



**Mesurer et évaluer l'exposition
professionnelle aux rayonnements
optiques artificiels (hors laser).**

Guide méthodologique

NS 347

NOTE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Mesurer et évaluer l'exposition professionnelle aux rayonnements optiques artificiels (hors laser).

Guide méthodologique

Annick Barlier-Salsi

NS 347
septembre 2016

Sommaire

1. Préambule	3
2. Objet et domaine d'application	5
2.1. Quels sont les rayonnements concernés ?	5
2.2. Dans quel cas recourir à la mesure ?	5
2.3. A qui s'adresse ce guide ?	5
3. Recommandations, normes et réglementation.....	7
3.1. Les recommandations.....	7
3.2. Les normes	7
3.3. La réglementation	7
4. Grandeurs à déterminer, Valeurs Limites d'Exposition (VLE) et Limites d'Exposition Recommandées (LER)	9
4.1. Grandeurs à déterminer	9
4.2. Valeurs Limites d'Exposition (VLE) et Limites d'Exposition Recommandées (LER)	10
5. Méthodes et moyens de mesure	15
5.1. Les appareils de mesures.....	15
5.1.1. Les radiomètres	15
5.1.2. Les spectroradiomètres.....	16
5.1.2.1. Spectroradiomètre à balayage et double monochromateurs	16
5.1.2.2. Spectroradiomètre ou spectromètre à barrette de détecteurs.....	17
5.1.3. Avantages et inconvénients de chaque appareil.....	19
5.2. Optique d'entrée.....	20
5.2.1. Eclairage énergétique	20
5.2.2. Luminance énergétique.....	21
5.2.3. Fibre optique	21
5.3. Méthode alternative pour déterminer les grandeurs exprimées en luminance énergétique à partir des grandeurs en éclairage énergétique.....	21
6. Analyse des situations d'exposition	23
6.1. Implantation des sources et des travailleurs.....	23
6.2. Fiche technique des sources	24
6.3. Fiche d'exposition	25
7. Mesurage.....	27
7.1. Géométrie du mesurage	27
7.2. Angle d'admission des appareils.....	28
7.3. Durée du mesurage.....	29
7.4. Signal d'obscurité.....	29
7.5. Ajustement du temps d'intégration des spectromètres CCD.....	30
7.6. Domaine spectral à mesurer selon le type de source	30

8. Evaluation des risques	33
8.1. Comparaison aux Valeurs Limites d'Exposition (VLE) ou aux Limites d'Exposition Recommandées (LER)	33
8.2. Outil d'aide à l'évaluation des risques : <i>CatRayon</i>	34
8.2.1. Le module <i>MesSourcesCatRayon</i>	35
8.2.2. Le module <i>CatRayon</i>	35
9. Démarche CARSAT/CRAMIF-INRS pour la mesure des rayonnements optiques au poste de travail	39
9.1. Appareillage	39
9.2. Interfaçage des spectroradiomètres.....	39
9.3. Evaluation des risques et moyens de protection.....	41
Bibliographie	43
Annexe 1 : Grandeurs, symboles, termes et unités	45
Annexe 2 : Spécificité des appareils de mesure	47
Annexe 3 : Méthode détaillée du calcul de L_B et L_R	51

1. Préambule

Bien avant les années 2000, des organismes tels que l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) et l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) se sont préoccupés des risques pour la santé des travailleurs exposés aux Rayonnements Optiques Artificiels (ROA). Leurs travaux ont conduit à la publication de recommandations^{[1]-[4]} visant notamment à proposer des Valeurs Limites d'Exposition (VLE). Ces dernières évoluent au fur et à mesure des nouvelles connaissances sur les effets des rayonnements optiques sur la santé. C'est pourquoi les recommandations dispensées par ces 2 organismes sont mises à jour régulièrement.

Les risques potentiels des rayonnements sur la santé des travailleurs sont également une préoccupation de l'INRS. Un certain nombre d'études conduites sur le terrain et en laboratoire ont permis de quantifier les niveaux d'exposition des salariés aux ROA produits par des sources diverses telles que les lampes à ultraviolets^[5], les projecteurs scéniques^[6], les fours de verrerie^[7], de forge^[8] et d'aciérie^[9], ainsi que par les arcs de soudages^[10]. L'INRS a aussi développé un logiciel *CatRayon*^[11] permettant de simuler différentes situations d'exposition aux ROA à partir des caractéristiques de sources présentes dans ses bases de données ou mesurées par les utilisateurs.

Sur le plan réglementaire, la protection des travailleurs contre les ROA a été prise en compte, à partir de 2006, par la directive européenne 2006/25/CE^[12] transposée en droit français par le décret n° 2010-750^[13] du 2 juillet 2010. Ces textes réglementent l'exposition des travailleurs aux ROA en fixant les VLE, ainsi que les obligations des employeurs et les conditions de surveillance de la santé des travailleurs. Dans ce cadre, l'employeur procède d'abord à une analyse a priori des risques basée sur des documents ou des calculs. En l'absence d'information ou si les données à sa disposition ne sont pas suffisantes, une évaluation des risques par la mesure s'impose. Toutefois, comme le précise le guide européen de bonnes pratiques^[14] « mesurer des rayonnements optiques sur le lieu de travail est complexe. Les appareils de mesure sont souvent assez chers et ne peuvent être utilisés correctement que par une personne qualifiée. Une personne inexpérimentée peut facilement commettre des erreurs et ainsi fournir des données très inexactes. En outre, l'évaluation des risques requiert souvent de combiner les données en termes de temps et de mouvements associés aux tâches accomplies ».

Le présent guide se propose de répondre aux préoccupations des personnes chargées de mesurer les ROA sur les lieux de travail. Fondé sur l'expérience acquise par l'INRS en matière de mesurage des ROA au poste de travail, sur les études métrologiques^{[15],[16]} conduites dans ses laboratoires ainsi que sur les différentes normes^{[17]-[19]}, il fournit les éléments essentiels concernant la méthodologie de mesure des ROA et l'évaluation des risques à partir des mesurages, tant sur le plan réglementaire que dans le cadre plus général d'une démarche de prévention.

L'évaluation des risques sans mesure, basée uniquement sur des documents ou des calculs, fera l'objet d'un autre guide spécifique.

Important

Ce guide s'adresse à des personnes ayant des connaissances de base sur la radiométrie, la métrologie des rayonnements optiques et l'évaluation des risques dus aux ROA à partir des VLE. Il ne peut en aucun cas remplacer une formation sur ce sujet.



2. Objet et domaine d'application

L'une des premières difficultés pour mesurer les ROA provient de la multiplicité de leurs effets et de l'étendue spectrale recouvrant sept domaines représentés par différentes grandeurs. Par conséquent sept grandeurs à comparer aux VLE sont à déterminer, dont certaines ne sont pas toujours simples à appréhender. S'ajoute à cela, la diversité des moyens de mesures et des sources rencontrées in-situ.

L'objectif de ce document est donc de guider les personnes chargées d'effectuer des mesures sur les lieux de travail, en dressant un état des recommandations, normes et réglementations existantes, en rappelant les grandeurs à déterminer et les Valeurs Limites d'Expositions (VLE) associées et en décrivant les moyens de mesure disponibles et leur fiabilité, la méthodologie de mesure au poste de travail et la méthode d'évaluation des risques à partir de mesurages.

Le but n'est pas de lister toutes les méthodes et moyens de mesure des ROA au poste de travail, mais plutôt de rechercher, chaque fois que la situation le permet, à optimiser et à pérenniser les mesures de manière à prendre en compte les évolutions du poste de travail (et, éventuellement, de la réglementation, donc des VLE) et à proposer une protection efficace sans procéder à de nouvelles mesures.

2.1. Quels sont les rayonnements concernés ?

Le présent document s'applique aux Rayonnement Optiques Artificiel (ROA) incohérents entre 180 et 3000 nm, produits par des sources présentes sur les lieux de travail intérieurs ou extérieurs. Les rayonnements cohérents (laser) n'y sont pas traités.

2.2. Dans quel cas recourir à la mesure ?

Absence d'information : la réalisation de mesure est nécessaire lorsque tous les moyens documentaires : notice du constructeur, normes, guides pratiques... n'ont pas permis de conclure qu'il n'y avait pas de risque et/ou que les outils de calcul disponibles, comme *CatRayon*^[11], ne permettent pas d'évaluer les niveaux d'exposition des salariés.

Rayonnements indirects : on peut citer aussi toutes les situations dans lesquelles la source est suspectée de provoquer un risque mais **n'est pas visible directement**. Par exemple, pour le contrôle qualité, l'opérateur n'est exposé qu'au rayonnement réfléchi par l'objet inspecté ; à l'entrée d'un tunnel de séchage l'opérateur n'est exposé qu'au rayonnement réfléchi par les parois.

Il existe également des procédés industriels spécifiques émettant des ROA parasites et pour lesquels aucune information n'est disponible.

2.3. A qui s'adresse ce guide ?

Ce guide a été rédigé principalement à l'intention des Centres de Mesure Physique des CARSAT (CRAMIF) et des autres organismes chargés d'évaluer les risques dus aux ROA sur les lieux de travail à partir de mesurage. Il peut également servir de base aux organismes accrédités dans le cadre des arrêtés^{[20],[21]}, mais n'a pas pour vocation à se limiter aux exigences réglementaires. En termes d'évaluation des risques et de méthode de mesure, il fait également référence aux recommandations de l'ICNIRP.

En règle générale, ce guide ne concerne pas directement les employeurs ou les préventeurs en entreprise. Ils peuvent cependant y trouver des informations utiles pour évaluer les prestations d'organismes auxquels ils auraient sous-traité les mesures.



3. Recommandations, normes et réglementation

3.1. Les recommandations

L'organisme de référence en matière de protection contre les rayonnements optiques artificiels ou naturels est l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Ses compétences sont reconnues internationalement, notamment au travers des Limites d'Exposition aux rayonnements optiques qu'il publie. Ces **Limites d'Exposition Recommandées (LER)** s'appuient sur la littérature scientifique relative aux effets biologiques des rayonnements optiques sur la santé et sont mises à jour chaque fois que de nouvelles connaissances dans le domaine l'exigent. Celles qui sont prises comme référence dans le présent guide sont :

- «*Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths 180 nm to 400 nm (incoherent optical radiation)*»^[2], publié en 2004
- «*Guidelines on limits exposure to incoherent visible and infrared radiation*»^[3], publié en 2013.

Au-delà des LER, l'ICNIRP publie également des recommandations plus ciblées comme celles relatives à la protection des travailleurs contre le rayonnement ultraviolet^[4].

Par ailleurs, l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) publie chaque année un recueil de LER^[1] aux agents chimiques, physiques et biologiques, dont une part concerne l'exposition aux rayonnements optiques. A ce jour, les LER préconisées par cet organisme sont extrêmement proches de celles proposées par l'ICNIRP, c'est pourquoi il n'y sera pas fait spécifiquement mention dans la suite de ce guide.

3.2. Les normes

Une norme européenne, en 4 parties, référencée NF EN 14255 et intitulée « Mesurage et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents » permet de répondre en grande partie aux préoccupations des préventeurs chargés de mesurer les ROA sur les lieux de travail. Les parties de la norme qui nous intéressent dans ce guide se déclinent comme suit :

- **NF EN 14255-1**^[17] : *Rayonnements ultraviolets émis par des sources artificielles sur les lieux de travail.*
- **NF EN 14255-2**^[18] : *Rayonnements visibles et infrarouges émis par des sources artificielles sur les lieux de travail.*
- **NF EN 14255-4**^[19] : *Terminologie et grandeurs utilisées pour le mesurage de l'exposition au rayonnement ultraviolet, visible et infrarouge.*

Il n'est pas fait état ici de la partie 3 de la norme qui est consacrée au rayonnement solaire.

En ce qui concerne les méthodes de mesure des ROA, il est souvent fait référence à la norme NF EN 62471,^[22] dont l'objectif est de classer les sources électriques émettant des ROA selon les risques photobiologiques qu'elles présentent. Cette norme définit des techniques de mesurage des ROA en laboratoire et concerne plus spécifiquement les fabricants de sources électriques. Il ne sera donc pas fait référence à cette norme dans le présent document.

3.3. La réglementation

Depuis 2006, l'exposition des travailleurs aux ROA est réglementée par la directive européenne 2006/25/CE^[12] transposée en droit français par le décret n° 2010-750^[13]. Ces textes fixent des **Valeurs Limites d'Exposition (VLE)**, lesquelles sont issues des recommandations de l'ICNIRP parues avant 2006. Ainsi, la réglementation est en concordance avec les dernières recommandations ICNIRP sur le domaine ultraviolet qui datent de 2004. En revanche, il n'en est pas de même sur les domaines visible et infrarouge puisque les VLE et grandeurs associées qui figurent dans la directive 2006/25/CE [12] sont issues

des recommandations de l'ICNIRP de 1997^[23]. L'évolution des connaissances relatives aux effets sur la santé des rayonnements visible et infrarouge a conduit à la publication de nouvelles recommandations de l'ICNIRP en 2013.

La directive européenne 2006/25/CE^[12] et le décret n° 2010-750^[13] ne fixent aucune condition quant aux configurations de mesure. Mais l'arrêté^[20] de mars 2016 précise les moyens à mettre en œuvre pour réaliser l'évaluation des risques et des niveaux d'exposition, notamment les conditions de mesurage. L'article 4 précise que le mesurage des grandeurs radiométriques caractéristiques de l'exposition, doit être réalisé conformément aux normes NF EN 14255-1^[17], NF EN 14255-2^[18] et NF EN 14255-4^[19] (cf. § précédent). Un second arrêté^[21] spécifie les conditions d'accréditation des organismes pouvant procéder aux mesurages des niveaux d'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail.

Remarque

Afin de distinguer facilement les exigences spécifiques à la réglementation et les éléments issus des recommandations de l'ICNIRP, le code couleur suivant a été adopté dans ce document :

Réglementation	Recommandations ICNIRP	Spécifications communes à la réglementation et à l'ICNIRP
----------------	------------------------	---

4. Grandeurs à déterminer, Valeurs Limites d'Exposition (VLE) et Limites d'Exposition Recommandées (LER)

4.1. Grandeurs à déterminer

Les VLE et LER aux rayonnements optiques sont basées sur 2 grandeurs physiques qui sont l'éclairement énergétique spectrique E_λ exprimé en $W.m^{-2}.nm^{-1}$ et la luminance énergétique spectrique L_λ exprimée en $W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$. (Ces grandeurs sont définies dans l'[annexe 1](#)). Sur cette base, les grandeurs à déterminer pour l'évaluation des risques sont, selon les domaines spectraux, exprimées en

- Eclairement énergétique global : E_{UVA} , E_{IR} , E_{Peau} ,
- Eclairement énergétique efficace : E_{eff} pondéré par la courbe $S(\lambda)$ tient compte de l'action du rayonnement ultraviolet, selon sa longueur d'onde, sur les yeux et la peau, et E_B pondéré par la courbe $B(\lambda)$ tient compte de l'action du rayonnement visible, selon sa longueur d'onde, sur les yeux,
- Luminance énergétique efficace : L_B pondérée par la courbe $B(\lambda)$ tient compte de l'action du rayonnement visible, selon sa longueur d'onde, sur les yeux et L_R pondéré par la courbe $R(\lambda)$ tient compte de l'action du rayonnement visible et proche infrarouge, selon sa longueur d'onde, sur les yeux.

Tableau 1 : Grandeurs à déterminer et à comparer aux VLE pour évaluer les risques dus aux ROA selon la directive 2006/25/CE ^[12], le décret 2010-750 ^[13] ou les recommandations ICNIRP ^{[2],[3]}. Les symboles utilisés sont détaillés dans l'[annexe 1](#).

Domaine spectral	Grandeurs à déterminer	
	Selon directive 2006/25/CE ^[12] et décret 2010-750 ^[13]	Selon recommandations ICNIRP ^{[2],[3]}
180 – 400 nm	$E_{eff} = \sum_{180}^{400} E_\lambda \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	$W.m^{-2}$
315 – 400 nm	$E_{UVA} = \sum_{315}^{400} E_\lambda \cdot \Delta\lambda$	$W.m^{-2}$
300 – 700 nm	$L_B = \sum_{300}^{700} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	$W.m^{-2}.sr^{-1}$
	$E_B = \sum_{300}^{700} E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	$W.m^{-2}$
380 – 1400 nm	$L_R = \sum_{380}^{1400} L_\lambda \cdot R(\lambda)^{[12],[13]} \cdot \Delta\lambda$ $W.m^{-2}.sr^{-1}$	$L_R = \sum_{380}^{1400} L_\lambda \cdot R(\lambda)^{[2],[3]} \cdot \Delta\lambda$ $W.m^{-2}.sr^{-1}$
780 – 1400 nm	$L_R = \sum_{780}^{1400} L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ $W.m^{-2}.sr^{-1}$	Pas de LER spécifique
780 – 3000 nm	$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_\lambda \cdot \Delta\lambda$ $W.m^{-2}$	$E_{IR} = \sum_{780}^{1000} 0.3 \cdot E_\lambda \cdot \Delta\lambda + \sum_{1000}^{3000} E_\lambda \cdot \Delta\lambda$ $W.m^{-2}$
380 – 3000 nm	$E_{Peau} = \sum_{380}^{3000} E_\lambda \cdot \Delta\lambda$ $W.m^{-2}$	

Le mode de calcul de ces différentes grandeurs est présenté au Tableau I. On notera quelques différences selon que ces grandeurs émanent de la directive 2006/25/CE ^[12] ou des dernières recommandations de l'ICNIRP [2] (cf. § [Réglementation](#)). Les différences portent sur les points suivants :

- Le domaine spectral 780-1400 nm : l'ICNIRP ^[2] ne définit plus de grandeur spécifique à déterminer sur ce domaine.
- Le mode de calcul de E_{IR} : l'ICNIRP ^[2] a introduit un facteur de pondération égal à 0,3 entre 780 et 1000 nm.
- La pondération spectrale $R(\lambda)$: Comme le montre la figure 1, **la courbe de pondération spectrale $R(\lambda)$ a été modifiée entre 380 et 500 nm**. En revanche, sur le domaine 500-1400 nm, les valeurs de pondération n'ont pas changé.

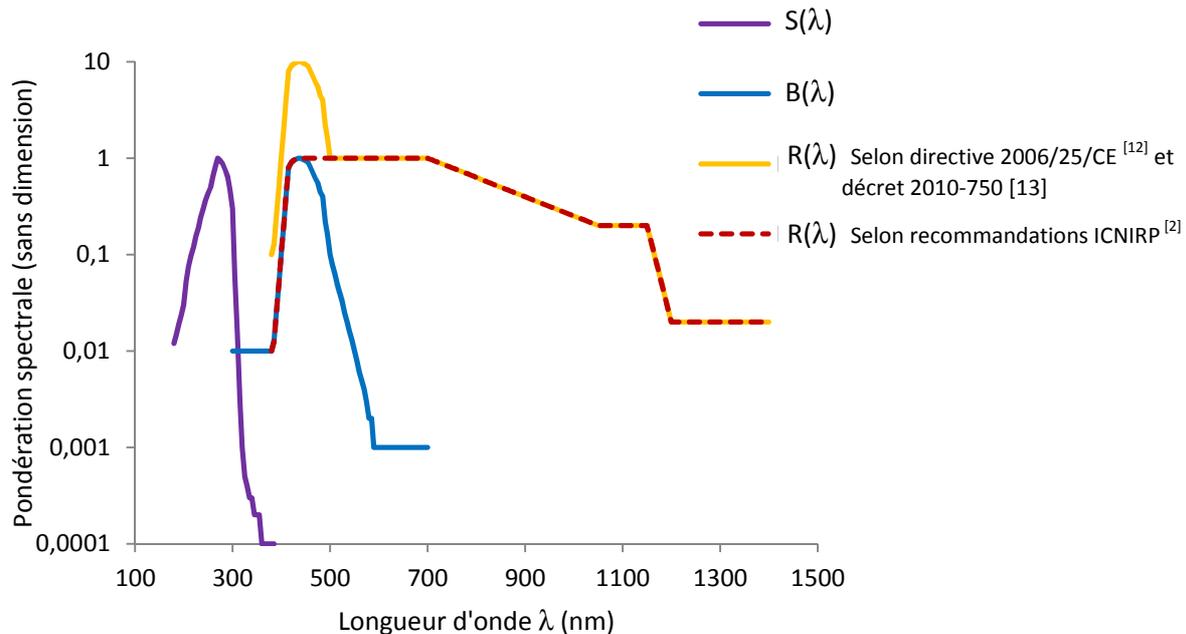


Figure 1 : Courbes de pondération spectrale, relatives aux effets du rayonnement ultraviolet sur les yeux et la peau : $S(\lambda)$, aux lésions rétiniennes par effet photochimique de la lumière bleue : $B(\lambda)$ et aux lésions rétiniennes par effet thermique : $R(\lambda)$ selon la directive 2006/25/CE^[12] et le décret 2010-750^[13] et $R(\lambda)$ selon les recommandations ICNIRP^[3] de 2013.

Remarque

Dans le domaine ultraviolet, l'évaluation des risques prend en compte les rayonnements optiques à partir de 180 nm. Or, les valeurs d'émission des sources étalon couramment utilisées dans les laboratoires chargés de l'étalonnage ne sont pas disponibles pour les longueurs d'onde inférieures à 200 nm.

4.2. Valeurs Limites d'Exposition (VLE) et Limites d'Exposition Recommandées (LER)

Selon les domaines spectraux, les grandeurs déterminées au tableau I peuvent être, soit comparées directement aux VLE ou LER, qui sont alors exprimées en $W.m^{-2}$ ou en $W.m^{-2}.sr^{-1}$, soit associées à la durée d'exposition journalière t (en s), on parle alors d'exposition (H) exprimée en $J.m^{-2}$ ou de dose de luminance énergétique (D) exprimée en $J.m^{-2}.sr^{-1}$. Les VLE dans les différents domaines spectraux selon la directive 2006/25/CE^[12] et le décret 2010-750^[13] sont données aux tableaux II, III, V et VIII ; les LER selon l'ICNIRP^{[2],[3]} sont données aux tableaux II, IV, VI et VIII.

Les VLE ou LER des tableaux IV à VII font intervenir l'angle α sous lequel la source est observée (Cf. figure 2). L'angle α , exprimé en radians, est défini par le quotient de la dimension apparente de la source par la distance d à laquelle elle est observée ^[19] (hypothèse simplificatrice applicable aux petits angles):

$$\alpha \approx \frac{l_s \cos(\phi)}{d}$$

Dans le cas d'une source circulaire, l_s correspond au diamètre de la source. Pour une source non circulaire, l_s est déterminé par la moyenne arithmétique de la plus petite et de la plus grande dimension de la source.

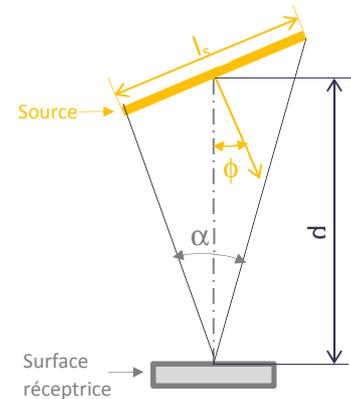


Figure 2 : Angle α sous-tendu par la source.

Tableau II : Domaine ultraviolet : Valeurs Limites d'Exposition (VLE) selon directive 2006/25/CE^[12] et décret 2010-750^[13] et Limites d'Exposition Recommandées (LER) selon l'ICNIRP^{[2],[3]}.

Partie du corps	Risque	Domaine spectral	VLE selon directive 2006/25/CE ^[12] , décret 2010-750 ^[13] et LER selon ICNIRP ^{[2],[3]}
Œil : Cornée, conjonctive Peau :	- Photokératite, conjonctivite - Erythème, élastose, cancer de la peau	180 – 400 nm	$H_{eff}^{VLE} = 30 \text{ J.m}^{-2}$
Œil : Cristallin	Cataracte	315 – 400 nm	$H_{UVA}^{VLE} = 10^4 \text{ J.m}^{-2}$

Tableau III : Valeurs Limites d'Exposition (VLE) dans le domaine visible pour le risque lumière bleue selon la directive 2006/25/CE^[12] et le décret 2010-750^[13]

Partie du corps	Risque	Domaine spectral	Angle sous-tendu par la source α	VLE Selon directive 2006/25/CE ^[12] , décret 2010-750 ^[13]
Œil : rétine	Photorétinite	300 – 700 nm	$\alpha \geq 0.011 \text{ rad}$	Pour $t \leq 10\,000 \text{ s}$ $L_B^{VLE} = \frac{10^6}{t} \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ Pour $t > 10\,000 \text{ s}$ $L_B^{VLE} = 100 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$
			$\alpha < 0.011 \text{ rad}$	Pour $t \leq 10\,000 \text{ s}$ $E_B^{VLE} = \frac{100}{t} \text{ W.m}^{-2}$ Pour $t > 10\,000 \text{ s}$ $E_B^{VLE} = 0.01 \text{ W.m}^{-2}$ (1)

(1) Mention de la directive : Normalement, cela ne s'applique qu'aux instruments ophtalmologiques ou à un œil stabilisé lors d'une anesthésie. La durée maximale pendant laquelle on peut fixer une source se détermine en appliquant la formule suivante : $t_{max} = 100/E_B$. Du fait des mouvements des yeux lors de tâches visuelles normales, cette durée n'excède pas 100 s

Tableau IV : Limites d'Exposition Recommandées (LER) dans le domaine visible pour le risque lumière bleue selon l'ICNIRP [3]

Partie du corps	Risque	Domaine spectral	Angle sous-tendu par la source α	LER selon l'ICNIRP [3]
Œil : rétine	Photorétinite	300 – 700 nm	$\alpha \geq 0.011$ rad	Pour $0,25 \leq t \leq 10\,000$ s $D_B^{LER} = 10^6 \text{ J.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ Pour $t > 10\,000$ s $L_B^{LER} = 100 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$
			$\alpha < 0.011$ rad	Pour $0,25 \leq t \leq 100$ s $H_B^{LER} = 100 \text{ J.m}^{-2}$ Pour $t > 100$ s $E_B^{LER} = 1 \text{ W.m}^{-2}$

Tableau V : Valeurs Limites d'Exposition (VLE) dans le domaine visible et proche infrarouge selon la directive 2006/25/CE [12] et le décret 2010-750 [13]

Partie du corps	Risque	Domaine spectral	Angle sous-tendu par la source α	VLE selon directive 2006/25/CE [12] et décret 2010-750 [13] α exprimé en radians
Œil : rétine	Brûlure rétinienne	380 – 1400 nm	$0.0017 \leq \alpha \leq 0.1$ rad	Pour $10\mu\text{s} \leq t \leq 10$ s (1) $L_R^{VLE} = \frac{5 \cdot 10^4}{\alpha \cdot t^{0.25}} \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$
		780 – 1400 nm	$0.011 \leq \alpha \leq 0.1$ rad	Source émettant uniquement dans l'infrarouge (stimulus visuel faible) Pour $t > 10$ s (2) $L_R^{VLE} = \frac{6000}{\alpha} \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$

(1) Si $t < 10 \mu\text{s}$ ou $t > 10$ s, la VLE est calculée en prenant respectivement $t = 10 \mu\text{s}$ ou $t = 10$ s. Si $\alpha < 0.0017$ rad ou $\alpha > 0,1$ rad, la VLE est calculée en prenant respectivement $\alpha = 0.0017$ rad ou $\alpha = 0,1$ rad.

(2) Si $\alpha < 0.011$ rad ou $\alpha > 0,1$ rad, la VLE est calculée en prenant respectivement $\alpha = 0.011$ rad ou $\alpha = 0,1$ rad.

Tableau VI : Limites d'Exposition Recommandées (LER) dans le domaine visible et proche infrarouge selon l'ICNIRP [3]

Partie du corps	Risque	Domaine spectral	Angle sous-tendu par la source α	LER selon l'ICNIRP [3] α exprimé en rad
Œil : rétine	Brûlure rétinienne	380 – 1400 nm	$0.0015 \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$ rad (pour valeur de α_{\max} cf. tableau VII)	Pour $10\mu s \leq t \leq 0,25s$ (1) (2) $D_R^{LER} = \frac{2.10^4}{\alpha} \cdot t^{0.75} \text{ J.m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
				Pour $t > 0,25s$ (2) $L_R^{LER} = \frac{2,8.10^4}{\alpha} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
			$0.0015 \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$ rad (pour valeur de α_{\max} cf. tableau VII)	Source émettant uniquement dans l'infrarouge (stimulus visuel faible)
				Pour $0,25s < t < 100s$ (2) $L_R^{LER} = \frac{2.10^4}{\alpha \cdot t^{0.25}} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
			Pour $t \geq 100s$ (2) $L_R^{LER} = \frac{6300}{\alpha} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	

(1) Si $t < 10 \mu s$, la LER est calculée en prenant $t = 10 \mu s$.

(2) Si $\alpha < 0.0015 \text{ rad}$ ou $\alpha > \alpha_{\max}$, la LER est calculée en prenant respectivement $\alpha = 0.0015 \text{ rad}$ ou $\alpha = \alpha_{\max}$.

Tableau VII : valeur de α_{\max} en fonction de la durée d'exposition journalière t .

Durée d'exposition journalière t (s)	α_{\max} (rad)
$t < 625.10^{-6}$	0.005
$625.10^{-6} \leq t < 0,25$	$0,2 \cdot t^{0.5}$
$t \geq 0,25$	0,1

Tableau VIII : Domaine Infrarouge : Valeurs Limites d'Exposition (VLE) selon la directive 2006/25/CE [12], le décret 2010-750 [13] et Limites d'Exposition Recommandées (LER) selon l'ICNIRP [3]

Partie du corps	Risque	Domaine spectral Ultraviolet	VLE selon directive 2006/25/CE [12], décret 2010-750 [13] et LER selon l'ICNIRP [3]
Œil : Cornée, cristallin	Brûlure cornéenne, cataracte	780 – 3000 nm	Pour $t \leq 1000 \text{ s}$ $E_{IR}^{VLE} = 1,8.10^4 \cdot t^{-0.75} \text{ W.m}^{-2}$
			Pour $t > 1000 \text{ s}$ $E_{IR}^{VLE} = 100 \text{ W.m}^{-2}$
Peau :	Brûlure	380 – 3000 nm	Pour $t < 10 \text{ s}$ $H_{Peau}^{VLE} = 2.10^4 \cdot t^{0.25} \text{ J.m}^{-2}$

5. Méthodes et moyens de mesure

Deux méthodes (Cf. Figure 3) sont possibles pour déterminer les grandeurs décrites au tableau I :

- mesurer directement les grandeurs requises (E_{eff} , E_{UVA} ...) à l'aide d'un radiomètre,
- mesurer les grandeurs énergétiques spectrales E_λ , L_λ à l'aide d'un spectroradiomètre et calculer ensuite les grandeurs nécessaires.

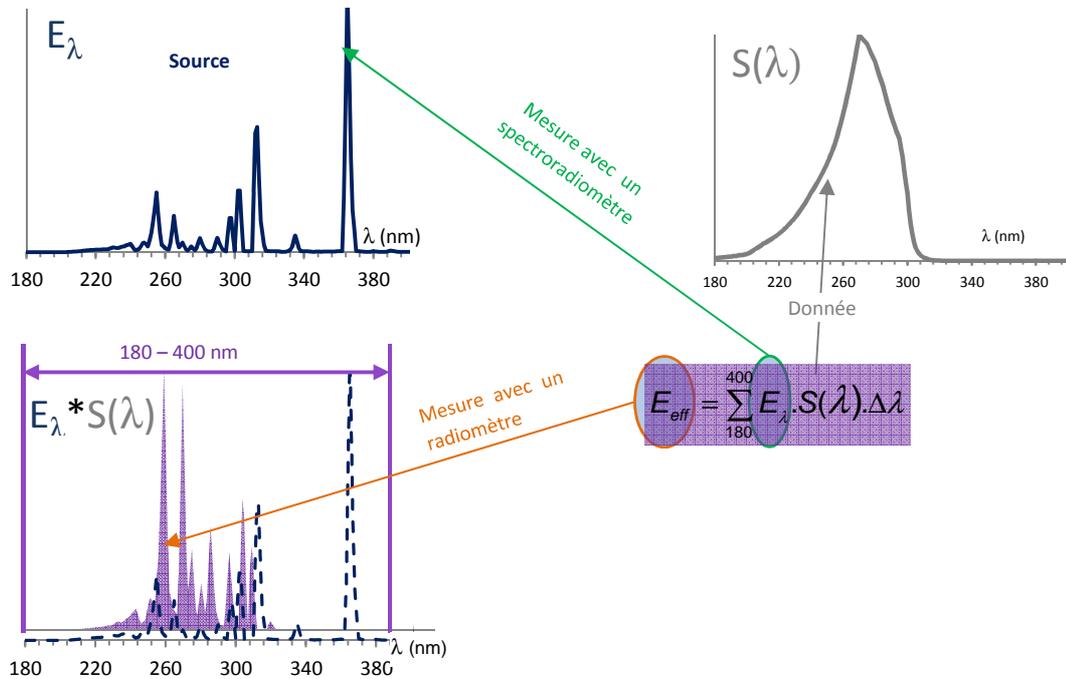


Figure 3 : Illustration des méthodes de mesures des ROA – Exemple de détermination de la grandeur E_{eff} .

5.1. Les appareils de mesures

5.1.1. Les radiomètres

Un radiomètre permet d'afficher directement la grandeur à déterminer sur le domaine spectral concerné. La sonde radiométrique se compose :

- d'un détecteur dont l'étendue de la sensibilité spectrale est supérieure ou égale au domaine spectral concerné,
- de filtres passe bandes permettant de délimiter le domaine spectral, par exemple entre 315 et 400 nm pour la détermination de E_{UVA} , ou
- pour les grandeurs efficaces, d'un filtre dont la réponse spectrale correspond à la courbe d'efficacité spectrale du rayonnement concerné, soit $S(\lambda)$ pour déterminer E_{eff} , $B(\lambda)$ pour L_B et E_B et $R(\lambda)$ pour L_R .

La détermination des sept grandeurs radiométriques décrites au tableau I implique donc l'utilisation de sept configurations de détecteurs. Certains radiomètres sont constitués de sondes modulaires : les différents éléments optiques sont alors montés à la demande. D'autres sont équipés de systèmes intégrés : chaque sonde correspond à une grandeur à déterminer.

Les radiomètres présentent l'avantage de fournir une réponse directe et instantanée. En revanche, l'utilisation de filtres optiques pour prendre en compte les courbes d'efficacité spectrale $S(\lambda)$, $B(\lambda)$ et $R(\lambda)$ ou pour délimiter les domaines spectraux comme par exemple dans le domaine UVA (entre 315 et 400 nm):

- peut être source d'erreur si la réponse des filtres ne correspond pas exactement aux courbes d'efficacité spectrale $S(\lambda)$, $B(\lambda)$ et $R(\lambda)$ ou si les longueurs d'onde de coupures des filtres ne coïncident pas avec les longueurs d'onde délimitant un domaine spectral (Voir détail en [annexe 2](#)).
- rendent les mesures dépendantes du mode de calcul des grandeurs à comparer aux VLE. En cas de modification de ces grandeurs (par exemple les courbes d'efficacité, les bornes d'intégration...), les mesures de sources réalisées antérieurement aux modifications, ainsi que le matériel deviennent obsolètes.

Par ailleurs un radiomètre nécessite que la source à mesurer ait une répartition spectrale proche de la source utilisée pour son étalonnage. Cette condition est quasiment toujours satisfaite pour les mesures sur le domaine infrarouge. En effet, sur ce domaine les sources étalon sont généralement des lampes de type tungstène halogène dont le spectre continu est proche de celui des sources infrarouges rencontrées dans l'industrie, puisqu'il s'agit dans les 2 cas de corps portés à haute température. En revanche, sur le domaine ultraviolet, bon nombre de sources émettent sur un spectre étroit, voire de quelques raies, donc très éloigné du spectre large d'une lampe étalon, qui, elle, est au deutérium. Ce fait peut conduire à une sous-estimation du risque.

Important

Pour la mesure de L_R s'assurer auprès du fabricant du radiomètre que le filtre $R(\lambda)$ monté sur le radiomètre a une courbe de réponse adaptée à la référence (réglementation ou ICNIRP) sur laquelle est basée l'évaluation des risques. Pour rappel, la courbe $R(\lambda)$ définie dans la réglementation est différente de celle définie par l'ICNIRP ^[3] (Cf. Figure 1).

5.1.2. Les spectroradiomètres

Un spectroradiomètre permet de mesurer la répartition spectrale d'une source en éclairage énergétique E_λ ou en luminance énergétique L_λ . L'élément de base est donc l'élément dispersif ; le plus courant est un réseau de diffraction, dont la fonction est de séparer le rayonnement émis par la source selon les différentes longueurs d'onde. A l'aide de détecteurs spécifiques, le rayonnement émis sur chacune des longueurs d'onde est mesuré, soit successivement, cas des spectroradiomètres à balayage (Cf. Figure 4) soit simultanément, cas des spectroradiomètres à barrettes de détecteurs comme les CCD¹ (Cf. Figure 5).

5.1.2.1. Spectroradiomètre à balayage et double monochromateurs

A ce jour, le spectroradiomètre à balayage et double monochromateur est l'appareil de référence en matière de mesures spectrales des rayonnements optiques. Il est constitué de :

- fentes d'entrée, intermédiaires et de sortie qui conditionnent la largeur minimale de la bande spectrale analysée à chaque mesure,
- deux éléments dispersifs (réseaux de diffraction) montés en cascade. Le recours à un second élément dispersif a pour objectif de limiter les erreurs dues à la lumière parasite (stray-light),
- d'une roue équipée de filtres permettant de rejeter les ordres de diffractions non désirés,
- 2 ou 3 détecteurs de sensibilités spécifiques à un domaine spectral.

Son coût élevé, son encombrement, sa fragilité ainsi que le temps nécessaire pour réaliser des mesures (analyse successive de chacune des longueurs d'onde), en font un appareil réservé aux mesures en laboratoire. Toutefois, lorsque la source à analyser est transportable et a une émission stable dans le

¹ Charge coupled device

temps, la détermination de la répartition spectrale en laboratoire à l'aide de cet instrument est tout-à-fait envisageable et même recommandée. En effet, comparativement à une mesure in-situ, la mesure en laboratoire est plus fiable du fait des performances de l'appareil et d'une meilleure maîtrise de l'environnement.

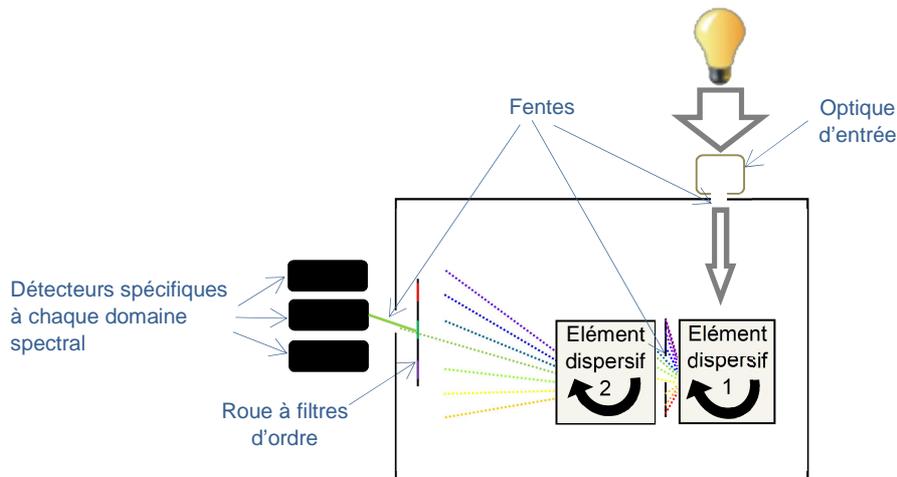


Figure 4 : Schéma d'un spectroradiomètre à balayage et à double monochromateur.

5.1.2.2. Spectroradiomètre ou spectromètre à barrette de détecteurs

Contrairement aux spectroradiomètres à balayage, la mesure avec un spectroradiomètre à barrettes de détecteurs est instantanée car chaque détecteur ou pixel est dédié à une longueur d'onde : voir sa représentation schématisée à la figure 5. Les éléments constitutifs notés sur le schéma, tels qu'élément dispersif, fentes et filtres d'ordre, ont les mêmes fonctions que sur un spectroradiomètre à balayage.

Mesure des rayonnements ultraviolet et visible

Dans le domaine ultraviolet, visible (200 - 1000 nm), les détecteurs utilisés sont du type CCD. Les spectromètres CCD sont utilisés dans des applications diverses (chimie, radiométrie...). Lorsqu'ils sont dédiés spécifiquement à la radiométrie, ils sont alors nommés spectroradiomètres et sont le plus souvent vendus par des fournisseurs spécialisés en radiométrie.

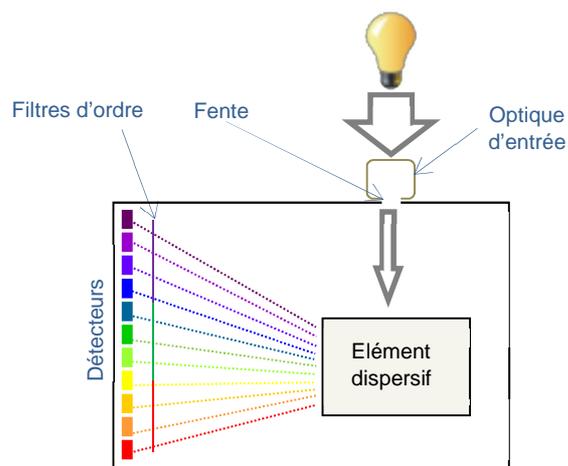


Figure 5 : Schéma d'un spectroradiomètre à barrette de détecteurs

La gamme des spectromètres est très étendue et il est souvent difficile de faire un choix. Parmi les caractéristiques proposées dans la gamme des spectromètres les plus courants et non dédiés

spécifiquement à la radiométrie, les critères minimaux suivants sont à retenir pour effectuer des mesures correctes dans le cadre d'une évaluation des risques in-situ:

- Les détecteurs doivent avoir une bonne sensibilité notamment dans l'ultraviolet. A ce jour, les détecteurs CCD rétro-éclairés (*back-thinned* ou *back-illuminated*) satisfont le mieux à cette condition.
- Présence de filtres d'ordre. Tous n'en sont pas pourvus.
- Le couple « largeur de fente-caractéristiques (nombre de traits /mm) du réseau de diffraction », doit permettre d'obtenir une résolution (FWHM²) inférieure ou égale à 5 nm sur les domaines UV – Visible, puisque les spectres sont destinés à être multipliés par des courbes de pondération comportant un pic.

Malgré leurs nombreux avantages, le défaut le plus important de ces appareils est le niveau de lumière parasite (*stray light*). Il est observé lorsque les sources mesurées ont un niveau d'émission faible (ou inexistant) dans l'ultraviolet, comparativement au niveau d'émission dans le visible (LED, lampes tungstènes halogènes et plus globalement tous les corps portés à haute température). Des erreurs de l'ordre de 5000% dans la détermination de E_{eff} peuvent être trouvées lors de mesures sur une LED par exemple (Cf. [Figure A2-3 en annexe 2](#)). Dans une situation d'évaluation des risques in-situ, une mesure de ce type avec un spectroradiomètre CCD non corrigé conduirait à préconiser une protection contre les ultraviolets même si la source a une émission négligeable sur ce domaine spectral.

Une méthode de correction de la lumière parasite développée au NIST^{3 [22]} a été reprise et simplifiée par l'INRS^[16]. Elle est décrite brièvement dans [l'annexe 2](#), qui détaille également un exemple de correction sur la mesure de la LED citée précédemment.

Le niveau de lumière parasite est moins élevé sur les spectroradiomètres CCD haut de gamme. Par ailleurs, certains constructeurs commencent à commercialiser des spectromètres intégrant des dispositifs optiques ou numériques de réduction de la lumière parasite.

Important

Le niveau de lumière parasite (*stray light*) est un critère important à prendre en compte dans l'achat d'un spectromètre CCD. Pour le quantifier lors de la démonstration de l'appareil par le fournisseur, faire une mesure sur une lampe tungstène halogène ou une LED dont on connaît le spectre. Ensuite, comparer les valeurs de E_{eff} déterminées à partir des mesures avec le spectromètre et celle calculées à partir du spectre de référence de la lampe. Cette lumière parasite est souvent observable dans la représentation spectrale de l'éclairage énergétique. Elle prend généralement la forme d'un remontée de signal dans les longueurs d'ondes les plus courtes.

Si une lampe tungstène est utilisée pour l'étalonnage du spectromètre dans l'UVA, une correction de la lumière parasite doit également être appliquée sur les mesures avec la lampe étalon.

Mesure des rayonnements infrarouges

Les spectromètres infrarouge fonctionnent sur le même principe que ceux utilisés dans les domaines ultraviolet et visible. Sur ces appareils, les détecteurs du type InGaAs ont une sensibilité qui couvre le domaine 1000-2500 nm. Ces derniers nécessitent généralement un système de refroidissement. Les résultats d'une évaluation en laboratoire d'un appareil de ce type sont donnés en [annexe 2](#).

² Full Width at Half Maximum

³ National Institute of Standards and Technology (USA)

5.1.3. Avantages et inconvénients de chaque appareil

Les tableaux IX, X et XI résument les avantages et inconvénients de chacune des méthodes de mesure.

Tableau IX : Avantages et inconvénients du mesurage à l'aide d'un radiomètre

Radiomètre	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Lecture directe de la grandeur à comparer aux VLE. • Mesurage instantané. • Possibilité de mesurer la valeur moyenne d'une grandeur lorsque l'émission d'une source est variable au cours du temps. • Simplicité d'utilisation. • Faible encombrement du matériel. • Robustesse (pas de pièces en mouvement). • Coût abordable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erreurs possibles si la réponse des filtres ne correspond pas exactement aux courbes d'efficacité spectrale $S(\lambda)$, $B(\lambda)$ et $R(\lambda)$ ou si les filtres passe-bande délimitant les domaines spectraux ne coïncident pas exactement avec les bornes du domaine. • Erreurs possibles si la source à mesurer a un spectre éloigné de la source utilisée pour l'étalonnage du radiomètre. • Nécessite autant de configurations du matériel que de grandeurs à déterminer. • Les mesures sont dépendantes du mode de calcul des grandeurs à comparer aux VLE : <ul style="list-style-type: none"> → Elles sont liées à un référentiel (Réglementation, ICNIRP...), → Les mesures et le matériel deviennent obsolètes si ces grandeurs changent.

Tableau X : Avantages et inconvénients du mesurage à l'aide d'un spectroradiomètre à balayage.

Spectroradiomètre à balayage	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Détermination exacte des grandeurs pondérées et non pondérées. • Pas d'erreur (ou erreur négligeable) dû à la lumière parasite (stray light) • Les mesures sont indépendantes du mode de calcul des grandeurs à comparer aux VLE : <ul style="list-style-type: none"> → Elles ne sont pas liées à un référentiel (Réglementation, ICNIRP...), → Les mesures et le matériel restent valides si ces grandeurs changent. • Permet d'évaluer avec précision l'efficacité d'un équipement de protection (à partir du spectre de la source et du facteur spectral de transmission du protecteur). 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de lecture directe, nécessite un calcul des grandeurs à comparer aux VLE. • Durée de la mesure allongée par le balayage séquentiel des longueurs d'onde. • Nécessite que l'émission de la source soit stable. • Encombrement, portabilité restreinte. • Coût très élevé. • Fragilité (nombreuses pièces en mouvement).

Tableau XI : Avantages et inconvénients du mesurage à l'aide d'un spectroradiomètre à barrettes de détecteurs.

Spectroradiomètre à barrettes détecteurs	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Détermination exacte des grandeurs pondérées et non pondérées. • Les mesures sont indépendantes du mode de calcul des grandeurs à comparer aux VLE : <ul style="list-style-type: none"> → Elles ne sont pas liées à un référentiel (Réglementation, ICNIRP...), → Les mesures et le matériel restent valides si ces grandeurs changent. • Permet d'évaluer avec précision l'efficacité d'un équipement de protection (à partir du spectre de la source et du facteur spectral de transmission du protecteur). • Mesurage instantané. • Possibilité de mesurer le spectre moyen d'une source dont l'émission est variable au cours du temps. • Faible encombrement du matériel. • Robustesse (pas de pièces en mouvement). 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de lecture directe, nécessite un calcul des grandeurs à comparer aux VLE. • Erreurs importantes possibles si l'appareil n'est pas corrigé contre la lumière parasite (stray light).

5.2. Optique d'entrée

5.2.1. Eclairage énergétique

Pour mesurer les grandeurs exprimées en éclairage énergétique, l'optique d'entrée des appareils utilisables in-situ se limite souvent à un diffuseur permettant de prendre en compte les rayonnements provenant de toutes les directions de l'espace. Il est souvent nommé « correcteur d'incidence » ou « correcteur de cosinus » (Cf. figure 6a) du fait que l'éclairage reçu par une surface varie comme le cosinus de l'angle d'incidence. Selon les domaines spectraux, certains référentiels imposent de limiter l'angle d'admission γ au niveau de l'optique d'entrée. La solution idéale pour limiter l'angle d'admission consiste à disposer un diaphragme au niveau de la source. Cependant cette opération est difficilement applicable lors de mesures au poste de travail. Une autre solution consiste par exemple à disposer le correcteur de cosinus dans un tube cylindrique, à condition que le diamètre du tube soit très supérieur au diamètre du diffuseur. Il s'agit de limiter les différences d'exposition entre le centre et la périphérie du détecteur^[25]. Le diamètre du tube et la distance séparant le correcteur de cosinus de l'entrée du tube détermineront alors l'angle d'admission (Cf. figure 6b).

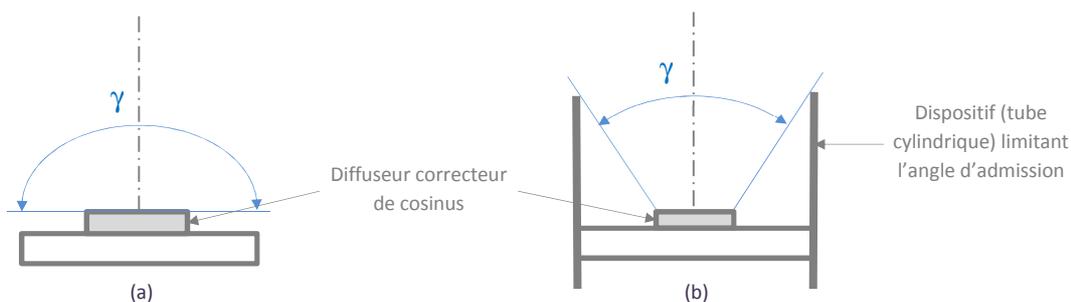


Figure 6 : Optique d'entrée pour la mesure de l'éclairage énergétique : correcteur de cosinus seul (a) et correcteur de cosinus avec limitation de l'angle d'admission (b).

Important

S'assurer que le matériau composant le diffuseur a un domaine spectral de transmission compatible avec le domaine spectral à mesurer.

5.2.2. Luminance énergétique

Pour les mesures en luminance énergétique, l'optique d'entrée est constituée d'un système optique permettant de délimiter la surface de la source sur laquelle la luminance énergétique sera moyennée comme décrit à la figure 7. L'angle sous lequel est vue cette surface est le champ de vision ou angle d'admission γ . Un dispositif à visée *reflex* complète généralement le système optique pour visualiser les contours de la surface de la source visée.

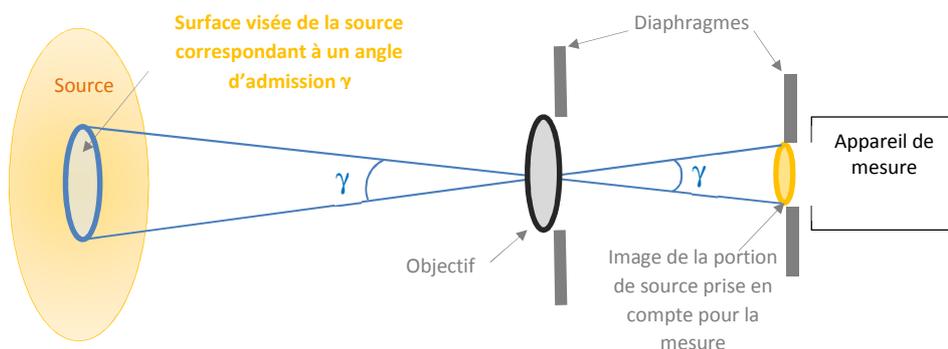


Figure 7 : Schéma de principe de l'optique d'entrée utilisée pour la mesure de la luminance énergétique.

5.2.3. Fibre optique

L'optique d'entrée est montée soit directement sur l'appareil de mesure, soit reliée à celui-ci au moyen d'une fibre optique. Cette dernière solution présente un avantage lorsque le rayonnement, notamment thermique, émis par la source est susceptible d'endommager l'appareil de mesure.

Important

- S'assurer que le domaine spectral de transmission de la fibre optique est bien compatible avec le domaine spectral à mesurer.
- Dans le domaine ultraviolet, utiliser de préférence des fibres traitées contre la solarisation.
- Attention : une fibre optique présente l'avantage d'être souple mais avec un rayon de courbure limité. Enrouler la fibre avec un rayon de courbure trop faible, comme un cordon électrique, risque fortement de l'endommager, avec des conséquences sur la mesure et sur l'étalonnage.
- L'étalonnage de l'appareil doit être réalisé avec la fibre optique montée sur l'appareil. Une fois l'étalonnage terminé, la fibre ne devrait normalement plus être déconnectée de l'appareil.

5.3. Méthode alternative pour déterminer les grandeurs exprimées en luminance énergétique à partir des grandeurs en éclairement énergétique

Du fait de l'expression des grandeurs soit en éclairement énergétique, soit en luminance énergétique (Cf. tableau I), il est nécessaire de disposer d'appareils équipés des 2 types d'optiques d'entrée et étalonnés

selon les 2 grandeurs. Cependant, lorsque les mesures sont effectuées à l'aide d'un spectroradiomètre, les grandeurs en luminance énergétique L_B et L_R peuvent être déduites de l'éclairement énergétique spectrique mesuré E_λ et d'une mesure de la luminance lumineuse L_V (le calcul est détaillé en [annexe 3](#)) :

$$L_B = \frac{L_V}{683 \cdot \sum_{380}^{780} E_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \cdot \sum_{300}^{700} E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad L_R = \frac{L_V}{683 \cdot \sum_{380}^{780} E_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \cdot \sum_{380}^{1400} E_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

Avec $V(\lambda)$: Fonction d'efficacité lumineuse spectrale relative pour la vision de jour définie par la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage)^[26].

En effet, les appareils de mesure des grandeurs lumineuses sont d'un usage plus courant. Les laboratoires ou organismes réalisant des mesures d'éclairage disposent soit de luminancemètres avec viseur *reflex* comme décrit à la figure 7, soit de systèmes d'imagerie numérique, vidéophotomètre ou appareil photo, étalonnés en luminance lumineuse (Cf. figure 8).

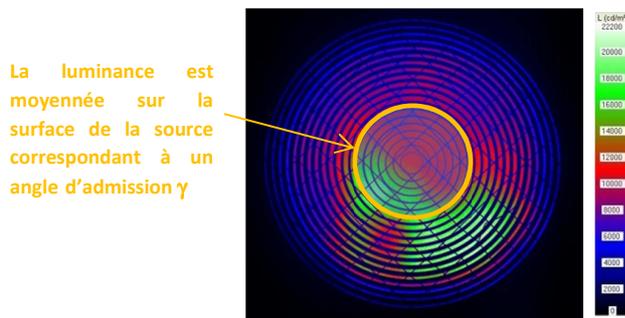


Figure 8 : Exemple de cartographie délivrée par un dispositif de mesure de luminance par imagerie numérique.

6. Analyse des situations d'exposition

Une analyse détaillée des tâches doit être effectuée pour déterminer l'exposition des salariés aux rayonnements optiques. Toutes les activités au cours desquelles les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à ces rayonnements doivent être considérées, même quand ces activités ne sont pas l'activité principale des salariés. Il s'agit aussi de bien identifier les zones exposées ainsi que l'origine du rayonnement reçu (Cf. exemple figure 9).

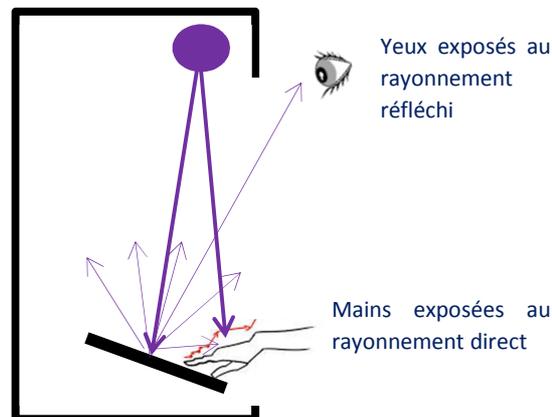


Figure 9 : Identification des zones exposées.

Les normes NF EN 14255 -1 et 2 proposent des exemples de tableaux d'analyse des tâches, qui regroupent à la fois les caractéristiques des sources, les conditions d'exposition, les données médicales des salariés... Ils constituent une bonne base pour établir une analyse des situations d'expositions mais nécessitent cependant d'être clarifiés et complétés notamment en ce qui concerne la géométrie de l'exposition. Une analyse des situations d'exposition basée sur les éléments suivants est proposée :

- Un schéma d'implantation des sources de rayonnement optique et des emplacements des salariés travaillant à un poste fixe
- Une fiche technique des sources
- Une fiche d'exposition pour chaque emplacement de travail et le cas échéant pour les travailleurs susceptibles d'être exposés lors de la réalisation de tâches annexes dans l'environnement des sources. Si les mesurages sont réalisés dans les conditions géométriques de l'exposition (en disposant les détecteurs en lieu et place des zones exposées), une seule fiche «exposition et mesurage» peut par exemple regrouper l'ensemble des données.

Les fiches décrites ci-après peuvent sembler très détaillées au regard des informations nécessaires à l'évaluation des risques à partir d'un mesurage au poste de travail. Mais, un poste de travail est susceptible d'évoluer au fil du temps : remplacement d'une lampe par un modèle approchant mais avec des caractéristiques optiques différentes, réaménagement d'un poste de travail, changement de processus... **Il est alors très important de connaître les conditions exactes d'exposition au moment du mesurage.**

6.1. Implantation des sources et des travailleurs

Un exemple de schéma d'implantation des sources repérées $S1$, $S2$... et des salariés repérés $P1$, $P2$... est donné à la figure 10. Le schéma d'implantation peut servir de base à l'élaboration des fiches d'exposition en faisant apparaître par exemple, qu'à l'emplacement $P1$, la personne est effectivement exposée à la source $S1$ présente à son poste de travail, mais aussi au rayonnement émis par la source $S2$ du poste voisin. Il est également important d'indiquer la nature des cloisons. Dans le cas de cloisons totalement opaques, les travailleurs ne sont exposés qu'aux sources présentes à leur poste. Dans le cas de rideaux translucides, il faudra tenir compte de leur efficacité.

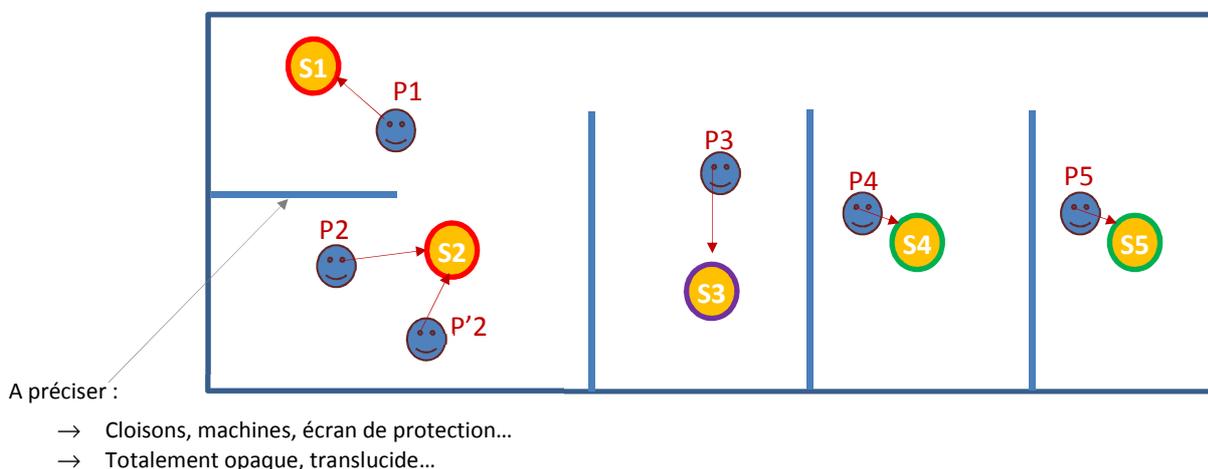


Figure 10 : Exemple de schéma d'implantation des sources et des personnes

6.2. Fiche technique des sources

La fiche technique regroupe tous les éléments qui permettront à la source d'être identifiée facilement, a posteriori, tant par la personne ayant effectué les mesurages que par l'entreprise. Elle doit également comporter toutes les caractéristiques techniques de la source, les paramètres utilisés pour son fonctionnement et tout autre élément spécifique à un type de source. Un exemple de fiche technique est donné au tableau XII.

Tableau XII : Exemple de fiche technique permettant de décrire chaque source.

Repère sur le schéma	S1
Nom ou référence donné par l'entreprise	T5 XX48 -16
Type de source	Appareillage équipés de lampes, four de fusion, arc de soudage, processus spécifique...
Description sommaire du processus	Polymérisation de vernis, détection de défauts, réchauffage de pièces métalliques, fabrication de fibres de verre ...
Paramètres	Équipement intégrant des lampes : nombre de lampes, type, référence commerciale, puissance... Soudage : type MIG, MAG, TIG... matériaux d'apport : électrode, fil, référence commerciale, intensité, tension, gaz de protection, matériau soudé... Four : type : fonte, réchauffage..., Nature du mode chauffage : électrique, gaz..., matériaux fondu ou entreposé : acier, aluminium, verre...
Géométrie de la source	Rectangulaire : Longueur, largeur Circulaire : rayon Elliptique : grand rayon, petit rayon Triangulaire : côtés, angles Complexe : décomposer en formes simples et donner les dimensions de chaque forme simple
Présence d'un dispositif de protection collective	Vitrage transparent, rideau de soudage orange ^[27]

6.3. Fiche d'exposition

Un exemple de fiche d'exposition, qui résume toutes les données importantes à relever au poste de travail, est donné au tableau XIII. Cette fiche concerne une personne exposée à une ou plusieurs sources, soit simultanément, soit successivement. Les paramètres entrés dans la colonne « géométrie d'exposition » doivent être suffisants pour repérer, d'une part la position de la zone exposée par rapport au centre de la source (d_e, h, e), d'autre part son inclinaison par rapport à l'axe de la source (X_v, Y_v), tels qu'ils sont décrits à la figure 11. Ces paramètres pourraient aussi être remplacés par les angles correspondants.

Dans le cas d'exposition indirecte, la source (secondaire) à considérer est l'objet (ouverture d'une cabine, l'entrée ou sortie de tunnel d'exposition...) qui réfléchit le rayonnement émis par la source primaire. Si la source secondaire a des contours bien définis, les paramètres, similaires à ceux décrits précédemment, seront repérés par rapport à la source secondaire. Sinon, les différentes distances ou orientations pourront être relevées par rapport à d'autres repères facilement identifiables.

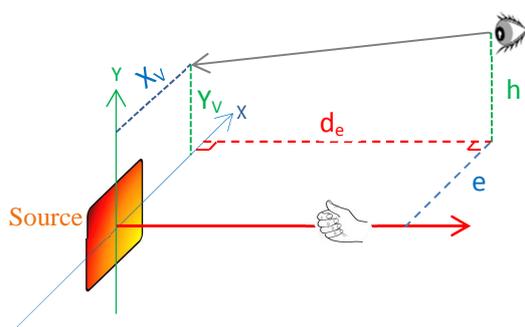


Figure 11 : Paramètres permettant de décrire la géométrie d'exposition, c'est-à-dire la position de la zone exposée par rapport au centre de la source (d_e, h, e) et son inclinaison par rapport à l'axe de la source (X_v, Y_v).

Tableau XIII : Exemple de fiche d'exposition.

Repère sur le schéma			P1		
Mode opératoire de l'activité			Chargement de pièces dans le four, maintenance du four, passage d'articles de maroquinerie sous la lampe UV pour détection de défauts...		
Sources	Zones exposées	Rayonnement	Equipement de protection	Durée d'exposition journalière	Géométrie d'exposition : Cf. figure 11
S1	yeux	direct	Lunettes : référence, classe de protection ^{[28]-[31]}	3 heures	$d_e=3m ; h=0,80m ; e=1m ; X_v=0,70m ; Y_v=0,60m$
	mains	direct	Gants : matière	3 heures	$d_e=2,5m ; h=0,20m ; e=0 ; X_v=0 ; Y_v=0$
S2	cou	indirect



7. Mesurage

7.1. Géométrie du mesurage

L'analyse des situations d'exposition a permis d'identifier toutes les zones du corps (yeux, mains, autre partie du corps...) exposées et de relever leur géométrie par rapport à la ou les sources de rayonnement optique. Le mesurage sera réalisé selon la géométrie d'exposition définie dans la fiche correspondante (Cf. tableau XIII), c'est-à-dire en disposant les optiques d'entrées des détecteurs en lieu et place des zones exposées (Cf. figure 11). Cependant, il peut être nécessaire de réaliser le mesurage dans une autre configuration pour les raisons suivantes : saturation du détecteur, signal insuffisant ou pouvant être amélioré (Cf. §7.5.), nécessité d'éloigner le détecteur (chaleur, projections... à proximité de la source), volonté d'isoler la source ou d'effectuer un relevé dans la direction d'émission maximale de la source. Dans ce cas, il sera nécessaire de relever les paramètres de mesurage tels que décrit à la figure 12. Les niveaux d'exposition seront alors recalculés en tenant compte à la fois des paramètres de mesurage, des paramètres d'expositions et des caractéristiques géométriques de la source (Cf. § 8.2.2.).

Un exemple de fiche de mesurage est donné au tableau XIV.

Important

Le mesurage dans une configuration autre que la configuration d'exposition n'est possible que dans le cas de **rayonnement direct** de la source, pour lequel les caractéristiques géométriques de la source sont bien définies et à condition de connaître ou de mesurer la répartition spatiale du rayonnement émis par la source.

Tableau XIV : Exemple de fiche de mesurage

Repère sur le schéma			P1		
Sources	Zone exposée	Rayonnement	Géométrie de mesurage	Grandeur mesurée	Appareil de mesure utilisé
S1	yeux	direct	$d_M=3m ; h_M=0,80m ;$ $e_M=1m ;$ $X_M=0 ; Y_M=0$	E_λ Entre 200 et 1000 nm $\gamma=80^\circ$ (cf. §7.2.)	Spectroradiomètre (Marque, référence)
	mains	direct	$d_M=2,5m ;$ $h_M=0,20m ; e_M=0 ;$ $X_M=0 ; Y_M=0$	E_{IR}	Marque, référence...
S2	cou	Indirect	Obligatoirement les mêmes paramètres pour le mesurage et l'exposition $\gamma=180^\circ$

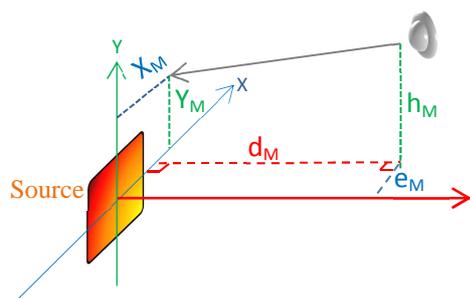


Figure 12: Paramètres permettant de décrire la géométrie de mesure

7.2. Angle d'admission des appareils

Il existe des contraintes sur les angles d'admission des appareils (Cf. § 5.2.1 et 5.2.2.), selon les domaines spectraux analysés et les grandeurs mesurées.

La **peau** étant une surface plane, tout le rayonnement susceptible de l'atteindre est mesuré avec un détecteur ayant une **réponse en cosinus**, soit un angle d'admission de **180°** [4].

Pour toutes les mesures en **éclairage énergétique qui concernent l'œil** (segment antérieur) seuls les rayonnements compris dans un **angle de 80°** sont collectés [3],[4]. Les rayonnements en dehors de cet angle ne nécessitent pas d'être comptabilisés puisqu'ils sont stoppés par les paupières.

Pour les **risques photochimiques rétinien**s (risque lumière bleue), la **luminance énergétique** est moyennée sur un **angle d'admission γ** , lequel varie selon la durée d'exposition (Cf. tableau XV) afin de tenir compte des mouvements des yeux lors de la réalisation d'une tâche. Ainsi, comme le montre la figure 13a, l'angle d'admission γ peut être plus petit que l'angle α sous tendu par la source. Dans ce cas, si la luminance de la source est uniforme, la valeur enregistrée sera égale à la luminance propre de la source. En revanche dans le second cas (Cf. figure 13b), où l'angle d'admission γ est supérieur à l'angle sous tendu α par la source, la luminance mesurée sera plus faible que la luminance propre de la source, puisque moyennée sur une surface plus importante.

Pour le **risque thermique de la rétine**, la **luminance énergétique** est moyennée en respectant un **angle d'admission γ** notée au tableau XVI, si la source n'est pas spatialement régulière et comporte des pics de luminance dans une direction (hot-spots). Si l'angle α sous tendu par la source, utilisé dans la détermination de la VLE, est plus petit que l'angle d'admission γ (utilisé pour la mesure) et que la luminance est moyennée sur cet angle d'admission γ , alors l'angle α utilisé pour déterminer la VLE (Cf. tableaux V et VI) ne peut pas être inférieur à l'angle d'admission γ .

Tableau XV : Spécification des angles d'admission pour les mesures réalisées dans le domaine visible.

Domaine spectral	Grandeurs à mesurer	Angle d'admission γ Selon ICNIRP [3]	Diamètre de la zone visée à une distance de 1 m (exemple)
300 – 700 nm	L_B	0,011 rad (0,63°) pour $t < 100$ s	11 mm
		0,0011.t ^{0.5} rad pour $100 \leq t \leq 10\ 000$ s	-
		0,110 rad (6,3°) pour $t > 10\ 000$ s	11 cm

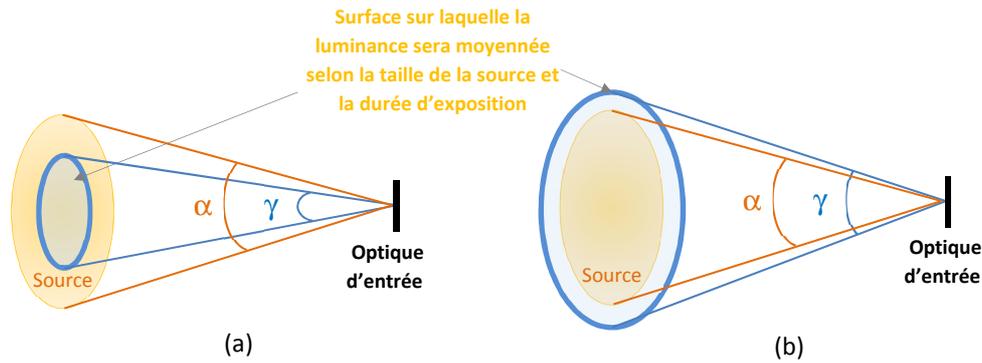


Figure 13 : Représentation des relations possibles entre la taille de la source vue sous un angle α et l'angle d'admission γ à prendre en compte selon la durée d'exposition.

Tableau XVI : Spécification des angles d'admission pour les mesures réalisées dans le domaine visible + infrarouge

Domaine spectral	Grandeurs à mesurer	Angle d'admission γ Selon ICNIRP ^[3]		Diamètre de la zone visée à une distance de 1 m (exemple)
380 – 1400 nm	L_R	0,005 rad (0,29°)	Source pulsée	5 mm
		0,011 rad (0,63°)	Source continue ($t \geq 0,25s$)	11 mm

Note : La réglementation ainsi que les normes NF EN 14255-1^[17], NF EN 14255-2^[18], auxquelles elle fait référence, ne fixent pas de valeurs pour les angles d'admission γ ; les normes renvoient aux exigences spécifiées par les VLE utilisées. La norme NF EN 14255-2^[18] spécifie que les valeurs de γ données dans son tableau E1, le sont à titre d'exemple et proviennent des anciennes (1993) LER de l'ICNIRP. C'est pourquoi elles ne sont pas reprises dans le présent document, même si la réglementation est basée sur ces anciennes LER. Les angles d'admission γ préconisés dans le présent document sont donc issus des dernières recommandations de l'ICNIRP^{[2]-[4]}, basées sur des travaux scientifiques plus récents.

7.3. Durée du mesurage

Si la source émet de manière continue et stable, la durée du mesurage doit être suffisamment longue pour permettre un mesurage exact. La durée dépend donc du type d'appareil utilisé et du niveau de rayonnement de la source dans le domaine spectral considéré. Si l'émission est variable dans le temps, la durée sera choisie de manière à obtenir un résultat moyen représentatif.

Dans le cas des sources pulsées (durée d'impulsion ou du groupe d'impulsions $< 0,25s$) le mesurage doit être effectué sur la durée d'une impulsion. La durée d'impulsion correspond à la largeur à mi-hauteur du pic d'émission.

7.4. Signal d'obscurité

Tous les appareils de mesure délivrent un signal résiduel plus ou moins important même en l'absence d'émission de rayonnement. Ainsi, ce signal mesuré dans l'obscurité (*Dark Current*) Sig_{DC} doit être déduit du signal mesuré Sig_{mes} en présence de rayonnement, pour obtenir le signal vrai Sig . Sur les appareils élaborés disposant d'un shutter automatique, cette opération est effectuée automatiquement. Elle est donc transparente pour l'utilisateur et la valeur fournie par l'appareil est le signal vrai Sig .

Si ce n'est pas le cas, cette opération doit être effectuée manuellement en obturant le détecteur lors de la mesure du signal d'obscurité Sig_{DC} .

Les radiomètres : La plupart d'entre eux permettent de mémoriser la valeur du signal d'obscurité Sig_{DC} qui sera alors soustraite directement à celle du signal mesuré Sig_{mes} en présence de rayonnement. La valeur qui sera affichée correspondra donc au signal vrai. Sinon, lors de chaque mesure, le signal d'obscurité Sig_{DC} devra être déduit manuellement du signal mesuré Sig_{mes} . La mesure du signal d'obscurité doit être effectuée avant la première mesure et être répétée à intervalle régulier au cours de la journée.

Les spectromètres CCD : La valeur du signal d'obscurité est liée d'une part à chaque détecteur ou pixel (donc fonction de la longueur d'onde) d'autre part au temps d'intégration choisi. La plupart des spectromètres proposent de mémoriser le signal d'obscurité $Sig_{DC}(\lambda)$ et de le déduire directement du signal mesuré $Sig_{mes}(\lambda)$. Si le signal fourni est exprimé directement en grandeurs radiométriques E_λ ou L_λ l'utilisateur ne pourra qu'opter pour cette solution. En revanche, s'il s'agit du signal brut exprimé en counts, il est préférable de ne pas choisir cette solution. En effet, la réponse des détecteurs en fonction du temps d'intégration n'est pas forcément linéaire. Le choix du temps d'intégration étant conditionné par le niveau du signal mesuré $Sig_{mes}(\lambda)$ en présence de rayonnement (Cf. §7.5.), la mesure du signal d'obscurité $Sig_{DC}(\lambda)$ devra donc être réalisée une fois le temps d'intégration connu, c'est-à-dire à la suite de chaque mesure. La déduction s'effectuera donc manuellement sur le signal brut.

7.5. Ajustement du temps d'intégration des spectromètres CCD

Sur les spectromètres CCD, l'amplitude du signal est ajustée en faisant varier le temps d'intégration. La plage d'ajustement du temps peut s'étendre de quelques μs à quelques minutes. Cependant, plus le temps d'intégration est élevé, plus le signal mesuré dans l'obscurité (*Dark Current*) Sig_{DC} est important. Au-delà de 5 à 10 s, on constate une réduction significative de la dynamique de mesure du signal. A l'inverse, on peut aussi observer une saturation du signal avec un temps d'intégration ajusté au seuil minimal. Dans l'une ou l'autre de ces situations il est alors préférable, si les conditions de mesure le permettent, de faire varier la distance de mesure pour avoir un meilleur compromis « amplitude du signal-temps d'intégration ».

Une technique dite de « bracketing » est également utilisable pour améliorer la précision d'acquisition du signal de faible niveau. Elle a notamment un intérêt lorsqu'il existe des différences importantes de niveau dans le spectre (spectre de raies par exemple). Elle consiste à réaliser la mesure en 2 temps :

- Mesure n°1 avec un temps d'intégration adapté à l'émission maximale du spectre,
- Mesure n°2 avec un temps d'intégration plus élevé pour améliorer le rapport « signal – bruit ». Bien entendu, durant la mesure n°2, le signal est saturé dans la région correspondant à l'émission maximale.

Le spectre final est reconstitué en remplaçant dans le spectre n°1, tous les signaux de faibles niveaux par les signaux relevés lors de la mesure n°2.

7.6. Domaine spectral à mesurer selon le type de source

L'opérateur réalisant des mesures de rayonnements optiques est souvent amené à se poser ces questions :

- Faut-il systématiquement mesurer les sources sur l'ensemble du domaine spectral 200 – 3000 nm ?
- Sinon, à quel domaine se limiter selon le type de source rencontrée ?

Compte tenu de la diversité des sources rencontrées sur les lieux de travail, il n'existe bien sûr pas de réponse universelle à ces questions, mais les pistes suivantes peuvent l'aider dans sa réflexion.

- Une analyse sur le domaine spectral 200-400 nm est suffisante pour les sources utilisées spécifiquement pour les effets du rayonnement ultraviolet : désinfection de l'air, stérilisation, détection de défauts avec sans fluorescence, polymérisation des encres ou des vernis...

- Les lampes de type tube fluorescent, lampes fluo compactes ou LED dédiées à l'éclairage général des locaux de travail ne nécessitent généralement pas de mesure sur les lieux de travail, mais si des mesures devaient être effectuées, elles pourraient se limiter au domaine 300-700 nm.
- Une analyse sur la totalité du domaine spectral est nécessaire dans les cas suivants :
 - Appareils d'éclairage spécifiques : industrie du spectacle...
 - Procédés industriels : soudage à l'arc, coupage plasma...
 - Fours ou produits en fusion : métaux et verre en fusion, fours de fusion, de réchauffage...
 - Appareils radiants utilisés pour le séchage : industrie du papier...
 - En l'absence d'informations sur la source.

8. Evaluation des risques

8.1. Comparaison aux Valeurs Limites d'Exposition (VLE) ou aux Limites d'Exposition Recommandées (LER)

La première étape consiste à calculer les VLE ou LER (Cf. § 4.2.) qui le nécessitent comme celles de L_B , E_B , L_R et E_{IR} fonction de la durée d'exposition ou d'impulsion. De plus, les VLE et LER correspondant à L_R sont aussi liées à l'angle α sous lequel la source est observée. Ce dernier est déterminé selon la formule du § 4.2. à partir des caractéristiques relevées sur la source.

En ce qui concerne les valeurs mesurées, selon l'appareil utilisé, elles nécessitent ou non un traitement préalable :

- Un radiomètre, fournit directement les grandeurs (E_{eff} , E_{UVA} , L_B , ...), données dans la colonne 2 du tableau XVII,
- Un spectroradiomètre mesure la répartition spectrale d'une source en éclairement E_λ ou en luminance L_λ énergétique. Les grandeurs (E_{eff} , E_{UVA} , L_B , ...), données dans la colonne 2 du tableau XVII, devront donc être calculées à l'aide des équations du tableau I avant être comparées aux VLE.

Ensuite, selon les domaines spectraux, les grandeurs (E_{eff} , E_{UVA} , L_B ...), sont soit comparées directement aux VLE ou LER, soit transformées en exposition (H_{eff} , H_{UVA} ...) ou en dose de luminance énergétique (D_B , D_R) à comparer aux VLE ou LER.

Tableau XVII : Grandeurs à comparer aux VLE ou LER.

Domaine spectral	Grandeurs mesurées ou calculées	Grandeurs à comparer aux VLE ou LER
180 – 400 nm	E_{eff} ($W.m^{-2}$)	$H_{eff} = \sum_0^t E_{eff} \cdot \Delta t$ ou $H_{eff} = E_{eff} \cdot t$ ($J.m^{-2}$)
315 – 400 nm	E_{UVA} ($W.m^{-2}$)	$H_{UVA} = \sum_0^t E_{UVA} \cdot \Delta t$ ou $H_{UVA} = E_{UVA} \cdot t$ ($J.m^{-2}$)
300 – 700 nm	L_B ($W.m^{-2}.sr^{-1}$)	$D_B = \sum_0^t L_B \cdot \Delta t$ ou $D_B = L_B \cdot t$ ($J.m^{-2}.sr^{-1}$) ou L_B ($W.m^{-2}.sr^{-1}$)
	E_B ($W.m^{-2}$)	$H_B = \sum_0^t E_B \cdot \Delta t$ ou $H_B = E_B \cdot t$ ($J.m^{-2}$) ou E_B ($W.m^{-2}$)
380 – 1400 nm ou 780 – 1400 nm	L_R ($W.m^{-2}.sr^{-1}$)	$D_R = \sum_0^t L_R \cdot \Delta t$ ou $D_R = L_R \cdot t$ ($J.m^{-2}.sr^{-1}$) ou L_R ($W.m^{-2}.sr^{-1}$)
780 – 3000 nm	E_{IR} ($W.m^{-2}$)	E_{IR} ($W.m^{-2}$)
380 – 3000 nm	E_{Peau} ($W.m^{-2}$)	$H_{Peau} = \sum_0^t E_{Peau} \cdot \Delta t$ ou $H_{Peau} = E_{Peau} \cdot t$ ($J.m^{-2}$)

Dans la colonne 3 du tableau XVII, les grandeurs exprimées en termes d'exposition (H) ou de doses de luminance énergétique (D) sont à utiliser comme suit :

- Si la source est stable et que l'exposition est continue, l'exposition H ou la dose de luminance énergétique D est obtenue en multipliant simplement l'éclairement ou la luminance énergétique par la durée d'exposition t . Sur le domaine 780-1400 nm, par exemple, on utilisera donc l'équation :

$$D_R = L_R \cdot t$$

- Si la source est pulsée ou que son émission n'est pas constante dans le temps ou dans le cas d'expositions intermittentes à une même source ou à différentes sources (intervention à un poste à plusieurs moments de la journée, personne occupant plusieurs postes), l'exposition H ou la dose de luminance énergétique D est obtenue par intégration de l'éclairement ou la luminance énergétique sur la durée d'exposition t . Sur le domaine 780-1400 nm, par exemple, on utilisera donc l'équation :

$$D_R = \sum_0^t L_R \cdot \Delta t$$

avec Δt : durée d'une impulsion dans le cas d'une source pulsée.

Ceci conduit simplement à moyenner l'éclairement ou la luminance énergétique sur la totalité de la durée d'exposition t .

Cependant, pour qu'une situation soit considérée sans risque^[3], il faut que H ou D correspondant à chaque impulsion soit inférieur à la VLE ou LER applicable à cette durée **et** que la somme des expositions ou des doses soit aussi inférieure à la VLE ou LER applicable à la durée t . Sur le domaine 780-1400 nm, par exemple on aura donc :

$$L_{R1} \cdot \Delta t_1 < L_R^{VLE(t1)} , L_{R2} \cdot \Delta t_2 < L_R^{VLE(t2)} , \dots \quad \text{et} \quad D_R = \sum_0^t L_R \cdot \Delta t < L_R^{VLE(t)}$$

Seuls les principes généraux applicables aux expositions répétées et sources pulsées sont repris dans ce document. Les cas particuliers, comme par exemple les sources pulsées dont la fréquence est supérieure à 5 Hz, sont décrits en détail dans les recommandations de l'ICNIRP^[3].

Dans cette même colonne 3 du tableau XVII, les grandeurs L_B , E_B et L_R mesurées ou calculées (colonne2) sont comparées directement aux VLE exprimées $W \cdot m^{-2}$ ou en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$, donc indépendantes de la durée d'exposition, lorsque la durée d'exposition a atteint la durée d'exposition maximale prise en compte par la VLE (par exemple $t > 10\,000$ s pour L_B).

8.2. Outil d'aide à l'évaluation des risques : *CatRayon*

Afin de faciliter la démarche de détermination des niveaux d'exposition et de comparaison aux VLE, l'INRS a développé le logiciel *CatRayon*^[11]. A partir de configurations de travail définies par l'utilisateur, il permet d'évaluer les risques présentés par une ou plusieurs sources émettant des rayonnements optiques. Il comprend notamment une base de données d'environ 400 sources dont les caractéristiques spectrales ont été mesurées en laboratoire ou sur site, de manière à ce qu'un utilisateur puisse procéder à une évaluation des risques sans recourir à la mesure. Mais un module de saisie indépendant, nommé *MesSourcesCatRayon*, est également joint au logiciel *CatRayon* pour permettre à l'utilisateur de créer ses propres bases de données, à partir de mesures réalisées en laboratoire ou relevées à des postes de travail.

Le package comprenant ces 2 modules est téléchargeable gratuitement sur le site de l'INRS via le lien :

<http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil03>

8.2.1. Le module *MesSourcesCatRayon*

Le module *MesSourcesCatRayon* (Cf. figure 14) permet de saisir les caractéristiques techniques et générales des sources ainsi que la configuration dans laquelle elles ont été mesurées. Il est donc nécessaire d'entrer les données suivantes:

- la répartition spectrale du rayonnement mesuré avec un spectroradiomètre ou les grandeurs radiométriques mesurées dans les différents domaines spectraux à l'aide de radiomètres.
- la répartition spatiale relative (courbe de directivité) du rayonnement. Cette donnée n'est pas toujours facilement disponible, mais des courbes prédéfinies sont présentes dans le logiciel. A noter que cette donnée est uniquement importante dans le cas d'une évaluation des risques dans des configurations autres que celle des mesures.
- la forme et les dimensions de la source ainsi que la configuration dans laquelle ont été effectuées les mesures.

Les sources mesurées sont regroupées dans une base de données (nommée « catalogue » dans le logiciel) créée par l'utilisateur. Un catalogue peut par exemple regrouper toutes les sources analysées dans une même entreprise.

Un guide d'utilisation au format pdf est joint au logiciel et permet à l'utilisateur d'en découvrir progressivement les fonctionnalités.

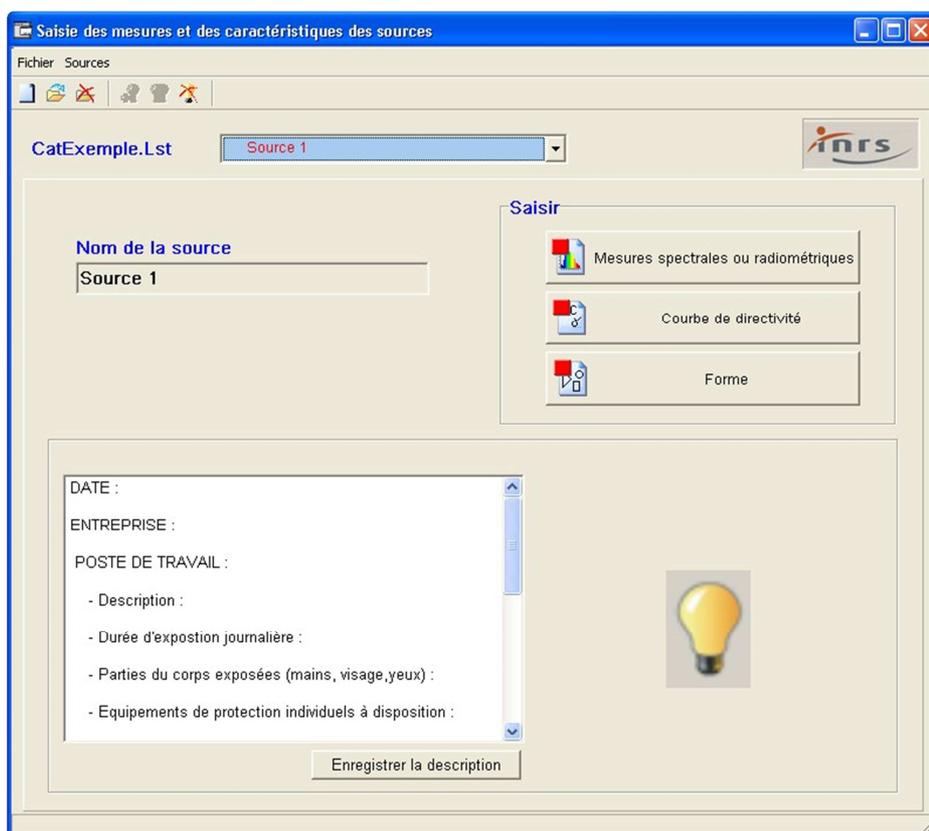


Figure 14 : Fenêtre principale du module de saisie *MesSourcesCatRayon*.

8.2.2. Le module *CatRayon*

Le catalogue de sources ainsi créé, est directement accessible dans *CatRayon*, soit pour une analyse rapide des risques dans la configuration de mesure, soit en complément des catalogues déjà implantés dans *CatRayon* pour des analyses dans d'autres configurations.

Le module d'évaluation des risques *CatRayon* est également accompagné d'un guide d'utilisation qui décrit toutes les fonctionnalités du logiciel ; elles ne seront donc pas reprises dans le présent document. Seule la fonctionnalité d'analyse des risques dans la configuration de mesure est décrite brièvement ci-après.

Comme pour toutes les analyses de risques effectuées dans *CatRayon*, la première étape consiste à créer un projet.

Ensuite, l'évaluation rapide des risques dans la configuration de mesure est accessible depuis le menu Configuration ou directement par la première barre d'icônes (Cf. figure 15).



Figure 15 : Sélectionner l'analyse rapide des risques.

Dans ce mode d'évaluation, il n'est pas nécessaire d'implanter la source et le poste de travail dans le local, cette opération s'effectue automatiquement et l'on considère qu'au poste de travail analysé :

- l'opérateur est situé à l'emplacement de l'appareil de mesure,
- son regard est orienté dans la direction de la mesure.

Après avoir sélectionné le nom du catalogue et choisi la source à analyser, la fenêtre de la figure 16 apparaît. L'utilisateur saisit alors la durée d'exposition journalière à ce poste de travail avant de valider.



Figure 16 : Fenêtre affichant les caractéristiques de la source sélectionnée et permettant de saisir la durée d'exposition journalière.

La fenêtre dans laquelle s'affichent les résultats de l'évaluation des risques dans la configuration de mesure est identique à celle utilisée pour les postes de travail mobiles (Cf. figure 17).

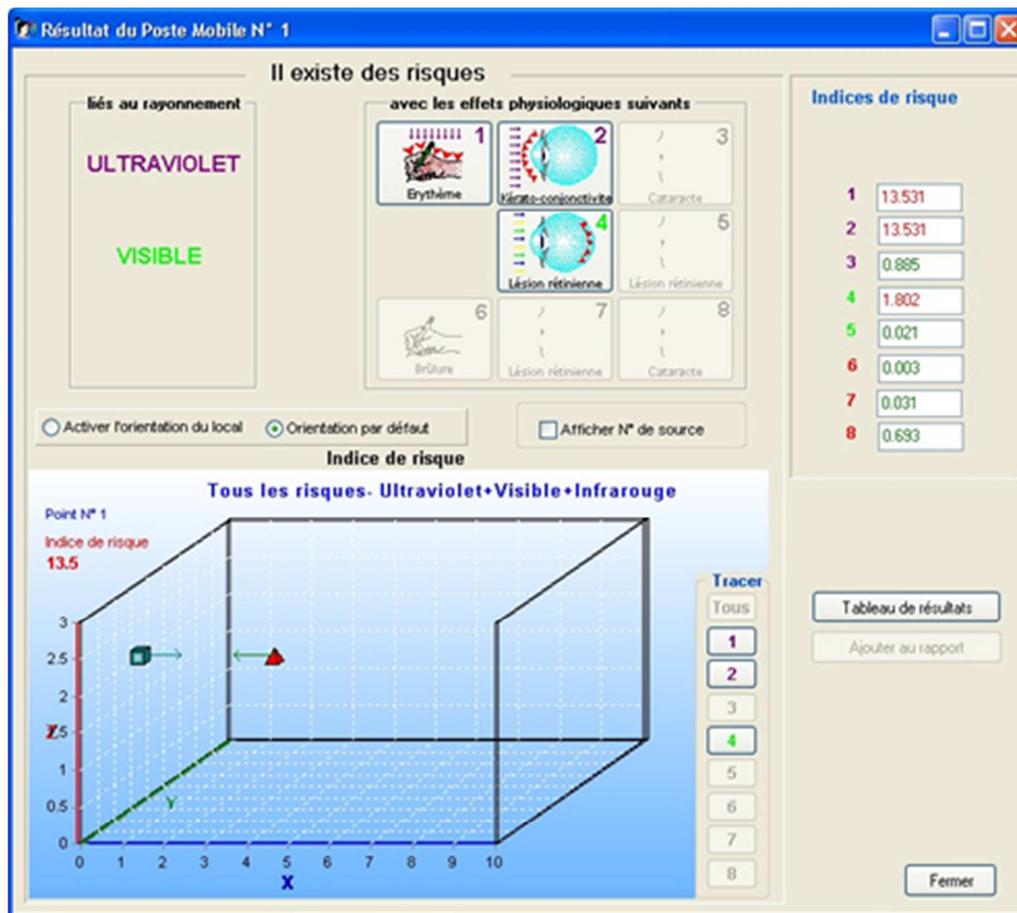


Figure 17 : Fenêtre présentant les résultats de l'analyse des risques.

Pour connaître les fonctionnalités accessibles depuis cette fenêtre de résultats, il est nécessaire de se reporter au guide d'utilisation de *CatRayon*.

Important

CatRayon dispose d'un catalogue de filtres qui permet de rechercher une protection adaptée aux risques évalués. Cependant, cette fonction est disponible uniquement pour les sources dont les données sont saisies sous forme spectrale, donc mesurées à l'aide d'un spectroradiomètre.

9. Démarche CARSAT/CRAMIF-INRS pour la mesure des rayonnements optiques au poste de travail

9.1. Appareillage

Le choix s'est porté sur 2 spectroradiomètres à barrettes de détecteurs, l'un couvrant le domaine 200- 1000 nm et le second le domaine 1000-2500 nm. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau XVIII.

A noter qu'il n'existe pas d'appareil de ce type couvrant le domaine infrarouge jusqu'à 3000 nm. Mais, comme les infrarouges proviennent principalement des corps chauffés, le spectre sur ce domaine est continu. La portion de spectre entre 2500 et 3000 nm peut donc facilement être extrapolée.

Tableau XVIII : Caractéristiques des spectroradiomètres

Domaine spectral	200 - 1000 nm	1000-2500 nm
Détecteurs	CCD - 2048 pixels rétro éclairés	InGaAs - 256 pixels avec refroidissement
Réseaux	300 traits/mm	300 traits/mm
Fentes	50 μ	200 μ
Largeur de bande (FWHM)	2,5 nm	30 nm
Temps d'intégration	2 μ s – 20s	10 μ s – 100 ms

Comme indiqué au [§ 5.1.2.2](#), le défaut le plus important des spectroradiomètres CCD est leur niveau de lumière parasite (*stray light*). Ainsi, pour chaque appareil à détecteur CCD, une matrice de correction de la lumière parasite est construite selon la méthode décrite dans [l'annexe 2](#). La construction de la matrice ainsi que l'étalonnage des appareils en éclairage énergétique spectrique sont réalisés dans les laboratoires de l'INRS.

9.2. Interfaçage des spectroradiomètres

Du fait, de la correction numérique de la lumière parasite, l'utilisation du logiciel d'acquisition fourni par le constructeur nécessiterait un post traitement des spectres mesurés. C'est pourquoi une interface spécifique à ces appareils et adaptée à des mesures au poste de travail a été développée. Elle offre les possibilités suivantes :

- Saisie des caractéristiques générales du poste de travail et de la configuration de mesure (Cf. figure 18).
- Ajustement automatique du temps d'intégration.
- Acquisition du signal (Cf. figure 19) en 2 temps :
 - mesure du signal émis par la source avec un temps d'intégration donné,
 - mesure du signal dans l'obscurité avec le même temps d'intégration.
- Affichage du spectre final en éclairage énergétique spectrique (Cf. figure 20), intégrant (pour chaque spectroradiomètres CCD) la correction préalable du signal par la matrice de correction de la lumière parasite.
- Possibilité de fusion de 2 spectres issus d'une même source en utilisant une méthode de « braketig ».

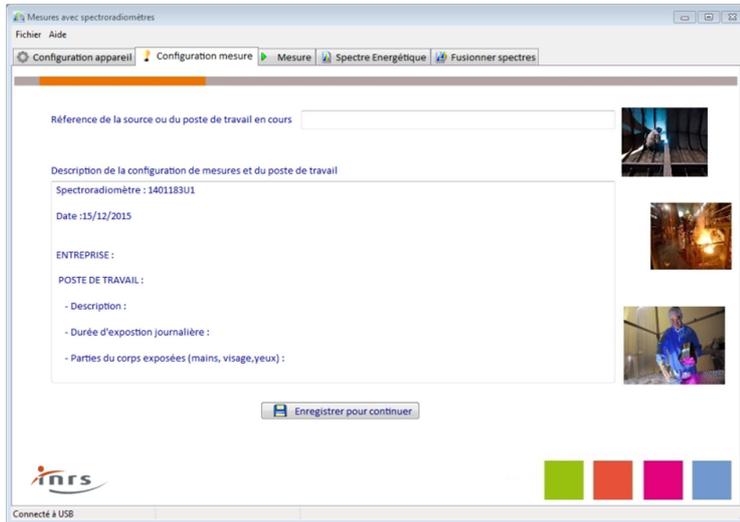


Figure 18 : Interface des spectroradiomètres : volet de saisie des caractéristiques du poste de travail et de la configuration de mesure.

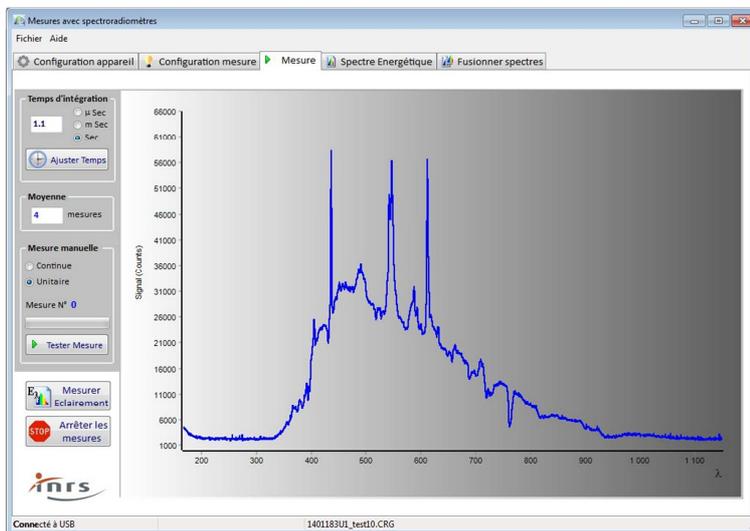


Figure 19 : Interface des spectromètres : volet d'acquisition du signal

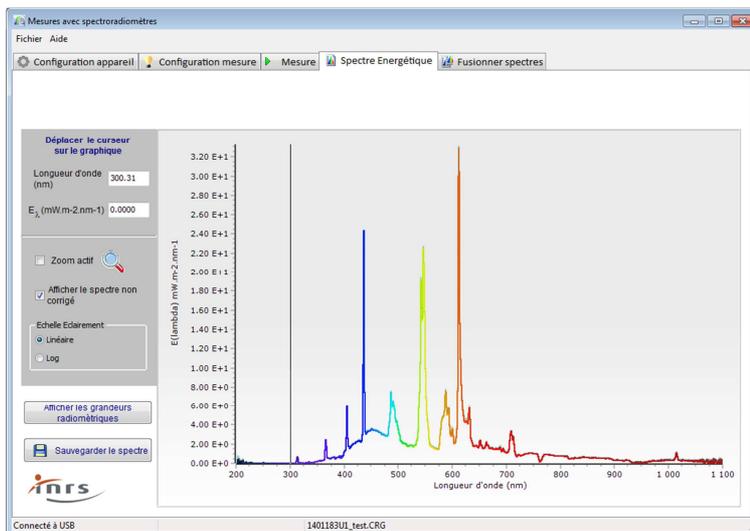


Figure 20 : Interface des spectroradiomètres : volet d'affichage du spectre final.

9.3. Evaluation des risques et moyens de protection

Les spectres mesurés via l'interface spécifique décrite ci-dessus, sont enregistrés dans des fichiers textes compatibles avec le module [MesSourcesCatRayon](#). Ensuite, l'évaluation des risques est réalisée à l'aide du logiciel [CatRayon](#). Comme les mesures sont données sous forme spectrale, il est alors possible de faire appel à la base de données de filtres présente dans [CatRayon](#) pour rechercher des moyens de protection adaptés. En effet, une fonctionnalité permet de lister automatiquement tous les filtres de protections collectives et individuelles efficaces au poste de travail analysé.

Bibliographie

- [1] **ACGIH**. Threshold limit Values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices. ACGIH, Cincinnati, Ohio. ACGIH, Cincinnati, Ohio; 2015. 252 p.
- [2] **ICNIRP**. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths 180 nm to 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Phys* 2004;87:171-86.
- [3] **ICNIRP**. ICNIRP guidelines on limits exposure to incoherent visible and infrared radiation. *Health Phys* 2013;105:74-91.
- [4] **ICNIRP**. ICNIRP Statement - Protection of Workers against Ultraviolet Radiation. *Health Phys* 2010;99:66-87.
- [5] **Barlier-Salsi A, Salsi S**. Lampes à rayonnement ultraviolet - quantification des risques associés à leur utilisation. *Cah Notes Doc* 1998;170:49-56.
- [6] **Salsi S, Barlier-Salsi A**. Exposition aux dispositifs d'éclairage scénique: risque pour la santé des professionnels du spectacle vivant ou enregistré. *Radioprotection* 2013;48:391-410.
- [7] **Salsi S, Barlier A**. Rayonnements optiques dans les verreries à main - Etude de 21 postes de travail. *Cah Notes Doc* 1987;126:75-87.
- [8] **Barlier A**. Rayonnements optiques dans une forge - mesures et moyens de protection. *Cah Notes Doc* 1994;155:181-93.
- [9] **Barlier A, Salsi S**. Rayonnement infrarouge et cataracte -Evaluation des risques à proximité d'un four à induction. *Cah Notes Doc* 1995;161:469-75.
- [10] **Salsi S, Barlier A**. Rayonnements optiques émis lors du soudage à l'arc avec électrodes enrobées - Risques et moyens de prévention. *Cah Notes Doc* 1991;143:223-33.
- [11] **INRS**. CatRayon 4, logiciel d'évaluation de l'exposition aux rayonnements optiques dans les locaux de travail. [Internet]. 2012; Hyperlien: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil03>
- [12] **Parlement européen**. Directive 2006/25/CE du parlement européen et du conseil, du 5 avril 2006, relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels). J. Off. 2006;38-59.
- [13] **République française**. Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels. J. Off. 4 Juillet 2010. :Texte 11.
- [14] **Commission Européenne**. Guide non contraignant pour la mise en oeuvre de la directive 2006/25/CE sur les rayonnements optiques artificiels [Internet]. Luxembourg: Union européenne; 2011. Hyperlien: <http://bookshop.europa.eu>
- [15] **Barlier-Salsi A, Salsi S**. Mesures des rayonnements optiques aux postes de travail: comparaison de différentes méthodes et matériels de mesure. *Radioprotection* 2010;45:307-20.
- [16] **Barlier-Salsi A**. Stray light correction on array spectroradiometers for optical radiation risk assessment in the workplace. *J Radiol Prot* 2014;34:915-30.

- [17] **NF EN 14255-1.** Mesurage et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents- Partie 1: Rayonnements ultraviolets émis par des sources artificielles sur les lieux de travail. AFNOR. 2005;29.
- [18] **NF EN 14255-2.** Mesurage et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents- Partie 2: Rayonnements visibles et infrarouges émis par des sources artificielles sur les lieux de travail. AFNOR. 2006;43.
- [19] **NF EN 14255-4.** Mesurage et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents- Partie 4: Terminologie et grandeurs utilisées pour le mesurage de l'exposition au rayonnement ultraviolet, visible et infrarouge. AFNOR. 2006;15.
- [20] **République française.** Arrêté du 1er mars 2016 relatif aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail. J. Off. 18 Mars 2016. :Texte 30.
- [21] **République française.** Arrêté du 1er mars 2016 relatif aux conditions d'accréditation des organismes pouvant procéder au mesurage de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail. J. Off. 18 Mars 2016. :Texte 31.
- [22] **NF EN 62471.** Sécurité photobiologique des lampes et appareils utilisant des lampes. AFNOR. 2008;46.
- [23] **ICNIRP.** Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3 μm). *Health Phys* 1997;73:539-54.
- [24] **Zong Y, Brown SW, Johnson BC, Lyckke KR, Ohno Y.** Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometer. *Appl Opt* 2006;45:1111-9.
- [25] **Schulmeister K.** Concepts in dosimetry related to laser safety and optical-radiation hazard evaluation [Internet]. In: Stuck BE, Belkin M, éditeurs. . 2001. p. 104-16. Hyperlien: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=899537>
- [26] **CIE.** e-ILV CIE [Internet]. Hyperlien: <http://eiv.cie.co.at/>
- [27] **NF EN ISO 25980.** Hygiène et sécurité en soudage et techniques connexes - Rideaux, lanières et écrans transparents pour les procédés de soudage à l'arc. AFNOR. 2014;8.
- [28] **NF EN 169.** Protection individuelle de l'oeil - Filtres pour le soudage et les techniques connexes - Exigences relatives au facteur de transmission et utilisation recommandée. AFNOR. 2003;15.
- [29] **NF EN 170.** Protection individuelle de l'oeil - Filtres pour l'ultraviolet - Exigences relatives au facteur de transmission et utilisation recommandée. AFNOR. 2003;13.
- [30] **NF EN 171.** Protection individuelle de l'oeil - Filtres pour l'infrarouge - Exigences relatives au facteur de transmission et utilisation recommandée. AFNOR. 2002;12.
- [31] **NF EN 172.** Protection individuelle de l'oeil - Filtres de protection solaires pour usage industriel. AFNOR. 1995;15.

Annexe 1 : Grandeurs, symboles, termes et unités

Rayonnement optique : rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde sont comprises entre 100 nm et 1 mm. Il comprend :

- Le rayonnement ultraviolet :
 - UVC : 100 nm – 280 nm
 - UVB : 280 nm – 315 nm
 - UVA : 315 nm – 400 nm
- Le rayonnement visible, seul rayonnement perceptible par l'œil humain : 400 – 780 nm
- Le rayonnement infrarouge :
 - IRA : 780 nm – 1400 nm
 - IRB : 1400 nm – 3000 nm
 - IRC : 3000 nm – 1 mm

Radiométrie : mesure des grandeurs associées aux rayonnements optiques

Photométrie : mesure des grandeurs associées aux rayonnements optiques qui tient compte des effets visuels de la lumière selon une fonction d'efficacité relative spectrale donnée, comme $V(\lambda)$.

Eclairement (énergétique ou lumineux) : Flux de rayonnement (énergétique ou lumineux) reçu par unité de surface. Dans le cas présent, la surface réceptrice est soit la peau, soit les yeux.

Luminance (énergétique ou lumineuse) : Elle caractérise la source et correspond au flux de rayonnement (énergétique ou lumineux) émis par unité de surface (de la source) et d'angle solide.

Eclairement (énergétique ou lumineux) spectrique : Quotient de l'éclairement (énergétique ou lumineux) contenu dans un intervalle de longueur d'onde, encadrant une longueur d'onde donnée, par la largeur de cet intervalle.

Luminance (énergétique ou lumineuse) spectrique : Quotient de la luminance (énergétique ou lumineuse) contenue dans un intervalle de longueur d'onde, encadrant une longueur d'onde donnée, par la largeur de cet intervalle.

Tableau A1 - 1 : Grandeurs radiométriques et photométriques et unités.

Grandeurs radiométriques	Unités	Grandeurs photométriques	Unités
Eclairement énergétique E	$W.m^{-2}$	Eclairement (lumineux) E_v	lux (lx)
Luminance énergétique L	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	Luminance (lumineuse) L_v	Candéla par m^2 ($cd.m^{-2}$)

Symboles :

λ : Longueur d'onde (nm).

E_{λ} : Eclairement énergétique spectrique ($\text{W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$).

L_{λ} : Luminance énergétique spectrique ($\text{W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}.\text{sr}^{-1}$).

$\Delta\lambda$: Largeur de bande (nm).

$S(\lambda)$: Pondération spectrale qui tient compte des effets du rayonnement ultraviolet sur les yeux et la peau.

$B(\lambda)$: Pondération spectrale qui tient compte des effets photochimiques de la lumière bleue sur l'œil.

$R(\lambda)$: Pondération spectrale qui tient compte des effets thermiques des rayonnements visible et IRA sur l'œil.

$V(\lambda)$: Efficacité lumineuse relative spectrale pour la vision de jour, définie par la CIE (Commission internationale de l'éclairage)

E_{eff} : Eclairement énergétique efficace (UV), (W.m^{-2}).

E_{UVA} : Eclairement énergétique total (UVA), (W.m^{-2}).

E_B : Eclairement énergétique efficace (lumière bleue), (W.m^{-2}).

L_B : Luminance énergétique efficace (lumière bleue), ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$).

L_R : Luminance énergétique efficace (lésion par effet thermique), ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$).

E_{IR} : Eclairement énergétique total (lésion par effet thermique), (W.m^{-2}).

E_{peau} : Eclairement énergétique total (visible, IRA et IRB) (W.m^{-2}).

Annexe 2 : Spécificité des appareils de mesure

A2- 1. Les radiomètres

L'exemple décrit ci-après concerne la détermination de la grandeur E_{UVA} à l'aide d'un radiomètre. Dans ce domaine spectral (315-400 nm), il n'y a pas de courbe de pondération, E_{UVA} correspond donc à la totalité de l'éclairement énergétique reçu entre 315 et 400 nm ; ce domaine est délimité par la courbe théorique tracée en pointillés rouge à la figure A2 – 1. Sur le radiomètre, ce domaine est délimité à l'aide d'un filtre passe-bande dont la réponse est donnée à la figure A2-1 (courbe en pointillés bleu). Pour toute source dont l'émission est située à l'intérieur de la courbe de réponse du filtre, la mesure à l'aide de ce radiomètre est correcte. En revanche, dans le cas d'une LED UV dont l'émission maximale se situe aux environs de 400 nm, soit aux limites du domaine spectral à analyser, l'éclairement énergétique E_{UVA} mesuré par le radiomètre représente seulement une portion (zone hachurée en bleu) de l'éclairement énergétique réel (zone hachurée en bleu + zone hachurée en rouge). Dans le cas présent, plus de 60% (zone hachurée en rouge) du rayonnement émis par la LED UV, n'est pas pris en compte dans l'évaluation des risques dus aux UVA.

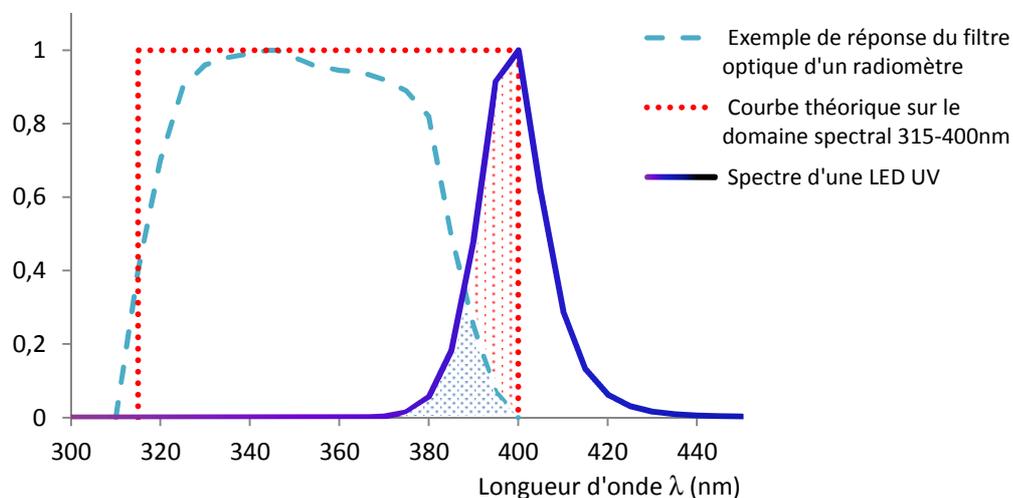


Figure A2 - 1 : Exemple d'erreur possible commise lors de la mesure d'une LED UV à l'aide d'un radiomètre.

A2- 2. Les spectroradiomètres CCD

Correction de la lumière parasite par calcul

Sur le domaine ultraviolet et visible, un signal parasite est observé lors de la mesure de certaines sources avec les spectroradiomètres CCD. Il est dû, au niveau de chaque détecteur composant la barrette, à la réception d'un rayonnement de longueur d'onde sans rapport avec la longueur d'onde associée à ce détecteur. Les erreurs les plus importantes apparaissent notamment lorsque les sources ont un niveau d'émission faible dans l'ultraviolet comparativement au niveau d'émission dans le visible. C'est pourquoi une méthode de correction de la lumière parasite, développée au NIST^[24], a été reprise à l'INRS^[16].

Elle consiste à injecter dans l'appareil des raies monochromatiques à l'aide de lasers et à relever pour chaque raie émise, le signal sur la totalité du domaine spectral (Cf. Figure A2 - 2). Ainsi, le signal vrai correspond au signal enregistré sur la bande spectrale de longueur d'onde égale à la raie d'émission du laser, alors que le signal en dehors de la bande d'émission correspond à la lumière parasite. Le signal enregistré à partir de chacune des raies d'émission (80 environ pour le NIST, réduit à 9 dans l'étude INRS) conduit à la construction d'une matrice qui, appliquée au signal mesuré sur la source, permet de réduire

considérablement les erreurs dues à cette lumière parasite. La méthode complète est détaillée dans le document référencé ^[16].

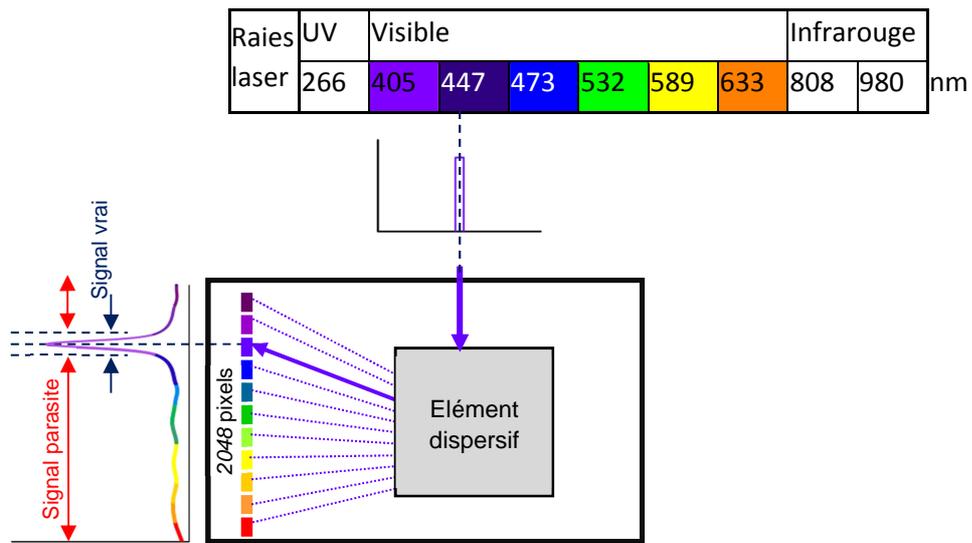


Figure A2 - 2 : Illustration de la méthode de correction de la lumière parasite (stray light)

Un exemple de spectre mesuré sur une LED à l'aide d'une part d'un spectroradiomètre à balayage et double monochromateur pris comme référence, d'autre part d'un spectroradiomètre CCD corrigé et non corrigé, est présenté à la figure A2-3. En comparant le spectre mesuré avec CCD non corrigé au spectre de référence, le signal correspondant à la lumière parasite apparaît clairement pour les longueurs d'onde inférieures à 400 nm mais également pour celles supérieures à 800 nm. A la figure A2-3, la détermination de la grandeur E_{eff} dans les 3 configurations montre que l'erreur commise en utilisant un spectroradiomètre CCD non corrigé est de l'ordre de 5000 %. En revanche, la grandeur E_{eff} calculée à partir du spectre corrigé est semblable à celle déterminée à partir du spectre de référence.

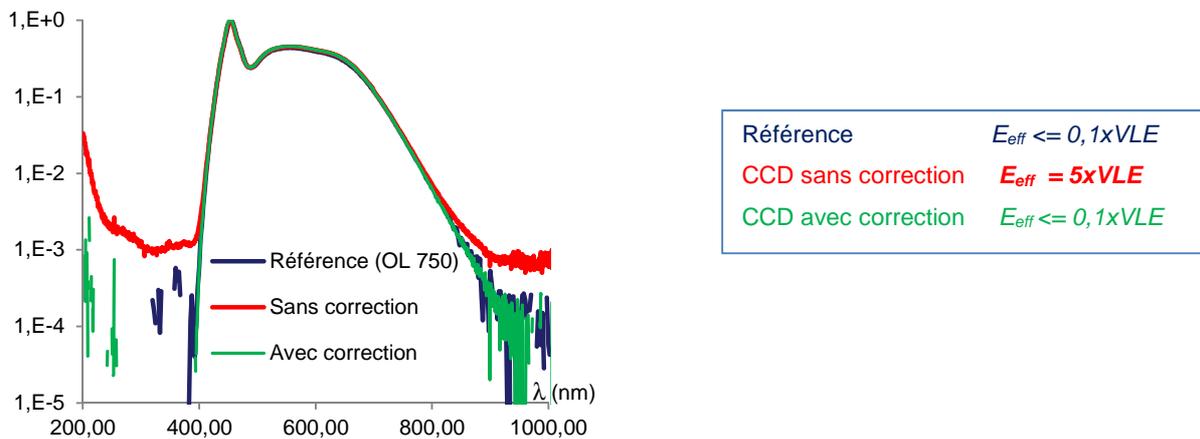


Figure A2 - 3 : Répartition spectrale relative d'une LED mesurée à l'aide d'un spectroradiomètre à balayage et double monochromateur, pris comme référence, et avec un spectroradiomètre CCD corrigé et non corrigé – détermination de E_{eff} à même distance de la source.

A2- 3. Les spectroradiomètres InGaAs

Sur le domaine infrarouge, une étude réalisée à l'INRS a comparé les résultats obtenus sur 3 lampes (lampe à arc au xénon, lampe tungstène halogène et lampe infrarouge) avec un spectroradiomètre à détecteurs inGaAs et un spectroradiomètre à balayage et double monochromateurs pris comme référence. Elle montre que la valeur maximale des écarts enregistrés sur la grandeur E_{IR} , limitée au domaine 1000-

2500 nm, est inférieure à 10%. Sachant que les normes NF EN 14255-1^[19] et NF EN 14255-2^[18], relatives aux mesures des ROA au poste de travail, admettent une incertitude maximale de 30% pour les mesurages, on peut considérer que ce type d'appareil est adapté aux mesures du rayonnement infrarouge au poste de travail.



Annexe 3 : Méthode détaillée du calcul de L_B et L_R

La répartition spectrale relative $S_p(\lambda)$ est définie^[26] par le rapport de la répartition spectrale d'une grandeur $X(\lambda)$ à une valeur de référence donnée R , qui peut être une valeur moyenne, une valeur maximale ou une valeur arbitrairement choisie de cette répartition.

$$S_p(\lambda) = \frac{X(\lambda)}{R}$$

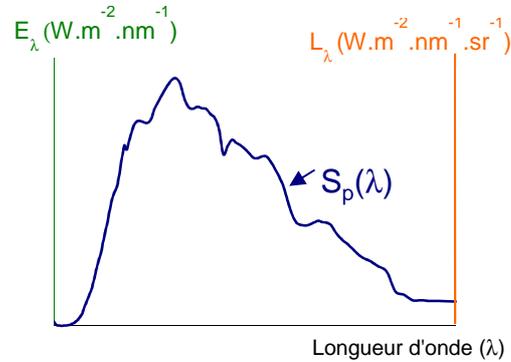


Figure A3-1 : illustration de la répartition spectrale relative.

Les grandeurs prises en compte étant les répartitions spectrales en éclairement énergétique $E(\lambda)$ et en luminance énergétique $L(\lambda)$ d'une même source, avec comme valeurs de référence respectives : l'éclairement lumineux E_V et la luminance lumineuse L_V , la relation s'écrit :

$$S_p(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{E_V} = \frac{L(\lambda)}{L_V} \quad \text{donc} \quad L(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{E_V} \cdot L_V$$

Ainsi, la relation $L_B = \sum_{300}^{700} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ du tableau I, devient : $L_B = \frac{L_V}{E_V} \cdot \sum_{300}^{700} E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$

Dans ces conditions, seule la luminance lumineuse L_V nécessite d'être mesurée, puisque l'éclairement lumineux E_V peut être déterminé à partir des valeurs mesurées de E_λ :

$$E_V = 683 \cdot \sum_{380}^{780} E_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

L'expression finale de L_B devient :

$$L_B = \frac{L_V}{683 \cdot \sum_{380}^{780} E_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \cdot \sum_{300}^{700} E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

Sur ce même principe L_R a pour expression :

$$L_R = \frac{L_V}{683 \cdot \sum_{380}^{780} E_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \cdot \sum_{380}^{1400} E_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$