



PHOTOMETRE POUR LA MESURE EN PRODUCTION DE L'ECLAIREMENT PRODUIT PAR DES LEDS

J. Sadi*, N. Kolem*, P. Pfeiffer, I. El-Hafidi****

*Lightnics Sarl

Via Innova / Espace Lunel Littoral
177b, avenue Louis Lumière – 34400 LUNEL
Tél : +33(0)4.67.64.37.72
contact@lightnics.com

**Laboratoire des Systèmes

Photoniques – ENSPS
67 400 Illkirch-Graffenstaden
Tél : +33(0)3.90.24.46.30

Introduction

Les photomètres disponibles donnent pleinement satisfaction pour les mesures d'éclairage en lumière blanche mais sont généralement mal adaptés aux mesures sur des LEDs. Ils ont en effet été conçus et sont calibrés pour mesurer des sources à spectre étendu couvrant une grande partie du domaine visible (Illuminant A par exemple). Ces photomètres ou luxmètres, sont donc mieux adaptés aux mesures en lumière naturelle (solaire) ou artificielle (éclairage incandescent ou halogène), qu'aux mesures sur LEDs.

En regard de ce constat, nous voyons apparaître une grande variété d'applications mettant en jeu des sources lumineuses à spectre étroit : les LEDs ponctuelles et leurs dérivés surfaciques. En effet, nous trouvons celles-ci aussi bien dans des systèmes d'éclairage : feux multicolores, lampes ou tableaux de bord automobiles, que dans des systèmes d'affichage : écrans géants à LEDs ou écrans miniatures à OLEDs.

Le spectre étroit propre à ces sources ne correspond pas aux spectres étalons utilisés pour le calibrage des photomètres courants : en conséquence, ces photomètres, calibrés pour la lumière blanche, sont mal adaptés aux mesures de l'éclairage produit par des LEDs.

Il apparaît donc nécessaire de développer, pour les industriels du domaine, un photomètre adapté aux mesures sur ce type de sources à spectre étroit, notamment les LEDs. Cet appareil doit vérifier plusieurs critères de qualité : universalité selon le type de LED, compacité, rapidité de mesure et simplicité (robustesse). Il répond ainsi à différents besoins industriels : tri des LEDs en cours de production, validation des LEDs par le client, tri des LEDs en classes homogènes par un constructeur d'écran, etc.

1. Problématique

Le spectre de la source lumineuse est relié à l'éclairage visuel par la relation :

$$I_v = \frac{K_m}{\Omega} \int \phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Où $K_m = 683 \text{ lum/W}$, ϕ_e désigne le spectre de la source et V la fonction photopique. D'après cette relation, on voit bien qu'un photomètre réglé pour fournir une mesure correcte de l'éclairage visuel en lumière blanche tiendra compte d'un spectre fort différent de ceux des LEDs, représentés en Figure 1.

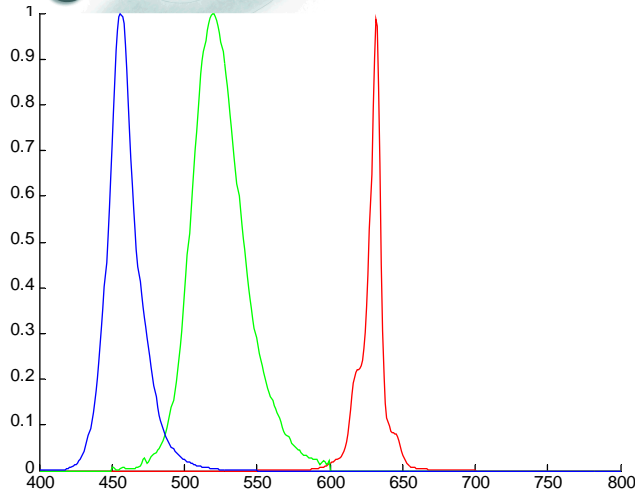


Figure 1 : Forme des spectres mesurés sur des LEDs Rouge, verte et bleue. Les caractéristiques des LEDs sont :

- LED rouge : pic à 632 nm et largeur spectrale à mi-hauteur (LSMH) de 8 nm ;
- LED verte : pic à 520 nm et largeur spectrale à mi-hauteur (LSMH) de 38 nm ;
- LED bleue : pic à 456 nm et largeur spectrale à mi-hauteur (LSMH) de 20 nm ;

2. Voies de solutions

Plusieurs alternatives existent [1] pour réaliser un photomètre qui tienne compte des spectres étroits spécifiques aux LEDs mais aussi à d'autres sources. Une solution serait ainsi d'intégrer un spectromètre au photomètre pour mesurer directement le spectre des LEDs avant d'en donner une mesure d'intensité visuelle. Une autre alternative consisterait à utiliser un filtre adapté à la réponse spectrale du capteur contenu dans le photomètre de manière à recréer la réponse photopique de l'œil humain, ou d'utiliser directement des capteurs à réponse spectrale photopique. Les deux premières solutions se révèlent onéreuses du fait du prix des composants pour la première et de la nécessité de réaliser des filtres sur mesure pour la seconde. Tandis que la troisième alternative, séduisante sur le papier, se révèle imprécise dès lors que le pic spectral de la LED se situe dans un domaine où la courbe de réponse du capteur présente une grande divergence par rapport à la courbe idéale de la fonction photopique.

Il s'avère donc plus judicieux de contourner le problème en bâtissant un photomètre autour d'un capteur standard (par exemple une photodiode) et d'en corriger numériquement sa réponse spectrale pour l'adapter aux caractéristiques d'émission des LEDs à mesurer.

3. Solution retenue

La réponse de la photodiode standard est corrigée suivant la relation [2] :

$$I_V = \frac{K_m \cdot I_{ph}}{\Omega \cdot R_{\max}} \frac{\int \phi_{e01}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{e01}(\lambda) \cdot R_{01}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

où I_{ph} est le photocourant mesuré, Ω l'angle solide du détecteur, R_{\max} la valeur maximale de la réponse du détecteur, ϕ_{e01} le spectre normalisé de la LED, R_{01} la réponse normalisée de la photodiode.

Cette correction demande de dimensionner avec rigueur les paramètres influant sur l'incertitude finale de la mesure :

- l'angle solide : évaluation précise de la surface réelle éclairée au niveau du capteur, si celui-ci intègre une lentille (une modélisation à l'aide d'un logiciel de CAO optique est alors nécessaire) ;
- les spectres des LEDs ϕ_{e01} et réponse R_{01} : la précision des mesures doit être homogène, notamment si l'un des deux spectres est fourni par une fiche technique ;
- la réponse maximale R_{max} : sa détermination doit être effectuée dans des conditions aussi proches que possibles de la mesure réelle (longueur d'onde et tension appliquée au photomètre) ;
- les caractéristiques des composants induisant la génération d'un photocourant parasite additionnel (bruits électroniques, lumières parasites, etc.) ;
- la variabilité de la réponse d'une photodiode à l'autre (réponse spectrale relative et sensibilité absolue).

4. Mesures

a) Mesure de la réponse du photomètre à une longueur d'onde laser variable en intensité.

Les mesures de linéarité sur notre photomètre ont été pratiquées sur un montage à deux bras et à lame séparatrice 50/50 : un bras contenait notre photomètre tandis que l'autre bras disposait d'un photomètre de laboratoire effectuant simultanément la mesure de la même intensité lumineuse. Les mesures effectuées montrent une excellente linéarité de la réponse par rapport au photomètre de laboratoire utilisé comme étalon de référence, comme on peut le constater sur la Figure 2.

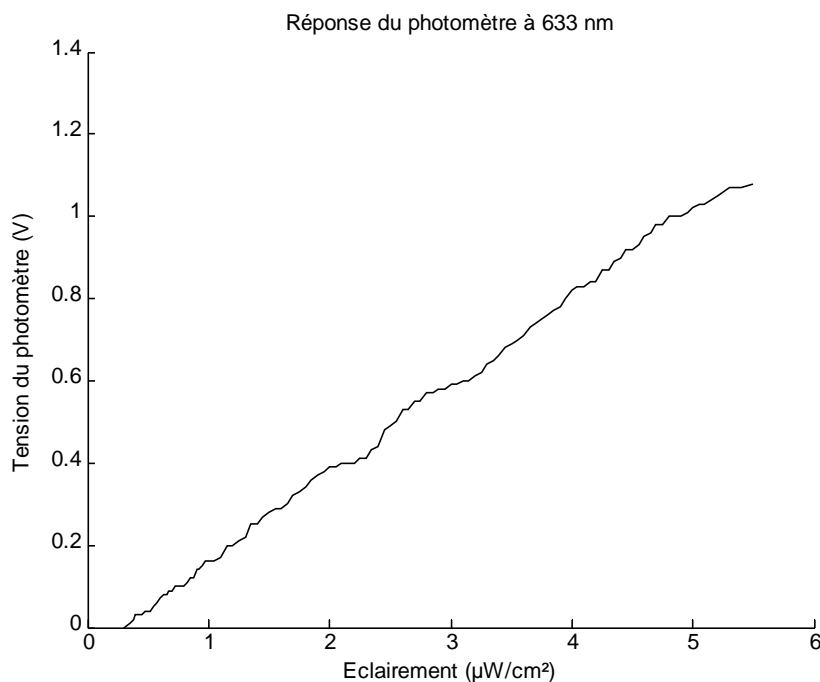


Figure 2 : Courbe de linéarité du photomètre

La répétabilité des mesures a été testée en interposant successivement un nombre croissant de filtres de même transmittance entre le photomètre et la source.

De telles mesures répétées sur plusieurs cycles présentent une répétabilité meilleure que 3%, calculée sur des courbes telles que celle de la figure 3.

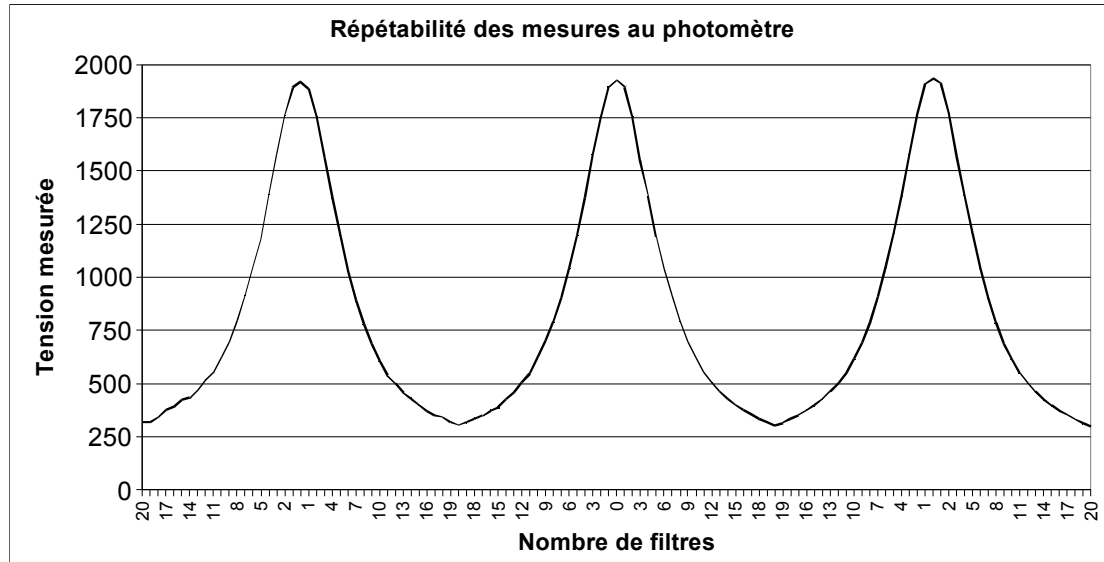


Figure 3 : Courbe de répétabilité des mesures au photomètre : tension mesurée au photomètre (mV) en fonction du nombre de filtres.

b) Mesures de LEDs

Afin de tenir compte de la largeur spectrale des LEDs, on applique aux mesures effectuées un coefficient de correction qui est fonction des caractéristiques spectrales du capteur et des LEDs. Ce coefficient de correction est appliqué concrètement au niveau du photomètre par le biais d'une variation de la résistance de mesure, à l'aide d'un potentiomètre numérique, d'un réseau R-2R ou de tout autre moyen semblable.

La plage de variation de la résistance dans le circuit de mesure est donnée par la relation :

$$R(\lambda) = R_C \cdot \Gamma(\lambda_1, \lambda_2) \quad (3)$$

où :

- R_C est la résistance de charge de valeur fixe placée dans le circuit ;
- $\Gamma(\lambda_1, \lambda_2)$ est le facteur correctif dépendant du capteur et des LEDs à mesurer :

$$\Gamma(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{e01}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{e01}(\lambda) \cdot R_{01}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

c) Dimensionnement du photomètre

Détermination de la résistance de mesure

Les facteurs correctifs des LEDs dont les spectres sont représentés sur la figure 1 ont été rassemblés dans le tableau suivant :

LED	Blanche	Rouge	Verte	Bleue
Facteur correctif	1,4568	0,7398	2,4156	0,4531

Si la résistance de charge dans le circuit de détection possède une valeur typique de $10\text{ M}\Omega$, il faudra régler la résistance du photomètre, d'après le tableau précédent, sur $7,4\text{ M}\Omega$ pour effectuer une mesure sur une LED rouge, $24\text{ M}\Omega$ dans le cas où l'on souhaite mesurer l'intensité émise par une LED verte, et $4,5\text{ M}\Omega$ pour une LED bleue.

Dans le cas de ce photomètre et pour cette gamme de LEDs donnée, la résistance interne de mesure doit donc être égale ou supérieure à $24\text{ M}\Omega$.

Ajout d'un filtre

L'interposition d'un filtre se traduit par l'ajout d'un facteur de transmittance supplémentaire au dénominateur de la relation (4). De ce fait, on peut choisir ce filtre de telle manière que $\Gamma(\lambda_1, \lambda_2)$ tende vers l'unité de manière à relaxer la contrainte sur la plage de variation de la résistance de mesure. Dans le cas monochromatique, on peut atteindre $\Gamma(\lambda_1, \lambda_2) \approx 1$ et la résistance de mesure devient constante et indépendante de la longueur d'onde : $R(\lambda) = R_C$. Dans ce cas asymptotique, l'opérateur n'a plus à régler le photomètre lorsqu'il change de source à mesurer.

Par contre, dans le cas polychromatique, il est difficile d'atteindre la condition $\Gamma(\lambda_1, \lambda_2) \approx 1$ pour différentes sources. Par conséquent un réglage par l'opérateur à chaque changement de source mesurée sera en général nécessaire.

d) Mise en œuvre

Pour l'utilisateur cette manipulation est transparente : les facteurs correctifs prenant en compte le spectre de chaque source sont précalculés par logiciel. L'utilisateur dispose alors d'une table de correspondance entre la longueur d'onde du pic spectral de la LED et un code à régler sur l'appareil pour modifier la résistance effective de mesure. Pour chaque nouvelle mesure sur un type de LED différent, il n'aura qu'à entrer dans l'appareil un code correspondant à la LED à mesurer.

Le paramétrage du photomètre avec un code sur huit bits entraîne une incertitude de mesure que nous avons volontairement limité à 5% dans la plage de mesure concernée. La plage de mesure valide pour cette précision est comprise entre 410 nm et 665 nm pour un photomètre sans filtre additionnel. En interposant un filtre additionnel, on relaxe la contrainte sur l'incertitude de mesure, ce qui permet une extension de la plage de mesure qui se situe désormais entre 410 nm et 715 nm.

Nous pouvons comparer les valeurs mesurées pour un réglage monochromatique (pour la longueur d'onde du pic central de la LED) et pour un réglage polychromatique, prenant en compte la totalité du spectre de la LED à l'aide du facteur correctif précédemment évoqué.

Pour ce faire, nous avons appliqué les réglages et paramètres suivants, dans le cas d'un photomètre sans filtre :

Couleur Led	$\Gamma_{\text{correctif}}$	$R_{\text{mesure}} (\Omega)$
Rouge	0,4547	6,41955E+006
Vert	1,6510	23,3092E+006
Bleu	0,3727	5,26186E+006

A l'aide de ces réglages sur le photomètre sans filtre, nous avons obtenu les résultats de mesure suivants :

Couleur LED	Données constructeur (Cd)	Mesure sur longueur d'onde centrale (Cd)	Erreur monochromatique / constructeur	Mesure tenant compte du spectre de la LED (Cd)	Erreur polychromatique / constructeur
Rouge	0,55	0,535	- 3%	0,568	3%
Verte	0,5	0,540	8%	0,520	4%
Bleue	0,13	0,091	- 43%	0,132	1,5%

On peut constater une légère sur-évaluation de l'intensité mesurée pour la LED verte dans le cas d'une approximation du spectre de la LED par une longueur d'onde unique. Dans ce même cas, on note une sous-évaluation très importante de l'intensité émise dans le bleu.

Notre photomètre, au contraire, en prenant en compte la totalité du spectre réel des LEDs, présente un biais bien plus faible et systématiquement positif. De ce fait, nous avons atteint notre objectif initial consistant à réaliser un photomètre précis à moins de 5%.

Conclusion

L'intérêt du photomètre présenté ici est qu'il s'adapte à tout type de LEDs, par le biais de son réglage par un code spécifique lié au spectre de chaque source lumineuse. Considérant cette possibilité d'adaptation au spectre réel des sources, un tel photomètre s'illustre particulièrement bien dans la mesure de sources lumineuses à bandes spectrales étroites dans le visible : LEDs, OLEDs, mais aussi : photophores ou toute autre source filtrée.

Au cours de cette étude, nous avons pu mettre en évidence ses très bonnes linéarité, répétabilité et précision. Cette précision a été atteinte notamment grâce à la sélection de composants électroniques particulièrement performants (incertitudes de 1%) pour sa fabrication. De même, ce souci de précision a conduit à la mise en place d'une procédure de test et de calibrage adaptée, prenant en compte des paramètres issus de modèles physiques, tels que les spectres réels d'émission des LEDs et la réponse spectrale précise des capteurs, ainsi que de modélisations sur CAO.

Le nouveau photomètre présenté ici répond en outre aux exigences définies lors de sa conception : compacité, universalité, robustesse et simplicité. Il s'adapte donc particulièrement aux environnements industriels, notamment pour les mesures en ligne ou sur échantillons lors de contrôles qualité.

Références

[1] R. Distl, T. Nägele, « Pick the right parameters to measure LEDs accurately », Laser Focus World, Vol. 35, p. 125, 1999.

[2] P. Taillepierre, R. Antony et A. Moliton, « Métrologie pour caractérisations optiques de LEDs organiques : facteurs correctifs en émission polychromatique », Journées du CNFRS : « Métrologie et capteurs en électromagnétisme », 29 et 30 mars 2004.