des couleurs d'objets éclairés par des diodes électroluminescentes (DEL). En effet, le développement des DEL blanches destinées à l'éclairage est rapide et les indices de rendu des couleurs utilisés actuellement pour les sources classiques ne traduit pas la sensation visuelle obtenue. Il est donc nécessaire de définir un nouvel indice qui prenne en compte ce nouveau type de sources dont la répartition spectrale est spécifique. Il sera établi en associant des mesures physiques et des mesures visuelles. Pour cela, un laboratoire spécifique a été adapté (parois, rideaux, supports d'équipements de mesure...) et une cabine adaptée aux mesures visuelles a été réalisée.

Elle comporte un ensemble de DEL blanches de puissance (une soixantaine). Un spectroradiomètre a déjà permis de caractériser différents types d'éclairage selon l'arrangement et le choix des sources. Il permettra également de faire les mesures physiques sur des matériaux éclairés dans cette cabine.

La stabilité et l'exactitude du courant électrique d'alimentation des DEL ont une influence sur la puissance lumineuse délivrée et sur la répartition spectrale. Pour définir l'impact sur les caractéristiques colorimétriques et radiométriques des DEL des transformateurs de courants du commerce utilisés, l'équipe du LNE-INM a mesuré les performances de ces transformateurs en les comparant à des alimentations du laboratoire stabilisées à 10^{-5} . Les stabilités et les exactitudes de ces transformateurs du commerce, respectivement de l'ordre de 10^{-4} et de 10 %, engendrent des variations sur les paramètres colorimétriques de l'ordre de $2 \cdot 10^{-6}$ et de 0,2 %.

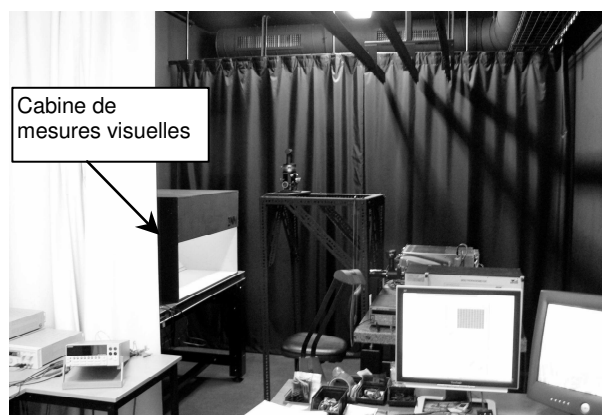


Fig. 1. – Photographie du laboratoire dédié aux mesures physiques et visuelles sur des matériaux éclairés par des DEL.

2.2. Réalisation d'un gonioréfectomètre pour la mesure de BRDF

L'apparence d'un objet est déterminée par un observateur en prenant en compte la couleur, le brillant, la texture ou la translucidité de l'objet. Réaliser une mesure physique de l'apparence revient donc à mesurer les propriétés réfléchives de l'objet. La grandeur considérée est le facteur de réflexion bi-directionnel (ou BRDF pour *Bidirectional Reflectance Distribution Function*) car elle caractérise intégralement la réflexion lumineuse à la surface d'un matériau. Un gonioréfectomètre mesure le facteur de réflexion à la surface d'un objet en fonction des différentes directions d'illumination et d'observation. Ces mesures sont utilisées dans de nombreux secteurs d'activités allant du contrôle de la qualité des surfaces aux modélisations pour l'imagerie numérique et sont également utilisées en recherche pour la compréhension des mécanismes de perception visuelle.

Le laboratoire a commencé la réalisation d'un tel instrument. Un cahier des charges détaillé a été élaboré à partir d'une étude bibliographique des différents types de goniométre déjà existants dans quelques LNM, laboratoires de recherche ou industriels et en prenant en compte les besoins de l'industrie. Cet équipement permettra à la Métrologie française d'avoir une participation active aux travaux d'un nouveau comité « *Measurement of appearance network* » créé en 2007 au sein de la CIE (Commission internationale de l'éclairage) ; Ce comité est lui-même divisé en 8 sous-comités relatifs aux différents paramètres intervenant dans l'apparence des matériaux.

2.3. Traçabilité des détecteurs de sensibilité spatiale inhomogène

Dans le cadre du raccordement systématique de tous les bancs d'étalonnage au radiomètre cryogénique, référence nationale pour la métrologie des rayonnements optiques, le laboratoire a développé une nouvelle méthode d'étalonnage en éclairage pour les détecteurs dont la réponse spatiale varie fortement ; En effet, la méthode d'étalonnage en éclairage à partir de l'étalonnage en sensibilité en flux ne peut pas être appliquée dans ce cas. Cependant ces détecteurs sont très utilisés (exemple des thermopiles) et présentent l'intérêt d'avoir une réponse spectrale identique sur un large domaine spectral.

La méthode développée en 2007 consiste à calculer un éclairage « synthétique » à partir de la somme d'éclairages ponctuels créés en différents points de la surface du détecteur. La réponse du détecteur est également calculée à partir des différentes réponses aux différents faisceaux ponctuels. La sensibilité du détecteur est alors le rapport de la réponse calculée à l'éclairage calculé pour toute la surface du détecteur.

Tableau 1
Comparaison de la sensibilité en éclairage mesurée selon les deux méthodes.

	Méthode « synthétique »	Méthode usuelle	Ecart relatif	Incertitude relative élargie sur l'écart ($k = 2$)
Sensibilité en éclairage en $A/W \cdot cm^{-2}$	0,060 16	0,060 07	0,15 %	0,39 %

Cette nouvelle méthode a été appliquée à l'étalonnage de thermopiles et est applicable aux photomètres ou aux radiomètres. Le tableau 1 donne un exemple de résultat obtenu pour un radiomètre en appliquant la méthode traditionnelle du calcul de la sensibilité en éclairage à partir de la sensibilité en flux et de la surface et en appliquant la nouvelle méthode dite « d'éclairage synthétique ». Elle établit une traçabilité directe au radiomètre cryogénique et permet de maîtriser les effets de l'inhomogénéité locale de sensibilité.

3. LNE/CMSI

3.1. Photométrie des DEL

L'éclairage connaît des évolutions marquées par l'apparition de nouvelles sources appelées à remplacer les sources à incandescence conventionnelles, surtout pour des raisons d'économie d'énergie. Les lampes à fluorescence compactes sont apparues au début des années 1990 et présentent une bonne alternative aux lampes à incandescence lorsque la durée d'allumage est grande ou que la maintenance est difficile. Plus récemment, les diodes électroluminescentes (DEL) blanches ont fait leur apparition. Les DEL blanches par fluorescence sont les plus prometteuses pour l'éclairage. Leurs caractéristiques spectrales et opto-géométriques les distinguent des sources classiques. Les principaux laboratoires de métrologie mettent en place des moyens spécifiques pour caractériser ce type de source. Au LNE, les travaux en cours concernent la mesure de l'efficacité lumineuse, susceptible de dépasser 100 lm/W, et la maîtrise des effets thermiques liés à l'augmentation de puissance électrique consommée.

Le LNE/CMSI compare les moyens d'étalonnage des DEL en flux lumineux par deux techniques :

- la goniophotométrie avec une mesure de la distribution spatiale des intensités lumineuses et intégration dans l'espace ;
- la photométrie à l'aide d'une sphère intégrant pour réduire les temps de mesure.

En 2007, le goniophotomètre a été défini. Pour des raisons de stabilité et de rapidité de mesure, le dispositif a été conçu de telle sorte que le détecteur reste immobile. C'est la source que se déplacera dans l'espace pour réaliser l'ensemble des angles d'observation.

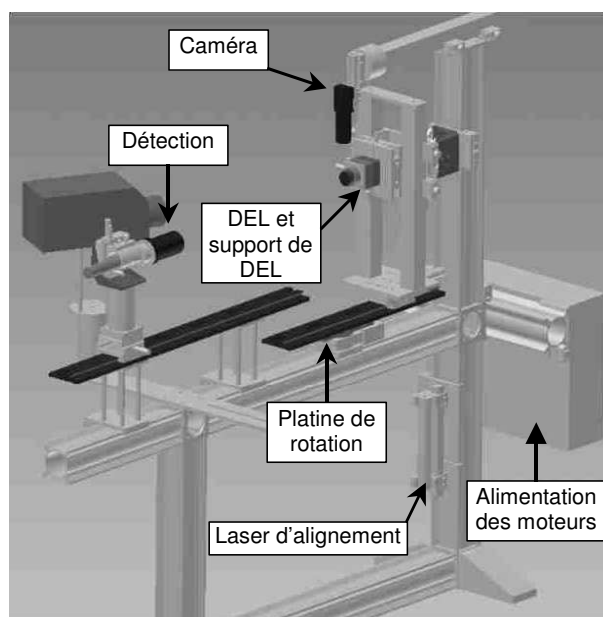


Fig. 2. – Goniophotomètre adapté aux mesures des DEL.

Le banc permettra de réaliser les mesures d'intensité lumineuse selon les deux conditions A et B normalisées de la CIE 127, à savoir à 10 cm et à 30 cm de la source. Pour la mesure de la distribution spatiale de l'intensité, le détecteur sera placé à une distance de 60 cm de la DEL, compte tenu de la dimension de la surface sensible du détecteur et de sa résolution angulaire de 1°.

Le photomètre à sphère intégrante du laboratoire a un diamètre de 60 cm et sera équipé d'un détecteur $V(\lambda)$. Le choix du détecteur se fera parmi ceux disponibles au laboratoire en fonction de la sensibilité et du rapport signal/bruit.

La position verticale du photomètre à sphère intégrante ne peut pas être ajustée. Par conséquent, la hauteur de l'axe optique du goniophotomètre a été déterminée de sorte qu'elle soit la même que celle de l'entrée de la sphère intégrante.

En 2007, le LNE s'est engagé auprès de 15 autres laboratoires dans une comparaison internationale, pilotée par le KRIS, sur les mesures de caractéristiques des DEL (intensité et flux lumineux et colorimétrie).

3.2. Radiométrie infrarouge : étalonnage de « fluxmètres »

Le bilan d'incertitudes sur le banc d'étalonnage totalement révisé a permis d'établir que les principales sources d'incertitudes étaient, dans un ordre croissant, le modèle de calcul de l'éclairement, les mesures de température à la surface de la cavité et le calcul de la densité de flux convectif. Pour évaluer la dernière composante, nettement prépondérante, il a fallu faire varier la pression dans la cavité et mesurer la réponse de différents capteurs. Cette étude a montré que certains capteurs étaient fortement dégradés et totalement inutilisables dans des conditions de basse pression, nécessaires pour éliminer au maximum le flux de nature convective.

L'incertitude relative sur la mesure par un fluxmètre est inférieure à 3 % pour une densité de flux supérieure à 1 $W \cdot cm^{-2}$ et est de 5 % à 0,5 $W \cdot cm^{-2}$. Pour diminuer les incertitudes aux faibles niveaux de densités de flux, le laboratoire étudie la possibilité d'un étalonnage à pression

atmosphérique avec une convection réduite. Elle exige la modélisation des flux suivant leur nature d'échange thermique.

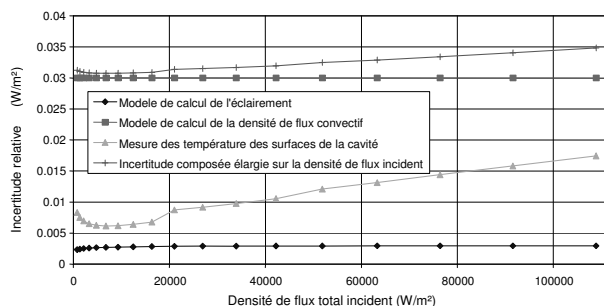


Fig. 3. – Composantes d'incertitudes relatives sur la densité de flux incidente.

3.3. Etalonnage des spectroradiomètres UV

La réglementation française oblige le contrôle, par des organismes agréés, du niveau de rayonnement émis par les cabines de bronzage. Ces contrôles sont effectués à l'aide de spectroradiomètres équipés de monochromateur simple. Après avoir constaté un écart important entre des mesures faites par ces différents organismes agréés, la Direction Générale de la Santé (DGS) a imposé un étalonnage des spectroradiomètres UV de contrôle au moins une fois par an. Le LNE s'est donc lancé dans la mise en place d'un banc d'étalonnage de ces appareils. Il est surtout nécessaire, pour le LNE, de réaliser une source spécifique, très proche spectralement des lampes utilisées dans les cabines.

La source n'est pas encore totalement opérationnelle car il reste à ajuster le spectre émis avec un jeu de filtres adaptés mais, en parallèle, quelques étalonnages de spectroradiomètres de contrôle ont été réalisés sur un large domaine spectral (200 nm – 400 nm) par comparaison à un spectroradiomètre étalon. Les résultats obtenus ont confirmé la nécessité des étalonnages puisque la correction, déterminée par l'étalonnage, appliquée aux résultats de la comparaison effectuée en 2006 par la DGS conduit à des écarts entre les mesures inférieurs à 5 % alors qu'ils étaient auparavant de l'ordre de 20 %.