

Sources de lumière

1- « Puissance en optique » : flux énergétique et lumineux

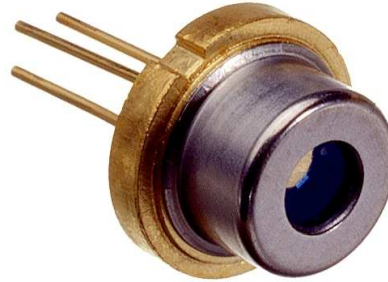
RED LASER DIODE DL-3147-060

Features

- Wavelength : 650 nm (Typ.)
- Low threshold current : $I_{th} = 20\text{mA}$ (Typ.)
- High operating temperature : 5 mW at 70°C
- TE mode

Applications

DVD-ROM/PLAYER
Laser module
industrial instrument



1.1- Flux énergétique F_e = « débit » d'énergie par unité de temps transportée par le rayonnement $\text{J}\cdot\text{s}^{-1} \equiv \text{W} \approx$ « puissance optique »

Les grandeurs **radiométriques** caractérisent le rayonnement dans les unités physiques usuelles (réponse du détecteur \approx indépendante de la longueur d'onde).

Flux énergétique en émission $F_e = 5 \text{ mW}$

Puissance électrique consommée : $P_{\text{alim}} = U \times I = 2,3 \text{ V} \times 30 \text{ mA} = 69 \text{ mW}$

Rendement de conversion $\eta = F_e / P_{\text{alim}} = 5 / 69 = 0,072 \approx 7 \%$

1.2- Flux lumineux F_l en lumen (ou lm)

Ampoule Philips Tornado High Lumen E27 42 watts BF

Notice :

Type d'ampoule : Fluocompacte .

Puissance électrique consommée : 42 W

Flux lumineux : 3000 lumens

(flux lumineux équivalent à celui d'une lampe à incandescence de puissance consommée 190 W)

Flux énergétique ? non spécifié, difficile à calculer \rightarrow à mesurer

Efficacité énergétique $\eta_L = F_l / P_{\text{alim}} = 3000 / 42 = 71,5 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$



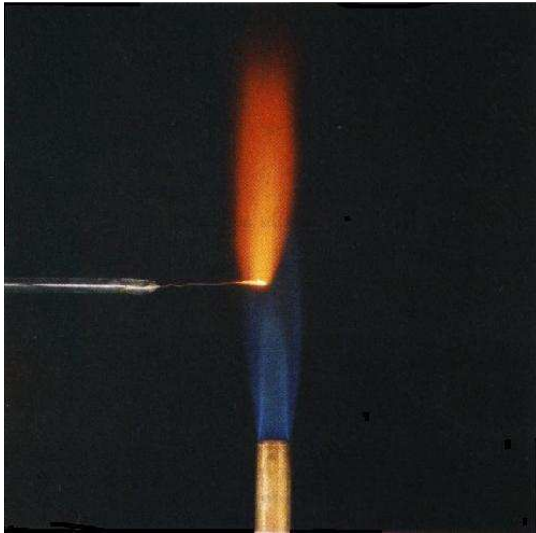
Les grandeurs **photométriques** caractérisent un rayonnement **comme s'il était vu par un observateur humain « standard »**.

\rightarrow nécessité d'utiliser les unités spécifiques de la **photométrie** lumen, lux, candela etc.

Voir §5 et une étude plus détaillée au ch4.

2- Sources monochromatiques (spectres de raies)

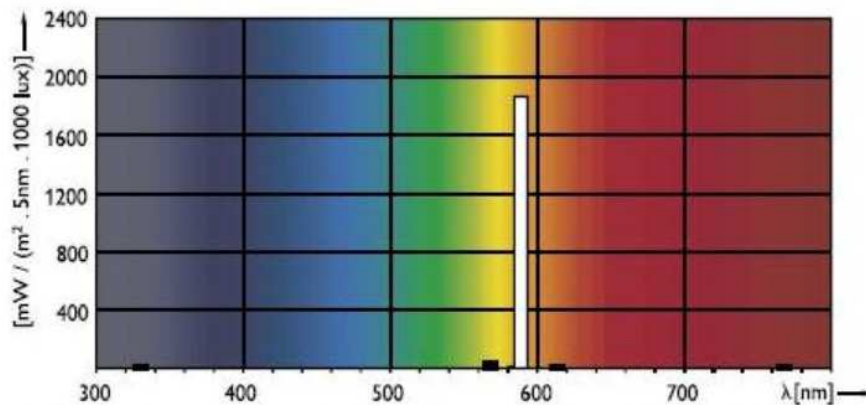
2.1- Lampe spectrale : électroluminescence dans un gaz



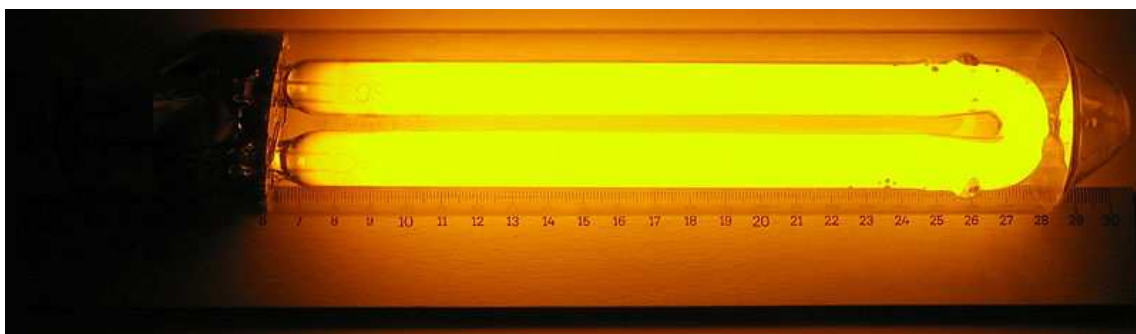
Emission après excitation thermique
(cristaux de NaCl dans la flamme)



Emission après excitation électrique
(lampe d'éclairage public)



Spectre de raie visible d'une lampe à vapeur de sodium basse pression
Master SOX-E 36 W (raie jaune à 589 nm)



Lampe d'éclairage public type *Mazda* Master SOX-E 36 W

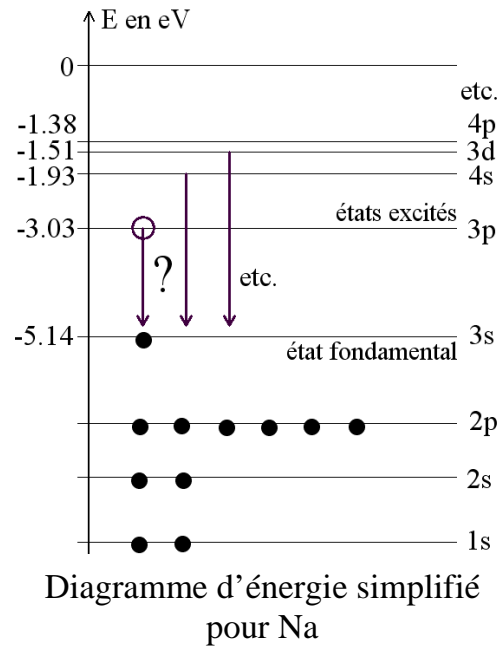
- Les électrons du cortège électronique d'un atome ne peuvent avoir que certains niveaux d'énergie.

- * $E = 0$ pour un électron quittant l'atome.
- * E_{\min} état fondamental
- * $E_{\min} < E < 0$ états excités.

- Absorption d'énergie par processus thermique, électrique etc.).

→ un électron transite vers l'état excité supérieur E_{sup} .

- **Emission spontanée d'un photon** lors de la désexcitation de l'électron : transition de E_{sup} vers E_{inf}



Energie du photon $\Delta E = E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}$ avec

$$\Delta E = hc / \lambda \text{ en J} \quad \text{et} \quad \Delta E = hc / (\lambda e) \text{ en eV.}$$

avec $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J.s Constante de Planck

$c = 3.0 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ vitesse de la lumière dans le vide

$e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C charge élémentaire → $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ J

L'émission de la raie jaune du ¹¹Na à 589,3 nm correspond à la transition $3p \rightarrow 3s$

$$\Delta E = E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}} = -3,03 - (-5,14) = 2,11 \text{ eV} = 2,11 \times 1.6 \cdot 10^{-19} = 3,38 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda_{\text{jaune Na}} = hc / \Delta E = 6.6 \cdot 10^{-34} \times 3.0 \cdot 10^8 / 3,38 \cdot 10^{-19} = 5,89 \cdot 10^{-7} = 589 \cdot 10^{-9} = 589 \text{ nm}$$

En résumé :

- Spectre de raies caractéristique de l'atome du gaz
- Largeur de raies très fines < 1 nm

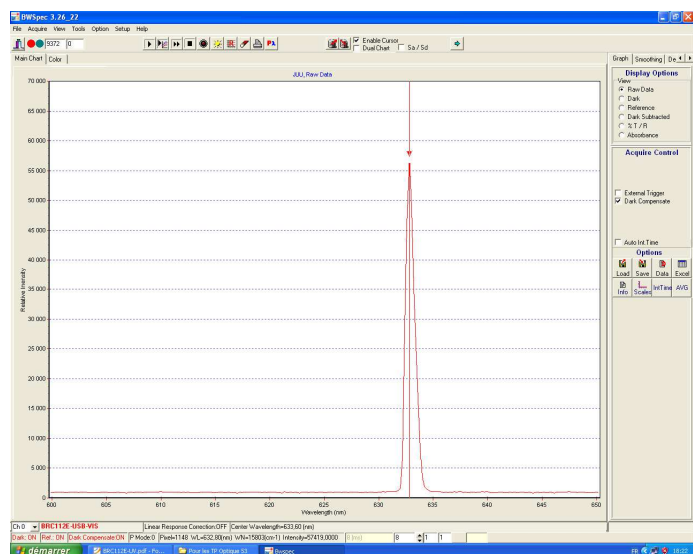
2.2- LASER

Processus d'émission plus complexe détaillé en TD S3

- Sélection d'une raie d'émission du matériau optique constate des raies
- Phénomène d'amplification optique

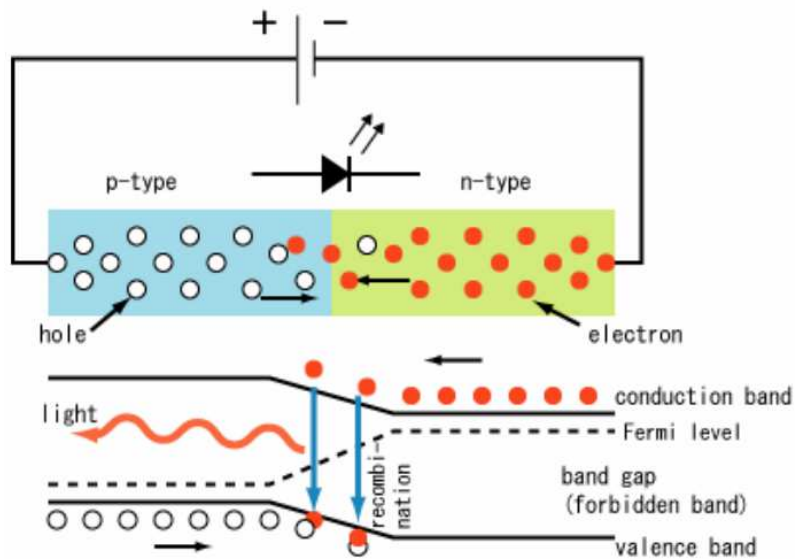
En résumé :

- Raie spectrale caractéristiques du type de laser
- Largeur de raies très fines < 1 nm

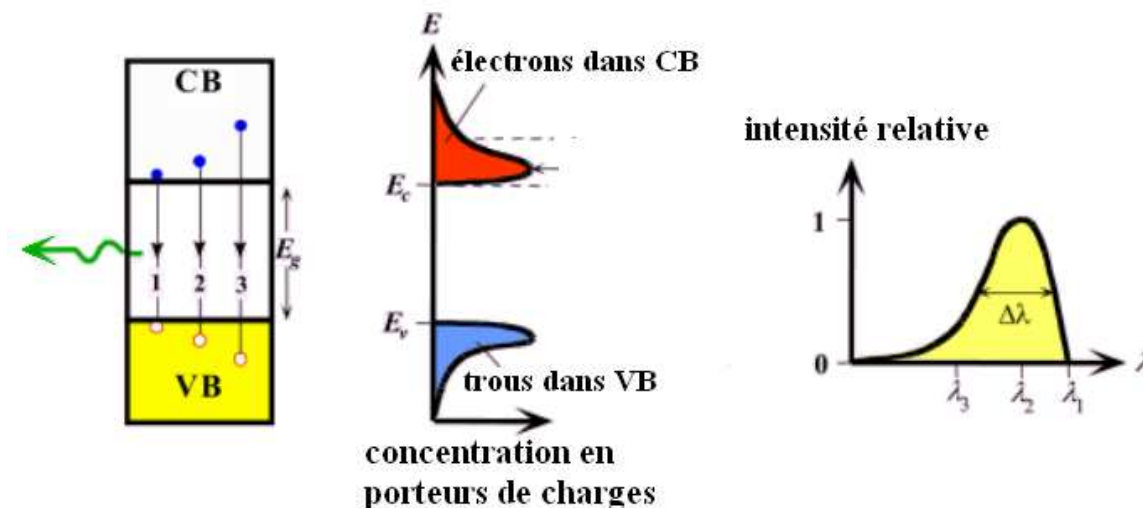


2.3- Diode électroluminescente LED

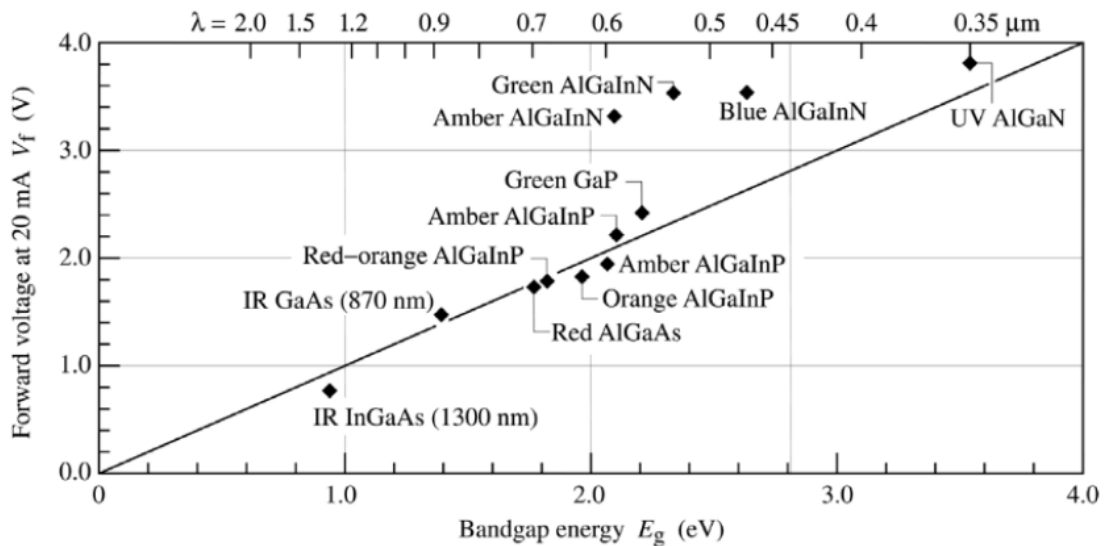
- LED : Light Emitting **Diode** → jonction de semi-conducteurs dopés n et p



- Excès d'**électrons** dans la zone dopée n, excès de **trous** dans la zone dopée p.
- Le générateur force un courant dans le **sens passant** de la diode (selon signe de la charge : mouvement des trous dans le sens de I, des électrons en sens inverse).
- Les électrons libres ont un niveau d'énergie situé dans la **bande de conduction** (CB). Il n'y a pas de niveau possible dans la **bande interdite** de largeur E_g (g pour « gap »).
- Recombinaison dans la zone de la jonction avec transition vers la **bande de valence** (VB). La **recombinaison** d'un électron et d'un trou **libère** \approx l'énergie E_g .
- Pour des matériaux optoélectroniques : essentiellement **recombinaison radiative**.



- Emission à $\lambda_{led} \approx hc / E_g$ (en J)
- Raies large : largeur de raie « à mi-hauteur » $\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{hc} 3kT$ soit 10 à 35 nm (visible) avec $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J.s Constante de Boltzmann) et T en kelvin.



Propriétés des principales LED actuelles

Une LED qui émet de la lumière est « passante » : à ses bornes on mesure la tension de seuil V_F au multimètre (F pour *forward* = « *direct* » ou « *passant* »).

L'énergie E d'un photon est environ celle d'un électron soumis à une tension de V_F volt, soit $E \approx E_g \approx e \times V_{seuil} \approx e \times V_F$ (en J) $\approx V_F$ (en eV !)

Ex : SFH415 LED IR à haut rendement, utilisée par ex. pour les télécommandes TV

- Conditions de fonctionnement typique :
 - * intensité $I_F = 100$ mA en mode impulsion
 - * $V_F = 1.3$ V
 - * flux total émis $F_e = 22$ mW

- « Couleur » d'émission de la LED

$$\lambda_{led} \approx hc / E_g \approx hc / (e \times V_F)$$

$$\lambda_{led} \approx 6.6 \cdot 10^{-34} \times 3.0 \cdot 10^8 / (1.6 \cdot 10^{-19} \times 1.3)$$

$$\lambda_{led} \approx 952 \text{ nm donc IR}$$

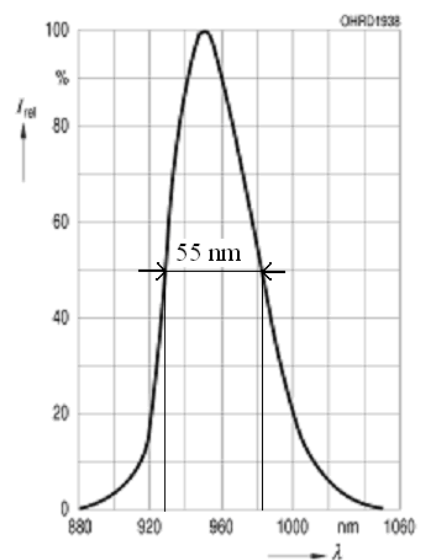
- Largeur de raie « à mi-hauteur »

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{hc} 3kT \approx 55 \text{ nm à } 25^\circ\text{C (298 K)}$$

- Rendement $\eta = F_e / P_{alim} = F_e / (V_F \times I_F)$
 $\eta = 22 \cdot 10^{-3} / (1.3 \times 100 \cdot 10^{-3}) = 22/130 \approx 17\%$

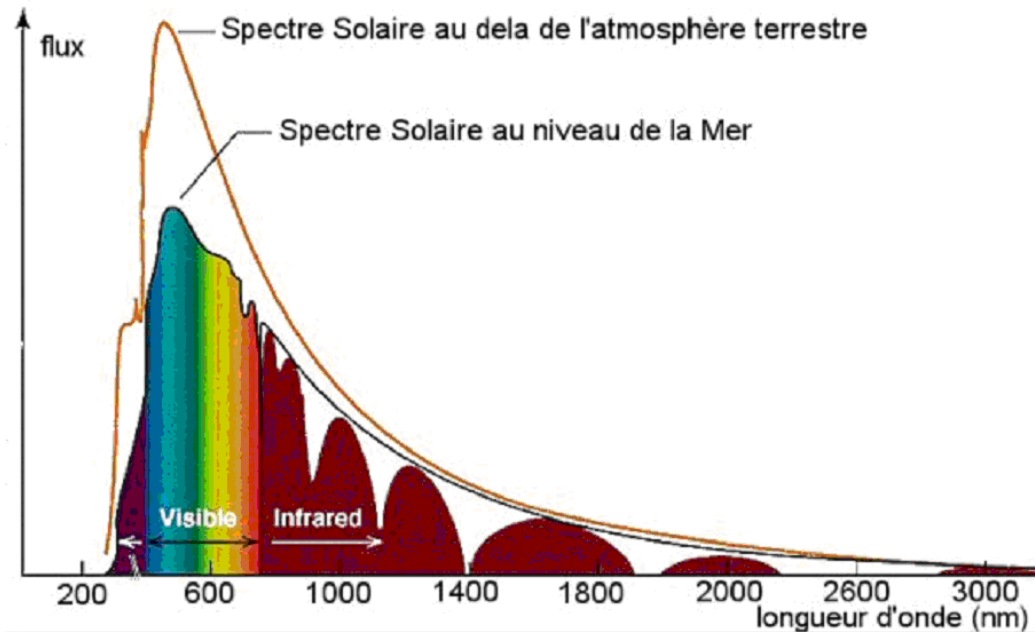
- Efficacité énergétique $\eta_L = F_l / P_{alim} = 0$
 car évidemment $F_l = 0$ lm
 émission en IR !

Relative Spectral Emission
 $I_{rel} = f(\lambda)$



3- Sources polychromatiques

3.1- Rayonnement thermique à spectre continu



Spectre « continu » du rayonnement solaire en fonction de λ

Modélisation par un corps noir à 5900 K (\approx température de la surface du soleil).

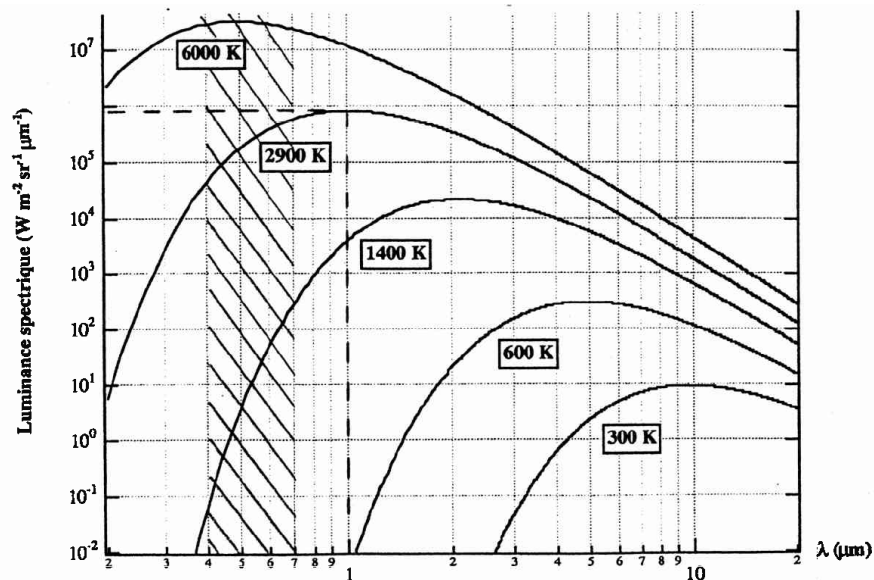
Vidéo : allumage progressif d'une lampe à incandescence.

Interprétation : lorsque T augmente, L_e et L_l augmentent et λ_{\max} se déplace des proches IR vers le visible. Il faut au moins 3000 K pour une « forte » émission dans le visible.

Modèle du photon dû à Einstein

Loi de Planck du « corps noir »

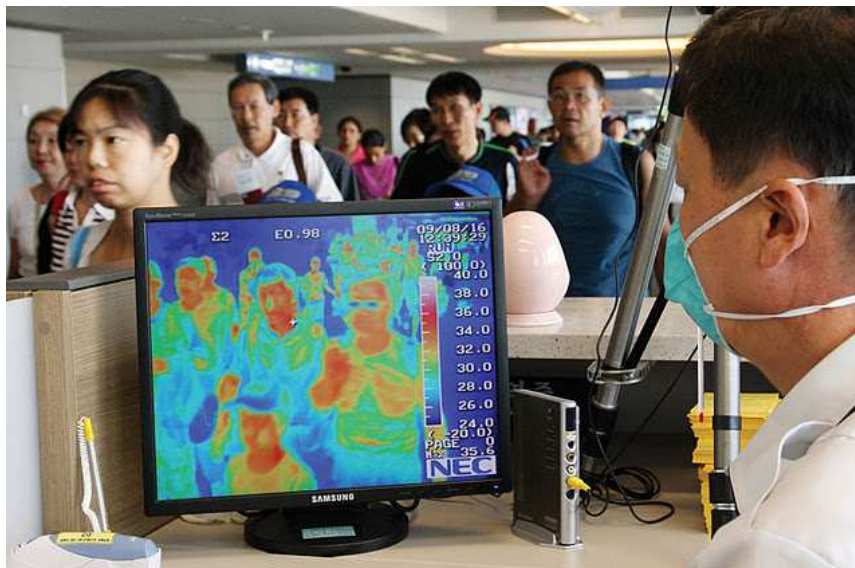
$$F_{e\lambda} = K \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)}$$



Tracé Log-Log des courbes d'un corps noir selon la température T

Flux énergétique total émis proportionnel à T^4

Emission maximale à $\lambda_{\max} = K_1 / T$ avec $K_1 = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$



Contrôle sanitaire en aéroport par caméra thermique
(prévention d'épidémie de grippe virale etc.)

La **caméra thermique** destinée au repérage d'une personne fiévreuse (température normale du front $35,8^\circ\text{C}$ à $37,8^\circ\text{C}$; fièvre si $>38,3^\circ\text{C}$) doit être particulièrement sensible à :

$\lambda \approx 2,898 \cdot 10^{-3} / (273 + 38) \approx 9,3 \mu\text{m}$ Infrarouge moyen

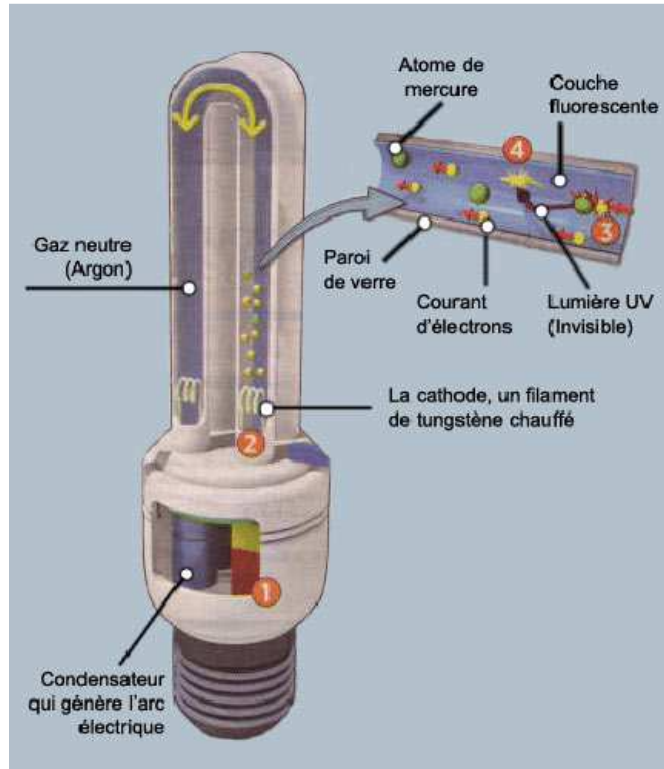
3.2- Rayonnement de fluorescence (à spectre continu)

Fonctionnement d'une lampe fluorescente compacte.

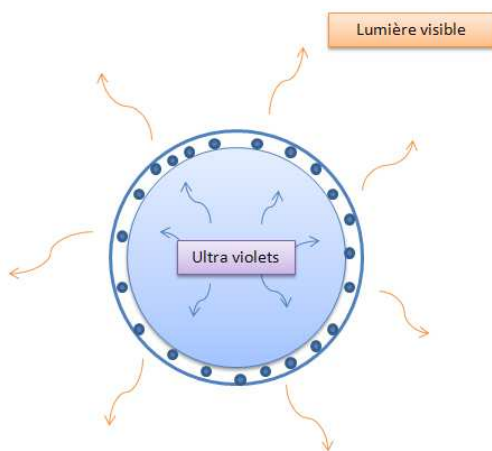
1- La base de l'ampoule abrite un **générateur de décharge** périodique qui assure un éclairage régulier.

2- Chaque décharge produit un arc électrique l'intérieur du tube rendant le gaz conducteur. À la cathode du tube, un filament de tungstène chauffé produit des électrons qui sont alors animé d'un mouvement de va-et-vient régulier (c'est à dire un courant électrique).

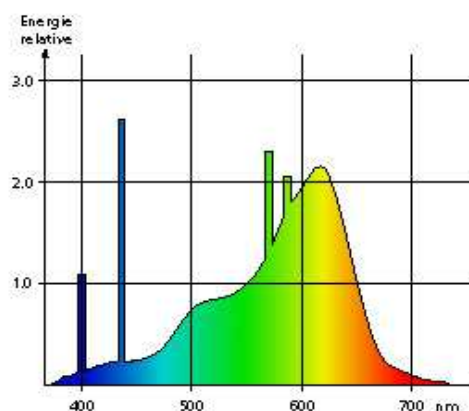
3- Les électrons percutent des atomes de mercure au sein du gaz dans le tube : le processus excitation/émission spontanée induit principalement l'émission des raies UV intenses du mercure.



4- Ces UV heurtent une couche fluorescente en surface du tube. Capable d'absorber les UV disponibles, les éléments de cette couche composés de sels minéraux émettent par fluorescence des bandes de raies visibles, d'apparence globale « blanche ».



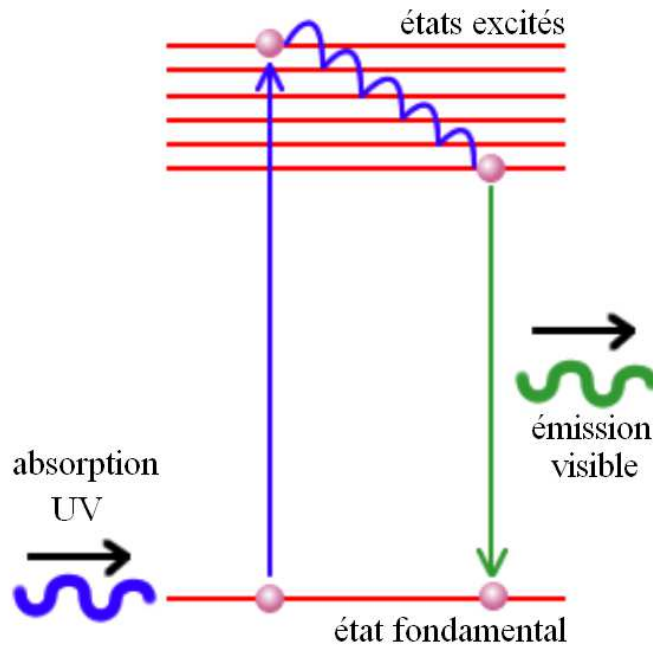
Vue en coupe du tube



Spectre d'émission d'un tube fluorescent (raies visibles du Mercure et bandes de fluorescence)

Principe de la fluorescence

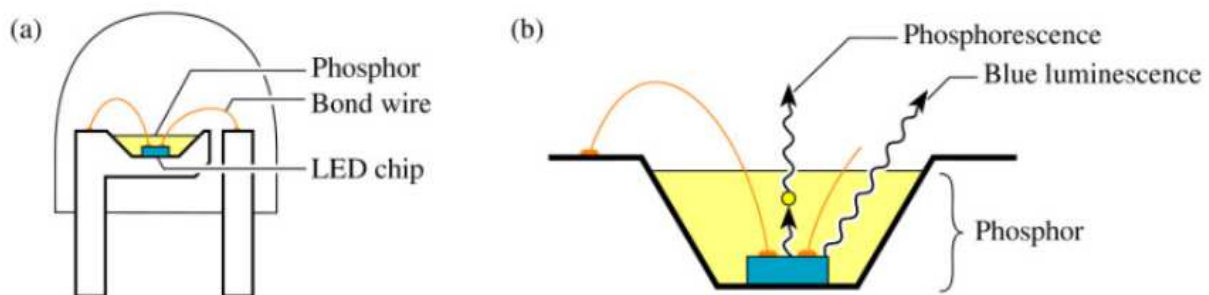
- Le composé fluorescent absorbe un photon UV correspondant à un ΔE possible.
- L'électron excité transite vers des niveaux inférieurs successifs par un processus non radiatif.
- Il transite enfin vers le fondamental par émission spontanée dans le visible avec un photon d'énergie moindre.
- Pour un même composé, plusieurs transitions sont possibles \rightarrow émission de bandes.



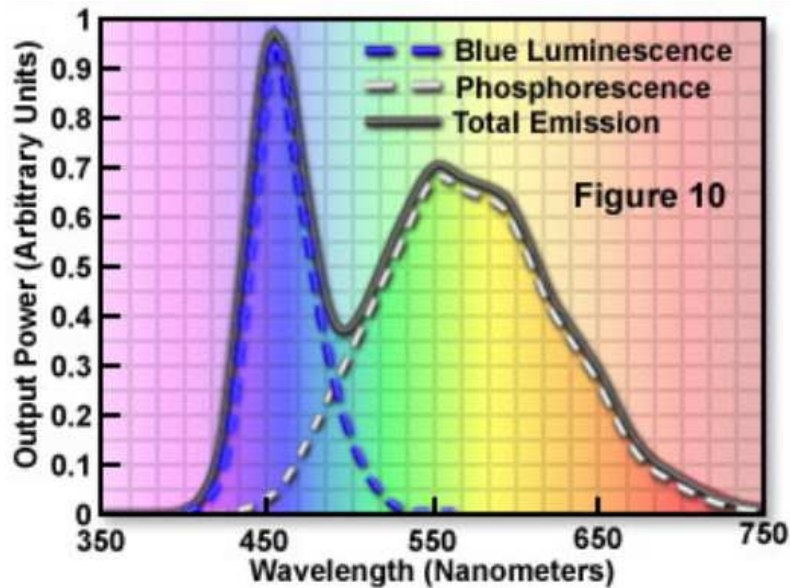
Le mélange de poudre de sels fluorescent permet d'obtenir un spectre large et de faire varier l'aspect global de l'éclairage.

LED « blanche » utilisant la phosphorescence par absorption de lumière bleue

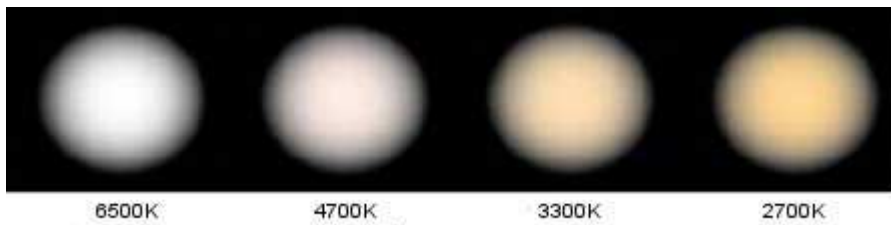
Le composant est une LED émettant fortement dans le bleu couplée avec un matériau phosphorescent.



Structure d'une LED blanche basée sur une LED bleue au GaInN encapsulée dans un mélange d'époxy et de colorants réémettant dans le visible par phosphorescence (une variante de la fluorescence)



Spectre typique d'une LED émettant une raie lumineuse bleue et une bande de phosphorescence



La température de couleur est adaptée selon la proportion de lumière réémise dans le jaune

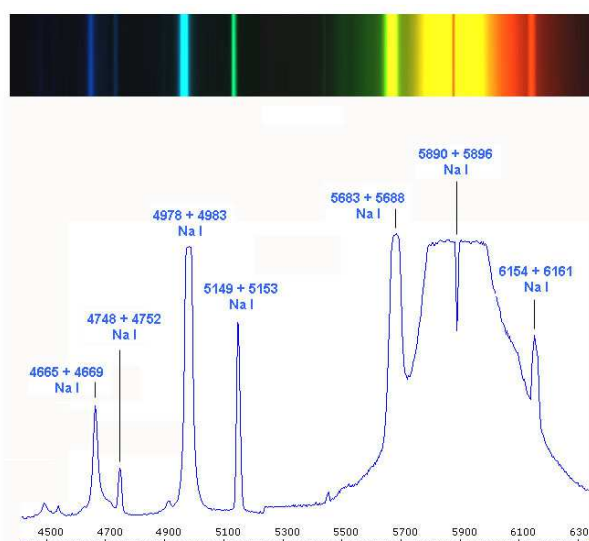
3.3- Lampes « Haute Pression » pour éclairage public (HPS)



Place du marché, Swidnica (Pologne)

Ex : MASTER SON PIA Plus 250W 12V

Eclairage sensiblement plus « blanc »



Spectre de raie d'une lampe à vapeur de sodium HPS.
(HPS : High Pressure Sodium)

4- Comparaison de sources d'éclairage

Principaux critères :

- Efficacité énergétique $\eta_L = F_l / P_{\text{alim}}$ (flux lumineux global émis toute couleur confondue / puissance électrique consommée, en lm.W^{-1})
- Qualité chromatique (appréciée par un panel d'utilisateurs) IRC Indice de Rendu des Couleurs (IRC = 1 lumière solaire, IRC = 0 en monochromatique !)
- Durée de vie moyenne
- Prix...

Type de lampe	Utilisation	Efficacité énergétique en lm.W^{-1}	IRC	Durée de vie en h	Prix typique en €
Sodium BPS	Eclairage public	178	0 (jaune !)	13000	22
Sodium HPS	Eclairage public	125	25	36000	16
Tube fluorescent	locaux	100	85	24000	4
LED blanche	Locaux, guirlande	80	85	35000	13
Halogène BT 12 V	Locaux (spots etc.) Phares de voiture	28	100	2000	15
Halogène HT 220 V	Locaux	16	100	2000	4
Incandescence classique	Locaux	15	95 à 100	1000	1 à 2 hors vente !



Halogène
BT



Halogène
HT



Sodium
HPS



Tube
fluorescent



Lampe à LED

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

5.1- Caractérisation de la vision de l'œil standard

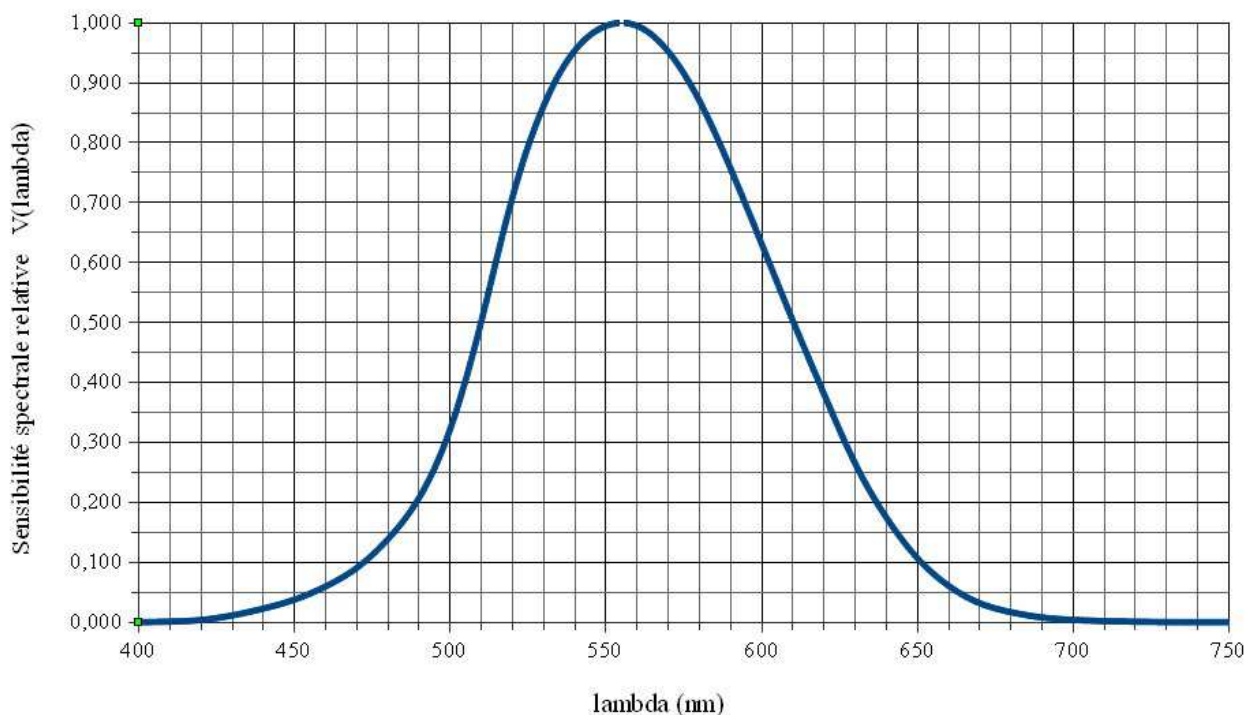
- L'observation d'un rayonnement se traduit pour un être humain par un ensemble de **stimulations visuelles interprétées par le cerveau** en termes de couleurs (**analyse des impressions colorées = colorimétrie**) ou de niveau sur une échelle d'importance (**analyse de la quantité de rayonnement = photométrie**).

Ces impressions dépendent du sujet, de son âge, de sa fatigue, des conditions d'éclairage actuelles et antérieures (éblouissement, accoutumance) → 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 aux niveaux de **luminosité ambiante usuel** ; elle met en jeu des détecteurs de la rétine appelés « cône » (il y en a de trois types qui permettent en général une bonne appréciation des couleurs). **Le maximum de sensibilité se situe à 555 nm.**

Sensibilité spectrale relative en vision de jour

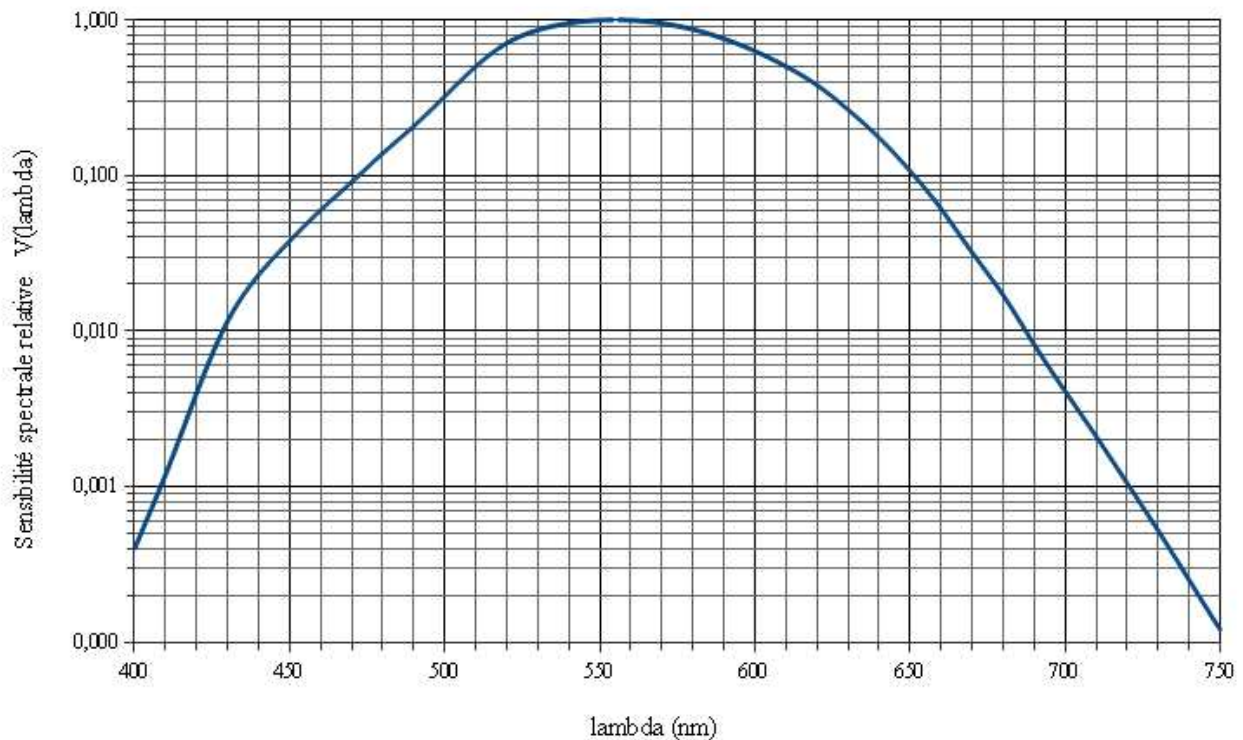
Efficacité lumineuse 683 lm/W maximale à 555 nm



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 en vision de jour

Efficacité lumineuse 683 lm/W maximale à 555 nm



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

Depuis 1978 le raccordement entre les deux systèmes d'unités est basé sur la vision de jour de l'œil standard CIE au maximum de la courbe $V(\lambda)$ soit $K_m = 683$ lumen \leftrightarrow 1 watt pour $\lambda = 555$ nm .

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

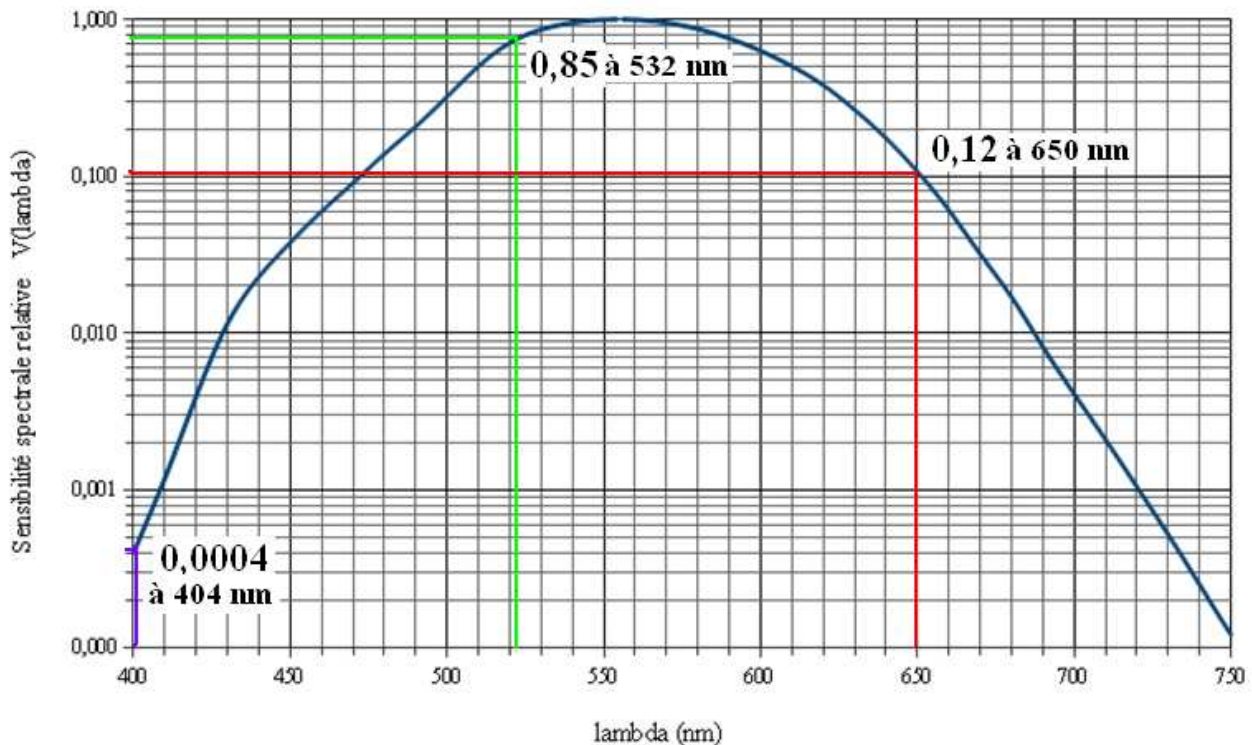
5.2- Cas d'une lumière monochromatique

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

Ex : comparer l'impression visuelle donnée par trois diodes laser émettant dans le vert, le rouge et le violet.

Sensibilité spectrale relative en vision de jour

Efficacité lumineuse 683 lm/W maximale à 555 nm



Diode laser 1 mW à 532 nm (vert) :

$$F_e(532 \text{ nm}) = 1 \text{ mW}$$

$$\text{lecture } V(532 \text{ nm}) = 0,85$$

$$F_l(\lambda_p) = F_e(\lambda_p) \times K_m \times V(\lambda_p) = 0,001 \times 683 \times 0,85 = 0,58 \text{ lm}$$

Diode laser 2 mW à 650 nm (rouge) :

$$F_e(650 \text{ nm}) = 2 \text{ mW}$$

$$\text{lecture } V(650 \text{ nm}) = 0,12$$

$$F_l(\lambda_p) = F_e(\lambda_p) \times K_m \times V(\lambda_p) = 0,002 \times 683 \times 0,12 = 0,164 \text{ lm}$$

Paraît $0,58 \text{ lm} / 0,164 \text{ lm} = 3,5$ fois moins visible mais $2 \text{ mW} / 1 \text{ mW} = 2$ fois plus dangereux que ce laser vert.

Diode laser 5 mW à 404 nm (violet) :

$$F_e(404 \text{ nm}) = 5 \text{ mW}$$

$$\text{lecture } V(404 \text{ nm}) = 0,0004$$

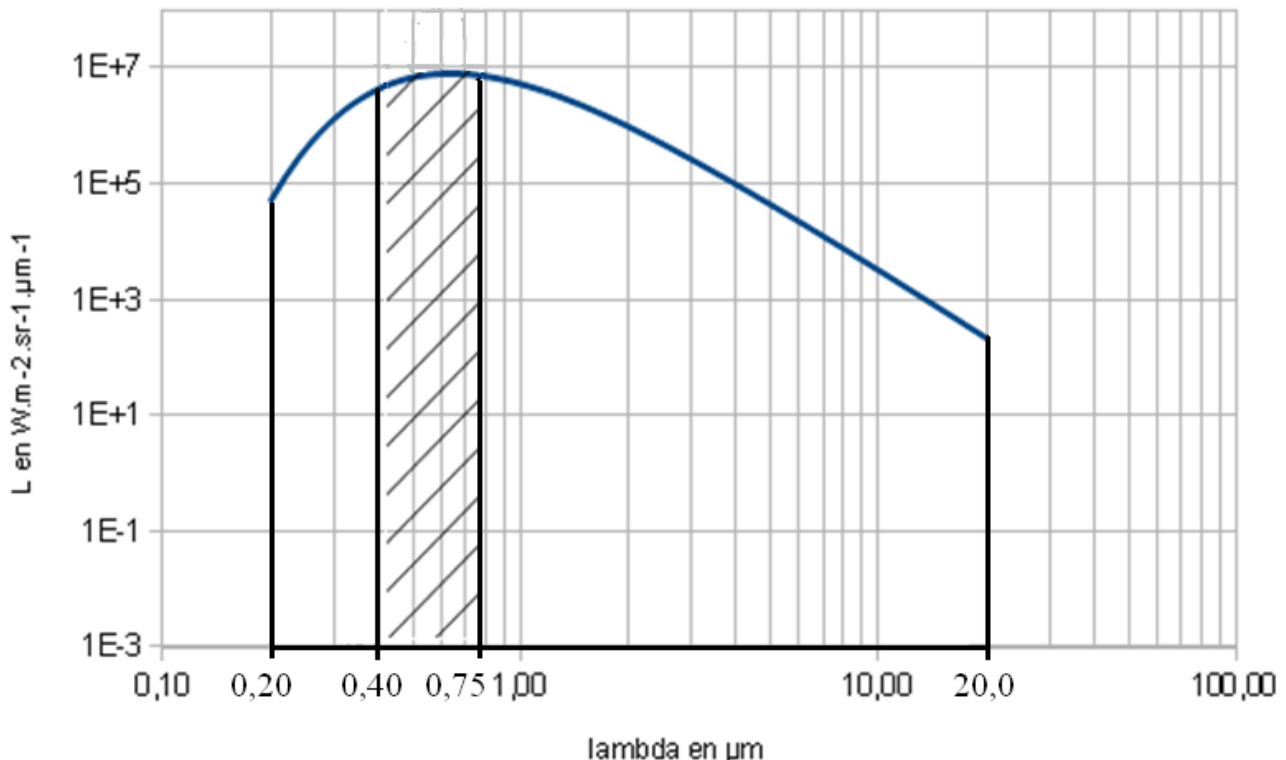
$$F_l(\lambda_p) = F_e(\lambda_p) \times K_m \times V(\lambda_p) = 0,005 \times 683 \times 0,0004 = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ lm}$$

Paraît $0,58 \text{ lm} / 0,00027 \text{ lm} = 2100$ fois moins visible mais $5 \text{ mW} / 1 \text{ mW} = 5$ fois plus dangereux que ce laser vert !



5.3- Cas d'une lumière polychromatique à spectre continu

Lumière émise par une lampe halogène assimilée à un corps noir à 4550°C (cf. 3.1)



On constate une émission préférentielle dans l'infrarouge.

Calcul du flux énergétique :

Dans le cas d'un rayonnement à spectre continu, l'information est plus complexe ; elle est résumée dans le graphe du **flux énergétique spectrique** $F_{e\lambda} = \frac{dF_e}{d\lambda}$ en $W.m^{-1}$.

Les intégrales correspondent aux surfaces sous la courbe dans la plage de λ choisie

$$F_e = \int_0^{+\infty} F_{e\lambda} d\lambda \quad \text{flux énergétique rayonné dans la totalité du spectre, en W}$$

$$F_{e\Delta\lambda} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} F_{e\lambda} d\lambda \quad \text{flux rayonnée (en W) dans la partie du spectre choisie}$$

$\Delta\lambda = [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ est par exemple la bande visible.

Dans cet exemple, on calcule numériquement :

- F_e total émis (sur la plage 200 nm ; 20 000 nm, soit 20 μm) = 1083 mW

- F_e émis dans le visible (sur la plage 400 nm ; 750 nm) = 400 mW

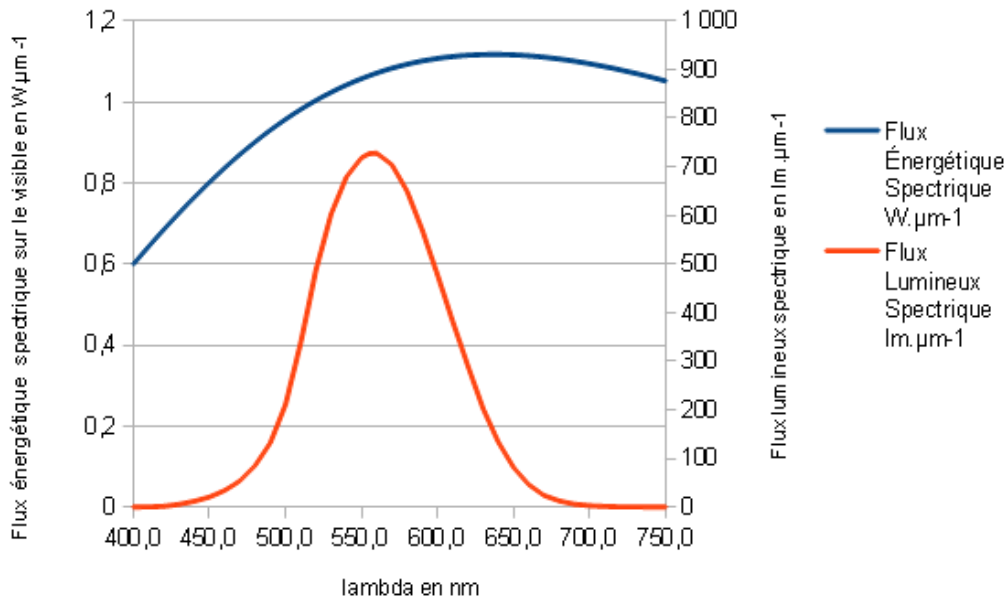
Soit 37 % émis dans le visible

Calcul du flux lumineux

Sur la plage de largeur $d\lambda$, on a le raccordement $dF_l(\lambda) = F_e(\lambda) \times K_m \times V(\lambda) d\lambda$

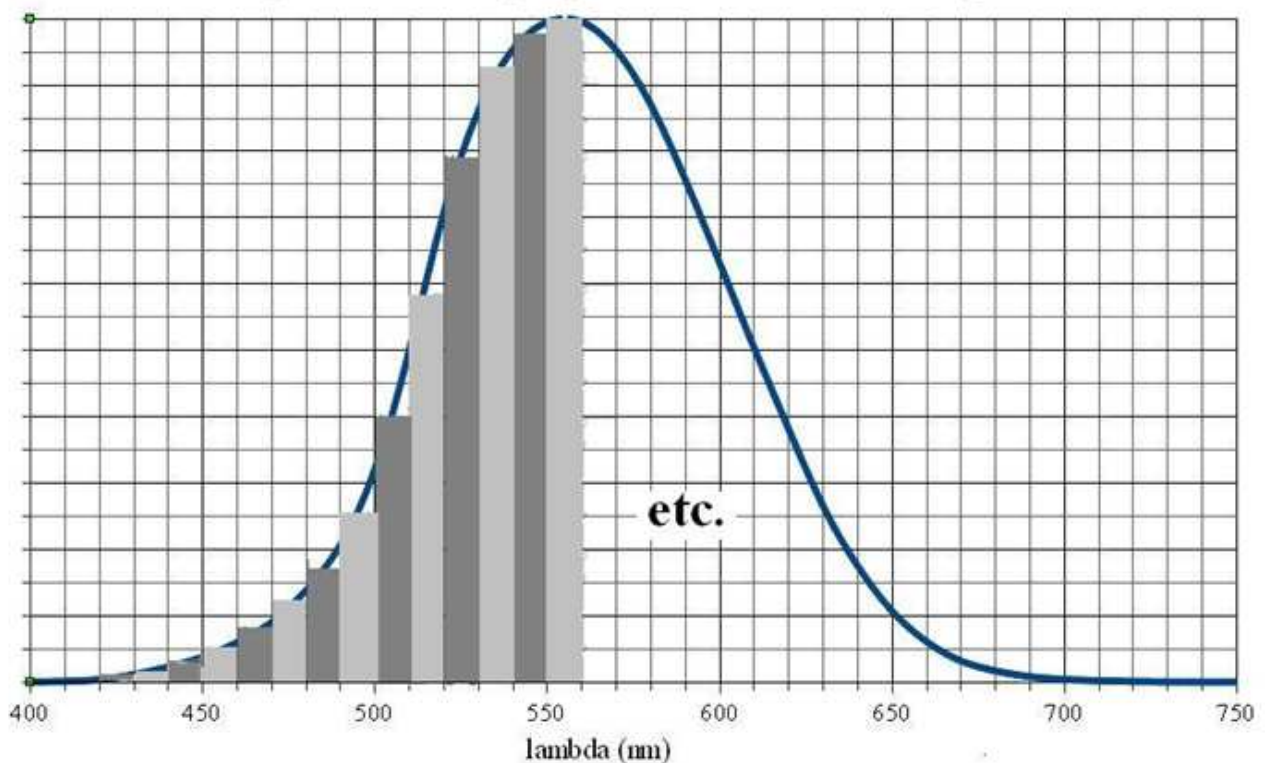
Le flux lumineux global sur le visible est

$$F_l = \int_{\lambda \text{ visible min}}^{\lambda \text{ visible max}} F_{l\lambda} d\lambda = \int_{\lambda \text{ visible min}}^{\lambda \text{ visible max}} F_{e\lambda} \times K_m \times V(\lambda) d\lambda$$



F_l est la surface sous la courbe rouge. On peut l'estimer par la méthode numérique suivante avec un tableur :

Intégration numérique par la méthode des rectangles



On calcule pour une suite de valeurs particulières espacée de $\delta\lambda$

$$\lambda_k = \lambda_{\min} + k \times \delta\lambda$$

k varie entre 0 et k_{\max} tel que $\lambda_{\min} + (k_{\max} - 1) \times \delta\lambda < \lambda_{\max} < \lambda_{\min} + k_{\max} \times \delta\lambda$

On a exactement
$$F_l = \int_{\lambda \text{ visible min}}^{\lambda \text{ visible max}} F_{e\lambda} \times K_m V(\lambda) d\lambda$$

Mais on calcule avec le tableur
$$F_l \approx \sum_0^{k \text{ max}} F_{e\lambda}(\lambda_k) \times K_m \times V(\lambda_k) \times \delta\lambda$$

Dans cet exemple, on calcule numériquement pour $102 - 33 = 69$ valeurs de k avec une bande de largeur $\delta\lambda = 5 \text{ nm}$.

La somme donne une correspondance $400 \text{ mW} \leftrightarrow 76,97 \text{ lm}$ avec la répartition « en cloche donnée » !

Soit un $V_{\text{moyen}} = F_l / (K_m F_e) = 76,97 / (683 * 0,4) \approx 0,28$ environ

Sources des figures et des images :

1.1

<http://www.datasheetarchive.com/DL-3147-060-datasheet.html>

<http://www.hellopro.fr/images/produit-2/1/1/2/diode-laser-continue-276211.jpg>

1.2

<http://www.confort-electrique.fr/images/Image/ampoule/philips/philips-807271.jpg?osCsid=7as5077hufaurgs4kjqvad4kp4>

2.1

<http://www.mazdaclairage.com/catalogue/index.asp?CAT=RECH&Mq=mzd>

http://helpexoschim.oldiblog.com/sites/images/photos/145/photo_1458886.jpg

<http://www.mazdaclairage.com/catalogue/index.asp?CAT=PRDT&Mq=mzd>

2.3

<http://www.southalabama.edu/engineering/ece/faculty/akhan/Courses/EE555-455-fall08/EE555.htm>

<http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/LED-slide-show.pdf>

3.1

d'après <http://www.sc-astro.com/photos/autres/naturelumiere/spectresolaire.jpg>

Base de radiométrie optique par JL Meyzonette et T. Lépine Cépaduès 1999 p 98

<http://www.youtube.com/watch?v=rckgywwB4aQ> vidéo lampe incandescence

<http://1.bp.blogspot.com/->

9v2Ba5pyOAK/ToQYjl6nxhI/AAAAAAAAAAmQ/jnpRrMQ_24w/s640/132329-050-B9442308.jpg

3.2

<http://www.savoirs.essonne.fr/sections/ressources/photos/photo/schema-du-fonctionnement-de-la-lampe-fluorescente-compacte/>

<http://www.led-fr.net/tubes-fluorescents.htm>

d'après http://scienceblogs.com/purepedantry/2007/11/two_photon.php

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/Spectre_d%27un_tube_fluorescent_blan_c_haud.jpeg

3.3

<http://www.mazdaclairage.com/catalogue/index.asp?CAT=PRDT&Mq=mzd>

<http://www.astrosurf.com/astro-images/spectro-buil/sodium/sodium.htm>

4

Divers catalogues

5.2

<http://www.apinex.com/det/LBM.html>

Sommaire

SOURCES DE LUMIERE	1
1- « Puissance en optique » : flux énergétique et lumineux	1
2- Sources monochromatiques (spectres de raies)	2
3- Sources polychromatiques	6
4- Comparaison de sources d'éclairage	11
5- Influence de l'œil humain : raccordement entre unités radiométriques et photométriques	12
Sources des figures et des images :	18
Sommaire	18