



J. DUBARD

Spectroradiométrie UV : application au contrôle des cabines de bronzage

UV spectroradiometry: Application to sunbeds control

Jimmy DUBARD, Séverine GUIMIER, Thierry VALIN, Anne-Françoise OBATON et François BUTEAU

LNE-LCM (Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam), LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais), 29 avenue Roger Hennequin, 78197 Trappes cedex, France, jimmy.dubard@lne.fr.

Résumé

Le contrôle des cabines de bronzage est obligatoire en France pour assurer la protection des consommateurs des dangers du rayonnement ultraviolet. Ce contrôle est réalisé par des organismes agréés à l'aide de spectroradiomètres à matrice de photodiodes qui doivent être étalonnés et traçables au SI. Ces spectroradiomètres présentent des défauts (sensibles à la lumière parasite) qu'il faut prendre en compte lors de leur étalonnage. Nous proposons une méthode simple d'étalonnage, par comparaison à un spectroradiomètre de référence, qui repose sur l'utilisation de sources dont la répartition spectrale est similaire à celle des sources placées dans les cabines de bronzage. Cet article présente le banc développé et la procédure mise en œuvre pour l'étalonnage des spectroradiomètres à matrice de photodiodes ainsi que l'évaluation des incertitudes d'étalonnage.

MOTS CLÉS : RAYONNEMENT, ULTRAVIOLET, SPECTRORADIOMÈTRE, SOURCE, ÉTALONNAGE, INCERTITUDE, CABINE DE BRONZAGE.

Abstract

Control of sunbeds is mandatory in France to ensure consumers protection against UV radiation. This control is performed by authorized body with array spectroradiometers that must be calibrated and traceable to SI. These spectroradiometers have defects (stray light) that need to be taken into account while performing the calibration. We propose a calibration method that is based on light sources which spectrum is similar to that of the light sources found in sunbeds, and by comparison to a reference spectroradiometer. This paper report on the bench and procedure developed to calibrate the array spectroradiometer as well as the calibration uncertainty.

KEY WORDS: RADIATION, ULTRAVIOLET, SPECTRORADIOMETER, SOURCE, CALIBRATION, UNCERTAINTY, SUNBED.

1. Introduction

Le rayonnement ultraviolet (UV) naturel ou artificiel est dangereux pour la vie, en particulier pour la peau et les yeux, car il peut occasionner des lésions cancéreuses [1–3]. En France, le mélanome de la peau est au 11^e rang des cancers les plus fréquents. Par conséquent, l'utilisation d'un rayonnement UV artificiel tel que celui produit dans les cabines de bronzage doit être maîtrisé.

L'exploitation des cabines de bronzage est réglementée en France. Le Ministère de la Santé a mis en place des mesures pour cadrer l'utilisation des cabines de bronzage avec notamment le décret n° 2013-1261 du 27 décembre 2013 [4]. Les rampes et lampes de bronzage doivent être déclarées avant leur mise en service, être classées puis vérifiées par des organismes de contrôle agréés. La vérification par ces organismes agréés est réalisée à l'aide de spectroradiomètres UV à matrice de photodiodes qui doivent être étalonnés.

Les résultats (fig. 1) d'une comparaison réalisée en 2005 sur une grande partie du parc de spectroradiomètres UV à matrice de photodiodes utilisés en France par les organismes agréés ont montré la nécessité de mettre en place une procédure d'étalonnage spécifique afin de réduire la dispersion des mesures.

Cet article présente les caractéristiques du banc développé pour étalonner les spectroradiomètres UV à matrice

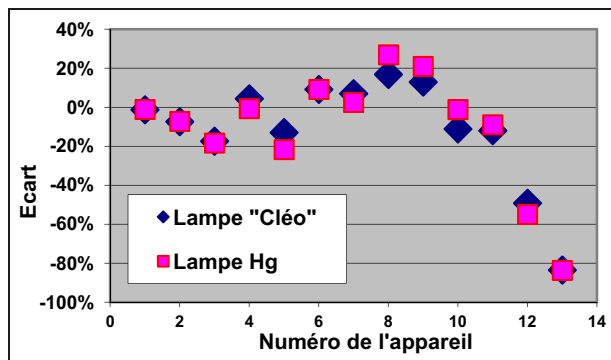


Fig. 1. – Résultats de la comparaison réalisée en 2005 sur des spectroradiomètres UV à matrice de photodiodes utilisés en France par les organismes agréés pour quantifier le rayonnement UVA.

de photodiodes, la procédure d'étalonnage et l'évaluation des incertitudes. Il décrit aussi la source UV étalon développée pour étalonner *in situ* un spectroradiomètre de référence en cas de caractérisation d'une cabine de bronzage sur site.

2. Contexte

L'arrêté du 9 décembre 1997 relatif aux conditions d'agrément d'organismes habilités à procéder au contrôle des installations de bronzage utilisant des rayonnements ultraviolets, donne des règles concernant le suivi métrologique des appareils de mesure :

- les instruments de mesure utilisés par ces sociétés de contrôle doivent être raccordés au moins une fois par an par le fabricant ou un organisme tiers ;
- l'organisme de contrôle doit mettre en place une procédure d'auto-vérification à partir d'une source de référence selon une procédure précisée par écrit ;
- l'organisme de contrôle doit effectuer de façon régulière des mesures sur un banc de référence à la demande du ministère chargé de la santé.

En mars 2005, une campagne de mesures comparatives sur des spectroradiomètres UV à matrice de photodiodes utilisés en France par les organismes agréés a été organisée à l'initiative de la DGS (Direction Générale de la Santé). 13 appareils sur les 15 recensés en France, tous du même fabricant et de même type, ont fait l'objet de cette comparaison. Pour la comparaison, ils ont été placés face aux mêmes sources, une lampe à fluorescence de type « Cléo » et une lampe à vapeur de mercure haute pression. Les résultats de cette comparaison sont présentés sur la figure 1 où sont représentés, pour quantifier le rayonnement UVA, les écarts entre la valeur indiquée par chaque appareil et la valeur moyenne des mesures ; les mesures des spectroradiomètres repérés « 12 » et « 13 » n'ont pas été prises en compte dans cette moyenne.

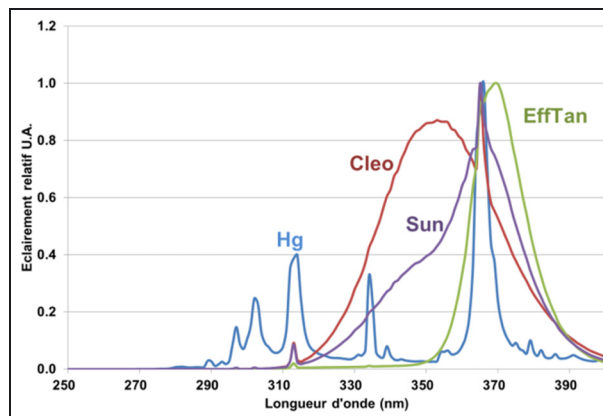


Fig. 2. – Répartitions spectrales des éclairages des lampes utilisées dans les cabines de bronzage.

3. Étalonnage des spectroradiomètres UV

L'ensemble des organismes habilités sont équipés de spectroradiomètres à matrice dont les principaux avantages sont :

- une compacité des appareils et une bonne robustesse qui les rendent facilement transportables ;
- un temps d'acquisition rapide (quelques secondes) car le spectre est acquis en une seule fois avec l'utilisation de détecteur multicanal ;
- une alimentation simplifiée, par exemple par le port USB d'un ordinateur portable.

Mais ces spectroradiomètres à matrice présentent un fort taux de lumière parasite qui entraîne des erreurs de mesure importantes dans le domaine spectral UV. Cette lumière parasite est due aux photons ayant des longueurs d'onde différentes de celle mesurée. Elle est due à la lumière polychromatique entrant dans le spectroradiomètre qui subit des réflexions multiples à l'intérieur du spectroradiomètre et qui n'est pas distinguée des photons utiles par les détecteurs. Des techniques de corrections ont été développées sur la base d'une caractérisation de la LSF (*Line Spread Function*) à l'aide d'un laser accordable [5, 6]. Mais cette méthode de caractérisation est coûteuse. Une autre méthode, plus simple, consiste à étalonner le spectroradiomètre à matrice par comparaison à un spectroradiomètre de référence en utilisant des sources spécifiques similaires à celles rencontrées dans les cabines de bronzage. C'est cette méthode qui a été mise en œuvre au LNE.

3.1. Sources de lumière UV

Les lampes équipant les cabines de bronzage sont de plusieurs types selon les différents fournisseurs du marché. La mesure de la répartition spectrale de l'émission de ces lampes a permis de créer quatre familles de lampes selon le spectre d'émission. Elles sont repérées : « Hg », « Cléo », « Sun » et « EffTan ». Les répartitions spectrales de chaque type de lampes sont présentées sur la figure 2.

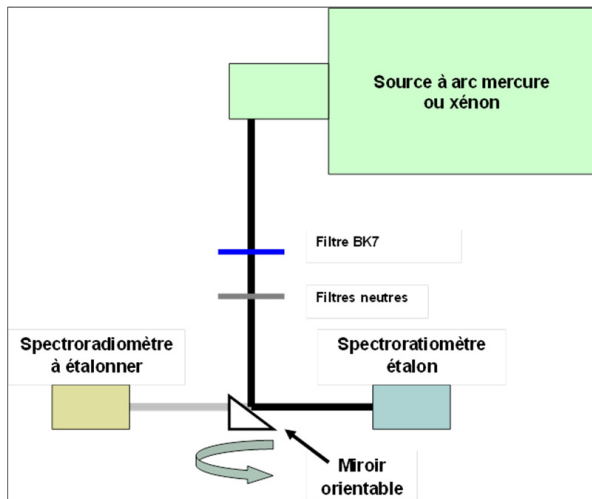


Fig. 3. – Banc d'étalonnage des spectroradiomètres UV à matrice de photodiodes fonctionnant avec un simulateur solaire.

Elle montre que ces lampes émettent principalement dans le domaine spectral de l'UVA (315 nm–380 nm).

3.2. Bancs d'étalonnage des spectroradiomètres

Deux bancs d'étalonnage ont été mis en œuvre pour tenir compte des différentes géométries des sources disponibles.

3.2.1. Banc « Source collimatée »

Le principe du banc « Source collimatée » est illustré sur la figure 3. Il comprend un simulateur solaire dont le faisceau lumineux est mis en forme avec un jeu de lentilles pour réaliser un faisceau collimaté.

Le simulateur solaire est équipé d'une lampe à arc à vapeur de mercure haute pression (HgHP) ou d'une lampe au xénon. Un filtre de type BK7 est interposé sur le faisceau de manière à éliminer les longueurs d'onde inférieures à 280 nm. Des filtres neutres sont utilisés pour réduire l'éclairement et ne pas saturer les appareils de mesure. Le faisceau dont le diamètre est de 30 mm est ensuite dirigé vers le spectroradiomètre étalon ou le spectroradiomètre à étalonner à l'aide d'un miroir orientable.

3.2.2. Banc « Source étendue »

Le banc « Source étendue » est constitué d'un luminaire à tubes fluorescents. À cause de son encombrement, nous avons disposé le luminaire verticalement face à une table optique à une distance des lampes de 25 cm (distance de mesure spécifiée dans le décret N° 2013-1261 du 27 décembre 2013). Les sondes du spectroradiomètre de référence et des spectroradiomètres à étalonner sont placées en bout de la table optique face aux lampes (fig. 4). Le faisceau vu par les spectroradiomètres est donc multidirectionnel. Pour minimiser les erreurs de mesure dues aux conditions géométriques d'éclairement, les sondes sont placées l'une au-dessus de l'autre.



Fig. 4. – Banc d'étalonnage des spectroradiomètres UV à matrice de photodiodes fonctionnant avec un luminaire à tubes fluorescents.

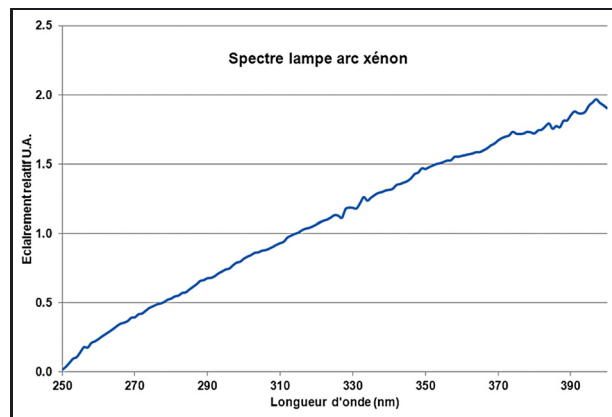


Fig. 5. – Répartition spectrale de l'éclairement de la lampe à arc xénon utilisée pour le contrôle du fonctionnement des spectroradiomètres des organismes agréés.

3.3. Spectroradiomètre de référence

Le spectroradiomètre de référence, de marque OPTRONIC LABORATORIES et de type OL754, est conçu sur la base d'un monochromateur double associé à un détecteur de type photomultiplicateur. La sonde est une sphère intégrante reliée au monochromateur par un faisceau de fibres optiques.

Le domaine spectral de sensibilité du spectroradiomètre de référence est 200 nm–800 nm. La largeur spectrale d'analyse est variable et est choisie à 1 nm pour l'étalonnage des spectroradiomètres.

3.4. Procédure d'étalonnage des spectroradiomètres UV

La procédure d'étalonnage comprend quatre étapes.

3.4.1. Étape 1 – Vérification du bon fonctionnement du spectroradiomètre

Le simulateur solaire du banc « Source collimatée » est constitué d'une lampe à arc xénon qui émet sur un domaine spectral étendu de l'UV à l'infrarouge (fig. 5).

Cette large étendue spectrale permet de vérifier la capacité du spectroradiomètre à détecter le rayonnement sur l'ensemble du domaine spectral requis (250 nm–450 nm).

3.4.2. Étape 2 – Vérification de l'échelle des longueurs d'onde du spectroradiomètre à étalonner

La caractérisation en longueur d'onde du spectroradiomètre sur le domaine spectral 250 nm–400 nm est effectuée en analysant les résultats d'une mesure du spectre d'émission de la lampe à vapeur de mercure dont les raies d'émission sont connues (fig. 2) [7]. On relève la longueur d'onde « pic » de chacune des raies mesurées et on la compare à la longueur d'onde de référence. Les longueurs d'onde de référence sélectionnées sont 297 nm, 313 nm et 365 nm. Cette caractérisation permet aussi d'évaluer la largeur de bande spectrale d'analyse du spectroradiomètre.

3.4.3. Étape 3 – Étalonnage en éclairage énergétique spectrique

La méthode utilisée est une méthode par comparaison au spectroradiomètre de référence, ceci pour différentes configurations spectrales de sources correspondant aux deux bancs mis en œuvre (lampe HgHP, tubes fluorescents). L'étalonnage en éclairage énergétique spectrique est effectué sur le domaine spectral 250 nm–400 nm, en ajustant le pas du spectroradiomètre de référence à 1 nm ; le pas du spectroradiomètre à étalonner étant fixe et inférieur ou égal à 1 nm.

3.4.4. Étape 4 – Détermination des facteurs correctifs

Les mesures effectuées à l'étape 3 permettent de caractériser quantitativement le spectroradiomètre par la détermination de facteurs correctifs pour les domaines spectraux dUVA et dUVB. Les domaines dUVA et dUVB (« d » pour dermatologie) diffèrent des domaines UVA et UVB (définis par la CIE [8]) par la longueur d'onde de séparation des domaines qui est de 320 nm entre dUVA et dUVB, et 315 nm entre UVA et UVB.

Ces facteurs correctifs sont déterminés de la façon suivante pour chaque source repérée « k » :

- à partir des éclairages énergétique spectriques mesurés $E_{k,l}$ par le spectroradiomètre de référence ($l = S$) et par le spectroradiomètre à caractériser ($l = UDC$), on calcule les éclairages érythémals $E_{er-dUVA}(k,l)$ et $E_{er-dUVB}(k,l)$

$$E_{er-dUVA}(k,l) = \int_{320}^{400} E_{k,l}(\lambda) S_{er}(\lambda) d\lambda$$

et

$$E_{er-dUVB}(k,l) = \int_{250}^{320} E_{k,l}(\lambda) S_{er}(\lambda) d\lambda$$

où $S_{er}(\lambda)$ est la courbe d'action de l'érythème [9, 10].

- Les facteurs correctifs FA_k et FB_k sont obtenus par les équations suivantes :

$$FA_k = \frac{E_{er-dUVA}(k, S)}{E_{er-dUVA}(k, UDC)} \text{ et } FB_k = \frac{E_{er-dUVB}(k, S)}{E_{er-dUVB}(k, UDC)}$$

4. Incertitude d'étalonnage de spectroradiomètres UV

Les spectroradiomètres sont étalonnés par comparaison au spectroradiomètre de référence du laboratoire lui-même étalonné avant chaque campagne d'étalonnage. Les sources d'incertitude d'étalonnage sont les suivantes :

- répétabilité des mesures ;
- étalonnage du spectroradiomètre de référence ;
- distance entre le spectroradiomètre et les sources ;
- homogénéité du faisceau d'éclairage ;
- température ambiante autour du banc d'étalonnage.

4.1. Répétabilité des mesures

Pour chaque type de source, les mesures sont effectuées trois fois. L'écart type relatif des mesures varie en fonction de la longueur d'onde de mesure. Il est de 10 % pour les longueurs d'onde inférieures à 310 nm, 4 % pour les longueurs d'onde entre 310 nm et 320 nm et 2,5 % pour les longueurs d'onde supérieures à 320 nm.

4.2. Étalonnage du spectroradiomètre de référence

Le spectroradiomètre de référence est étalonné en utilisant une lampe au deutérium pour l'étalonnage sur le domaine spectral 250 nm–300 nm, et une lampe tungstène-halogène de type FEL sur le domaine spectral 290 nm–450 nm. L'incertitude d'étalonnage est évaluée à partir des contributions suivantes :

- Répétabilité des mesures

Cette incertitude est évaluée en effectuant 5 mesures successives sur une source stable (lampes deutérium et tungstène-halogène). Pour les longueurs d'onde inférieures à 300 nm, la répétabilité est de 1 %. Pour les longueurs d'onde entre 300 nm et 320 nm, elle est de 0,5 %. Pour les longueurs d'onde supérieures à 320 nm, elle est de 0,25 %.

- Lampes étalons d'éclairage spectrique

L'incertitude d'étalonnage des lampes est fournie par le certificat d'étalonnage des lampes étalons utilisées pour l'étalonnage du spectroradiomètre. Elle est de 1 % pour les longueurs d'onde situées entre 250 nm et 299 nm, de 0,8 % de 300 nm à 349 nm et 0,7 % pour des longueurs d'onde ≥ 350 nm.

- Dérive des lampes étalons

Elle est évaluée à partir des valeurs des éclairages spectriques obtenues lors des différents étalonnages des lampes étalons réalisés au cours du temps.

Tableau 1

Bilan d'incertitude d'étalonnage du spectroradiomètre de référence.

Causes d'incertitude		Incertitude évaluée (en %)			
		250 nm–299 nm	300 nm–319 nm	320 nm–349 nm	≥ 350 nm
Répétabilité		1	2	1	1
Sources étalons	Étalonnage	1	0,8	0,8	0,7
	Dérive	0,7	0,5	0,5	0,5
	Homogénéité du faisceau	0	0	0	0
	Distance de mesure	0,17	0,1	0,1	0,1
	Alimentation	0,1	0,1	0,12	0,08
Spectroradiomètre	Étalonnage en longueur d'onde	0,45	0	0	0
	Lumière parasite	0	0	0	0
	Linéarité	0,1	0,1	0,1	0,1
Température ambiante		0	0	0	0
Incertitude type combinée		1,7	2,2	1,4	1,3
Incertitude élargie ($k = 2$)		3,3	4,4	2,8	2,7

– *Courant d'alimentation des lampes étalon*

Pour la lampe au deutérium, le courant d'alimentation est ajusté avec une incertitude de 0,4 mA pour un courant d'alimentation de 0,3 A. L'incertitude relative sur l'éclairement produit est de 0,1 % sur le domaine spectral 250 nm–320 nm.

Pour la lampe de type FEL, le courant d'alimentation est mesuré avec une incertitude relative de 0,025 %. Ceci engendre une incertitude relative de 0,12 % à 320 nm et de 0,08 % à 400 nm sur l'étalonnage du spectroradiomètre.

– *Distance de mesure*

La lampe étalon de type FEL est positionnée à une distance de 500 mm mesurée avec une incertitude de 0,25 mm. L'incertitude relative sur la mesure de l'éclairement produit est de 0,1 %. La lampe étalon au deutérium est utilisée à une distance du spectroradiomètre de 300 mm mesurée avec une incertitude de 0,25 mm. L'incertitude relative induite sur la mesure de l'éclairement produit est donc de 0,17 %.

– *Homogénéité du faisceau*

Cette incertitude est évaluée en déplaçant la sonde du spectroradiomètre dans un plan perpendiculaire au faisceau produit par la lampe étalon autour du point de mesure de référence. Un déplacement de 1 cm par rapport au point de mesure de référence montre que les variations sur l'éclairement spectrique mesuré sont équivalentes à la répétabilité des mesures. Par conséquent, l'incertitude due à l'homogénéité du faisceau est négligeable.

– *Étalonnage en longueur d'onde du spectroradiomètre*

Le spectroradiomètre est calibré en longueur d'onde avec une incertitude de 0,05 nm. Cette incertitude entraîne une incertitude sur la mesure de l'éclairement qui atteint 1 % pour des longueurs d'onde entre 300 nm et 320 nm.

– *Influence de la largeur spectrale d'analyse du spectroradiomètre*

La largeur spectrale d'analyse est de 1,2 nm. La variation de l'éclairement sur cet intervalle spectral entraîne un décalage effectif de la longueur d'onde centrale de la lumière analysée par le spectroradiomètre. Ce décalage peut atteindre 0,07 nm sur le domaine spectral 300 nm–320 nm ce qui génère une incertitude sur la mesure de l'éclairement de 1,4 %.

– *Lumière parasite*

Le niveau de lumière parasite est évalué en mesurant l'éclairement spectrique produit par une source blanche, sans et avec des filtres passe-haut de type WG320 ou WG340. Les résultats indiquent que la lumière parasite est négligeable, inférieure à 10^{-3} .

– *Température*

Dans les conditions du laboratoire avec une température de 23 °C contrôlée à ± 2 °C, l'influence de la température est négligeable, et est inclus dans la répétabilité des mesures.

Le bilan d'incertitude d'étalonnage du spectroradiomètre de référence est indiqué dans le tableau 1.

Tableau 2
Bilan d'incertitude d'étalonnage des spectroradiomètres.

Causes d'incertitude	Incertitude évaluée (en %)			
	250 nm–309 nm	310 nm–319 nm	320 nm–349 nm	350 nm–400 nm
Répétabilité	10	4	2,5	2,5
Étalonnage du spectroradiomètre	1,7	2,2	1,4	1,3
Distance de mesure par rapport aux sources	0,6	0,6	0,6	0,6
Homogénéité du faisceau	2	2	2	2
Température ambiante	0	0	0	0
Incertitude type combinée	10	5,0	3,5	3,5
Incertitude élargie ($k = 2$)	21	10	7,1	7,0

4.3. Distance spectroradiomètre-source

Sur le banc « simulateur solaire », le faisceau est collimaté. L'incertitude d'étalonnage due à la distance de mesure est négligeable.

Pour le banc « luminaire à tubes », les sondes du spectroradiomètre de référence et du spectroradiomètre à étalonner sont placées à égale distance de la source (250 mm) déterminée avec une incertitude de 2 mm. La variation du signal mesuré en changeant la distance par rapport à la source de 2 mm est de 1 % (distribution rectangulaire). L'incertitude associée sur l'étalonnage ou la mesure de l'éclairement est de 0,6 %.

4.4. Homogénéité du faisceau

Le diamètre de la surface sensible des sondes du spectroradiomètre de référence et du spectroradiomètre à étalonner est de 1 cm.

Sur le banc « simulateur solaire » dont le faisceau collimaté a un diamètre de 5 cm, les sondes sont alignées avec un laser. L'incertitude due à l'homogénéité du faisceau est estimée en déplaçant la sonde dans la section du faisceau. Elle est de 2 %.

Sur le banc « luminaire à tubes » la source est étendue. Les sondes du spectroradiomètre de référence et du spectroradiomètre à étalonner sont placées l'une au-dessus de l'autre et les surfaces sensibles sont espacées de 5 cm à 7 cm. Une étude de la variation du signal dans un plan parallèle à la source a montré que l'incertitude due à l'homogénéité est de 2 %.

4.5. Température ambiante

La salle où est réalisé l'étalonnage des spectroradiomètres pour les cabines de bronzage est régulée en température à $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Le spectroradiomètre de référence est étalonné dans un milieu ambiant similaire et la variation de la température sur le domaine $21\text{ °C}–25\text{ °C}$ n'a pas d'effet notable sur cet étalonnage. Par conséquent, l'incertitude due à la température ambiante est négligeable.

L'incertitude donnée dans le tableau 2 concerne la mesure de la répartition spectrale d'émission des sources utilisées pour l'étalonnage du spectroradiomètre. Pour l'incertitude sur les facteurs de correction sur les domaines d'UVA et d'UVB, il faut prendre en compte la courbe d'action de l'érythème.

Pour l'incertitude sur le facteur *FB*, il faut considérer le domaine spectral 310 nm–319 nm car les valeurs de l'éclairement spectrique pondéré par la courbe d'action de l'érythème sont négligeables pour les longueurs d'onde inférieures à 310 nm.

Pour l'incertitude sur le facteur *FA*, il faut considérer le domaine spectral 320 nm–349 nm car les valeurs de l'éclairement spectrique pondéré par la courbe d'action de l'érythème contribuent plus faiblement pour les longueurs d'onde supérieures à 350 nm.

L'incertitude d'étalonnage ($k = 2$) pour les facteurs de correction est de 7,1 % pour *FA* et 10 % pour *FB*.

Pour les étalonnages courants, compte tenu des faibles éclaircissements produits par les sources dans le domaine UVB, l'incertitude relative du facteur *FB* est majorée et est de 15 %.

5. Caractérisation des cabines de bronzage sur site

En cas de contestation des mesures réalisées sur une cabine de bronzage avec un spectroradiomètre à matrice de photodiodes, une validation à l'aide d'un spectroradiomètre de référence à balayage avec un monochromateur double doit être effectuée sur site. Les prestations sur site sont complexes à mettre en œuvre : accessibilité à la source, environnement non-contrôlé (température, perturbation électromagnétique, vibration, rayonnement lumineux...). Le spectroradiomètre de référence est sensible aux paramètres environnementaux et il est nécessaire de vérifier le calibrage *in situ*.

Une source de contrôle transportable a été développée pour réaliser cette vérification et sera utilisée dans un environnement non maîtrisé. Par conséquent, dans son utilisation, l'espace entre la lampe et la sonde

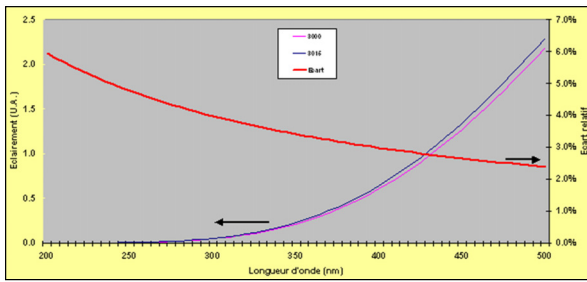


Fig. 6. – Variation de l'éclairement énergétique spectrique de la lampe avec le courant d'alimentation (température de couleur).

du spectroradiomètre de référence doit être isolé de tous les rayonnements parasites provenant des sources de lumière présentes dans la salle où est réalisée la mesure.

5.1. Cahier des charges de la source transportable de contrôle

La source doit fournir un éclairement spectrique absolu (exprimé en $W \cdot (m^2 \cdot nm)^{-1}$) de manière à pouvoir déterminer un facteur correctif à appliquer aux mesures réalisées sur site en cas de variation de la réponse du spectroradiomètre de référence entre son étalonnage réalisé en laboratoire et sa vérification sur site.

La source doit émettre un spectre continu. La puissance consommée et les caractéristiques électriques doivent être compatibles avec celles d'une alimentation stabilisée transportable.

L'alimentation électrique doit avoir une bonne stabilité en courant de manière à ce qu'elle n'apporte pas une contribution trop importante à l'incertitude d'étalonnage. La lampe tungstène a une température de couleur de fonctionnement de l'ordre de 3 000 K. Une variation relative de 1 % de son courant d'alimentation entraîne une variation de la température de couleur de 15 K. La figure 6 montre la distribution spectrale relative du corps noir à 3 000 K et à 3 015 K sur le domaine spectral 200 nm–500 nm ainsi que l'écart relatif entre ces deux répartitions spectrales. Cet écart varie entre 4,8 % à 250 nm et 3,0 % à 400 nm. Pour avoir une composante d'incertitude sur le spectre d'émission de la source due à la stabilité de la source de 1 % ($k = 2$) alors il faut que le courant d'alimentation de la source soit stable à mieux que 0,2 %.

Le cahier des charges de la source transportable est donc constitué des points suivants :

- l'ensemble comprenant la lampe et la sonde du spectroradiomètre doit être isolé de l'extérieur par une structure mécanique ;
- le rayonnement émis par la source doit être à spectre continu ;
- l'alimentation électrique de la lampe doit être stable à mieux que 0,2 %.



Fig. 7. – Lampe tungstène-halogène de la source transportable de contrôle.

5.2. Alimentation stabilisée

Le laboratoire a depuis plusieurs années acquis des alimentations électriques de marque Agilent et de la série E36XXA. Le modèle E3634A présente les caractéristiques suivantes :

- il est compact, transportable et programmable ;
- l'alimentation est progressive et peut être gérée soit en tension, soit en courant. Ceci permet de préserver la lampe et de lui garantir une durée de vie optimale ;
- il intègre un voltmètre et un ampèremètre, avec un affichage à 4 digits, qui peuvent être étalonnés ;
- la puissance maximale délivrée est 200 W en régime continu, selon deux configurations tension/courant (tension 0–25 V et courant 0–7 A ou tension 0–50 V et courant 0–4 A), qui peut donc être optimisée en fonction de la lampe choisie ;
- la stabilité du courant I spécifiée par le constructeur est : $0,1 \% I + 1 \text{ mA}$.

5.3. Lampe

Pour l'étalonnage sur site du spectroradiomètre, nous devons disposer d'une source à spectre large pour couvrir le domaine spectral de 250 nm à 800 nm. Une lampe tungstène-halogène répond à ce critère. La température de couleur, de l'ordre de 3 000 K à 3 200 K, permet en effet d'obtenir une contribution significative du rayonnement dans le domaine spectral UV de 250 nm à 300 nm.

La lampe sélectionnée est de marque OSRAM de type 64643 (fig. 7). Elle présente les paramètres suivants :

- elle est compacte (hauteur inférieure à 50 mm) ;
- ses caractéristiques électriques sont optimisées par rapport à l'alimentation disponible : puissance de 150 W sous 24 V soit un courant nominal de 6,25 A ; combinée à cette alimentation, la stabilité en courant est de 7 mA, soit environ 0,1 % en valeur relative ;

Tableau 3

Caractéristiques de la lampe tungstène-halogène de la source transportable de contrôle.

Marque	OSRAM
Type	64643
Puissance (W)	150
Tension (V)	24
Durée de vie (heures)	100
Position de fonctionnement	Culot en bas
Type de culot	GY9.5

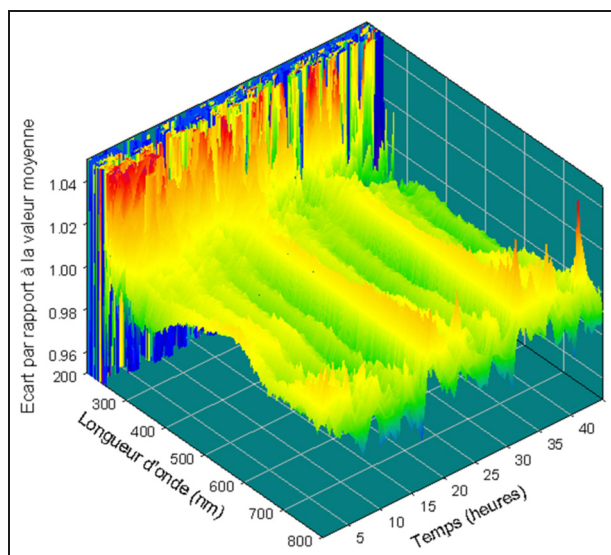


Fig. 8. – Caractérisation de la stabilité de la lampe tungstène-halogène de la source transportable de contrôle.

- elle a une durée de vie supérieure à 100 h ;
- son culot est de type GY9.5 lui conférant une stabilité mécanique optimale à l'intérieur de la source transportable.

Les caractéristiques de la lampe sont résumées dans le tableau 3.

L'étude de la stabilité du rayonnement est réalisée en mesurant le l'éclairement spectrique de la lumière émise en utilisant un spectroradiomètre de type OL756. Le domaine spectral de mesure s'étend de 200 nm à 800 nm avec un pas de 1 nm. La lampe est montée dans la source transportable. Les mesures sont effectuées sur un temps de fonctionnement de 45 h.

La stabilité de la lampe (fig. 8) est caractérisée par la représentation des écarts par rapport à la moyenne des éclairagements spectriques mesurés en fonction de la longueur d'onde et du temps de fonctionnement exprimé en heure.

Les oscillations en fonction du temps de fonctionnement, correspondent à une variation de l'éclairement spectrique au cours de la journée due à l'évolution de la température des différents éléments utilisés : spectroradiomètre, alimentation stabilisée. Cette variation est de l'ordre de 2 % à 300 nm et 1 % à 400 nm.

Cette étude apporte des informations sur le fonctionnement du spectroradiomètre dans des conditions d'utilisation sur site et permet de déterminer la contribution de la température de l'appareil à l'incertitude de mesure.

La figure 9 montre un vieillissement de la lampe de l'ordre de 1 % sur une durée de fonctionnement de 45 h. Une périodicité d'étalonnage de la source de 20 h de fonctionnement est préconisée. Ceci permet de réaliser 40 opérations de contrôle du spectroradiomètre sur site (15 min de stabilisation en température et 15 min de mesure).

5.4. Réalisation de la source transportable de contrôle

La source transportable est constituée de trois parties (fig. 10 et 11) : support de lampe, support de la sonde du spectroradiomètre et tube de liaison.

La distance entre la lampe et l'entrée de la sonde est de 210 mm. L'ensemble des pièces sont anodisées. Le tube de liaison comporte des stries pour réduire les réflexions parasites. La lampe est soumise à un refroidissement naturel par convection au travers d'ouverture sur le boîtier.

La source transportable (fig. 11) a une masse de moins de 3 kg. Elle est mise dans un conteneur (de dimensions 700 mm × 500 mm × 500 mm) avec l'alimentation électrique et des accessoires pour l'utilisation sur site. La source est utilisée sur le domaine spectral de 230 nm à 800 nm et utilisable dans l'infrarouge jusqu'à 2 500 nm pour l'étalonnage de spectroradiomètres à spectre large. La figure 12 montre la comparaison entre l'éclairement spectrique mesuré avec le spectroradiomètre OL754, en laboratoire et sur site, pour la lampe H1.

5.5. Évaluation des incertitudes de mesure sur site

Trois sources d'incertitude prépondérantes sont identifiées pour l'évaluation de l'incertitude de mesure de l'éclairement énergétique spectrique produit par la source transportable : la répétabilité, l'étalonnage du spectroradiomètre et le courant d'alimentation de la lampe.

– Incertitude de répétabilité

Cette incertitude est évaluée en calculant l'écart type relatif de 10 mesures de l'éclairement spectrique de la source transportable, entre 250 nm et 400 nm.

– Incertitude sur l'étalonnage du spectroradiomètre

Cette incertitude a déjà été présentée en paragraphe 4 et le bilan est synthétisé dans le tableau 2.

– Incertitude due au courant d'alimentation de la lampe

Le courant d'alimentation de la lampe est ajusté avec une incertitude de 1 mA pour un courant de 6,25 A, ce qui conduit à une incertitude en valeur relative de 0,02 %. La contribution sur l'incertitude de l'éclairement produit

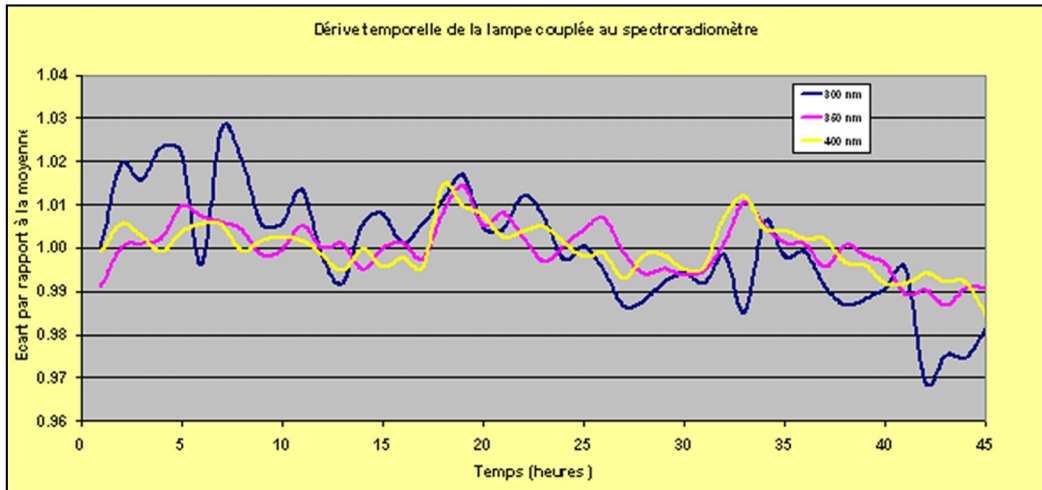


Fig. 9. – Variation de l'éclairement énergétique spectrique en fonction du temps, à trois longueurs d'onde, de la source transportable de contrôle.

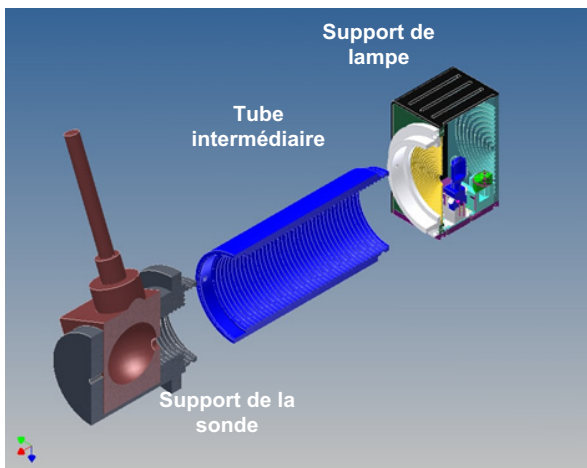


Fig. 10. – Vue éclatée de la source transportable de contrôle.

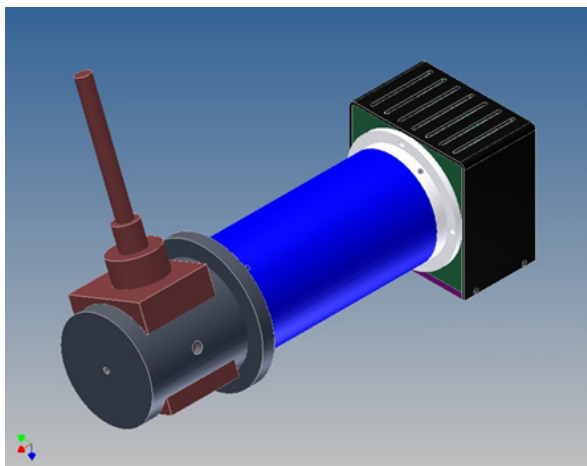


Fig. 11. – Source transportable de contrôle.

est inférieure à 0,1 % sur l'ensemble du domaine spectral. (voir discussion au § 5.1).

L'incertitude d'étalonnage en éclairement de la source transportable est indiquée dans le tableau 4.

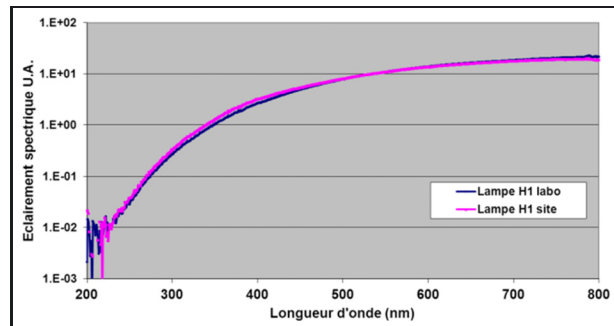


Fig. 12. – Spectres d'émission de la source transportable mesurés au laboratoire et sur site.

Elle varie de 2,8 % à 5,2 % selon la bande spectrale considérée.

6. Conclusion

Pour répondre au besoin d'étalonnage des spectroradiomètres à matrice de photodiodes, utilisés pour le contrôle des cabines de bronzage, nous avons développé un banc spécifique qui intègre des sources de lumière dont le spectre d'émission est similaire à celui des lampes des cabines de bronzage. Ce banc permet de prendre en compte la lumière parasite inhérente à ce type de spectroradiomètre qui impacte fortement les mesures d'éclairement dans le domaine UV.

Trois types de sources sont suffisants pour couvrir les besoins de contrôle. L'éclairement spectrique de ces sources est mesuré par le spectroradiomètre à matrice et par un spectroradiomètre de référence à balayage couplé à un double monochromateur. Les résultats de l'étalonnage sont les facteurs correctifs à appliquer à la valeur d'éclairement énergétique effectif pondéré par la courbe d'action de l'érythème sur les domaines UVA et UVB respectivement. L'incertitude relative sur les facteurs correctifs est de 7 % pour les UVA et 10 % pour les UVB. Ces valeurs d'incertitude sont identiques

Tableau 4
Incertitude d'étalonnage de la source transportable de contrôle.

Causes d'incertitude	Incertitude évaluée (en %)			
	250 nm–309 nm	310 nm–319 nm	320 nm–349 nm	350 nm–400 nm
Répétabilité	2	1	0,5	0,5
Étalonnage du spectroradiomètre	1,7	2,2	1,4	1,3
Courant d'alimentation	0,1	0,1	0,1	0,1
Incertitude type combinée	2,6	2,4	1,5	1,4
Incertitude élargie ($k = 2$)	5,2	4,9	3,0	2,8

pour des mesures sur site grâce à l'utilisation d'une source transportable de contrôle caractérisée au LNE permettant de vérifier le calibrage du spectroradiomètre de référence utilisé.

Références

- [1] CÉSARINI J.-P., « Rayonnement ultraviolet et santé », *Radioprotection*, **42**, 3, 2007, 379-392.
- [2] ICNIRP, "On health issues of ultraviolet tanning appliances used for cosmetic purposes", *Health Physics* **84**(1), 2003, 119-127.
- [3] LUCAS R., MCMICHAEL T., SMITH W. et ARMSTRONG B., "Solar Ultraviolet Radiation. Global burden of disease from solar ultraviolet radiation", Environmental Burden of Disease Series, No. 13, World Health Organization, 2006.
- [4] Décret N° 2013-1261 du 27 décembre 2013 (<http://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2013/12/27/AFSP1319983D/jo/texte>).
- [5] ZONG Y., BROWN S.B., JOHNSON B.C., LYKKE K.R. et OHNO Y., "Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers", *Appl. Opt.*, **45**, 2006.
- [6] NEVAS S., WÜBBELER G., SPERLING A., ELSTER C. et TEUBER A., "Simultaneous correction of bandpass and stray-light effects in array spectroradiometer data", *Metrologia*, **49**, 2, 2012.
- [7] READER J. et CORLISS C.-H., "Wavelengths and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions", – Part 1, US Department of Commerce – NBS, décembre 1980.
- [8] "ILV: International lighting vocabulary", Commission Internationale de l'Éclairage, publication CIE S 017/E, 2011.
- [9] « Spectre d'action érythémale de référence et dose érythémale normalisée », Norme NF ISO 17166 (CIE S 007/F), juillet 2000.
- [10] "On limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation)", ICNIRP guidelines, *Health Physics*, **87**, 2, 2004, 171-186.

Article reçu le 10 février 2016, version révisée reçue le 22 juillet 2016.