

2 FORMATION de l'IMAGE

2.1 ENERGIE LUMINEUSE

Une Image, au sens optique du terme, est une certaine quantité d'informations véhiculée par des ondes électromagnétiques caractérisées par leur longueur d'onde et leur énergie (ou répartition spectrale d'énergie). Ces ondes lumineuses correspondent à une émission d'énergie, sous forme de photons, due aux transitions atomiques de corps chauffés.

D'autres types de phénomènes peuvent conduire à une émission lumineuse (fluorescence, phosphorescence ...)

2.1.1 Loi de Planck

Un corps noir chauffé à une température T émet une puissance rayonnante P en $W.m^{-2}$ telle que :

$$P(\lambda) = \frac{C1}{\lambda^5 (\exp(\frac{C2}{\lambda T}) - 1)}$$

$$C1 = 2c^2h \quad C2 = \frac{c h}{k}$$

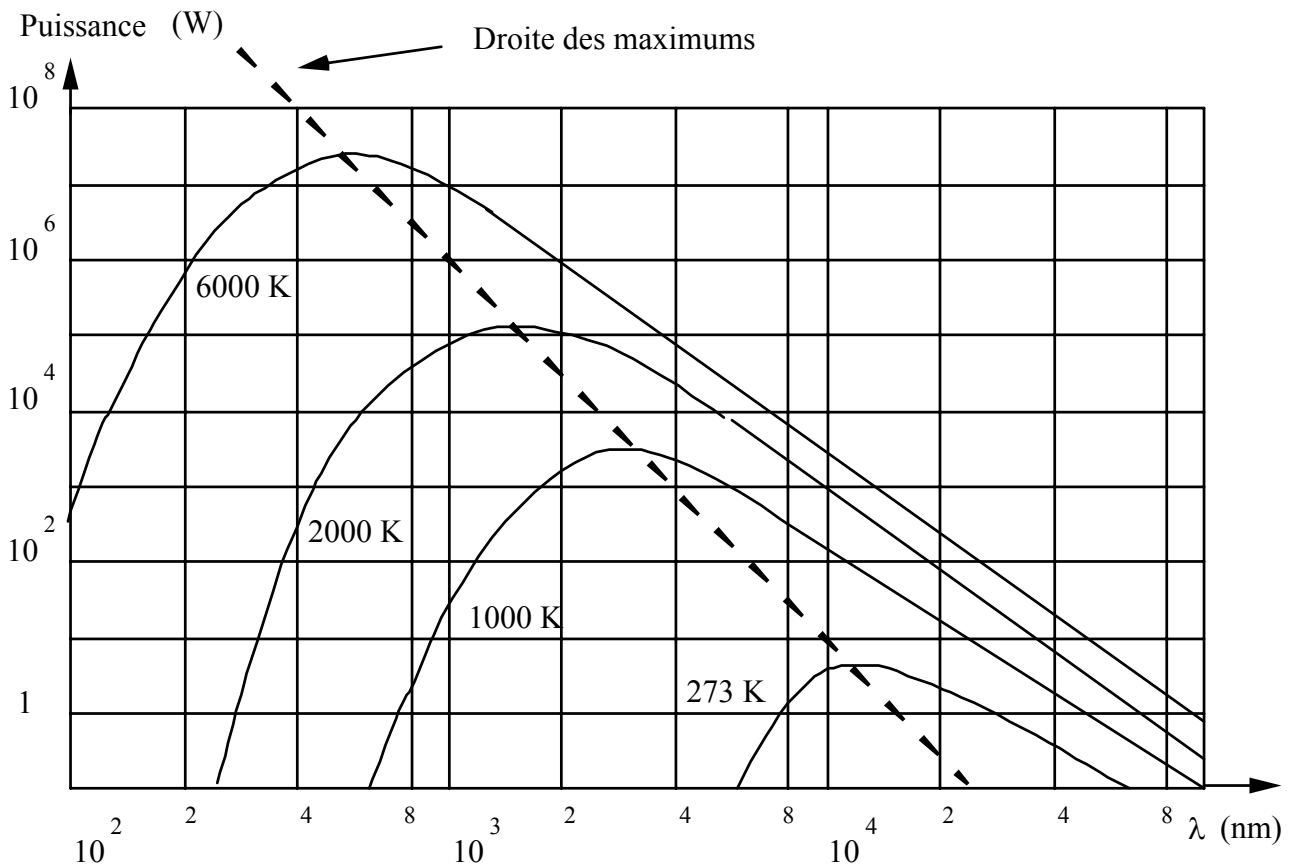
c : vitesse de la lumière dans le vide = $2,998.10^8 \text{ m.s}^{-1}$

h : constante de Planck = $6,62.10^{-34} \text{ J.s}$

k : constante de Boltzmann = $1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

T : température en kelvin

λ : longueur d'onde (m^{-1})



Spectre de puissance lumineuse émise par un corps noir par unité de surface

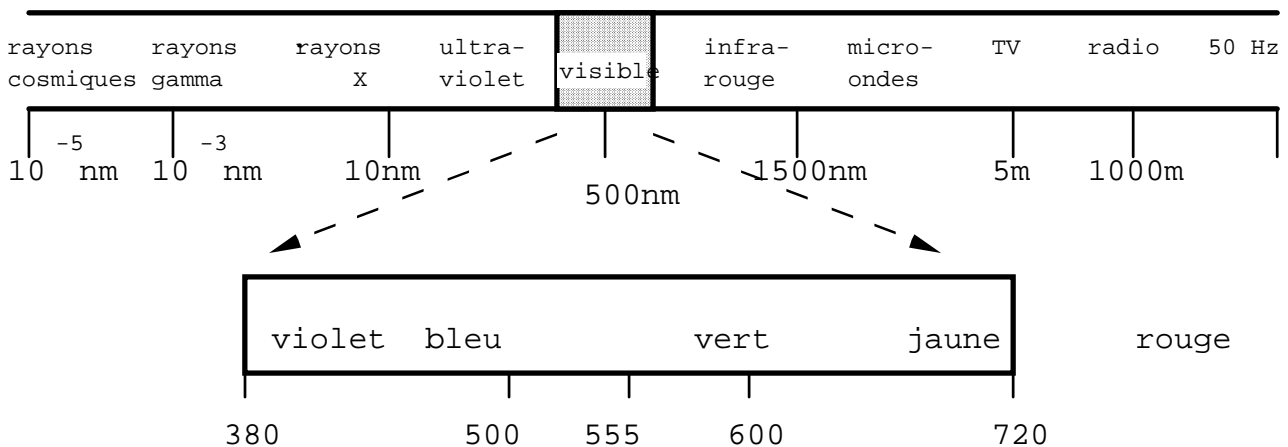
La puissance totale rayonnante est égale à :

$$P \text{ (W.m}^{-2}\text{)} = \int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{Loi de Stefan-Boltzmann}$$

Le maximum du spectre de puissance est donné par :

$$\frac{\partial P(\lambda)}{\partial \lambda} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_m T = \frac{C_2}{5} = 2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m.K} \quad \text{[Loi de Wien]}$$

2.1.2 Classification fréquentielle des ondes lumineuses



Lumière visible	:	Détectée par l'œil
Lumière chromatique	:	Composée de plusieurs longueur d'onde
Lumière monochromatique	:	Une seule longueur d'onde (LASER)
Lumière achromatique	:	Seule l'énergie est prise en compte (niveaux de gris)

2.1.3 Température de couleur

Lorsqu'un corps chauffe il émet un certain spectre de lumière (voir loi de Wien). Plus on chauffe, plus le spectre sera décalé vers les longueur d'onde courtes.

La température de couleur est égale à la température du corps noir dont le maximum du spectre de rayonnement correspond à la couleur en jeu.

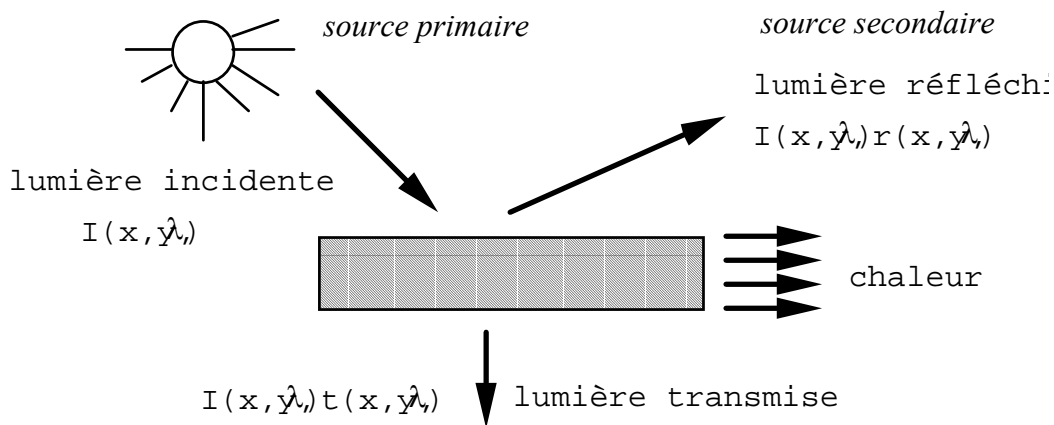
ex:	Flamme bougie	1900 K
	Lampe à incandescence	2700 K
	Lampe FLOOD	3400 K
	Soleil	6000 K
	Tube cathodique	7000 K

La vision humaine a pour référence la lumière solaire (assimilée au blanc parfait), aussi lorsque d'autres sources lumineuses sont utilisées (lampe à incandescence ...) pour des besoins d'éclairage en photo ou vidéo, la couleur rendue peut être différente. Il est donc nécessaire de faire des corrections - filtrage (film de sensibilité chromatique adaptée, équilibrage du blanc en vidéo ...)

2.2 RADIOMETRIE

2.2.1 Réflexion et transmission de la lumière

Dans la plupart des cas, la vision que l'on a des objets n'est pas due à leur rayonnement propre mais à leur interaction avec une source lumineuse.



Les fonctions r et t sont caractéristiques de l'objet, exemples :

$r(x, y) = 0.01$ pour le velours noir	$t(x, y) = 0$ pour un objet opaque
$r(x, y) = 0.8$ pour le blanc mat	$t(x, y) \approx 1$ pour une vitre
$r(x, y) = 0.93$ pour la neige fraîche	
$r(x, y) \approx 1$ pour un miroir	

Le coefficient de réflexion d'un objet vert sera maximum pour la longueur d'onde correspondante (550 nm). Un filtre optique rouge aura un coefficient de transmission élevé pour cette longueur d'onde, et quasiment nul pour le reste du spectre.

2.2.2 Loi de Lambert

" La quantité d'énergie émise à partir d'un élément de surface dans une direction déterminée est proportionnelle au cosinus de l'angle que fait cette direction avec la normale à la surface " $dW_\theta = dW_n \cos(\theta)$

Cette loi n'est en fait rigoureusement vraie que pour les corps noirs, mais elle est couramment appliquée sans induire trop d'erreur. Bien sûr, elle n'est pas valable pour les surfaces brillantes !

2.2.3 Unités radiométriques

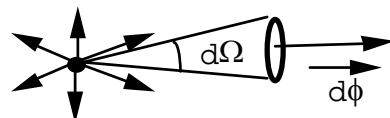
Source lumineuse ponctuelle

FLUX ENERGETIQUE : $\Phi = \frac{dW}{dt}$

(W)

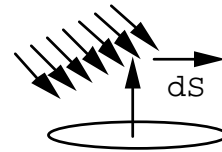
INTENSITE ENERGETIQUE : $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$

(W.sr⁻¹)

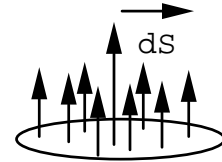


Surface lambertienne

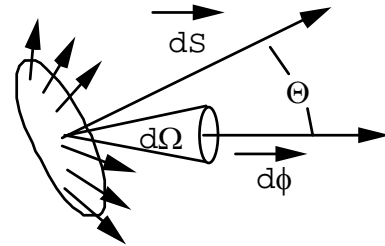
ECLAIREMENT ENERGETIQUE : $E = \frac{d\Phi}{dS}$
 ($W.m^{-2}$)



EMITTANCE ENERGETIQUE : $M = \frac{d\Phi}{dS}$
 ($W.m^{-2}$)



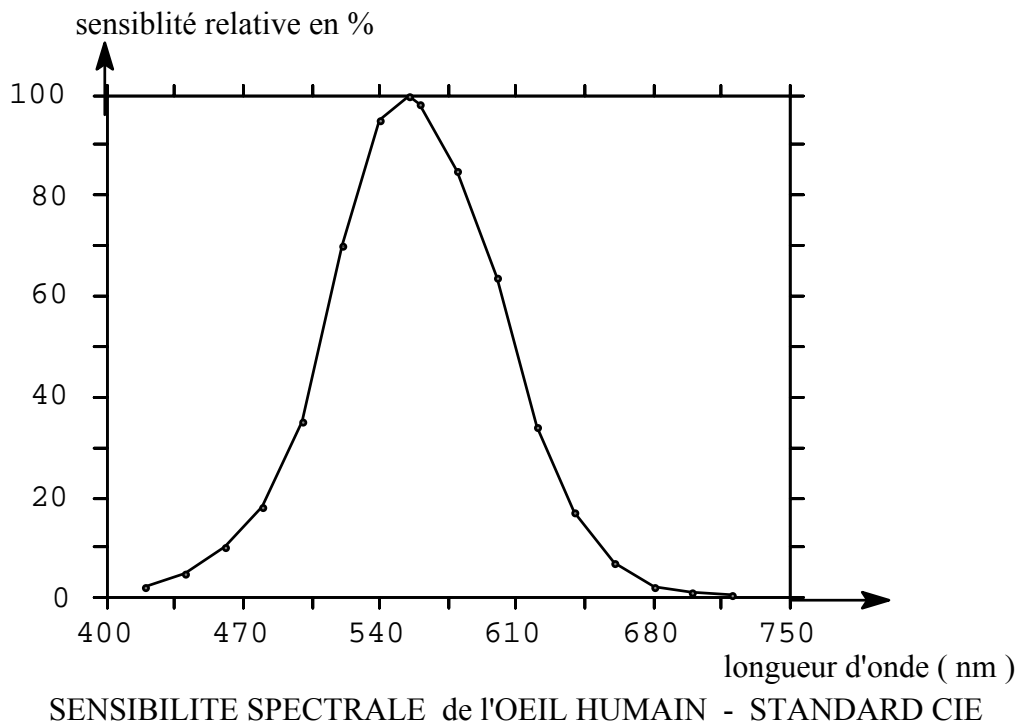
LUMINANCE ENERGETIQUE : $L = \frac{d^2\Phi_\theta}{d\Omega dS \cos(\theta)}$
 ($W.m^{-2}.sr^{-1}$)



2.3 PHOTOMETRIE

2.3.1 Sensibilité spectrale de l'œil humain

La vision humaine n'a pas une sensibilité égale dans tout le spectre visible. La notion d'énergie lumineuse perçue par l'œil est subjective, dépendante de la longueur d'onde. La courbe ci-après montre la réponse spectrale de l'œil moyen - standard CIE (Commission Internationale de l'Eclairage).



2.3.2 Unités photométriques

La photométrie exprime les mêmes unités que la radiométrie mais en prenant en compte les spécificités de la vision humaine.

<u>Radiométrie</u>		<u>Photométrie</u>	
Flux énergétique	(W)	Flux lumineux	lumen (lm)
Intensité	" (W.sr ⁻¹)	Intensité lumineuse	candela (cd)
Eclairement	" (W.m ⁻²)	Eclairement	lux (lx = lm.m ⁻²)
Luminance	" (W.m ⁻² .sr ⁻¹)	Luminance	nit (= cd.m ⁻²)

Unité de base : *La candela - Intensité lumineuse dans une direction donnée d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de 540.10¹² Hz (≈ 555 nm) et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1 / 683 W.sr⁻¹*

Efficacité lumineuse : C'est le rapport photométrie-radiométrie

$$k = \frac{\text{flux lumineux}}{\text{flux énergétique}} \quad \text{à 555 nm, } k = 683 \quad \text{pour le soleil, } k \approx 250$$

Quelques valeurs :

nuit sombre	10 ⁻⁴ lux	minimum visible	10 ⁻⁵ nit
ciel étoilé	10 ⁻³ lux	vert luisant	50 nits
pleine lune	10 ⁻¹ lux	flamme	15 10 ³ nits
norme couloir	> 50 lux	papier blanc au soleil	30 10 ³ nits
norme salle de lecture	>300 lux	arc électrique	1.5 10 ⁸ nits
jour ciel couvert	10 ³ lux	soleil	1.5 10 ⁹ nits
table d'opération	10 ⁵ lux		

Unités anglo-saxonnes

$$\begin{aligned} 1 \text{ footlambert (ft.L)} &= 3,426 \text{ cd.m}^{-2} \\ 1 \text{ lambert (L)} &= 3,183.10^3 \text{ cd.m}^{-2} \\ 1 \text{ footcandle (ft.c)} &= 10,76 \text{ lx} \end{aligned}$$

2.3.3 Relation émittance - luminance

Soit une surface lambertienne dS : $L_{\theta} = \frac{d^2\Phi_{\theta}}{d\Omega dS \cos(\theta)}$

$$I_{\theta} = \frac{d\Phi_{\theta}}{d\Omega} \quad \text{et} \quad I_{\theta} = I_N \cos(\theta) \quad [\text{Lambert}] \quad \text{d'où} \quad L_{\theta} = \frac{dI_{\theta}}{dS \cos(\theta)} = \frac{dI_N}{dS}$$

La luminance est constante quel que soit " l'angle d'observation "

De plus, l'émittance d'une surface lambertienne est égale au produit de sa luminance par π

En effet : $M = \frac{d\Phi}{dS}$ avec $d\Phi = Id\Omega = LS \cos \theta \cdot 2\pi \sin\theta d\theta$

d'où, en intégrant sur un demi-espace $\Phi = \int_0^{\pi/2} d\Phi = \pi LS$ on en déduit alors $M = \pi L$

2.3.4 Exemples de calculs

Evaluation de la Luminance du soleil

- Données : Eclairage énergétique reçu : 500 W.m^{-2}
 Efficacité lumineuse : 250 lm.W^{-1}
 Angle sous lequel est vu le soleil : 10^{-2} rd (0.5 degré)
 Angle solide correspondant (Ω_r) : $\frac{\pi}{4} 10^{-4} \text{ Str}$

Le soleil peut être approximé par une surface lambertienne émettrice S_e
 L'éclairage reçu par une surface S_r égale à 1 m^2 est de $500 \times 250 = 125000 \text{ Lux}$

Flux lumineux envoyé par le soleil dans un angle solide Ω_e : $\Phi_e = L S_e \Omega_e$

relation entre $S_r, S_e, \Omega_r, \Omega_e$: $S_e \Omega_e = S_r \Omega_r$

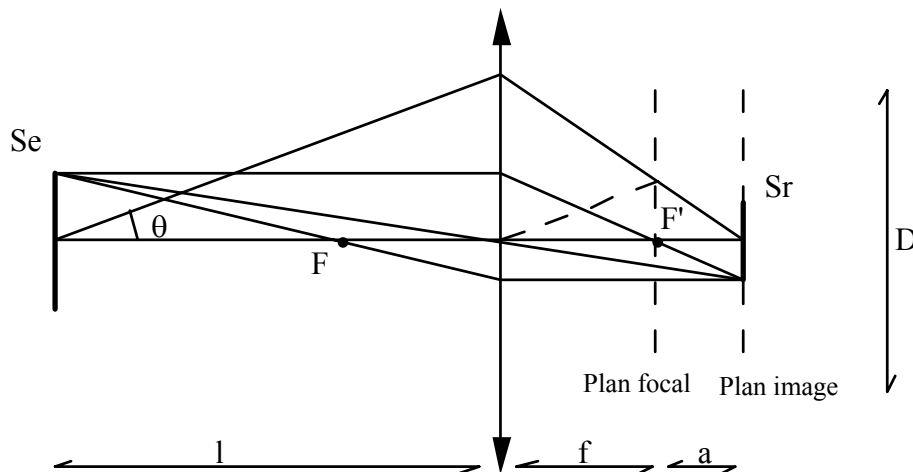
On a alors $E_{S_r} = \frac{\Phi_r}{S_r} = \frac{\Phi_e}{S_r} = \frac{L S_e \Omega_e}{S_r} = L \Omega_r$

d'où $L = \frac{E_{S_r}}{\Omega_r}$ A.N. $L \# 1.7 10^9 \text{ nits}$

Energie captée par une lentille

Soient les composants suivants :

- Lentille convergente de Diamètre D , de focale f et ayant un taux de transmission τ
- Surface lambertienne émettrice S_e de luminance L
- Surface réceptrice S_r



Calcul du flux lumineux total capté par la lentille

$$I_{\theta} = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad \square \quad \Phi_{\text{total}} = \int_{\Omega} I_{\theta} d\Omega$$

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos\theta) \quad \square \quad d\Omega = 2\pi \sin\theta \, d\theta \text{ d'autre part : } I_{\theta} = I_N \cos\theta$$

$$\text{d'où } \Phi_{\text{total}} = \int_0^{\theta_{\text{max}}} 2\pi I_N \cos\theta \sin\theta \, d\theta = \pi I_N \sin^2(\theta_{\text{max}})$$

$$\sin^2(\theta_{\text{max}}) = \frac{\frac{D}{2}}{\sqrt{\frac{D^2}{4} + l^2}} \quad \text{et } I_N = LSe \quad \text{On obtient donc } \Phi_{\text{total}} = \pi L Se \frac{\frac{D^2}{4}}{\frac{D^2}{4} + l^2}$$

$$\text{Ce flux est restitué sur } S_r, \text{ avec une atténuation } \tau : \Phi_{S_r} = \pi \tau LSe \frac{\frac{D^2}{4}}{\frac{D^2}{4} + l^2}$$

Calcul du rapport éclairement/émittance

$$\text{en introduisant l'émittance } E_{Se} \text{ de la surface } Se : \Phi_{S_r} = E_{Se} \tau Se \frac{\frac{D^2}{4}}{\frac{D^2}{4} + l^2}$$

$$\text{et en faisant le rapport des surfaces } \frac{S_r}{Se} = \frac{(f+a)^2}{l^2} \# \left(\frac{f}{l}\right)^2$$

$$\text{on peut calculer l'éclairement reçu } E_{S_r} : E_{S_r} = \frac{\Phi_{S_r}}{S_r} = E_{Se} \tau \left(\frac{l}{f}\right)^2 \frac{\frac{D^2}{4}}{\frac{D^2}{4} + l^2}$$

$$\text{avec l'hypothèse } l \gg D : E_{S_r} = E_{Se} \frac{\tau}{4} \frac{D^2}{f^2}$$

E_{S_r} ne dépend pas de l ; $\frac{D^2}{f^2}$ représente la vitesse ou le nombre d'ouverture de la lentille

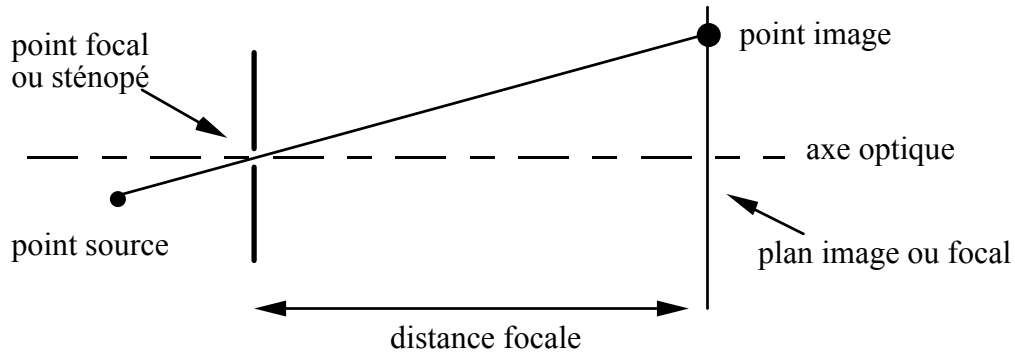
$$\text{Application Numérique : } \tau = 80 \% ; \frac{D}{f} = \frac{1}{2} \quad \frac{E_{S_r}}{E_{Se}} \# 5 \%$$

2.4 SYSTEMES de PRISE DE VUE

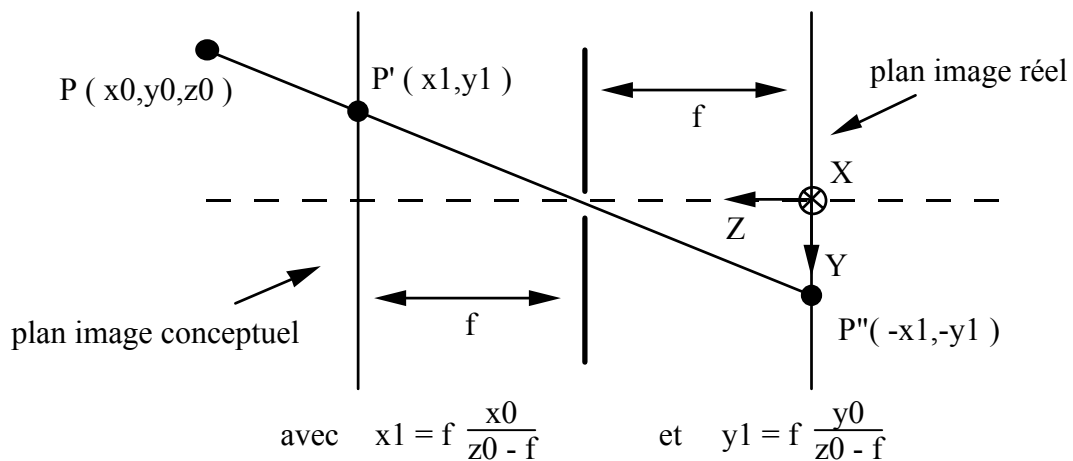
Un objet ou une scène tridimensionnel (3D) doit être représenté sur un support (film, couche photosensible ...) bidimensionnel (2D).

2.4.1 Appareil à sténopé (ou trou d'épingle)

Pour que le point image soit ponctuel, il faut que le trou d'épingle soit infiniment petit, auquel cas l'intensité lumineuse traversant le sténopé est quasiment nulle !



Systèmes réel et conceptuel :

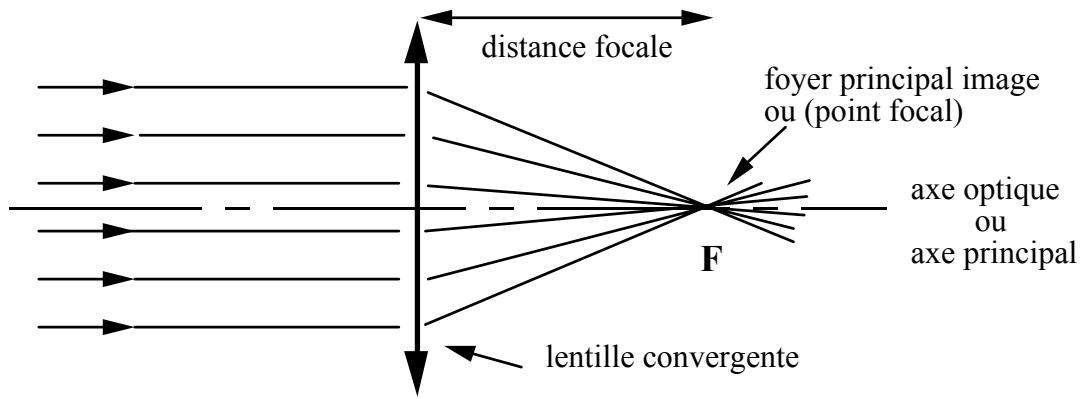


2.4.2 Systèmes optiques à lentilles

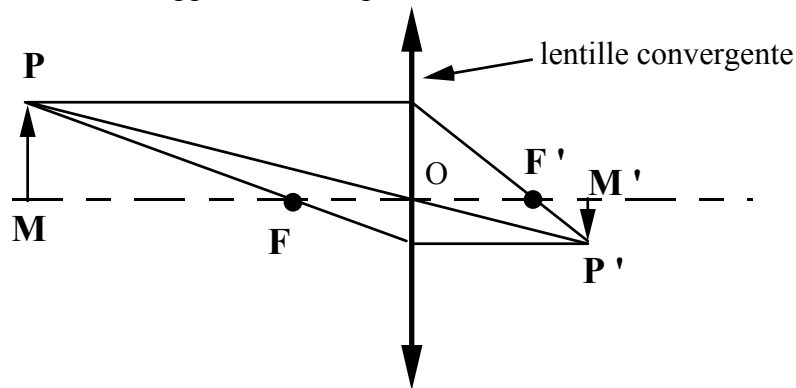
L'appareil à sténopé est d'une part très peu sensible, et d'autre part l'épaisseur de la plaque introduit des hétérogénéités suivant les positions des sources lumineuses. Le phénomène de diffraction est aussi très marqué pour ce type de dispositif.

Une lentille est caractérisée par sa vergence exprimée en dioptries [δ]. Une lentille convergente a une vergence positive, alors qu'une lentille divergente aura une vergence négative.

La vergence est égale à $\frac{1}{f}$, où f représente la distance focale.



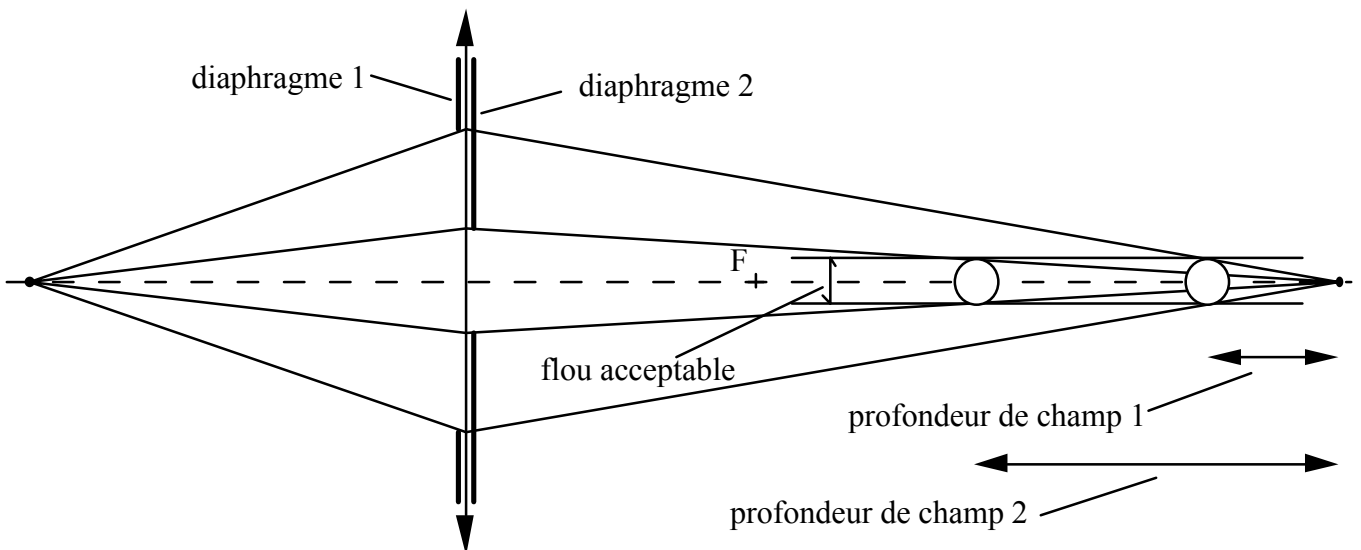
Sur la figure ci-après, l'image du segment PM est représentée par P'M' qui est inversé. D'autre part, P' étant l'image du point P, on voit que tous les rayons lumineux issus de P et passant par la lentille vont converger en P'. L'énergie lumineuse ainsi récupérée en P' sera notablement plus importante que dans le cas de l'appareil à sténopé.



Formules de DESCARTES : $\frac{1}{OM} + \frac{1}{OM'} = \frac{1}{OF} = \frac{1}{OF'}$ et $\frac{M'P'}{MP} = \frac{OM'}{OM}$

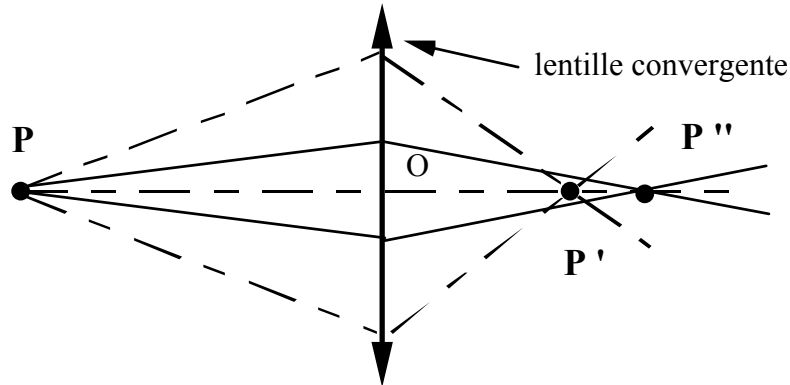
Diaphragme et profondeur de champ

L'ouverture du diaphragme permet de recueillir une énergie lumineuse plus importante. Par contre, cela réduit la zone de flou acceptable, appelée profondeur de champ, pour laquelle les objets sont considérés comme nets.



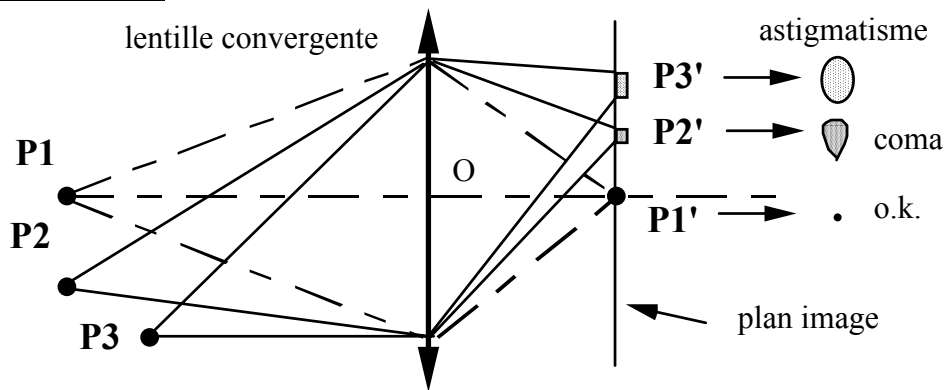
2.4.3 Aberrations et distorsions optiques

Aberration sphérique



Les rayons issus du point P ne convergent pas tous en un seul point; les plus proches de l'axe convergent en P' alors que les rayons périphériques forment une image en P'. L'image formée apparaît comme floue. Ce phénomène sera d'autant plus important que les lentilles auront un diamètre important; l'utilisation d'un diaphragme permet alors de réduire cette aberration.

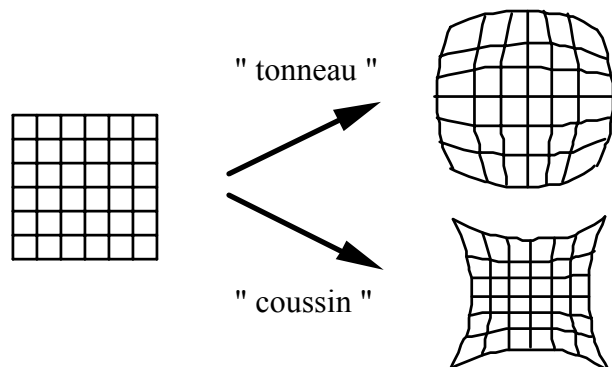
Autres aberrations



L'astigmatisme vient du fait que les trajets optiques sont différents suivant les axes vertical et horizontal de la lentille. Le défaut de coma (forme en goutte d'eau) est causé par un grossissement différent en fonction de l'écart par rapport à l'axe.

Distorsions géométriques

Les principales causes de distorsion sont liées à l'optique (par exemple objectif grand angle) mais aussi à l'appareil de prise de vue; le balayage d'une caméra TV à tube est souvent loin d'être parfait !



En conclusion, le choix d'une optique pour l'acquisition d'une image est très important; en effet tous les défauts évoqués ici peuvent être considérablement réduits à condition d'y mettre le prix!! Certains défauts pourront être corrigés par traitements de l'image ...