

Radiométrie & Photométrie

0- Grandeurs radiométriques & photométriques

Les grandeurs **radiométriques** caractérisent un rayonnement de lumière dans les unités physiques usuelles **W**, **W.sr⁻¹**, **W.m⁻²**. Mesures par un détecteur à réponse \approx indépendante de λ .

Les grandeurs **photométriques** caractérisent un rayonnement **comme s'il était vu par un observateur humain « standard »**.

La réponse de l'œil dépend spécifiquement de λ ; limitée au visible \approx [400 nm ; 750 nm] \rightarrow nécessité d'utiliser les unités spécifiques de la photométrie **lumen, candela, lux** etc.

1- Flux énergétique et lumineux : F_e en W, F_l en lm (lumen) Correspondance entre les systèmes d'unités

1.1- Flux énergétique F_e et Flux lumineux F_l en lumen(ou lm)

F_e = « débit » d'énergie par unité de temps transportée par le rayonnement $J.s^{-1} \equiv W$
 $\rightarrow F_e$ « puissance optique » en watt .

F_l = mesure de la sensation visuelle d'un flux de lumière visible par un œil humain, en lumen (lm).

1.2- Influence de l'œil humain : raccordement entre unités radiométriques et photométriques

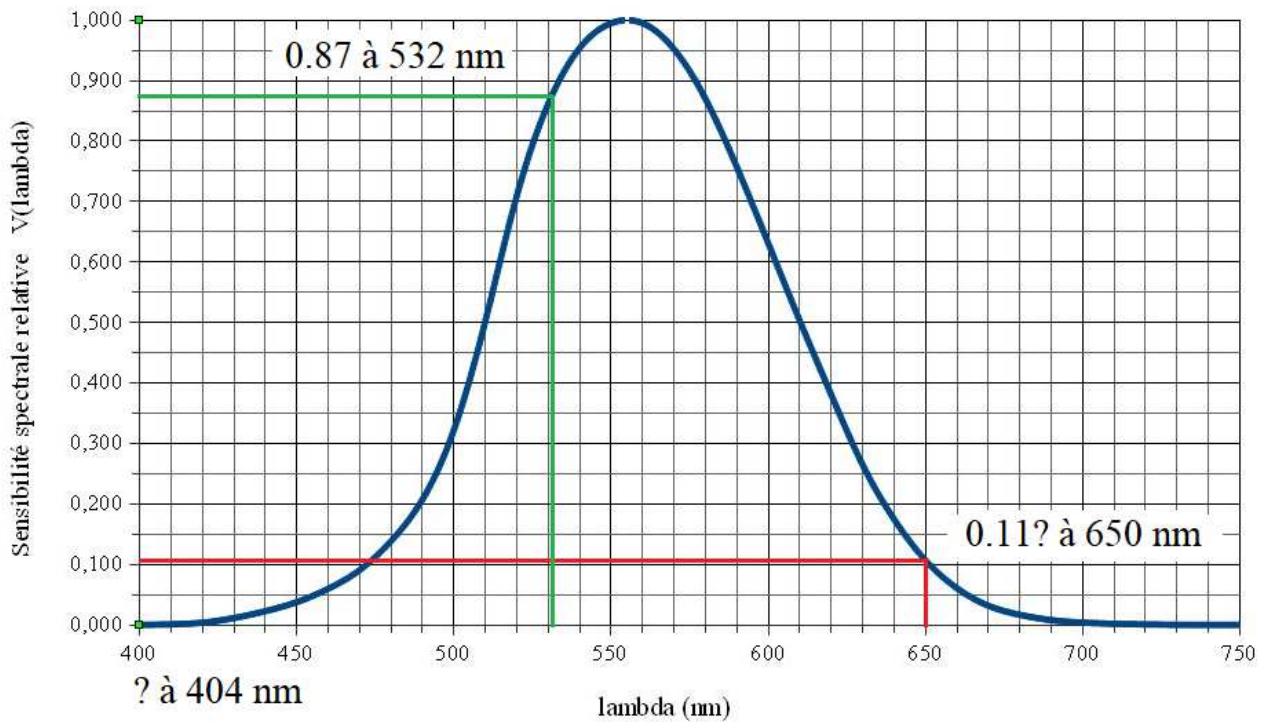
Caractérisation de la vision d'un œil standard

- L'observation d'un rayonnement se traduit pour un être humain par un ensemble de **stimulations visuelles interprétées par le cerveau** en termes de couleurs (**analyse des impressions colorées = colorimétrie**) ou de niveau sur une « échelle de gris » (**analyse de la quantité de rayonnement = photométrie**).
- Ces impressions dépendent du sujet, de son âge, de sa fatigue, des conditions d'éclairage actuelles et antérieures (éblouissement, accoutumance) \rightarrow la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) a défini un « **observateur standard** » sur la base d'études statistiques.
- La « **vision de jour** » est bien adaptée à la **luminosité ambiante usuelle** ; le **maximum de sensibilité de la courbe $V(\lambda)$** se situe à **555 nm**.
- Depuis 1978 le raccordement entre les deux systèmes d'unités est basé sur la vision de jour de l'œil standard au maximum de la courbe $V(\lambda)$: 683 lumen \leftrightarrow 1 watt pour $\lambda = 555$ nm .

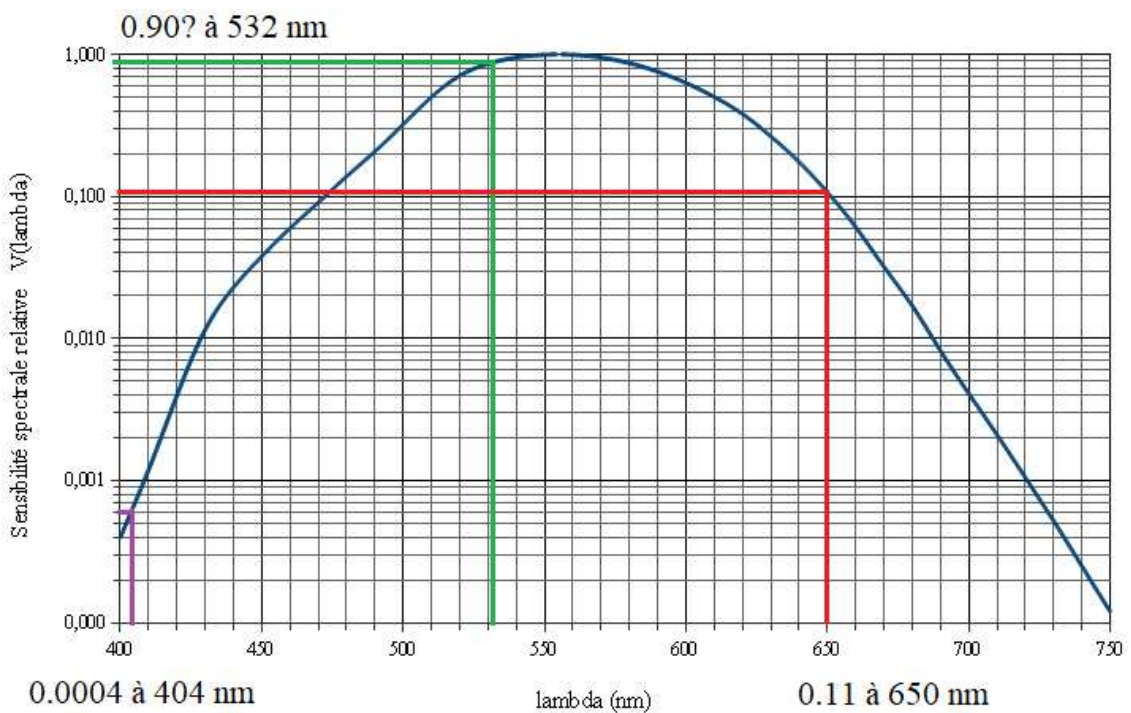
$$F_l(\lambda) = F_e(\lambda) \times K_m \times V(\lambda) \quad \text{avec } K_m = 683 \text{ lm.W}^{-1}$$

Exemple : Diode laser rouge usuelle à 650 nm (lecture de code barre, pointeur, etc.)

- puissance à l'émission $F_e = 2$ mW
- rendement de conversion en puissance $\eta = 0.25 = 25\% = F_e / P$
- consommation électrique $P = F_e / \eta = 8$ mW.
- lecture sur la courbe de vision de jour à 650 nm, soit $V(650 \text{ nm}) = 0,11$ (monochromatique)
- flux lumineux $F_l(\lambda_r) = F_e(\lambda_r) \times K_m \times V(\lambda_r) = 0,002 \times 683 \times 0,11 = 0,150$ lm (lumen)
- efficacité énergétique de la lumière $\eta_L = F_l / P_{\text{alim}} = 0.150 / 0.002 = 75$ lm.W⁻¹



Sensibilité spectrale relative $V(\lambda)$ en vision de jour de l'œil standard CIE
 échelle linéaire : lecture facile entre 470 et 650 nm



Sensibilité spectrale relative $V(\lambda)$ en vision de jour de l'œil standard CIE
 échelle log : lecture facile aux limites (violet, rouge)

1.3- Cas d'une lumière monochromatique

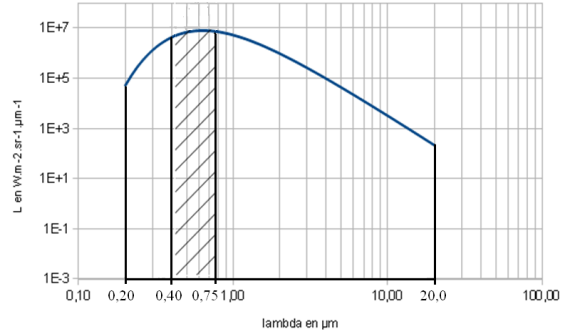
- Identifier la valeur particulière λ_{ex}
- Lire la valeur correspondante $V(\lambda_{ex})$ sur le graphe le plus pratique
- Calculer : $F_l(\lambda_{ex}) = F_e(\lambda_{ex}) \times K_m \times V(\lambda_{ex})$ en lumen, connaissant $F_e(\lambda_{ex})$ en W
 $F_e(\lambda_{ex}) = F_l(\lambda_{ex}) / (K_m \times V(\lambda_{ex}))$ en watt, connaissant $F_l(\lambda_{ex})$ en lm

1.4- Cas d'une lumière polychromatique à spectre continu : compliqué !

Dans le cas d'un rayonnement à spectre continu, l'information doit d'abord être connue en détail, par exemple par le graphe du **flux énergétique spectrique** $F_{e\lambda} = \frac{dF_e}{d\lambda}$ en $W.m^{-1}$.

On peut disposer pour $F_{e\lambda}$ d'une formule d'origine théorique ou de tableau de valeurs d'origine expérimentale (mesure par un spectromètre).

Exemple : lumière émise par une lampe halogène assimilée à un corps noir à 4550°C (émission préférentielle dans l'infrarouge, un peu dans le visible).



Calcul du flux énergétique : $F_{e\Delta\lambda} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_{e\lambda} d\lambda$

flux rayonnée (en W) dans la partie du spectre mesuré par la sonde (l'intégrale correspond à la surface sous la courbe dans la plage de λ de mesure de la sonde)

Calcul du flux lumineux : $F_l = \int_{\lambda_{visible\ min}}^{\lambda_{visible\ max}} dF_{l\lambda} = \int_{\lambda_{visible\ min}}^{\lambda_{visible\ max}} F_{e\lambda} \times K_m \times V(\lambda) d\lambda$

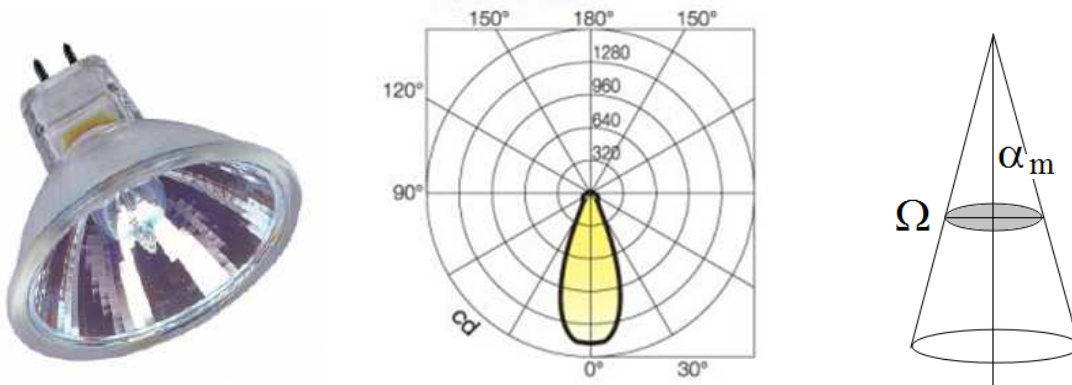
$F_l \approx \sum_{k=0}^{k_{max}} F_{e\lambda}(\lambda_k) \times K_m \times V(\lambda_k) \times \delta\lambda$ où on découpe la bande visible en k_{max} éléments de largeur $\delta\lambda$, chacun étant supposé quasi-monochromatique à $\lambda_k = \lambda_{min} + k \times \delta\lambda$

2- Sources de lumière en émission : Intensité énergétique (en $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$) et lumineuse (en cd candela)

2.1- Rappel : angle solide

Exemple : Spot halogène dichroïque OSRAM Decostar 51 ECO 50 W 12 V 36°

Emission préférentielle dans un cône de demi-angle au sommet $\alpha_m = 36^\circ/2 = 18^\circ$



L'ouverture du cône est mesurée par l'angle solide $\Omega(\alpha_m) = 2\pi(1 - \cos \alpha_m)$

Soit $\Omega = 2\pi(1 - \cos(18^\circ)) = 2\pi \times 0.0489 = 0.307 \text{ sr}$ stéradian

2.2- Intensité énergétique et lumineuse

- **Intensité** d'une source dans une direction donnée : **flux issu de la source par unité d'angle solide** $dF_s = I d\Omega_s$ ou $I = \frac{dF_s}{d\Omega_s}$

- En radiométrie, le flux est en W et l'**intensité énergétique** I_e est mesurée en $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$
- En photométrie, le flux lumineux est en lumen et l'**intensité lumineuse** I_l est en **candela** cd ($\approx \text{lm}\cdot\text{sr}^{-1}$)

Historiquement 1 cd est l'intensité lumineuse produite par une flamme de bougie...

L'intensité lumineuse (en **candela**) est l'une des sept **grandeurs primaires** du **système international d'unités** SI : m, kg, s, A, K, mol et **cd**

- **Indicatrice d'intensité** : courbe en coordonnées polaires décrivant la distribution de I pour la source en fonction d'un ou deux angles pertinents.

- Flux émis dans un cône d'angle solide Ω_s $F = \int_{\Omega_s} I(\theta) d\Omega$

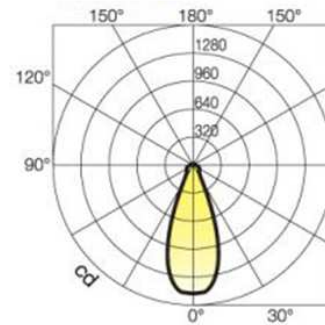
2.3- Cas « simple » d'une source « isotrope » ou « quasi isotrope »

- **Isotrope** = « identique dans toutes les directions » = « indépendant de la direction » (donc des angles concernés).
- Source **isotrope** : pour toute direction $I(\theta) = I_0 = \text{constante}$
 → Surface indicatrice : sphère centrée sur le point source
- $$F = \int_{\Omega_s} I(\theta) d\Omega = \int_{\Omega_s} I_0 d\Omega = I_0 \int_{\Omega_s} d\Omega = I_0 \times \Omega_s$$

Exemples :



Cas de la « boule » solaire et de sa surface d'émission sphérique.



Cas du spot halogène §2.1

- Pour toutes les directions, l'émission solaire est supposée isotrope. Le flux total émis par la « boule » solaire dans tout l'espace est donc $F_{\text{soleil}} = 4\pi I_{\text{soleil}}$
- Si on simplifie la courbe d'émission du spot en la supposant être en forme de « part de tarte », cela revient à supposer la source isotrope. $I \approx \text{constante}$ dans l'angle solide d'émission et $I = 0$ en dehors.

Product datasheet



DECOSTAR 51 ECO 50 W 12 V 36° GU5.3

DECOSTAR 51 ECO | Halogen dichroic reflector lamps with 51 mm diameter

Electrical data

Nominal wattage	50 W
Nominal voltage	12 V
Rated wattage	50 W
Power factor λ	1.00
Energy consumption	53 kWh/1000h

Light technical data

Nominal useful luminous flux 90°	870 lm
Luminous intensity	2850 cd
Beam angle	36 °
Color temperature	3000 K
Light color as per EN 12464-1	Warm White
Color rendering index Ra	100

- Angle solide $\Omega_{\text{spot}} = 2\pi (1 - \cos(18^\circ)) = 0.307 \text{ sr}$ stéradian
- Intensité lumineuse $I_l = 2850 \text{ cd}$
- Calcul du flux lumineux émis en supposant $I \approx \text{constante}$ dans l'angle solide d'émission
 → $F_l \approx I_l \times \Omega_{\text{spot}} \approx 2850 \times 0.307 \approx 876 \text{ lm}$ à comparer au flux nominal (écran perpendiculaire à la direction de la lumière) : 870 lm. L'hypothèse est donc réaliste.

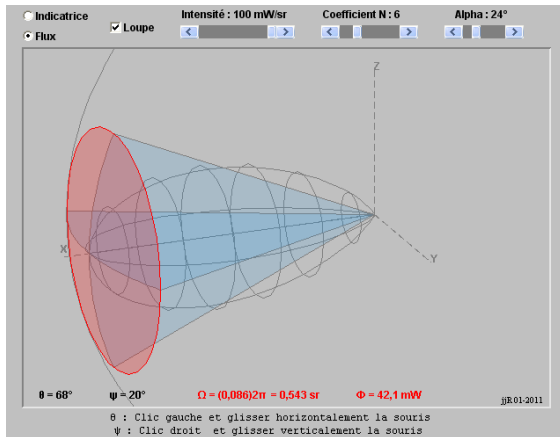
2.4- Cas d'une source non isotrope :

En dehors de l'hypothèse « isotrope » les calculs détaillés de flux peuvent se compliquer.

Exemple : émission directive d'une télécommande

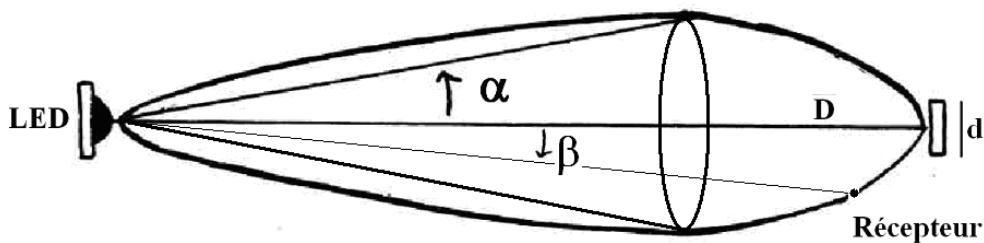
Une télécommande utilise une LED IR à $\lambda = 900 \text{ nm}$ pour émettre ses informations.

Intensité lumineuse $I_1 = 0 \text{ cd}$ et flux lumineux total émis $F_1 = 0 \text{ lm}$ car IR non visible !



Cette LED possède un diagramme de rayonnement en intensité qui présente une symétrie de révolution autour de l'axe.

$I(\beta) = I_0 (\cos \beta)^n$ avec un facteur $n = 6$ et $I(\beta = 0) = I_0 = 100 \text{ mW}\cdot\text{sr}^{-1}$ dans l'axe.



$$F_e = \int_{\Omega_s} I(\theta) d\Omega = \int_{\Omega_s} I_0 [\cos(\beta)]^n d\Omega = \dots \rightarrow F_e = 2\pi I_0 \frac{1 - (\cos \alpha)^7}{7}$$

(les détails du calcul sont non exigibles ; ils sont proposés à la fin du document pour les amateurs d'intégrales)

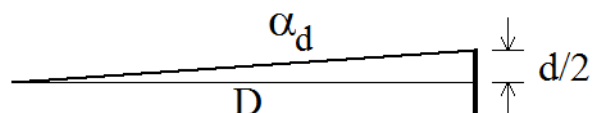
Le flux énergétique total émis par cette LED en mW dans le demi-espace avant ($\alpha = \pi/2$)

$$F_{e \text{ 1/2espace}} = 2\pi I_0 \frac{1 - (\cos(\pi/2))^7}{7} = \frac{2\pi I_0}{7} = \frac{2\pi \times 0.1}{7} = 90 \text{ mW}$$

On pointe cette télécommande vers un détecteur de diamètre $d = 10 \text{ mm}$ situé sur la TV à $D = 5 \text{ m}$ de distance.

Le cône d'émission vers le détecteur à un demi-angle au sommet :

$$\alpha_d = \arctan\left(\frac{d/2}{D}\right) = \arctan\left(\frac{0.005}{5}\right) \approx 0.001 \text{ rd}$$



$$\cos(\alpha_d) \approx 1 - \frac{\alpha_d^2}{2} \approx 0.9999995 \text{ très proche de } 1 \text{ (développement limité au } 2^{\text{ième}} \text{ ordre)}$$

Le flux émis en direction du détecteur et reçu par celui-ci est :

$$F_{\text{détecteur}} = 2\pi I_0 \frac{1 - (\cos \alpha_d)^7}{7} \approx \frac{2\pi \times 0.1}{7} \times (1 - (0.9999995)^7) \approx 0.31 \mu W$$

Soit $0.31 \cdot 10^{-6} / 90 \cdot 10^{-3} = 3.5 \cdot 10^{-6}$ soit seulement 3 à 4 millionième de ce qui est émis...

Sur ce petit cône, on pourrait considérer que $I(\beta) \approx I_0$ pour $\Omega_d \approx 2\pi (1 - \cos \alpha_d) \approx 3.1 \cdot 10^{-6} \text{ sr}$
 Donc $F_{\text{détecteur}} \approx \Omega_d \times I_0 \approx 3.1 \cdot 10^{-6} \times 0.1 \approx 0.31 \mu W$

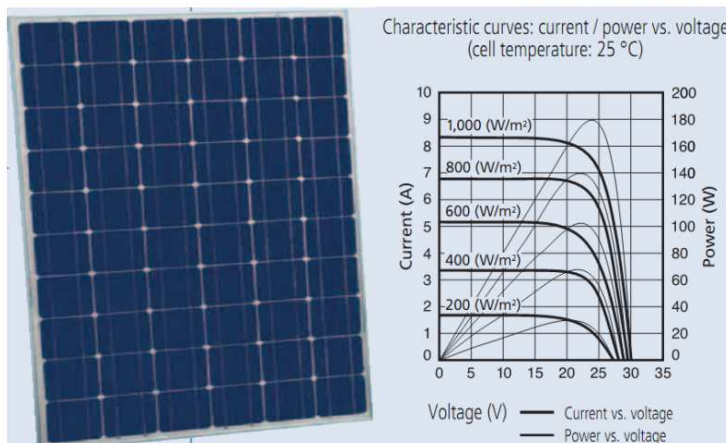
Une source quelconque émettant dans un angle solide minuscule est quasi-isotrope sur cet angle !

3- Surface éclairée : éclairement énergétique E_e (en $W.m^{-2}$) et lumineux (en lux : lx)

3.1- Exemples : mesures en $W.m^{-2}$ ou en lux

Fiche produit panneau solaire photovoltaïque
 Sharp
 Type: NU-E235 (E1) 235 Wc

**SOLAR
 ACCESS**



Caractéristiques d'un panneau solaire en fonction de l'éclairement reçu – luxmètre pour photographe

3.2- Eclairement énergétique (en $W.m^{-2}$) et lumineux (en lx)

- L'éclairement caractérise le flux reçu par unité de surface du récepteur
- En radiométrie, éclairement énergétique $E_e = \frac{dF_e}{dA_r}$ en $W.m^{-2}$
 mesuré avec un radiomètre.
- En photométrie, éclairement lumineux $E_l = \frac{dF_l}{dA_r}$ en lux ($lx \approx lm.m^{-2}$)
 mesuré avec un luxmètre (pas un « photomètre »!).
- L'éclairement moyen est le rapport du flux global reçu divisé par la surface éclairée A_r .

$$E_{\text{moyen}} = \frac{F_{\text{global sur } A}}{A_r} = \frac{\iint dF}{A_r} = \frac{\iint E(P) dA}{A_r} \text{ en } W.m^{-2} \text{ ou } lx \text{ selon le cas}$$

Ce qui compte est la surface éclairée.

Exemple : une surface de 1 cm² recevant un flux de 5 mW a un éclairage moyen de $5 \cdot 10^{-3} / 10^{-4} = 50 \text{ W.m}^{-2}$

- Pour des lumières convergeant sur la même surface, **les flux s'additionnent**
- et en un point de réception donné, les différents éclairagements **reçus s'additionnent**.



Stade de la Route de Lorient, à Rennes

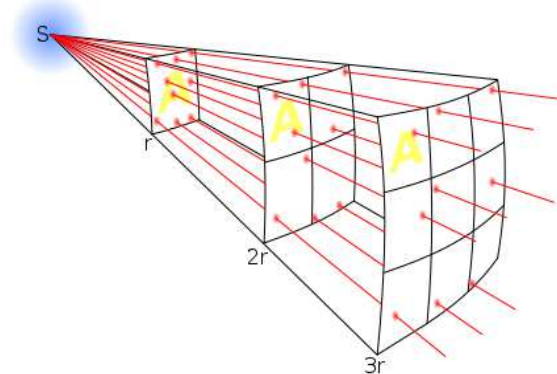
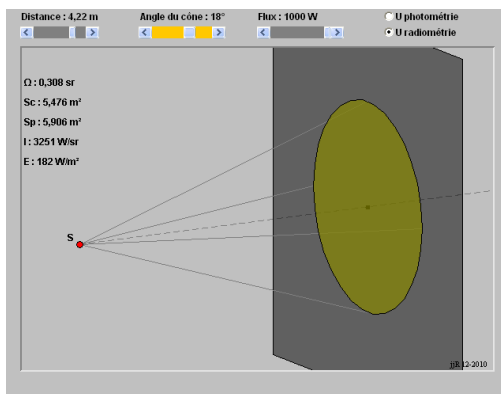
(pas d'interférences optiques avec des lampes différentes cf.S3).

3.3- Eclairage par une source ponctuelle d'intensité I

- Source quasi-ponctuelle d'intensité I dans la direction concernée
- Propagation en **ligne droite** (sans lentille ou autre) dans un milieu sans pertes
- Surface dA_r à la distance D de la source
- Normale à dA_r faisant un angle Θ_r avec le rayon issu de la source (cos Θ_r dA_r est la surface projetée ou apparente)
- dA_r vue depuis la source sous l'angle solide dΩ_s

Flux reçu par la surface dA_r → $dF_r = I d\Omega_s = I \frac{dA_r \cos \Theta_r}{D^2}$

L'**éclairage** de cette surface est $E_r = \frac{dF_r}{dA_r} = I \frac{\cos \Theta_r}{D^2}$. loi de **Bouguer**



Symboliquement, on constate une diminution du flux avec l'éloignement avec un facteur 1²= 1, 2² = 4 ou 3² = 9 pour les distances D = r, 2r, 3r

3.4- Eclairage par une surface d'émission

Exemple : éclairage lumineux produit par un écran d'ordinateur

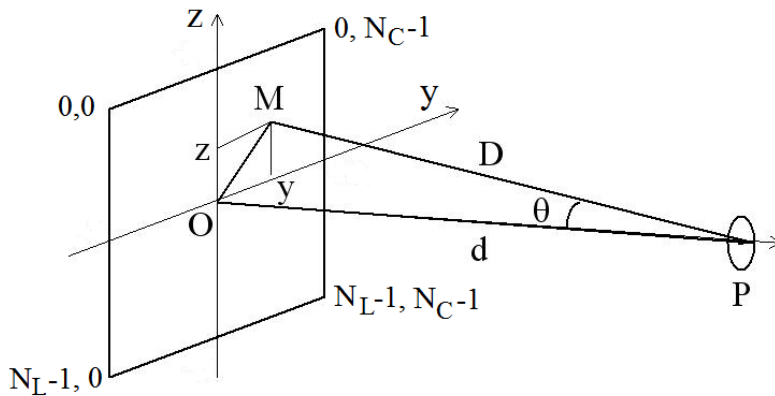
De façon générale, le calcul fait intervenir des intégrales de surfaces bien compliquées !

Dans cet exemple, en travaillant avec un ensemble de points lumineux, le calcul reste « élémentaire » car uniquement basé sur le théorème de Bouguer et l'addition des éclairagements.

Soit un écran affichant une image numérique comprenant N_L lignes et N_C colonnes.

Chaque pixel est un carré de côté p .

L'écran illuminé a une surface $S = N_L \times N_C \times p^2$



Informatiquement, une image est un tableau contenant pour chacun des pixels les trois coordonnées numériques entières (n, m, q) :

* $0 \leq n < N_C$ n° de colonne : position sur l'horizontale

* $0 \leq m < N_L$ m° de ligne : position sur la verticale

* $0 \leq q(n,m) < Q_m$ « Intensité » informatique du pixel de coordonnées (n, m) , c'est-à-dire une valeur dans l'échelle de gris entre 0 et Q_m .

Soit une image de Webcam basique (codée sur 8 bits) : $N_C = 640, N_L = 480, Q_m = 255 = 2^8 - 1$

Pour le pixel situé en M, de coordonnées : y_n, z_m, I_{nm} on a :

* $y_n = (n - N_C/2) \times p$ abscisse horizontale

* $z_m = (N_L/2 - m) \times p$ ordonnée verticale

* $I_{nm} = I_{\max} \times q(n,m) / Q_m$ pour le pixel situé aux coordonnées (n, m) ; I_{\max} est l'intensité lumineuse max possible (lorsque $q = Q_m$)

Calcul de l'éclairement reçu sur la pupille de l'œil située au un point P, distant de d et situé sur l'axe normal au centre de symétrie de l'image sur l'écran :

On lit sur la figure présentant un triangle rectangle en O les relations géométriques :

$$D^2 = d^2 + y_n^2 + z_m^2 \quad (\text{car } OM^2 = y_n^2 + z_m^2) \quad \text{et}$$

$$\cos \vartheta = \frac{d}{D} = \frac{d}{\sqrt{d^2 + y_n^2 + z_m^2}}$$

Le **théorème de Bouguer** donne la contribution de chaque « pixel ponctuel » :

$$E_{nm} = I_{nm} \frac{\cos \vartheta}{D^2} = I_{nm} \times \frac{1}{d^2 + y_n^2 + z_m^2} \times \frac{d}{\sqrt{d^2 + y_n^2 + z_m^2}} = \frac{I_{nm} \times d}{(d^2 + y_n^2 + z_m^2)^{3/2}}$$

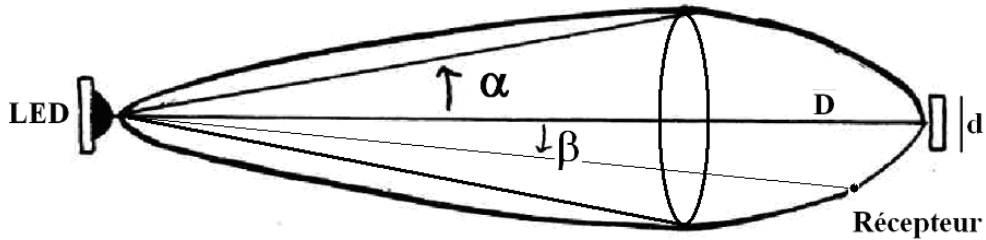
Pour l'**image numérique** complète (en échelle de gris), il suffit de sommer les contributions de chacun des pixels :

$$E(P) = \sum_{n=0}^{N_C-1} \sum_{m=0}^{N_L-1} E_{nm} = \sum_{n=0}^{N_C-1} \sum_{m=0}^{N_L-1} I_{nm} \frac{d}{(d^2 + y_n^2 + z_m^2)^{3/2}}$$

Pour un écran couleur, il faut refaire le même calcul pour chacune des trois couleurs RVB et sommer les trois contributions en tenant compte de la sensibilité de l'œil à chacune de ces trois couleurs (Rouge, Vert, Bleu).

Complément :**Calcul détaillé du flux pour une LED §2.4 (calcul bien sûr non exigible)**

Exemple de calcul d'intégrale par changement de variable

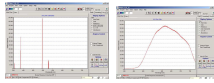
 $I(\beta) = I_0 (\cos \beta)^n$ avec un facteur $n = 6$ et $I(\beta = 0) = I_0 = 100 \text{ mW}\cdot\text{sr}^{-1}$ dans l'axe.


$$F_e = \int_{\Omega_s} I(\theta) d\Omega = \int_{\Omega_s} I_0 [\cos(\beta)]^n d\Omega = \int_0^\alpha I_0 [\cos(\beta)]^n \times 2\pi \sin \beta d\beta$$

$$F_e = -2\pi I_0 \int_0^\alpha [\cos(\beta)]^n \times (-\sin \beta d\beta) = -2\pi I_0 \int_0^\alpha [\cos(\beta)]^n d \cos \beta$$

$$F_e = -2\pi I_0 \left[\frac{(\cos \beta)^{n+1}}{n+1} \right]_0^\alpha \rightarrow \boxed{F_e = 2\pi I_0 \frac{1 - (\cos \alpha)^{n+1}}{n+1}} \text{ avec } n = 6$$

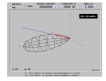
Sources des figures et des images :



Copies d'écran du logiciel de TP S3 B&Wspec 3.26 <http://www.bwtek.com/>



<http://www.zeblog.com/blog/uploads/m/marlenesasseur/soleil-couv.jpg>



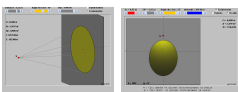
<http://subaru2.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/diode.html>



Crédit personnel

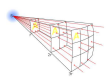


<http://s1.e-monsite.com/2009/06/27/10/78658434stade2-jpg.jpg>

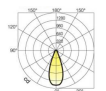


<http://subaru2.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/grandphoto.html>

<http://subaru2.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/photoecran.html>



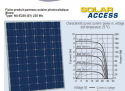
http://fr.wikibooks.org/wiki/Photographie/Photom%C3%A9trie/Calculs_photom%C3%A9triques_usuels



<http://www.targetti.fr/products/65283/mondial>



http://www.osram.fr/osram_fr/produits/lampes/lampes-halogenes/decostar/decostar-51-eco/index.jsp?productId=ZMP_57742



[http://www.solaraccess.fr/resources/solarmodule/datasheets/Sharp_NU-S0E3E_NU-180\(E1\)_180Wp_NU-S5E3E_NU-185\(E1\)_185Wp_EN.pdf](http://www.solaraccess.fr/resources/solarmodule/datasheets/Sharp_NU-S0E3E_NU-180(E1)_180Wp_NU-S5E3E_NU-185(E1)_185Wp_EN.pdf)



<http://www.lyon-outil.com/578-850-thickbox/luxmetre-digital-1010kt.jpg>



<http://www.fayneljost.com/img/ecran-ordinateur.jpg>

Sommaire

RADIOMETRIE & PHOTOMETRIE.....	1
0- Grandeurs radiométriques & photométriques	1
1- Flux énergétique et lumineux : F_e en W, F_l en lm (lumen) Correspondance entre les systèmes d'unités	1
2- Sources de lumière en émission : Intensité énergétique (en $W.sr^{-1}$) et lumineuse (en cd candela)	4
3- Surface éclairée : éclairement énergétique E_e (en $W.m^{-2}$) et lumineux (en lux : lx).....	7
Sources des figures et des images :	11
Sommaire	11