

Fiche n°6 (ronéo 9) : 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'O₂ et de N₂ (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**.

Ciel jaune, orangé et rouge : au coucher et au lever, 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**, surtout le bleu, qui est diffusé dans toutes les directions. 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 ne dépend pas 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.

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)

Exemples du diapo : carotte → absorption autour du violet et du vert
hémoglobine → absorption au niveau du bleu et du jaune

$K(\lambda) \cdot C = \text{atténuation}$

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** :

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

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

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

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

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

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 \rightarrow 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 :

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

$\Delta \mu_s$ 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**, 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 :

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

Δ 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)

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

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 \rightarrow **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 :

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

IV. Rudiments de photométrie

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 θ :

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

Cas particuliers :

| | |
|--------------------------|------------------|
| Sphère | $\Omega = 4\pi$ |
| Hémisphère | $\Omega = 2\pi$ |
| Pour $\theta = 60^\circ$ | $\Omega = \pi$ |
| Trièdre | $\Omega = \pi/2$ |
| Pour $\theta = 33^\circ$ | $\Omega = 1$ |

A. Intensité lumineuse

Unité : candela (1cd=1W/sr)

C'est une mesure de la **puissance fournie** par une **source ponctuelle** par unité d'angle solide dans une **direction donnée**. Elle correspond ainsi à la puissance des OEM émises par **source monochromatique S_λ** , dans $d\Omega$

Intensité énergétique en photométrie énergétique :

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

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

$$I_\lambda = Km \cdot V(\lambda) \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

B. Flux lumineux = puissance lumineuse

Unité : lumen (1cd=1lm/sr)

Elle représente la **puissance visible d'un rayonnement**, fournie par une **source ponctuelle**, dans 1 angle donné (dépend de la sensibilité de l'œil)

Si l'intensité est **constante** :

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

Si elle se trouve dans **toutes les directions** :

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

Point unités

- A = surface découpée par le cône dans une sphère
- $V(\lambda)$ = fonction de visibilité

C. Le rendement = efficacité lumineuse

Unité : lm/W

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

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

D. Éclairement

Unité : lux (1lx=1lm/m²)

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

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

Éclairement en un point P d'une surface :

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

E. Luminance

Unité : cd/m²

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. ÉmittanceUnité : lm/m²

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 :

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

On peut calculer l'émittance totale du corps noir selon la **loi de Stefan** :

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

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

$$M = \pi \cdot L$$

| | Définition | Formule | Unité |
|---------------------------------------|--|--|----------------------------------|
| Intensité lumineuse | Puissance fournie par une source ponctuelle par unité d'angle solide dans une direction donnée | $I_\lambda = Km \cdot V(\lambda) \frac{d\Phi}{d\Omega}$ | 1cd=1W/sr |
| Flux lumineux | Puissance visible d'un rayonnement , fournie par une source ponctuelle , dans 1 angle donné | Si intensité constante : $\Phi = I \cdot \Omega$ | cd/m ² |
| Rendement | Comparaison de la puissance lumineuse visible avec la puissance totale P consommée | $r = \frac{\Phi}{P}$ | lm/W |
| Éclairement sur une surface | Éclairement lumineux E_m d'une surface S | $E_m = \frac{\Phi}{S}$ | lux (1lx=1lm/m ²) |
| Éclairement sur un point donné | Éclairement lumineux E_p au niveau d'un point donné | $E_p = \frac{I}{d^2}$ | lux (1lx=1lm/m ²) |
| Luminance | 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 | $L = \frac{dI}{dA}$ | lumen (1cd=1lm/sr) |
| Émittance | 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 | $M = \frac{d\Phi}{dS}$ | lm/m ² |