

# Photométrie

## Introduction

Quand on regarde un objet éclairé (on regarde une petite zone de l'objet), l'œil perçoit deux choses :

- L'aspect plus ou moins clair  $\Rightarrow$  les valeurs
- L'aspect coloré  $\Rightarrow$  les couleurs

Si on regarde une source *primaire* de lumière, on parle plutôt de sa luminosité d'une part, et d'autre part de la lumière émise : lumière blanche ou colorée.

Pour caractériser *quantitativement* ces deux aspects, on utilise d'une part la photométrie, d'autre part la colorimétrie.

La photométrie mesure des « quantités de lumière » perçues par l'œil, émises par une source ou renvoyée par un objet.

La colorimétrie mesure la chromaticité de la lumière.

Du point de vue physique, une lumière est caractérisée par :

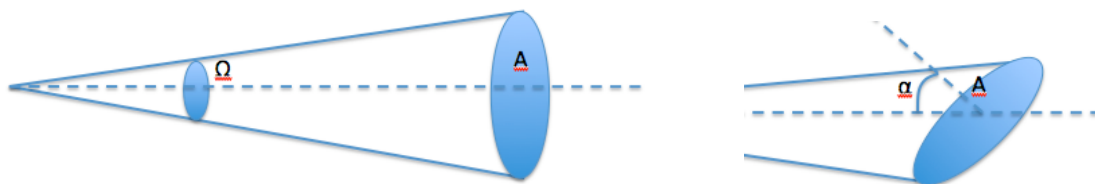
- Sa composition spectrale
- L'énergie qu'elle transporte

Ainsi, deux lumières ayant la même composition spectrale et la même énergie sont physiquement identiques.

Remarque importante : deux lumières physiquement différentes peuvent dans certains cas être perçues visuellement comme identiques. C'est le *métamérisme*. En effet, l'aspect coloré provient de la composition spectrale de la lumière : deux lumières de compositions spectrales différentes peuvent pourtant donner la même impression colorée.

## I. Flux lumineux et éclairement

On considère un faisceau de lumière émise par une source suffisamment petite pour être considérée comme ponctuelle. Ce faisceau est caractérisé par l'angle solide  $\Omega$ . Lorsqu'il tombe sur un objet il éclaire une surface  $A$  (aire) de l'objet.



1. Le flux lumineux  $\phi$  est la quantité de lumière émise (par la source), transportée (par le faisceau) ou reçue (par l'objet) par seconde. L'unité est le *lumen*.
2. Eclairement en un point d'un objet

Si  $A$  est suffisamment petite pour que l'éclairement soit *uniforme* en tout point de cette surface, alors l'éclairement en chaque point de  $A$  est :

- $e = \frac{\phi}{A}$  si l'axe du faisceau est perpendiculaire à  $A$
- $e = \frac{\phi \cos \alpha}{A}$  si l'axe du faisceau fait avec la perpendiculaire à  $A$  un angle  $\alpha$ .

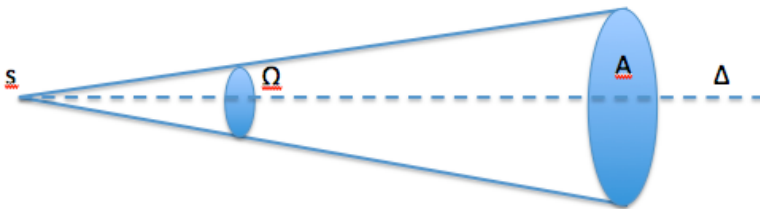
L'unité est le *lux* ( $lx$ ) qui correspond au *lumen par mètre carré* ( $lm.m^{-2}$ ).

Remarque 1 :  $e$  est inversement proportionnel à  $r^2$  (car  $\phi$  est proportionnel à  $\Omega = \frac{A \cos \alpha}{r^2}$ )

Remarque 2 :  $\phi$  est la somme des  $\phi_\lambda \Rightarrow e$  est la somme des  $e_\lambda$

Remarque 3 :  $E$ , l'éclairement par une source étendue (exemple : le ciel), est la somme des éclairements  $e_i$  des sources ponctuelles n°i.

## II. Intensité d'un faisceau lumineux dans une direction $\Delta$ donnée



Le flux transporté par unité d'angle solide est noté :  $i = \frac{\phi}{\Omega}$ .

Son unité est le *candela* ( $cd$ ), qui correspond au *lumen par stéradian* ( $lm.sr^{-1}$ ).

Remarque 1 :  $i$  est la somme des  $i_\lambda$

Remarque 2 :  $i$  dépend à priori de  $\Delta$  (exple : lampes « spots »), tandis que  $\Omega$  ne dépend que de la géométrie.

### III. Luminance d'une source dans une direction $\Delta$ donnée.

A l'époque, on parlait de « brillance »

#### 1. Définition

L'intensité lumineuse d'un faisceau est proportionnelle à l'aire de la surface émettrice de lumière. On définit l'intensité émise par unité de surface émettrice :

$$L = \frac{i}{s} \text{ si } \Delta \text{ est perpendiculaire à } s$$

$$L = \frac{i}{s \cos \theta} = \frac{i}{s_{\text{apparente de la source}}} \text{ si } \Delta \text{ fait l'angle } \theta \text{ avec } s$$

L'unité est le *candela par mètre carré* ( $cd.m^{-2}$ ). On appelle aussi cette grandeur « nit ».

Remarque 1 :  $L$  est la somme des  $L_\lambda$

Remarque 2 : à priori  $L$  dépend de la direction  $\theta$  mais lorsque la source de lumière est une surface qui diffuse la lumière également dans toutes les directions (on parle de diffuseur « orthotrope »),  $L$  ne dépend pas de  $\theta$ . On a alors la loi de Lambert  $e = e_0 \cos \theta$ , où  $e_0$  est l'éclairement dans la direction  $\theta = 0$  et  $e$  l'éclairement dans la direction  $\theta$

Remarque 3 : rendu des couleurs

Dans la reproduction d'une scène, le rapport entre la luminance de la zone la plus éclairée et celle de la zone la plus sombre est  $\approx 200$  (1000 maxi).

Pour une image (diapositive) sur un écran, c'est  $\approx 100$ .

Pour une image sur papier photo,  $\approx 40$ .

Remarque 4 :  $L = \frac{\varphi}{s \cos \theta \times \Omega} = \frac{\varphi}{s \cos \theta \times \frac{A \cos \alpha}{r^2}} = \frac{\varphi}{\Pi}$  où  $\Pi$  est l'« étendue géométrique »

du faisceau.]

#### 2. Facteur de luminance d'un objet éclairé

##### a. Définition

Le facteur de luminance s'écrit :

$$\beta = \frac{L}{L_{\max}} \quad 0 \leq \beta \leq 1$$

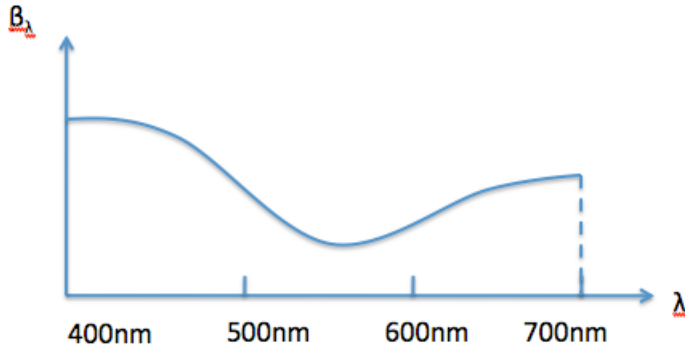
Il s'agit d'un nombre sans dimension entre 0% et 100%.

$L_{\max}$  est la luminance (dans la direction  $\Delta$ ) qu'on mesure en remplaçant l'objet par un diffuseur parfaitement blanc (en n'absorbant pas de lumière).

Remarque : pour un objet coloré,  $L$  dépend de  $\lambda$ . On définit  $\beta_\lambda = \frac{L_\lambda}{L_{\max}}$  comme étant le « facteur de luminance spectrale ».

b. Intérêt du facteur de luminance

$\beta_\lambda$  en fonction de  $\lambda$  donne la façon dont une surface éclairée modifie la composition spectrale de la lumière en la diffusant.



Par exemple, les courbes de divers pigments dans l'article « couleurs » de l'encyclopédie Universalis.

De plus, l'œil fonctionne en comparant les luminances avec celle de l'objet le plus clair. Il compare les rapports de luminance  $\Rightarrow \beta$  correspond au qualificatif « clarté » de la couleur d'une petite zone d'un objet (ou « luminosité » d'une lumière).

Remarque 1 :

- si  $\beta$  dépend de  $\lambda \Rightarrow$  objet coloré
- si  $\beta$  indépendant de  $\lambda \Rightarrow$  objet blanc, gris ou noir

(suivant que  $\beta$  soit voisin de 1, entre 0,2 et 0,8, ou voisin de 0)

Remarque 2 :

- si l'objet est un diffuseur orthotrope, on montre que  $L = \beta \frac{E}{\pi}$
- si l'objet est un diffuseur parfait,  $\beta = 1$  et  $L = \frac{E}{\pi}$

#### IV. Relations entre grandeurs photométriques et grandeurs énergétiques

La lumière est une forme d'énergie. D'un point de vue physique, c'est de l'énergie émise par une source, transportée par un faisceau, reçue par un objet éclairé.

On peut donc définir le flux d'énergie, l'intensité énergétique etc...

Le flux  $\phi_e$  s'exprime en *joule par seconde* ( $J.s^{-1}$ ) donc en *watts* ( $W$ ), l'intensité énergétique  $I_e$  en *watt par stéradian* ( $W.sr^{-1}$ ) etc...

Alors pourquoi des unités spéciales (*lumen* au lieu de *watts*, etc...) ? Le problème est que  $I_e$  ne correspond pas à l'intensité lumineuse telle qu'elle est perçue par nous.

Par exemple : une lumière monochromatique  $\lambda = 510 \text{ nm}$  (vert) est perçue comme deux fois moins intense qu'une lumière monochromatique  $\lambda = 555 \text{ nm}$  (vert-jaune) de même intensité énergétique.

Idem avec une lumière de  $\lambda = 610 \text{ nm}$  (orangé-rouge).

De même  $\lambda = 460 \text{ nm}$  (bleu) et  $\lambda = 660 \text{ nm}$  (rouge) sont perçues comme ayant des intensités égales à 6% de celle de  $\lambda = 555 \text{ nm}$ .

#### L'œil n'a pas la même sensibilité à toutes les longueurs d'onde visibles !

A la suite de nombreuses mesures, on a pu obtenir la courbe de visibilité relative des diverses longueurs d'onde par un « observateur moyen ». On la nomme « courbe d'efficacité lumineuse relative  $V(\lambda)$  ».

Le maximum de  $V(\lambda)$  est 1 pour  $\lambda = 555 \text{ nm}$ .

La limite de visibilité est  $V(\lambda) = 4 \cdot 10^{-4}$  pour  $\lambda = 400 \text{ nm}$  et  $\lambda = 725 \text{ nm}$

La relation entre  $\phi_e$  (énergétique) et  $\phi$  (visuel) est définie par :

$$\phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \phi_e$$

où  $K(\lambda)$  est l'efficacité lumineuse de l'œil à la longueur d'onde  $\lambda$ .

On définit le lumen par la relation :  $K(555\text{nm}) = 683 \text{ lm} \cdot W^{-1} (= K_{\max})$

Alors  $K(\lambda) = K_{\max} V(\lambda)$  et  $\underbrace{\phi(\lambda)}_{\text{visuel en lumen}} = \underbrace{683}_{\text{lm/W}} \times V(\lambda) \cdot \underbrace{\phi_e}_{\text{énergétique en watts}}$

D'où :  $\underbrace{I(\lambda)}_{\text{candela}} = 683 \times V(\lambda) \cdot \underbrace{I_e}_{\text{W/sr}}$

## V. Quelques ordres de grandeur

### 1. Eclairage

- Paysage sous la pleine Lune  $E = 0,2 \text{ lux}$
- Eclairages en intérieurs  $E = 100 \text{ à } 200 \text{ lux}$
- Eclairage pour une lecture confortable  $E = \text{quelques } 10^2 \text{ lux}$
- Eclairage pour une vision finie des couleurs (exple : salle de dessin)  
 $E = 1000 \text{ lux}$
- Eclairage en extérieur sous un ciel gris  $E = 3000 \text{ lux}$
- Eclairage sous scialytique (salle d'opération)  $E = 10000 \text{ lux}$
- Paysage sous le Soleil d'été au max.  $E = 100000 \text{ lux}$

Eclairage recommandés en conservation [d'après « la muséologie selon Georges-Henri RIVIERE (Dunod 1989) ] :

- Papiers et tissus  $E = 50 \text{ lux}$  (aquarelles, dessins, manuscrits, textiles, tapisseries)
- Peintures  $E = 150 \text{ à } 180 \text{ lux}$  (huile, détrempe, bois, cuirs, etc...)
- Objets  $E = 300 \text{ lux}$  (métaux, céramiques, bijoux, verres, émaux, sculptures, pierres non-polychromes...)
- La part des UV dans les sources lumineuses doit être inférieure à  $E = 70 \mu\text{W} \cdot \text{m}^2$  (mesurée par des ultraviomètres, et non des luxmètres qui mesurent la partie visible du rayonnement reçu).
- La détérioration par la lumière dépend non seulement de l'éclairage mais aussi de la durée d'exposition. Une norme porte sur le produit  $H = E \times t$  où  $H$  s'exprime en  $\text{lux} \cdot \text{heures}$ ). Les valeurs maximales par an sont :
  - Papier et textiles :  $H = 15000 \text{ lux} \cdot \text{h}$
  - Gravures, photos :  $H = 150000 \text{ lux} \cdot \text{h}$
  - Bois, ivoires, peintures :  $H = 600000 \text{ lux} \cdot \text{h}$
  - Pierres, métaux, céramiques : le facteur durée est secondaire

[d'après le site à l'URL suivantes :

[http://www.ace-fr.org/article.php3?id\\_article=122](http://www.ace-fr.org/article.php3?id_article=122)

ou encore :

<http://www.alyon.org/perso/byc/hga/museo.html> ]

## 2. Luminance

Valeurs limites dans le domaine de visibilité :

- seuil de perception  $L = 10^{-6} \text{ cd.m}^{-2}$  ( $\approx 10$  photons sur la rétine, absorbés par des bâtonnets)
- vision nocturne (scotopique)  $10^{-4} < L < 0,1 \text{ cd.m}^{-2}$
- vision intermédiaire (mésopique) :  $0,1 < L < 10 \text{ cd.m}^{-2}$
- vision diurne (photopique)  $L > 10 \text{ cd.m}^{-2}$
- seuil d'éblouissement  $L = 30\,000 \text{ cd.m}^{-2}$

Luminances de quelques sources :

- écran éclairé par un projecteur  $L \approx 50 \text{ cd.m}^{-2}$
- écran plat LCD (TV ou moniteur)  $L \approx 300 \text{ cd.m}^{-2}$
- pleine lune  $L \approx 3000 \text{ cd.m}^{-2}$
- bougie  $L \approx 5000 \text{ cd.m}^{-2}$
- ciel de jour  $L \approx \underbrace{3000}_{\text{ciel bouché, gris}}$  à  $\underbrace{10000}_{\text{ciel voilé, très brillant}} \text{ cd.m}^{-2}$
- soleil au zénith  $L \approx 1,5 \cdot 10^9 \text{ cd.m}^{-2}$

Luminance d'une feuille de papier à dessin ( $\rho = \underbrace{0,7}_{70\%}$ ) :

- Eclairée par  $E = 1000 \text{ lux}$  :  $L \approx 200 \text{ cd.m}^{-2}$
- Eclairée par  $E = \underbrace{100\,000}_{\text{Soleil au max}} \text{ lux}$  :  $L \approx 20\,000 \text{ cd.m}^{-2}$

Remarque :  $L = \rho \frac{E}{\pi}$  où  $\rho$  est le facteur de réflexion diffuse.