

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 103 (2012)  
**Heft:** 1

**Artikel:** Quant la lumière blanche devient colorée  
**Autor:** Blattner, Peter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-857260>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 30.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Quant la lumière blanche devient colorée

## La photométrie fait face aux défis posés par les sources LED

L'éclairage aborde un tournant historique. De nouvelles exigences légales imposent en effet le remplacement des ampoules à incandescence par des sources plus efficaces, comme les diodes électroluminescentes. Or pour caractériser ces dernières, il faut analyser de nouveaux paramètres tels que la température de couleur proximale et l'indice de rendu de couleur. Les laboratoires de mesures photométriques doivent par conséquent s'équiper de nouveaux instruments et adapter leurs procédures de mesure.

**Peter Blattner**

Récemment encore, des sources de lumière blanche de grande largeur spectrale telles que les ampoules à incandescence étaient essentiellement utilisées. Aujourd'hui, l'afflux des diodes électroluminescentes (LED), qui affichent des spectres plus étroits, représente un défi du point de vue des mesures photométriques. Les mesures spectrales vont donc gagner en importance dans un futur proche. Elles sont indispensables pour pouvoir déterminer les grandeurs de mesure colorimétriques telles que l'indice de rendu de couleur et faire les corrections nécessaires pour les grandeurs photométriques. Cet article résume les aspects les plus importants à considérer par les laboratoires photométriques.

### Base des mesures photométriques

Chaque instrument de mesure photométrique doit soit posséder une sensibilité spectrale correspondant à celle des courbes de sensibilité de l'œil humain, soit mesurer le rayonnement à l'aide d'une méthode spectrale et en déduire numériquement les grandeurs photométriques à partir du spectre absolu.

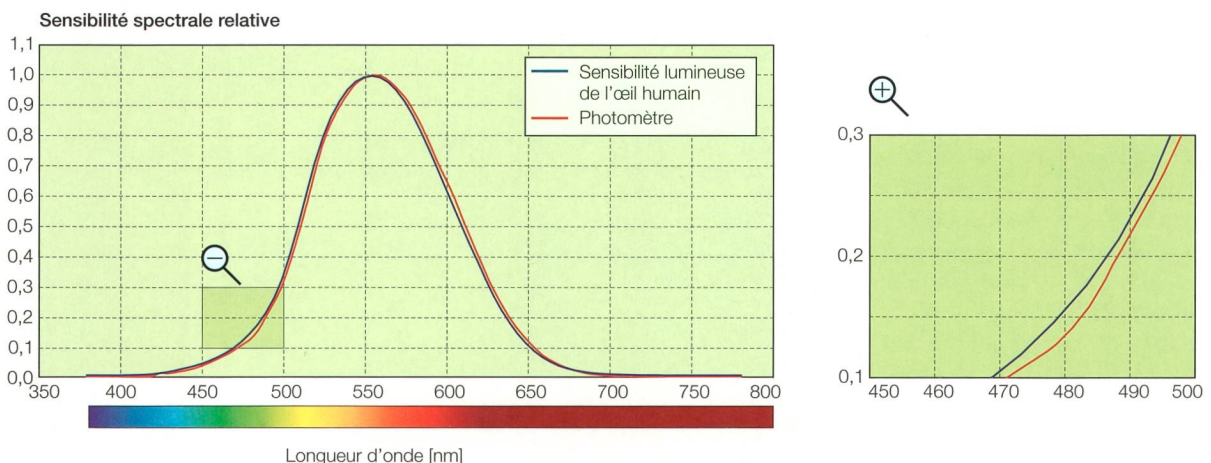
### Efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil humain

Un rayonnement électromagnétique qui a un spectre non nul dans la plage de longueurs d'onde de 360 nm à 830 nm stimule l'œil humain par le biais des éléments sensibles de la rétine de l'œil : les cônes

pour la vision de jour (observateur photopique) et les bâtonnets pour la vision de nuit (observateur scotopique). Les fonctions de sensibilité, en particulier l'efficacité lumineuse relative spectrale pour la vision photopique  $V(\lambda)$  et scotopique  $V'(\lambda)$ , sont connues et standardisées [1] par la Commission Internationale d'Éclairage (CIE [2]). Elles décrivent la sensation de clarté perçue par un observateur standard en fonction de la longueur d'onde.

### Étalonnage des instruments de mesure photométriques

L'Office fédéral de métrologie (METAS) est responsable en Suisse de la réalisation et de la diffusion des unités de mesure, la diffusion étant effectuée par les services d'étalonnage des instruments de mesure. En photométrie, ces instruments sont typiquement des luxmètres pour la mesure de l'éclairement lumineux, des luminancemètres et des caméras spécialement conçues pour la mesure de la luminance. Tous ces appareils sont munis de filtres colorés afin de faire correspondre au mieux leur sensibilité spectrale à la courbe d'efficacité lumineuse relative standardisée de l'œil humain  $V(\lambda)$  (figure 1). La précision de cette adaptation dépend fortement de la qualité du photomètre ; pour des sources de lumière blanche, l'erreur de mesure relative est typiquement inférieure à 1% pour un instrument de haute qualité.



**Figure 1** Adaptation spectrale d'un photomètre à la courbe normalisée photopique de l'œil humain. Pour les sources lumineuses à bande étroite, l'imperfection de la concordance peut engendrer d'importantes erreurs.



**Figure 2** Mesure de l'intensité lumineuse d'une LED bleue. En plus des trois photomètres de référence, un spectroradiomètre permettant de corriger l'erreur due à une mauvaise adaptation spectrale est utilisé pour mesurer la distribution spectrale de la LED.

Ces instruments de mesure permettent de déterminer directement la grandeur mesurée. Leur étalonnage se fait par comparaison avec un instrument de référence en utilisant, selon les recommandations de la CIE, une source standard à incandescence ayant une température de distribution de 2856 K (CIE source standard A).

Au METAS, un groupe de photomètres de référence est utilisé comme base pho-

tométrique (figure 2). Ces détecteurs sont constitués de photodiodes en silicium arrangées géométriquement de manière à obtenir une efficacité quantique de presque 100%. L'adaptation spectrale à la courbe  $V(\lambda)$  est réalisée par des filtres stabilisés en température. Une ouverture de précision permet de déterminer le flux lumineux par unité de surface (c'est-à-dire l'éclairement). Toutes les grandeurs photométriques, et en particulier l'intensité

lumineuse (unité: Candela, cd), la luminance (unité:  $\text{cd}/\text{m}^2$ ), le flux lumineux (unité: Lumen, lm) et l'éclairement lumineux (unité: Lux, lx), peuvent être déduites à partir de cette base photométrique.

**Mesures spectrales**

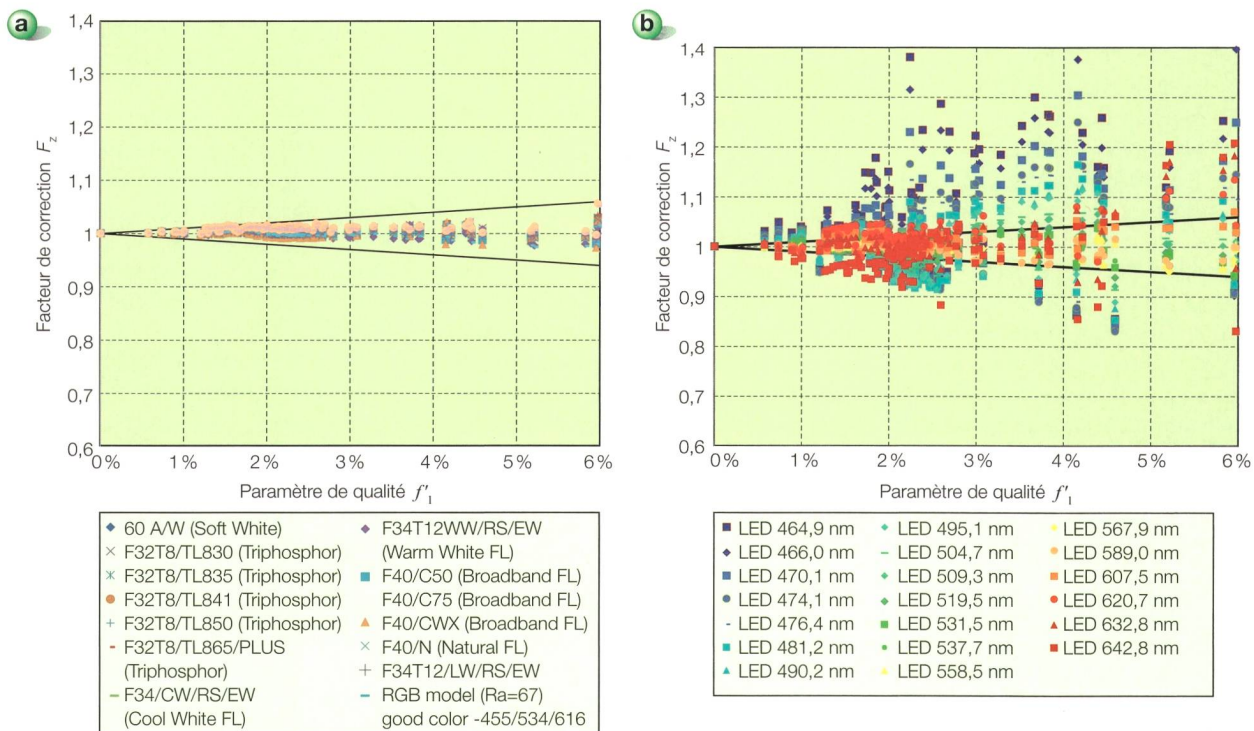
Les grandeurs photométriques peuvent aussi être déterminées à l'aide de mesures spectrales (radiométriques). La conversion d'une grandeur radiométrique en grandeur photométrique, comme par exemple la détermination du flux lumineux  $\Phi_v$  à partir de la puissance rayonnante spectrale  $\Phi_\lambda(\lambda)$ , s'effectue à l'aide de l'équation suivante :

$$\Phi_v = K_m \int_{360\text{nm}}^{830\text{nm}} \Phi_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

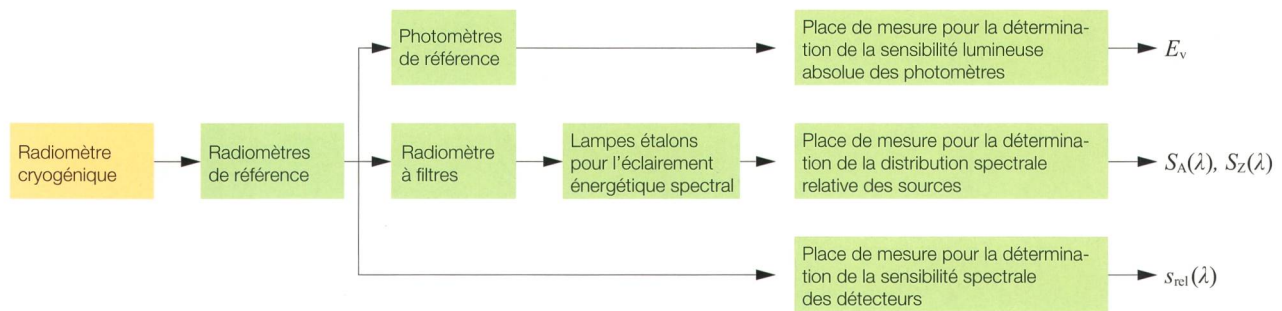
avec

$$K_m = 683 \text{ lm/W} \cdot \left[ \frac{V(\lambda = 555\text{nm})}{V(\lambda = 555,016\text{nm})} \right]$$

Cette équation repose directement sur la définition de la Candela et sa mise en pratique [3]. L'intégrale mathématique exprime la sommation des différentes contributions spectrales pondérées avec la courbe de la sensibilité de l'œil humain. Le paramètre  $K_m$  est l'efficacité lumineuse maximale d'un rayonnement pour la vision photopique. Sa valeur est prin-



**Figure 3** Facteurs de correction  $F_z$  en fonction du paramètre de qualité  $f'_1$  pour différentes sources de lumière: (a) Sources blanches. (b) Sources LED de couleur.



**Figure 4** Traçabilité de la mesure d'une source de lumière colorée au METAS : la distribution spectrale relative de la lampe de calibration  $S_Z(\lambda)$  et de la source à mesurer  $S_A(\lambda)$  ainsi que la réponse spectrale du photomètre  $s_{rel}(\lambda)$  permettent de calculer le facteur de correction  $F_Z$  et de corriger l'éclairage lumineux  $E_v$ .

ci-dessus déterminée par l'histoire de la définition de l'unité de base de la Candela qui a remplacé la bougie étalon.

Le facteur de correction  $V(\lambda = 555 \text{ nm}) / V(\lambda = 555,016 \text{ nm})$  est justifié par le fait que le maximum de la courbe  $V(\lambda)$  se situe à 555 nm, alors que la Candela est définie par rapport à une fréquence optique de 540 THz qui correspond à une longueur d'onde de 555,016 nm. Pour les applications pratiques, cette valeur peut être réduite à l'approximation  $K_m \cong 683 \text{ lm/W}$ .

### Qualité d'un photomètre

L'adaptation spectrale à la courbe  $V(\lambda)$  n'est en réalité possible que d'une manière approximative. La CIE a défini le paramètre  $f_1$  pour en caractériser la précision [4,5]. Ce paramètre n'est pas à considérer comme une erreur de mesure ni une incertitude de mesure. Il donne une indication sur la qualité de l'adaptation : un photomètre ayant une petite valeur de  $f_1$  génère dans des conditions générales de plus petites erreurs. Dans des cas spécifiques, par exemple lors de la mesure de LED de couleur, l'erreur peut être nettement plus grande que suggérée par la valeur  $f_1$ . Un photomètre de très haute qualité possède une valeur de  $f_1$  typiquement inférieure à 1,5 %. Pour des applications de mesure générales, une valeur inférieure à 6 % est recommandée.

### Facteur de correction pour mesures photométriques

Pour les sources à large spectre d'émission (c'est-à-dire de lumière blanche), l'adaptation spectrale ne représente pas un problème réel pour un photomètre de bonne qualité. Pour les sources à spectre limité, la situation est beaucoup plus critique car de petites déviations de la courbe

de sensibilité spectrale par rapport à la courbe  $V(\lambda)$  peuvent provoquer de grandes erreurs. Un exemple est illustré dans le graphe de la **figure 1**. Pour une source de lumière blanche, l'erreur due à la déviation d'adaptation serait inférieure à 1 %, alors que pour une source de lumière bleue l'erreur serait supérieure à 10 %.

Cette erreur peut être corrigée si les propriétés spectrales du photomètre et de la source sont connues, et en particulier la distribution spectrale relative de la source  $S_Z(\lambda)$  et la sensibilité spectrale relative du photomètre  $s_{rel}(\lambda)$ . Le facteur de correction  $F_Z$  dû à la déviation d'adaptation spectrale (Spectral Mismatch Correction Factor, SMCF) est donné par l'équation suivante :

$$F_Z = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_A(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int_{360\text{nm}}^{\lambda_{\min}} S_A(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_Z(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int_{360\text{nm}}^{\lambda_{\min}} S_Z(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

$S_A(\lambda)$  étant la distribution spectrale de la lampe d'étalonnage de la source. Les limites des intégrations sont données par les longueurs d'onde définissant le domaine de sensibilité du photomètre.

Les **figures 3a** et **3b** présentent les facteurs de correction pour différentes sources, et ce, pour une centaine de photomètres de différents indices de qualité  $f_1$ . Pour les sources de lumière blanche, les corrections sont beaucoup plus petites que pour les sources de lumière colorée.

### Infrastructure de mesure du METAS

Le METAS possède l'infrastructure et l'expérience nécessaires pour déterminer ces facteurs de correction (**figure 4**). En principe, il existe deux manières d'étalonner un photomètre par rapport à une source spécifique :

■ L'instrument du client est directement étalonné par rapport à la source en comparant la valeur indiquée avec la valeur donnée par les photomètres de référence. Dans ce cas, le spectre de la source doit être mesuré pour pouvoir corriger les valeurs des photomètres de référence. Le client reçoit alors un certificat qui contient un facteur de correction uniquement valable pour cette source spécifique.

■ La sensibilité spectrale du photomètre du client est mesurée, permettant ainsi de calculer le facteur de correction  $F_Z$  pour toute source de spectre connu en appliquant l'équation (2). La **figure 5** illustre cette méthode pour le cas de l'étalonnage d'une source étalon de lumière colorée.

La deuxième méthode est plus générale car le client peut recalculer le facteur de correction spectrale pour n'importe quelle source de spectre connu. Par contre, elle nécessite un photomètre de haute sensibilité car une source à spectre accordable émettant de faibles puissances optiques est utilisée pour la détermination de la sensibilité spectrale.

### Caractérisation complexe des spectroradiomètres

Dans certains cas, il suffit de déterminer, en appliquant l'équation (1), les valeurs photométriques absolues directement à partir de la mesure spectrale absolue de la source obtenue à l'aide d'un spectroradiomètre. Cependant, les spectroradiomètres sont en général des instruments complexes ayant une incertitude de mesure plus élevée que les photomètres, une plus faible sensibilité (c'est-à-dire qu'il faut davantage de lumière) et requérant de plus longs temps d'intégration.

Pour caractériser les paramètres qui influencent les mesures tels que la lumière spectrale diffuse et la fonction de bande passante spectrale, une importante infrastructure est nécessaire – par exemple des lasers accordables. Le METAS possède toute l'infrastructure requise [6]. Les plus petites incertitudes de mesure peuvent être obtenues en combinant les deux méthodes, c'est-à-dire en utilisant un photomètre et en appliquant la correction spectrale (équation 2).

**Colorimètres**

Le problème de l'adaptation spectrale est aussi valable pour d'autres types de détecteurs qui intègrent les spectres, comme par exemple un colorimètre. Un tel appareil est utilisé pour mesurer les composantes trichromatiques d'un stimulus de couleur à l'aide de trois détecteurs munis de trois différents filtres de couleurs spécifiques. Ces composantes trichromatiques permettent par la suite de calculer les coordonnées trichromatiques, ainsi que d'autres paramètres comme la température de couleur proximale. Pour des sources de couleur, seule une correction individuelle des valeurs des composantes trichromatiques par la méthode présentée auparavant permet de corriger les erreurs et d'estimer l'incertitude de mesure [7].

**Température de couleur proximale**

La température de couleur proximale  $T_{cp}$  permet de classer une source de couleur blanche. La couleur d'une source lumineuse est comparée à celle d'un corps noir théorique. La température du corps noir qui possède la même chromaticité que la source de test est appelée tempéra-

ture de couleur proximale [8]. Elle est donc déterminée à partir d'une mesure des composantes trichromatiques.

Les sources de lumière blanche sont classées dans trois différents domaines :

- Blanc chaud : température de couleur proximale inférieure à 3300 K.
- Blanc neutre : température de couleur proximale comprise entre 3300 K et 5300 K.
- Blanc froid : température de couleur proximale supérieure à 5300 K.

Une lampe à incandescence possède typiquement une température de couleur proximale de 2300 K à 2800 K, le ciel couvert de 6500 K, quant aux LED blanches, elles sont disponibles dans une grande variété (typiquement de 2500 K à 10 000 K).

**Indice de rendu de couleurs**

Il n'est cependant pas possible de déterminer tous les paramètres par des photomètres ou d'autres détecteurs intégrant : l'indice de rendu des couleurs en est un exemple important. Une source de lumière blanche peut bien être caractérisée par sa température de couleur proximale, mais cette valeur ne décrit pas toutes les propriétés de la source : si l'on observe deux sources de même température de couleur proximale directement, les couleurs des sources vont normalement être similaires. Par contre, si ces deux lampes illuminent une surface colorée, les couleurs réfléchies peuvent être bien différentes.

En effet, les composantes spectrales de deux sources peuvent être différentes même si leurs couleurs semblent identiques (couleurs métamères). Les diverses composantes spectrales sont réfléchies par une surface colorée différemment et l'addition

de ces composantes réfléchies provoque un décalage de couleurs. La quantification de ce décalage est donnée par l'indice général de rendu de couleurs  $R_a$  selon la méthode CIE [9].  $R_a$  est ainsi déterminé à partir de l'indice de rendu de huit couleurs normalisées. Pour le calcul des indices, une mesure de la distribution spectrale relative de la source est indispensable.

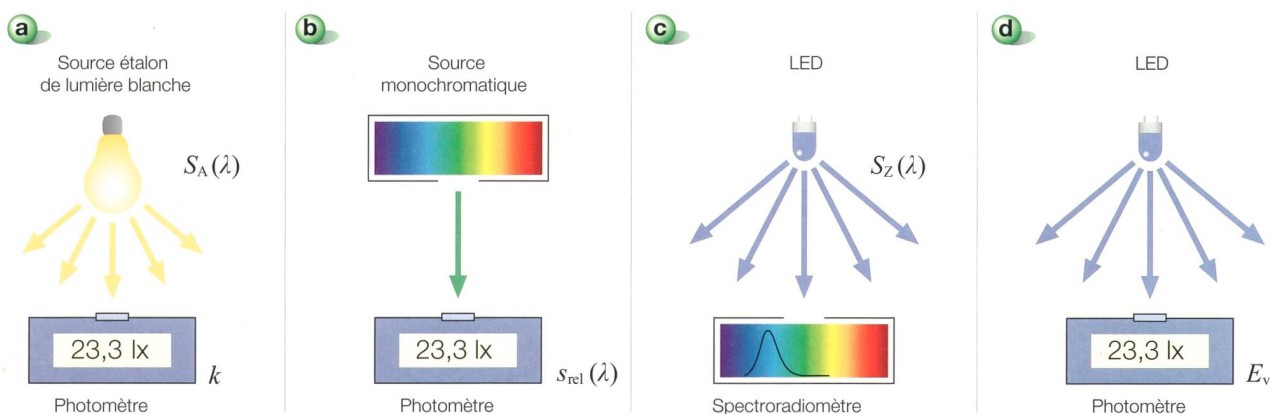
**La vision crépusculaire**

Selon la clarté de l'environnement, deux différents types de récepteurs sont actifs dans l'œil humain. La vision de jour (photopique) se fait principalement grâce aux cônes se trouvant sur la rétine de l'œil. Ce régime est typiquement valable si la luminance d'adaptation  $L_{adapt} > 10 \text{ cd/m}^2$ . La sensibilité est alors maximale pour une longueur d'onde de 555 nm. Dans la nuit noire ( $L_{adapt} < 0,01 \text{ cd/m}^2$ ), seuls les bâtonnets sont actifs (vision scotopique). La sensibilité de l'œil est décalée dans les longueurs d'onde plus petites (509 nm, c'est-à-dire dans le bleu-vert). De plus, la sensibilité absolue est augmentée d'un facteur d'environ 2,5 par rapport à la vision photopique (voir figure 6).

La CIE a récemment défini un modèle se situant entre ces deux régimes dans sa publication CIE 198-2010 [10]. Le modèle (appelé photométrie mésopique de performance) consiste en une série de courbes de sensibilité spectrale qui dépendent du niveau d'adaptation de l'œil de l'observateur.

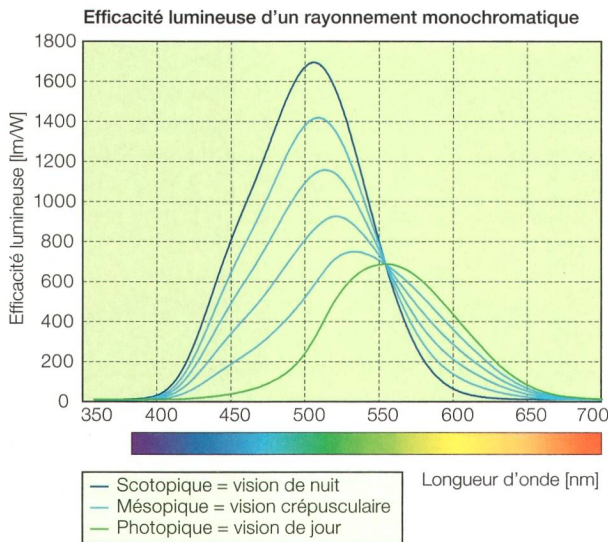
**Une meilleure efficacité pour l'éclairage extérieur**

Le domaine mésopique est très important dans les applications telles que l'éclairage de routes, de places et de tun-



**Figure 5** L'étalonnage de l'intensité lumineuse d'une lampe étalon pour l'intensité lumineuse comprend plusieurs étapes. a) Un photomètre est étalonné en utilisant une source de lumière blanche calibrée. b) Une source de lumière monochromatique est utilisée pour déterminer la réponse spectrale  $s_{rel}(\lambda)$  du photomètre. c) La distribution spectrale relative  $S_Z(\lambda)$  de la source de lumière colorée est obtenue en utilisant un spectroradiomètre. d) L'éclairement  $E_v$  de la source étalon d'intensité lumineuse est mesuré et corrigé en utilisant un facteur de correction.

Figures: METAS



**Figure 6** Sensibilité lumineuse spectrale pour différents niveaux d'adaptation de l'œil humain.

nels. Grâce au développement révolutionnaire des LED, il est possible de réaliser des sources blanches qui contiennent une importante composante bleu-vert. Or, l'efficacité lumineuse de ces sources dans le domaine mésopique est bien plus élevée que celle de sources traditionnelles, telles que la lampe à sodium haute pression émettant une lumière jaune, ce qui permettrait d'économiser de l'énergie notamment dans le domaine de l'éclairage extérieur. Comme le potentiel de cet effet mésopique dépend du spectre de la source, il est nécessaire de faire une caractérisation spectrale des sources.

**Caractérisation dans le domaine mésopique**

Une des difficultés consiste dans le fait qu'en fonction de la luminance d'adaptation la courbe d'efficacité lumineuse spectrale change et par là-même la valeur numérique de la grandeur photométrique correspondante. Un exemple: un paramètre important pour caractériser un système d'éclairage est l'efficacité lumineuse de la source, c'est-à-dire le rapport du flux lumineux (photopique) de la source et de la puissance électrique totale consommée par la source. Elle est exprimée en lumens par watt (lm/W). Dans le domaine mésopique, l'efficacité lumineuse ne serait désormais plus déterminée par une seule valeur, mais par plusieurs. Elle dépendrait en effet de la luminance d'adaptation.

Sur la base d'une mesure de la distribution spectrale, l'efficacité lumineuse peut être calculée pour chaque luminance d'adaptation. Il reste encore cependant la question de savoir dans quelle mesure l'observateur standard

mésopique sera utilisé et accepté par les normes nationales. L'application concrète de la photométrie mésopique est actuellement discutée dans les comités de normalisation concernés.

**L'éclairage biodynamique**

Un autre aspect intéressant est la découverte récente d'un nouveau type de détecteur sur la rétine de l'œil: des cellules de ganglion sensibles à la lumière (Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, ipRGCs [11]). Ces récepteurs ont une influence directe sur le rythme circadien humain (effet chrono-biologique) et n'ont pas de fonction associée à la vision. Elles montrent une sensibilité maximale pour la lumière bleue.

Les futurs systèmes d'éclairage appelés biodynamiques pourraient tenir compte de cet effet. Ils permettraient de générer de la lumière avec des spectres variables. Ainsi, il serait possible d'influencer les rythmes circadiens d'une manière contrôlée. Cela nécessiterait cependant que la fonction de réponse spectrale soit connue avec une précision suffisante et des instruments appropriés (c'est-à-dire des spectroradiomètres) seraient alors indispensables pour en quantifier l'effet.

**Conclusion**

L'importance des mesures spectrales en photométrie va augmenter de manière significative dans les prochaines années. D'une part, elles sont nécessaires pour déterminer les valeurs de correction pour les sources de lumière colorée, de l'autre, elles sont indispensables pour quantifier les grandeurs de mesure colorimétriques, mésopiques et biodynamiques.

**Références**

- [1] CIE S 010/E:2004 - ISO 23539:2005: Joint ISO/CIE Standard: Photometry – The CIE System of Physical Photometry. www.cie.co.at/index.php/index.php?i\_ca\_id=475
- [2] www.cie.co.at
- [3] W.R. Blevin, K. Kessler, K.D. Mielenz and G. Wysocki: Principles Governing Photometry. Metrologia 19 n° 3, pp. 97–101, 1983.
- [4] CIE 069-1987: Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters: Performance, Characteristics and Specifications.
- [5] CIE DS 023: Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters (en preparation).
- [6] Peter Blattner: Neue optische Strahlungsmessbasis am METAS. METinfo, Vol. 12, n° 2, pp. 4–9, 2005.
- [7] CIE 179:2007: Methods for Characterising Tristimulus Colorimeters for Measuring the Colour of Light.
- [8] CIE 015:2004: Colorimetry, 3rd ed.
- [9] 13.3-1995: Method of Measuring and Specifying Colour Rendering of Light Sources 3rd ed.
- [10] CIE 191:2010: Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance.
- [11] R.G. Foster, I. Provencio, D. Hudson, S. Fiske, W. De Grip and M. Menaker: Circadian photoreception in the retinally degenerate mouse (rd/rd). J. Comp. Physiol. A., 169(1), pp. 39-50, July 1991.

**Informations sur l'auteur**



Dr **Peter Blattner** a obtenu un diplôme en électronique-physique en 1992 à l'Université de Neuchâtel. Après un stage étendu au Centre de tests de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) au Pays-Bas, il a effectué une thèse à l'Institut de Microtechnique de l'Université de Neuchâtel. Depuis 2000, il est chef du laboratoire photométrique et radiométrique de l'Office fédéral de métrologie (METAS). Il est membre de divers comités techniques dans le cadre de la CIE, du CEN, de la SLG et d'EURAMET. Depuis juillet 2011, il est directeur de la Division 2 « Mesure de la lumière et rayonnement » de la CIE.

Office fédéral de métrologie (METAS),  
3003 Bern-Wabern, peter.blattner@metas.ch

**Zusammenfassung Wenn**

**weisses Licht farbig wird Die Fotometrie stellt sich den Herausforderungen der LED-Lichtquellen**

In der Vergangenheit wurden hauptsächlich weisse Lichtquellen, wie beispielsweise Glühbirnen, eingesetzt, die spektral breitbandig sind. Heute dagegen stellt die Zunahme schmalbandiger Leuchtdioden (LED) in messtechnischer Hinsicht eine grosse Herausforderung dar. Spektrale Messungen werden demnach in naher Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen. Einerseits weil sie Voraussetzung sind, um die bei farbigen Lichtquellen nötigen Korrekturfaktoren zu bestimmen, und andererseits damit farbmetrische, mesopische und biodynamische Messgrößen bestimmt werden können. Dieser Artikel fasst die wichtigsten Aspekte zusammen, die bei fotometrischen Labormessungen zu beachten sind. CHe