RADIOMÉTRIE, PHOTOMÉTRIE, FONCTION LAMBDA

AUTEUR

Thomas Salmon: Northeastern State University, États-Unis

RÉVISION PAR LES PAIRS

Scott Steinman: Southern California College of Optometry, États-Unis

CE CHAPITRE INCLUT UNE RÉVISION DE :

- La radiométrie
- La photométrie
- Fonction de luminosité de la CIE
- Quantités de base mesurées en photométrie

RADIOMÉTRIE

Q. Qu'est-ce que la radiométrie? Quelle est la différence entre la radiométrie et la photométrie?

A. La radiométrie décrit les propriétés physiques de la lumière tandis que la photométrie décrit la lumière d'une perception référentielle. La radiométrie mesure l'énergie, qu'elle soit détectée ou non par le système visuel; la photométrie quantifie la lumière comme elle serait perçue par un observateur humain standard.

ÉNERGIE ET PUISSANCE

L'unité de base de l'**énergie** est le *joule*. La puissance est définie comme étant une *énergie par unité de temps*. L'unité de base pour la *puissance est le watt.*

1 watt = 1 joule / 1 seconde

Une ampoule de 60 watts de *puissance rayonnée* produit 60 joules d'énergie chaque seconde. Si elle est allumée pour 10 secondes, elle produit 600 joules d'énergie. Ceci décrit l'énergie totale émise de la source lumineuse dans toutes les directions.

RADIOMÉTRIE (SUITE)

INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

Une *source ponctuelle* émet de l'énergie rayonnante dans toutes les directions. Si elle se retrouve au centre d'une sphère, son énergie ou sa puissance serait distribuée sur la surface interne de la sphère. Dans certains cas, il faut savoir à quel point la puissance est concentrée dans une direction particulière. C'est-à-dire, la quantité de puissance contenue dans un volume défini. La quantité de puissance contenue dans un volume en forme de cône est appelée l'*intensité énergétique*. Plus il y a de puissance dans le cône, plus l'intensité énergétique est grande. L'unité pour un angle solide (taille du cône) est le stéradian (Fig. 4-5 Schwartz).

Stéradian = Superficie à l'ouverture du cône/(longueur du cône)^2

Pour connaître la taille d'un stéradian, imaginez un gros cornet de crème glacée avec un diamètre d'ouverture de 17,15 cm et une longueur de 15,24 cm. Un tel cône a un volume angulaire d'à peu près 1 stéradian. L'intensité énergétique quantifie la concentration de lumière venant uniquement d'une source ponctuelle et elle est exprimée en watts/stéradian.

RADIANCE

Une source étendue comme un long tube de lumière fluorescente peut être vue comme une collection de points. La quantité de puissance rayonnée émise d'une source étendue est appelée **radiance**. La radiance est exprimée en unités de watts/stéradian/m^2.

IRRADIANCE

La quantité de puissance rayonnée qui atteint une surface est l'**irradiance**. L'irradiance est exprimée en watts/m^2. Faites attention de ne pas confondre la radiance et l'irradiance. La radiance fait référence à l'énergie émise d'une surface (énergie sortante). L'irradiance fait référence à l'énergie qui atteint une surface (énergie arrivante).

PHOTOMÉTRIE

Dans ce contexte général de radiométrie, nous allons étudier la photométrie. La radiométrie décrit les propriétés physiques de la lumière tandis que la photométrie décrit la lumière selon une perception référentielle. La radiométrie mesure l'énergie, que la lumière soit détectée ou non par le système visuel; la photométrie quantifie la lumière comme elle serait perçue par un **observateur humain standard**.

En optométrie, nous sommes habituellement plus intéressés par la photométrie que par la radiométrie, mais dans certains cas la radiométrie peut être plus pertinente. Par exemple, lorsqu'on étudie les effets des lasers sur les tissus oculaires, on ne se soucie pas de luminance perçue, mais plutôt de la quantité d'énergie transférée aux tissus pour traiter des maladies oculaires ou des tissus endommagés. Dans ce cas, vous seriez plus intéressés par des données de radiométrie que de photométrie.

La photométrie est étroitement liée à la radiométrie, mais il faut faire attention de ne pas les confondre. Évidemment, une lumière visible semblerait plus brillante si elle a plus d'énergie ou plus de puissance. C'est pour cela qu'une ampoule de 100 watts semble plus brillante qu'une ampoule de 60 watts. Pour des lumières ultraviolet ou infrarouge, même s'il y a plus d'énergie, on ne verrait pas la lumière.

Lorsqu'on compare la brillance apparente de lumières ayant différentes longueurs d'onde, il faut considérer la sensibilité de l'œil pour différentes longueurs d'onde. Par exemple, un laser vert de 5 mW semblera plus brillant qu'un laser rouge de 5mV, car l'œil est plus sensible à la lumière verte que la lumière rouge.

FONCTION DE LUMINOSITÉ DE LA CIE

Pour simplifier, prenons tout d'abord une source lumineuse monochromatique (une seule longueur d'onde) qui est visible pour l'œil humain. Afin de calculer sa brillance pour un observateur standard, c'est-à-dire l'**intensité photométrique** de la lumière, il faut connaître :

- Sa puissance radiométrique (en watts)
- Sa longueur d'onde
- La sensibilité de l'œil pour cette longueur d'onde

La sensibilité de l'œil pour différentes longueurs d'onde pour un observateur standard a été établie par la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage, ou *International Commission on Illumination*) en 1924. Cette collection de données standardisées est fondamentale dans le domaine de la photométrie et est connue comme étant la :

- Fonction de l'efficacité lumineuse de l'œil humain
- Fonction de luminosité spectrale
- Fonction de luminosité **photopique**
- Fonction V(λ) de la CIE 1924 ou courbe V lambda pour vision conique (photopique)

Cette fonction décrit la sensibilité relative normale de l'œil pour différentes longueurs d'onde, dans des conditions de lumière adaptée. C'est-à-dire, en conditions de lumière du jour au lieu de lumière nocturne. Dans ce cas-ci, les cônes sont activés.

Lorsque les yeux sont adaptés à l'obscurité, leur sensibilité maximale est décalée vers les courtes longueurs d'onde alors que les bâtonnets sont activés. La fonction de sensibilité correspondante dans des conditions d'obscurité est celle de la luminosité **scotopique** ou la fonction V'(λ) de 1951 (fonction V-prime lambda). On travaillera habituellement avec la fonction (λ) photopique, mais il est important de savoir qu'il y a une différente fonction de luminosité spectrale pour la vision scotopique (adaptée à l'obscurité).

La figure 5-1 montre les fonctions V(λ) et V'(λ) sur un même graphique. Remarquez que les deux courbes sont en forme de cloche. La courbe V(λ) a un pic situé environ à 555 nm (pic de sensibilité des cônes), alors l'efficacité lumineuse relative de l'œil humain pour cette longueur d'onde est une valeur donnée de 1.0 C(λ555) = 1.0.

La courbe V'(λ) (scotopique) est décalée vers les courtes longueurs d'onde et atteint un sommet à environ 507 nm (pic de sensibilité des bâtonnets). L'efficacité lumineuse relative sous conditions scotopiques à cette longueur d'onde est une valeur donnée de 1.0. V'(λ507) = 1.0. (Fig. 4-8 de Schwartz)

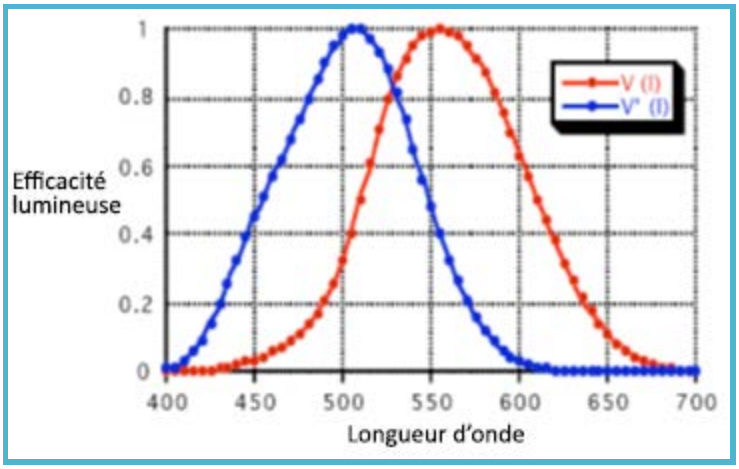

Figure 5.1: *Les courbes de CIE V(λ) (droite, rouge) et V'(λ) (gauche, bleue)*

FONCTION DE LUMINOSITÉ DE LA CIE (SUITE)

DÉRIVATION DE LA FONCTION DE LUMINOSITÉ PHOTOPIQUE

Comment pouvons-nous déterminer expérimentalement la fonction de luminosité photopique? C'est-à-dire, quelle serait la brillance de différentes longueurs d'onde pour l'œil humain? Une façon (Fig. 4-9 de Schwartz) serait de comparer une lumière de référence d'une longueur d'onde et d'une radiance fixes avec une lumière d'une longueur d'onde différente. Le sujet ajusterait la radiance de la lumière testée jusqu'à ce qu'elle ait la même brillance apparente que la lumière de référence (Fig. 5-2). Malheureusement, cette procédure donne des résultats variables, car il est difficile de faire concorder la brillance de stimuli de longueurs d'onde différentes.

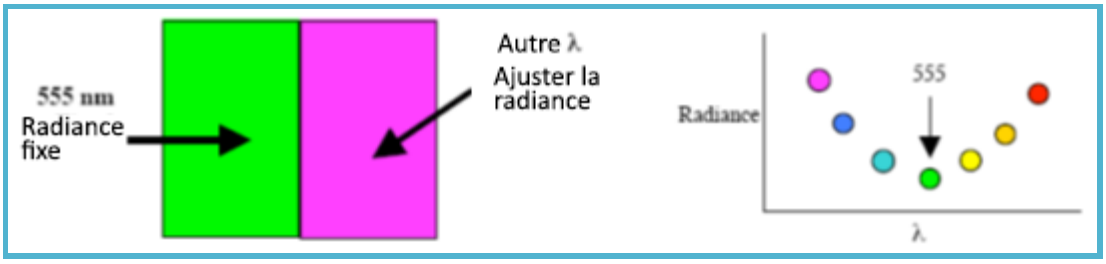

Figure 5.2: *Expérience pour comparer l'efficacité lumineuse relative pour différentes longueurs d'onde*

Une autre méthode astucieuse, connue comme étant la **photométrie oscillatoire hétérochromatique (HFP pour « heterochromatic flicker photometry »)**, a été développée pour surmonter ce problème. Un seul stimulus illuminé est conçu pour osciller alternativement entre deux longueurs d'onde (Fig. 5-3 A, et Fig. 4-10 de Schwartz) à une vitesse d'à peu près 15 cycles/sec (ou 15 Hz). Par exemple, une longueur d'onde pourrait être de 555 nm avec une radiance fixe (Fig. 5-3 B) tandis que l'autre longueur d'onde est variable et sa radiance peut être ajustée (Fig. 5-3 C). Les couleurs alternantes sembleront se fusionner en une couleur entre les deux, mais si leurs brillances apparentes ne sont pas égales, la lumière semblera osciller. La radiance de la longueur d'onde testée est ajustée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'oscillation ou que celle-ci est minimisée. À ce point, les luminances (brillance perçue par un observateur humain standard) sont égales. La procédure est répétée pour plusieurs longueurs d'onde tests. Les données de CIE 1924 sont basées sur des expériences utilisant cette méthode.

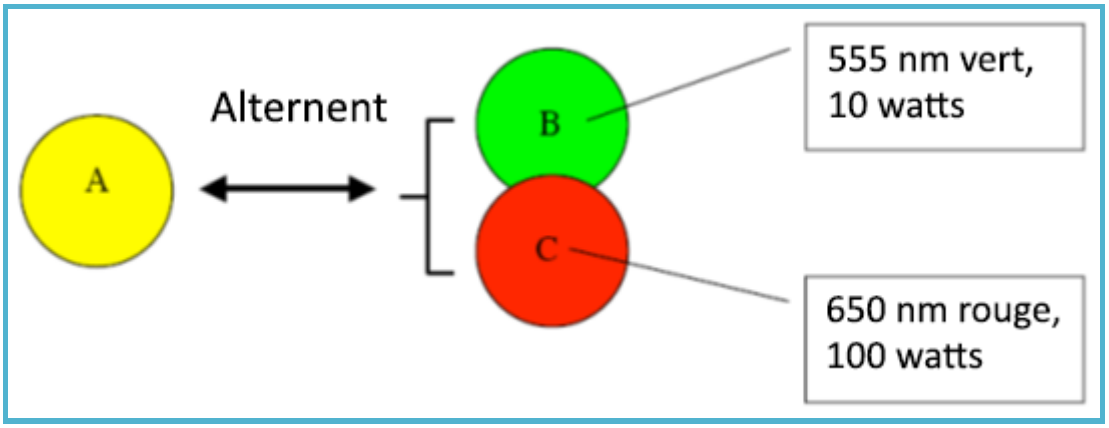

Figure 5.3: *Photométrie oscillatoire hétérochromatique. Le point jaune, dont la couleur est perçue comme étant une fusion des deux couleurs alternantes, semble osciller jusqu'au moment où la brillance des deux couleurs devient égale (brillance perçue égale). Dans cet exemple, le rouge doit avoir dix fois la puissance rayonnée de la lumière verte de référence, donc l'œil doit être 1/10e aussi sensible à 650 nm; donc, la valeur V(λ) à 650 nm est 0.1.*

Dans la **méthode « *Minimally Distinct Border* »** («Bordure minimalement distincte») montrée dans la Fig. 4-11 de Schwartz, les stimuli de longueur d'onde standard et de longueur d'onde test occupent deux moitiés d'un carré (comme le stimulus de la Fig. 5-2) et partagent une bordure commune. Les radiances sont ajustées jusqu'à ce que cette bordure devienne à peine discernable. (c.-à.-d. elle paraît floue plutôt qu'une ligne nette). À ce niveau de radiance, les brillances semblent égales alors les luminances sont égales. Les résultats concordent avec résultats de HFP.

QUANTITÉS DE BASE MESURÉES EN PHOTOMÉTRIE

PUISSANCE LUMINEUSE

Alors que la puissance rayonnée est simplement en fonction de la quantité d'énergie présente, la *puissance lumineuse* indique la brillance perçue (pour un observateur humain standard). 10 watts à 555 nm est beaucoup plus brillant que 10 watts à 400 nm. Même si la puissance rayonnée est la même, la puissance *lumineuse* à 400 nm est moindre. La puissance lumineuse pour une longueur d'onde est exprimée en lumens, où un lumen est défini comme étant :

lumen = (puissance rayonnée en watts)Vλ(680)

Cette équation paraît dans Schwartz et l'utilise comme une constante arrondie à 680. D'autres références peuvent utiliser 683 ou 685. Il faut noter que cette formule est conçue pour des lumens photopiques. Regardez les exemples dans la Fig. 4-2 de Schwartz.

La courbe V(λ) fait référence à la fonction de luminosité photopique. Puisque les bâtonnets sont plus sensibles à la lumière, c'est-à-dire, ils voient mieux les lumières réduites que les cônes, la brillance perçue de la lumière dans un système scotopique est différente et il y a une différente formule pour des *lumens scotopiques*.

Lumen scotopique = (puissance rayonnée en watts)V'λ(1700)

Il s'avère qu'à 555 nm, l'efficacité lumineuse scotopique est de 0.4, donc pour une source lumineuse de 1 watt à cette longueur d'onde, il y a 680 lumens scotopiques. Nous n'allons pas beaucoup utiliser les lumens scotopiques dans cette leçon. Dans le système photopique, l'efficacité lumineuse à 555 nm est de 1.0, donc pour une source de 1 watt de cette longueur d'onde, il y a 680 lumens photopiques.

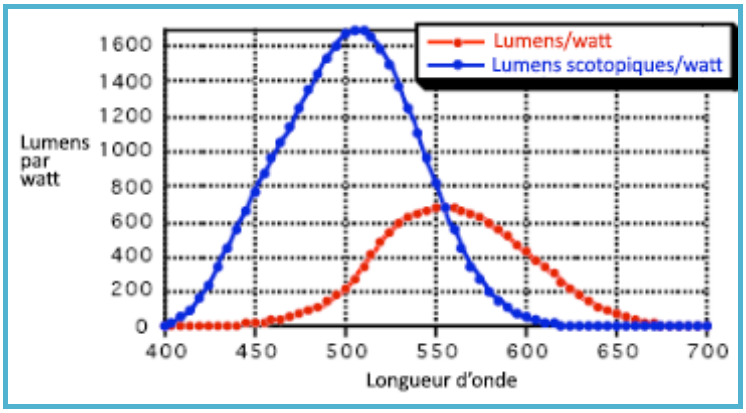

Figure 5-4: *Comparaison des lumens photopique et scotopique*

La Figure 5-4 montre le nombre de lumens photopiques et scotopiques pour chaque longueur d'onde, en supposant une puissance rayonnée de 1 watt. Schwartz mentionne qu'à 555 nm, le nombre de lumens photopiques et scotopiques sont tous deux égaux à 680. À 507 nm, il y a 1699 lumens scotopiques par watt. Schwartz arrondi ce nombre à 1700.

Si la source lumineuse est polychromatique (plusieurs longueurs d'onde), la puissance lumineuse totale est égale à la somme des puissances lumineuses calculées séparément pour chaque longueur d'onde. Le caractère additif des puissances lumineuses de chaque longueur d'onde est appelé la **loi d'Abney d'additivité**. (Fig. 4-3 de Schwartz)

INTENSITÉ LUMINEUSE

Ce terme photométrique est similaire à l'intensité rayonnée (watts/stéradian). Il est uniquement utilisé pour une source ponctuelle et l'unité de l'intensité lumineuse est la candela.

1 candela = 1 lumen / 1 stéradian

QUANTITÉS DE BASE MESURÉES EN PHOTOMÉTRIE (SUITE)

LUMINANCE

La brillance perçue d'une source étendue (pour l'observateur standard) est appelée **luminance** et est similaire à la radiance dans la mesure où elle quantifie la lumière émise par une surface étendue. L'unité métrique de base pour la luminance est le **nit**.

1 nit = 1 candela / 1 m^2

Une autre unité métrique pour la luminance est **l'apostilb** et l'unité anglaise similaire est le **pied-lambert**. Celles-ci sont spécifiques aux surfaces Lambertiennes qui seront discutées dans la prochaine section. Elles sont définies comme suit :

1 apostilb = ((candela / m^2) / π) = (1/π) nits
1 pied-lambert = (candela / ft2) / π

ÉCLAIREMENT LUMINEUX

Ce terme ressemble à l'irradiance dans la mesure où il quantifie la lumière qui atteint une surface. L'unité métrique pour l'éclairement lumineux est le **lux**. L'unité anglaise pour l'éclairement lumineux est le **pied-bougie**.

1 lux = 1 lumen / m^2
1 pied-bougie = 1 lumen / ft^2

Le Tableau 4-1 de Schwartz liste les valeurs d'éclairement lumineux recommandées pour une variété de sites ou d'activités et peut être une référence utile pour vous. D'autres unités pour la luminance et l'éclairement lumineux sont indiquées dans le Tableau 4-2 de Schwartz.

Faites attention de ne pas confondre *luminance* et *éclairement lumineux*. La luminance fait référence à l'éclat de lumière émise d'une surface. L'éclairement lumineux fait référence à la lumière qui atteint une surface.

Le Tableau 5-1 montre qu'il y a un parallèle entre les unités radiométriques et photométriques. La photométrie concerne la brillance apparente d'une lumière et cela dépend autant de la puissance rayonnée et de la valeur V(λ) de chaque longueur d'onde considérée.

Table 5-1: *Comparaison des unités radiométriques et photométriques*

DESCRIPTION	RADIOMÉTRIE	UNITÉ	PHOTOMÉTRIE	UNITÉ
Énergie	Énergie	Joule		
Énergie/temps (puissance)	Puissance rayonnée	Joules/sec (watt)	Puissance lumineuse	Lumen
Intensité d'une source ponctuelle	Intensité énergétique	Watts/stéradian	Intensité lumineuse	Lumens/stéradian (candela)
Énergie émise d'une source étendue	Radiance	Watts/str/m^2	Luminance	Lum/str/m^2 (candela/m^2) (nit)
Énergie qui arrive sur une surface	Irradiance	Watts/m^2	Éclairement lumineux	Lumens/m^2 (lux)

LECTURES RECOMMANDÉES/OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

- Schwartz SH. **Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004