

Annexe 3.

Unités pour la mesure des grandeurs photochimiques et photobiologiques

Les rayonnements optiques sont susceptibles de produire des modifications chimiques dans certains matériaux vivants ou inertes. Cette propriété est appelée actinisme et les rayonnements capables de causer de tels changements sont connus sous le nom de rayonnements actiniques. La propriété fondamentale des rayonnements actiniques est qu'à l'échelle moléculaire, un photon interagit avec une molécule pour altérer ou briser cette molécule en de nouvelles espèces moléculaires. En outre, les rayonnements optiques dans les longueurs d'onde infrarouges peuvent causer des dommages thermiques à des matériaux vivants ou inertes à des niveaux d'exposition élevés, bien que dans ce cas l'interaction n'ait pas lieu au niveau d'un unique photon. Ces interactions entre les rayonnements optiques incidents et le matériau irradié peuvent être décrits en définissant des grandeurs photochimiques ou photobiologiques spécifiques en fonction de l'effet du rayonnement optique sur le matériau en question et sur les récepteurs chimiques ou biologiques associés.

Dans le domaine de la métrologie, la seule grandeur photobiologique qui ait été formellement définie du point de vue des mesures selon les règles du SI est l'interaction de la lumière avec l'œil humain dans la vision. Une unité de base du SI, la candela, a été définie pour cette importante grandeur photobiologique. Plusieurs autres grandeurs photométriques, dont les unités sont dérivées de la candela, ont également été définies (comme le lumen ou le lux, voir tableau 4, section 2.3.4).

Note : Les définitions des grandeurs et des unités photométriques sont publiées dans le *Vocabulaire international de l'éclairage*, norme CIE S 017 ILV: *International Lighting Vocabulary*, ou dans le *Vocabulaire électrotechnique international*, norme IEC 60050, chapitre 845 : Éclairage. Des informations sur la réalisation pratique de ces unités sont données dans la mise en pratique de la candela ; d'autres informations sur les conventions de base et la manière de mettre en pratique ces définitions sont précisées dans la publication conjointe BIPM/CIE, 018, dans la norme conjointe ISO/CIE ISO 23539 /CIE S 010 *Photométrie – Le système CIE de photométrie physique* et dans la norme CIE S 026 pour les applications métrologiques des effets non visuels.

1. Spectre d'action

Un rayonnement optique peut être caractérisé par sa distribution spectrale. Les mécanismes selon lesquels le rayonnement optique est absorbé par le système chimique ou biologique sont en général très complexes, et sont toujours fonction de la longueur d'onde (ou de la fréquence). Pour les applications métrologiques, cependant, la complexité des mécanismes d'absorption peut être ignorée et l'effet est simplement caractérisé par un spectre d'action qui relie la réponse photochimique ou photobiologique au rayonnement incident. Ce spectre d'action (ou fonction de pondération) décrit l'efficacité relative d'un rayonnement optique monochromatique à la longueur d'onde λ à produire une réponse donnée. Il est donné en valeur relative, normalisée à 1 pour la longueur d'onde d'efficacité maximale. Les spectres d'action sont définis et recommandés par les organisations internationales scientifiques ou de normalisation, notamment par la Commission internationale de l'éclairage (CIE). La fonction de pondération peut être combinée à une constante d'efficacité reliant la réponse photochimique ou photobiologique absolue aux unités caractérisant les rayonnements optiques : en photométrie, il s'agit de l'efficacité lumineuse spectrale exprimée en lm W^{-1} .

En photochimie et en photobiologie, les mesures de rayonnements optiques peuvent être réalisées en fonction de la distribution spectrale de la grandeur radiométrique (système radiométrique spectral) ou de la distribution

spectrale d'une grandeur photonique (système photonique spectral), ci-après simplement dénommées « distribution spectrale de puissance » et « distribution spectrale photonique ». Comme la distribution spectrale de puissance et la distribution spectrale photonique décrivent le rayonnement optique dans des unités différentes, un effet photochimique ou photobiologique donné a deux constantes d'efficacité, une pour chacun des systèmes. Par ailleurs, comme la distribution spectrale de puissance n'est pas proportionnelle à la distribution spectrale photonique, il en résulte que les fonctions de pondération de ces systèmes de mesure ne sont pas, elles non plus, proportionnelles. Pour éviter toute confusion, il est essentiel lors de l'utilisation d'un spectre d'action ou d'une fonction de pondération de préciser le système (radiométrique ou photonique) qui le/la définit. Les deux constantes d'efficacité, et leurs fonctions de pondération respectives, sont étroitement liées, tel que décrit dans la mise en pratique de la candela et des unités dérivées associées pour les grandeurs photométriques et radiométriques dans le Système international d'unités (SI), section 1.2.

Pour la vision, deux fonctions de pondération radiométriques ont été définies par la CIE et approuvées par le CIPM : $V(\lambda)$ pour la vision photopique, $V'(\lambda)$ pour la vision scotopique. En ce qui concerne la vision mésopique, la fonction de pondération radiométrique $V_{\text{mes};m}(\lambda)$ dépend des conditions d'adaptation visuelle. Ces fonctions sont utilisées dans les mesures des grandeurs photométriques et font implicitement partie de la définition de l'unité SI pour la photométrie, la candela. La vision photopique est régie par une stimulation des cônes de la rétine de l'œil, qui sont sensibles aux luminances élevées ($L > \text{environ } 5 \text{ cd m}^{-2}$) et sont utilisés pour la vision diurne. La vision scotopique est régie par une stimulation des bâtonnets de la rétine de l'œil, qui sont sensibles aux faibles luminances ($L < \text{environ } 10^{-3} \text{ cd m}^{-2}$) et sont utilisés pour la vision nocturne. La vision mésopique est gouvernée par la stimulation simultanée des cônes et des bâtonnets de la rétine, qui sont sensibles à un niveau de luminance moyen (L entre $10^{-3} \text{ cd m}^{-2}$ et 5 cd m^{-2}) et sont utilisés pour la vision crépusculaire.

Des spectres d'action radiométriques ont également été définis par la CIE pour d'autres effets photobiologiques, tel le spectre d'action de l'érythème (rougissement de la peau) dû au rayonnement ultraviolet ou les effets non visuels transmis par l'œil. Ces spectres n'ont cependant pas de statut particulier dans le SI.

Les processus actiniques photochimiques et photobiologiques sont souvent influencés par d'autres facteurs. Par exemple, l'absorption thermique peut altérer l'efficacité actinique d'un rayonnement à une longueur d'onde donnée ou un filtrage optique peut se produire en raison de couches intermédiaires entre la source de rayonnement optique et la couche actinique. Il est souvent pratique d'utiliser des spectres d'action qui combinent ces types d'effets modificateurs avec l'effet actinique, en particulier pour les diverses réponses de la rétine aux rayonnements optiques. C'est pourquoi le terme « spectre d'action » peut également faire référence à des fonctions de pondération utilisées pour dériver les grandeurs pondérées en fonction de leur spectre à partir des effets photochimiques et photobiologiques qui ne sont pas purement actiniques.

2. Mesure des grandeurs photochimiques et photobiologiques ; unités correspondantes

Les grandeurs et unités photométriques définies dans le domaine de la vision sont bien établies et très largement utilisées depuis longtemps. Elles ne sont pas concernées par les règles énoncées dans la suite de ce texte. Pour toutes les autres grandeurs photochimiques ou photobiologiques, les règles suivantes doivent être appliquées pour définir les unités à utiliser. Cette façon de définir les unités à l'aide des spectres d'action exprimés selon le système spectral radiométrique a été recommandée par le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) lors de sa 9^e réunion en 1977 et était décrite dans l'Annexe 3 de la 8^e édition de la *Brochure sur le SI*. Le CCPR, lors de sa 23^e réunion en 2016, a recommandé de réviser le texte de la version en ligne de l'Annexe 3 de la 9^e édition de la *Brochure sur le SI* afin de clarifier l'utilisation des spectres d'action lorsqu'ils sont exprimés selon le système spectral photonique ou selon le système spectral radiométrique.

Une grandeur photochimique ou photobiologique est définie de manière purement physique comme la grandeur dérivée de la grandeur radiométrique correspondante par l'évaluation de l'effet du rayonnement selon son action sur un récepteur sélectif, la sensibilité spectrale de ce récepteur étant définie par le spectre d'action de l'effet photochimique ou photobiologique considéré. La grandeur est donnée par l'intégrale par rapport à la longueur d'onde de la distribution spectrale de la grandeur radiométrique considérée, pondérée par la fonction de pondération appropriée. L'utilisation d'une intégrale suppose implicitement l'additivité arithmétique des grandeurs photochimiques ou photobiologiques bien que dans la pratique, cette loi ne soit, souvent, pas parfaitement vérifiée en pratique. La fonction de pondération est donnée en valeur relative ; c'est une grandeur sans dimension dont l'unité SI est le nombre un. La grandeur radiométrique a sa propre unité radiométrique correspondante. Ainsi, selon la règle d'obtention de l'unité SI d'une grandeur dérivée, l'unité de la grandeur photochimique ou photobiologique est celle de la grandeur radiométrique correspondante ; cela signifie également que pour être conforme au SI, la constante d'efficacité est un. Quand on donne un résultat numérique, il est indispensable de préciser s'il s'agit d'une grandeur radiométrique ou d'une grandeur pondérée de manière spectrale puisque les unités sont les mêmes. Si pour un effet photochimique ou photobiologique donné il existe plusieurs spectres d'action, le spectre d'action utilisé pour les mesures doit être clairement indiqué.

À titre d'exemple, l'éclairement érythémal, E_{er} , d'une source de rayonnement ultraviolet est obtenu en pondérant l'éclairement énergétique spectral à la longueur λ par l'efficacité de ce rayonnement à cette longueur d'onde à provoquer un érythème, et en sommant sur l'ensemble de toutes les longueurs d'onde présentes dans le spectre de la source sur toute la gamme de longueurs d'onde du spectre d'action. Ceci peut s'exprimer sous la forme mathématique suivante :

$$E_{er} = \int E_{\lambda}(\lambda) s_{er}(\lambda) d\lambda \quad \text{Équation A3.1}$$

où $E_{\lambda}(\lambda)$ est l'éclairement énergétique spectral à la longueur d'onde λ (généralement exprimé en unité SI $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$) et $s_{er}(\lambda)$ la fonction de pondération spectrale de l'érythème exprimée selon le système radiométrique spectral et normalisée à 1 à sa valeur spectrale maximale. L'éclairement érythémal, E_{er} , déterminé de cette façon est exprimé en unité SI W m^{-2} .

3. Conversion des spectres d'action entre système radiométrique spectral et système photonique spectral

Comme décrit précédemment, les mesures de rayonnements optiques en photochimie et photobiologie peuvent être réalisées en fonction de la distribution spectrale de puissance ou de la distribution spectrale photonique. Si un effet est purement actinique (interaction purement chimique/moléculaire), l'amplitude de l'effet est gouvernée par le nombre de photons absorbés et la fonction de pondération dans le système photonique spectral est ainsi proportionnelle au spectre d'absorption du matériau actinique. Dans ce cas, il est nécessaire d'appliquer une conversion au spectre d'absorption avant de l'utiliser dans le système de distribution spectrale de puissance. Au contraire, si un effet est purement thermique (c'est-à-dire lié à la chaleur, sans changement chimique et donc dépendant de l'énergie absorbée), la fonction de pondération dans le système radiométrique spectral est proportionnelle au spectre d'absorption. Dans ce cas, une conversion doit être appliquée au spectre d'absorption pour pouvoir l'utiliser dans le système photonique spectral.

Les grandeurs photochimiques et photobiologiques peuvent être déterminées à l'aide du système radiométrique spectral ou du système photonique spectral, c'est pourquoi il est essentiel non seulement d'appliquer la fonction de pondération adéquate mais aussi d'indiquer clairement le système utilisé avec la grandeur. Ainsi, par analogie avec l'équation A3.1, l'érythème causé par une source de rayonnement ultraviolet peut être caractérisé en unités du système de distribution spectrale photonique à l'aide de l'éclairement érythémal photonique :

$$E_{p,er} = \int E_{p,\lambda}(\lambda) s_{p,er}(\lambda) d\lambda \quad \text{Équation A3.2}$$

où $E_{p,\lambda}(\lambda)$ est le flux spectral de photons¹ par unité de surface à la longueur d'onde λ (généralement exprimé en unité $s^{-1} m^{-2} nm^{-1}$) et $s_{p,er}(\lambda)$ est la fonction de pondération spectrale de l'érythème exprimée dans le système de distribution spectrale photonique et normalisée à 1 à sa valeur spectrale maximale. L'éclairement érythémal photonique, $E_{p,er}$, déterminé de cette façon est généralement exprimé en unité $s^{-1} m^{-2}$ car le nombre de photons est une grandeur sans dimension.

Il résulte directement des équations ci-dessus que la relation entre les expressions de la grandeur spectralement pondérée dans les deux systèmes dépend à la fois de la forme spectrale de $E_{\lambda}(\lambda)$ et du spectre d'action. Toutefois, pour un processus de réponse générale A, la relation entre les formes des deux fonctions de pondération spectrales $s_{p,A}(\lambda)$ et $s_{e,A}(\lambda)$ (dans le système photonique et dans le système radiométrique, respectivement) pouvant être utilisée pour décrire l'effet est gouvernée par :

$$s_{p,A}(\lambda) = \gamma_A \frac{hc}{\lambda n_a(\lambda)} s_{e,A}(\lambda) \quad \text{Équation A3.3}$$

où γ_A est une constante (exprimée en unité J^{-1}), indépendante de l'éclairement énergétique, $E_{\lambda}(\lambda)$, qui répond à l'exigence de fixer les valeurs maximales de $s_{p,A}(\lambda)$ à 1, h étant la constante de Planck, c la vitesse de la lumière dans le vide, et $n_a(\lambda)$ l'indice de réfraction dans l'air² à une longueur d'onde donnée, λ . Il convient de noter que les deux fonctions de pondération spectrale $s_{p,A}(\lambda)$ et $s_{e,A}(\lambda)$ décrivant le même effet diffèrent par leur forme et que la longueur d'onde de crête de l'effet est différente si les grandeurs sont exprimées en fonction du système photonique ou radiométrique.

¹ Le flux de photons est le nombre de photons émis, transmis ou reçus par unité d'intervalle de temps, généralement exprimé en unité s^{-1} .

² Les spectres d'action sont définis en termes d'amplitude de l'effet en fonction de la longueur d'onde. La longueur d'onde d'un rayonnement dépend de l'indice de réfraction du milieu, ce qui signifie que la valeur du spectre d'action à une longueur d'onde donnée varie en fonction du milieu dans lequel cette longueur d'onde est déterminée. En général, le milieu pris en considération est l'air et les spectres d'action définis par la CIE mentionnés ci-dessus s'appliquent pour des longueurs d'onde mesurées dans l'air.