

## **Fiche n°6 (ronéo 8) : Lumière et couleurs**

### **I. Origine de l'émission lumineuse**

**Source primaire** : produit elle-même de la lumière, **2 possibilités** :

- **incandescence** → bougie, soleil, filament ampoule
- **luminescence** → photo/électro/bioluminescence

**Source secondaire** : la lumière interagit selon différents phénomènes physiques : **réfraction, diffusion, interférences, absorption suivie d'émission** (photoluminescence)

### **II. Les modèles de diffusion de la lumière**

**Diffusion** : propriété de la matière de **disperser la lumière dans toutes les directions**, elle est provoquée par l'**interaction** de la **lumière** avec les **particules** (ex : celles présentes dans l'air)

**Mécanisme** : les photons rencontrent des particules → leur direction/énergie change

Il existe 2 types de diffusion selon la taille des particules que rencontre la lumière : la diffusion de **Rayleigh** et la diffusion de **Mie**

#### **A. Diffusion de Rayleigh**

Pour des **particules très petites**, i.e. des particules pour lesquelles

$$\text{taille} < \frac{\lambda}{10}$$

Cette diffusion est **symétrique**, i.e. que la lumière diffuse autant vers l'avant que vers l'arrière

**! Elle ne se fait pas perpendiculairement à la direction de propagation**

On observe une **très forte variation de l'intensité en fonction de la longueur d'onde** (différence importante par rapport à la diffusion de Mie) et du **nombre de particules**

→ **plus la longueur d'onde est faible, plus elle est diffusée** :

$$I \propto \frac{N}{\lambda^4} (1 + \cos(2\theta))$$

Ainsi, la lumière **bleue** est plus efficacement diffusée que la lumière **rouge** d'un facteur environ égal à **10**

#### **B. Diffusion de Mie**

Pour des **particules plus grosses**, i.e. des particules pour lesquelles

$$\text{taille} > \frac{\lambda}{10}$$

Cette diffusion est une **distribution angulaire dissymétrique**

L'intensité de lumière diffusée **dépend PEU de la longueur d'onde** → elle dépend essentiellement de la **taille de la particule**

La **fraction rétrodiffusée** sera d'autant plus **faible** que la particule est **grosse**



Point météo : application → couleur du ciel

**Ciel bleu** : la diffusion de **Rayleigh** domine car l'atmosphère Terre est essentiellement composée de molécules d'O<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub> (dont la **taille**  $< \frac{\lambda}{10}$ )

→ **on ne perçoit pas les photons émis mais les photons diffusés**. Or, plus la longueur d'onde est faible, plus elle est diffusée, on voit donc le ciel **bleu** (mais pas violet car notre œil y est moins sensible est l'intensité lumineuse du Soleil est plus faible à ces longueurs d'ondes).

**Ciel jaune, orangé et rouge** : au coucher et au levant, i.e. quand le soleil est bas → les rayons traversent une **part plus importante de l'atmosphère, il y a moins de longueurs d'onde courtes** (car elles ont été diffusées) donc on voit les couleurs restantes. Ainsi, pour une direction proche du soleil, la diffusion de **Rayleigh** prédomine.

**Blancheur des nuages** : la diffusion de **Mie** domine (car les gouttelettes d'eau sont de grosses particules), or la diffusion dépendant très TRÈS peu de la longueur d'onde, **toutes les couleurs sont diffusées de la même façon**, ce qui donne une lumière blanche **La diffusion de Mie est plus efficace quand on regarde vers la source des rayons incidents** (donc par exemple si on regarde très proche du Soleil on voit le ciel plus clair à cause de la diffusion de Mie).

**NB** : l'atténuation lumière traversant un milieu est due à **l'absorption** et la **diffusion** de la lumière par ces molécules

### III. Diffusion et absorption

#### A. Absorption

La **couleur d'un objet** dépend de :

- ce que les pigments constituant l'objet diffusent et absorbent : ils absorbent **certaines longueurs d'onde**, le reste des REM est diffusé ; l'objet apparaît ainsi sous une **couleur complémentaire des longueurs d'onde absorbées**
- la composition de la lumière qui éclaire l'objet, il sera **coloré si la lumière contient des longueurs d'onde n'étant pas absorbées**

**NB** : la réflexion de surface peut être **spéculaire** (surface lisse, ex : miroir) ou **diffuse** (surface rugueuse, ex : pomme). Il existe également la **diffusion de volume** (lorsque la lumière pénètre dans la première couche d'un matériau, elle est susceptible de repartir)

**Exemples du diapo** : carotte → absorption autour du violet et du vert (donc elle apparaît orange)  
hémoglobine → absorption au niveau du bleu et du jaune

#### Loi de Beer-Lambert :

**L'absorption d'un faisceau lumineux** dépend de : la **longueur** du trajet optique  $l$ , du **coefficient d'extinction  $K(\lambda)$**  et de la **concentration  $C$**  d'atomes

On peut ainsi calculer l'**intensité transmise à travers une substance absorbante** :

$$K(\lambda).C = \text{atténuation}$$

$$K(\lambda).C.l = \text{absorbance}$$

$$I_{\text{trans}} = I_{\text{inc}} e^{-K(\lambda).C.l}$$

On utilise cependant plus fréquemment **l'absorbance  $A(\lambda)$**  :

$$A(\lambda) = -\ln \left( \frac{I_{trans}}{I_{inc}} \right)$$

En **spectroscopie**, on utilise surtout l'absorbance avec  $\log_{10}$  :

$$A_{\lambda}^s = -\log_{10} \left( \frac{I_{trans}}{I_{inc}} \right) = \frac{A_{\lambda}}{\ln(10)}$$

## B. Diffusion (scattering) et section efficace

**Section efficace** : façon de quantifier la **fraction de lumière** qui est renvoyée dans une direction autre que l'incidente.

Soit un flux lumineux  $\Phi_{EC} = I \cdot A$ , qui arrive sur un objet diffusant → **une fraction du flux est diffusée** :

$$\Phi_{inc} = I_0 \cdot A \quad \Phi_{diff} = I_0 \cdot \sigma_s \quad \Phi_{out} = I_0 \cdot (A - \sigma_s)$$

**Coefficient de diffusion** :

$$\mu_s = N_s \cdot \sigma_s$$

/!\  $\mu_s$  est l'inverse d'une longueur

**Coefficient d'absorption** :

$$\mu_a = C \cdot K(\lambda)$$

**Libre parcours moyen d'absorption et de diffusion** : un photon va se déplacer dans un système et va se heurter à diverses particules diffusantes, on définit une **distance moyenne au bout de laquelle le photon va être efficacement diffusé ou absorbé**, elle est inversement proportionnelle au coefficient :

**Libre parcours moyen de diffusion** :

$$l_s = \frac{1}{\mu_s} = \frac{1}{N_s \cdot \sigma_s}$$

**Libre parcours moyen d'absorption** :

$$l_a = \frac{1}{\mu_a} = \frac{1}{C \cdot K(\lambda)}$$

/!\ La diffusion et l'absorption dépendent de la longueur d'onde +++

La diffusion augmente quand la longueur d'onde diminue :  $\mu_s = A \cdot \lambda^{-b}$ , où  $b \approx 4$  (Rayleigh) et  $b \approx 0,5$  (Mie)

### Transport de lumière dans les tissus biologiques :

L'eau absorbe fortement dans l'UV et l'IR mais il y a une plage où l'eau n'absorbe rien, c'est la **fenêtre de transparence**

L'absorption est majoritairement due à la présence de protéines, Hb, collagène, le coefficient est fort sur la fenêtre transparence de l'eau. Elle correspond à la longueur d'onde où elle est la moins forte → **plage 600-1000nm** = fenêtre thérapeutique

Modélisation transport lumière dans les tissus dépend de **l'importance relative des coefficients optiques d'absorption et de diffusion**, il existe 3 cas :

- $\mu_a \gg \mu_s$ , l'**absorption** domine :  $300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 2000 \text{ nm}$
- $\mu_s \gg \mu_a$ , la **diffusion** domine :  $600 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1000 \text{ nm}$
- $\mu_s \approx \mu_a \rightarrow$  **coeff d'extinction global**  $\mu = \mu_s + \mu_a$

**Loi d'atténuation généralisée** :

$$I_{trans} = I_{inc} \cdot e^{-\mu \cdot l}$$

→ l'absorption est **importante** dans l'UV et l'IR mais **faible** dans le rouge et le proche IR (cf fenêtre thérapeutique)

#### IV. Rudiments de photométrie

La photométrie est tout ce qui a trait à la **mesure de la quantité de lumière** qui est produite par une **source** et qui contribue à l'**éclairage** d'un **objet** ou la **quantité de lumière émise par cet objet**. La **photométrie visuelle** s'intéresse à ces quantités mais du point de vue de nos **capteurs visuels**

**Angle solide** : région de l'espace limité par un **cône nécessairement circulaire** :  
Avec A, surface découpée par le cône dans une sphère

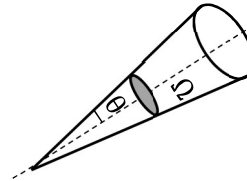
$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

**Angle solide sous-tendu par un cône d'ouverture  $\theta$  :**

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta)$$

**Cas particuliers :**

<b>Sphère</b>	$\Omega = 4\pi$
<b>Hémisphère</b>	$\Omega = 2\pi$
<b>Pour <math>\theta = 60^\circ</math></b>	$\Omega = \pi$
<b>Trièdre</b>	$\Omega = \pi/2$
<b>Pour <math>\theta = 33^\circ</math></b>	$\Omega = 1$



#### A. Intensité

L'intensité mesure une **puissance**, fournie par une **source ponctuelle** par unité d'angle solide dans une direction donnée.

Unité :  $1W/sr$

##### 1. Intensité énergétique

L'intensité énergétique mesure la **puissance énergétique** (i.e. en termes d'OEM) par **unité d'angle solide** dans une **direction donnée**.

**Intensité énergétique pour une source monochromatique :**

$$I_\lambda^e = \frac{d\Phi_\lambda}{d\Omega}$$

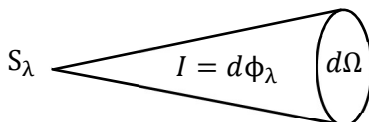
**Pour une source polychromatique :**

$$I^e = \int I_\lambda^e d\lambda$$

##### 2. Intensité lumineuse

Unité : candela ( $1cd = 1lm/sr$ )

En **photométrie visuelle**, on prend en compte la perception en fonction de la longueur d'onde. Ainsi, l'intensité lumineuse vaut



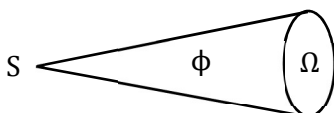
$$I_\lambda = K_m \cdot V(\lambda) \frac{d\Phi_\lambda}{d\Omega}$$

**Point unités**

- $K_m = 683$
- $V(\lambda)$  = fonction de visibilité

#### B. Flux lumineux = puissance lumineuse

Unité : lumen ( $1lm = 1cd \cdot sr$ )



Elle représente la **puissance visible d'un rayonnement**, fournie par une **source ponctuelle**, dans un angle solide donné (dépend de la sensibilité de l'œil)

Si l'intensité est **constante** :

$$\Phi = I \cdot \Omega$$

Si la source émet uniformément dans **toutes les directions** :

$$\Phi = 4\pi \cdot I$$

**C. Le rendement = efficacité lumineuse**Unité :  $lm/W$ 

Elle correspond à la **comparaison** de la **puissance lumineuse** visible avec la **puissance totale P consommée** :

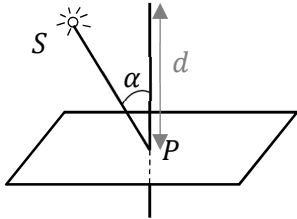
$$r = \frac{\Phi}{P}$$

Du fait de la définition de l'intensité lumineuse, on en déduit que ce rendement à une valeur max égale à  $r = 683lm/W$

**D. Éclairement**Unité : lux ( $1lx = 1lm/m^2$ )

$$E_m = \frac{\Phi}{S}$$

L'**éclairement lumineux**  $E_m$  d'une **surface S** vaut :



Éclairement en un point P d'une surface :  $E_P = \frac{I \cdot \cos \alpha}{d^2}$  en incidence normale :

$$E_P = \frac{I}{d^2}$$

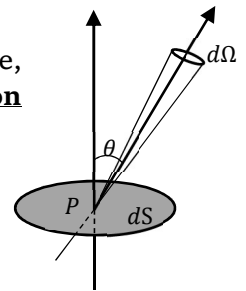
En QCM si on ne vous précise pas l'angle d'incidence, considérez que l'on est en incidence normale

**E. Luminance**Unité :  $cd/m^2$ 

Elle caractérise l'éclat d'une **source étendue**

L'**intensité lumineuse** due à l'élément de surface  $dS$ , dans la direction donnée, par **élément de surface apparent**  $dA = dS \cdot \cos \theta$ , **perpendiculaire à la direction donnée** vaut :

$$L = \frac{dI}{dA}$$

**F. Émittance****1. Définition**Unité :  $lm/m^2$ 

Elle mesure la **puissance lumineuse** par unité de surface d'une **source étendue**, lorsqu'elle émet un **rayonnement visible** dans **toutes les directions** vers l'extérieur de la source :

$$M = \frac{d\Phi}{dS}$$

**2. Source de Lambert**

**Source de Lambert** : source dont la **luminance** est la **même dans toutes les directions**  
→ **source orthotrope** :

$$M = \pi \cdot L$$

**3. Loi de Stefan**Unité :  $W \cdot m^{-2} \cdot K^4$ 

En photométrie énergétique, on peut définir l'**émittance énergétique** totale du corps noir par la **loi de Stefan** :

$$M_e = \sigma \cdot T^4$$

	Définition	Formule	Unité
<b>Intensité lumineuse</b>	Puissance fournie par une source ponctuelle par unité d'angle solide dans une direction donnée	$I_\lambda = Km.V(\lambda) \frac{d\Phi}{d\Omega}$ $I = \frac{\Phi}{\Omega}$	$1cd = 1lm/sr$
<b>Flux lumineux</b>	<b>Puissance visible d'un rayonnement</b> , fournie par une <b>source ponctuelle</b> , dans 1 angle donné	Si <b>intensité constante</b> : $\Phi = I. \Omega$	$lm$
<b>Rendement</b>	<b>Comparaison de la puissance lumineuse visible avec la puissance totale P consommée</b>	$r = \frac{\Phi}{P}$	$lm/W$
<b>Éclairement sur une surface</b>	Éclairement lumineux $E_m$ d'une surface $S$	$E_m = \frac{\Phi}{S}$	$lux$ ( $1lx = 1lm/m^2$ )
<b>Éclairement sur un point donné</b>	Éclairement lumineux $E_p$ au niveau d'un point donné	$E_p = \frac{I \cos \alpha}{d^2}$	$lux$ ( $1lx = 1lm/m^2$ )
<b>Éclairement sur un point donné</b>	Éclairement lumineux $E_p$ au niveau d'un point donné en incidence normale	$E_p = \frac{I}{d^2}$	$lux$ ( $1lx = 1lm/m^2$ )
<b>Luminance</b>	<b>Intensité lumineuse</b> due à l'élément de surface $dS$ , dans la direction donnée, par <b>élément de surface apparent</b> $dA = dS \cdot \cos \theta$ , <b>perpendiculaire à la direction donnée</b>	$L = \frac{dI}{dA}$	$cd/m^2$
<b>Émittance</b>	<b>Puissance lumineuse</b> par unité de surface d'une <b>source étendue</b> , lorsqu'elle émet un <b>rayonnement visible</b> dans <b>toutes les directions</b> vers l'extérieur de la source	$M = \frac{d\Phi}{dS}$	$lm/m^2$
	<b>Source de Lambert</b> : source dont la luminance est la même dans toutes les directions	$M = \pi. L$	
<b>Émittance énergétique</b>	<b>Application</b> : Loi de Stefan	$Me = \sigma. T^4$	$W.m^{-2}.K^4$