

# Lumière et couleurs

## I. Modèles de diffusion de la lumière

La **diffusion** est la propriété de la matière de disperser la lumière dans toutes les directions.

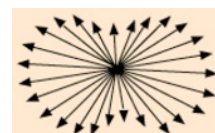
On distingue **2 types de diffusion** selon la taille des particules : diffusion de Rayleigh et de Mie.



### A. Diffusion de Rayleigh

→ Concerne les **petites particules** : taille  $< \frac{\lambda}{10}$ . Ex :  $O_2$  ou  $N_2$  dans l'air.

→ Dans la diffusion de Rayleigh, la diffusion se fait autant vers l'avant que vers l'arrière, mais pas perpendiculairement à la direction de propagation.



→ La diffusion dépend de la longueur d'onde : plus la longueur d'onde est faible, plus elle est diffusée car l'intensité  $I$  de la lumière diffusée est telle que :  $I \propto N \frac{1}{\lambda^4} (1 + \cos^2 \theta)$  où  $N$  est le nombre de particules par unité de volume, et  $\theta$  l'angle que fait la direction d'observation avec la direction de la lumière incidente.

⇒ La **lumière bleue** ( $\lambda = 480nm$ ) sera plus efficacement diffusée que la **lumière rouge** ( $\lambda = 650nm$ )

### Application à la couleur du ciel :

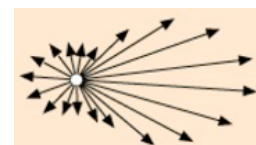
**Couleur bleue du ciel** : La Terre possède une atmosphère principalement constituée de molécules de dioxygène (21%) et de diazote (78%) avec une faible proportion de gaz carbonique et d'eau. Les rayons du Soleil sont diffusés par ces molécules ou particules d'autant plus efficacement que la longueur d'onde est courte : le bleu est plus diffusé que le rouge et le ciel apparaît bleu.

**Couleur rouge au couchant** : Lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, les rayons qui nous parviennent ont traversé une part plus importante de l'atmosphère, le nombre de molécules sur lesquelles rebondir augmente considérablement. Les longueurs d'onde (bleu et violet) ont eu le temps d'être complètement diffusées. Ainsi, en l'absence des composantes bleu et violet, il ne reste que du jaune et du rouge.

### B. Diffusion de Mie

→ Concerne les **grosses particules** : taille  $> \frac{\lambda}{10}$ .

→ La diffusion dépend de la taille de la particule : la fraction rétro-diffusée est d'autant plus faible que la particule est grosse. *Dans la diffusion de Mie, la longueur d'onde joue très peu (considérer qu'elle ne joue pas sur la diffusion).*



### Application à la couleur du ciel :

Plus l'atmosphère est chargée de gouttelettes d'eau, plus le ciel devient blanc par la diffusion de Mie qui domine lorsque les gouttelettes ont une taille importante.

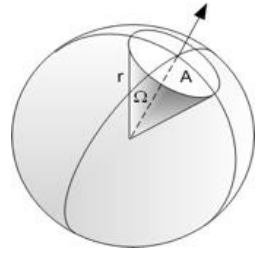
⇒ **Blancheur des nuages** (car comme la diffusion ne dépend pas de  $\lambda$ , toutes les couleurs sont diffusées de la même façon → lumière blanche)

## II. Rudiments de photométrie

### Préalable : notion d'angle solide

Le concept d'angle solide (en 3D) généralise le concept d'angle plan (angle classique en 2D).

Un angle solide est une région de l'espace limitée par un cône non nécessairement circulaire. Le sommet du cône est le sommet de l'angle solide.



L'unité de mesure de l'angle solide est le stéradian (sr).

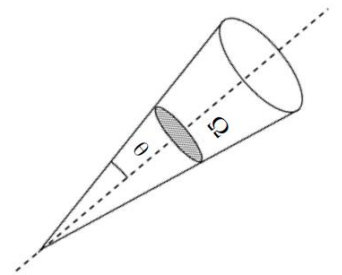
La mesure d'un angle solide est la mesure de la surface découpée par celui-ci sur une sphère ayant pour centre le sommet de l'angle solide et un rayon unité  $r$ .

Pour tout angle solide sous-tendu par un cône d'ouverture  $\theta$  on a :

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

➤ Valeurs particulières de  $\Omega$  (à retenir)

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

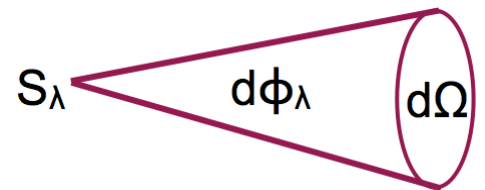


NB :  $0 \leq \Omega \leq 4\pi$

### A. Intensité lumineuse

L'intensité (énergétique ou lumineuse) mesure la **puissance fournie par une source ponctuelle, par unité d'angle solide dans une direction donnée**. Elle s'exprime en candela (cd) :  $1 \text{ cd} = 1 \text{ W/sr}$

Soit une source monochromatique  $S_\lambda$  de longueur d'onde  $\lambda$ . On note  $d\phi_\lambda$  la puissance des ondes électromagnétiques émises par la source dans  $d\Omega$ .



→ En **photométrie énergétique**, l'**intensité énergétique** est donnée par :  $I_\lambda^e = \frac{d\phi_\lambda}{d\Omega}$

→ En **photométrie visuelle**, on tient compte de la perception en fonction de la longueur d'onde. L'**intensité lumineuse** est donnée par :  $I_\lambda = Km V(\lambda) \frac{d\phi_\lambda}{d\Omega}$

🌈 Où  $V(\lambda)$  est la fonction de visibilité (maximale pour  $\lambda \approx 555 \text{ nm}$ ), et  $Km = 683$  par convention.

## B. Flux lumineux

Le flux lumineux  $\phi$  mesure la **puissance lumineuse (perceptible) d'une source rayonnant dans un angle solide donné**.

Si l'intensité est constante dans toutes les directions, alors :

$$\phi = \Omega I$$

Ex : si l'angle solide  $\Omega$  considéré correspond à tout l'espace ( $\rightarrow$  sphère), alors  $\phi = 4\pi I$

Le flux lumineux est exprimé en lumen (lm). Le lumen est la valeur du flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle située au sommet de cet angle et dont l'intensité lumineuse vaut 1 candela dans toutes les directions.

$$\Rightarrow 1 \text{cd} = 1 \text{lm/sr}$$

### Rendement d'une source lumineuse :

On définit le rendement d'une source lumineuse (souvent appelé efficacité lumineuse) en comparant la puissance lumineuse (visible) de cette source avec la puissance totale  $P$  qu'elle consomme.

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

## C. Eclairement

### Eclairement moyen

Soit une surface  $S$  éclairée par un rayonnement lumineux. L'éclairement lumineux  $E_m$  moyen de cette surface est égal au rapport du flux lumineux incident sur cette surface par l'aire de la surface :

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

$\rightarrow$  L'éclairement s'exprime en lux :  $1 \text{lux} = 1 \text{lumen/m}^2$ .

*Donc 1 lux est l'éclairement à 1 m produit par une source dont l'intensité est 1 cd, dans un angle solide de 1 stéradian (le flux lumineux dans cet angle solide correspondant à 1 lumen).*

### Eclairement en un point

On veut calculer l'éclairement en un point  $P$  d'une surface par une source  $S$  située à une distance  $d$  de  $P$ , et dont on connaît l'intensité lumineuse  $I$  (on suppose que la source émet de façon uniforme dans toutes les directions).

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

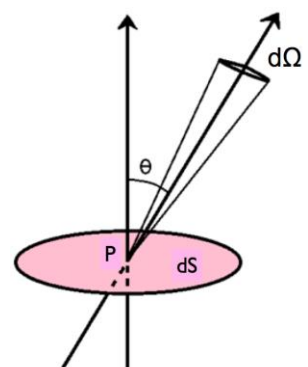
## D. Luminance

La luminance  $L$  caractérise **l'éclat d'une source étendue**, c'est-à-dire qui n'est pas perçue comme un point mais comme une surface (écran de télévision, sujet d'une photographie, etc).

On considère une petite portion  $dS$  de surface entourant un point  $P$  de cette surface sous un angle  $\theta$  par rapport à la normale, et petit angle solide  $d\Omega$  de sommet  $P$ .

Soit  $I$  l'intensité lumineuse et la surface apparente  $dA = dS \cos\theta$ , on a :

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



## E. Emittance

L'émittance  $M$  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.

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

L'émittance s'exprime en  $lm/m^2$ .

### Source de Lambert :

On appelle **source de Lambert** une source dont la luminance est la même dans toutes les directions. On dit alors de cette source qu'elle est **orthotrope**.

*Ex : le corps noir ou une surface parfaitement diffusante*

Pour une telle source, on a :

$$M = \pi L$$