



N. POUSSET

Colorimétrie des LED : incertitudes et influence du courant électrique

LEDs colorimetry: uncertainties and electrical power influence

Nicolas POUSSET, Bernard ROUGIÉ et Annick RAZET

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

Résumé

Le banc de mesure de paramètres colorimétriques (coordonnées chromatiques, température de couleur proximale, et indices de rendu des couleurs) de sources d'éclairage à LED, du LNE-INM/Cnam, est décrit. Les résultats de calcul d'incertitudes, par simulation Monte Carlo, sur les mesures spectrales relatives et sur les paramètres colorimétriques sont exposés. La qualité de la lumière émise par ces éclairages à LED a été étudiée, *via* l'évolution des paramètres colorimétriques, en fonction du mode d'alimentation électrique (courant continu et pulsé).

MOTS CLÉS : DEL, LED, COLORIMÉTRIE, CHROMATICITÉ, SPECTRORADIOMÈTRE, TEMPÉRATURE DE COULEUR, INDICE DE RENDU DES COULEURS, INCERTITUDES.

Abstract

The LNE-INM/Cnam measurement bench for colorimetric parameters (chromaticity coordinates, correlated colour temperature and colour rendering index) of LED lightings, is described. The results of uncertainties calculations, by Monte Carlo simulations, on the spectral measurements and the colorimetric parameters are exposed. Quality of light emitted by these LED lightings was studied using the colorimetric parameters evolving according to electrical power supply mode (continuous and pulsed current).

KEY WORDS: LED, COLORIMETRY, CHROMATICITY, SPECTRORADIOMETER, COLOUR TEMPERATURE, COLOUR RENDERING INDEX, UNCERTAINTIES.

1. Introduction

D'après l'Agence internationale de l'énergie [1], l'éclairage représente actuellement environ 19 % de la production électrique mondiale soit 2 650 TW·h d'énergie électrique par an. Cela a engendré en 2005 environ 1 890 millions de tonnes de CO₂ soit l'équivalent de 70 % de l'émission due aux automobiles.

A l'heure du développement durable, la consommation électrique et le respect de l'environnement sont les vocables qui caractérisent les diodes électroluminescentes (LED pour *Light Emitting Diode*). Leur durée de vie et l'évolution croissante de leur efficacité lumineuse mettent les LED au premier rang des sources d'éclairage du futur :

- La durée de vie, qui peut être définie par le temps à partir duquel la source n'émet plus que 70 % de la quantité de lumière initiale (L_{70}) [2], est environ 3 à 30 fois plus importante que les sources usuelles.
- Alors que l'efficacité lumineuse typique des lampes à incandescence est d'environ 15 lm/W, celle des LED est de l'ordre de 40 lm/W à 80 lm/W ; ce qui les rapproche des sources à fluorescence dont l'efficacité est comprise, approximativement, entre 70 lm/W et 100 lm/W.

D'une technologie datant des années 1960, les LED constituent actuellement un ensemble vaste et éclectique dont les applications dépendent à la fois de la puissance électrique et de la couleur d'émission.

Les LED de faible puissance (inférieure à 1 W) ont, depuis les années 1970, des applications au quotidien : voyants lumineux sur divers appareils, signalisation routière...

Les LED blanches de forte puissance, apparues grâce, notamment, aux recherches de Shuji Nakamura [3] [4] [5], dans les années 1990, sont, depuis le début des années 2000, en plein essor pour une utilisation dans l'éclairage, le rétro-éclairage des écrans et les phares avant des automobiles. Les critères qui doivent être appréhendés pour la mise en œuvre de ces LED sont : le flux lumineux, l'efficacité lumineuse, la durée de vie, la qualité de la lumière, les conditions d'alimentation électrique, les conditions de dissipation thermique.

Le LNE-INM/Cnam s'est plus particulièrement intéressé à la qualité de la lumière émise à partir d'analyses colorimétriques effectuées sur des systèmes d'éclairage à base de LED de puissance émettant de la lumière blanche.

Le montage expérimental est développé dans le cadre d'un projet (plus vaste que celui présenté dans cet article) dont le thème central est l'étude du rendu des couleurs des LED. Le montage est composé, d'une part, d'une cabine à lumière qui reprend les mêmes conditions expérimentales que les expériences de mesures visuelles sur des observateurs humains et, d'autre part, d'un spectroradiomètre permettant d'effectuer des mesures spectrales.

Cet article présente le montage expérimental. Les mesures spectrales effectuées ont permis de déterminer les paramètres colorimétriques des sources (coordonnées chromatiques, température de couleur proximale et indices de rendu des couleurs).

Les formules permettant la détermination des paramètres colorimétriques étant assez complexes, nous avons utilisé une méthode de Monte Carlo pour la détermination des incertitudes. Cette méthode est basée sur le supplément 1 au Guide pour l'expression des incertitudes de mesures (GUM), « *Propagation of distributions using a Monte Carlo method* » [6] paru en 2008. Les résultats de calculs d'incertitudes sur les mesures spectrales et sur les paramètres colorimétriques sont explicités. Cela permet d'avoir des informations sur les caractéristiques des sources utilisées dans les mesures visuelles.

De plus, les variations spectrales des sources d'éclairages ont été analysées en fonction de la valeur du courant électrique moyen pour deux modes d'alimentation (continu et pulsé).

Ces analyses permettent d'argumenter sur le choix du meilleur mode d'alimentation, particulièrement dans

un mode dynamique, avec des variateurs de puissance. D'autre part, ces analyses constituent une étape permettant d'orienter les recherches vers la réalisation de sources de référence utilisant des LED.

2. Paramètres colorimétriques

La qualité de la lumière émise par une source est caractérisée par deux notions indissociables :

- sa couleur apparente ;
- sa capacité à rendre les couleurs.

Ces deux propriétés, respectivement liées à la couleur et à la vision de la couleur, sont caractérisées par la température de couleur proximale et l'indice de rendu des couleurs. La détermination de ces deux paramètres nécessite le repérage de la source de lumière dans un système colorimétrique à l'aide de coordonnées chromatiques.

2.1. Coordonnées chromatiques

A toute source de lumière de composition spectrale déterminée peut être associée une couleur dont le repérage dans le diagramme de chromaticité du système colorimétrique CIE XYZ 1931 se fait à partir des coordonnées chromatiques x , y et z . Les deux coordonnées x et y suffisent pour repérer les couleurs dans un plan, puisque $x + y + z = 1$.

Les coordonnées x et y sont calculées à partir des composantes trichromatiques X , Y , Z , elles-mêmes déterminées à partir de la répartition spectrale énergétique du rayonnement de la source considérée (par exemple sa luminance énergétique spectrique L_λ échantillonnée avec un pas en longueur d'onde $\Delta\lambda$) et des fonctions colorimétriques normalisées \bar{x}_λ , \bar{y}_λ , \bar{z}_λ d'un observateur dit de référence [7].

Les coordonnées chromatiques x et y sont données par les expressions suivantes [8] :

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \end{aligned} \quad (1)$$

et les composantes trichromatiques X , Y , Z par :

$$\begin{aligned} X &= k' \times \sum_{\lambda} L_{\lambda} \cdot \bar{x}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \\ Y &= k' \times \sum_{\lambda} L_{\lambda} \cdot \bar{y}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \\ Z &= k' \times \sum_{\lambda} L_{\lambda} \cdot \bar{z}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

avec $k' = \frac{100}{\sum_{\lambda} L_{\lambda} \cdot \bar{y}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda}$ dans le cas où L_{λ} est associée à

la surface d'un échantillon. Donc Y est égal à 100.

2.2. Température de couleur et température de couleur proximale

La température de couleur d'une source est la température du radiateur de Planck dont le rayonnement a la même chromaticité que celle du stimulus donné. De façon usuelle, rares sont les sources à avoir des spectres semblables aux corps noirs. Ainsi, la notion de température de couleur proximale a été définie comme étant la température du radiateur de Planck dont la couleur perçue ressemble le plus, dans les conditions d'observation spécifiées, à celle d'un stimulus donné de même luminosité [8].

La température de couleur proximale d'une source lumineuse, notée T_{cp} , évaluée par la méthode de McCamy, à partir de ses coordonnées chromatiques x et y , est donnée par l'expression suivante [9] :

$$T_{cp} = 5\,520,33 - 6\,823,3 \times n + 3\,525 \times n^2 - 449 \times n^3, \quad (3)$$

où l'expression de n est :

$$n = \frac{x - 0,332\,0}{y - 0,185\,8} \quad (4)$$

La température de couleur proximale d'une source lumineuse caractérise sa teinte. Les lumières de teintes chaudes (jaune – rouge) ont des températures de couleur inférieures à 3 000 K et les lumières de teintes froides (bleu – violet) des températures de couleur comprises entre 5 000 K et 10 000 K.

2.3. Indice de rendu des couleurs

L'indice de rendu des couleurs, compris entre 0 et 100, a pour objectif de rendre compte de l'aptitude d'une source de lumière à restituer la couleur d'un objet éclairé par cette source.

La Commission internationale de l'éclairage (CIE) a fixé en 1965 une méthode d'évaluation d'un indice de rendu des couleurs, révisée en 1974 et en 1995 [10]. Cette méthode nécessite de mesurer la répartition spectrale de l'énergie lumineuse émise par la source à mesurer, notée avec l'indice « k ». Un illuminant de référence, défini par la CIE [10], noté avec l'indice « r », de même température de couleur proximale que la source à mesurer est ensuite choisi. Pour des températures de couleur proximale supérieures ou égales à 5 000 K, l'illuminant de référence sera un illuminant « lumière du jour D ». Pour des températures de couleur proximale inférieures à 5 000 K, ce sera un radiateur de Planck.

Cela permet de comparer les écarts de couleur, dans un espace colorimétrique donné, entre des échantillons (i) de couleur test éclairés, soit par la source à mesurer, soit par l'illuminant de référence, afin d'en déduire les indices particuliers de rendu des couleurs (R_i) et l'indice général de rendu des couleurs (R_a).

Ainsi, pour chacun des quatorze échantillons de couleur test, notés avec l'indice i , de l'atlas de Munsell, défini par la CIE, et de facteur spectral de luminance $R_{i,\lambda}$ explicité dans les tables appropriées de la recommandation CIE [10], la série de calculs décrite ci-après (de A à E) doit être faite pour la source (indice k) à mesurer :

A. Les composantes trichromatiques $X_{k,i}$, $Y_{k,i}$, $Z_{k,i}$ sont calculées à l'aide des relations suivantes :

$$\begin{aligned} X_{k,i} &= k' \times \sum_{\lambda} L_{\lambda} \cdot R_{i,\lambda} \cdot \bar{x}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \\ Y_{k,i} &= k' \times \sum_{\lambda} L_{\lambda} \cdot R_{i,\lambda} \cdot \bar{y}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \\ Z_{k,i} &= k' \times \sum_{\lambda} L_{\lambda} \cdot R_{i,\lambda} \cdot \bar{z}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{avec : } k' = \frac{100}{\sum_{\lambda} L_{\lambda} \cdot \bar{y}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda} \quad (6)$$

B. Les coordonnées chromatiques $c_{k,i}$ et $d_{k,i}$ sont déterminées par les relations :

$$\begin{aligned} c_{k,i} &= \frac{4 - u_{k,i} - 10 \cdot v_{k,i}}{v_{k,i}} \\ d_{k,i} &= \frac{1,708 \cdot v_{k,i} + 0,404 - 1,481 \cdot u_{k,i}}{v_{k,i}} \end{aligned} \quad (7)$$

avec :

$$\begin{aligned} u_{k,i} &= \frac{4 \cdot X_{k,i}}{X_{k,i} + 15 \cdot Y_{k,i} + 3 \cdot Z_{k,i}} \\ v_{k,i} &= \frac{6 \cdot Y_{k,i}}{X_{k,i} + 15 \cdot Y_{k,i} + 3 \cdot Z_{k,i}} \end{aligned} \quad (8)$$

C. Ces coordonnées sont corrigées pour tenir compte de l'adaptation chromatique :

$$\begin{aligned} c'_{k,i} &= c_{k,i} \times \left(\frac{c_r}{c_k} \right) \\ d'_{k,i} &= d_{k,i} \times \left(\frac{d_r}{d_k} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

où, c_k et d_k sont les coordonnées intrinsèques de la source à mesurer et c_r et d_r sont les coordonnées intrinsèques de l'illuminant de référence.

D. Les coordonnées $u_{k,i}$, $v_{k,i}$ sont également corrigées de l'adaptation chromatique :

$$\begin{aligned} u'_{k,i} &= \frac{10,872 + 0,404 \cdot c'_{k,i} - 4 \cdot d'_{k,i}}{16,518 + 1,481 \cdot c'_{k,i} - d'_{k,i}} \\ v'_{k,i} &= \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \cdot c'_{k,i} - d'_{k,i}} \end{aligned} \quad (10)$$

E. Ensuite les coordonnées $W_{k,i}^*$, $U_{k,i}^*$ et $V_{k,i}^*$ sont calculées par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} W_{k,i}^* &= 25 \cdot Y_{k,i}^{1/3} - 17 \\ U_{k,i}^* &= 13 \cdot W_{k,i}^* \cdot (u'_{k,i} - u_r) \\ V_{k,i}^* &= 13 \cdot W_{k,i}^* \cdot (v'_{k,i} - v_r) \end{aligned} \quad (11)$$

où u_r et v_r sont les coordonnées intrinsèques de l'illuminant de référence.

Après avoir obtenu l'ensemble des coordonnées $U_{k,i}^*$, $V_{k,i}^*$, $W_{k,i}^*$ pour chacun des échantillons colorés, la même série de calculs est effectuée avec les échantillons de couleur test mais pour l'illuminant de référence. Les grandeurs $U_{r,i}^*$, $V_{r,i}^*$, $W_{r,i}^*$ sont alors obtenues.

Les différences de couleur ΔE_i pour les échantillons de couleur test i , éclairés par la source à mesurer « k », et l'illuminant de référence « r », sont calculées grâce à l'expression suivante :

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2} \quad (12)$$

Les indices particuliers de rendu des couleurs R_i , pour chacun des échantillons de couleur test, sont alors déterminés par :

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i \quad (13)$$

La moyenne des huit premiers indices particuliers est effectuée pour obtenir l'indice général de rendu des couleurs R_a :

$$R_a = \frac{1}{8} \times \sum_{i=1}^8 R_i \quad (14)$$

La moyenne des quatorze indices, que nous nommerons dans cet article $R_{a_{14}}$, a également été calculée :

$$R_{a_{14}} = \frac{1}{14} \times \sum_{i=1}^{14} R_i \quad (15)$$

L'ensemble du processus de calcul est résumé par la figure 1.

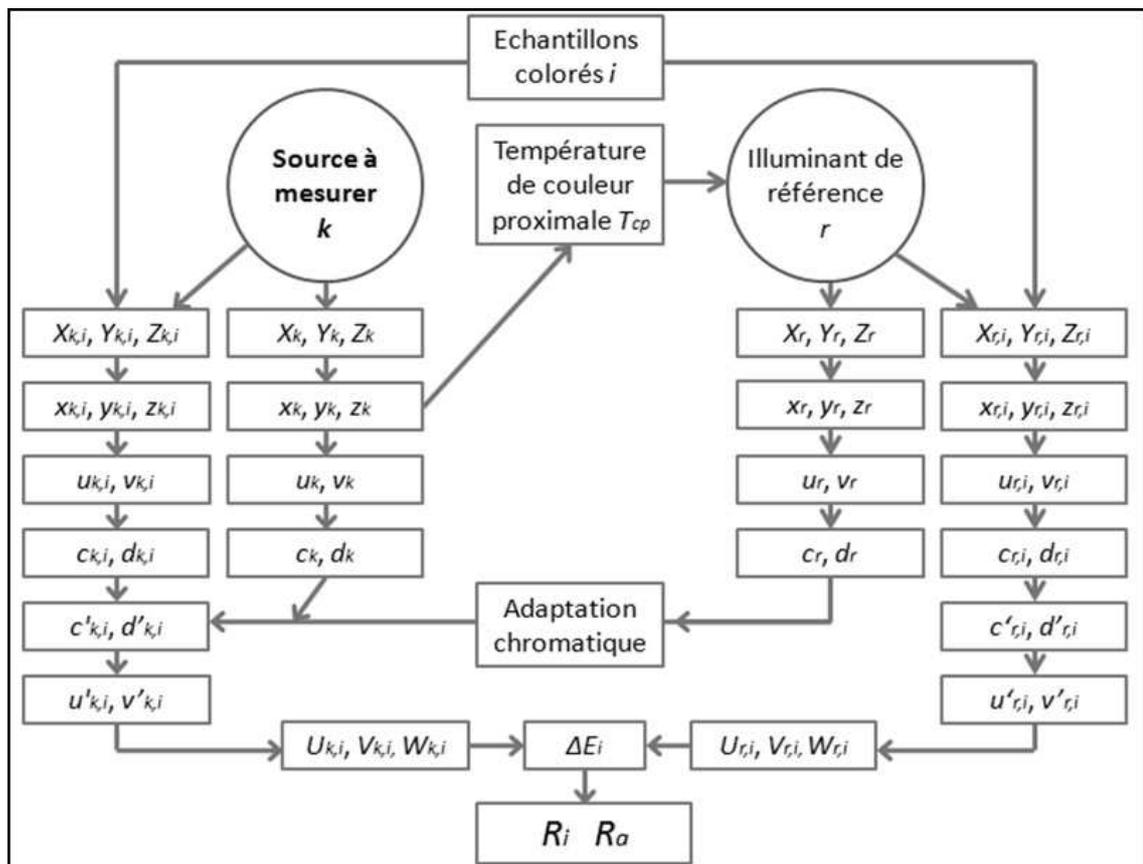


Fig. 1. – Schéma résumant les étapes de calcul de l'indice de rendu des couleurs.

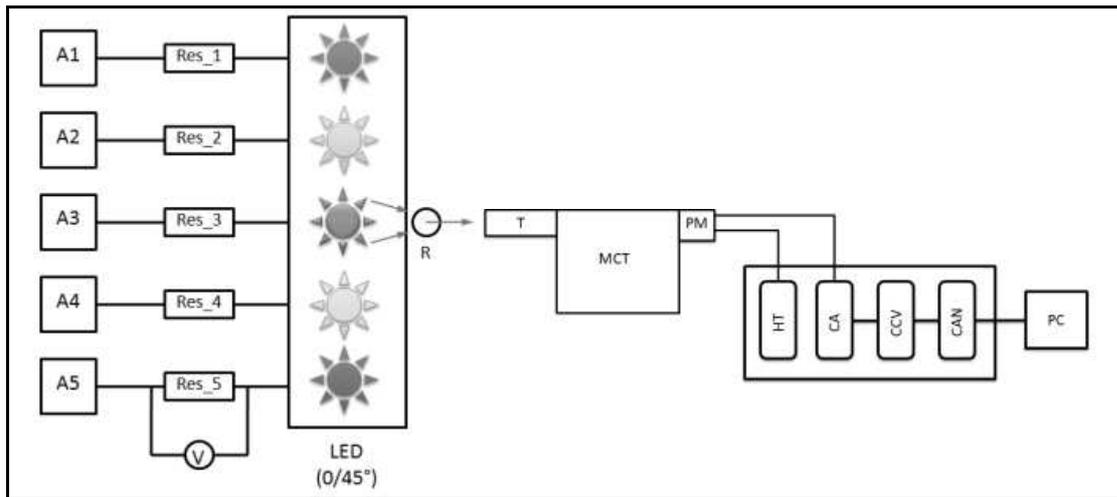


Fig. 2. – Description schématique du montage de référence du LNE-INM/Cnam permettant d’effectuer des mesures spectrales relatives sur des systèmes d’éclairage à LED ; Res_i : résistances étalon, A_i : alimentations stabilisées en courant, R : étalon blanc de réflexion diffuse éclairé par un des systèmes d’éclairage à LED, T : téléobjectif du spectroradiomètre, MCT : monochromateur de type Czerny-Turner, PM : photomultiplicateur, HT : haute tension, CA : amplificateur de courant, CCV : convertisseur courant-tension, CAN : convertisseur analogique numérique.

3. Montage expérimental de référence

Le schéma de la figure 2 présente le banc de référence de caractérisation de LED de puissance développé au LNE-INM/Cnam. Celui-ci est composé principalement d’une cabine à lumière contenant des systèmes d’éclairage à LED et d’un spectroradiomètre à réseau, positionné à 1,2 m de la cabine environ, et permettant d’effectuer des mesures spectrales relatives.

3.1. Cabine à lumière et systèmes d’éclairage à LED

Une cabine à lumière sert généralement à effectuer des comparaisons visuelles sur des objets colorés éclairés par différents types de sources lumineuses artificielles. La cabine à lumière (fig. 3) qui a été conçue pour cette expérience fait 1 m de long pour 60 cm de profondeur et de hauteur.

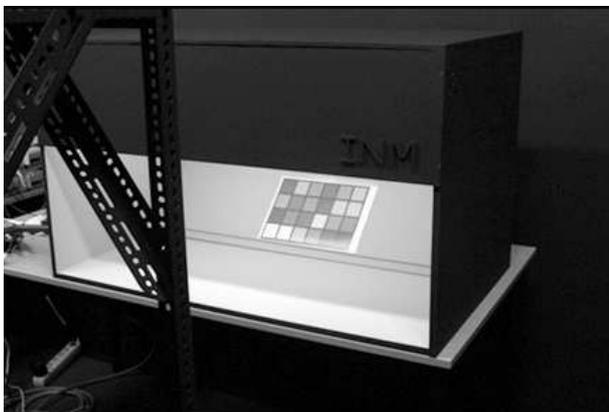


Fig. 3. – Cabine à lumière du LNE-INM/Cnam.

Elle contient cinq systèmes d’éclairage à LED positionnés dans la partie supérieure de la cabine. Deux de ces éclairages sont de type blanc froid (notés 1 et 2) et proviennent de deux fabricants distincts et les trois autres éclairages sont de type blanc chaud (notés 3, 4, et 5) et proviennent également de trois fabricants différents. Chaque éclairage est composé de dix LED de 1 W branchées en série et montées sur un dissipateur thermique. Dans le cas du banc de référence, ils sont chacun alimentés par une source de courant continu dont la stabilité relative est de l’ordre de quelques 10^{-5} . La mesure du courant d’alimentation des LED est obtenue grâce à la mesure de la tension aux bornes de résistances étalons de 10 mΩ branchées en série dans chacun des circuits (fig. 2).

Les répartitions spectrales des sources 1 et 2 sont représentées sur la figure 4a et celles des sources 3, 4 et 5 sont représentées sur la figure 4b. Les températures de couleur proximales moyennes sont respectivement pour les deux systèmes 1 et 2, de type blanc froid, de 5 930 K et 6 100 K, et pour les trois systèmes 3, 4 et 5, de type blanc chaud, elles sont de 3 500 K, 2 850 K et 3 030 K.

Un diffuseur est placé sous les éclairages à LED afin d’obtenir un éclairage uniforme dans la partie inférieure de la cabine à lumière, sur un étalon blanc de réflexion diffuse, qui sera la surface d’analyse. L’intérieur de cette cabine est recouvert d’une peinture de couleur gris clair de type Munsell N7. Celle-ci est utilisée comme revêtement de référence lors de la mise en place de mesures visuelles dans ce type de cabine [11] [12].

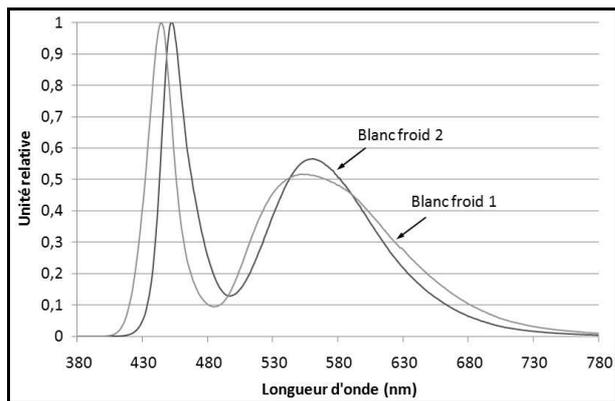


Fig. 4a. – Spectres des systèmes d’éclairage à LED de type blanc froid montés dans la partie supérieure de la cabine à lumière du LNE-INM/Cnam.

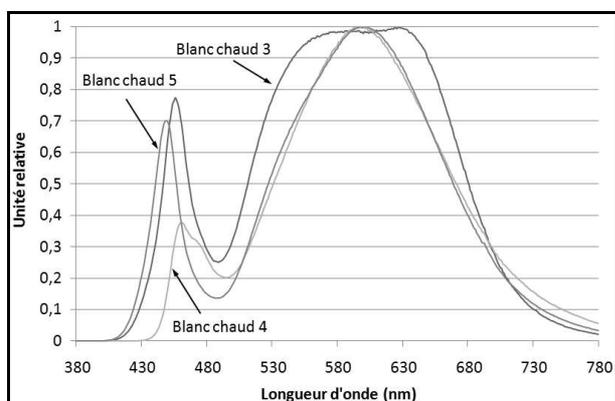


Fig. 4b. – Spectres des systèmes d’éclairage à LED de type blanc chaud montés dans la partie supérieure de la cabine à lumière du LNE-INM/Cnam.

3.2. Spectroradiomètre

Un spectroradiomètre est associé à cette cabine. Pour le banc de référence, il s’agit d’un spectroradiomètre à réseau, de marque Bentham, composé d’un monochromateur simple, référencé M300, de type Czerny-Turner, ayant une distance focale de 300 mm.

Le réseau de diffraction holographique permet de mesurer des radiations électromagnétiques de longueurs d’onde comprises entre 200 nm et 1,4 μm environ. Son utilisation est restreinte au domaine des longueurs d’onde visibles, comprises entre 380 nm et 780 nm.

Le téléobjectif monté en amont du monochromateur forme l’image de l’objet à observer sur un diaphragme de champ de diamètre 1,17 mm. Celui-ci définit sur l’objet une surface de 1 cm^2 environ.

Le signal au niveau de la fente de sortie du monochromateur est détecté par un tube photomultiplicateur (PMT) alimenté par une haute tension constante de 900 V. Le courant généré par le PMT est ensuite amplifié, converti en tension. La grandeur de sortie est exprimée comme un courant I_s ,

sachant que les mesures ont toutes été effectuées avec le même gain du convertisseur courant-tension de 100 nA/V. Un convertisseur analogique numérique permet l’acquisition de données par logiciel informatique.

Les fentes d’entrée et de sortie ont une hauteur fixe de 20 mm et leur largeur est réglable de 10 μm à 8 mm. Dans le cadre de nos mesures la largeur de bande de la fonction de transfert est fixée à 1 nm.

La résolution du moteur pas à pas assurant la rotation du réseau permet des déplacements en longueur d’onde d’une valeur minimum de 0,075 nm.

3.3. Etalonnage du spectroradiomètre

Afin de raccorder au Système international d’unités (SI) les mesures spectrales relatives effectuées sur les systèmes d’éclairage à LED, le spectroradiomètre a été étalonné, dans un premier temps, en longueur d’onde puis, dans un second temps, en sensibilité spectrale relative, par l’intermédiaire de mesures de luminance.

Le spectroradiomètre a été étalonné en longueur d’onde à l’aide d’une lampe à vapeur de mercure basse pression ORIEL, placée à l’intérieur de la cabine, pour les raies à 365,02 nm, 404,66 nm, 435,83 nm, 546,07 nm, 576,96 nm et 579,07 nm. La fonction de transfert du spectroradiomètre a été déterminée pour chacune des raies de la lampe. La longueur d’onde mesurée est celle donnée par le spectroradiomètre qui correspond au centre de cette fonction de transfert. Dans notre cas, ce centre est considéré comme étant la projection de l’intersection des deux droites ajustées sur les flancs de la fonction de transfert. Ensuite, pour chacune des raies cette valeur mesurée est comparée à la valeur théorique.

La sensibilité spectrale S_λ du spectroradiomètre est déterminée comme étant le rapport entre le courant de sortie du photomultiplicateur, et la luminance énergétique spectrique reçue par le spectroradiomètre. Cette luminance est celle renvoyée par un étalon blanc de réflexion diffuse éclairé par une lampe de référence étalonnée au LNE-INM/Cnam [13] en éclairage énergétique spectrique relatif, normé à 1 pour la longueur d’onde de 550 nm.

La lampe de référence utilisée est une lampe tungstène halogène (24 V – 10 A) dont l’éclairage est stable dans le temps, très homogène sur la surface mesurée, et de valeur comparable à celle mesurée pour les éclairages à LED. Cette lampe est montée dans une lanterne conçue spécifiquement afin de pouvoir maîtriser l’orientation du flux émis tout en permettant une dissipation appropriée de la chaleur produite (fig. 5).

L’étalon blanc de réflexion diffuse est positionné en incidence normale par rapport au plan d’éclairage de la lampe et à 45° par rapport au plan du spectroradiomètre,

symbolisé par le plan perpendiculaire à l'axe optique du téléobjectif (fig. 6). Cet étalon réfléchit la lumière incidente avec un facteur de réflexion ρ_λ . Le facteur de réflexion moyen, sur le domaine spectral 380 nm - 780 nm est de 0,988 avec des variations comprises entre 0,987 et 0,989.



Fig. 5. – Vue de l'intérieur de la lanterne contenant la lampe tungstène halogène de référence.

La luminance énergétique spectrique réfléchiée par l'étalon L_λ^S , est mesurée par le PMT, par pas de 1 nm, dans le domaine spectral 380 nm – 780 nm. Cette luminance convertie par le spectroradiomètre, de sensibilité spectrale S_λ , en courant I_λ^S , est donnée par l'expression suivante :

$$L_\lambda^S = \frac{I_\lambda^S}{S_\lambda} \quad (16)$$

L'offset I_{off} , généré par le courant d'obscurité du PMT et par l'amplificateur de courant du spectroradiomètre, est constant sur le domaine spectral 380 nm – 780 nm, de l'ordre de 2 nA avec une incertitude type de 2 pA pour le calibre de 100 nA/V. Ce courant d'offset est ensuite soustrait, pour chaque longueur d'onde, aux valeurs de courant I_λ^S .

L'expression de la luminance devient :

$$L_\lambda^S = \frac{I_\lambda^S - I_{\text{off}}}{S_\lambda} \quad (17)$$

Considérons l'élément A comme étant la surface délimitée, par le spectroradiomètre, sur l'étalon blanc de réflexion diffuse. L'exitance de cette surface est égale à l'éclairement émis par la lampe de référence, E_λ , multiplié par le facteur de réflexion, ρ_λ , de l'étalon de blanc. Si l'on considère que l'étalon a une distribution lambertienne, alors, la luminance énergétique réfléchiée par l'étalon est donnée par :

$$L_\lambda^S = \frac{E_\lambda \cdot \rho_\lambda}{\pi} = \frac{I_\lambda^S - I_{\text{off}}}{S_\lambda} \quad (18)$$

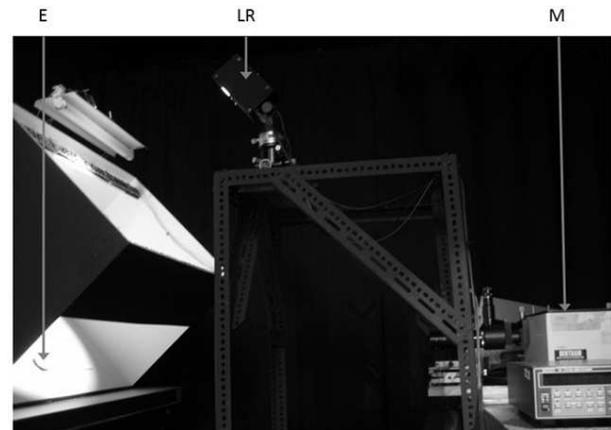


Fig. 6. – Étalonnage en sensibilité spectrale relative du spectroradiomètre ; E : étalon blanc de réflexion diffuse, LR : lampe tungstène halogène de référence, M : monochromateur M300.

L'expression de la sensibilité spectrale du monochromateur est ensuite déduite à partir de la relation précédente :

$$S_\lambda = \frac{(I_\lambda^S - I_{\text{off}}) \times \pi}{E_\lambda \cdot \rho_\lambda} \quad (19)$$

L'analyse des spectres des éclairages à LED à étudier étant faite en relatif, la sensibilité spectrale relative a été déterminée en utilisant l'éclairement spectral relatif de la lampe de référence $E_{\text{rel},\lambda}$, normé à 1 pour la longueur d'onde de 550 nm. La sensibilité spectrale relative s'écrit :

$$S_{\text{rel},\lambda} = \frac{1}{E_{\text{rel},\lambda}} \times \left(\frac{I_\lambda^S - I_{\text{off}}}{I_{550}^S - I_{\text{off}}} \right) \times \frac{\rho_{550}}{\rho_\lambda} \quad (20)$$

3.4. Mesures spectrales relatives sur les éclairages à LED

Pour effectuer des mesures spectrales sur les éclairages à LED, une seule des cinq sources d'éclairage montées dans la cabine à lumière est alimentée. L'éclairage produit, illumine l'étalon blanc de facteur de

réflexion ρ_λ positionné en incidence normale par rapport au plan d'éclairage des sources et à 45° par rapport à l'axe optique du spectroradiomètre. La luminance énergétique spectrique réfléchie par l'étalon L'_λ , est mesurée par le PMT, par pas de 1 nm, dans la zone spectrale 380 nm – 780 nm.

La mesure du courant électrique I_λ^{LED} , généré par le PMT, auquel est soustrait, pour chaque longueur d'onde, le courant d'offset I_{off} , est ensuite effectuée pour obtenir l'expression :

$$L'_\lambda = \frac{(I_\lambda^{\text{LED}} - I_{\text{off}})}{S_\lambda} \quad (21)$$

Une normalisation à 550 nm de l'expression (21) est réalisée :

$$L'_{\text{rel},\lambda} = \left(\frac{I_\lambda^{\text{LED}} - I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{LED}} - I_{\text{off}}} \right) \times \frac{1}{S_{\text{rel},\lambda}} \quad (22)$$

En remplaçant l'expression (20) dans la (22), il en résulte :

$$L'_{\text{rel},\lambda} = \left(\frac{I_\lambda^{\text{LED}} - I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{LED}} - I_{\text{off}}} \right) \times \frac{E_{\text{rel},\lambda}}{\left(\frac{I_\lambda^{\text{S}} - I_{\text{off}}}{I_{550}^{\text{S}} - I_{\text{off}}} \right)} \times \frac{\rho_\lambda}{\rho_{550}} \quad (23)$$

Le rapport entre ρ_λ et ρ_{550} se simplifie dans l'équation (23) car nous faisons l'hypothèse que ce facteur de réflexion est constant et égal à 1 sur l'ensemble du domaine visible entre 380 nm et 780 nm.

Afin d'obtenir une luminance énergétique spectrique $L'_{\text{rel},\lambda}$, normée à 1 à la longueur d'onde associée à la valeur maximale de luminance $L'_{\text{rel},\lambda}$, une dernière normalisation est effectuée :

$$L_{\text{rel},\lambda}^{\text{LED}} = \frac{L'_{\text{rel},\lambda}}{(L'_{\text{rel},\lambda})_{\text{max}}} \quad (24)$$

3.5. Incertitudes sur les mesures spectrales relatives et sur les paramètres colorimétriques

Les causes d'erreurs liées aux mesures spectrales relatives sont listées ci-dessous. Pour chacune de ces causes d'erreur, est associée, une grandeur C dont l'incertitude est $u(C)$. La valeur de C est nulle en valeur moyenne (car les corrections ont été effectuées au préalable) et sans unité (car c'est une grandeur relative).

- Erreur due à l'étalonnage de la lampe tungstène halogène de référence : $C_\lambda^{E_{\text{rel},\lambda}}$, $u(C_\lambda^{E_{\text{rel},\lambda}})$;
- Erreur due à l'étalonnage en longueur d'onde du spectroradiomètre : $C_\lambda^{\text{lambda}}$, $u(C_\lambda^{\text{lambda}})$;

- Erreur due à la largeur de bande spectrale du monochromateur : $C_\lambda^{\Delta\lambda}$, $u(C_\lambda^{\Delta\lambda})$;
- Erreur due aux phénomènes de diffusion dans le monochromateur : C_λ^{diff} , $u(C_\lambda^{\text{diff}})$;
- Erreur due à la non linéarité du photomultiplicateur : C_λ^{PMT} , $u(C_\lambda^{\text{PMT}})$;
- Erreur de répétabilité et de reproductibilité des mesures sur les éclairages à LED et la lampe de référence (incluant l'erreur sur le positionnement de la lampe de référence, l'erreur due à la stabilité de l'alimentation du photomultiplicateur et l'erreur due à la stabilité à court terme du montage expérimental) : C_λ^{rep} , $u(C_\lambda^{\text{rep}})$;
- Erreur sur la mesure du courant d'offset I_{off} du spectroradiomètre qui est considérée comme négligeable : $C^{I_{\text{off}}}$, $u(C^{I_{\text{off}}})$.

Pour le calcul des incertitudes associées aux mesures spectrales et aux paramètres colorimétriques, une méthode de Monte Carlo a été appliquée d'après les recommandations du supplément 1 « *Propagation of distributions using a Monte Carlo method* » du Guide pour l'expression des incertitudes de mesures [6].

La méthode de Monte Carlo est une technique de simulation numérique permettant de trouver des solutions à des problèmes mathématiques par la génération de variables aléatoires respectant diverses lois de distribution. Cette méthode nécessite que le mesurande soit décrit par un modèle mathématique reliant une grandeur de sortie à diverses grandeurs d'entrée. Pour chacune de ces grandeurs d'entrée une loi de distribution sera choisie et le résultat final donnera la distribution de la grandeur de sortie, accompagnée de sa valeur moyenne et de son écart type.

La relation fonctionnelle entre la luminance relative $L'_{\text{rel},\lambda}$ et les différentes grandeurs d'entrée est obtenue à partir de la relation (23) et s'exprime par la relation (25).

Pour pouvoir effectuer la simulation Monte Carlo à partir de l'expression mathématique (25), des lois de distribution ainsi que des valeurs d'incertitude doivent, désormais, être assignées à chacune des causes d'erreur. Les lois de distribution sont déterminées d'après la connaissance des phénomènes physiques ou d'après l'observation effective de la distribution des incertitudes. Cette analyse est traitée dans l'article « *Uncertainty evaluation of LED measurement colour by Monte Carlo simulations* » [14].

La simulation numérique de type Monte Carlo a été effectuée par un programme développé sous le logiciel Matlab. Celui-ci permet d'estimer les incertitudes sur les mesures spectrales relatives effectuées sur les éclairages à LED, ainsi que celles sur leurs paramètres colorimétriques.

$$L'_{rel,\lambda} = \left(\left(\frac{I_{\lambda}^{LED} - I_{off}}{I_{550}^{LED} - I_{off}} \right) + C_{\lambda}^{LED,rep} + C_{\lambda}^{LED,lambd} + C_{\lambda}^{LED,\Delta\lambda} + C_{\lambda}^{LED,PMT} + C_{\lambda}^{LED,diff} \right) \times \left[\frac{E_{rel,\lambda} + C_{\lambda}^{E_{rel,\lambda}}}{\left(\left(\frac{I_{\lambda}^S - I_{off}}{I_{550}^S - I_{off}} \right) + C_{\lambda}^{S,rep} + C_{\lambda}^{S,lambd} + C_{\lambda}^{S,\Delta\lambda} + C_{\lambda}^{S,PMT} + C_{\lambda}^{S,diff} \right)} \right] \quad (25)$$

Tableau 1

Incertitudes types sur les mesures de luminance spectrique relative des éclairages à LED (alimentés avec un courant continu de 350 mA) pour quelques longueurs d'onde du domaine 380 nm - 780 nm.

Longueur d'onde (nm)	Incertitude type sur la luminance spectrique relative normée à 1 des éclairages à LED				
	Blanc froid 1	Blanc froid 2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4	Blanc chaud 5
380	0,000 1	0,000 1	0,000 3	0,000 1	0,000 2
400	0,000 1	0,000 1	0,000 1	0,000 2	0,000 1
420	0,003 3	0,000 2	0,001 1	0,000 1	0,002 9
440	0,011 6	0,006 6	0,006 2	0,001 0	0,007 7
460	0,004 9	0,009 8	0,011 9	0,008 8	0,008 5
480	0,001 2	0,003 2	0,009 5	0,004 5	0,004 1
500	0,002 2	0,001 7	0,003 3	0,004 0	0,002 5
520	0,005 2	0,003 7	0,005 0	0,005 7	0,006 7
540	0,006 2	0,006 5	0,007 3	0,008 9	0,006 6
560	0,006 4	0,009 2	0,009 2	0,009 2	0,008 0
580	0,006 1	0,007 6	0,009 8	0,010 1	0,010 0
600	0,005 4	0,005 3	0,010 6	0,009 7	0,010 0
620	0,004 9	0,004 3	0,009 9	0,011 0	0,010 8
640	0,003 8	0,003 0	0,011 8	0,009 7	0,010 4
660	0,002 6	0,002 4	0,009 0	0,007 7	0,006 5
680	0,001 9	0,002 1	0,008 2	0,005 9	0,005 7
700	0,001 0	0,000 7	0,004 3	0,004 3	0,004 0
720	0,001 0	0,000 3	0,001 9	0,003 1	0,002 1
740	0,000 6	0,000 2	0,001 5	0,001 8	0,002 2
760	0,000 3	0,000 2	0,001 4	0,001 7	0,001 1
780	0,002 1	0,001 1	0,005 5	0,012 5	0,007 9

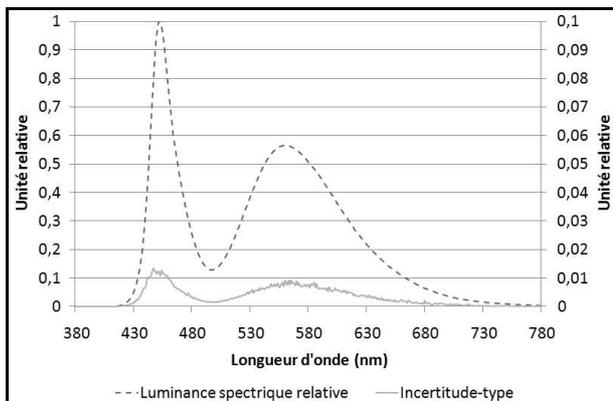


Fig. 7. – Incertitude type sur la mesure de la luminance spectrique relative de l'éclairage à LED blanc froid 2.

La figure 7 représente une évolution caractéristique de l'incertitude en fonction de la longueur d'onde pour

un des éclairages à LED, alimenté en courant continu à 350 mA.

Le tableau 1 donne l'incertitude type pour les différents éclairages à LED à quelques longueurs d'onde pour ce même mode d'alimentation.

La figure 8 présente un exemple de distribution de coordonnée chromatique x , de température de couleur proximale T_{cp} , et d'indice général de rendu des couleurs R_a , obtenus à l'issu des calculs. Ces distributions, correspondantes à celles de l'éclairage blanc froid 1, suivent des lois gaussiennes. Il en est de même pour les autres éclairages à LED.

Les tableaux 2a et 2b donnent les valeurs moyennes et les incertitudes de mesures sur les paramètres colorimétriques des éclairages à LED, obtenues par simulation Monte Carlo, à partir des mesures spectrales relatives effectuées sur le banc de référence.

Tableau 2a

Valeurs moyennes et incertitudes types des coordonnées chromatiques x , y , de la température de couleur proximale T_{cp} , et des indices de rendu des couleurs, pour les systèmes d'éclairage à LED (alimentés avec un courant continu de 350 mA), de type blanc froid, de la cabine à lumière.

Paramètres colorimétriques	Blanc froid 1		Blanc froid 2	
	Moyenne	Incertitude type	Moyenne	Incertitude type
x	0,323 7	0,000 2	0,320 1	0,000 2
y	0,326 8	0,000 4	0,332 5	0,000 3
T_{cp}	5 934	11	6 098	11
R_1	72,8	0,7	63,5	0,7
R_2	74,2	0,7	78,6	0,7
R_3	72,1	0,5	83,0	0,3
R_4	74,3	0,4	60,6	0,6
R_5	73,3	0,6	63,3	0,6
R_6	64,3	0,8	65,3	0,8
R_7	77,8	0,9	80,6	0,6
R_8	65,2	0,7	50,9	0,7
R_9	-9,7	0,5	-50,5	0,6
R_{10}	36,1	0,9	43,8	0,9
R_{11}	73,0	0,4	49,8	0,5
R_{12}	43,9	0,4	32,6	0,5
R_{13}	71,5	1,0	67,4	0,9
R_{14}	83,8	0,4	90,2	0,3
R_a	71,7	0,3	68,2	0,2
$R_{a\ 14}$	62,3	0,2	55,6	0,2

Tableau 2b

Valeurs moyennes et incertitudes types des coordonnées chromatiques x , y , de la température de couleur proximale T_{cp} , et des indices de rendu des couleurs, pour les systèmes d'éclairage à LED (alimentés avec un courant continu de 350 mA), de type blanc chaud, de la cabine à lumière.

Paramètres colorimétriques	Blanc chaud 3		Blanc chaud 4		Blanc chaud 5	
	Moyenne	Incertitude type	Moyenne	Incertitude type	Moyenne	Incertitude type
x	0,410 0	0,000 2	0,460 4	0,000 2	0,426 9	0,000 2
y	0,402 6	0,000 2	0,431 8	0,000 2	0,385 7	0,000 3
T_{cp}	3 501	4	2 855	3	3 027	3
R_1	83,7	0,7	73,0	0,7	76,8	0,7
R_2	87,7	0,7	85,7	0,7	85,5	0,7
R_3	88,6	0,5	96,6	0,3	90,0	0,4
R_4	83,7	0,5	68,9	0,6	74,1	0,5
R_5	81,2	0,6	70,3	0,6	74,7	0,6
R_6	80,6	0,6	79,0	0,6	77,5	0,6
R_7	93,6	0,5	83,8	0,7	83,0	0,6
R_8	79,6	0,7	56,2	0,8	61,6	0,7
R_9	45,9	0,4	-0,6	0,5	11,3	0,5
R_{10}	68,3	0,9	65,6	1,0	63,5	0,9
R_{11}	78,7	0,4	61,1	0,5	67,7	0,5
R_{12}	53,9	0,4	48,0	0,4	55,9	0,3
R_{13}	84,0	0,9	75,2	1,0	78,1	1,0
R_{14}	92,8	0,3	97,6	0,2	93,6	0,3
R_a	84,8	0,2	76,7	0,2	77,9	0,2
$R_{a\ 14}$	78,7	0,2	68,6	0,2	70,9	0,2

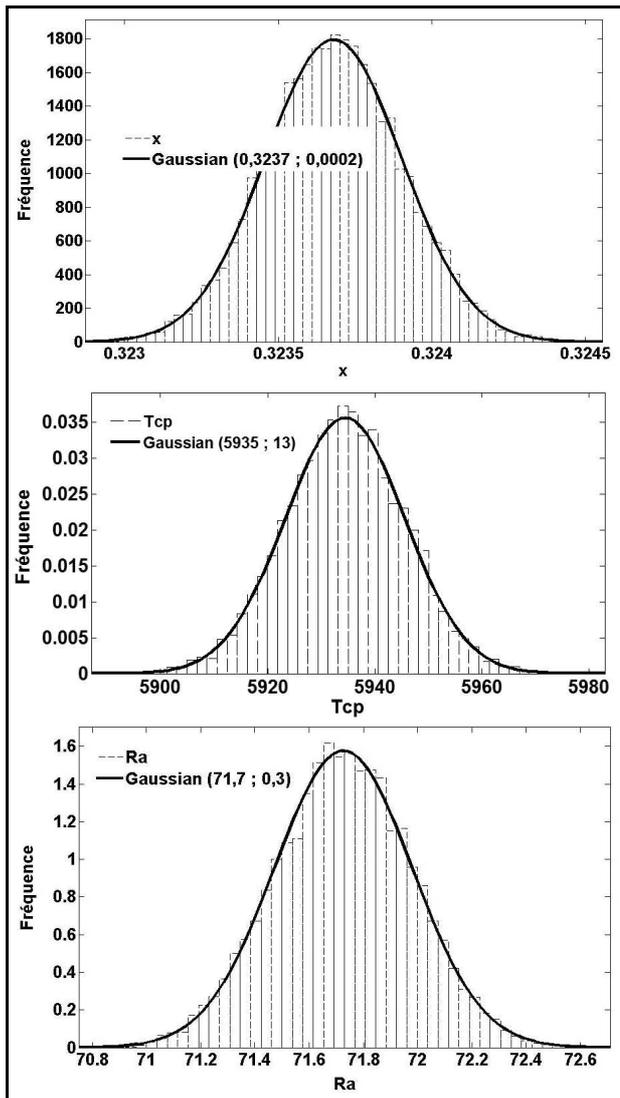


Fig. 8. – Distributions associées à la coordonnée chromatique x , à la température de couleur proximale T_{cp} , et à l'indice général de rendu des couleurs R_a , pour le système d'éclairage à LED blanc froid 1.

4. Étude du courant d'alimentation

4.1. Montage expérimental et incertitudes

Dans le cadre des mesures présentées dans cet article, celles-ci ont été réalisées à l'aide d'un spectroradiomètre référencé CS-2000, de marque Konica Minolta (fig. 9), utilisant une technologie différente de celle du Bentham.

Cet instrument a été choisi afin de réduire les temps de mesures. En effet, pour le spectroradiomètre du banc de référence (configuré pour répondre à nos besoins) le temps de mesure d'un seul spectre est proche de 20 min. Ce temps est de quelques dizaines de secondes environ pour le CS-2000, dans une configuration équivalente. Pour les résultats présentés dans cet article le nombre de spectres qui ont été mesurés, est supérieur à 150.

Ce spectroradiomètre permet de couvrir le même domaine spectral (380 nm – 780 nm) que le Bentham et définit sur l'objet une surface équivalente à celle définie par notre banc de référence. Le détecteur utilisé est une barrette CCD, asservie en température, par un élément Peltier.

La largeur de bande de sa fonction de transfert est de 5 nm. Or, le signal mesuré par le spectroradiomètre est proportionnel au résultat d'un produit de convolution entre la valeur vraie du spectre de la source étudiée, et la fonction de transfert du monochromateur. Afin de valider les mesures réalisées par le CS-2000, des écarts de spectres mesurés sur les différents éclairages à LED avec ce spectroradiomètre et celui du banc de référence ont été calculés. Ceux-ci ont été comparés avec les écarts de spectres calculés avant et après une simulation de convolution - effectuée sous labVIEW - avec une fonction de transfert triangulaire et symétrique de largeur de bande de 5 nm (figures 10a et 10b).

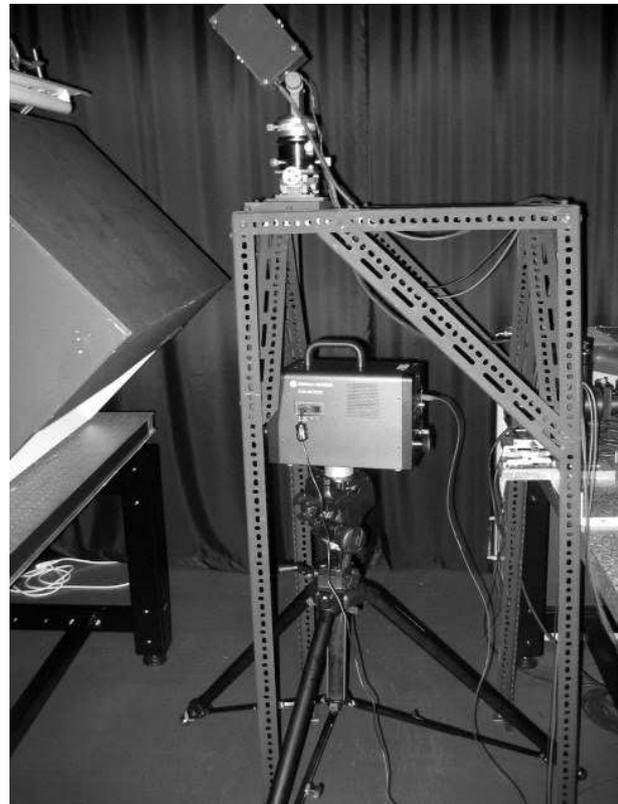


Fig. 9. – Spectroradiomètre CS-2000 de Konica Minolta.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence que les écarts de spectres étaient dus à la largeur de bande de la fonction de transfert. Ces mesures permettent également de montrer l'indépendance du mesurande vis-à-vis de la technologie de mesure utilisée.

Les éléments essentiels de la cabine (peinture, diffuseur) ont été choisis pour leur neutralité spectrale. Par conséquent, l'éclairage sur la surface analysée est

représentatif de la répartition spectrale intrinsèque des LED. Sans avoir les qualités d'une sphère intégrante, nous estimons que la cabine à lumière produit sur l'étalon blanc un éclairage qui est sensiblement proportionnel au flux. D'autant plus, que nous ne nous intéressons pas à la valeur absolue de ce flux mais à ces variations en fonction du courant d'alimentation des LED. Les mesures spectrales relatives effectuées, dans le cadre de cette étude, sont donc assimilées à des mesures de flux spectrique échantillonnées avec un pas $\Delta\lambda$, de 1 nm, dans le domaine visible, entre 380 nm et 780 nm. Ces mesures sont normées à 1 pour la valeur maximale du flux.

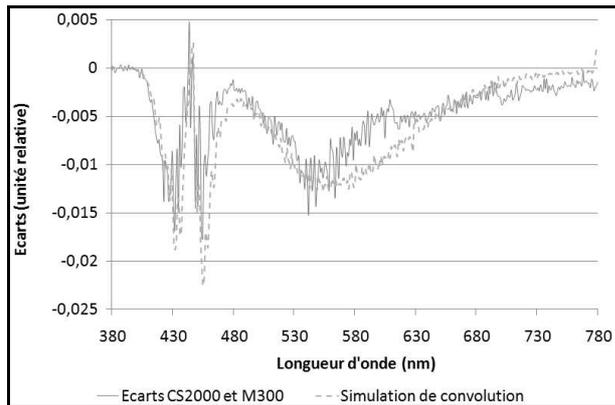


Fig. 10a. – Écarts sur les mesures spectrales relatives effectuées avec le Konica Minolta (CS-2000) et le Bentham (M300) comparés aux écarts de spectres calculés avant et après des simulations de convolution, avec une fonction de transfert de largeur de bande de 5 nm, sur le système d'éclairage à LED blanc froid 1.

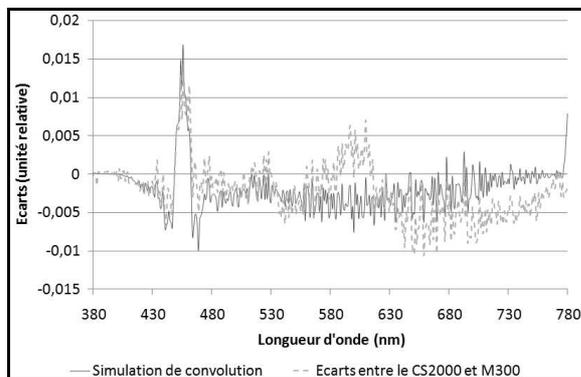


Fig. 10b. – Écarts sur les mesures spectrales relatives effectuées avec le Konica Minolta (CS-2000) et le Bentham (M300) comparés aux écarts de spectres calculés avant et après des simulations de convolution, avec une fonction de transfert de largeur de bande de 5 nm, sur le système d'éclairage à LED blanc chaud 1.

Les incertitudes calculées pour les mesures effectuées avec le CS-2000 reposent sur le même principe que celles calculées pour le banc de référence. Seules les incertitudes dues à la largeur de bande ont été ajustées. Le tableau 3 donne les incertitudes associées aux paramètres colorimétriques, déduits des mesures

spectrales effectuées avec le CS-2000. Ces valeurs peuvent être comparées aux valeurs des tableaux 2a et 2b. Il est ainsi possible de juger de l'influence de la largeur de bande du spectroradiomètre sur les paramètres colorimétriques des différents éclairages à LED. La largeur de bande de 5 nm ne modifie pas les incertitudes sur les paramètres des éclairages à LED de type blanc chaud. Par contre elle les modifie pour les éclairages à LED de type blanc froid d'un facteur au maximum égal à 2.

Tableau 3

Incertitudes types de mesures, sur les paramètres colorimétriques des éclairages à LED, effectuées avec le spectroradiomètre CS-2000.

Paramètres colorimétriques	Incertitude type				
	Blanc froid 1	Blanc froid 2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4	Blanc chaud 5
x	0,000 3	0,000 4	0,000 2	0,000 2	0,000 2
y	0,000 5	0,000 6	0,000 3	0,000 2	0,000 3
T_{cp}	16	22	4	3	3
R_1	1,2	1,3	0,6	0,7	0,7
R_2	1,2	1,2	0,6	0,7	0,6
R_3	0,8	0,6	0,5	0,3	0,4
R_4	0,6	1,0	0,5	0,6	0,5
R_5	0,9	1,1	0,5	0,6	0,6
R_6	1,2	1,4	0,6	0,6	0,7
R_7	1,2	1,1	0,6	0,7	0,7
R_8	1,1	1,2	0,7	0,7	0,8
R_9	0,8	1,0	0,5	0,5	0,5
R_{10}	1,4	1,6	0,8	1,0	0,9
R_{11}	0,6	0,8	0,4	0,5	0,4
R_{12}	0,6	0,8	0,4	0,5	0,4
R_{13}	1,5	1,7	0,9	1,0	0,9
R_{14}	0,6	0,4	0,3	0,2	0,3
R_a	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2
$R_{a 14}$	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2

4.2. Comment alimenter une LED ?

Une LED est un composant optoélectronique dont l'élément essentiel, qui émet de la lumière, est un semiconducteur. Ce semiconducteur possède une dépendance courant-tension qui n'est pas linéaire mais exponentielle, comme le montre la figure 11 [15]. Ainsi, une petite variation de tension engendre une grande variation de courant, et inversement une petite variation de courant engendre une petite variation de tension. Le flux étant quasi proportionnel au courant [15] il est préférable d'utiliser une alimentation en courant plutôt qu'en tension pour obtenir un flux stable.

De manière générale, il est possible d'alimenter des LED en courant de deux manières différentes. La première, qui est également la plus simple et la moins coûteuse, est une alimentation en courant continu. La deuxième est une alimentation en courant pulsé,

autrement nommée PWM (*Pulse Width Modulation*). Ce courant pulsé est constitué de créneaux d'amplitude fixe dont on fait varier le rapport cyclique R_c , exprimé par :

$$R_c = \frac{\tau}{T} \quad (26)$$

avec τ , la durée du pulse généré et T , la période du signal.

Ceci offre un moyen de faire varier le flux émis en fonction du rapport cyclique. On parle alors de « *dimming* ».

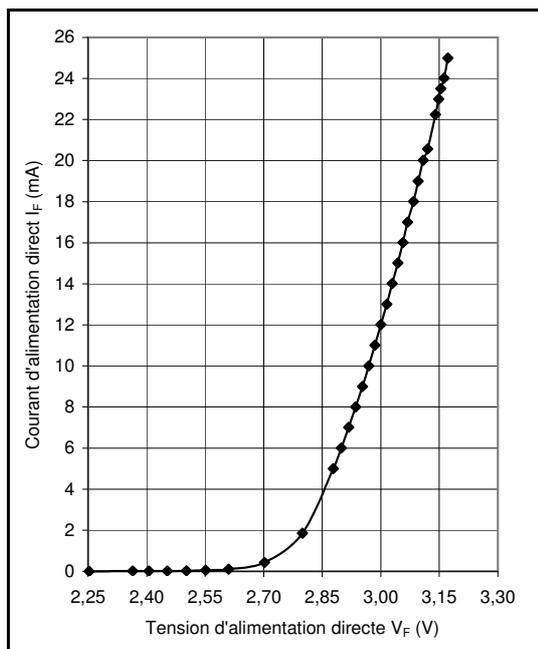


Fig. 11. – Caractéristique courant-tension d'une LED blanche.

4.3. Montages d'alimentation électrique

Le schéma de la figure 12 présente le montage mis en œuvre pour l'alimentation en courant continu des systèmes d'éclairage à LED. Nous utilisons une alimentation stabilisée qui permet de délivrer un courant de 0 A à 1,7 A dans une gamme de tension comprise entre 0 V et 35 V. Le courant d'alimentation est mesuré à partir de la tension aux bornes d'une résistance étalon quatre fils de 10 m Ω branchée en série dans le circuit électrique.

La stabilité relative du courant d'alimentation des LED pour ce montage est typiquement de l'ordre de quelques 10^{-5} . L'incertitude type relative sur la mesure du courant électrique a été estimée à 0,04 %.

Pour l'alimentation en courant pulsé, nous avons choisi d'utiliser un composant électronique appelé « *driver* » de LED, de marque MAXIM, référencé MAX16803, qui permet d'alimenter un système de une à dix LED branchées en série avec un courant maximal de 350 mA. Il s'agit d'un composant monté en surface (CMS) de 5 mm de côté et de 1 mm d'épaisseur. Le câblage du composant respecte les spécifications du

constructeur conformément au schéma de la figure 13. L'ajout d'une résistance de rappel R , entre la masse GND et l'entrée DIM, augmente la stabilité électrique du dispositif.

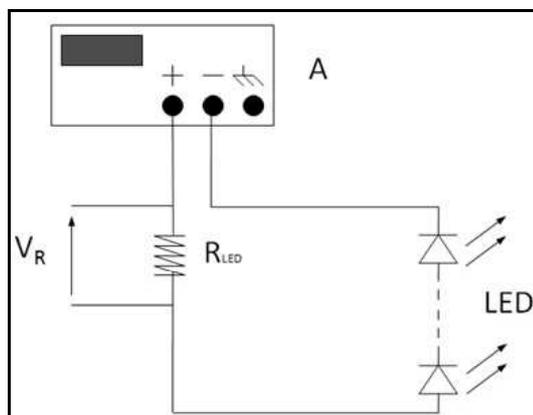


Fig. 12. – Montage d'alimentation en courant continu de LED ; A : alimentation stabilisée en courant, R_{LED} : résistance étalon de 10 m Ω .

Pour générer le signal en créneaux, un générateur de fonction délivre un signal TTL dont la fréquence varie de 1 μ Hz à 100 kHz et le rapport cyclique de 1 % à 99 %. Des mesures de stabilité relative du courant moyen d'alimentation des LED, ont été effectuées, à différentes fréquences et pour plusieurs rapports cycliques et, à chaque fois sur une durée de dix minutes grâce à la mesure de la tension aux bornes de la résistance R_{SENSE} . Les résultats donnent des stabilités relatives comprises entre 0,15 % et 0,45 % environ.

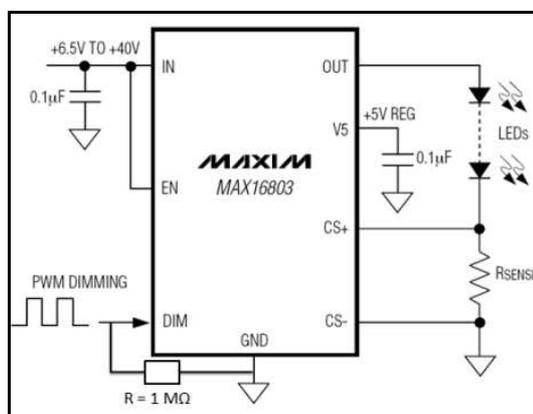


Fig. 13. – Montage d'alimentation en courant pulsé de LED ; IN correspond à la tension d'alimentation qui est fonction du nombre de LED branchées sur la sortie OUT du composant, R_{SENSE} a été choisie égale à 0,5 Ω , DIM est un signal TTL 0 V-5 V.

L'incertitude type relative sur la mesure du courant électrique moyen est estimée égale à 0,5 %. D'après les spécifications constructeur, l'exactitude du courant délivré en fonction de la valeur du rapport cyclique du signal TTL est de $\pm 3,5$ %. Des mesures ont permis de valider cette information.

4.4. Conditions de mesures

Les variations de flux spectrique des éclairages à LED ont été mesurées et les variations résultantes sur les paramètres photométriques et colorimétriques ont été calculées pour différents courants moyens et pour les deux modes d'alimentation.

Dans le cadre du montage en courant pulsé, des mesures spectrales ont été effectuées pour trois fréquences du signal TTL de 100 Hz, 500 Hz et 1 000 Hz. Pour chacune de ces fréquences, des mesures ont été réalisées pour sept rapports cycliques de 5 %, 10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 % et 99 % correspondant à des courants moyens de 17,5 mA, 35 mA, 105 mA, 175 mA, 245 mA, 315 mA et 350 mA, à l'exactitude de $\pm 3,5\%$ près donnée par le constructeur.

Pour l'alimentation en courant continu, des mesures spectrales ont été faites pour des courants moyens de 17,5 mA, 35 mA, 105 mA, 175 mA, 245 mA, 315 mA et 350 mA.

4.5. Résultats expérimentaux

Les variations spectrales majeures résident dans le choix du mode d'alimentation des LED. Les mesures ont montré que les évolutions du flux spectrique, dans le cadre d'une alimentation pulsée, étaient beaucoup moins importantes que celles obtenues dans le cadre d'une alimentation continue, de l'ordre d'un facteur dix au maximum (fig. 14 et 15). Ces variations spectrales sont contenues essentiellement dans deux domaines spectraux. Celui de l'émission propre du semiconducteur, dans la zone bleue du spectre visible, autour de 420 nm – 480 nm, et celui de l'émission du luminophore de la LED, dans la zone jaune-orange, autour de 510 nm – 650 nm. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Marc Dyble en 2005 [16].

On souligne que des variations spectrales se produisent sur le premier front montant des spectres dans le cas du courant continu alors qu'il s'agit du premier front descendant dans le cas du courant pulsé. De plus, aucune évolution significative des spectres en fonction de la fréquence du signal TTL, en mode pulsé, n'a été observée.

Le flux lumineux, calculé d'après la fonction d'efficacité spectrale relative de l'œil humain $V(\lambda)$, et d'après les spectres mesurés, est représenté sur les graphiques de la figure 16, en fonction du courant moyen dans les deux modes d'alimentation. La somme des carrés des écarts entre les données expérimentales et l'ajustement linéaire de ces données est de $5 \cdot 10^{-3}$ avec l'alimentation continue et de $2 \cdot 10^{-4}$ avec l'alimentation pulsée. Il apparaît donc que l'évolution du flux est plus linéaire pour une alimentation en courant pulsé, que pour une alimentation en courant continu. Ce résultat est en accord avec ceux présentés par Yimin Gu en 2006 [17].

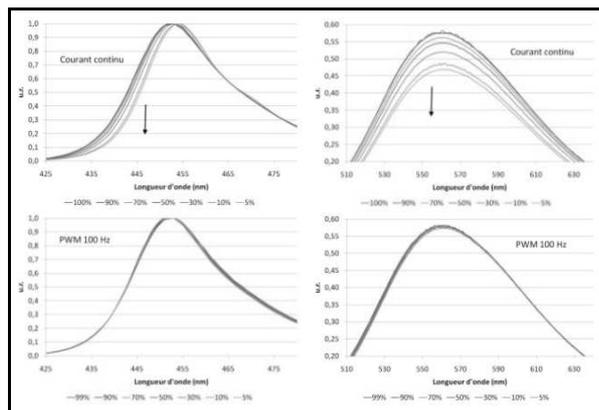


Fig. 14. – Spectres du système d'éclairage blanc froid 2 dans le visible entre 425 nm et 475 nm et entre 510 nm et 630 nm lorsque celui-ci est alimenté en courant continu et en pulsé.

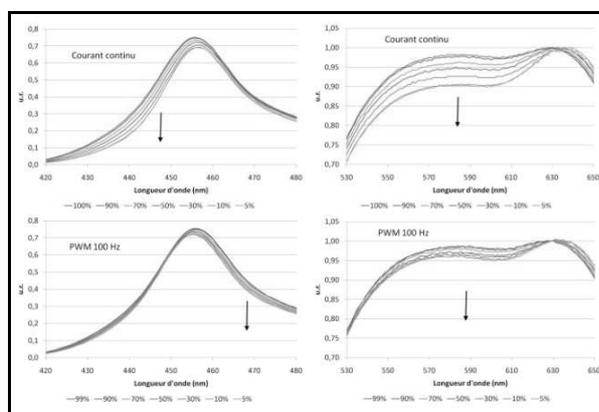


Fig. 15. – Spectres du système d'éclairage blanc chaud 3 dans le visible entre 420 nm et 480 nm et entre 530 nm et 650 nm lorsque celui-ci est alimenté en courant continu et en pulsé.

Les évolutions des paramètres colorimétriques ont été étudiées. Les figures 17a à 17c représentent les écarts Δx , Δy et ΔT_{cp} sur les paramètres colorimétriques calculés à partir des mesures effectuées à 5 % et à 100 % environ du courant moyen nominal de 350 mA.

Les figures 17d et 17e représentent les écarts calculés sur les indices de rendu des couleurs, de R_1 à R_{14} , dans les mêmes conditions.

De ces graphiques, il est possible de conclure que l'utilisation d'une alimentation en courant pulsé procure, globalement, une meilleure stabilité des paramètres colorimétriques que l'alimentation en courant continu.

Les incertitudes sur ces paramètres ont été calculées à partir de mesures effectuées pour une valeur de courant continu de 350 mA. Comme la stabilité relative du courant moyen est peu influencée par le rapport cyclique en courant pulsé, alors, les incertitudes présentées sont celles de l'ensemble des résultats.

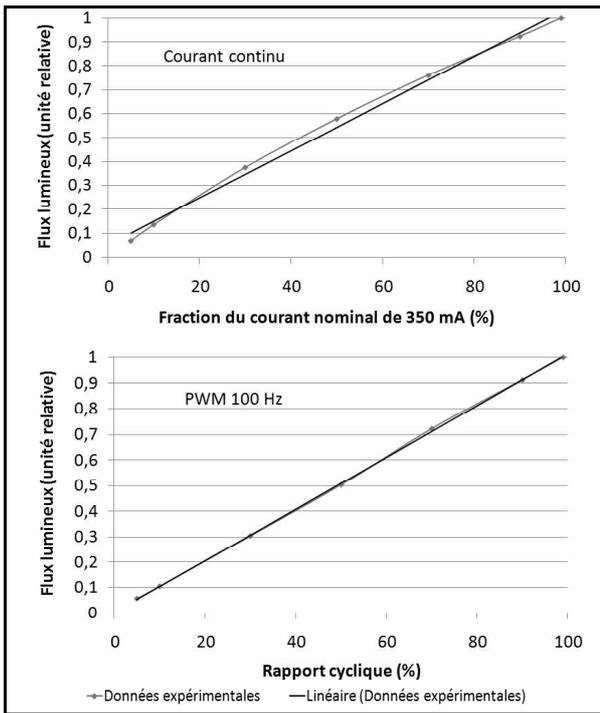


Fig. 16. – Évolution du flux lumineux en fonction du courant moyen d'alimentation (continu et pulsé) pour le système d'éclairage de type blanc chaud 3.

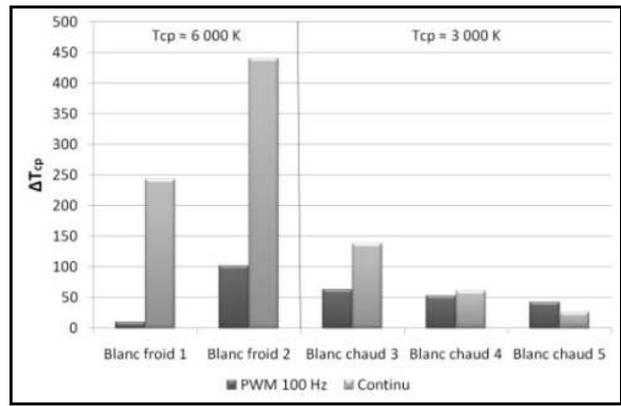


Fig. 17c. – Écarts sur la température de couleur proximale T_{cp} entre 100 % (ou 99 %) et 5 % du courant maximal de 350 mA.

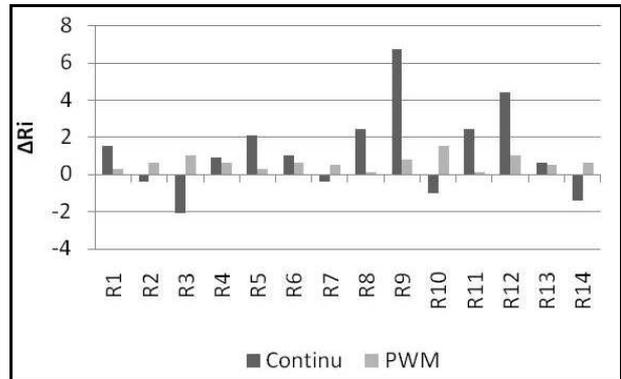


Fig. 17d. – Écarts sur les indices de rendu des couleurs entre 100 % (ou 99 %) et 5 % du courant maximal de 350 mA, pour l'éclairage blanc froid 2.

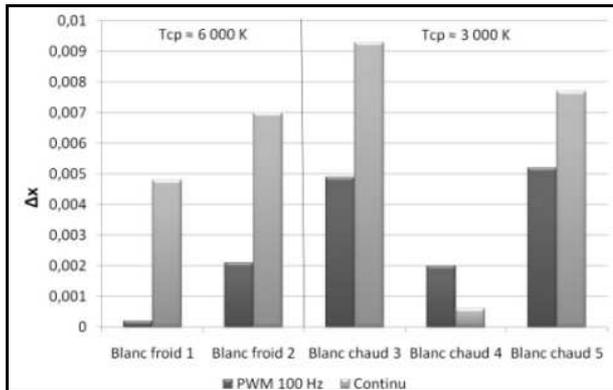


Fig. 17a. – Écarts sur la coordonnée chromatique x de l'espace CIE 1931 entre 100 % (ou 99 %) et 5 % du courant maximal de 350 mA.

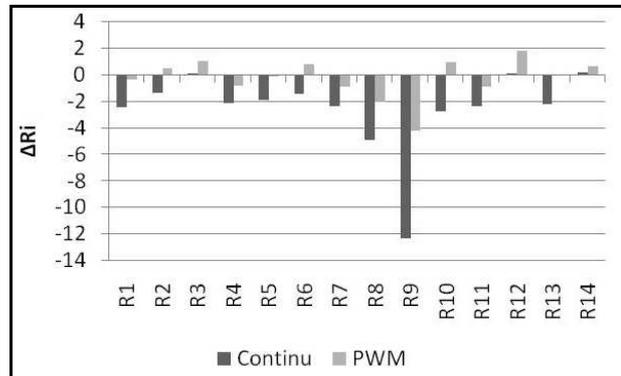


Fig. 17e. – Écarts sur les indices de rendu des couleurs entre 100 % (ou 99 %) et 5 % du courant maximal de 350 mA, pour l'éclairage blanc chaud 3.

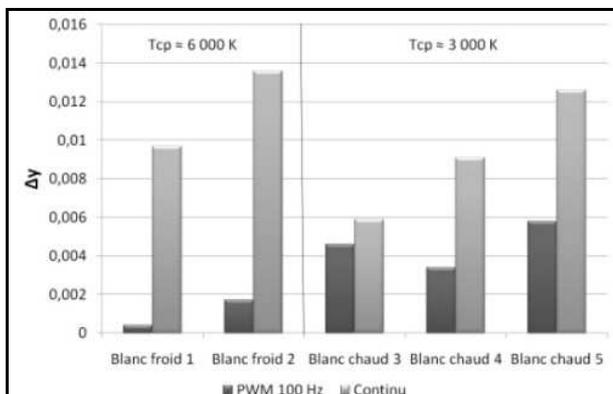


Fig. 17b. – Écarts sur la coordonnée chromatique y de l'espace CIE 1931 entre 100 % (ou 99 %) et 5 % du courant maximal de 350 mA.

5. Conclusion

Les sources à LED ont des caractéristiques colorimétriques différentes des sources à incandescence ou à fluorescence. Pour quantifier la variation des paramètres colorimétriques, il est fondamental de pouvoir juger de la validité des mesures sur ces paramètres, en leur attribuant une incertitude.

En 2000, James L. Gardner a présenté une méthode analytique de calcul de l'incertitude sur les coordonnées chromatiques et la température de couleur proximale basée sur le GUM [18] [19] [20].

En 2001, Yoshi Ohno a proposé une méthode numérique pour calculer les coefficients de sensibilité liant les incertitudes sur les coordonnées chromatiques et la température de couleur à celle de l'indice de rendu des couleurs [21].

La méthode de Monte Carlo permet de s'affranchir d'une grande partie du calcul des dérivés partielles, en particulier, lorsque les expressions analytiques sont complexes. De plus, elle permet d'associer des lois de distributions à chacune des grandeurs mesurées.

Des mesures spectrales relatives ainsi que des calculs colorimétriques ont été effectués sur des éclairages à LED. Les simulations de Monte Carlo réalisées ont permis de montrer que les distributions des coordonnées chromatiques et de la température de couleur proximale sont gaussiennes. Une nouvelle application de la méthode a permis de déterminer les distributions liées aux indices de rendu des couleurs, permettant d'en extraire les valeurs moyennes et les incertitudes types.

Dans une utilisation dynamique des éclairages, à l'aide de variateurs de puissance, l'étude sur un des paramètres d'influence des LED (le courant électrique d'alimentation) a montré que le mode d'alimentation en courant pulsé constitue le meilleur choix afin de conserver la stabilité des caractéristiques colorimétriques.

Références

- [1] "Light's Labour's Lost: Policies for Energy-efficient Lighting", *Organisation de coopération et de développement économiques – Agence internationale de l'énergie (OCDE/AIE)*, 2006, ISBN 92-64-10951-X.
- [2] "LED Life for General Lighting: recommendations for the definition and specification of useful life for light emitting diode light source", *Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies (ASSIST)*, 2006.
- [3] NAKAMURA S., SENOH M. et MUKAI T., "P-GaN/n-InGaN/n-GaN double heterostructure blue light emitting diodes", *Japanese Journal of Applied Physics*, **32**, 1993, L8-L11.
- [4] NAKAMURA S., SENOH M. et MUKAI T., "High power InGaN/GaN double heterostructure violet light emitting diodes", *Applied Physics Letters*, **62**, 1993, 2390-2392.
- [5] NAKAMURA S., MUKAI T. et SENOH M., "Candela class high brightness InGaN/AlGaN double heterostructure blue light emitting diodes", *Applied Physics Letters*, **64**, 1994, 1687-1689.
- [6] "Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement - Propagation of distributions using a Monte Carlo method", *BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP et OIML*, 2008.
- [7] « Colorimetry - Part 1: CIE standard colorimetric observers », *Commission internationale de l'éclairage*, 2006, CIE S 014-1/E:2006.
- [8] "Colorimetry", *Commission internationale de l'éclairage*, 2004, CIE 15-2004.
- [9] McCAMY C.S., "Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates", *Color Research and Application*, **17**, 1992, 142-144. Errata, *Color Research and Application*, **18**, 1993, 150.
- [10] *Commission internationale de l'éclairage*, "Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources", *CIE 13.3*, 1995.
- [11] ASTM E1808-96 (2003), "Standard guide for designing and conducting visual experiments".
- [12] BSI 950-1:1967, "Specification for artificial daylight for the assessment of colour. Part 1 : Illuminant for colour matching and colour appraisal".
- [13] ROUGIE B. et BASTIE J., « Réalisation de la référence d'éclairage à l'Institut national de métrologie », *Revue française de métrologie*, **5**, 2006, 31-40.
- [14] POUSSET N., ROUGIE B. et RAZET A., "Uncertainty evaluation of LED measurement colour by Monte Carlo simulations", *Metrologia*, **46**, 2009, 704-718. Corrigendum, *Metrologia*, **47**, 2010, 112.
- [15] POUSSET N., RAZET A., OBEIN G., RICHARD A. et BASTIE J., « Métrologie des diodes électroluminescentes », *Congrès international de métrologie*, Lille, France, 18-21 juin 2007.
- [16] DYBLE M., NARENDRAN N., BIERMAN A., KLEIN T., "Impact of dimming white LEDs : chromaticity shifts due to different dimming method", *Fifth international conference on solid state lighting*, San Diego, Etats-Unis d'Amérique, 1-4 août 2005.
- [17] GU Y., NARENDRAN N., DONG T. et WU H., "Spectral and luminous efficacy change of high power LEDs under different dimming methods", *Sixth International Conference on Solid State Lighting*, Proceedings of SPIE 6337, San Diego, Etats-Unis d'Amérique, 14-17 août 2006.
- [18] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP et OIML, « Guide pour l'expression des incertitudes de mesures », 1995.
- [19] GARDNER J.L., "Uncertainty estimation in colour measurement", *Color Research and Application*, **25**, 2000, 349-355.
- [20] GARDNER J.L., "Correlated colour temperature – Uncertainty and estimation", *Metrologia*, **37**, 2000, 381-355.
- [21] OHNO Y., "A numerical method for Color Uncertainty", *CIE Expert Symposium on Uncertainty Evaluation*, Vienne, Autriche, 22-24 janvier 2001.

Article reçu le 24 avril 2009 ; version révisée reçue le 6 octobre 2009.