

Rayonnements optiques

Optical radiation

1. Introduction

Les activités de métrologie des rayonnements optiques sont effectuées au sein du laboratoire commun de métrologie (LCM) institué courant 2008 entre le LNE et le CNAM. Les travaux ont été réalisés par des membres du LNE-INM au CNAM/Saint-Denis et du LNE/DMSI à Trappes.

Les activités recouvrent le maintien au meilleur niveau et l'amélioration des références nationales en photométrie et radiométrie, leurs comparaisons au niveau international et leurs transferts vers l'industrie. En parallèle, des recherches amont sont menées pour offrir *in fine* de nouvelles prestations d'étalonnage aux industriels. Tous ces travaux sur la métrologie des rayonnements optiques s'effectuent dans les domaines spectraux ultraviolet, visible et infrarouge, pour les grandeurs caractérisant des sources, des détecteurs ou des matériaux. Tous les travaux réalisés en 2008 ne sont pas relatés ici ; seuls les résultats de quatre études sont présentés.

2. DEL : Qualité et quantité de lumière

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 par fluorescence ont fait leur apparition et sont les plus prometteuses pour l'éclairage. Leurs caractéristiques spectrales et optogéométriques les distinguent des sources classiques. Les principaux laboratoires de métrologie mettent en place des moyens spécifiques pour caractériser ce type de sources.

Ce projet porte sur les deux critères importants de caractérisation des DEL à savoir la qualité de la lumière (mesure du rendu des couleurs) et la quantité de lumière (mesure de l'intensité et du flux lumineux).

2.1. Qualité du rendu des couleurs

La qualité du rendu des couleurs des sources en général est déterminée par l'indice de rendu des couleurs

(IRC) lié à la perception visuelle et dont le calcul repose sur la mesure de la répartition spectrale des sources. Les études ont porté sur la traçabilité de l'IRC au SI à travers des mesures spectrales et sur l'examen des variations de cet IRC en fonction d'un ensemble de paramètres physiques agissant sur l'émission du rayonnement des sources, dans des conditions de mesures visuelles.

La détermination de la qualité de lumière des DEL a nécessité la mise en place d'instrumentations et de méthodes pour mesurer les grandeurs physiques associées aux sources (répartition spectrale) et les caractéristiques des matériaux (propriétés de réflexion et de transmission). Dans un premier temps, cette qualité de lumière a été étudiée à partir d'analyses colorimétriques effectuées sur des systèmes d'éclairage à base de DEL de puissance, émettant de la lumière blanche.

Le montage expérimental est composé, d'une part, d'une cabine à lumière qui reprend les mêmes conditions expérimentales que celles des mesures visuelles, et d'autre part, d'un spectroradiomètre à réseau pour les mesures spectrales.

Une étude préliminaire avait permis de déterminer les caractéristiques intrinsèques des DEL ainsi que leur intensité lumineuse et d'évaluer les différents paramètres à contrôler afin d'obtenir un rayonnement lumineux stable. Ces paramètres sont entre autre le courant d'alimentation et la température de la DEL. L'incertitude type relative sur la mesure d'intensité lumineuse a été évaluée à 0,56 %.

Les dimensions de la cabine à lumière sont : une longueur de 1 m, une profondeur et une hauteur de 60 cm. Elle contient cinq systèmes d'éclairage composé chacun de 10 DEL de 1 W. La partie supérieure de la cabine est recouverte d'une peinture blanche de facteur de réflexion élevé. Chaque éclairage est branché en série et montées sur un dissipateur thermique en aluminium anodisé. Ils sont chacun alimentés par une source de courant continu dont la stabilité mesurée est de l'ordre de quelques 10^{-5} en relatif.

L'intérieur de la cabine est recouvert d'une peinture de couleur gris clair de même type que les revêtements utilisés généralement pour les mesures en cabine. Des mesures d'éclairement effectuées dans la cabine, à l'aide d'un luxmètre, montrent que l'éclairement est compris entre 130 lux et 220 lux selon la source d'éclairage à DEL et que cet éclairement est homogène à $\pm 7\%$ sur une surface de (40×20) cm² située au centre de la cabine.

Les mesures spectrales (fig. 1) ont été effectuées sur un étalon de blanc de réflexion diffuse éclairé par chacune des cinq sources à l'aide d'un spectroradiomètre; les DEL étaient alimentées par une source de courant continu et stabilisé. Ces mesures ont permis de déterminer les paramètres colorimétriques de ces sources (coordonnées chromatiques, température de couleur proximale, indices de rendu des couleurs) et d'examiner l'impact de plusieurs paramètres d'influence sur ces coefficients. Les formules permettant la détermination des paramètres colorimétriques étant assez complexes, l'évaluation des incertitudes a été faite par une méthode de Monte Carlo. Les incertitudes types relatives varient de 2% à 4% en fonction de la longueur d'onde.

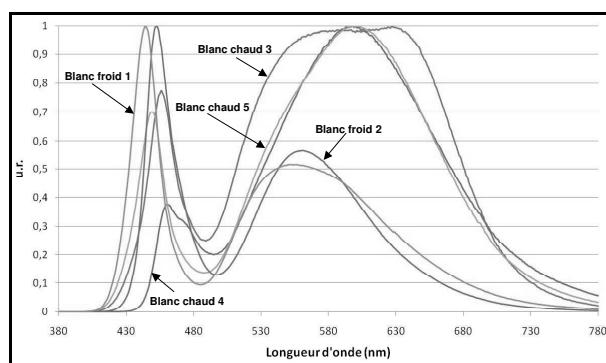


Fig. 1. – Mesure des spectres des cinq sources générées.

Des études de l'impact de l'alimentation électrique des DEL sur les spectres des sources ont été effectuées. Les variations des spectres en fonction de l'intensité électrique sont beaucoup moins importantes avec une alimentation en courant haché (signal carré) qu'avec un courant continu, de l'ordre de dix fois au maximum pour certaines longueurs d'onde. L'utilisation d'une alimentation en courant haché permet d'obtenir une bien meilleure stabilité (pas de variations significatives) des coordonnées chromatiques et de la température de couleur proximale.

Des mesures visuelles par un panel de personnes seront effectuées sur des échantillons et des images colorées dans différentes conditions d'éclairage et une analyse des résultats sera faite en corrélation avec les paramètres colorimétriques.

2.2. Mesures des grandeurs photométriques des DEL

L'objectif est de développer les possibilités de raccordement des mesures photométriques et de mesure des propriétés opto-électroniques des DEL. Les moyens photométriques développés doivent répondre aux besoins de mesure de l'intensité lumineuse, du flux lumineux et des caractéristiques colorimétriques. Deux bancs complémentaires seront mis en œuvre : un goniophotomètre permettant la mesure absolue des caractéristiques photométriques (intensité et flux lumineux) et un lumenmètre à sphère intégrante pour la mesure du flux par comparaison à une DEL étalon. En 2008, les travaux ont porté essentiellement sur la mise en œuvre du goniophotomètre comprenant la définition du

cahier des charges, la réalisation des pièces mécaniques, le montage du banc, la réalisation du logiciel de pilotage, la caractérisation en sensibilité spectrale relative du photomètre et l'étalonnage des instruments de mesure électriques.

Pour des raisons de stabilité et de rapidité de mesure, le goniophotomètre a été conçu de telle sorte que le détecteur reste immobile ; la source est déplacée dans l'espace pour réaliser les mesures selon tous les angles d'observation. La structure mécanique du photomètre a été réalisée pour répondre au besoin de mesure de l'intensité lumineuse selon les conditions A et B de la recommandation CIE-127 et pour réduire au minimum la contribution de la lumière parasite lors des mesures goniophotométriques. Le photomètre a une cellule de mesure de diamètre 11,3 mm (surface de 1 cm²), avec une correction $V(\lambda)$ très fine ($f_1 \leq 1\%$). Le photomètre a été caractérisé sur le banc de sensibilité spectrale « visible-proche IR » du laboratoire, entre 400 nm et 780 nm par pas de 5 nm pour une largeur d'analyse de 3 nm. Le facteur de désadaptation spectrale, f_1 , déterminé à partir de ces mesures, est supérieur à celui annoncé par le constructeur. Ce décalage reste à comprendre.

Le goniophotomètre développé pour la mesure absolue du flux lumineux des DEL est opérationnel. Il a été utilisé pour des mesures d'intensité et de flux lumineux et de caractéristiques colorimétriques de DEL, dans le cadre de la comparaison internationale APMP-S3 pilotée par le laboratoire national coréen (KRISS).

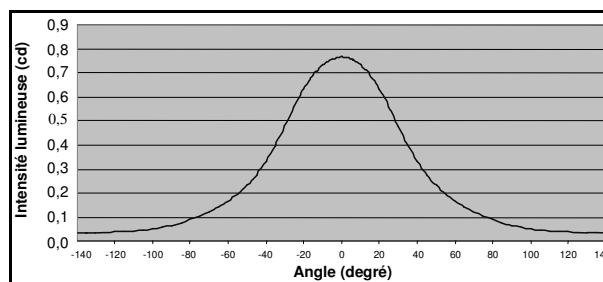


Fig. 2. – Répartition spatiale de l'intensité lumineuse d'une DEL blanche ; mesure réalisée pour la comparaison APMP-S3.

Ce banc sera complété par un dispositif à sphère intégrante permettant d'effectuer des mesures de flux par comparaison avec un gain important sur la durée de l'étalonnage. L'évaluation des incertitudes d'étalonnage pour les deux dispositifs sera réalisée en 2009.

3. Etalonnage de spectroradiomètres UV

En France, le Ministère de la Santé a mis en place des mesures pour réglementer l'utilisation des cabines de bronzage avec notamment le décret n° 97-617 du 30 mai 1997 : les rampes et lampes de bronzage doivent être déclarées avant leur mise en service, classées puis vérifiées par des organismes de contrôle agréés. L'évaluation est réalisée à l'aide de spectroradiomètres qui doivent être raccordés.

En 2005, une comparaison des mesures a mis en évidence des écarts significatifs entre les différents spectromètres de contrôle utilisés (dispersion des résultats de 20 % autour de la moyenne des mesures). Il était donc nécessaire d'étalonner les appareils de contrôle avant qu'ils soient utilisés pour les mesures sur site. Pour cela, il fallait disposer d'une procédure spécifique à ce type d'appareils de mesure. Un protocole d'étalonnage a été établi et est maintenant appliqué. En 2006, un banc sommaire a été monté à partir de deux sources : un simulateur solaire équipé d'une lampe à vapeur de mercure haute pression et un luminaire à tube fluorescent. En mesurant l'éclairement émis par ces sources à l'aide du spectroradiomètre de référence du laboratoire, un facteur correctif a pu être appliqué aux mesures faites par les spectromètres de contrôle soumis à la comparaison précédente. La dispersion des mesures a été ramenée à 5 % ; ce qui justifiait pleinement la nécessité d'imposer l'étalonnage régulier des spectroradiomètres de contrôle.

Le LNE s'est donc fixé comme objectif de développer et de qualifier un banc d'étalonnage dédié aux spectroradiomètres utilisés pour les mesures sur les cabines de bronzage, car celui-ci n'est pas réalisé par les fabricants.

Le banc d'étalonnage est équipé de sources dont le spectre d'émission est similaire à celui émis par les lampes des cabines de bronzage. Ces sources sont réalisées à partir :

- d'un simulateur solaire équipé d'une lampe à vapeur de mercure filtrée avec un verre Bk7 ;
- d'un luminaire à tubes fluorescents générant trois types de spectres représentatifs des spectres rencontrés sur les installations de cabines de bronzage.

L'utilisation de ces sources permet de bien prendre en compte les problèmes liés à la lumière parasite qui est crucial pour la mesure du rayonnement UV avec ces spectroradiomètres à monochromateur simple.

L'étalonnage est réalisé en comparant le spectre mesuré par le spectroradiomètre à étalonner et le spectroradiomètre de référence du laboratoire. Les données de sortie sont des facteurs correctifs pour les domaines spectraux d'UVA et d'UVB que devront utiliser les contrôleurs afin de déterminer la conformité d'une cabine de bronzage aux textes réglementaires.

Tableau 1

Incertitude d'étalonnage des spectroradiomètres.

Sources d'incertitudes	Évaluation (%)			
	280 nm – 309 nm	310 nm – 319 nm	320 nm – 349 nm	? 350 nm
Répétabilité	10	4,0	2,5	2,5
Étalonnage du spectroradiomètre de référence	4,0	2,6	2,1	1,2
Distance de mesure	1,0	1,0	1,0	1,0
Homogénéité du faisceau	1,0	1,0	1,0	1,0
Température ambiante	0,0	0,0	0,0	0,0
Incertitude combinée	11	5,0	3,6	3,1
Incertitude élargie ($k = 2$)	22	10	7,1	6,2

L'incertitude d'étalonnage a été évaluée (tab. 1). Les sources d'incertitude sont : la répétabilité, l'étalonnage du spectroradiomètre de référence, la distance de mesure (source – capteur), l'homogénéité du faisceau et la température ambiante. L'incertitude d'étalonnage est de 7,1 % pour le domaine d'UVA et de 10 % pour le domaine d'UVB.

Par ailleurs, à la demande de la Direction générale de la santé, différents types de spectroradiomètres ont été évalués pour guider les organismes de contrôle dans leur choix d'appareils. Les performances mesurées étaient : la justesse en longueur d'onde, la résolution spectrale, la bande passante, la dynamique de mesure, la sensibilité et la gestion de la lumière parasite par l'appareil.

4. Réalisation d'une source UV étalon transportable

Afin de tester les effets néfastes des rayonnements UV contenus dans le rayonnement solaire sur les produits de consommation, des sources d'ensoleillement artificiel sont utilisées : les simulateurs solaires.

Ces sources d'éclairement sont utilisées pour accélérer et sélectionner le spectre afin de prédire les effets d'une exposition prolongée au soleil : essais de tenue aux rayonnements UV des matériaux (polymères) ou des produits (pharmaceutiques) ou évaluation de l'efficacité de la protection de la peau (produits cosmétiques) contre les rayonnements UV. Ces simulateurs doivent être caractérisés en éclairement énergétique spectrique pour répondre aux exigences des normes professionnelles en vigueur.

Les sources sont montées dans des chambres d'essais qui permettent de contrôler d'autres paramètres de test (température, humidité) et les équipements sont difficilement déplaçables pour permettre la caractérisation des sources en laboratoire. La caractérisation des simulateurs solaires doit très souvent être réalisée sur site.

Les mesures sont réalisées à l'aide d'un spectroradiomètre étalonné mais celui-ci est susceptible de dériver au cours du transport. Il est donc nécessaire de l'étalonner sur site à l'aide d'une source étalon transportable d'éclairement énergétique spectrique. L'objet de l'étude était donc la construction de cette source transportable selon un cahier des charges spécifique.

Le cahier des charges a été établi à partir de considérations pratiques et en prenant en compte les conditions d'environnement rencontrées sur site : la structure mécanique doit isoler de l'extérieur l'ensemble comprenant la lampe et la sonde du spectroradiomètre, le rayonnement émis par la source doit être à spectre continu et l'alimentation de la lampe doit avoir une stabilité meilleure que 0,2 %.

La source est constituée d'une alimentation électrique et une lampe optimisées. L'alimentation électrique a été choisie pour ses performances et sa portabilité. La lampe

tungstène-halogène offre un spectre continu. L'étude de la stabilité temporelle a montré que ce type de lampe convient parfaitement. La partie mécanique a été conçue pour limiter les perturbations engendrées par les rayonnements provenant de l'environnement. Le résultat est une source compacte et portable (fig. 3). La distance entre la lampe et l'entrée de la sonde est de 210 mm. La longueur totale de la source est de 350 mm et sa masse est inférieure à 2 kg.

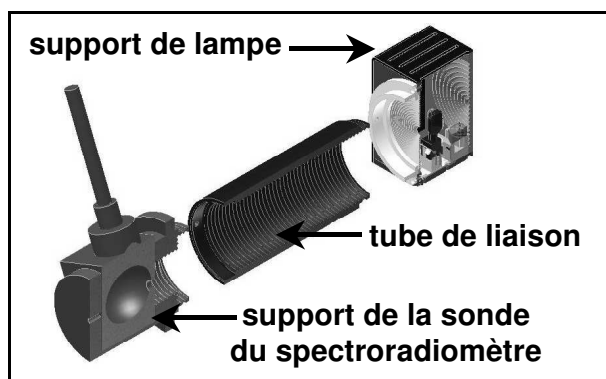


Fig. 3. – Dessin technique de la source transportable réalisée.

La source transportable a été étalonnée entre 250 nm et 800 nm à l'aide d'un spectroradiomètre de référence par comparaison aux lampes étalons d'éclairage énergétique spectrique du laboratoire (3 lampes tungstène-halogène 1 000 W entre 290 nm et 800 nm et 3 lampes au deutérium entre 200 nm et 350 nm). L'incertitude élargie ($k = 2$) d'étalonnage de la source en laboratoire a été évaluée à 8 % dans le domaine UVB et de 2,3 % à 5 % dans le domaine UVA.

Le spectroradiomètre associé à la source transportable est équipé d'une sonde comprenant une sphère intégrante de 50 mm de diamètre et d'une fibre optique de 2 m de longueur facilitant l'accès aux sources de lumière lors des étalonnages sur site. Il est paramétrable sur deux caractéristiques : la largeur spectrale et le temps d'acquisition.

Le spectroradiomètre de référence associé à la source a été totalement caractérisé afin de déterminer les paramètres optimum de fonctionnement : résolution en longueur d'onde, largeur spectrale d'analyse, lumière parasite, temps d'acquisition (vitesse de balayage maximale), stabilité temporelle de la mesure d'éclairage.

Les dispositifs réalisés et caractérisés en 2008 sont opérationnels et sont utilisés dès 2009 pour étalonner sur site des simulateurs solaires servant à déterminer l'indice SPF (*Sun Protection Factor*) de crèmes solaires.

5. Évaluation de la linéarité des détecteurs : réduction du flux minimal de mesure

Afin de quantifier la linéarité en flux d'un détecteur, le laboratoire dispose d'un banc de mesure reposant sur une méthode d'addition de flux. Le banc est équipé de sources incohérentes de type quartz-tungstène-halogène (QTH) et permet des mesures sur un très large domaine de flux (de 100 pW à 1 mW) pour différents types de détecteurs (photodiode, thermopile ou photomultiplicateur). L'incertitude type relative sur la mesure du facteur de correction de non-linéarité est inférieure à $5 \cdot 10^{-4}$.

La mesure des flux les plus faibles s'effectue en insérant des filtres neutres (densités) sur le trajet du faisceau. Mais aux très faibles flux, la lumière parasite engendrée par les sources est du même ordre de grandeur que le flux mesuré par le détecteur. Pour diminuer le flux mesuré et conserver la même incertitude de mesure du facteur de non-linéarité du détecteur, le laboratoire a substitué la source QTH par une source à base de diodes électroluminescentes (DEL), spécifiquement conçue : cinq DEL émettent dans un cylindre diffusant percé d'un trou de sortie.

Les DEL permettent d'atteindre de très faibles flux lumineux (régulation du courant d'alimentation et du nombre de DEL) avec une bonne stabilité temporelle : le flux minimal est environ cent fois inférieur à celui des QTH. La conception de la source permet d'abaisser les mesures de linéarité à des flux inférieurs d'un facteur dix, avec une incertitude identique (10^{-4}) à celle obtenue avec la source QTH pour des flux plus élevés.

La validation du banc fonctionnant avec la nouvelle source à base de DEL a été faite en comparant les résultats obtenus, pour les mêmes flux, successivement avec les montages utilisant les sources QTH et les DEL, pour un détecteur au silicium.

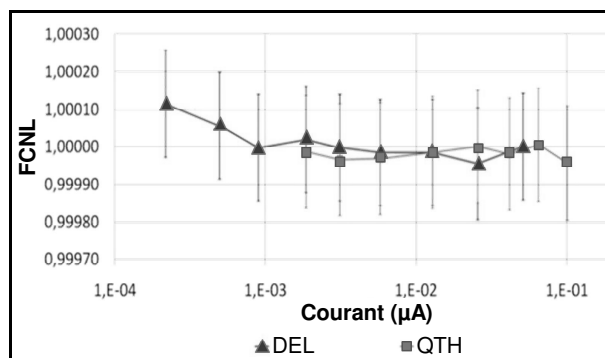


Fig. 4. – Comparaison des facteurs de correction de non-linéarité (FCNL) obtenus avec les deux sources (QTH et DEL), pour différentes valeurs de courant délivré par un détecteur silicium.