

Mesures des rayonnements optiques aux postes de travail : comparaison de différentes méthodes et matériels de mesure

A. BARLIER-SALSI¹, S. SALSI¹

(Manuscrit reçu le 11 février 2010, accepté le 30 mars 2010)

RÉSUMÉ La directive européenne 2006/25/CE, relative à l'exposition des travailleurs aux rayonnements optiques, prévoit l'évaluation des risques au poste de travail par la mesure et/ou le calcul. L'objectif de cette étude était de permettre à des organismes de contrôle de mettre en œuvre la directive en mettant à leur disposition une méthodologie simple d'évaluation des risques *in situ*, compatible avec leurs moyens. Cette étude a donc consisté à faire un état du marché, acquérir quelques appareils de mesure de coût raisonnable (radiomètres et spectroradiomètres) et ensuite évaluer leurs performances. Les résultats des mesures effectuées sur 5 lampes de spectres divers, à l'aide de ces appareils, ont été comparés à ceux donnés par un spectroradiomètre de laboratoire pris comme référence. De cette étude il est ressorti qu'aucun d'eux ne permet de mesurer avec une précision acceptable le rayonnement émis par des sources de différentes natures sur l'ensemble du domaine spectral compris entre 180 et 3 000 nm. Les radiomètres ne sont pas adaptés à la mesure de sources émettant sur un domaine spectral étroit. Les spectroradiomètres à simple monochromateur ou à barrettes CCD linéaires présentent quant à eux des erreurs importantes attribuables à la lumière parasite (*stray light*). Cependant, l'approche d'une méthode de correction de cette lumière parasite a montré qu'il était possible d'améliorer la précision de ces appareils.

ABSTRACT Measurements of optical radiation in workstations: comparaison of different methods and measuring devices.

The European directive 2006/25/EC on minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from optical radiation provides for risk assessment at the workstation by measurement and/or calculation. The aim of this study was to enable inspection bodies to implement the directive by providing them with a simple *in situ* risk assessment methodology compatible with their resources. This involved reviewing the market, acquiring a number of reasonably priced equipment items (radiometers and spectroradiometers) and then evaluating their performance characteristics. The results of measurements taken on 5 lamps with different spectra using these instruments were compared with readings provided by a laboratory reference spectroradiometer. The study reveals that none of the instruments allows acceptable measurement of radiation emitted by different sources embracing the entire 180-3 000 nm spectral range. Radiometers are unsuitable for measuring sources that emit over a narrow spectral range and major errors occur due to stray light, when measuring radiation with single monochromator or linear CCD spectroradiometers. However, an approach involving a stray light correction method indicates that it is possible to improve the accuracy of these instruments.

Keywords: Optical radiation / ultraviolet / radiometer / spectroradiometer / European directive

¹ INRS, Département ingénierie des équipements de travail, rue du Morvan, CS 60027, 54519 Vandœuvre-les-Nancy, France.

1. Introduction

La présence sur les lieux de travail de sources de rayonnements optiques potentiellement dangereuses, a conduit à l'adoption en avril 2006, de la 19^e directive européenne particulière (Directive, 2006), relative à l'exposition des travailleurs aux rayonnements optiques, au sens de l'article 16 de la directive 89/391/CEE (Directive, 1989). Sont concernées toutes les sources artificielles émettant des rayonnements cohérents ou incohérents. Cependant, seuls les rayonnements incohérents sont traités dans le présent article.

Afin d'évaluer les risques pour les yeux et la peau des personnes exposées, la directive définit des grandeurs énergétiques à déterminer dans différents domaines spectraux, de longueurs d'onde comprises entre 180 et 3 000 nm et fixe les valeurs limites d'exposition (VLE) correspondantes. Ces VLE sont issues des recommandations de l'ICNIRP² (ICNIRP, 1997, 2004). Dans le cas de risques suspectés à un poste de travail, dans un ou plusieurs domaines spectraux, l'employeur est tenu d'évaluer par la mesure et/ou le calcul les niveaux d'exposition correspondants. La mise en œuvre de la directive fait donc apparaître le besoin de disposer d'une méthodologie simple d'évaluation des risques in situ, faisant appel à un matériel de mesure d'un coût compatible avec les moyens des organismes susceptibles d'effectuer ces contrôles.

Il convient de distinguer deux grandes familles d'appareils de mesure, les radiomètres qui rendent compte directement de l'exposition au rayonnement émis sur un domaine spectral donné et les spectroradiomètres qui permettent de relever le spectre énergétique du dit rayonnement ; l'exposition correspondant au domaine spectral considéré étant ensuite déterminée par calcul. L'étude présentée ci-après a consisté à évaluer la performance de deux appareils de chaque type en comparant les résultats de mesure de cinq lampes de spectre très différents à ceux donnés par un spectroradiomètre de laboratoire pris comme référence. Des mesures complémentaires propres à chaque type d'appareil ont permis d'affiner les résultats.

2. Matériel et méthode

2.1. Définition des grandeurs mesurées et/ou calculées

Les effets nocifs du rayonnement optique concernent les yeux et la peau. Ils dépendent essentiellement de la longueur d'onde, de l'intensité et de la durée d'exposition. L'évaluation des risques consiste à déterminer les niveaux

² ICNIRP : International Commission on non-Ionizing Radiation Protection.

$$E_{eff} = \sum_{180}^{400} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad L_B = \sum_{300}^{700} L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad L_{R(1)} = \sum_{380}^{1400} L_{\lambda} \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

$$E_{UVA} = \sum_{315}^{400} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad E_B = \sum_{300}^{700} E_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad L_{R(2)} = \sum_{780}^{1400} L_{\lambda} \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad E_{Peau} = \sum_{380}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

Cf. termes définis en annexe

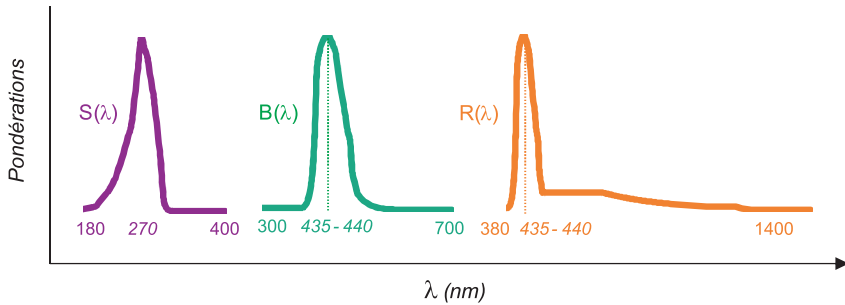


Figure 1 – Grandeurs mesurées et/ou calculées et courbes d’efficacité relative spectrale.
Measured and/or calculated quantities and relative spectral effectiveness curve.

d’expositions dans différents domaines spectraux, sur l’intervalle 180-3 000 nm, et à les comparer aux valeurs limites d’exposition correspondantes. Selon les domaines spectraux, les grandeurs à déterminer sont exprimées en termes d’éclairement énergétique efficace E_{eff} , E_B , d’éclairement énergétique E_{UVA} , E_{IR} , E_{peau} ou de luminance énergétique efficace L_B et L_R . Les terminologies utilisées sont celles définies par la directive (Directive, 2006), et sont détaillées en annexe. Les méthodes de calcul de ces grandeurs ainsi que les courbes de pondération associées sont présentées à la figure 1.

2.2. Caractéristiques des appareils de mesure

Outre les qualités techniques, deux autres critères ont été retenus pour la sélection du matériel, l’encombrement et le coût qui doivent respectivement être compatibles avec une utilisation in-situ et les moyens des organismes susceptibles d’effectuer les contrôles. Pour ces mêmes raisons, seuls les appareils permettant de mesurer l’éclairement énergétique ont été pris en compte. Les normes (NF EN 14255-1, 2005 ; NF EN 14255-2, 2006) relatives au mesurage et à l’évaluation de l’exposition aux rayonnements optiques incohérents présentent dans leurs annexes une liste informative d’appareils couramment utilisés. De cette liste il ressort essentiellement deux types de matériel.

Les radiomètres qui mesurent directement soit l'éclairement énergétique efficace E_{eff} , E_B soit l'éclairement énergétique E_{UVA} , E_{IR} , E_{peau} . Des filtres placés devant le détecteur délimitent la bande passante de l'appareil donc le domaine spectral à analyser. La mesure des valeurs efficaces est réalisée à l'aide d'un filtre ou d'une combinaison de filtres dont la réponse spectrale s'approche des courbes de pondération considérées $S(\lambda)$, $B(\lambda)$. Il est à noter que les appareils les plus courants couvrent le domaine spectral 200-400 nm.

Les spectroradiomètres qui mesurent l'éclairement énergétique spectrique E_λ . Les différentes grandeurs E_{eff} , E_{UVA} , E_B ... sont ensuite calculées à l'aide des relations définies à la figure 1. Sur ces appareils, la diffraction du rayonnement est assurée par un ou plusieurs réseaux et des détecteurs spécifiques mesurent le rayonnement correspondant à chaque longueur d'onde. Sur les spectroradiomètres à balayage, le détecteur est fixe et le réseau, par un mouvement de rotation, balaie pas à pas les différentes longueurs d'onde. En revanche, les spectroradiomètres à barrettes CCD, de technologie plus récente, permettent une mesure quasi instantanée sur l'ensemble des longueurs d'ondes sans aucun mouvement mécanique ; le spectre énergétique en sortie de réseau étant projeté sur une rangée de détecteurs.

Les caractéristiques détaillées des quatre appareils de mesure testés sont décrites dans le tableau I.

L'appareil utilisé comme référence est un spectroradiomètre à balayage OPTRONIC - OL 750, de focale 1/4, composé d'un double monochromateur avec deux tourelles équipées chacune de trois réseaux, une roue à filtres d'ordre, ainsi que de trois détecteurs (photomultiplicateur, Si et PbS refroidi) permettant de couvrir l'ensemble du domaine spectral 200-3 000 nm. L'optique d'entrée se compose de deux sphères intégratrices, l'une à revêtement PTFE pour le domaine 200-2 500 nm et l'autre à revêtement or pour le domaine 2 500-3 000 nm.

2.3. Étalonnage et traçabilité des appareils de mesure

Les spectroradiomètres *SP1*, *SP2* et de référence ont été étalonnés à partir de sources secondaires, elles mêmes étalonnées par rapport aux étalons du NIST³. Cet étalonnage, en éclairement énergétique spectrique, a été effectué à l'aide d'une lampe au deutérium de 40 W entre 200 et 300 nm (avec une précision variant de 3,8 à 5 % selon la longueur d'onde) et d'une lampe tungstène halogène de 200 W entre 300 et 3 000 nm (avec une précision variant de 2,6 à 3,1 % selon la longueur d'onde). En revanche, pour les radiomètres *Rd1* et *Rd2* c'est l'étalonnage fabricant qui a été pris en compte.

³ National Institute of Standards and Technology, USA.

TABLEAU I
Caractéristiques des appareils de mesure.
Properties of the measurement devices.

Repères	Spectroradiomètres	Détecteurs et domaine spectral	Grandeurs mesurées
<i>Sp1</i>	Spectroradiomètre à balayage, simple monochromateur (focale 1/8), 1 réseau (200-750 nm), 1 réseau (750-3 000 nm)	2 détecteurs : Si (200-1 000 nm), PbS (1 000- 3 000 nm)	E_{λ} (W.m ⁻² .nm ⁻¹)
<i>Sp2</i>	Spectroradiomètre à barrettes linéaires CCD – plage d'intégration : 1 ms à 1 s.	Si 2048 pixels CCD (200-1 050 nm)	E_{λ} (W.m ⁻² .nm ⁻¹)
Repères	Radiomètres	Domaine spectral et filtres	
<i>Rd1</i>	Système compact : double détecteur+filtre+diffuseur	200-400 nm corrigé $S(\lambda)$	E_{eff} (W.m ⁻²)
	Système compact : détecteur+filtre+diffuseur	315-400 nm	E_{UVA} (W.m ⁻²)
<i>Rd2</i>	Détecteur Si avec filtres interchangeables et diffuseur amovible	315-400 nm	E_{UVA} (W.m ⁻²)
		300-700 nm corrigé $B(\lambda)$	E_B (W.m ⁻²)
	Détecteur Thermopile avec filtres interchangeables et diffuseur amovible	380-3 000 nm	E_{peau} (W.m ⁻²)
		780-3 000 nm	E_{IR} (W.m ⁻²)

2.4. Méthode de mesure

2.4.1. Mesures systématiques

Une première série de mesures des éclairagements énergétiques et éclairagements énergétiques spectraux produits par quatre lampes, d'émissions spectrales très différentes (cf. Fig. 2), a été réalisée à l'aide des appareils décrits dans le tableau I et du spectroradiomètre de référence. Afin de minimiser les erreurs dues au positionnement et à l'alignement des lampes et des appareils, deux bancs de mesure disposés parallèlement ont été utilisés. Les appareils de mesures ont été montés sur l'un, fixe, et chaque lampe sur l'autre, mobile à trois axes motorisés, permettant ainsi de positionner avec précision la lampe en cours d'utilisation devant chaque appareil. Pour chacune des lampes, les valeurs mesurées avec l'appareil testé ont ensuite été comparées aux valeurs relevées par le spectroradiomètre de référence.

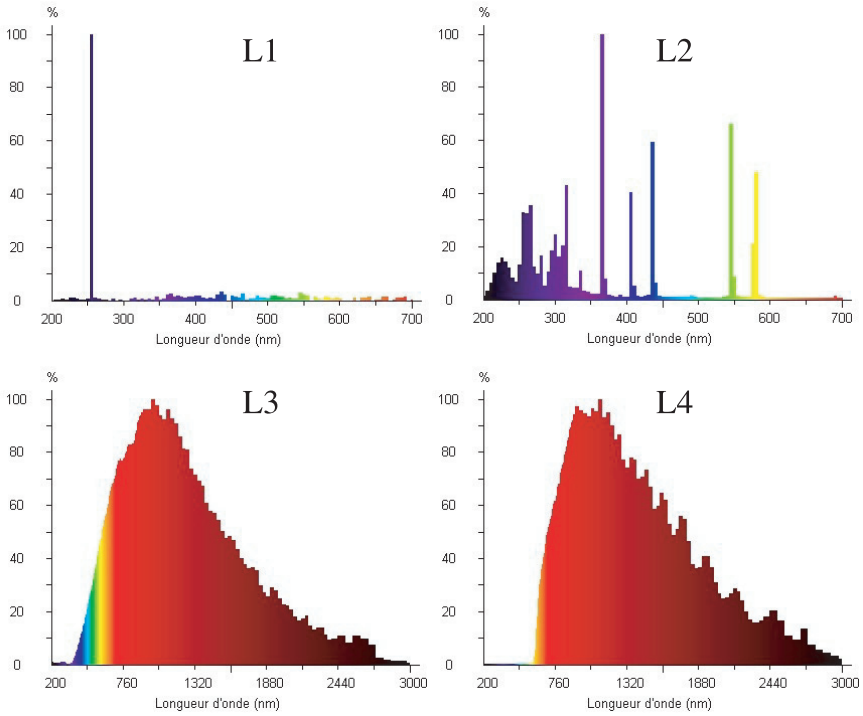


Figure 2 – Répartition spectrale relative des 4 lampes utilisées pour les mesures.
Relative spectral distribution of the 4 measured lamps.

2.4.2. Mesures complémentaires

2.4.2.1. Radiomètres

Afin de contrôler la réponse des radiomètres à des sources à spectre étroit, des mesures complémentaires ont été réalisées sur une lampe constituée de cinq LEDs émettant sur un domaine spectral étroit centré à 400 nm (cf. Fig. 3).

2.4.2.2. Spectroradiomètres à barrettes CCD – Correction de la lumière parasite

Dans le cas des spectroradiomètres à barrettes CCD des essais de quantification de la lumière parasite ont été effectués dans le but de corriger les spectres relevés. En effet, ce phénomène de lumière parasite, plus sensible dans le domaine ultraviolet, a principalement pour origine les imperfections des systèmes optiques, les réflexions internes sur les divers éléments et la superposition des ordres inférieurs sur la dispersion de l'ordre principal. Il est dépendant de l'étendue spectrale de la

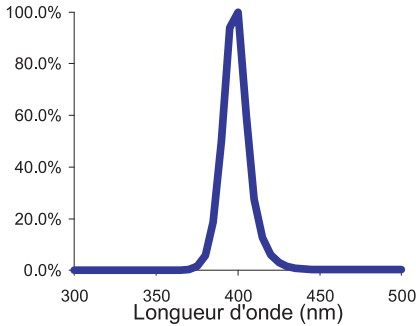


Figure 3 – Répartition spectrale relative de la lampe à LEDs.
Relative spectral distribution of the LEDs lamp.

source analysée et notamment lorsque la distribution spectrale de cette source est très différente de celle de la source d'étalonnage. Dans le cas des systèmes à balayage, techniquement évolués, ce phénomène est corrigé par l'utilisation de filtres d'ordre et d'un double monochromateur.

Une méthode de correction par calcul a récemment été développée par le NIST (Zong *et al.*, 2006 ; Brown *et al.*, 2003) et reprise également par le PTB⁴ (Sperling *et al.*, 2005). Elle consiste à produire entre 200 et 700 nm, des raies uniques j et à enregistrer pour chaque raie d'excitation de longueur d'onde λ_j , le signal $Sgn_{i,j}$ reçu sur chaque élément récepteur i correspondant à la longueur d'onde λ_i . Les différents spectres enregistrés conduisent à la construction de la matrice D :

$$D = \begin{bmatrix} d_{1,1} & \dots & d_{1,j} & d_{1,n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ d_{i,1} & \dots & \dots & d_{i,n} \\ d_{n,1} & \dots & \dots & d_{n,n} \end{bmatrix}$$

avec $d_{i,j} = \frac{Sgn_{i,j}}{Sgn_{i=j,j}}$ pour $i \neq j$ (longueurs d'onde réceptrices différentes de la longueur d'onde d'excitation) et $d_{i,j} = 0$ pour $i = j$ (longueurs d'onde réceptrices égales à la longueur d'onde d'excitation).

La lumière parasite lp_i atteignant un élément récepteur i est donc égale à la somme des contributions spectrales parasites $d_{i,j}$. Ainsi, lors de la mesure d'une source à large bande, l'éclairement mesuré e_{mesi} sur le récepteur i peut donc s'écrire :

$$e_{mes\ i} = e_{vrai\ i} + lp_i \quad \text{avec} \quad lp_i = \sum_{j=1}^n d_{i,j} \cdot e_{vrai\ i}$$

$e_{vrai\ i}$: éclairement vrai sans erreur due à la lumière parasite.

⁴ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Allemagne.

En écrivant cette équation sous forme matricielle, il est alors possible de déterminer les éclairagements vrais :

$$E_{mes} = E_{vrai} + D E_{vrai} \quad \text{ou} \quad E_{mes} = [I + D] E_{vrai}$$

E_{mes} , E_{vrai} : vecteurs colonnes correspondant aux éclairagements mesurés et aux éclairagements vrais ; I : matrice identité.

Pour produire les raies monochromatiques, le NIST utilise des lasers accordables (variables en longueurs d'onde). N'ayant pas de telles sources à notre disposition, le double monochromateur du spectroradiomètre de référence a été utilisé comme source variable en longueurs d'onde. Cependant le signal recueilli en sortie de monochromateur pour les longueurs d'ondes inférieures à 250 nm était faible. Il ne s'agit donc là que d'une approche, destinée à estimer l'amélioration qu'est susceptible d'apporter cette méthode de correction de la lumière parasite.

3. Résultats

3.1. Mesures systématiques

En ce qui concerne les exigences relatives aux méthodes de mesure, la norme NF EN 14255-1 fixe à 1/10 de la valeur limite d'exposition, la sensibilité minimale de mesurage des appareils. C'est pourquoi, dans chaque domaine spectral, seules les valeurs supérieures à ces seuils de sensibilité ont été prises en compte dans l'évaluation des performances des appareils de mesure.

Les éclairagements énergétiques mesurés à l'aide des deux radiomètres $Rd1$, $Rd2$ et calculés, à partir des mesures de l'éclairement énergétique spectrique réalisées avec les deux spectroradiomètres $Sp1$, $Sp2$, sont présentés à la figure 4. Ils font apparaître que :

- dans l'infrarouge (détermination de E_{IR} et E_{peau}), les résultats fournis par le radiomètre $Rd2$ sont tout-à-fait corrects avec des écarts toujours inférieurs à 8 %. Les écarts enregistrés avec le spectroradiomètre $Sp1$ sont plus importants et peuvent atteindre 46 % ;
- dans l'ultraviolet et notamment lors de la mesure de E_{eff} à l'aide des spectroradiomètres ($Sp1$, $Sp2$), les écarts atteignent plus 40 000 % lors de la mesure de source émettant sur l'ensemble du domaine spectral 200-3 000 nm (lampe $L3$). En revanche les radiomètres ($Rd1$, $Rd2$), présentent des écarts moins importants (entre 8 et 35 %). L'écart le plus élevé (35%) est enregistré avec le radiomètre $Rd1$ dans la mesure de E_{eff} sur la lampe $L1$ émettant une raie principale ;

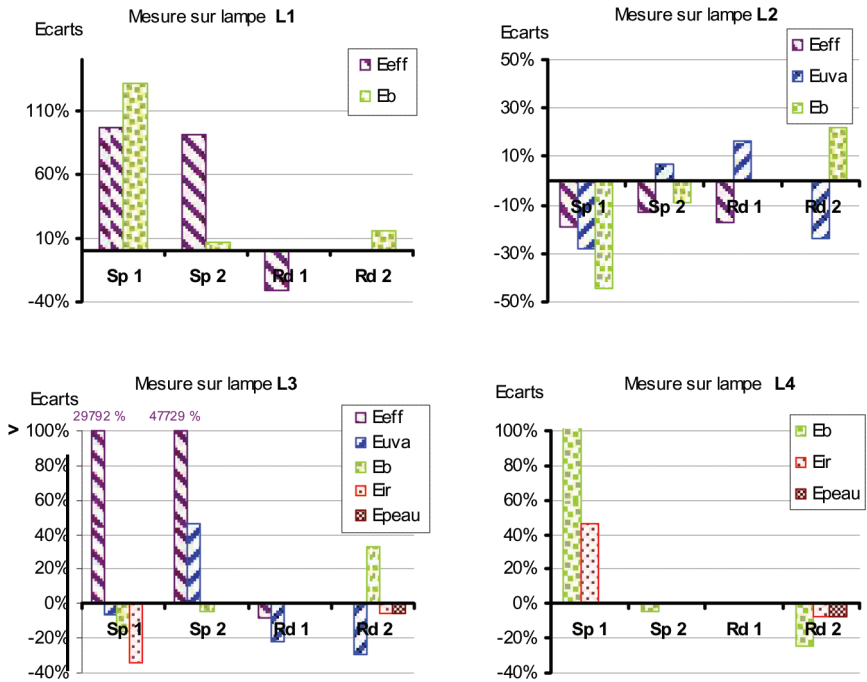


Figure 4 – Écarts entre les valeurs mesurées avec les appareils Sp1, Sp2, Rd1, Rd2 et l'appareil de référence, sur 4 types de lampes.

Deviation between measured values with the Sp1, Sp2, Rd1 and Rd2 devices and the reference device on the 4 types of lamp.

- dans le visible, les résultats des mesures réalisées avec le spectroradiomètre SP2 sont satisfaisants (écarts inférieurs à 10 %). Ces écarts sont un peu plus élevés avec le radiomètre Rd2 (entre 17 et 33 %) et atteignent plus de 130 % avec le spectroradiomètre SPI.

Il est à noter qu'il existe sur tous les appareils une erreur systématique due aux différences de taille entre les récepteurs. De plus, les spectroradiomètres produisent des erreurs supplémentaires liées à l'absence d'optique d'entrée ; cette dernière ayant été supprimée lors de la mesure de certaines lampes en raison du manque de signal. Cependant, il s'agit là d'erreur portant sur la géométrie du faisceau. Pour une lampe donnée, ces erreurs constantes, se reportent dans le même sens sur chaque domaine spectral. Elles n'expliquent donc pas l'importance des écarts enregistrés.

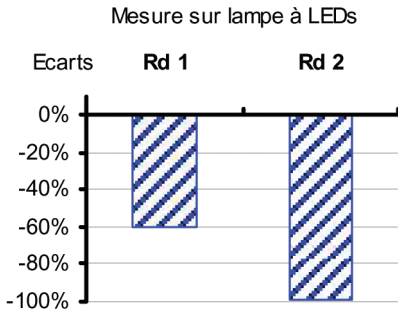


Figure 5 – Résultats associés à la mesure de la lampe à LEDs à l'aide des radiomètres Rd1 et Rd2.

Results from the LEDs lamp measured with the Rd1 and Rd2 radiometers.

La principale source d'erreur relative aux spectroradiomètres, s'explique par la présence de lumière parasite « Stray light » (cf. § 2.4.2.2.). C'est pourquoi une approche de correction a été expérimentée sur le spectroradiomètre *Sp2*.

3.2. Mesures de la lampe à LEDs à l'aide des radiomètres

Ces mesures ont permis d'évaluer les performances des radiomètres *Rd1* et *Rd2*, sur le domaine UVA, domaine de mesure commun à ces deux appareils. La figure 5 met en évidence que l'écart enregistré avec les radiomètres *Rd2* et *Rd1* atteint respectivement -100% et -60% . Le domaine spectral d'émission de la lampe à LEDs étant très étroit, les écarts enregistrés peuvent vraisemblablement être imputés d'une part à une réponse non linéaire du détecteur sur la gamme de longueur d'onde pour laquelle il est construit et d'autre part au fait que le spectre de la lampe utilisée pour l'étalonner est très différent de celui de la lampe à LEDs. De plus, l'émission maximale de cette lampe se situe à 400 nm, extrémité du domaine spectral UVA. Or, le domaine spectral mesuré par les radiomètres est délimité par des filtres passe bande pour lesquels il n'y a jamais une rupture franche aux limites de ce domaine spectral. Une partie du signal à 400 nm est donc coupée par ces filtres, d'où les écarts négatifs enregistrés.

3.3. Application de la correction de la lumière parasite

La méthode de correction de la lumière parasite décrite au § 2.4.2.2. a été appliquée au spectroradiomètre à barrette CCD *Sp2*, d'une part lors de son étalonnage (cf. § 2.3.) et d'autre part lors du relevé du spectre de la lampes *L3*, lampe pour laquelle les écarts enregistrés étaient les plus importants. Les résultats des mesures corrigées *C.* et non corrigées *N.C.* sont présentés à la figure 6. Elle montre que, sur la plupart des domaines spectraux, la correction permet de réduire considérablement les écarts. Il est à noter que, dans certains cas, la lumière parasite est surestimée (cf. *L3* : E_{eff} , E_{UVA}).

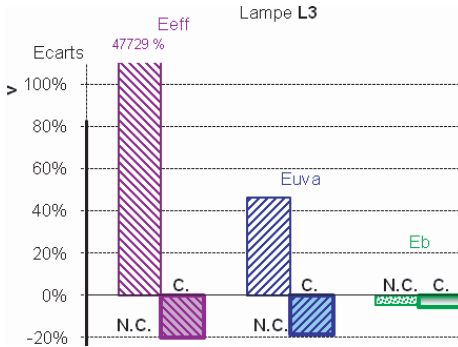


Figure 6 – Mesures corrigées (C.) et non corrigées (N.C.) réalisées à l'aide du spectroradiomètre Sp2 sur la lampe L3.

Corrected (C.) and not corrected (N.C.) measures of the lamp L3 with the Sp2 spectroradiometer.

4. Discussion

4.1. Les radiomètres

Les mesures réalisées sur les deux lampes qui émettent dans l'infrarouge (*L3* et *L4*) font apparaître des résultats satisfaisants sur les deux domaines analysés : 380-3 000 nm et 780-3 000 nm. L'étendue des domaines spectraux scrutés, la nature des spectres (qui sont en majorité des spectres continus), l'absence de courbe de pondération sur ces domaines font que les mesures sont moins sensibles aux variations éventuelles de la réponse spectrale des détecteurs et à la qualité des filtres passe-bande, que sur les domaines ultraviolet et visible. En effet, les résultats dans ces deux domaines sont plus aléatoires et dépendants du spectre de la source. Lors de la mesure des spectres étroits dans l'ultraviolet, les écarts enregistrés sont toujours négatifs, ce qui conduit à une sous estimation des risques.

4.2. Les spectroradiomètres

La première série de mesures réalisée à l'aide des deux spectroradiomètres a mis en évidence des écarts très importants sur le domaine ultraviolet, qui sont principalement dus au phénomène de « Stray light ».

Sur le spectroradiomètre à balayage de référence, le « Stray light » est corrigé en utilisant un double monochromateur (diffractions successives par deux réseaux) et une roue équipée de six filtres d'ordre. Une telle configuration serait envisageable pour le spectroradiomètres *Sp1*. Cependant, s'agissant d'un appareillage modulaire avec une alimentation propre à chaque module (monochromateur, chopper) le montage final deviendrait alors trop complexe et ne remplirait plus du tout les conditions requises pour une utilisation *in situ*.

Une approche de la méthode de correction du « Stray light » par calcul appliquée à l'appareil *Sp2* a montré qu'il était possible d'améliorer très nettement les résultats. Cette méthode demande toutefois à être affinée, notamment sur les longueurs d'onde inférieures à 250 nm.

Sur ces deux types d'appareils, il convient de noter une source d'erreur provenant du mode de gestion des appareils, qui consiste à fixer soit le gain (*Sp1*), soit la durée d'intégration (*Sp2*) pour l'acquisition d'un domaine spectral donné. Ainsi, sur une source de type *L1* comprenant une raie principale et un signal de fond sur les autres longueurs d'onde, le gain ou la durée d'intégration sont fixés par rapport au signal de la raie principale, de manière à ne pas avoir de saturation. Ceci a pour conséquence un signal très faible, voir insuffisant pour les longueurs d'onde en dehors de la raie principale. La situation idéale serait donc de pouvoir effectuer diverses acquisitions à des gains ou durées d'intégrations différentes, de manière à reconstituer le spectre final avec davantage de précision. Si cette méthode de mesure peut être réalisée manuellement lors de mesures en laboratoire, elle doit par contre être gérée directement par le logiciel d'acquisition lors de mesures *in situ*.

De plus, sur le modèle de spectroradiomètre à barrette CCD (*Sp2*), la durée d'intégration maximale était de 1 s, valeur insuffisante pour obtenir un signal correct dans toutes les situations. Sur d'autres appareils de même type, cette durée d'intégration peut aller jusqu'à 60 s, ce qui paraît plus acceptable.

5. Conclusion

Cette étude a mis en évidence qu'il n'existe pas d'appareils de mesure de sources de différentes natures répondant aux critères fixés en terme de coût, d'encombrement, de facilité d'utilisation *in situ*, donnant des résultats satisfaisants sur l'ensemble du domaine spectral (180-3 000 nm). Les difficultés majeures résident dans la mesure du rayonnement ultraviolet de longueurs d'onde inférieures à 300 nm.

Les radiomètres conviennent pour la mesure dans le domaine infrarouge. Dans le cas des sources à spectre continu, les résultats sont variables selon les modèles. Mais ces appareils ne sont pas adaptés à la mesure de sources émettant sur quelques raies. Or, la plupart des sources émettant dans l'ultraviolet sont de ce type.

Les spectroradiomètres à barrette CCD linéaire actuellement présent sur le marché, ainsi que ceux à balayage, à simple monochromateur, sans adjonction de filtres d'ordre ne sont absolument pas utilisables en l'état pour évaluer les risques

aux postes de travail. L'approche d'une méthode de correction de la lumière parasite, montre qu'il est possible d'améliorer très nettement les résultats. La mise en œuvre de cette méthode demande néanmoins à être affinée.

Par rapport à une mesure radiométrique, la mesure spectrale présente l'avantage de pouvoir proposer une protection adaptée par simple calcul à l'aide du facteur spectral de transmission des filtres de protection, module présent dans le logiciel CatRayon (CatRayon 3, 2006) développé par l'INRS (2006). Les résultats de cette étude nous incitent donc à privilégier l'utilisation de spectroradiomètres à barrette CCD, qui donnent une mesure rapide du spectre, en sachant qu'il sera alors nécessaire d'approfondir la méthode de correction ébauchée dans cette étude.

Annexe

Symboles, termes et unités

- λ : Longueur d'onde (nm).
- E_{λ} : Éclairement énergétique spectrique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$).
- L_{λ} : Luminance énergétique spectrique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$).
- $\Delta\lambda$: Largeur de bande (nm).
- $S(\lambda)$: Pondération spectrale qui tient compte du rapport entre la longueur d'onde et les effets du rayonnement ultraviolet sur les yeux et la peau.
- $B(\lambda)$: Pondération spectrale qui tient compte du rapport entre la longueur d'onde et la lésion photochimique de l'œil provoqué par la lumière bleue.
- $R(\lambda)$: Pondération spectrale qui tient compte du rapport entre la longueur d'onde et la lésion de l'œil par effet thermique provoquée par des rayonnements visible et IRA.
- E_{eff} : Éclairement énergétique efficace (UV), calculé sur le domaine spectral 180-400 nm et pondéré en fonction de la longueur d'onde par $S(\lambda)$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).
- E_{UVA} : Éclairement énergétique total (UVA), calculé sur le domaine spectral 315-400 nm ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).
- E_{B} : Éclairement énergétique efficace (lumière bleue), calculé sur le domaine spectral 300-700 nm et pondéré en fonction de la longueur d'onde par $B(\lambda)$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).
- L_{B} : Luminance énergétique efficace (lumière bleue), calculée sur le domaine spectral 300-700 nm et pondérée en fonction de la longueur d'onde par $B(\lambda)$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$).
- L_{R} : Luminance énergétique efficace (lésion par effet thermique), calculée sur le domaine spectral 380-1400 nm ou 780-1400 nm et pondérée en fonction de la longueur d'onde par $R(\lambda)$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$).

E_{IR} : Éclairement énergétique total (lésion par effet thermique), calculé sur le domaine spectral 780-3 000 nm ($W.m^{-2}$).

E_{peau} : Éclairement énergétique total (visible, IRA et IRB), calculé sur le domaine spectral 380-3 000 nm ($W.m^{-2}$).

RÉFÉRENCES

- Brown S.W., Johnson B.C., Feinholz M.E., Yarbrough M.A., Flora S.J., Lyckke K.R., Clark D.K. (2003) Straylight correction algorithm for spectrographs, *Metrologia* **40**, 81-83.
- Directive 89/391/CEE (1989) du Conseil, concernant la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail, Journal officiel L 183 du 29/06/1989, pp. 0001-0008.
- Directive 2006/25/CE (2006) du parlement européen et du conseil, relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels) (dix-neuvième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE), Journal officiel L 114 du 27/04/2006, pp. 38-59.
- ICNIRP (1997) Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3 μ m), *Health Phys.* **73** (3), 539-554.
- ICNIRP (2004) Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths 180 nm to 400 nm (incoherent optical radiation), *Health Phys.* **87**, 171-186.
- INRS Cd 006 2^e édition (2006) CatRayon 3 – Evaluation de l'exposition au rayonnement optique dans les locaux de travail – Détermination des risques et des moyens de protection. Guide d'utilisation.
- NF EN 14255-1 (2005) Mesure et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents : Rayonnements ultraviolets émis par les sources artificielles sur les lieux de travail.
- NF EN 14255-2 (2006) Mesure et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents : Rayonnements visibles et infrarouges émis par les sources artificielles sur les lieux de travail.
- Sperling A., Larionov O., Grusemann U., Winter S. (2005) Stray-light correction of array spectrometers using tuneable pulsed and cw lasers. In: Proceedings of the 9th international conference on new developments and applications in optical radiometry (NEWRAD), Davos, p. 93.
- Zong Y., Brown S.W., Johnson B.C., Lykke K.R., Ohno Y. (2006) Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers, *Appl. Opt.* **45**, 1111-1119.