

LED DE PUISSANCE BLANCHES : SOURCES DE LUMIERE DE DEMAIN

N. Pousset, B. Rougié, S. Aubert, A. Razet
LNE-INM/Cnam
61 rue du Landy
93210 La Plaine - Saint Denis

Résumé

La qualité de la lumière émise par des systèmes d'éclairage à base de LED de puissance a été étudiée au sein du LNE-INM/Cnam, via des paramètres colorimétriques évoluant en fonction du mode d'alimentation électrique (courant continu et pulsé) des LED. Les valeurs d'incertitudes sur les mesures spectrales relatives et sur les paramètres colorimétriques sont présentées.

Abstract

The quality of light emitted by lighting systems based on high brightness LEDs has been studied in the LNE-INM/Cnam via colorimetric parameters evolving with electrical power (continuous and pulsed current). Uncertainties values on relative spectral measurements and colorimetric parameters are presented.

Introduction

A l'heure du développement durable, la consommation électrique et le respect de l'environnement sont les vocables qui caractérisent les diodes électroluminescentes (LED : Light Emitting Diode). D'une technologie datant des années 60, les LED constituent actuellement un ensemble vaste et éclectique dont les applications dépendent à la fois de la puissance lumineuse et de la couleur d'émission.

Les LED de faible puissance (inférieure à 1W) ont, depuis les années 70, des applications au quotidien : voyants lumineux sur divers appareils, tableaux de bord des véhicules, signalisation routière,...

Les LED blanches de forte puissance, apparues grâce notamment aux recherches de S. Nakamura dans les années 90, sont actuellement en plein essor pour une utilisation dans l'éclairage, le rétro-éclairage des écrans et les phares avant d'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. Un des avantages majeurs de la mise en œuvre des LED de puissance concerne leur efficacité lumineuse. Alors que l'efficacité lumineuse typique des lampes à incandescence est de 15 lm/W, celle des LED est de l'ordre de 40 à 80 lm/W ce qui les rapproche des sources à fluorescences dont l'efficacité typique est proche de 100 lm/W.

Le LNE-INM/Cnam, s'est intéressé à la qualité de la lumière émise selon les conditions d'alimentation électrique des LED. Dans cet article, les variations spectrales du flux ont été analysées en fonction de la valeur du courant moyen dans chacun des deux modes d'alimentation (continu et pulsé) des éclairages à LED mis en œuvre. Ces mesures spectrales ont permis de quantifier les variations de paramètres colorimétriques.

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.

Systèmes d'éclairage à LED et spectroradiomètre

Le schéma de la figure 1 présente le banc de référence de caractérisation de LED de puissance développé au LNE-INM/Cnam [1]. 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 sur ces éclairages.

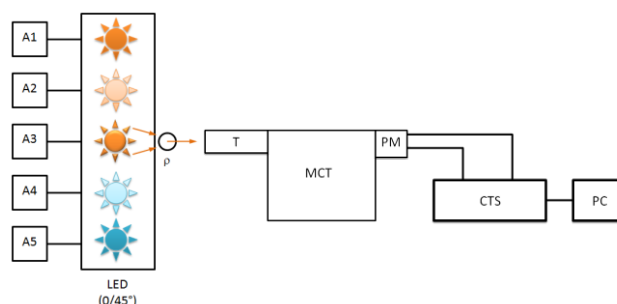


Figure 1 - Description schématique du montage de référence du LNE-INM/Cnam permettant d'effectuer des mesures spectrales relatives sur des systèmes d'éclairage à LED. Ai : Alimentations stabilisées en courant, ρ : Etalon blanc de réflexion diffuse éclairé par un des systèmes d'éclairage à LED, T : Téléobjectif, MCT : Monochromateur de type Czerny-Turner, PM : Photomultiplicateur, CTS : Chaîne de traitement du signal.

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 a été conçue 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. Cette cabine fait 1 m de long pour 60 cm de profondeur et de hauteur. 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 (noté 1 et 2) et proviennent de deux fabricants distincts et les trois autres éclairages sont de type blanc chaud (noté 3, 4, et 5) et proviennent également de trois fabricants différents. Les répartitions spectrales des sources 1 et 2 sont représentées sur la figure 2a et celles des sources 3, 4 et 5 sont représentées sur la figure 2b. Les températures de couleur proximales moyennes sont respectivement pour les deux systèmes 1 et 2, de 5930 K et 6100 K, et pour les trois systèmes 3, 4 et 5, de 3500 K, 2850 K et 3030 K. Chaque éclairage est composé de 10 LED de 1 W branchées en série et montées sur un dissipateur thermique en aluminium anodisé. Un diffuseur est placé sous les éclairages à

LED à une distance de 15 cm afin d'obtenir un éclairage uniforme, dans la cabine à lumière, sur un étalon blanc de réflexion diffuse qui sera la surface d'analyse.

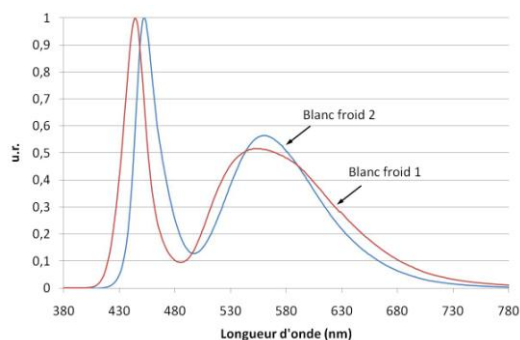


Figure 2a - Spectres des systèmes d'éclairage à LED de type blanc froid montés dans la cabine à lumière du LNE-INM/Cnam.

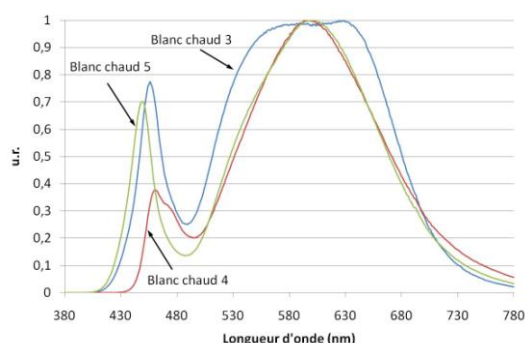


Figure 2b - Spectres des systèmes d'éclairage à LED de type blanc chaud montés dans la cabine à lumière du LNE-INM/Cnam.

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 comprises entre 200 nm et 1,4 μm environ. Son utilisation est restreinte au domaine de longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nm. La largeur de bande de la fonction de transfert est de 1 nm. La résolution du moteur pas à pas assurant la rotation du réseau permet des déplacements en longueur d'onde d'une valeur minimale de 0,075 nm. La surface analysée correspond à une aire de 1 cm^2 environ sur l'étalon blanc.

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.

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 minutes. Ce temps est de 10 secondes environ pour le CS-2000 dans une configuration équivalente. Pour les résultats présentés dans cet article le nombre de spectre qui ont été mesurés, est supérieur à 150.

Ce spectroradiomètre permet de couvrir le même domaine spectral que le Bentham et définit sur l'objet une surface équivalente à celle définie par notre banc de référence. 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 le banc de référence ont été calculés. Ceux-ci ont été comparés avec les écarts de spectres calculés avant et

après une simulation de convolution avec une fonction de transfert triangulaire et symétrique de largeur de bande de 5 nm. Ceci a permis de mettre en évidence que les écarts étaient dus à la largeur de bande de la fonction de transfert comme le montre la figure 3.

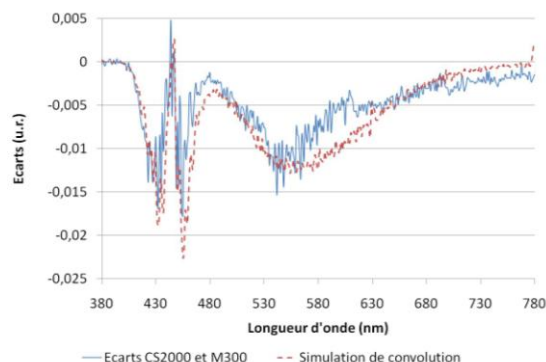


Figure 3 - Écarts sur les mesures spectrales relatives effectuées avec le CS-2000 et le banc de référence (M300) comparés aux écarts de spectres calculés avant et après des simulations de convolution avec une fonction de largeur de bande de 5 nm sur le système d'éclairage à LED blanc froid 1.

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 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 sont donc assimilées à des mesures de flux spectrique ϕ_λ échantillonnées avec un pas, $\Delta\lambda$, de 1 nm, dans le domaine visible, entre 380 et 780 nm, sur les cinq systèmes d'éclairage à LED. Ces mesures sont normées à 1 pour la valeur maximale du flux.

Les incertitudes calculées pour les mesures effectuées avec le CS-2000 reposent sur le même principe que celles calculées pour le banc de référence [1]. Seules les incertitudes dues à la largeur de bande ont été ajustées. Le tableau 1 présente quelques incertitudes associées aux mesures de flux spectrique relatif des différents éclairages à LED effectuées avec le CS-2000.

Paramètres colorimétriques

La qualité de la lumière émise par une source est caractérisée par deux notions indissociables que sont sa couleur apparente et sa capacité à rendre les couleurs. Ces deux propriétés sont caractérisées par la température de couleur proximale et les indices particuliers de rendu des couleurs. La détermination de ces paramètres nécessite le repérage de la source de lumière dans un système colorimétrique à l'aide de coordonnées chromatiques.

Dans cet article seules les coordonnées chromatiques x et y de l'espace CIE XYZ 1931 [2] ont été étudiées. Elles sont définies par :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (1)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

avec les composantes trichromatiques X, Y, Z exprimées par :

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

où \bar{x}_{λ} , \bar{y}_{λ} , \bar{z}_{λ} sont les fonctions colorimétriques d'un observateur de référence CIE 1931, et

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} \Phi_{\lambda} \cdot \bar{y}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda} \quad (3)$$

La température de couleur proximale a été calculée par la méthode de McCamy [3] tel que :

$$T_{cp} = 5520,3 - 6823,3 \cdot n + 3525 \cdot n^2 - 449 \cdot n^3 \quad (4)$$

où l'expression de n est donnée par :

$$n = \frac{x - 0,3320}{y - 0,1858} \quad (5)$$

La méthode de calcul des indices particuliers de rendu des couleurs, notés de R_1 à R_{14} , basée sur 14 échantillons de couleur test de l'atlas de Munsell, est décrite dans la recommandation de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) [4].

Alimenter une LED : courant ou tension?

Une LED est un composant opto-électronique 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 4. 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 [5] 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 :

$$R_c = \frac{\tau}{T} \quad (6)$$

avec :

τ , la durée du pulse généré.

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 ».

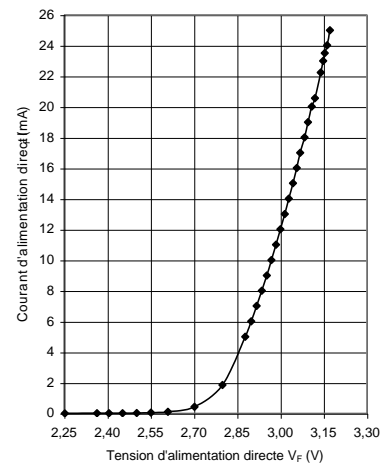


Figure 4 - Caractéristique courant - tension d'une LED blanche de type 5 mm. D'après [5].

Comparaison courant continu - courant pulsé

Montages d'alimentation électrique

Courant continu

Le schéma de la figure 5 présente le montage mis en œuvre pour l'alimentation en courant continu des systèmes d'éclairage à LED. Nous utilisons une alimentation stabilisée en courant qui permet de délivrer un courant de 0 à 1,7 A dans une gamme de tension comprise entre 0 et 35 V. Le courant d'alimentation est mesuré à partir de la tension aux bornes d'une résistance étalon 4 fils de 10 mΩ branchée en série dans le circuit électrique.

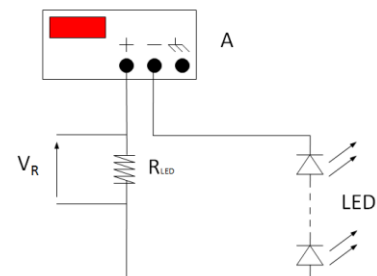


Figure 5 - Montage d'alimentation en courant continu de LED.
A : Alimentation stabilisée en courant, R_{LED} : résistance étalon de 10 mΩ.

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

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 1 à 10 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 constructeur conformément au schéma de la figure 6. Une résistance de rappel R entre la masse GND et l'entrée DIM augmente la stabilité électrique du dispositif.

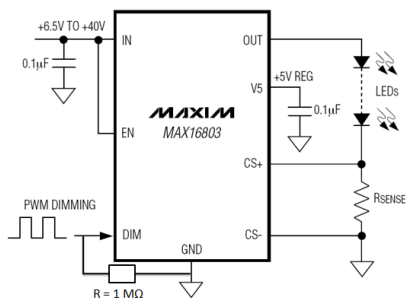


Figure 6 - Montage d'alimentation en courant pulsé de LED. IN correspond à la tension d'alimentation et est fonction du nombre de LED branchées sur la sortie OUT du composant, R_{SENSE} a été choisie égale à $0,5 \Omega$, DIM est un signal TTL 0-5 V.

Pour générer le signal en créneaux, un générateur de fonction délivre un signal TTL dont la fréquence varie de $1 \mu\text{Hz}$ 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 cyclique et, à chaque fois sur une durée de 10 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. L'incertitude 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 $\pm 3,5\%$.

Mesures expérimentales

Conditions de mesures

Les variations de flux spectrique des éclairages à LED ont été mesurées et les variations résultantes sur les paramètres radiométriques 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, 500 et 1000 Hz. Pour chacune de ces fréquences, des mesures ont été réalisées pour sept rapports cyclique de 5, 10, 30, 50, 70, 90 et 99% correspondant à des courants moyens d'environ 17,5, 35, 105, 175, 245, 315 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, 35, 105, 175, 245, 315 et 350 mA.

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 10 au maximum (figures 7 et 8). 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 420-480 nm, et celui de l'émission du luminophore de la LED, dans la zone jaune-orange, autour de 510-650 nm. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Dyble en 2005 [6]. 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.

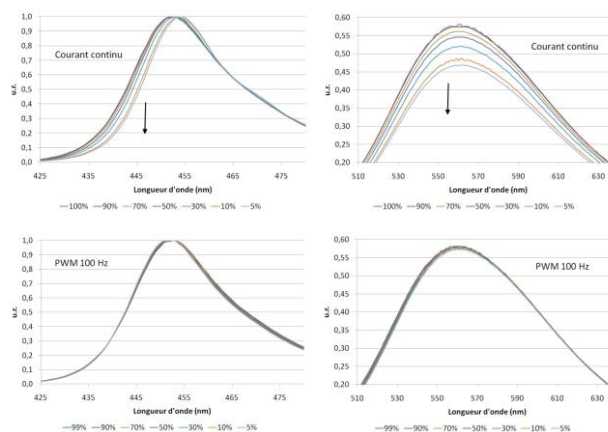


Figure 7 - Spectres du système d'éclairage blanc froid 2 dans le visible entre 425 et 475 nm et entre 510 et 630 nm lorsque celui-ci est alimenté en courant continu et en pulsé.

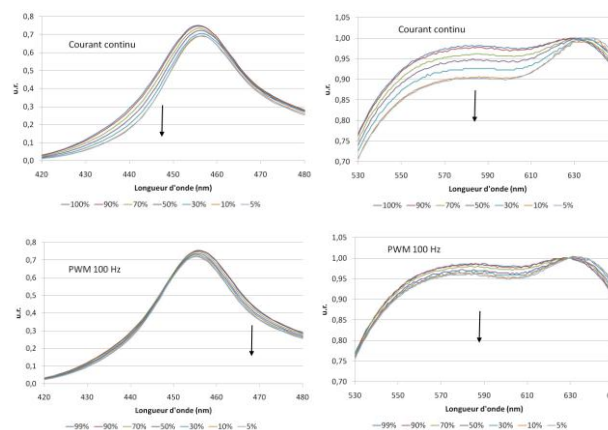


Figure 8 - Spectres du système d'éclairage blanc chaud 3 dans le visible entre 420 et 480 nm et entre 530 et 650 nm lorsque celui-ci est alimenté en courant continu et en pulsé.

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 9, en fonction du courant moyen dans les deux modes d'alimentation. Il apparaît 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 Gu en 2006 [7].

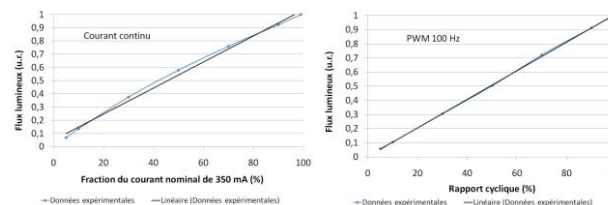


Figure 9 - Evolution du flux lumineux en fonction du courant moyen d'alimentation (continu et pulsé) pour le système d'éclairage de type blanc chaud 3.

Les évolutions des **paramètres colorimétriques** (coordonnées chromatiques x et y , température de couleur proximale T_{cp} , et indices de rendu des couleurs) ont été étudiées. Les figures 10a à 10c 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 10d et 10e représentent le 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.

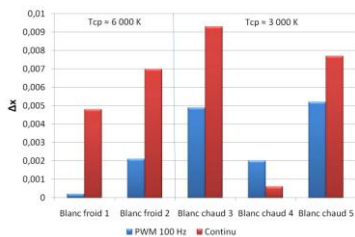


Figure 10a - Ecart Δx sur la coordonnée chromatique x de l'espace CIE 1931 entre 100% et 5% du courant maximal de 350 mA.

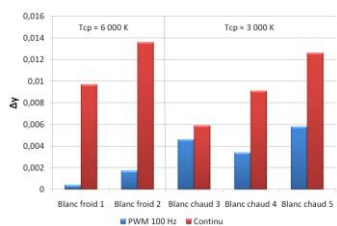


Figure 10b - Ecart Δy sur la coordonnée chromatique y de l'espace CIE 1931 entre 100% et 5% du courant maximal de 350 mA.

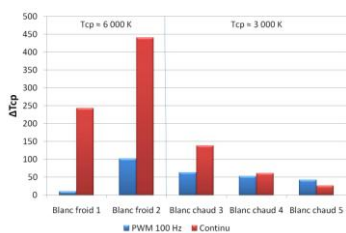


Figure 10c - Ecart ΔT_{cp} sur la température de couleur proximale entre 100% et 5% du courant maximal de 350 mA.

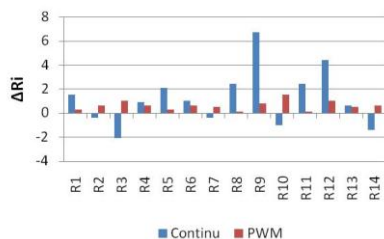


Figure 10d - Ecart sur les indices de rendu des couleurs entre 100% et 5% du courant maximal de 350 mA pour l'éclairage blanc froid 2.

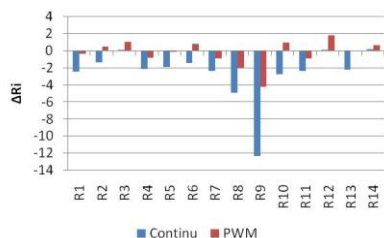


Figure 10e - Ecart sur les indices de rendu des couleurs entre 100% et 5% du courant maximal de 350 mA pour l'éclairage blanc chaud 3.

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 (tableau 2) sont celles de l'ensemble des résultats.

Alimentation en courant continu : exactitude et stabilité

Variations spectrales autour du courant nominal

Une étude a été réalisée sur le courant électrique continu délivré par trois transformateurs commerciaux dédiés à l'alimentation de LED de 1 à 3 W. L'objectif de cette étude était, d'une part, l'examen de la stabilité du courant délivré par ce type d'alimentation en fonction du temps, et d'autre part, de l'exactitude des datasheets (écarts de courant entre la valeur nominale donnée par les datasheets et par les mesures réelles). Les mesures ont montré que cette exactitude est de $\pm 5\%$ et la stabilité relative du courant de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} .

Une étude sur les variations spectrales du flux et sur les paramètres colorimétriques a été effectuée en fonction des courants d'alimentation des éclairages à LED dans une gamme de $\pm 5\%$ et $\pm 15\%$ autour du courant nominal de 350 mA. Ceci a permis d'évaluer les variations des paramètres colorimétriques pour des stabilités relatives du courant de l'ordre de 10^{-3} et 10^{-4} .

Résultats expérimentaux

Les figures 11 et 12 montrent qu'une augmentation (une diminution) du courant d'alimentation des LED de puissance engendre globalement une augmentation (une diminution) du flux émis, avec cependant, des nuances suivant la zone spectrale.

Des stabilités relatives du courant de 10^{-3} et 10^{-4} donnent respectivement, sur les coordonnées chromatiques, des variations inférieures à environ 10^{-6} et 10^{-5} et sur la température de couleur proximale des variations de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-1} K, et ceci, quelque soit le type d'éclairage à LED.

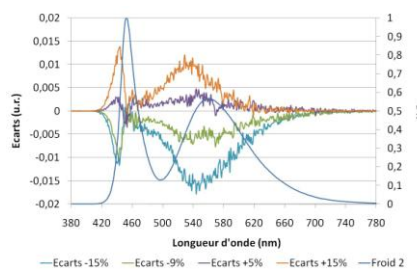


Figure 11 - Evolution du spectre de l'éclairage blanc froid 2 en fonction de l'écart de courant par rapport au courant nominal de 350 mA.

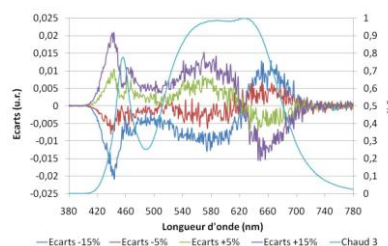


Figure 12 - Evolution du spectre de l'éclairage blanc chaud 3 en fonction de l'écart de courant par rapport au courant nominal de 350 mA.

Des exactitudes de l'ordre de $\pm 5\%$ et de $\pm 15\%$ donnent des variations linéaires sur les coordonnées chromatiques de l'ordre de quelques 10^{-4} dans le premier cas, et de quelques 10^{-4} à

quelques 10^{-3} dans le second cas. Les variations sur la température de couleur proximale sont inférieures à la dizaine de kelvin dans le premier cas, et dans le second cas, elles sont comprises entre 10 et 40 K. Pour les indices particuliers de rendu des couleurs les écarts sont en moyenne dans le premier cas de 0,2 et dans le second cas de 0,3.

Les variations sur la température de couleur proximale ne sont pas significatives pour des valeurs de l'ordre de 10 à 20 K mais le sont pour des valeurs supérieures à 20 K compte tenu de l'incertitude sur ce paramètre (tableau 2). Pour les indices de rendu des couleurs, ces écarts ne sont pas significatifs considérant que l'incertitude moyenne est comprise entre 0,6 et 1,1.

Ces résultats montrent que les variations du flux spectrique et celles des paramètres colorimétriques autour du courant nominal sont extrêmement faibles.

Conclusions

Dans une utilisation dynamique des éclairages, les différentes études ont montré que le mode d'alimentation en courant pulsé des LED constitue le meilleur choix afin de conserver la stabilité des caractéristiques colorimétriques.

Dans une utilisation statique des éclairages, le choix se porte plus sur une alimentation en courant continu, moins coûteuse et d'une mise en pratique plus simple, qui offre une très bonne stabilité des paramètres colorimétriques autour du courant nominal d'alimentation. La caractérisation de ces LED, en courant continu, permettrait de les envisager comme source de référence dans le cadre de mesures colorimétriques.

Références bibliographiques

- [1] N. Pousset, B. Rougié, A. Razet, « Uncertainty evaluation of LED measurement color by a Monte Carlo simulations », Metrologia, 2009, soumis.
- [2] Commission Internationale de l'Eclairage, « CIE 15.2 - Colorimetry », 1986.
- [3] C.S. McCamy, « Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates », Color Research and Application, 17, pp. 142-144, 1992. Errata, Color Research and Application, 18, p. 150, 1993.
- [4] Commission Internationale de l'Eclairage, « CIE 13.3 - Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources 3rd edition », 1995.
- [5] N. Pousset, A. Razet, G. Obein, A. Richard, J. Bastie, « Métrologie des diodes électroluminescentes » dans Actes des conférences Métrologie 07, 2007.
- [6] M. Dyble, N. Narendran, A. Bierman, T. Klein, « Impact of dimming white LEDs : chromaticity shifts due to different dimming method », Proceedings of fifth international conference on solid state lighting, 2005.
- [7] Y. Gu, N. Narendran, T. Dong, H. Wu, « Spectral and luminous efficacy change of high power LEDs under different dimming methods », Proceedings of sixth international conference on solid state lighting, 2006.

Longueur d'onde (nm)	Incertitude-type				
	Blanc froid 1	Blanc froid 2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4	Blanc chaud 5
380	0,0002	0,0001	0,0004	0,0002	0,0002
480	0,0032	0,0083	0,0037	0,0043	0,0042
580	0,0099	0,0134	0,0107	0,0099	0,0101
680	0,0029	0,0029	0,0088	0,0062	0,0060
780	0,0032	0,0016	0,0079	0,0198	0,0116

Tableau 1. Incertitude-type sur les mesures de flux spectrique normées à 1 pour le flux maximum, sur les éclairages à LED pour quelques longueurs d'onde du domaine 380-780 nm.

Paramètres colorimétriques	Incertitude-type				
	Blanc froid 1	Blanc froid 2	Blanc chaud 3	Blanc chaud 4	Blanc chaud 5
x	0,0003	0,0004	0,0002	0,0002	0,0002
y	0,0005	0,0006	0,0003	0,0002	0,0003
T _{cp}	16	22	4	3	3
R ₁	1,2	1,3	0,6	0,7	0,7
R ₂	1,1	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
Moyenne sur R _i	1,0	1,1	0,6	0,6	0,6

Tableau 2. Incertitude-type de mesure sur les paramètres colorimétriques des éclairages à LED.