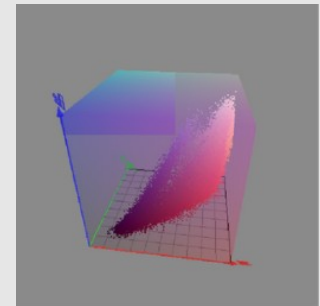
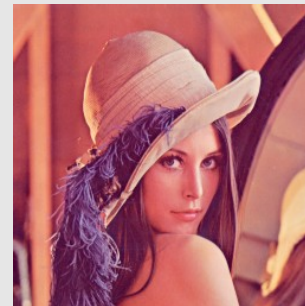


Traitement d'Images

Semaine 1 : de la lumière à l'image



Plan du cours

1 – Généralités

**types d'images, niveau de gris, composantes couleur
triplet (source lumineuse + objet + observateur)**

2 – Source lumineuse

**grandeurs photométriques, spectre
corps noir, illuminant et illuminants standards**

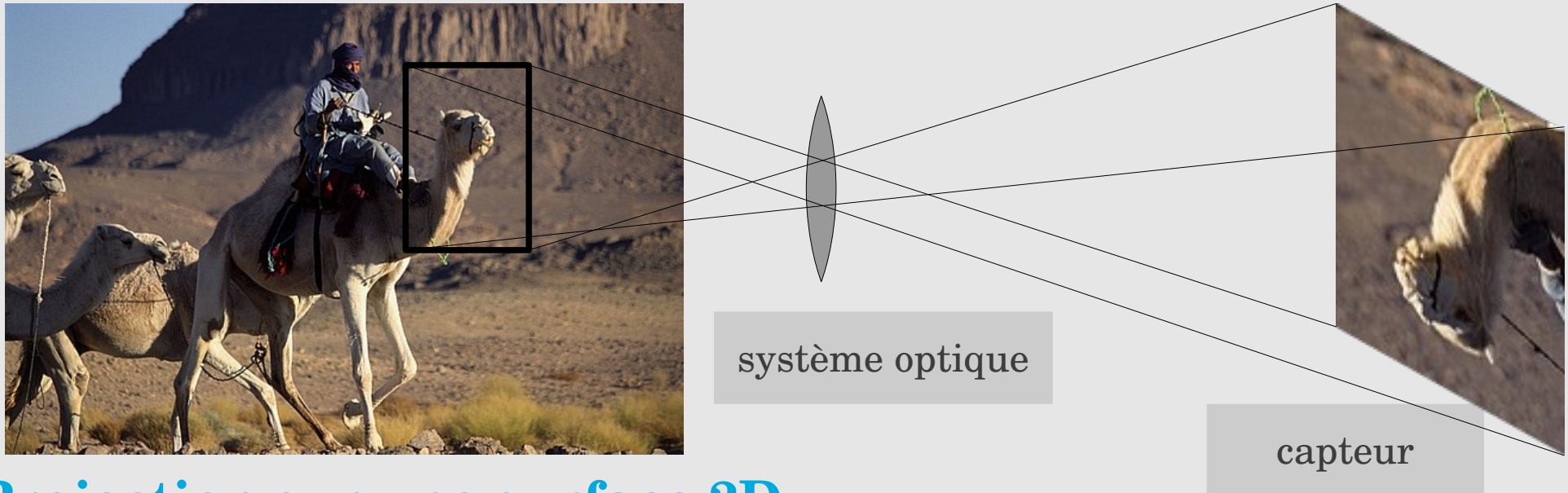
3 – Objet

**réflexion diffuse, spéculaire
BRDF et réflectance spectrale**

4 – Observateur

**sensibilité, sensibilité spectrale
grandeurs énergétiques et photométriques**

Image : représentation bidimensionnelle d'une scène



Projection sur une surface 2D

formée au travers d'un **système optique**, l'image est la **projection** d'une partie de l'**information lumineuse** sur une surface 2D.

Perte irréversible

l'information contenue dans l'image est beaucoup **moins riche** que celle contenue dans la scène initiale.

Image continue : fonction de deux variables

Fonction image

fonction $I : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^n, (x,y) \rightarrow I(x,y)$

n est le nombre de **composantes** de l'image ($n \geq 1$)

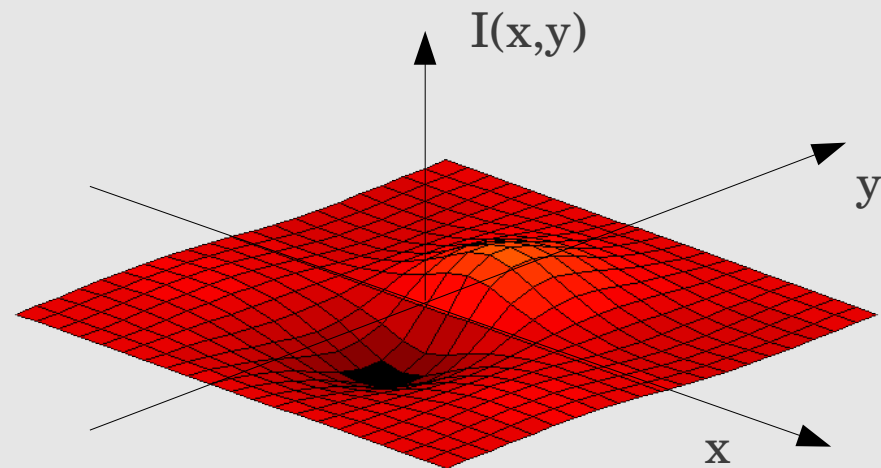
dans ce cas, l'espace \mathbb{R}^2 est appelé **plan image**.

Support de l'image

sous ensemble de \mathbb{R}^2 de définition de $I(x,y)$, de surface **finie**, en général un **rectangle**, de côtés T_x et T_y .

Exemple à 1 composante :

$I(x,y) = e^{-(x^2+y^2)} \cdot \cos(x) \cdot \sin(y)$,
pour $x \in [-\pi, \pi]$ et $y \in [-\pi, \pi]$
(support carré)



Composantes des images

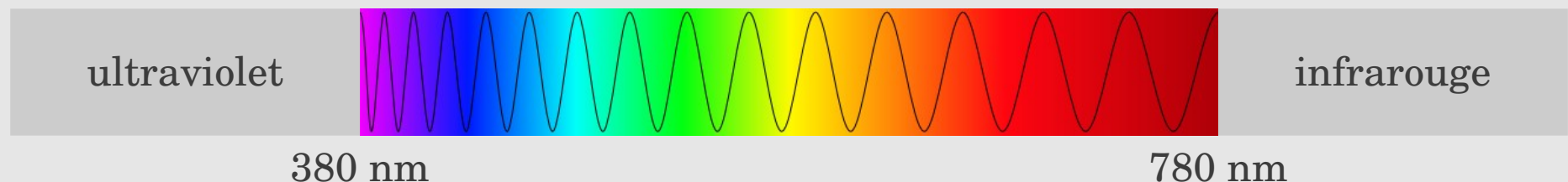
1 seule composante : niveau de gris

le niveau de gris est une **mesure** de l'**éclairement énergétique** reçu par le capteur d'image.

image qualifiée de **monochrome**, ou « en niveau de gris ».

Images multi-spectrales

chaque composante mesure l'éclairement reçu par le capteur dans une **gamme de fréquences** du signal électromagnétique.



Images couleur : 3 composantes

composantes standard : rouge, vert, bleu.

correspond à la perception des couleurs par l'être humain.

Composantes d'une image couleur (R,V,B)

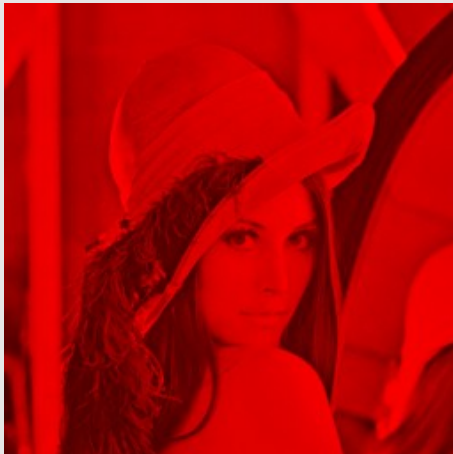


Image couleur



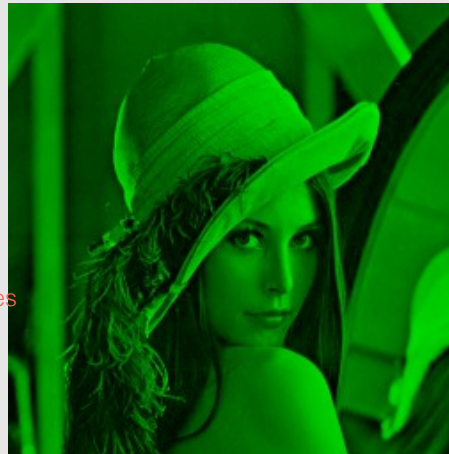
luminance

60 a 70 composantes



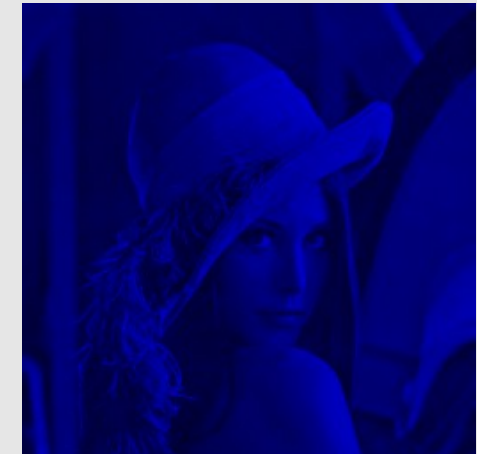
rouge

15 a 20 composantes



vert

150 a 200
composantes



bleu

3 a 4
composantes

Types d'images



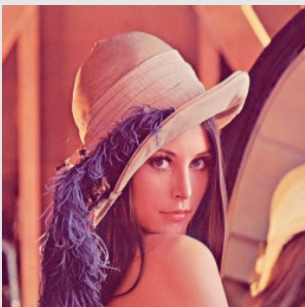
Images d'émission

les éléments de la scène **émettent** les ondes électromagnétiques perçues par le capteur.
exemple : image thermique.



Images d'absorption (ou transmission)

les éléments observés **absorbent** une partie des rayons électromagnétiques, le **reste** est perçu.
exemple : radiographie numérique.



Images de réflexion

les rayons provenant d'une source sont **réfléchis** ou **diffusés** par un objet puis atteignent le capteur.
c'est le cas le plus courant.

Formation des images de réflexion

Le triplet (source lumineuse, objet, observateur)

la source lumineuse est la source d'**énergie**, transmise par l'intermédiaire d'un **rayonnement électromagnétique**.

l'objet **réfléchit** les rayons reçus dans plusieurs directions.

l'observateur capte une **partie** de l'énergie réfléchie vers lui.



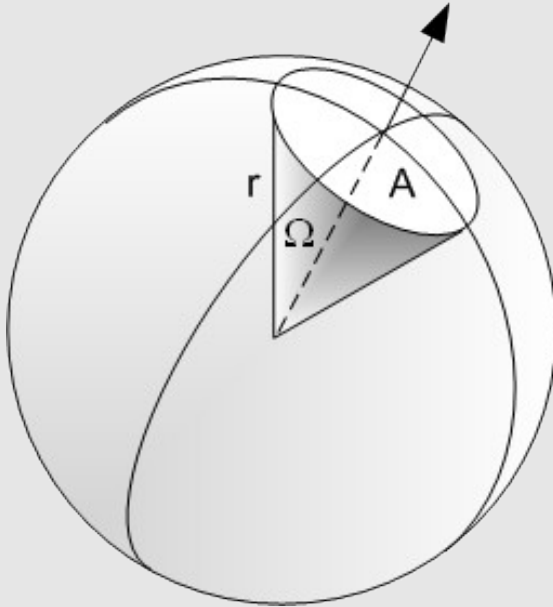
Source : point lumineux

Flux énergétique (unité : W)

puissance **totale** émise par la source dans **toutes** les directions, pour toutes les **longueurs d'onde** du spectre électromagnétique.

Intensité énergétique (unité W.sr⁻¹)

flux énergétique émis dans une **direction** donnée pour un **angle solide** unitaire.



Angle solide (unité stéradian = sr)

projection d'une **portion de l'espace** sur une **sphère** de rayon r ;

$$\text{angle solide} = \Omega = A / r^2$$

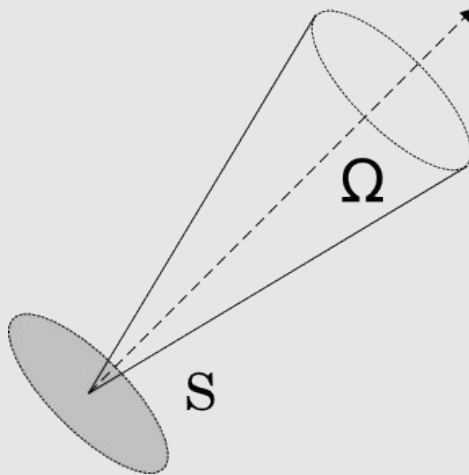
angle solide pour la **totalité de l'espace** :

$$(4\pi \cdot r^2) / r^2 = 4\pi \text{ sr}$$

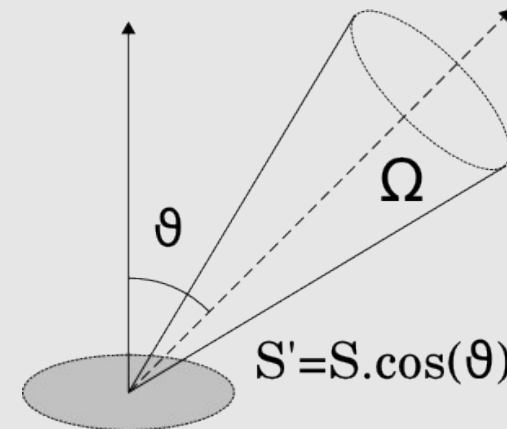
Source : surface lumineuse

Luminance énergétique (unité: $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$)

intensité énergétique par unité de **surface**. la **surface lumineuse** est supposée **perpendiculaire** à la direction de l'intensité énergétique (sinon, multiplication par un cosinus).



intensité énergétique
émise dans une direction
orthogonale à la surface

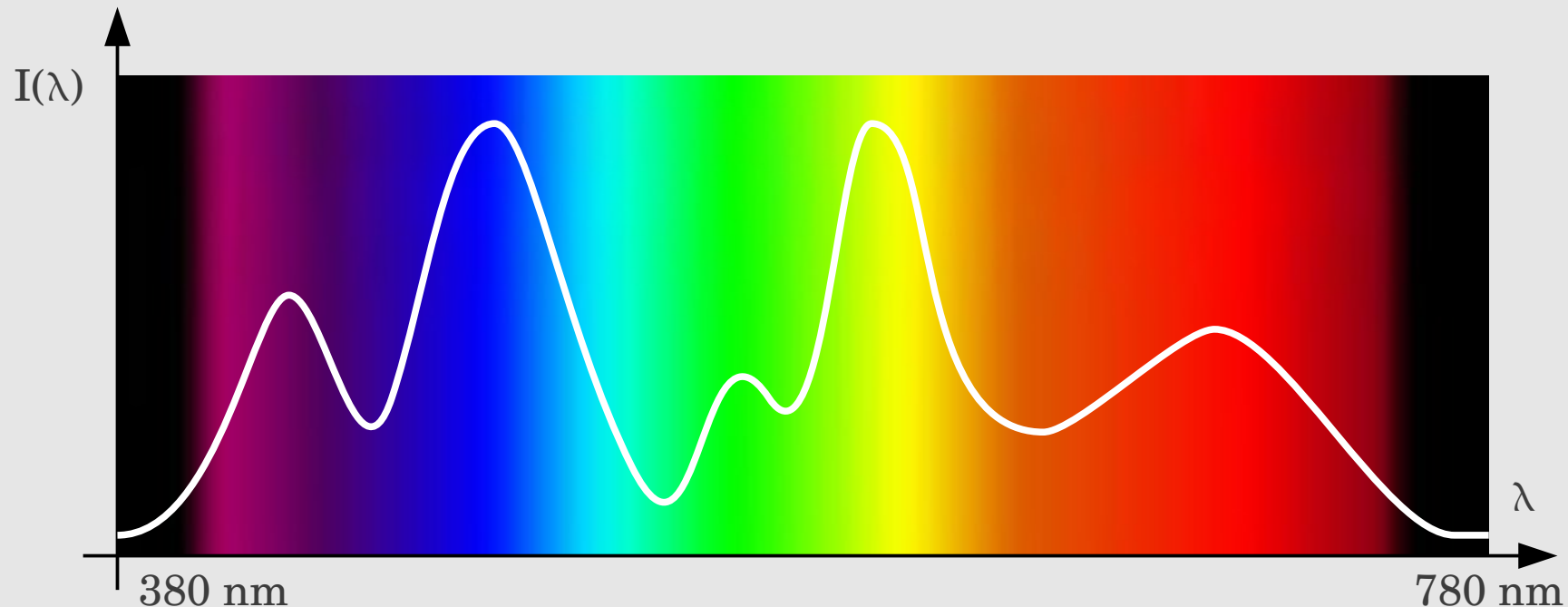


intensité énergétique
émise dans une direction
non orthogonale à la surface

Source : surface lumineuse monochromatique

Spectre de luminance énergétique

la luminance énergétique **monochromatique** est la luminance énergétique d'un rayonnement monochromatique, en $\text{W.m}^{-3}.\text{sr}^{-1}$.
le **spectre** de luminance énergétique décrit la **variation** de la luminance énergétique monochromatique en fonction de la **longueur d'onde**.



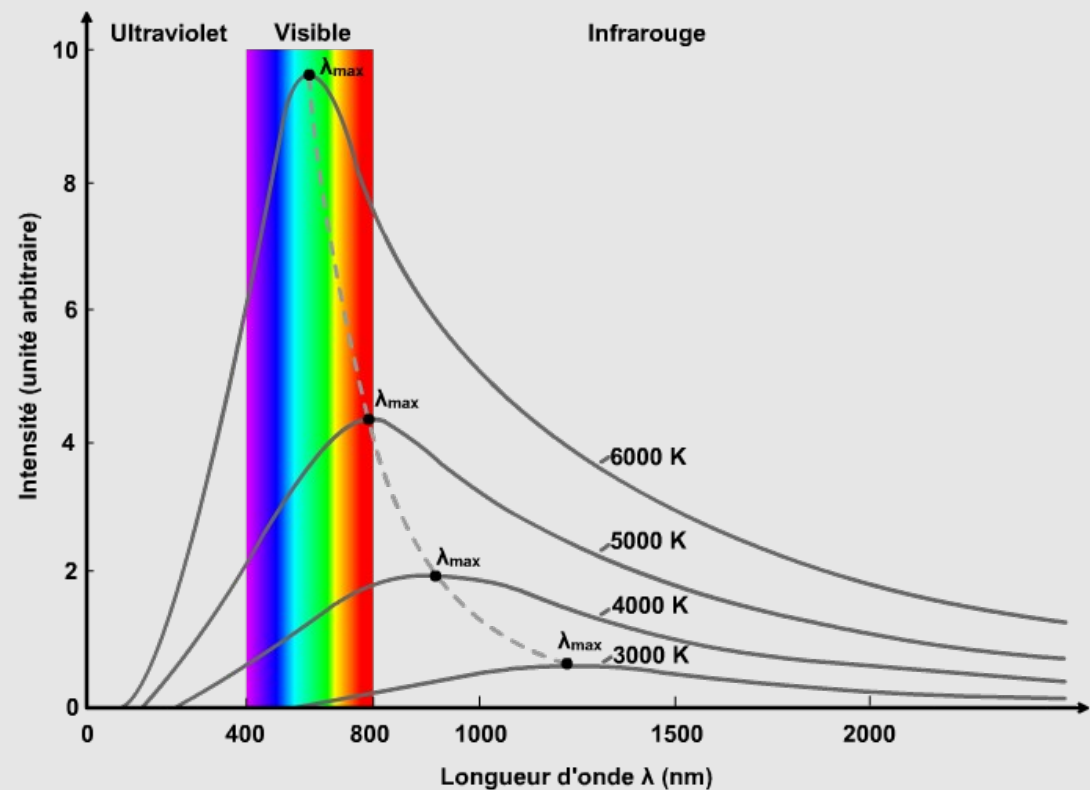
Corps noir et température de couleur

Corps noir

objet théorique qui **absorbe** toute la lumière qu'il reçoit et émet un rayonnement dont le spectre dépend de sa **température**.

la courbe représentant la luminance monochromatique passe par un **maximum**.

la **position** du maximum dépend de la température plus le corps noir est **chaud**, plus sa couleur semble **bleue**.



Illuminants

Illuminants et illuminants standard

il existe une multitude d'**illuminants** : lumière du jour, plein soleil, lampe à incandescence, tube au néon, etc...

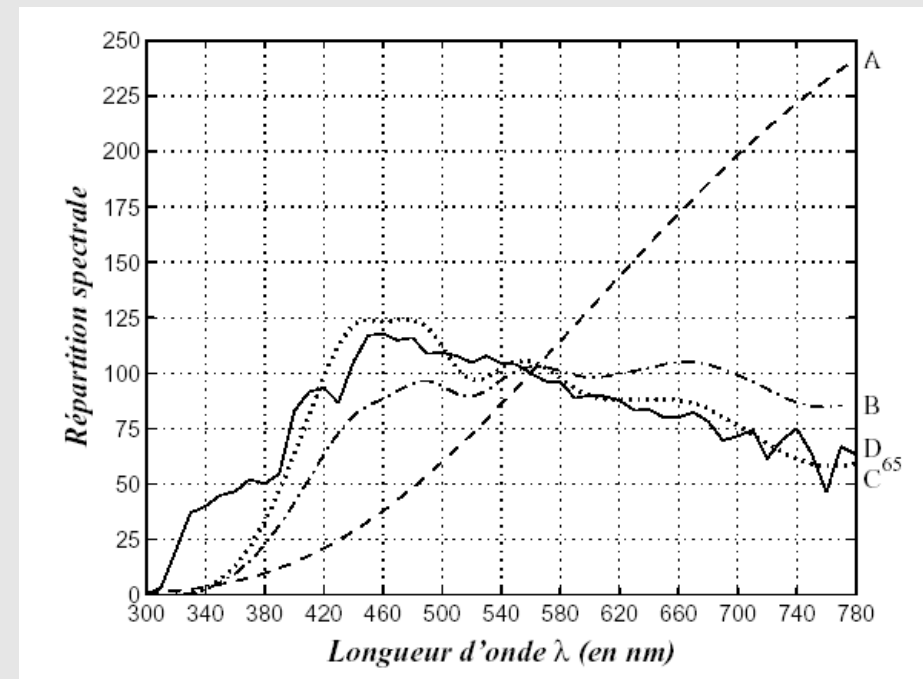
Pour simplifier la description de la source, la **CIE** (Commission Internationale de l'Éclairage) a défini des **illuminants standard**.

A = filament de tungstène, à la température de 2856 K

C = lumière du jour moyenne, sans composante UV (6750 K)

D65 = lumière du jour moyenne, avec composante UV (6500 K)

F11 = lampe fluorescente



Effet de l'illuminant



lumière naturelle



sodium basse pression



sodium haute pression



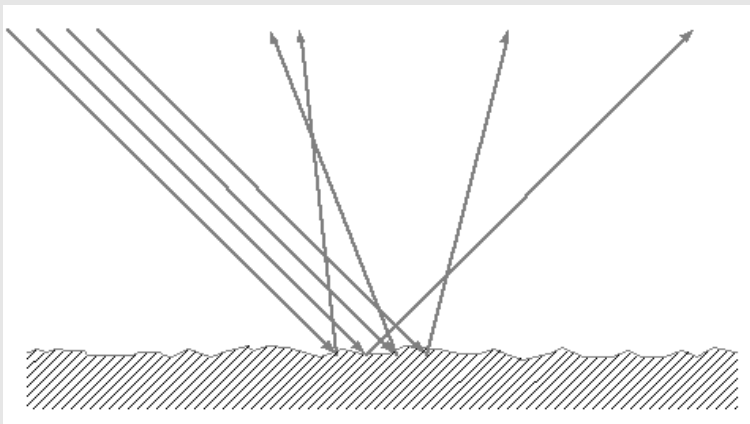
mercure haute pression

Caractéristiques de l'objet (1/3)

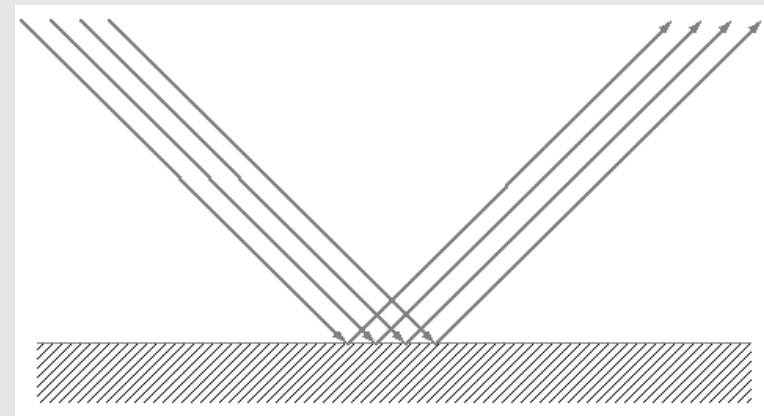
Réflexion diffuse / spéculaire

la réflexion **diffuse** caractérise la lumière réfléchie par une surface **irrégulière**, qui renvoie l'énergie incidente dans une **multitude** de directions.

la réflexion est dite **spéculaire** lorsqu'un rayon incident donne naissance à un **seul** rayon réfléchi (loi de Snell-Descartes).



réflexion diffuse

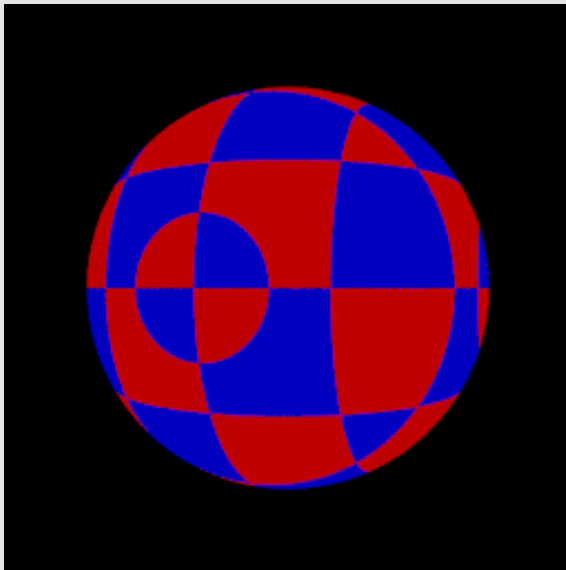


réflexion spéculaire

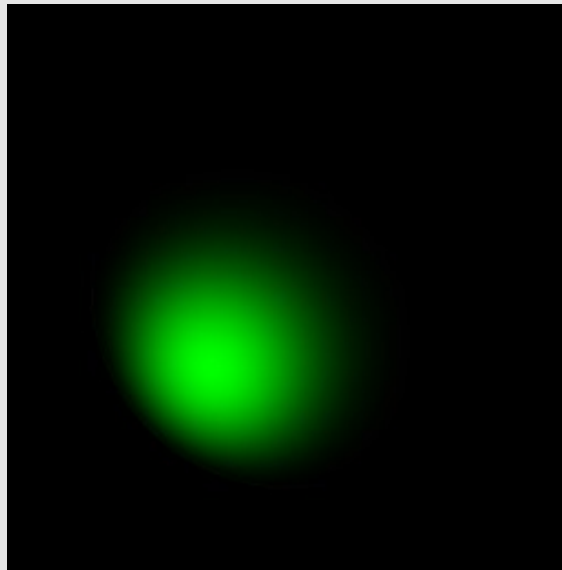
Caractéristiques de l'objet (2/3)

Réflexion diffuse / spéculaire

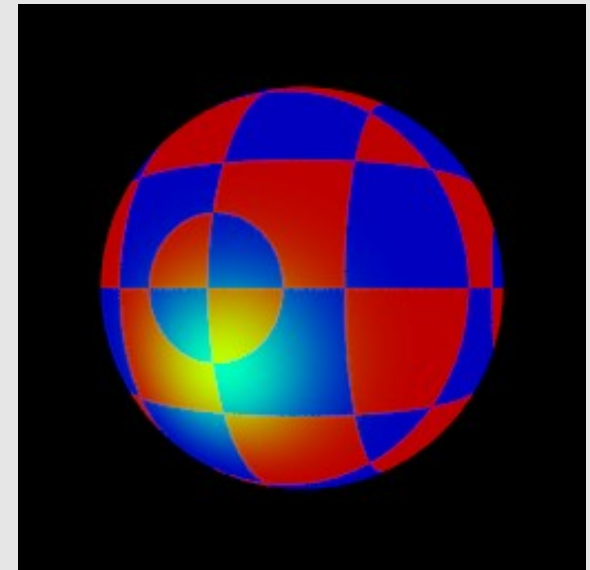
la couleur de la réflexion **diffuse** dépend des propriétés de l'**objet** et de la couleur de la **source lumineuse** ;
la couleur de la réflexion **spéculaire** est celle de la **source**.



composante diffuse



composante spéculaire



combinaison

Caractéristiques de l'objet (3/3)

BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function

fonction qui décrit **intégralement** les propriétés de réflexion d'une surface en tenant compte du **spéculaire** et du **diffus**.
permet de calculer l'intensité énergétique d'un rayon réfléchi en fonction de celle du rayon incident et des **angles** (θ_i, φ_i) incidents et (θ_r, φ_r) réfléchis.

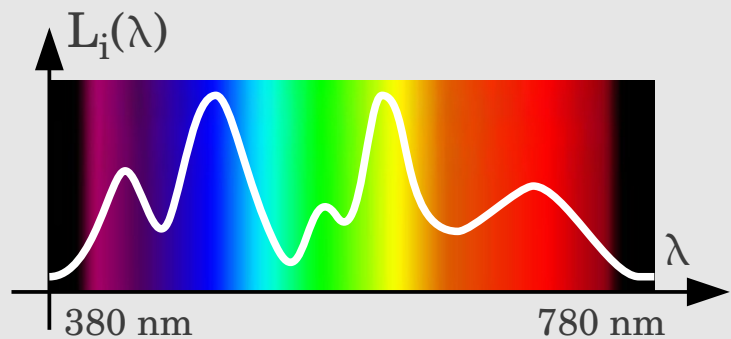
$$I_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda) = \text{BRDF}(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i, \lambda) \cdot I_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)$$

Réflectance spectrale (ou spectre de réflectance)

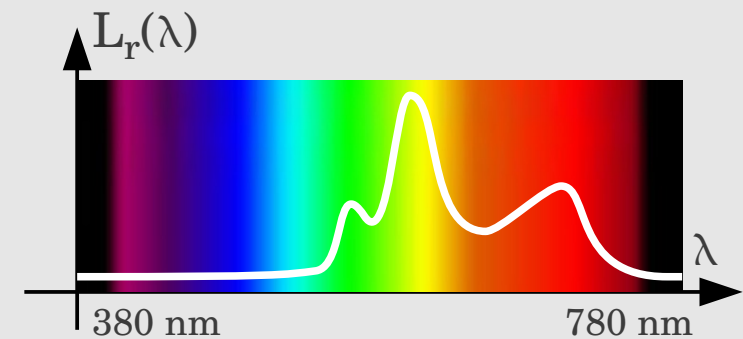
les angles incidents (θ_i, φ_i) et réfléchis (θ_r, φ_r) étant imposés, la réflectance spectrale définit le **rapport** entre l'intensité énergétique du rayon réfléchi et celle du rayon incident.
la réflectance spectrale est une fonction de la **longueur d'onde** λ de la lumière.

Interaction source lumineuse / objet (1/2)

Spectre de luminance énergétique de la lumière réfléchie

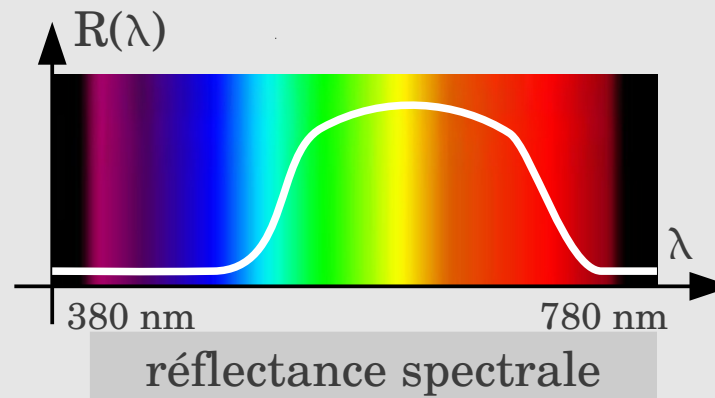


spectre de luminance
énergétique incidente



spectre de luminance
énergétique réfléchie

$$L_r(\lambda) = L_i(\lambda) \cdot R(\lambda)$$



Interaction source lumineuse / objet (2/2)

Influence de la source lumineuse sur la réflexion

source **ponctuelle** : éclairage direct, non homogène, générant des réflexions spéculaires et des ombres.

éclairage **diffus** : indirect et plus uniforme, mais de moins bon rendu, générant une perte de saturation pour certaines couleurs, par **absorption** d'énergie.



source ponctuelle

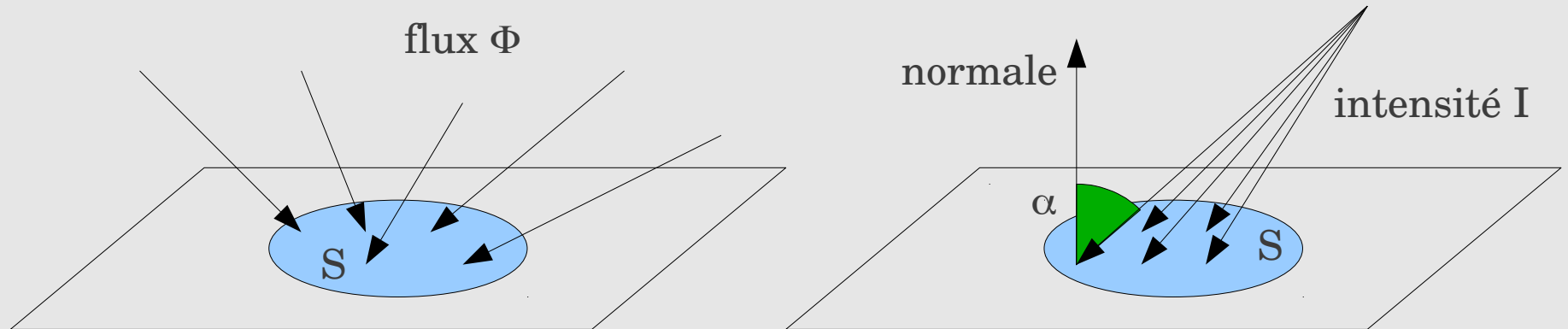


éclairage diffus

Éclairement énergétique (ou irradiance)

À la surface du capteur

l'**éclairement énergétique** est l'intégration des flux énergétiques de **tous** les rayons parvenant sur la surface (unité: W.m^{-2}).



CAS PARTICULIER : surface élémentaire : suffisamment petite pour dire que l'intensité = pour tous les traits ainsi que la normale

pour un point, recevant le flux depuis une **source unique**, d'intensité I , située à une distance R , suivant une incidence α :

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I d\Omega}{dS} = \frac{I \frac{dS \cdot \cos(\alpha)}{R^2}}{dS} = \frac{I \cos(\alpha)}{R^2}$$

Caractéristiques de l'observateur (1/2)

Observateur = capteur d'image

un **système optique** permet de garantir que l'éclairement énergétique parvenant à un point du capteur est issu d'une **source unique** (objectif, collimateur, etc.)

la lumière parvenant sur la **surface sensible** du capteur est transformée en information exploitable.

Sensibilité spectrale de l'observateur

seule une **partie** de l'éclairement énergétique est converti, qui dépend de la longueur d'onde incidente.

la **sensibilité spectrale** du capteur définit la **proportion** d'éclairement convertie pour chaque longueur d'onde.

Source* réflexion objet * perception

S : surface

E : Energie

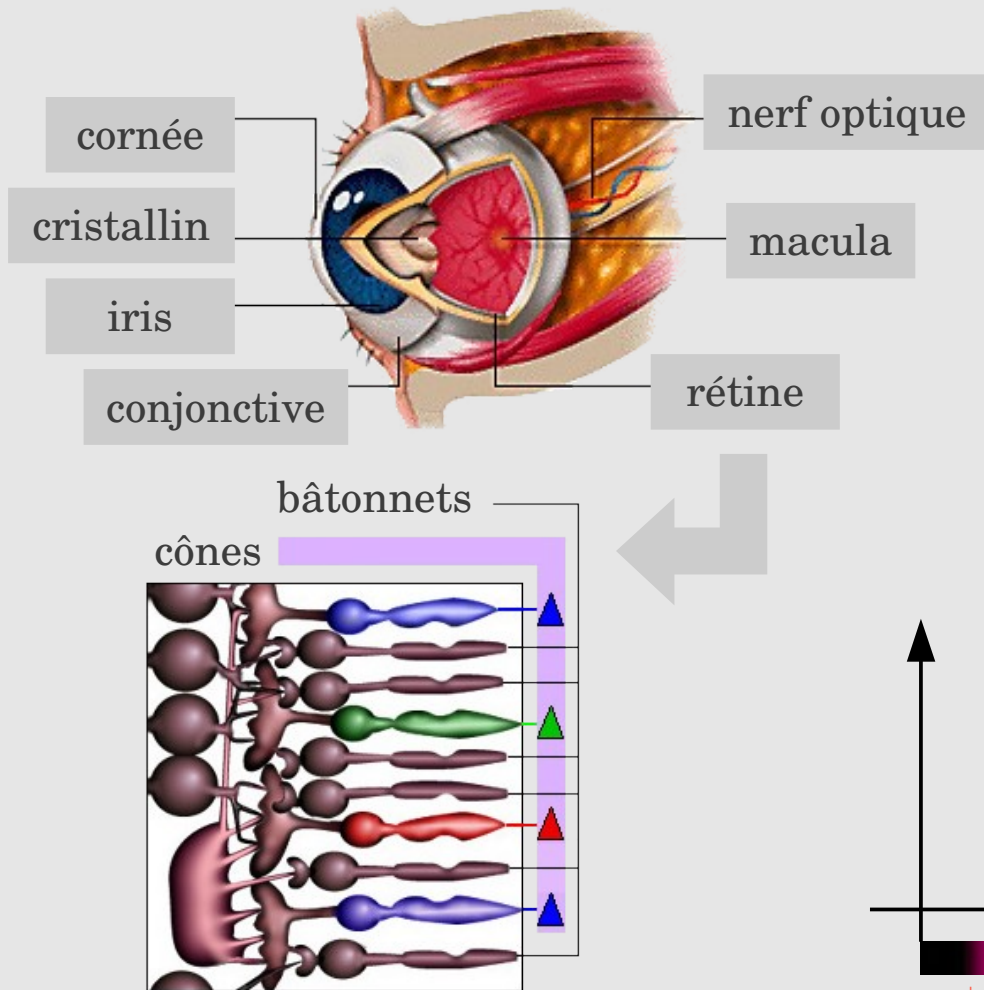
d :

Lambda :

$$G = \int_{\lambda} S(\lambda).E(\lambda).d\lambda$$

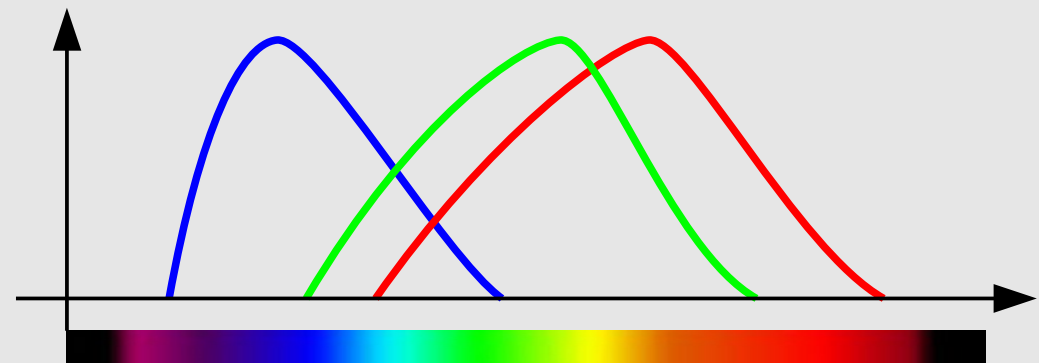
Caractéristiques de l'observateur (2/2)

Analogie avec le système visuel animal



la **ré**tine contient différents types de cellules sensibles à la lumière: les **cô**nes et les **bâ**tonnets

chaque type de cellule est sensible à une **gam**me de longueurs d'ondes.

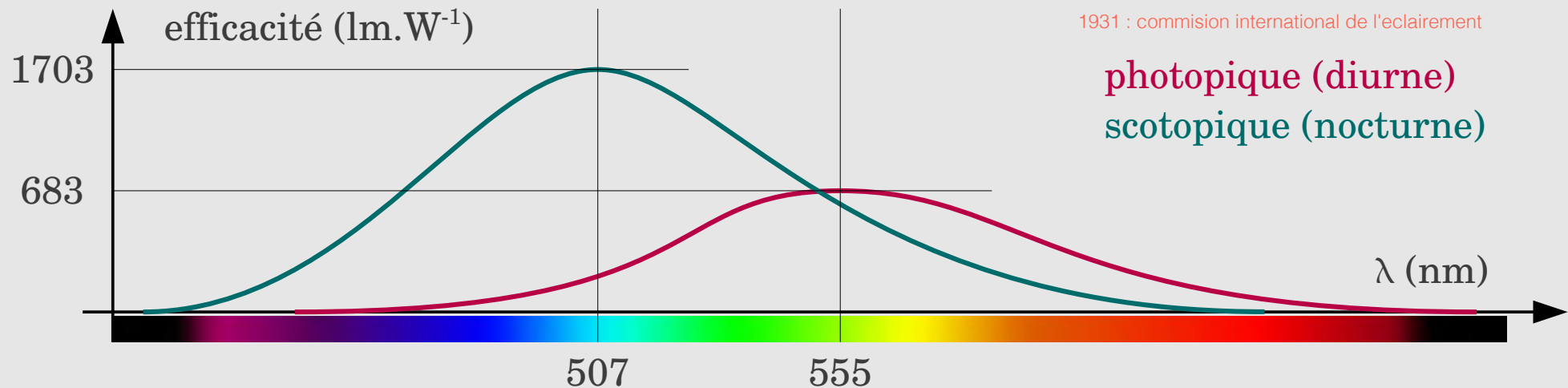


courbes = proportion perçu par rapport à reçu pour un cône
pour calculer le vert on fait la soustraction entre le vert et le rouge

Grandeurs énergétiques / grandeurs photométriques

Sensibilité spectrale de l'oeil humain

courbes d'efficacité lumineuse $V(\lambda)$ **normalisées** par la CIE.



vision **photopique** : pendant le jour, trois types de cônes

vision **scotopique** : de nuit, perception par les bâtonnets

Grandeurs photométriques

toutes les grandeurs **énergétiques** ont un équivalent **photométrique**, obtenu après pondération par $V(\lambda)$.

seule la partie **visible** par l'oeil humain est prise en compte.

Grandeurs énergétiques / grandeurs photométriques

Estimation d'une grandeur photométrique

on intègre la **dérivée** de la grandeur énergétique par rapport à la longueur d'onde pondérée par l'**efficacité spectrale** de l'oeil.

$$G_{\text{photométrique}} = \int_{\lambda} V(\lambda) \cdot G'_{\text{énergétique}}(\lambda) \cdot d\lambda$$

diviser / rapport à lambda

Unités photométriques

grandeurs énergétiques

flux énergétique, Watt

intensité énergétique, W.sr⁻¹

éclairement énergétique, W.m⁻²

luminance énergétique, W.m⁻².sr⁻¹

grandeurs photométriques

flux lumineux, lumen (lm)

intensité lumineuse, candéla (cd)

éclairement lumineux, lux

luminance lumineuse, nit = cd.m⁻²

spécifique à l'oeil humain