2026-2027

Guillaume Dupuis

Optique instrumentale
Performances photométriques

Institut d'Optique Graduate School
1re année

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL | université PARIS-SACLAY

Introduction



Image de la nébuleuse de la Tarentule (NASA, télescope James Webb), située à ~170 000 années-lumière dans le Grand Nuage de Magellan (NIR fausses couleurs : bleu pour 900 nm, vert pour 2,0 µm, orange pour 3,35 µm, rouge pour 4,44 µm)

Introduction

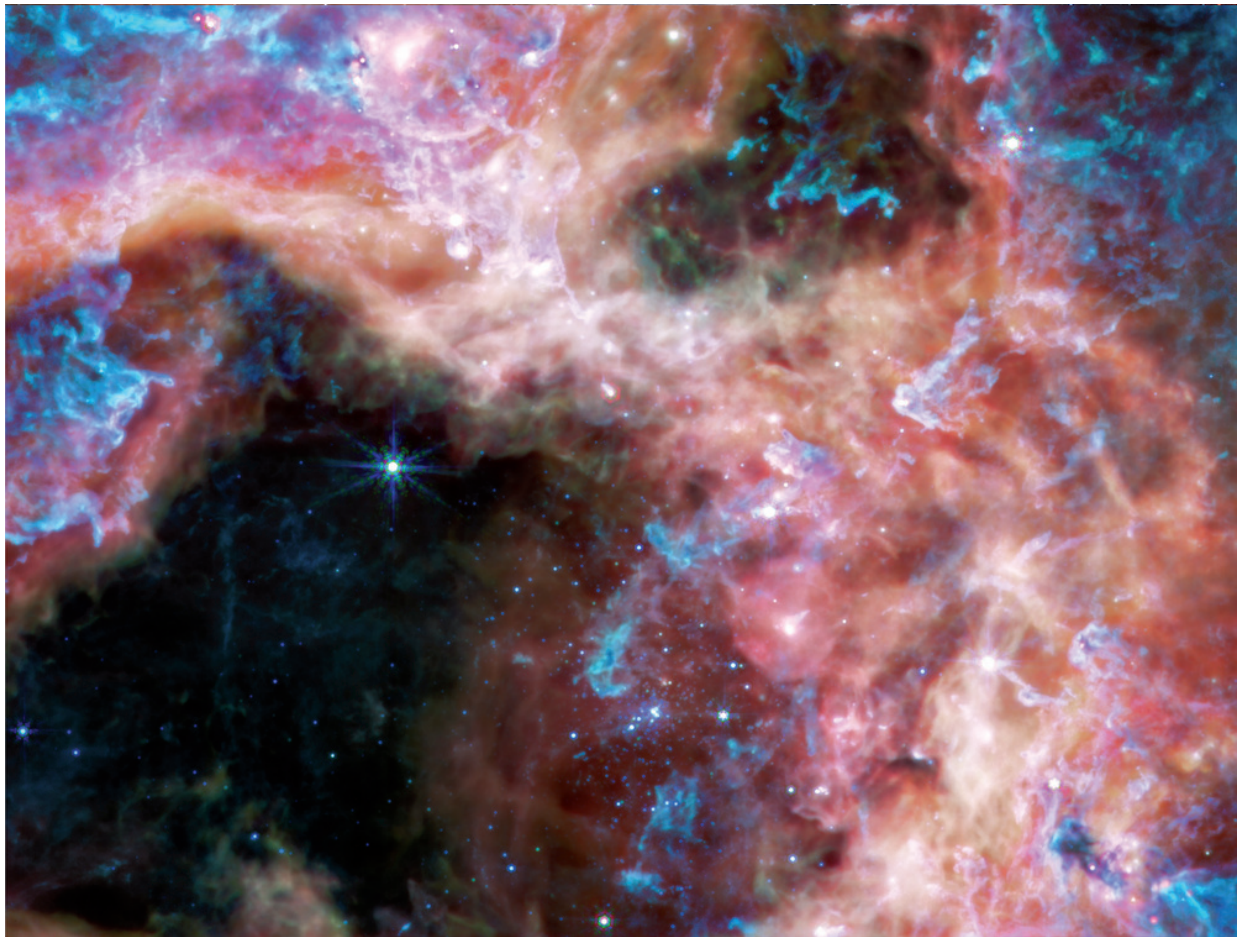
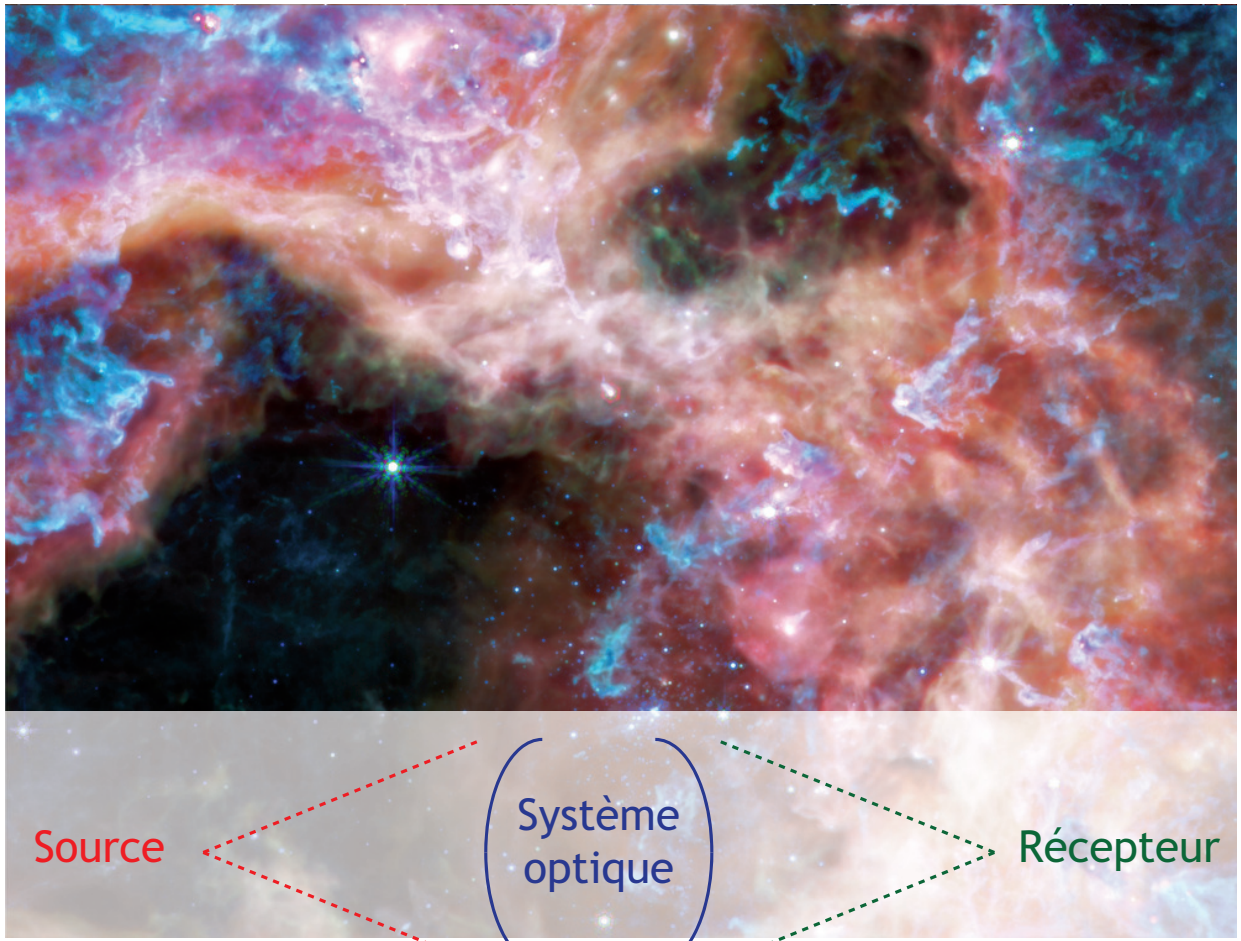


Image de la nébuleuse de la Tarentule (NASA, télescope James Webb), située à ~170 000 années-lumière dans le Grand Nuage de Magellan (MIR fausses couleurs : bleu pour 7,7 µm, cyan pour 10,0 µm, vert pour 12,8 µm, rouge pour 18,0 µm)

Introduction



Introduction

La photométrie est l'étude et la mesure du transport d'énergie par les faisceaux lumineux.

Domaine d'étude

- Propagation rectiligne de la lumiere (milieux supposés homogènes)
- Lois de l'optique géométrique
- Non prise en compte des interférences
- Non prise en compte de la diffraction, sauf quand elle est déterminante pour les performances photométriques du système (notion de fonction d'instrument)

Objectifs du cours

- Définir les grandeurs géométriques liées à un faisceau lumineux (angle solide, étendue géométrique...)
- Définir les grandeurs photométriques caractéristiques d'un système optique (flux, intensité, luminance, éclairement...)
- Caractériser le comportement d'un système photométrique : collecteurs de flux, capteurs d'images...

1. Flux et éclairement

1. *Fiat lux et facta est lux*
2. *Like a candle in the wind*
3. *Here comes the sun*
4. *Moi diffuse, j'ai fait ce que j'ai pu*
5. *I can see clearly now*

Source optique



Georges de La Tour,
Saint-Joseph charpentier (détail),
1643, musée du Louvre, Paris

Définition

Une source optique est un générateur de lumière à partir d'autres formes d'énergie, telles que l'énergie électrique (lampes à filament, LED, etc.), l'énergie thermique (soleil, etc.) ou l'énergie optique (scènes naturelles en éclairage ambiant, etc.).

On distingue traditionnellement les sources primaires (qui sont à l'origine de leur rayonnement) des sources secondaires (qui n'émettent un rayonnement que dans la mesure ou elles sont éclairées par d'autres sources).
Cette distinction simpliste est artificielle : la plupart des sources naturelles émettent les 2 types de rayonnements, la prépondérance de l'un vis à vis de l'autre dépendant du domaine spectral considéré.

Source optique



Georges de La Tour,
Saint-Joseph charpentier (détail),
1643, musée du Louvre, Paris

Caractéristiques cruciales :

- Géométrie de la source : sources ponctuelles, linéiques, surfaciques, volumiques...
- Directivité du rayonnement : sources isotropes, limitées à un demi-espace, très directives (lasers)...
- Composition spectrale du rayonnement : spectre large, quasi-monochromatique...
- Comportement temporel : sources continues, modulées, impulsionnelles...
- Si approprié : rendement énergétique, consommation électrique...



Définition

Le flux énergétique F_e est le débit énergétique de lumière par unité de temps à l'instant considéré. On parle de flux émis par une source, transmis par un composant optique, réfléchi par une surface, etc. Ce flux énergétique s'exprime en **watts (W)**.

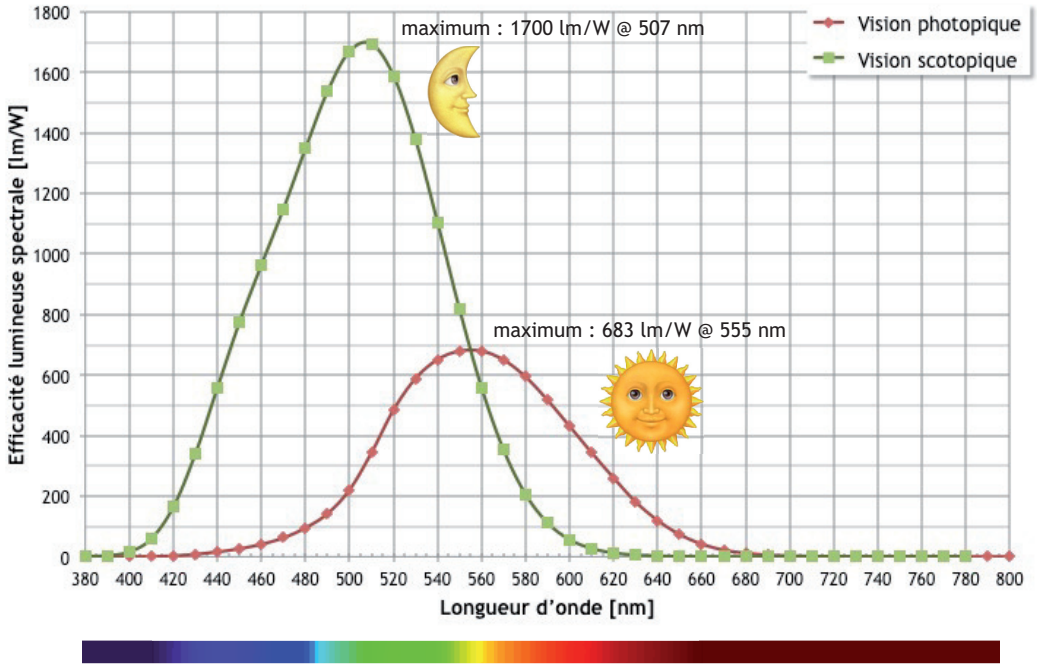
Définition

Le flux énergétique d'un rayonnement quasi-monochromatique correspond à un débit de photons par unité de temps, appelé **flux photonique** F_p et exprimé en **nombre de photons par seconde**.

$$F_p = \frac{F_e}{u} \quad \text{avec} \quad u = \frac{h\,c}{\lambda} \tag{1}$$

Flux visuel

Débit de lumière perçu par l'œil

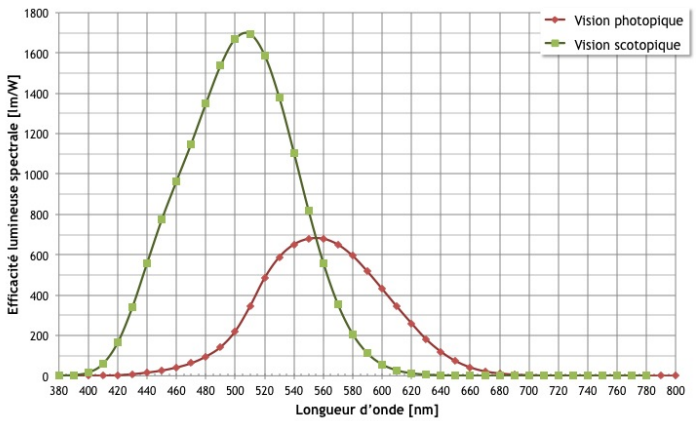


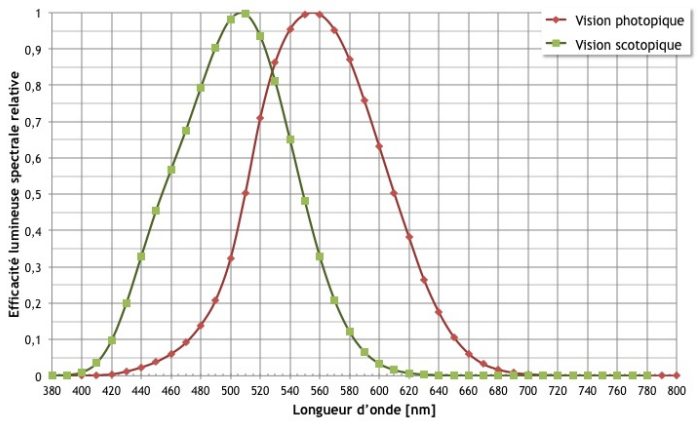
Définition

Le flux visuel F_v (ou **flux lumineux**) quantifie la stimulation visuelle créée par un rayonnement lumineux sur un observateur humain dit « standard ». Son unité est le **lumen** (**1 lm = 1/683 W @ 555 nm**).

Définition

Les **fonctions d'efficacité lumineuse spectrale** assurent la conversion entre les grandeurs photométriques énergétiques et visuelles : la relation entre le flux lumineux **perçu** par l'œil humain et la puissance du rayonnement **reçu**.

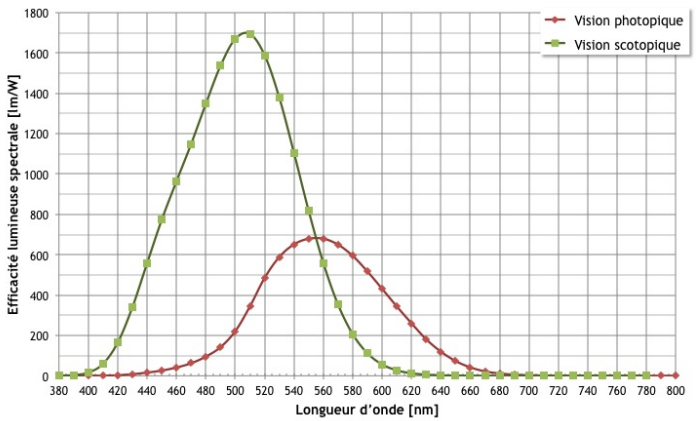


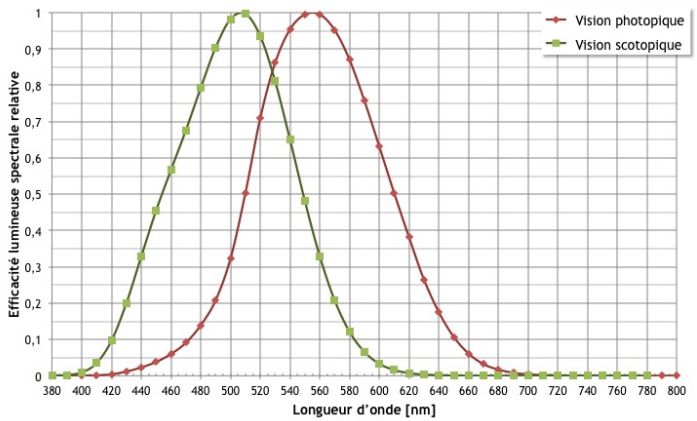


La puissance exprimée en watts (W) est une quantité intrinsèque du rayonnement, tandis que le flux exprimé en lumens (lm) dépend de la sensibilité de l'œil d'un observateur de référence, défini par la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage).

Définition

Les **fonctions d'efficacité lumineuse spectrale** assurent la conversion entre les grandeurs photométriques énergétiques et visuelles : la relation entre le flux lumineux **perçu** par l'œil humain et la puissance du rayonnement **reçu**.

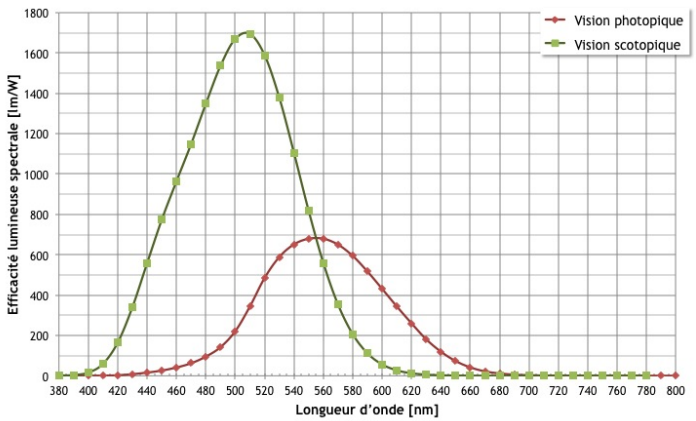


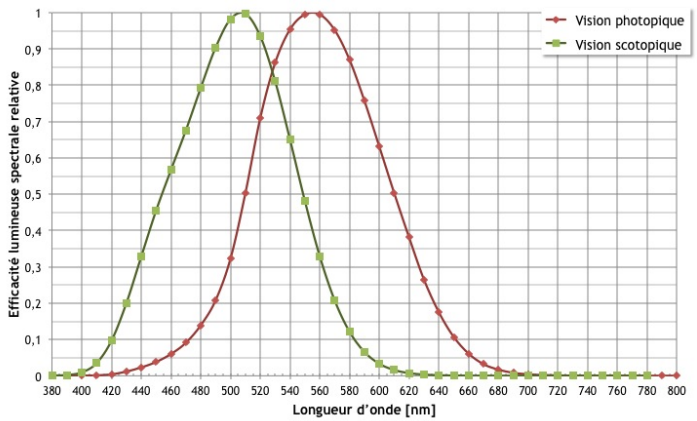


- Vision photopique (cônes) : sensibilité maximale pour une $\lambda \approx 555$ nm.
- Vision scotopique (bâtonnets) : sensibilité maximale pour une $\lambda \approx 507$ nm, et plus de deux fois plus importante.

Définition

Les **fonctions d'efficacité lumineuse spectrale** assurent la conversion entre les grandeurs photométriques énergétiques et visuelles : la relation entre le flux lumineux **perçu** par l'œil humain et la puissance du rayonnement **reçu**.

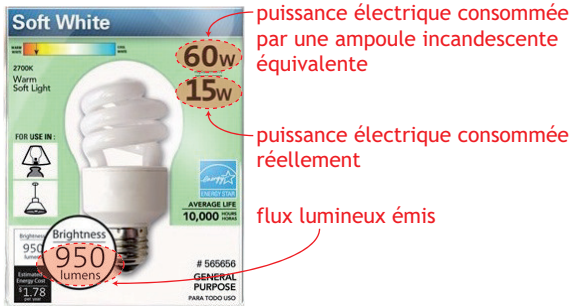




$$F_v(\lambda) = K(\lambda) \times F_e(\lambda) = K_M \times V(\lambda) \times F_e(\lambda) \tag{2}$$

(avec $K(\lambda)$ la fonction d'efficacité lumineuse spectrale en $\mathrm{lm.W^{-1}}$, K_M (en $\mathrm{lm.W^{-1}}$) l'efficacité lumineuse spectrale maximale et $V(\lambda)$ la fonction d'efficacité lumineuse spectrale relative)

Notion de rendement lumineux



Définition

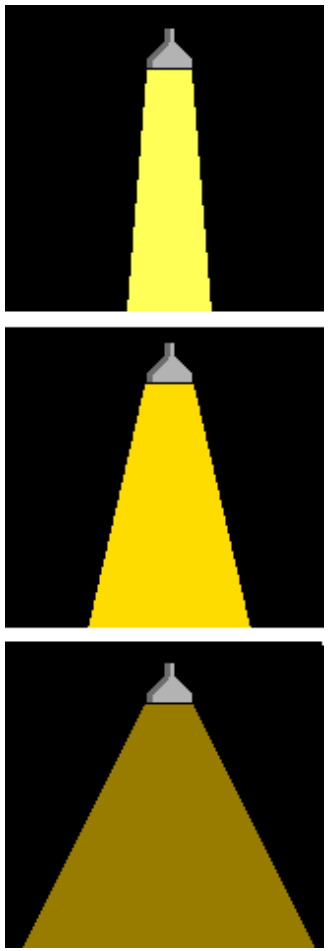
Le **rendement lumineux** d'une source est le rapport entre le flux lumineux émis par cette source et la puissance (électrique) consommée. Il s'exprime en **lumens par watt ($\mathrm{lm.W^{-1}}$)**.

Performances des sources classiques

Ampoules à incandescence	Ampoules à économie d'énergie	Ampoules à LED
$10 - 15\ \mathrm{lm.W^{-1}}$	$40 - 50\ \mathrm{lm.W^{-1}}$	$90\ \mathrm{lm.W^{-1}}$
		

Flux de sources réelles

Quelques ordres de grandeur

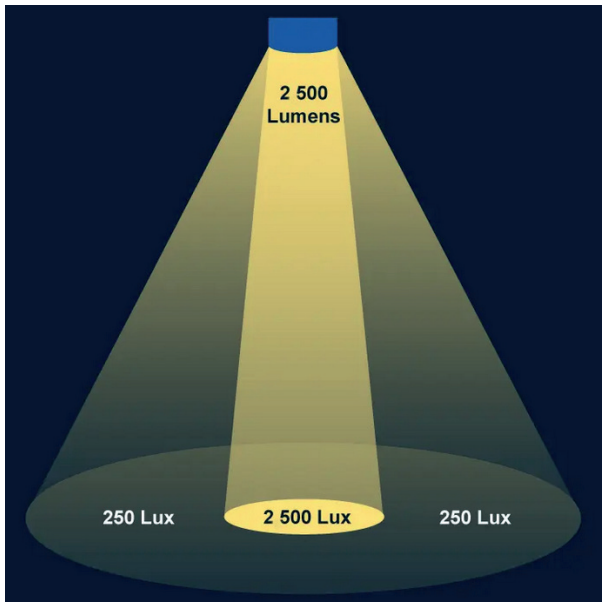


Ordres de grandeur typiques

1. Une lampe à filament de tungstène de 100 W de consommation électrique moyenne émet un flux énergétique $F_e = 90$ W, un flux photonique $F_p = 10^{21}$ s^{-1} et un flux visuel $F_v = 1500$ lm.
2. Un laser Nd :YAG de 50 W de consommation électrique émet (à $\lambda = 1064$ nm) un flux énergétique moyen $F_e = 2$ W, un flux photonique de $F_p = 10^{19}$ s^{-1} et un flux visuel nul.

Le flux est une grandeur intégrée

La notion de flux ne quantifie en rien la distribution spatiale (surfacique, angulaire) de la lumière émise par une source.



Définition

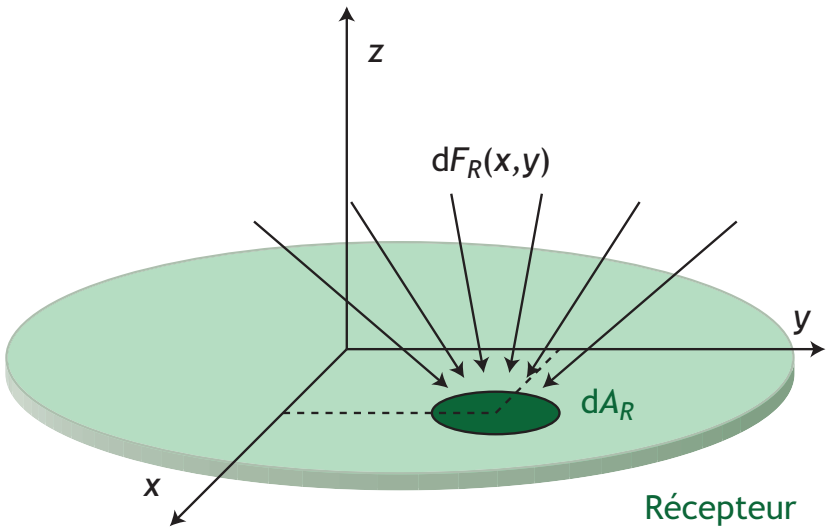
L'éclairement E d'une surface en un point est la densité de flux incident sur cette surface par unité d'aire au point considéré :

$$E(x,y) = \frac{\mathrm{d}F_R(x,y)}{\mathrm{d}A_R} \tag{3}$$

L'éclairement qualifie communément la puissance du flux énergétique délivré par unité de surface. L'éclairement énergétique s'exprime en watts par mètre carré ($\mathrm{W.m^{-2}}$), l'éclairement visuel s'exprime en lux ($1\ \mathrm{lux} = 1\ \mathrm{lm.m^{-2}}$).

Éclairement de surface réceptrice

Débit de lumière par unité de surface réceptrice



Définition

L'éclairement E d'une surface en un point est la densité de flux incident sur cette surface par unité d'aire au point considéré :

$$E(x,y) = \frac{dF_R(x,y)}{dA_R} \tag{3}$$

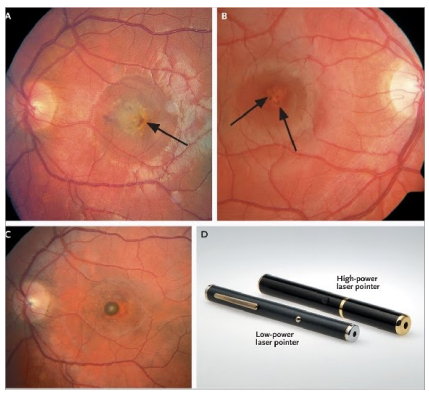
L'éclairement qualifie communément la puissance du flux énergétique délivré par unité de surface. L'éclairement énergétique s'exprime en watts par mètre carré ($W.m^{-2}$), l'éclairement visuel s'exprime en lux ($1\ lux = 1\ lm.m^{-2}$).

Éclairements par des sources réelles

Quelques ordres de grandeur



Luxmètre
(source : http ://www.conrad.fr)



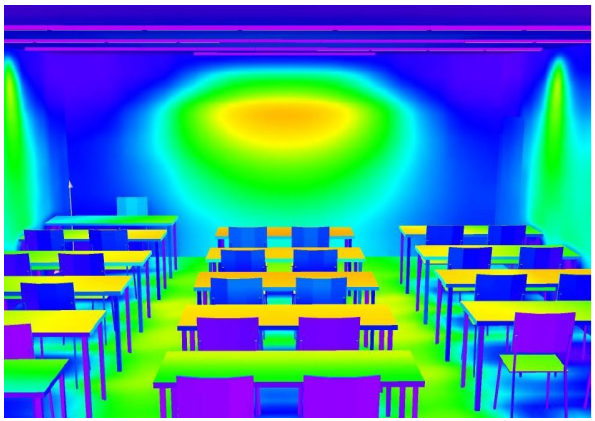
Dommages rétiniens causés par des pointeurs laser
(source : http ://www.bbc.co.uk)

Ordres de grandeur typiques

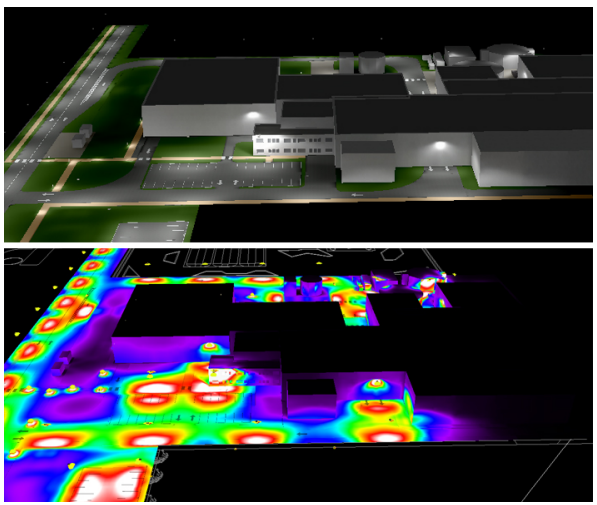
1. Éclairement solaire au sol dans des conditions optimales (soleil zénithal en plein été) : 1400 $W.m^{-2}$. Focalisé par une loupe : éclairement ~ 1000 fois supérieur, ~ 1 $MW.m^{-2}$ soit ~ 100 $W.cm^{-2}$.
2. Pointeur laser : flux énergétique ~ 1 mW sur une mince section circulaire de 2 mm de diamètre. Ce flux de photons peut être dangereusement focalisé par l'œil humain en un spot de 10 µm de diamètre, ce qui représente 167 fois la vision directe du soleil.
3. Un bistouri laser CO_2 émettant à une longueur d'onde infrarouge de 10,6 µm, éclaire de 5 à 50 $mW.mm^{-2}$, ce qui est suffisant pour que le pinceau découpe la chair.

Éclairements par des sources réelles

Quelques ordres de grandeur



Conception d'éclairage intérieur sous *DiaLux*
(source : https ://www.actiled.com)



Conception d'éclairage public sous *DiaLux*
(source : https ://www.vhm-eclairage.fr)

Ordres de grandeur typiques

En France, des règlements et recommandations définissent l'éclairement lumineux minimal des lieux de travail, des routes, etc.

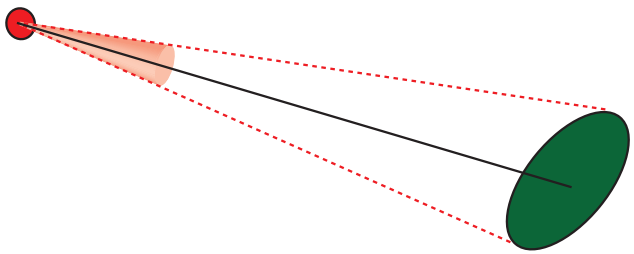
1. Les normes de la série NF EN 12464-1 et NF EN 12464-2 rassemblent les recommandations pour l'éclairage des lieux de travail respectivement intérieur et extérieur : 100 lux pour les zones de circulation et couloirs, 200 lux pour les vestiaires et sanitaires, 300 lux pour les ateliers, 500 lux pour dactylographie et lecture, etc.
2. La série de normes NF EN 13201 définit les recommandations des éclairements pour l'éclairage public, selon les différents types de zones (trafic motorisé, zones de conflit, piétons et cyclistes), entre 2 et 50 lux.

2. Sources ponctuelles

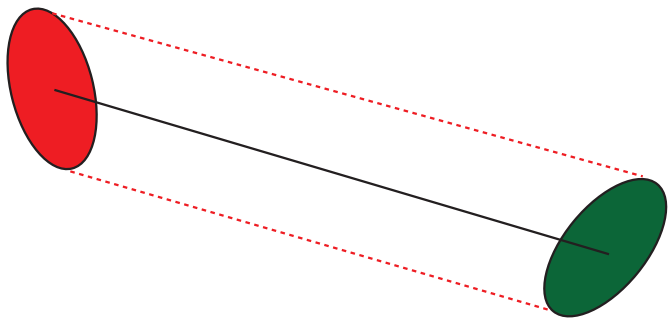
1. *Fiat lux et facta est lux*
2. ***Like a candle in the wind***
3. *Here comes the sun*
4. *Moi diffuse, j'ai fait ce que j'ai pu*
5. *I can see clearly now*

Définition

Un **tube élémentaire de rayonnement** (ou pinceau de lumière) est limité par deux éléments de surface : une source et un détecteur, une source et la pupille d'entrée d'un système optique, la pupille de sortie d'un système optique et un détecteur.



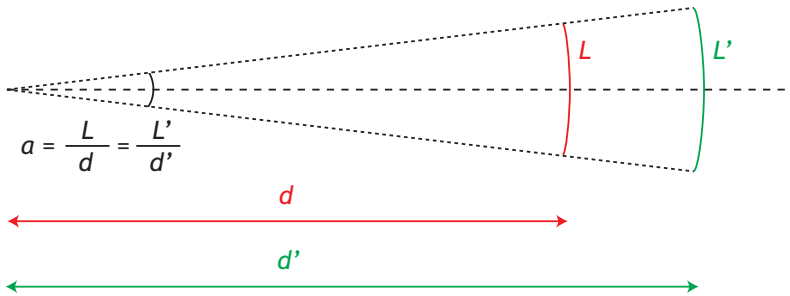
Un des élément de surface est de type ponctuel : la grandeur géométrique appropriée est l'angle solide.

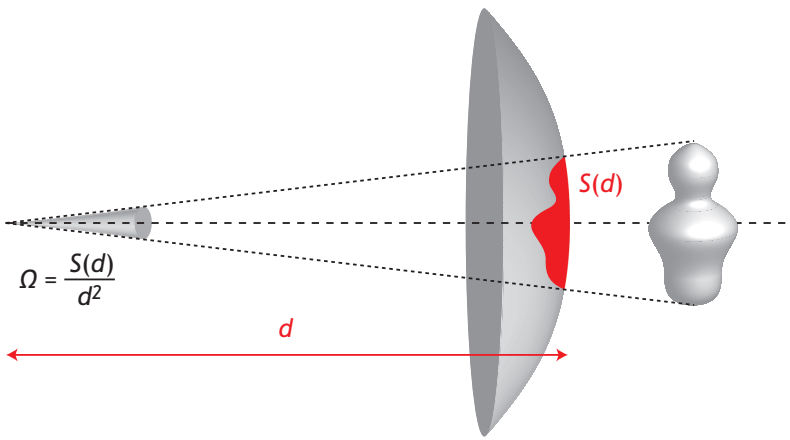


Les deux éléments de surface sont étendus : la grandeur géométrique appropriée est l'étendue géométrique.

Qu'est-ce qu'un angle solide ?

Angle plan vs. angle solide





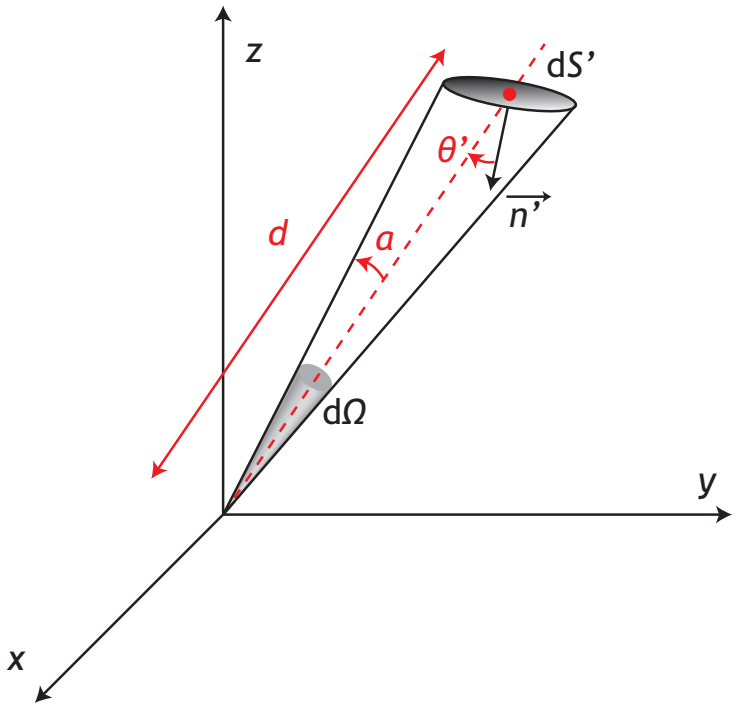
Dans un espace en 2D, l'angle plan α est le rapport de la longueur de l'arc L sur le rayon du cercle d.

Définition

Dans un espace en 3D, **l'angle solide** Ω est défini de façon analogue comme le rapport entre l'aire de la calotte sphérique définie par le cône qui s'appuie sur le contour apparent de l'objet et le carré du rayon de cette calotte. C'est une grandeur sans dimension que l'on exprime en **stéradians (sr)**.

Angle solide

Expression mathématique générale



Si les dimensions transversales de l'objet sont petites vis à vis de sa distance d au point d'observation, l'angle solide élémentaire correspondant $\mathrm{d}\Omega$ a pour expression :

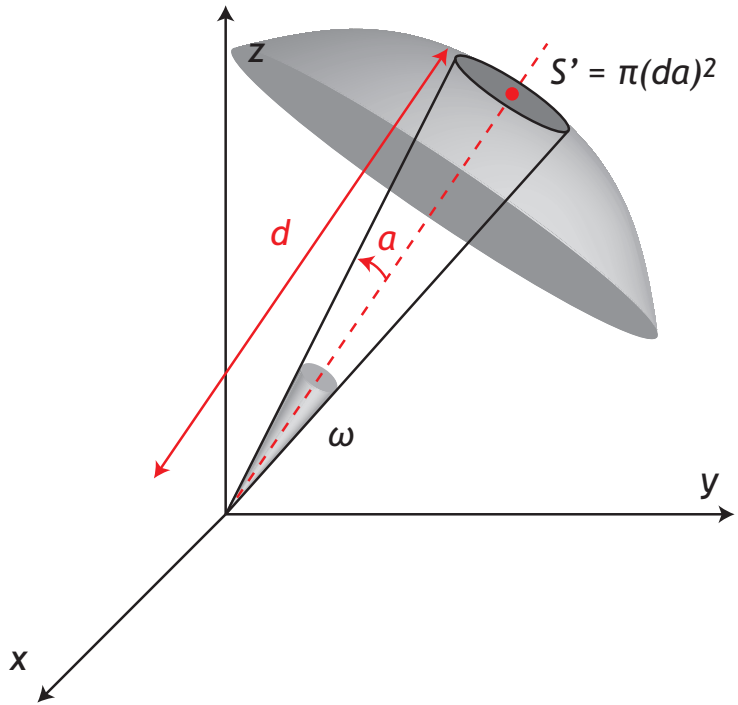
$$\mathrm{d}\Omega = \frac{\mathrm{d}S' \cos\theta'}{d^2} \qquad (4)$$

Définition

Le terme $\cos\theta$ est appelé **facteur d'obliquité** et le terme $\mathrm{d}S' \cos\theta'$ est appelé **aire apparente**.

Angle solide

Expression mathématique : angle solide petit



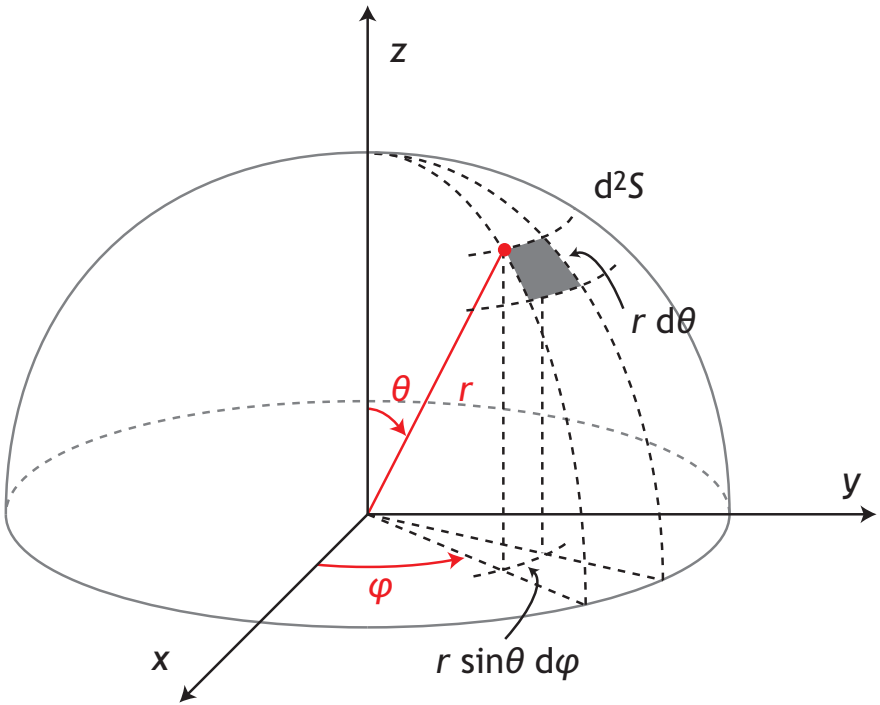
Si un objet est perçu sous la forme d'un disque de rayon apparent α petit (demi-angle au sommet du cône), orthogonal à la direction d'observation, l'angle solide élémentaire correspondant est alors :

$$\omega = \frac{\pi r^2}{d^2} = \frac{\pi(\tan\alpha\, d)^2}{d^2}$$

$$\omega \approx \frac{\pi(\alpha d)^2}{d^2} = \pi\alpha^2 \qquad (5)$$

Angle solide

Expression mathématique : couronne élémentaire



En coordonnées sphériques, un élément de surface quelconque a une aire $\mathrm{d}^2S = r^2 \sin\theta \, \mathrm{d}\theta \, \mathrm{d}\varphi$, soit un angle solide :

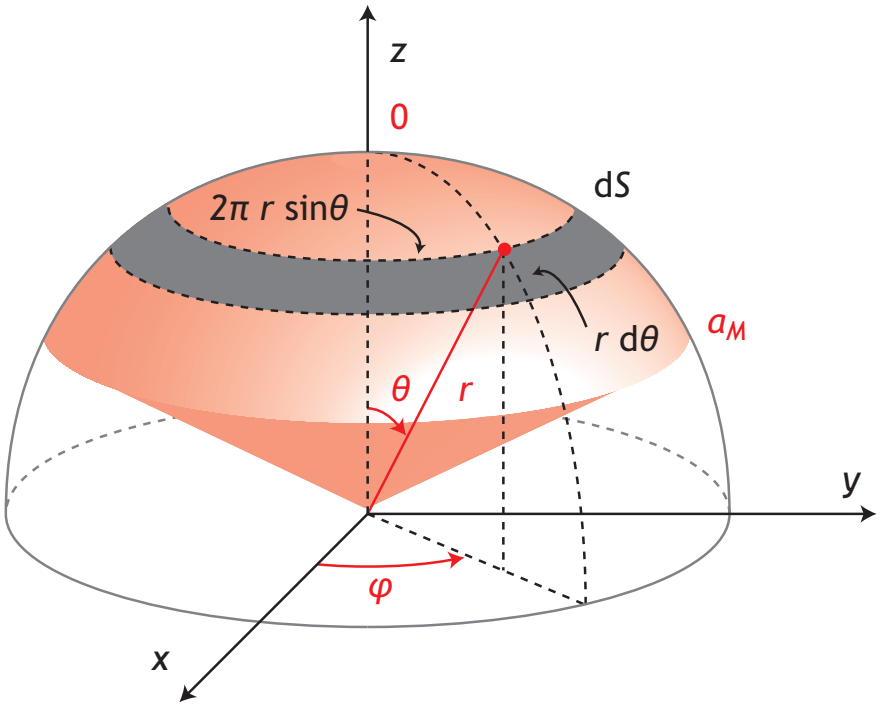
$$\mathrm{d}^2\Omega = \sin\theta \, \mathrm{d}\theta \, \mathrm{d}\varphi \tag{6}$$

En cas de symétrie de révolution, l'angle solide élémentaire approprié est une couronne :

$$\mathrm{d}\Omega_C = \int_0^{2\pi} \mathrm{d}^2\Omega = 2\pi \sin\theta \, \mathrm{d}\theta \tag{7}$$

Angle solide

Expression mathématique : calotte sphérique



L'angle solide défini par la calotte sphérique de demi-angle au sommet α_M s'obtient par intégration de la couronne élémentaire :

$$\Omega(\alpha_M) = \int_0^{\alpha_M} \mathrm{d}\Omega_C = \int_0^{\alpha_M} 2\pi \sin\theta \, \mathrm{d}\theta$$

$$\Omega(\alpha_M) = 2\pi(1 - \cos\alpha_M) \tag{8}$$

soit pour un demi-espace :

$$\Omega(\alpha_M = \pi/2) = 2\pi \text{ sr} \tag{9}$$

et pour l'espace entier :

$$\Omega(\alpha_M = \pi) = 4\pi \text{ sr} \tag{10}$$

Intensité de source

Débit de lumière dans une direction donnée



Phare du Créac'h, île d'Ouessant
(source : Ministère chargé de la mer et de la pêche)

Définition

L'intensité d'une source dans une direction (θ, φ) est le flux $\mathrm{d}F_S$ émis par l'ensemble de la source par unité d'angle solide $\mathrm{d}\Omega_S$ dans cette direction :

$$I(\theta, \varphi) = \frac{\mathrm{d}F_S(\theta, \varphi, \mathrm{d}\Omega_S)}{\mathrm{d}\Omega_S} \qquad (11)$$

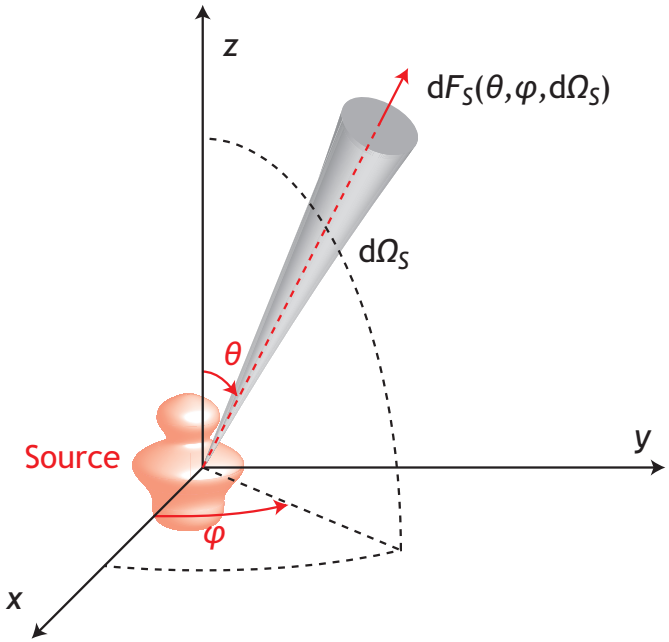
Son unité énergétique est le **watt par stéradian** ($\mathbf{W.sr^{-1}}$), l'unité visuelle est le **candela** ($= \mathbf{1\ lm.sr^{-1}}$).

Éclat d'une source ponctuelle

La notion d'intensité est bien adaptée à la description de la luminosité des sources ponctuelles.

Intensité de source

Débit de lumière dans une direction donnée



Définition

L'intensité d'une source dans une direction (θ,φ) est le flux dF_S émis par l'ensemble de la source par unité d'angle solide $d\Omega_S$ dans cette direction :

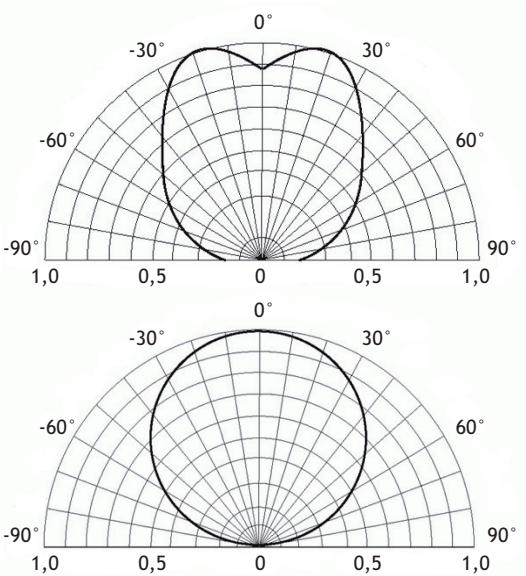
$$I(\theta,\varphi) = \frac{dF_S(\theta,\varphi,d\Omega_S)}{d\Omega_S} \qquad (11)$$

Son unité énergétique est le **watt par stéradian** ($\mathbf{W.sr^{-1}}$), l'unité visuelle est le **candela** ($\mathbf{= 1\ lm.sr^{-1}}$).

Éclat d'une source ponctuelle

La notion d'intensité est bien adaptée à la description de la luminosité des sources ponctuelles.

Indicatrice d'intensité



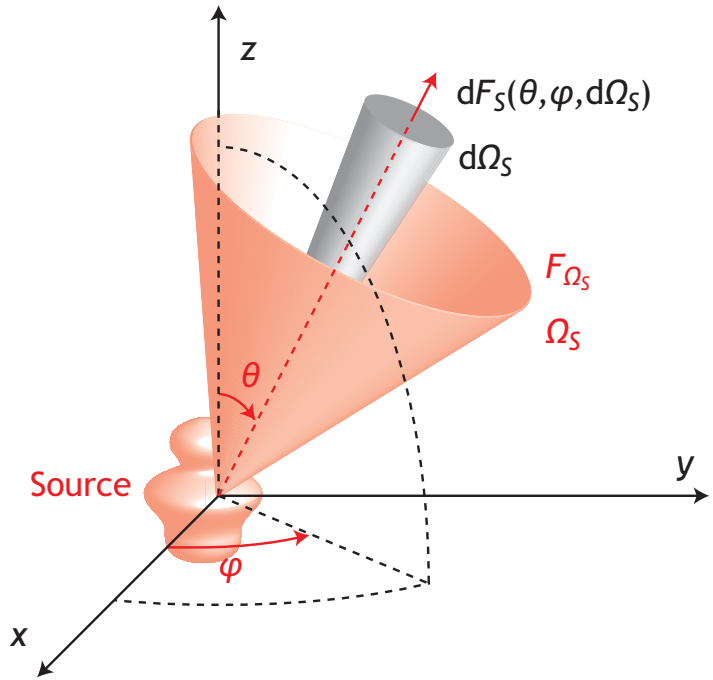
Le comportement angulaire d'une source est défini par son indicatrice d'intensité ou diagramme de rayonnement. Il s'agit de la surface entourant la source et délimitée par le lieu de l'extrémité du vecteur $\vec{I}(\theta, \varphi)$, son origine étant maintenue au centre de la source.

- Sources isotropes : indicatrice sphérique
- Sources directives : indicatrice allongée

Pour une source étendue, l'intensité est aussi une grandeur intégrée

La notion d'intensité de source caractérise le rayonnement de la source dans une direction mais ne donne pas de renseignements sur la source elle-même (forme, dimensions, variations spatiales d'émissivité).

Flux émis et intensité de source



Flux infinitésimal dF_S émis dans un angle solide infinitésimal $d\Omega_S$ orienté dans la direction (θ, φ) :

$$dF_S = I(\theta,\varphi)\, d\Omega_S$$

Flux F_{Ω_S} émis par cette source dans un angle solide Ω_S :

$$F_{\Omega_S} = \int_{\Omega_S} I(\theta,\varphi)\, d\Omega_S \qquad (12)$$

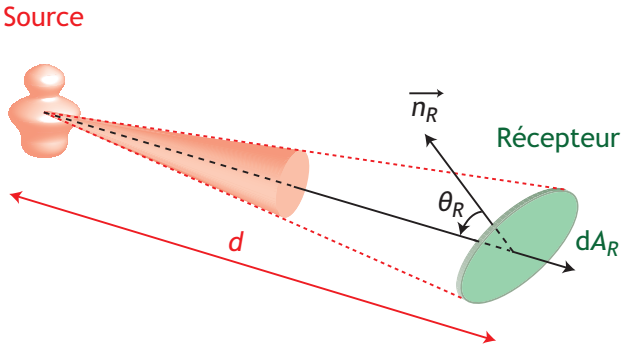
Source isotrope

Le flux total émis par la source dans tout l'espace est traditionnellement noté $F_{4\pi}$. Si la source est isotrope :

$$I(\theta,\varphi) = I_0 = \text{constante} \quad \text{d'où} \quad F_{4\pi} = 4\pi I_0 \qquad (13)$$

Intensité et éclairement de récepteur

Loi de Bouguer



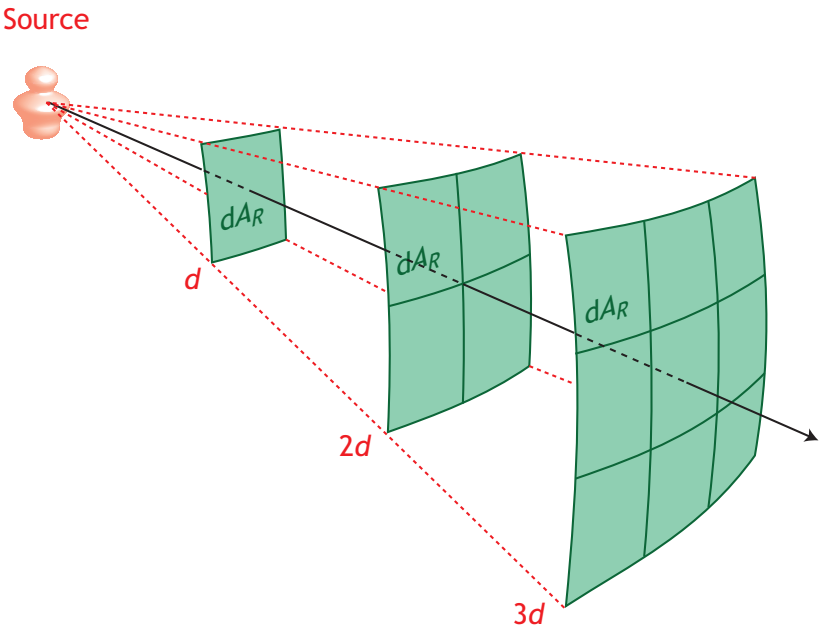
Flux dF_R incident sur l'élément de surface dA_R de récepteur :

$$dF_R = \mathcal{T}\, dF_S = \mathcal{T}\, I(\theta,\varphi)\, d\Omega_S$$

$$dF_R = \mathcal{T}\, I(\theta,\varphi)\, \frac{dA_R \cos\theta_R}{d^2}$$

Éclairement du récepteur :

$$E_R = \frac{dF_R}{dA_R} = \frac{\mathcal{T}\, I(\theta,\varphi)\cos\theta_R}{d^2} \qquad (14)$$



Dans les mêmes conditions d'inclinaison, l'éclairement est donc inversement proportionnel au carré de la distance séparant la source du récepteur.

Source étendue ≠ source ponctuelle

Importance de la surface apparente

surface émissive très petite



surface émissive très grande



À flux identique, l'ampoule de gauche est plus éblouissante que l'ampoule de droite en vision directe.

⚠ Intensité ≠ luminosité d'une source étendue

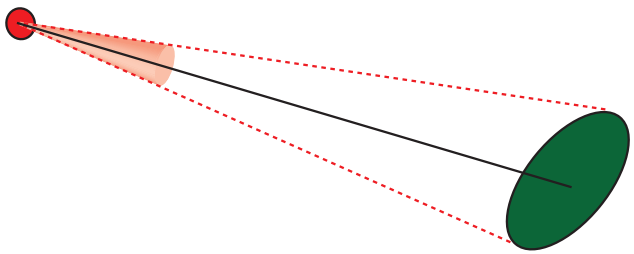
Plus il y a de candelas émis par unité de surface apparente d'une source, plus celle-ci est éblouissante : la notion d'intensité n'est pas adaptée à la description de l'éclat des sources étendues.

3. Sources étendues

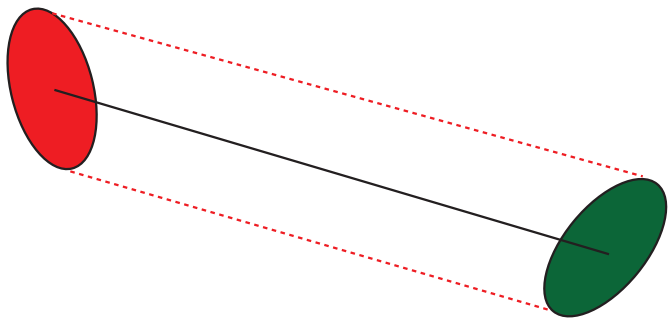
1. *Fiat lux et facta est lux*
2. *Like a candle in the wind*
3. *Here comes the sun*
4. *Moi diffuse, j'ai fait ce que j'ai pu*
5. *I can see clearly now*

Définition

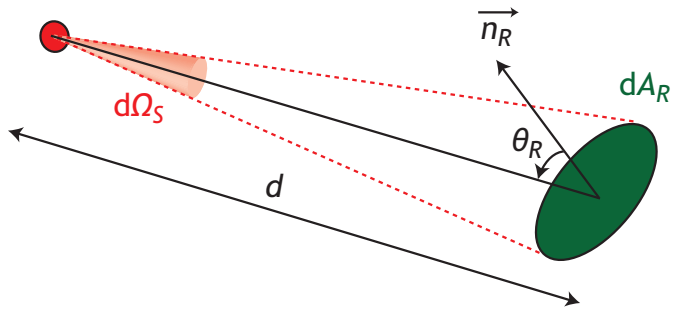
Un **tube élémentaire de rayonnement** (ou pinceau de lumière) est limité par deux éléments de surface : une source et un détecteur, une source et la pupille d'entrée d'un système optique, la pupille de sortie d'un système optique et un détecteur.

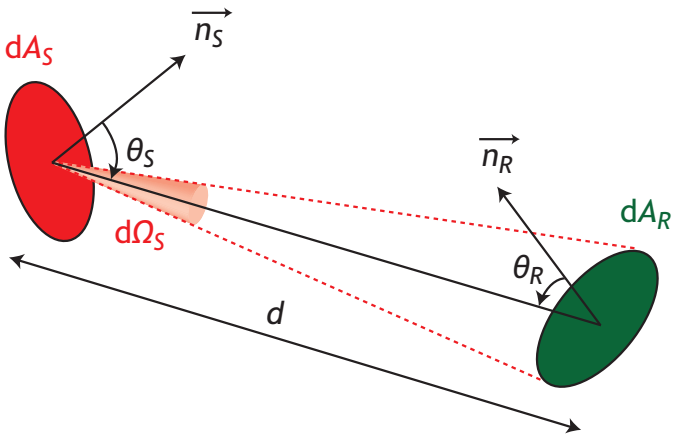


Un des élément de surface est de type ponctuel : la grandeur géométrique appropriée est l'angle solide.



Les deux éléments de surface sont étendus : la grandeur géométrique appropriée est l'étendue géométrique.





- Source ponctuelle : le faisceau issu de la source et entrant dans un diaphragme forme un cône de rayonnement qu'on caractérise par son angle solide.
- Source étendue : le faisceau issu de la source et entrant dans un diaphragme forme un tube de rayonnement limité par deux éléments de surface.

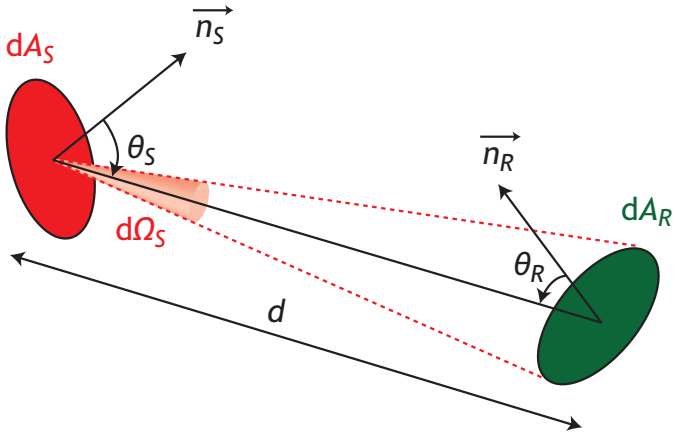
Définition

L'étendue géométrique est une grandeur qui caractérise la dispersion d'un faisceau lumineux entre une source et un récepteur. Vue de la source, c'est le produit entre un élément de surface de la source et l'angle solide sous-tendu par l'élément de surface correspondant sur le détecteur :

$$\mathrm{d}^2 G = \mathrm{d}A_S \cos\theta_S \, \mathrm{d}\Omega_S \qquad (15)$$

Étendue géométrique élémentaire

Multiples définitions

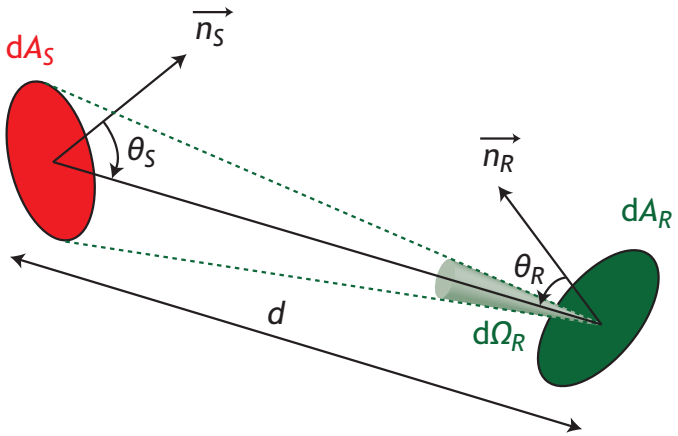


Expression générale depuis la source :

$$d^2G = dA_S \cos\theta_S \, d\Omega_S \tag{15}$$

Depuis le récepteur : produit entre un élément de surface du détecteur par l'angle solide sous-tendu par l'élément de surface correspondant de la source :

$$d^2G = dA_R \cos\theta_R \, d\Omega_R \tag{16}$$

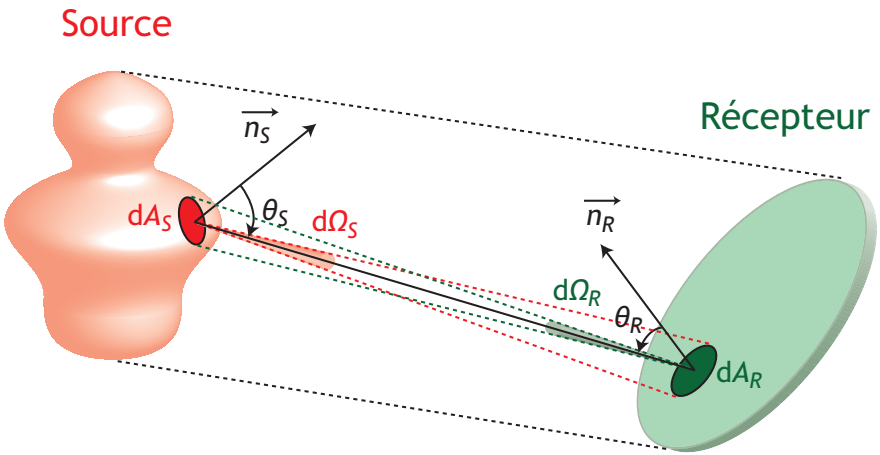


Expression générique :

$$d^2G = \frac{dA_S \cos\theta_S \, dA_R \cos\theta_R}{d^2} \tag{17}$$

Étendue géométrique intégrée

Du pinceau élémentaire au faisceau de lumière



Faisceau de lumière défini par une source et un récepteur : l'étendue géométrique G se calcule en sommant les contributions élémentaires des pinceaux qui le constitue :

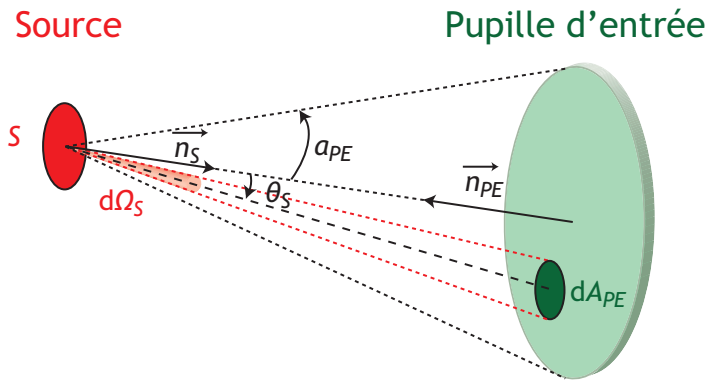
$$G = \int_{\text{récepteur}} \int_{\text{source}} \mathrm{d}^2 G \qquad (18)$$

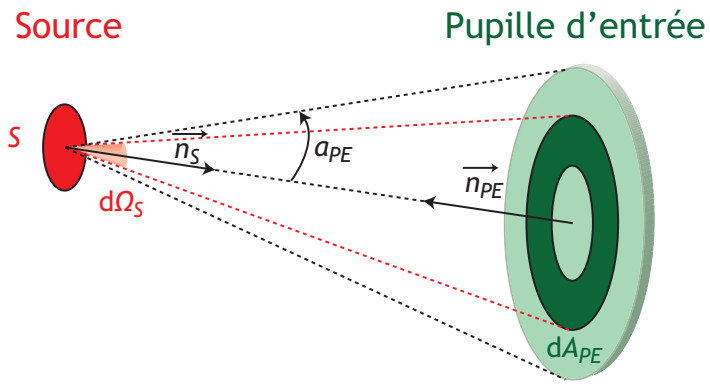
Conservation de l'étendue géométrique

La conservation de l'étendue géométrique d'un faisceau au travers d'un système optique dans l'air exprime la conservation de la puissance lumineuse de ce faisceau, et donc l'absence de perte dans le système.

Étendue géométrique intégrée

Source étendue devant une pupille circulaire





Étendue géométrique source/pupille

Expression élémentaire la source :

$$d^2G = dA_S \cos\theta_S \, d\Omega_S$$

Découpage élémentaire en couronnes sur la pupille d'entrée :

$$d^2G = dA_S \cos\theta_S \, 2\pi \sin\theta_S d\theta_S$$

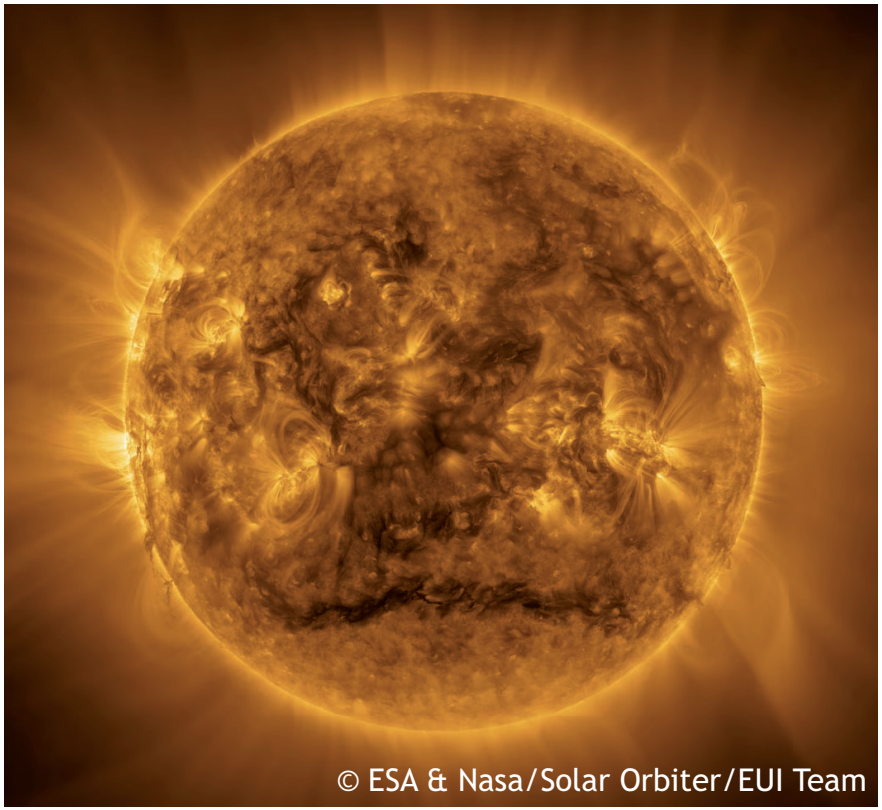
Expression intégrée :

$$G = \int_S dA_S \int_0^{\alpha_{PE}} 2\pi \cos\theta_S \sin\theta_S d\theta_S$$

$$G = \pi S \sin^2 \alpha_{PE}$$

Luminance de source

Intensité de source par unité de surface apparente



Définition

La luminance mesure le débit de lumière émis par unité de surface apparente dans un certain angle solide.

Intensité émise par l'élément d'aire $\mathrm{d}A_S$ autour d'un point $A(x,y,z)$:

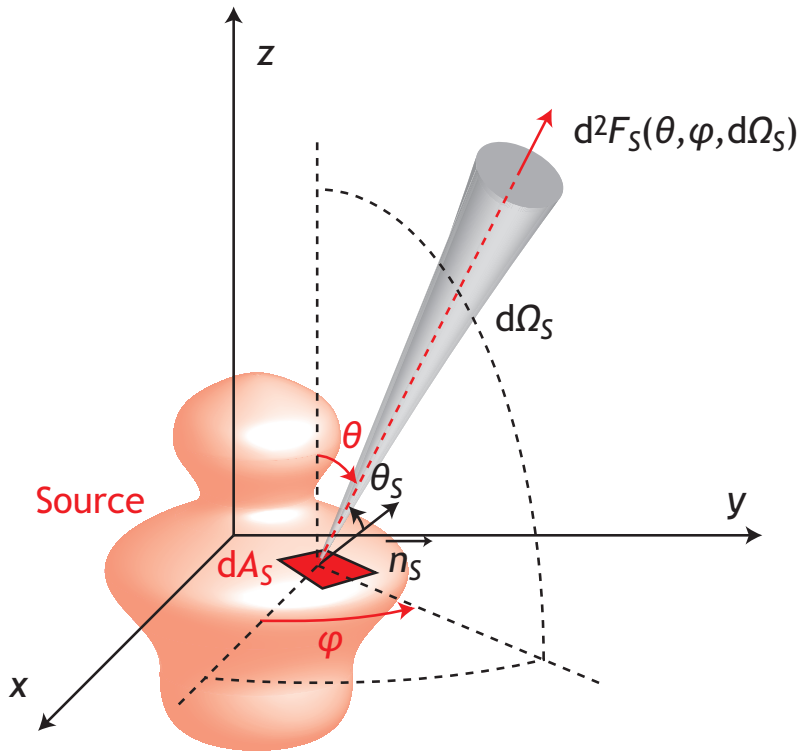
$$\mathrm{d}I(x,y,z,\theta,\varphi) = \frac{\mathrm{d}^2 F_S(x,y,z,\theta,\varphi)}{\mathrm{d}\Omega_S}$$

$$L(x,y,z,\theta,\varphi) = \frac{\mathrm{d}I(x,y,z,\theta,\varphi)}{\mathrm{d}A_S \cos\theta_S} = \frac{\mathrm{d}^2 F_S(x,y,z,\theta,\varphi)}{\mathrm{d}A_S \cos\theta_S \,\mathrm{d}\Omega_S} \tag{19}$$

La luminance énergétique a pour unité le watt par mètre carré par stéradian ($\mathrm{W.m^{-2}.sr^{-1}}$).
L'unité visuelle correspondante est le candela par mètre carré ($\mathrm{cd.m^{-2}}$).

Luminance de source

Intensité de source par unité de surface apparente



Définition

La luminance mesure le débit de lumière émis par unité de surface apparente dans un certain angle solide.

Intensité émise par l'élément d'aire dA_S autour d'un point $A(x,y,z)$:

$$dI(x,y,z,\theta,\varphi) = \frac{d^2F_S(x,y,z,\theta,\varphi)}{d\Omega_S}$$

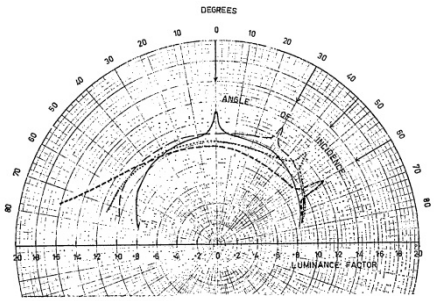
$$L(x,y,z,\theta,\varphi) = \frac{dI(x,y,z,\theta,\varphi)}{dA_S\cos\theta_S} = \frac{d^2F_S(x,y,z,\theta,\varphi)}{dA_S\cos\theta_S\,d\Omega_S} \qquad (19)$$

La luminance énergétique a pour unité le watt par mètre carré par stéradian ($W.m^{-2}.sr^{-1}$).
L'unité visuelle correspondante est le candela par mètre carré ($cd.m^{-2}$).



Luminances de sources réelles

Quelques ordres de grandeur



Le comportement angulaire du rayonnement d'une région donnée de la source est caractérisé par son indicatrice de luminance : surface entourant la source et délimitée par le lieu de l'extrémité du vecteur $\vec{L}(\theta, \varphi)$, son origine étant maintenue fixe.

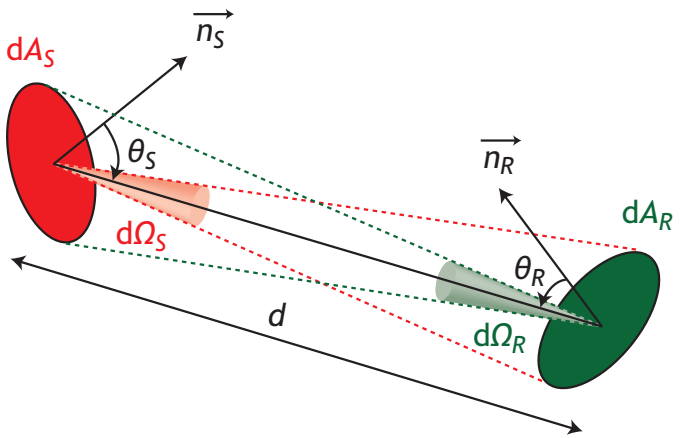


Luminancemètre
(source : http ://www.conrad.fr)

Ordres de grandeur de la vie courante

1. Écran LCD 300 cd.m^{-2}, lampe à économie d'énergie 10000 cd.m^{-2}, ciel de jour 3000 à 10000 cd.m^{-2}, soleil au zénith $1,5 \cdot 10^9$ cd.m^{-2}.
2. Seuil de perception de l'œil humain $\sim 10^{-6}$ cd.m^{-2} (10 photons sur la rétine) ; vision nocturne de 10^{-4} à 0,1 cd.m^{-2}, vision diurne > 10 cd.m^{-2}.
3. Seuil de gêne entre 3000 et 10000 cd.m^{-2} ; éblouissement neutralisant au-delà de 10^5 cd.m^{-2}.

Rappel : $$L(x,y,z,\theta,\varphi) = \frac{\mathrm{d}^2 F_S(x,y,z,\theta,\varphi)}{\mathrm{d}A_S \cos\theta_S \,\mathrm{d}\Omega_S} = \frac{\mathrm{d}^2 F_S(x,y,z,\theta,\varphi)}{\mathrm{d}^2 G} \tag{19}$$



La luminance mesure le flux par unité d'étendue géométrique. C'est donc une grandeur conservative dans un système optique où l'étendue géométrique se conserve (indice d'entrée égal à l'indice de sortie, pas de vignettage) et en l'absence d'atténuation (ni absorption ni diffusion).

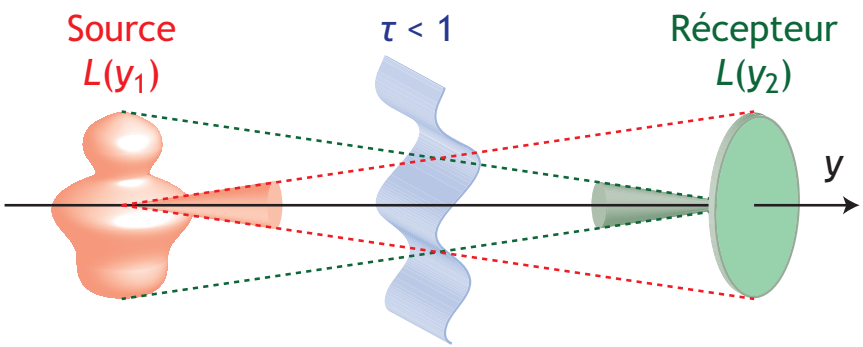
donc : $$L_S \,\mathrm{d}A_S \cos\theta_S \,\mathrm{d}\Omega_S = L_R \,\mathrm{d}A_R \cos\theta_R \,\mathrm{d}\Omega_R$$

Le terme L_S caractérise la luminance du rayonnement de la source au niveau de l'émission. Le terme L_R est appelé luminance du rayonnement dû à la source au niveau du récepteur.

Non-conservation de la luminance

Notion de facteur de transmission en luminance

La luminance d'un rayonnement se conserve dans un milieu homogène (ou dans un système optique) sans perte, depuis la source jusqu'au récepteur. En particulier, la luminance de l'image d'une source donnée par un système optique est au plus égale à celle de la source primaire.



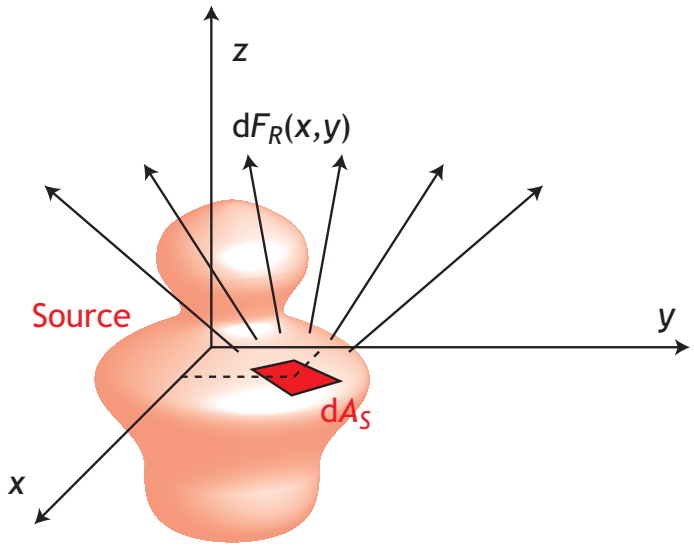
Définition

Si le milieu de propagation (ou le système optique) introduit des pertes le long du trajet, ces dernières se traduisent par le facteur de transmission du milieu sur le trajet considéré :

$$\mathcal{T}(y_1, y_2) = \frac{L(y_2)}{L(y_1)} \tag{20}$$

Exitance de source

Débit de lumière par unité de surface émettrice



Définition

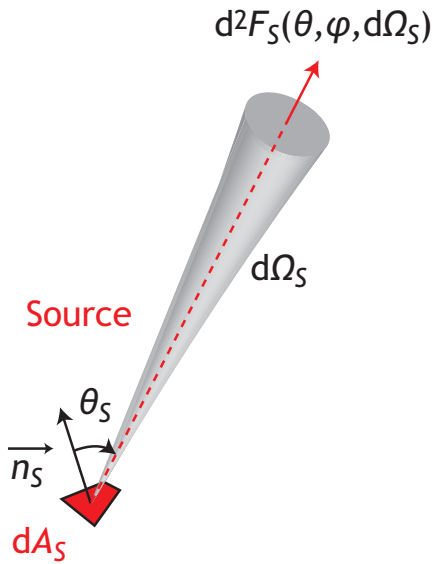
L'exitance M d'une surface en un point est la densité de flux émis dans un demi-espace par unité de surface émissive :

$$M(x,y,z) = \frac{dF_S(x,y,z)}{dA_S} \qquad (21)$$

Confusion exitance et éclairement

Il ne faut pas confondre exitance et éclairement même si elles ont la même dimension : la première décrit une source, le second décrit un récepteur.

Flux émis et luminance de source

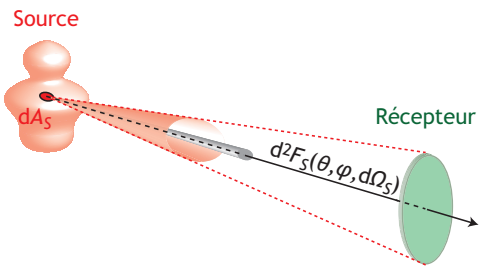


Cas d'un pinceau de lumière d'angle solide infinitésimal $d\Omega_S$:

$$d^2F_S = L_S\, dA_S \cos\theta_S\, d\Omega_S = L_S\, d^2G$$

Cas d'un faisceau de lumière d'extension finie dans l'espace :

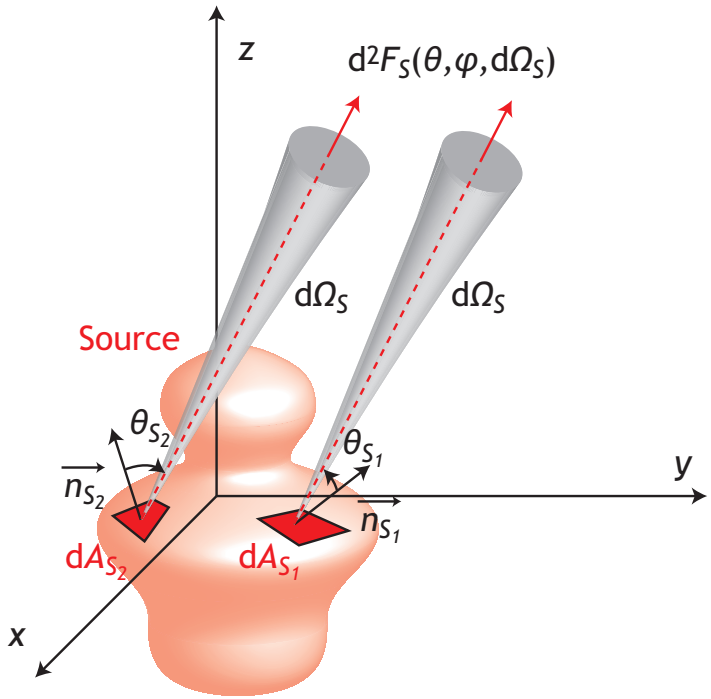
$$F_S = \int_{\text{récepteur}} \int_{\text{source}} L_S(x,y,\theta,\varphi)\, d^2G \qquad (22)$$



Cas d'une source de luminance uniforme :

$$F_S = L_S\, G \qquad (23)$$

Intensité et luminance de source



Flux d^2F_S émis par un élément de surface dA_S dans l'angle solide $d\Omega_S$ centré sur (θ,φ) :

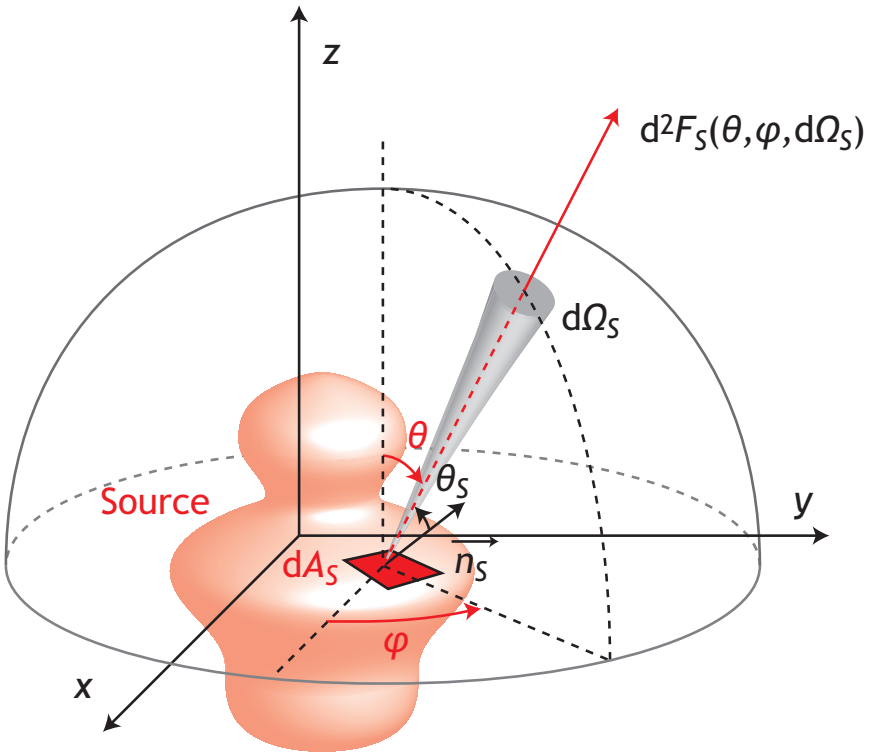
$$d^2F_S = L_S(x,y,\theta,\varphi)\,dA_S\,\cos\theta_S\,d\Omega_S$$

Flux émis par l'ensemble de la source dans cet angle solide :

$$dF_S = d\Omega_S \int_{\text{source}} L_S(\cdots)\cos\theta_S\,dA_S$$

$$I(\theta,\varphi) = \frac{dF_S}{d\Omega_S} = \int_{\text{source}} L_S(x,y,\theta,\varphi)\,dA_S\,\cos\theta_S \qquad (24)$$

Luminance et exitance de source



Flux d^2F_S émis par un élément de surface dA_S dans l'angle solide $d\Omega_S$ centré sur (θ,φ) :

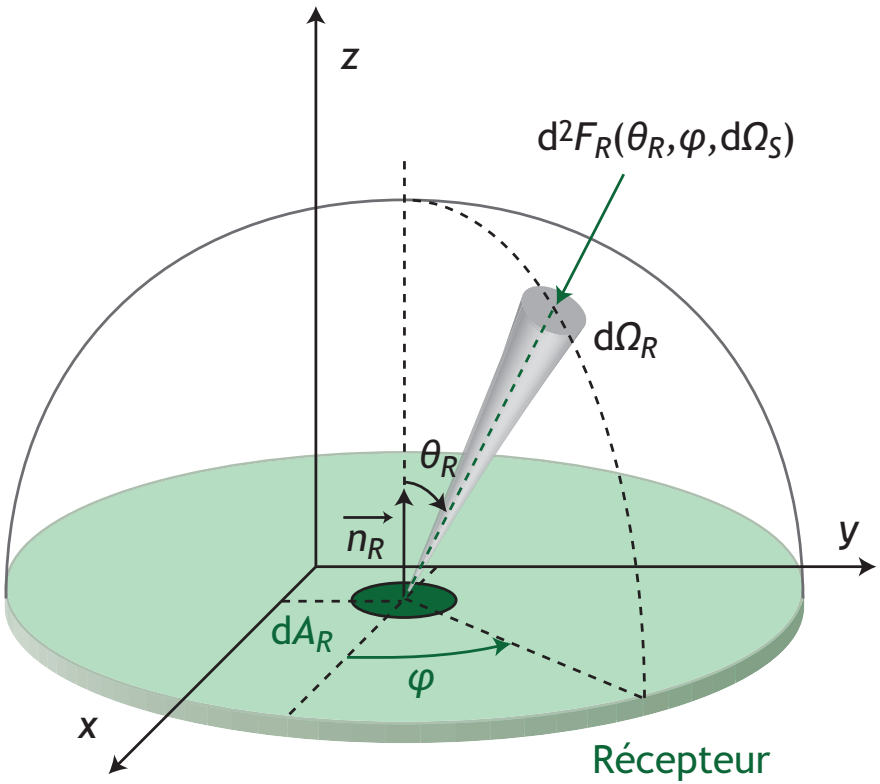
$$d^2F_S = L_S(x,y,\theta,\varphi)\,dA_S\cos\theta_S\,d\Omega_S$$

Flux émis par cet élément de surface dans un demi-espace :

$$(dF_S)_{2\pi} = dA_S \int_{\text{demi-espace}} L_S(\cdots)\cos\theta_S\,d\Omega_S$$

$$M(x,y) = \frac{dF_S}{dA_S} = \int_{\text{demi-espace}} L_S(x,y,\theta,\varphi)\cos\theta_S\,d\Omega_S \qquad (25)$$

Luminance et éclairement



Flux d^2F_R incident sur un élément de surface dA_R dans l'angle solide $d\Omega_R$ centré sur (θ_R, φ) :

$$d^2F_R = L_R(x, y, \theta_R, \varphi)\, dA_R \cos\theta_R\, d\Omega_R$$

Éclairement du récepteur :

$$dE_R = \frac{d^2F_R}{dA_R} = L_R(\cdots) \cos\theta_R\, d\Omega_R$$

$$E_R(x,y) = \int_{\text{demi-espace}} L_R(x, y, \theta_R, \varphi) \cos\theta_R\, d\Omega_R \qquad (26)$$

Autres grandeurs photométriques

Définition

La quantité de lumière $\mathcal{F}$ définie par un flux F et une durée Δt est la somme de ce flux pendant cette durée :

$$\mathcal{F} = \int_{\Delta t} F(t)\,\mathrm{d}t \qquad (\text{en J}) \tag{27}$$

Définition

L'exposition $\mathcal{E}$ d'une surface pendant une durée Δt est la somme de son éclairement pendant cette durée :

$$\mathcal{E} = \int_{\Delta t} E(t)\,\mathrm{d}t \qquad (\text{en J.m}^{-2}) \tag{28}$$

C'est par exemple la grandeur pertinente en photographie.

Tableau récapitulatif

Grandeurs énergétiques et visuelles

Le tableau suivant résume la terminologie fondamentale en photométrie (en français et en anglais) et les unités à employer dans les systèmes énergétique et visuel. Le système photonique se déduit aisément du système énergétique en remplaçant les watts par un débit de photons par seconde.

Grandeur	Unité énergétique	Unité visuelle
Flux	W (*Power*)	lumen (lm) (*Flux*)
Intensité	$W.sr^{-1}$ (*Intensity*)	candela (cd) = $lm.sr^{-1}$ (*Intensity*)
Luminance	$W.m^{-2}.sr^{-1}$ (*Radiance*)	$cd.m^{-2}$ (*Luminance*)
Éclairement	$W.m^{-2}$ (*Irradiance*)	lux = $lm.m^{-2}$ (*Illuminance*)
Exitance	$W.m^{-2}$ (*Exitance*)	$lm.m^{-2}$ (*Exitance*)
Exposition	$J.m^{-2}$ (*Fluence*)	$lm.s.m^{-2}$

4. Sources lambertiennes

1. *Fiat lux et facta est lux*
2. *Like a candle in the wind*
3. *Here comes the sun*
4. ***Moi diffuse, j'ai fait ce que j'ai pu***
5. *I can see clearly now*

Rayonnements à luminance uniforme

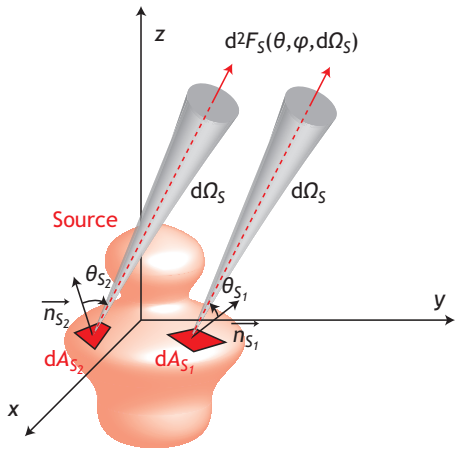
La luminance du rayonnement émis par une source est un paramètre qui dépend à la fois de la zone considérée et de la direction d'émission. Cela étant, il existe un certain nombre de sources dont la luminance peut être considérée uniforme (en particulier des sources naturelles : le ciel bleu, un ciel très couvert, un mur blanc, etc.) :

- elle est dite uniforme angulairement si elle est indépendante de la direction d'émission : $L(x, y, \theta, \varphi) = L(x, y)$;
- elle est dite uniforme spatialement et angulairement si elle est indépendante à la fois de la zone d'émission sur la source et de la direction d'émission : $L(x, y, \theta, \varphi) = L_0$. On parle aussi de source lambertienne dans ce cas.

Les propriétés spécifiques des sources de ce type permettent d'établir des relations simples entre les grandeurs photométriques caractéristiques, qui sont particulièrement utiles pour la modélisation de systèmes optiques en première approximation.

Intensité et luminance de source

Cas particulier d'une source lambertienne



$$I(\theta,\varphi) = \int_{\text{source}} L_S(x,y,\theta,\varphi)\, dA_S \cos\theta_S \tag{24}$$

$$I(\theta,\varphi) = L_S \int_{\text{source}} \cos\theta_S\, dA_S = L_S\, A_{app}(\theta,\varphi) \tag{29}$$

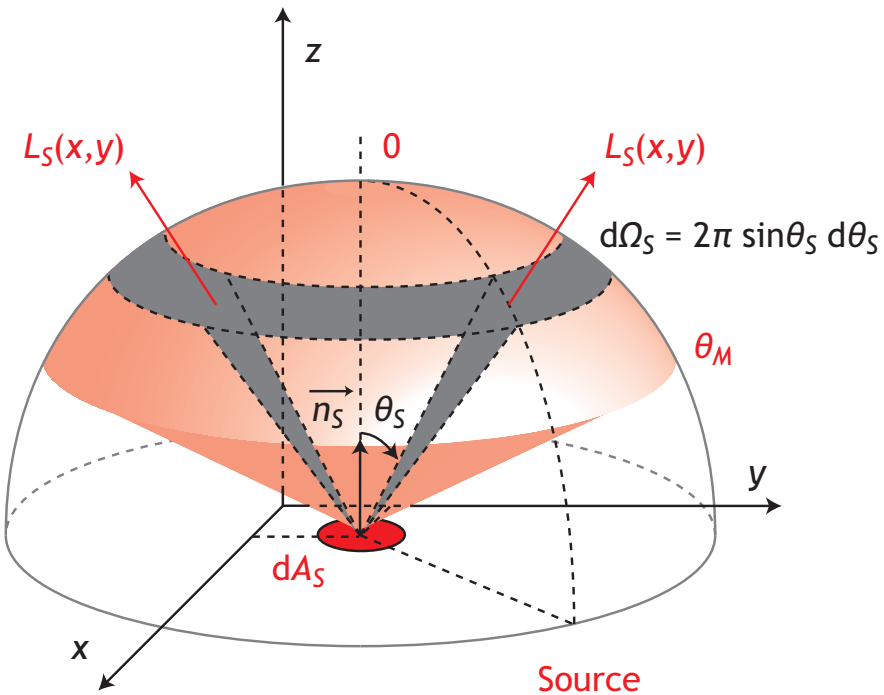
avec $A_{app}(\theta,\varphi)$ l'aire apparente de la source (en projection) dans la direction (θ,φ).

Exemple : intensité d'un disque lumineux

Intensité d'un disque plan d'aire A_S et de luminance uniforme L_S dans la direction θ_S par rapport à la normale :

$$I(\theta_S) = L_S \cos\theta_S \int_{\text{source}} dA_S = L_S \cos\theta_S\, A_S$$

Cas général : $$M(x,y) = \int_{\text{demi-espace}} L_S(x,y,\theta,\varphi)\cos\theta_S \, \mathrm{d}\Omega_S \qquad (25)$$



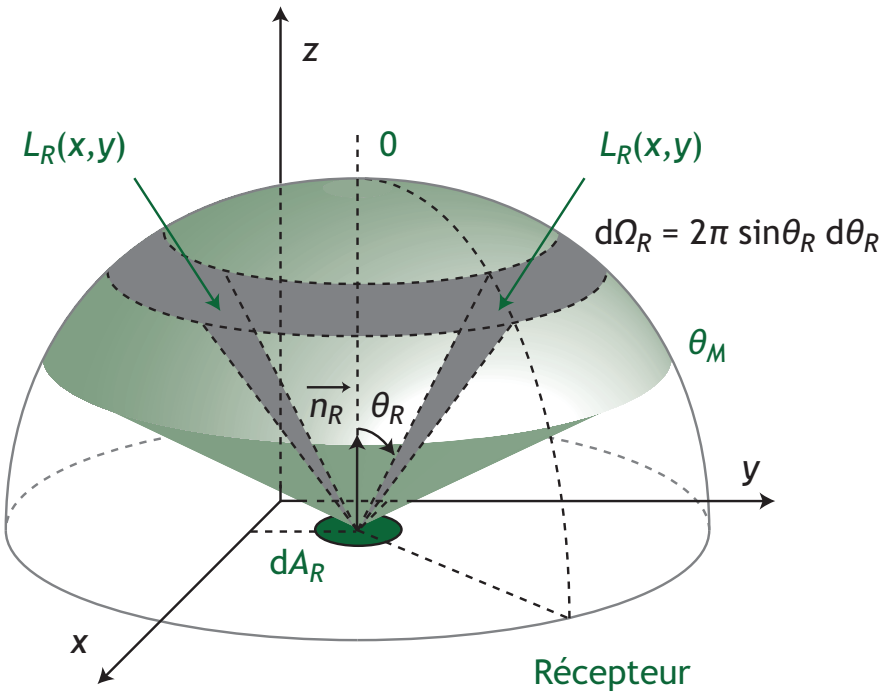
Source de luminance uniforme : l'expression (25) s'applique en échantillonnant l'angle solide d'émission de chaque zone en couronnes élémentaires centrées sur la normale :

$$M = L_S \int_0^{\theta_M} 2\pi \sin\theta_S \cos\theta_S \, \mathrm{d}\theta_S$$

$$M = \pi L_S \sin^2\theta_M \qquad (30)$$

$$M = \pi L_S \quad \text{(demi-espace : } \theta_M = \pi/2\text{)}$$

Cas général : $$E_R(x,y) = \int_{\text{demi-espace}} L_R(x,y,\theta_R,\varphi)\cos\theta_R \,\mathrm{d}\Omega_R \qquad (26)$$



Rayonnement de luminance uniforme : l'expression (26) s'applique en échantillonnant l'angle solide d'émission de chaque zone en couronnes élémentaires centrées sur la normale :

$$E_R = L_R \int_0^{\theta_M} \cos\theta_R \, 2\pi \sin\theta_R \,\mathrm{d}\theta_R$$

$$E_R = \pi L_R \sin^2\theta_M \qquad (31)$$

$$E_R = \pi L_R \quad \text{(demi-espace : } \theta_M = \pi/2\text{)}$$

Diffuseurs parfaits

Définition

Un **diffuseur parfait** en réflexion (resp. en transmission) est une surface qui réfléchit (resp. transmet) la totalité du flux incident avec une luminance qui dépend uniquement de son éclairement, quelles que soient la direction et la directivité du rayonnement incident et la direction d'observation du rayonnement du rayonnement réfléchi (resp. transmis).

Par conséquent, l'exitance en réflexion (resp. en transmission) du diffuseur parfait est égale à son éclairement. On en déduit que la luminance d'un tel diffuseur est :

$$L = \frac{M}{\pi} = \frac{E}{\pi} \quad \text{puisqu'elle est uniforme.} \tag{32}$$

Diffuseurs lambertiens

En pratique, les diffuseurs réels réfléchissent (resp. transmettent) seulement une fraction $\mathcal{R}$ (resp. $\mathcal{T}$) du rayonnement incident et leur luminance peut dépendre des directions d'illumination et de réémission.

Définition

Un diffuseur dont la luminance est uniforme spatialement et angulairement est appelé un **diffuseur lambertien**. On parle également de **surface orthotrope**.

La luminance d'un diffuseur lambertien est liée à l'éclairement E par le facteur de réflexion diffuse $\mathcal{R}_d$ (resp. de transmission diffuse $\mathcal{T}_d$ de la surface par la relation de Lambert :

$$L = \frac{\mathcal{R}_d\, E}{\pi} \quad \text{(en réflexion)} \qquad\qquad L = \frac{\mathcal{T}_d\, E}{\pi} \quad \text{(en transmission)} \tag{33}$$

Le facteur de réflexion diffuse d'une surface est aussi appelé albédo.

Ordres de grandeur

La qualité lambertienne d'une surface diffusante dépend essentiellement de la rugosité de la surface par rapport à la longueur d'onde. Pour un échantillon donné, cette rugosité apparente décroît en fonction de l'angle d'incidence du faisceau : une surface lambertienne sous incidence proche de la normale perd en général son caractère lambertien en incidence rasante.

Luminance de la lune

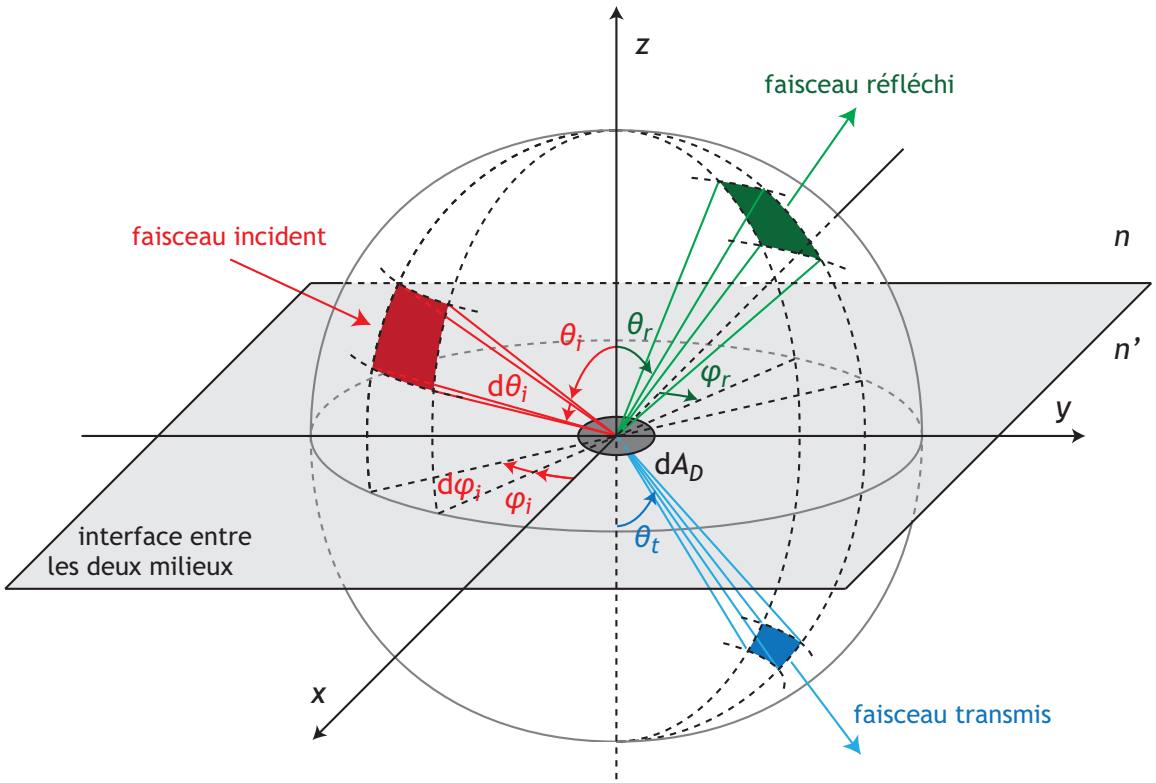
L'albédo de la lune est $\mathcal{R}_d = 0,07$. L'éclairement par le soleil est $E_V = 130000$ lux.

$$L_V(\text{lune}) = \frac{\mathcal{R}_d\, E_V}{\pi} = \frac{0,07 \times 130000}{\pi} = 3000 \text{ cd.m}^{-2}$$

Observée depuis la terre, il faudrait tenir compte de la transmission par l'atmosphère, ce qui réduirait la luminance effective d'un facteur $\mathcal{T}_{atm} = 0,75$ environ.

5. Photométrie dans les instruments

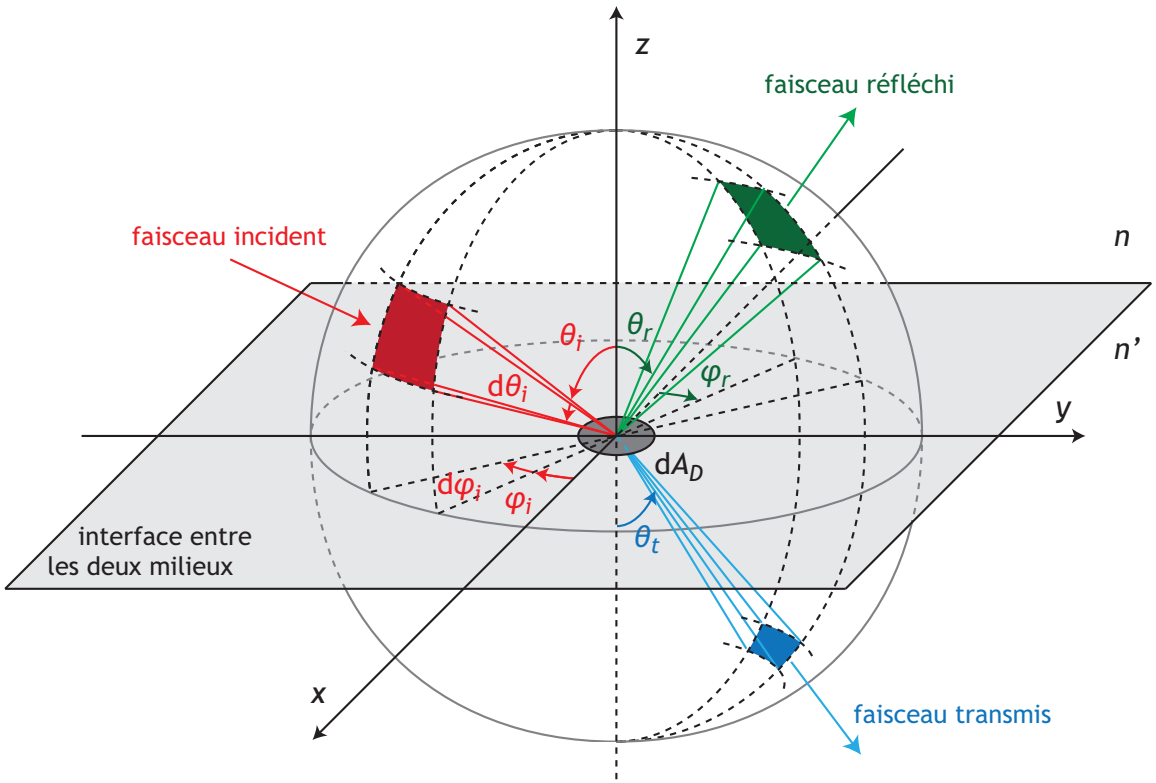
1. *Fiat lux et facta est lux*
2. *Like a candle in the wind*
3. *Here comes the sun*
4. *Moi diffuse, j'ai fait ce que j'ai pu*
5. ***I can see clearly now***



Lors de la réflexion, $\varphi_i = \varphi_r$ et $\theta_i = \theta_r$. En termes d'étendue géométrique :

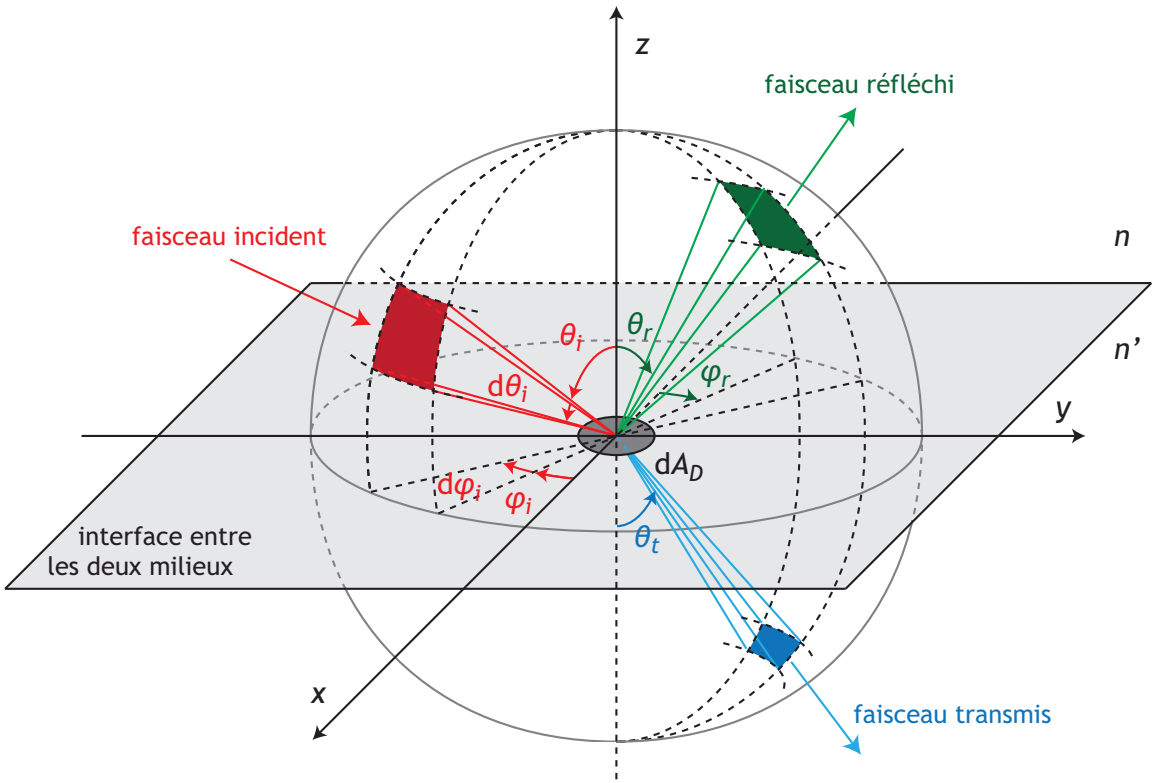
$$d^2 G_r = dA_D \cos\theta_i \, d\varphi_r \sin\theta_r \, d\theta_r = dA_D \cos\theta_r \, d\varphi_i \sin\theta_i \, d\theta_i = d^2 G_i \qquad (34)$$

Il y a conservation de l'étendue géométrique à la réflexion.



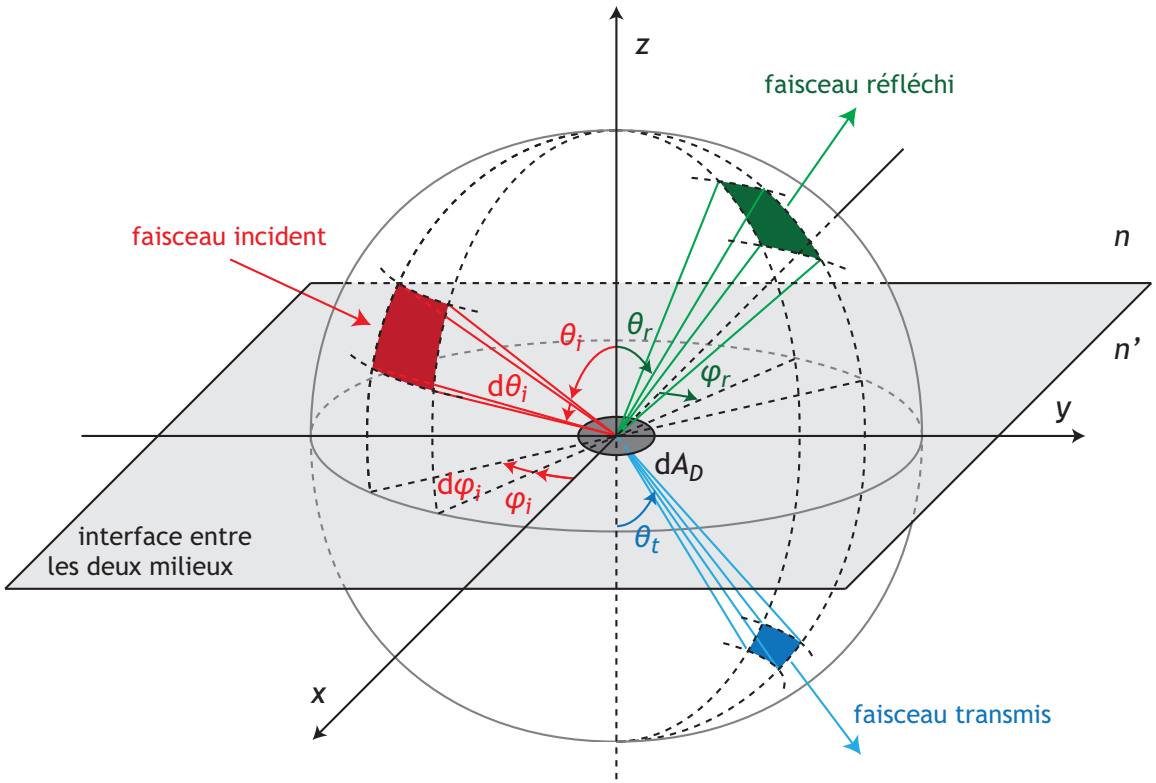
Lors de la réfraction, la symétrie impose $d\varphi_t = d\varphi_i$ et la loi de Snell-Descartes donne $n \sin\theta_i = n' \sin\theta_t$. En différenciant cette expression, il vient :

$$n \sin\theta_i = n' \sin\theta_t \quad \Rightarrow \quad n \cos\theta_i \, d\theta_i = n' \cos\theta_t \, d\theta_t$$



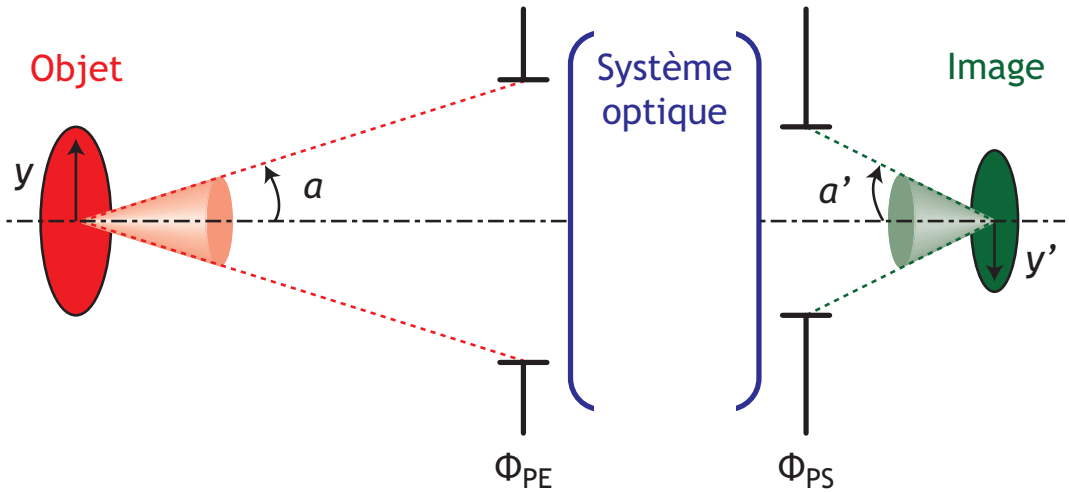
L'étendue géométrique $\mathrm{d}^2 G_t$ dans le second milieu s'écrit par conséquent :

$$\mathrm{d}^2 G_t = \mathrm{d}A_D \cos\theta_t \, \mathrm{d}\varphi_t \sin\theta_t \, \mathrm{d}\theta_t = \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \mathrm{d}A_D \cos\theta_r \, \mathrm{d}\varphi_i \sin\theta_i \, \mathrm{d}\theta_i$$



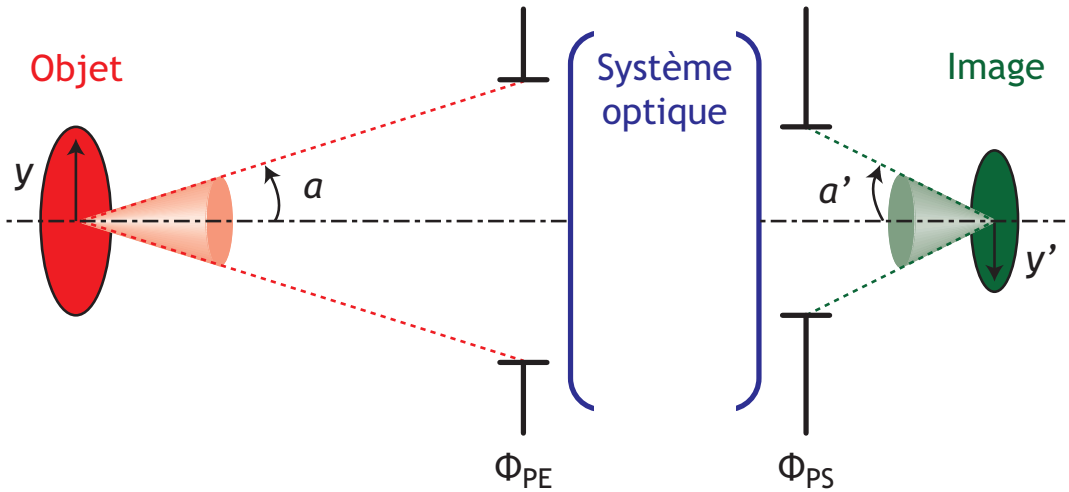
Il en résulte que ce n'est pas l'étendue géométrique d^2G qui se conserve lors du passage du dioptre, mais le produit $n^2\,\mathrm{d}^2G$, appelé étendue optique :

$$n'^2\mathrm{d}^2G_t = n^2\mathrm{d}^2G_i \quad \text{(théorème de Clausius)} \tag{35}$$



Dans de nombreuses applications, telles que l'imagerie, le système optique est conçu de façon à reproduire au mieux dans l'image la configuration géométrique de l'objet initial. Un tel système est dit aplanétique (dépourvu d'aberrations dans le plan transversal). Une condition nécessaire et suffisante est alors la relation des sinus d'Abbe :

$$n\,y\,\sin\alpha = n'\,y'\,\sin\alpha' \tag{36}$$



Si on raisonne en termes d'étendues géométriques et que l'on considère un objet circulaire de rayon y, le théorème de Clausius donne :

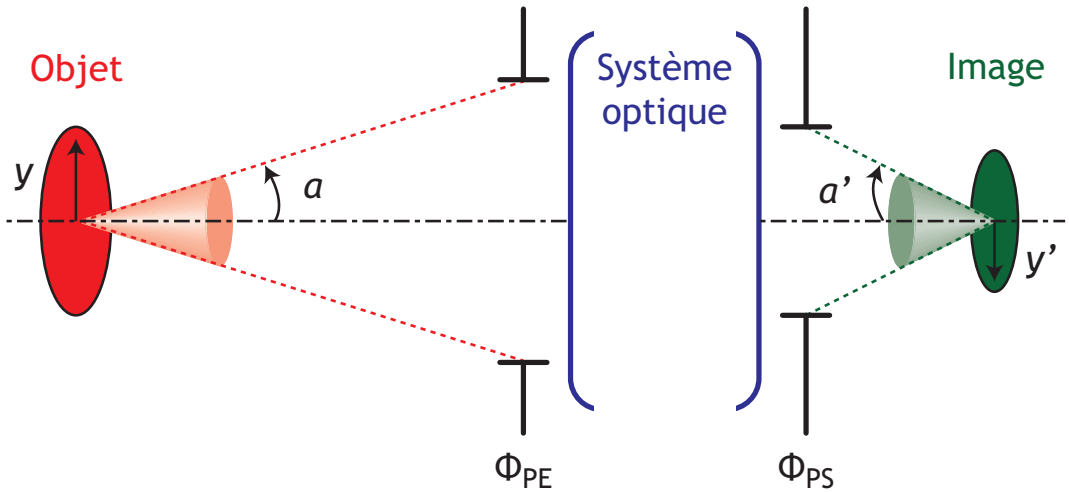
$$G = \pi y^2 \sin^2 \alpha \quad \text{et} \quad G' = \pi y'^2 \sin^2 \alpha'$$

$$\text{or} \quad n^2 G = n'^2 G' \quad \Leftrightarrow \quad (n y \sin \alpha)^2 = (n' y' \sin \alpha')^2$$

La relation des sinus d'Abbe est donc équivalente au théorème de Clausius dans les systèmes optiques aplanétiques.

Systèmes optiques aplanétiques

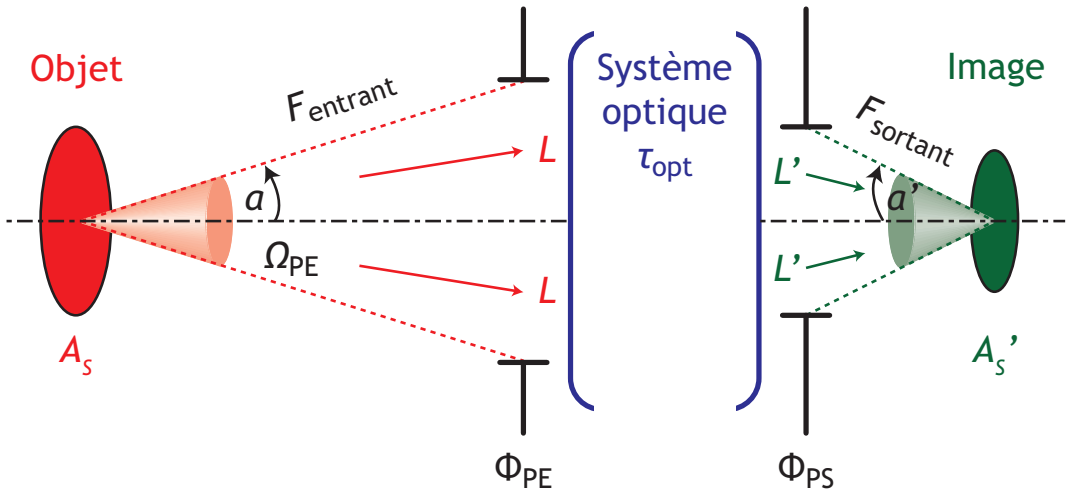
Relation des sinus d'Abbe



Conservation de l'étendue optique

En d'autres termes, on ne peut pas à la fois réduire la dimension transverse d'un faisceau et sa divergence angulaire dans un système aplanétique (on peut en revanche les augmenter toutes les deux dans un système non-aplanétique).

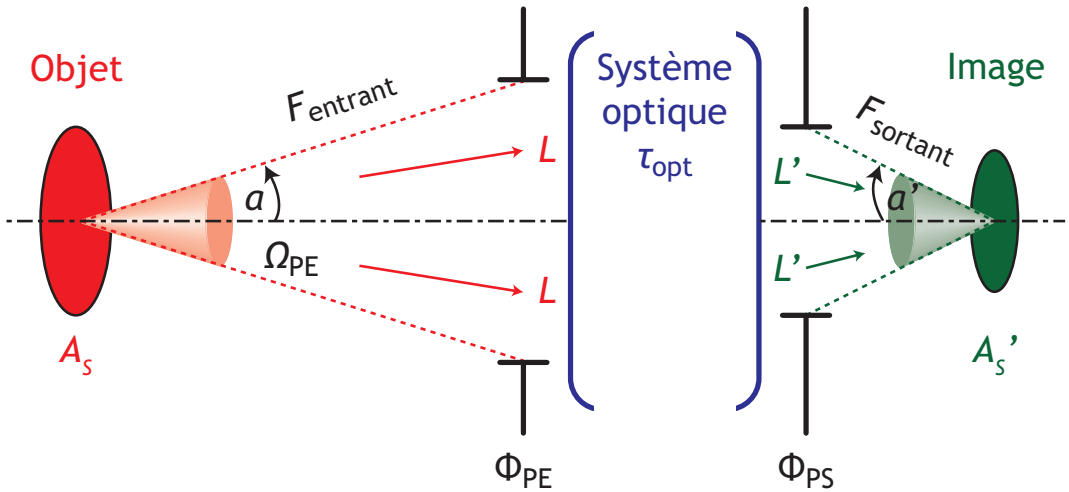
Flux entrant dans un instrument



Hypothèses de travail

- Objet petit d'aire A_S, centré sur l'axe, assimilé à une source lambertienne, dans le champ de pleine lumière objet.
- Propagation sans perte dans l'espace libre.
- Luminance L uniforme, aire A_S petite.
- La pupille d'entrée est vue **depuis tout point de la source** sous l'angle solide Ω_{PE}.
- Le flux entrant est limité par la pupille d'entrée du système, caractérisée par l'angle d'ouverture objet α.

Flux entrant dans un instrument



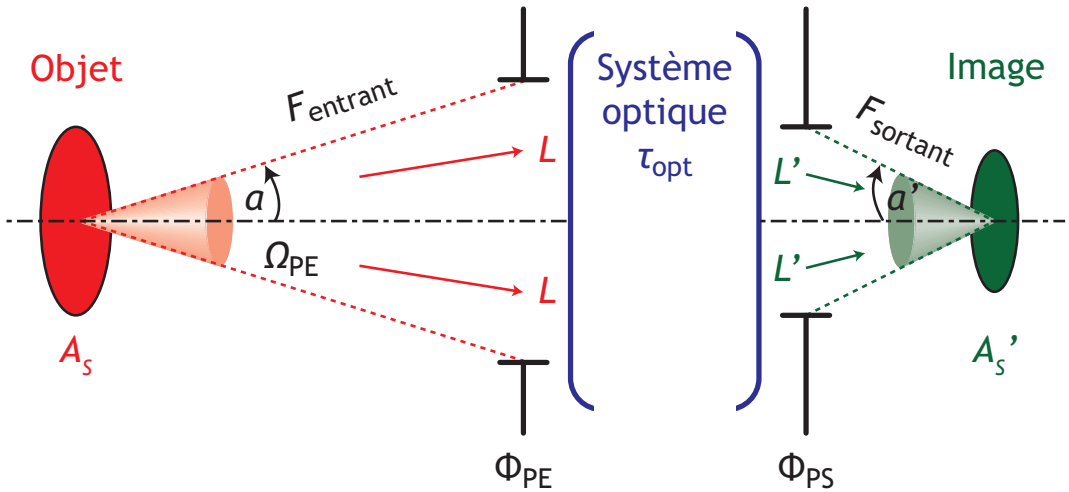
Calcul du flux entrant

$$dF_{entrant} = L\, dG_{S-PE} = L\, dS \cos\theta\, d\Omega_{PE}$$

$$F_{entrant} = L \int_{A_S} dS \int_{\Omega_{PE}} \cos\theta\, d\Omega_{PE} = L\, A_S \int_0^{\alpha} 2\pi \sin\theta \cos\theta\, d\theta$$

$$F_{entrant} = \pi L\, A_S \sin^2\alpha \qquad (37)$$

Flux sortant d'un instrument



Dans le champ de pleine lumière, le flux sortant est donc égal au flux entrant, à la transmission près du système optique $\mathcal{T}_{opt}$.

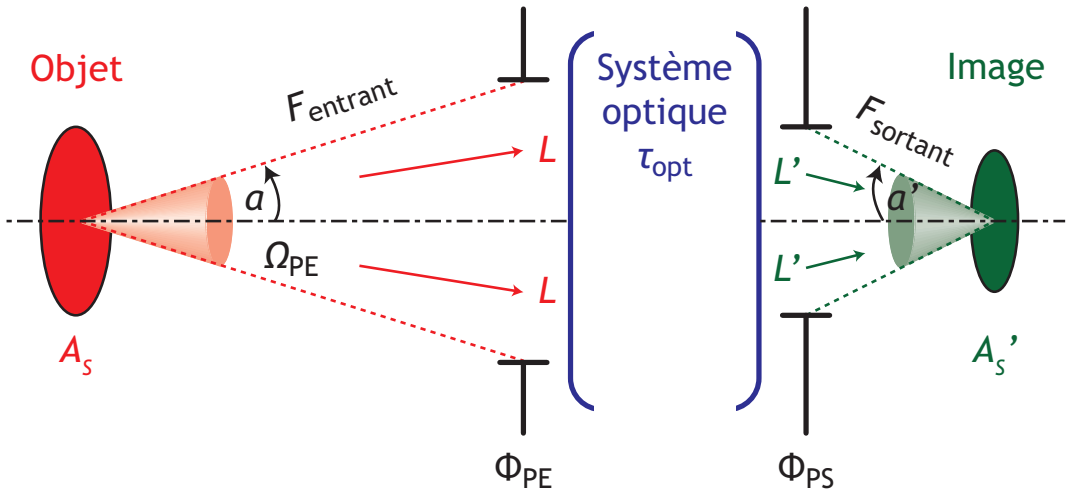
$$F_{sortant} = \mathcal{T}_{opt} F_{entrant} \tag{38}$$

On peut également écrire le flux sortant de façon analogue au flux entrant, en fonction de la luminance L' du rayonnement sortant du système, de la surface $\Delta S'$ de l'image de l'objet et de l'angle d'ouverture image α' :

$$F_{sortant} = \pi L' A_S' \sin^2 \alpha' \tag{39}$$



Flux sortant d'un instrument

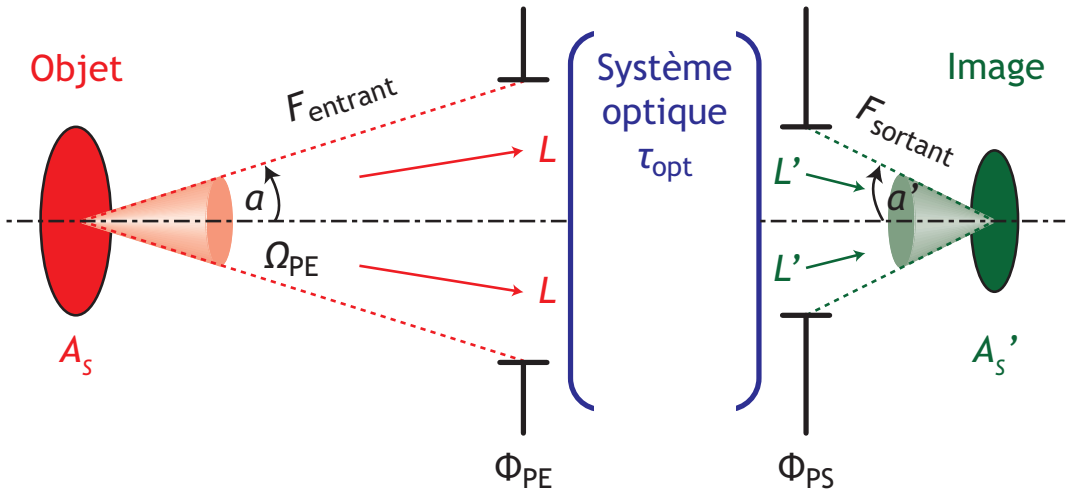


En tenant compte de la conservation de l'étendue optique $n^2\,G = n'^2\,G'$, on peut établir l'expression qui lie la luminance de l'objet à la luminance du rayonnement sortant du système optique :

$$F_{\text{sortant}} = \pi\,L'\,A'_S\,\sin^2\alpha' = \mathcal{T}_{\text{opt}}\,F_{\text{entrant}} = \mathcal{T}_{\text{opt}}\,\pi\,L\,A_S\,\sin^2\alpha$$

$$\text{or}\quad n^2\,A_S\,\sin^2\alpha = n'^2\,A'_S\,\sin^2\alpha' \quad\Leftrightarrow\quad L' = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \mathcal{T}_{\text{opt}}\,L \qquad (40)$$

Flux sortant d'un instrument



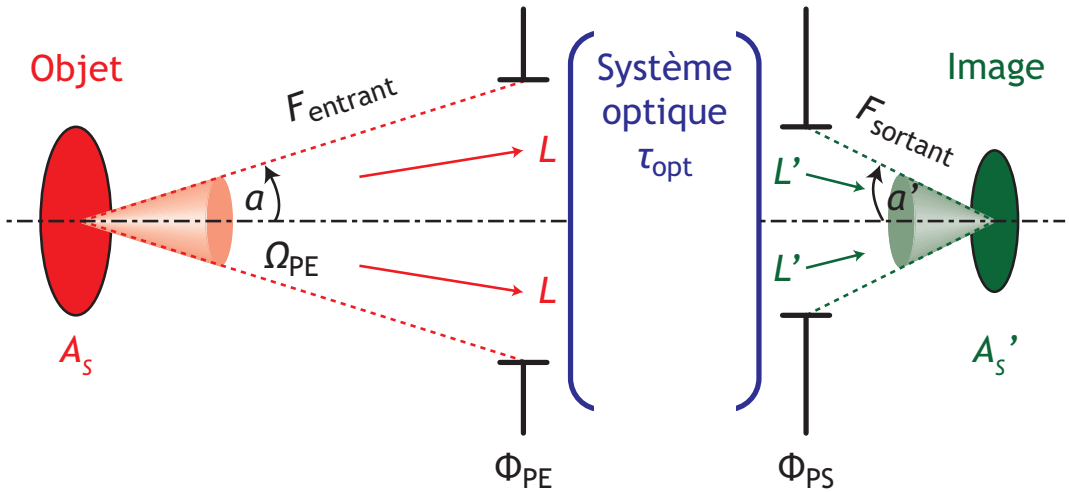
Transfert de la luminance

$$L' = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \mathcal{T}_{opt}\, L$$

Il y a donc conservation de la luminance entre objet et image dans le cas où les milieux extrêmes sont identiques ($n = n'$) et où le système optique n'a pas de perte ($\mathcal{T}_{opt} = 1$), sous réserve que l'objet se trouve dans le champ de pleine lumière.

Éclairement dans le plan image

Sur l'axe



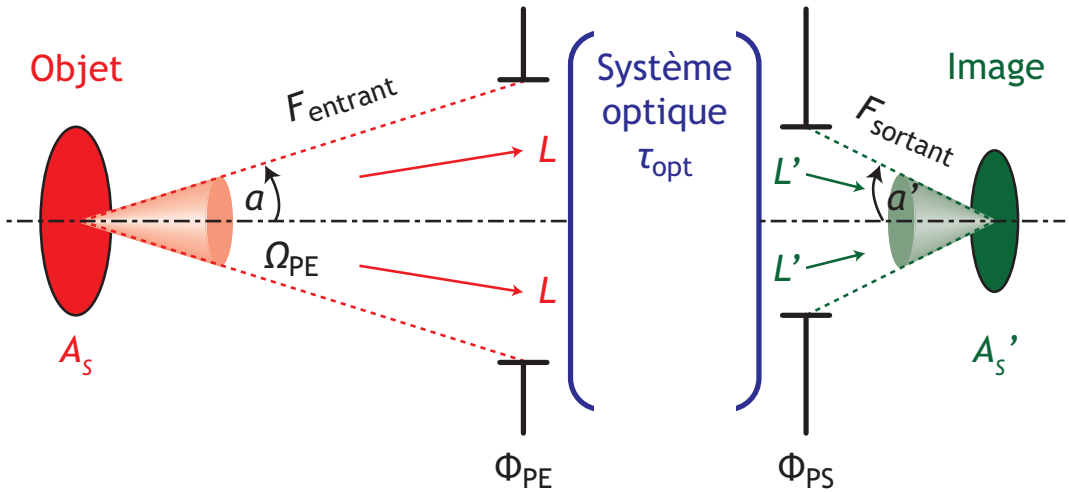
Un élément de surface dS' de l'écran, centré sur l'axe et à l'intérieur du champ de pleine lumière va recevoir un flux sortant infinitésimal :

$$dF_{sortant} = \pi L' \, dS' \sin^2 \alpha' \quad \text{donc} \quad E' = \frac{dF_{sortant}}{dS'} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \pi \mathcal{T}_{opt} L \sin^2 \alpha' \qquad (41)$$

Sur l'axe, l'éclairement dans le plan image ne dépend que de l'angle d'ouverture image α' et pas de la taille ni de la position de l'image.

Éclairement dans le plan image

Sur l'axe



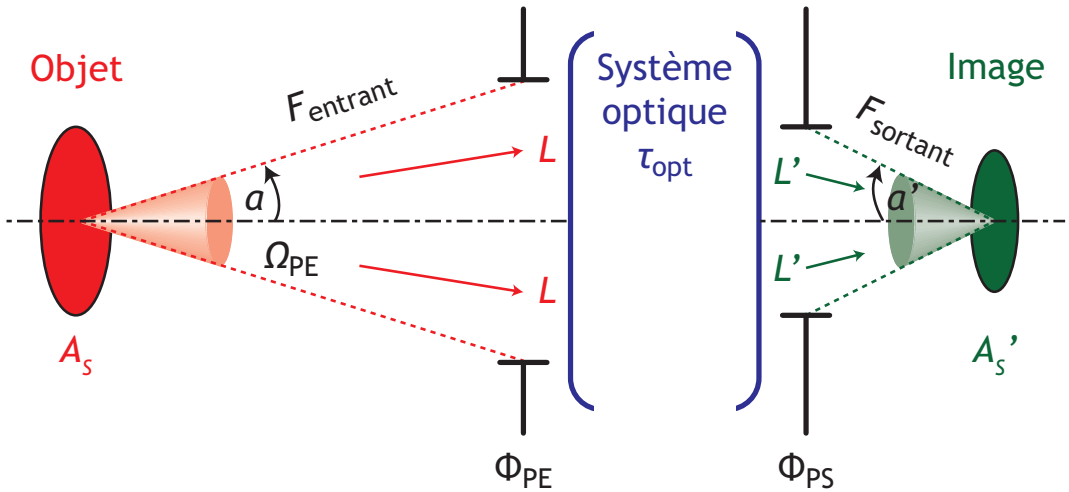
Cas particulier d'une conjugaison infini/foyer dans l'air :

$$N = \frac{1}{2|\sin\alpha'|} \quad \Rightarrow \quad E' = \pi \mathcal{T}_{opt} L \sin^2\alpha' = \frac{\pi \mathcal{T}_{opt} L}{4N^2} \tag{42}$$

La distance de mise au point reste généralement très grande devant la focale du système (typiquement $f' = 50$ mm et on vise au moins à 1 m), de sorte que cette relation reste valable en première approximation hors de la conjugaison nominale.

Éclairement dans le plan image

Sur l'axe





Objectif ouvert à $N = 1{,}4$
(crédit : Leica)

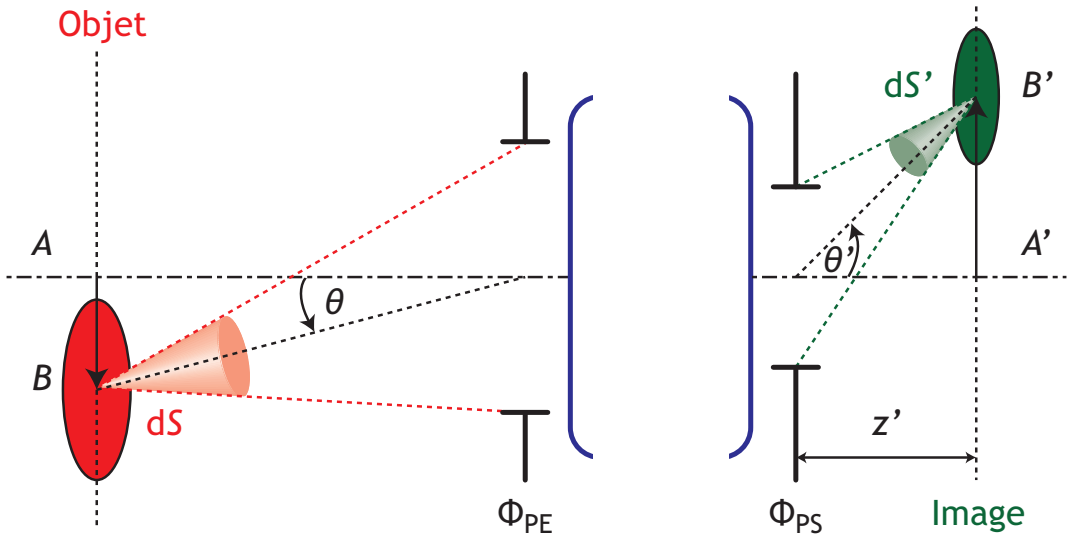
L'éclairement sur l'axe varie en $1/N^2$

$$E' = \frac{\pi \mathcal{T}_{opt} L}{4N^2}$$

C'est la raison pour laquelle les nombres d'ouverture sont calibrés selon une suite géométrique de raison $\sqrt{2}$ sur les objectifs d'appareil photographique :
$1 - 1{,}4 - 2 - 2{,}8 - 4 - 5{,}6 - 8 - 11 - 16 - \cdots$
Passer d'un nombre d'ouverture au suivant augmente (ou diminue) d'un facteur 2 l'éclairement sur l'axe : il reste ensuite à adapter le temps de pause d'un facteur 2 également pour travailler à exposition contante.

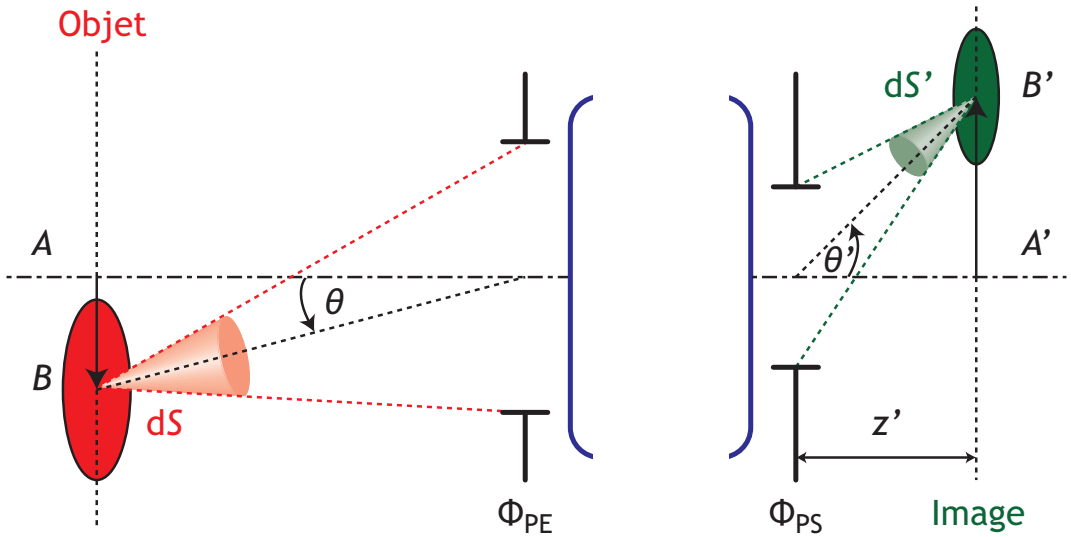
Éclairement dans le champ

Dans le champ de pleine lumière



Hypothèses de travail

- Système aplanétique, objet lambertien petit à grande distance (conjugaison nominale).
- Dans le champ de pleine lumière, la pupille de sortie est uniformément éclairée : source secondaire de luminance L' qui éclaire le plan image.
- L'angle solide sous lequel est vue la pupille de sortie depuis le plan image est petit.



Loi en $\cos^4\theta$

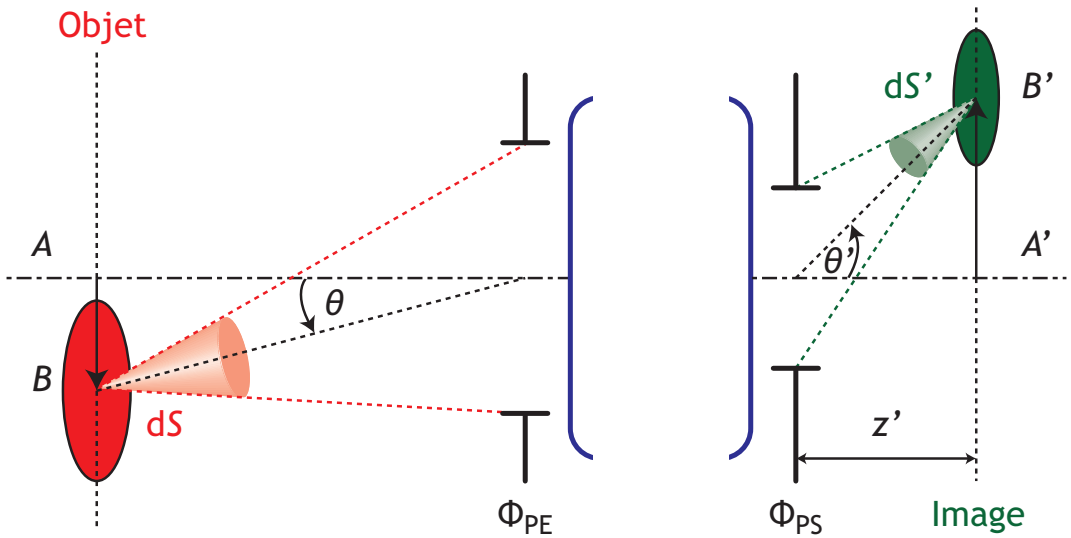
Flux respectivement reçus par un élément de surface $\mathrm{d}S'$ centré sur A' (sur l'axe) et B' (dans le champ de pleine lumière) :

$$\mathrm{d}F(A') = L'_{PS}\, G_0 = L'\,\frac{S_{PS}\,\mathrm{d}S'}{z'^2} \qquad \mathrm{d}F(B') = L'\,G(\theta') = L'\,\frac{(S_{PS}\cos\theta')(\mathrm{d}S'\cos\theta')}{(z'/\cos\theta')^2}$$

$$E'_0 = \frac{\mathrm{d}F(A')}{\mathrm{d}S'} = L'\,\frac{S_{PS}}{z'^2}\ \text{(sur l'axe)} \qquad E'(\theta') = \frac{\mathrm{d}F(B')}{\mathrm{d}S'} = E'_0\cos^4\theta'\ \text{(dans le champ)} \quad (43)$$

Éclairement dans le champ

Dans le champ de pleine lumière

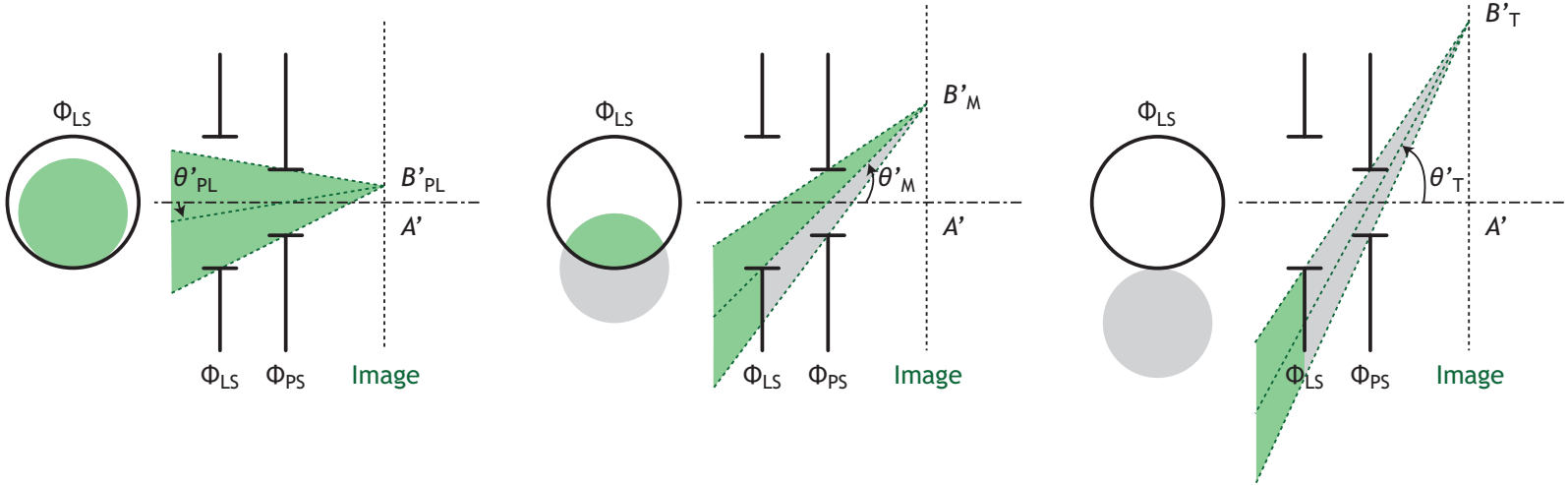


Loi en $\cos^4\theta$ (parfois nommée « *dôme photométrique* »)

Cette diminution est très lente ($\cos^4(10°) = 0,94$) et dans la pratique l'effet de la dépendance des transmissions des optiques avec l'incidence s'y ajoute, de même que les aberrations. Cette loi est obtenue dans le cas d'un système optique simple et peu ouvert, elle est donc rarement vérifiée dans les systèmes optiques réels.

Éclairement dans le champ

Au-delà du champ de pleine lumière





Présence de vignettage en bord du champ de pleine lumière dans le clip *Sans Logique* de Mylène Farmer (crédit : Marianne Rosenstiehl)

Loi en $\cos^4\theta \neq$ Vignettage

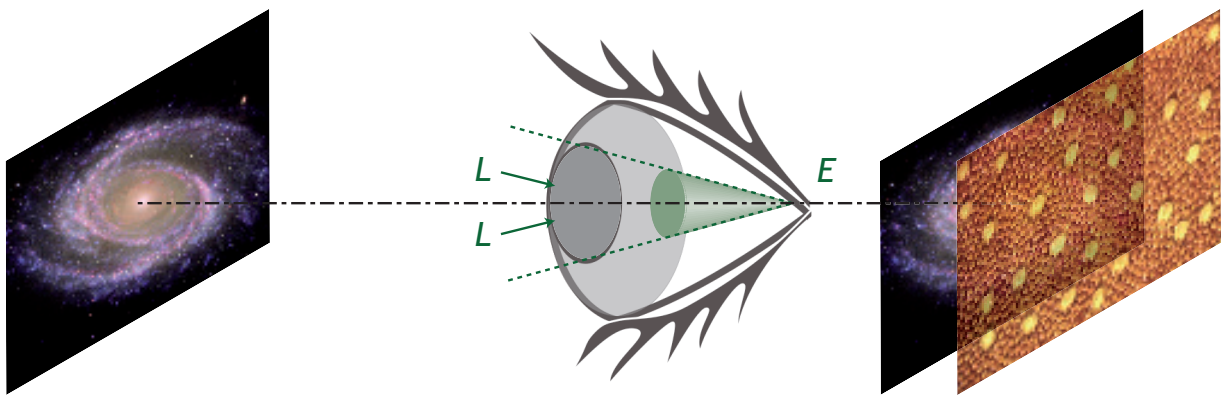
- Lorsqu'on s'écarte dans le champ au-delà du champ de pleine lumière, la pupille de sortie n'est plus uniformément éclairée : une partie du faisceau est obturée par les lucarnes.
- Au milieu du champ de contour, l'étendue géométrique a été diminuée de plus d'un facteur 2 : la chute d'éclairement est plus rapide qu'une chute linéaire.

Clarté des instruments visuels

Objet étendu

Définition

La **clarté** est une propriété des instruments qui caractérise son rendement photométrique. Sa définition dépend du type d'instrument (on parle de **clarté d'un instrument visuel** et de **luminosité d'un instrument objectif**) et du type d'image réalisée (étendue ou ponctuelle).

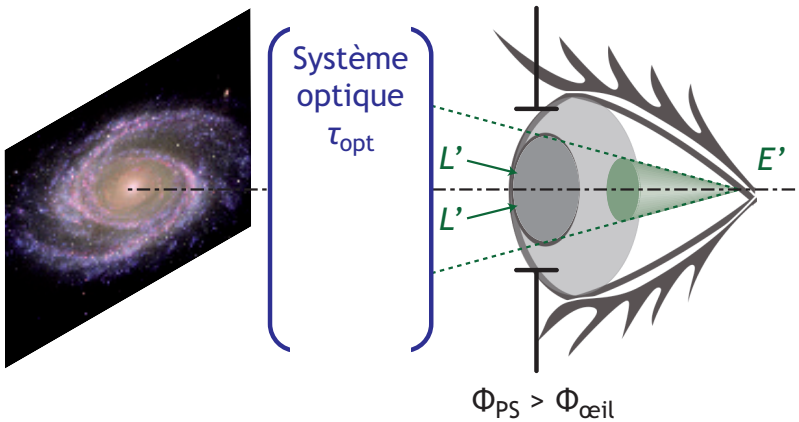


L'objet est étendu : la lumière se répartit sur plusieurs cellules rétiniennes. Le flux reçu par chaque cellule rétinienne est directement proportionnel à l'éclairement local, et la clarté est donc un rapport d'éclairement.

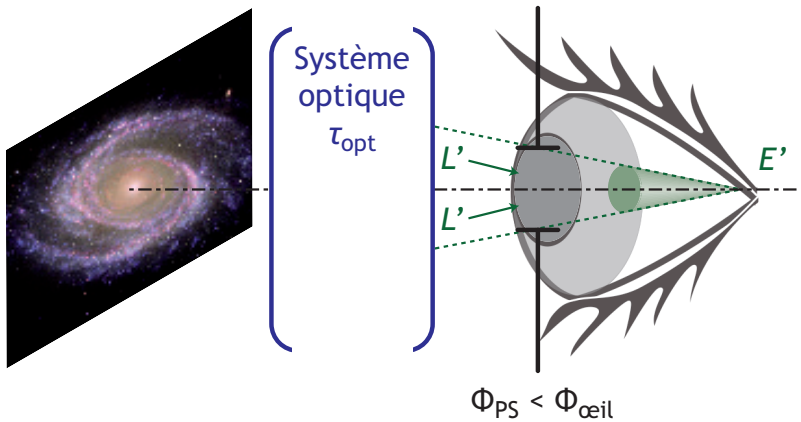
$$\mathcal{C}_{\text{étendu}} = \frac{\text{éclairement sur la rétine avec instrument}}{\text{éclairement sur la rétine à l'œil nu}}$$

Clarté des instruments visuels

Objet étendu



$\Phi_{PS} > \Phi_{œil}$



$\Phi_{PS} < \Phi_{œil}$

$$\mathcal{C}_{\text{étendu}} = \frac{\pi L' \Phi_{\text{œil}}^2}{\pi L \Phi_{\text{œil}}^2} = \frac{L'}{L} = \mathcal{T}_{\text{opt}}$$

$$\mathcal{C}_{\text{étendu}} = \frac{\pi L' \Phi_{\text{PS}}^2}{\pi L \Phi_{\text{œil}}^2} = \mathcal{T}_{\text{opt}} \left(\frac{\Phi_{\text{PS}}}{\Phi_{\text{œil}}} \right)^2$$

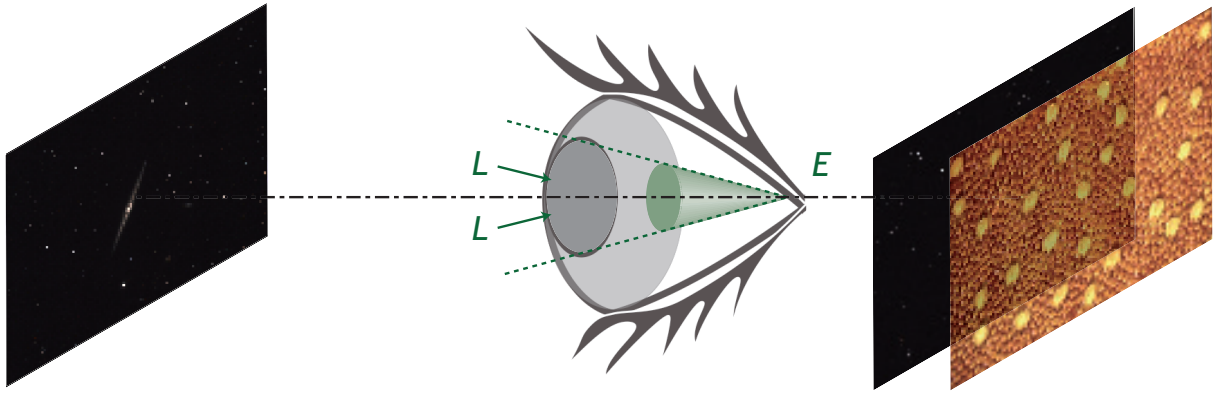
$$\mathcal{C}_{\text{étendu}} < \mathcal{T}_{\text{opt}} < 1$$

Optimisation de la clarté

- Rappel : pour une lunette afocale, le grossissement angulaire est $G = \Phi_{PE}/\Phi_{PS}$
- $\mathcal{C}_{\text{étendu}} < 1$: le ciel est plus noir à travers la lunette.

Clarté des instruments visuels

Objet ponctuel



L'intégralité des photons issus de l'objet se concentre sur une cellule de la rétine, qui intègre toute la lumière incidente, c'est-à-dire le produit de l'éclairement par la surface éclairée. La grandeur significative est donc le flux, et la clarté s'exprime :

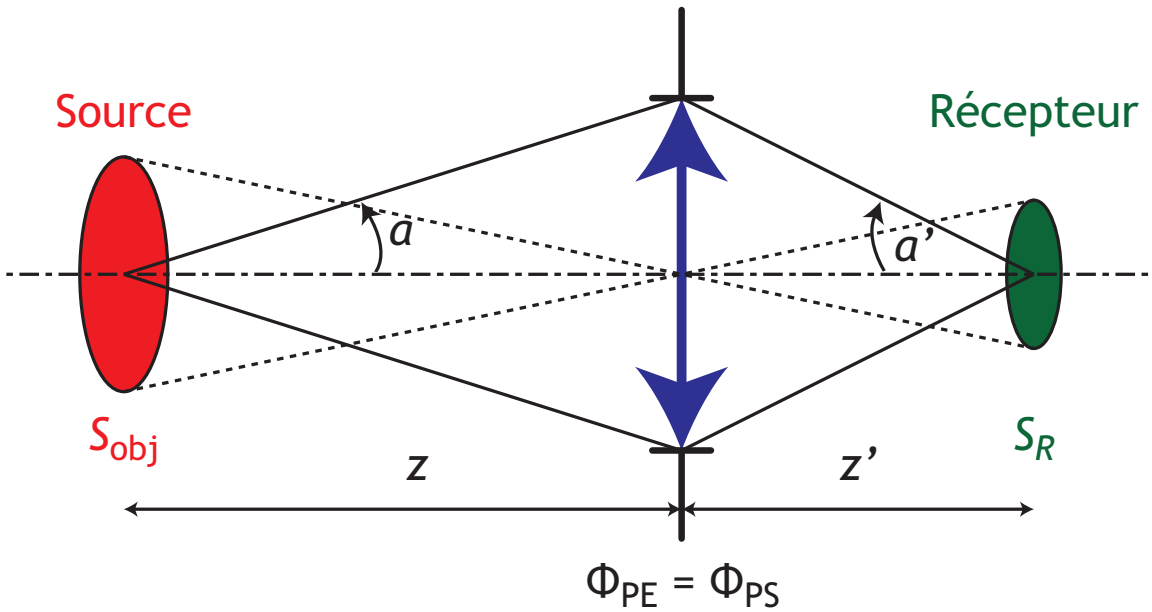
$$\mathcal{C}_{\text{ponctuel}} = \frac{\text{flux sur la rétine avec instrument}}{\text{flux sur la rétine à l'œil nu}} = \frac{E' S'}{E S} = \mathcal{C}_{\text{étendu}} \left(\frac{\theta'}{\theta} \right)^2 = \mathcal{C}_{\text{étendu}} G^2$$

Optimisation de la clarté

Si G est grand, $\mathcal{C}_{\text{ponctuel}} \gg 1$: on voit plus d'étoiles au travers de la lunette.

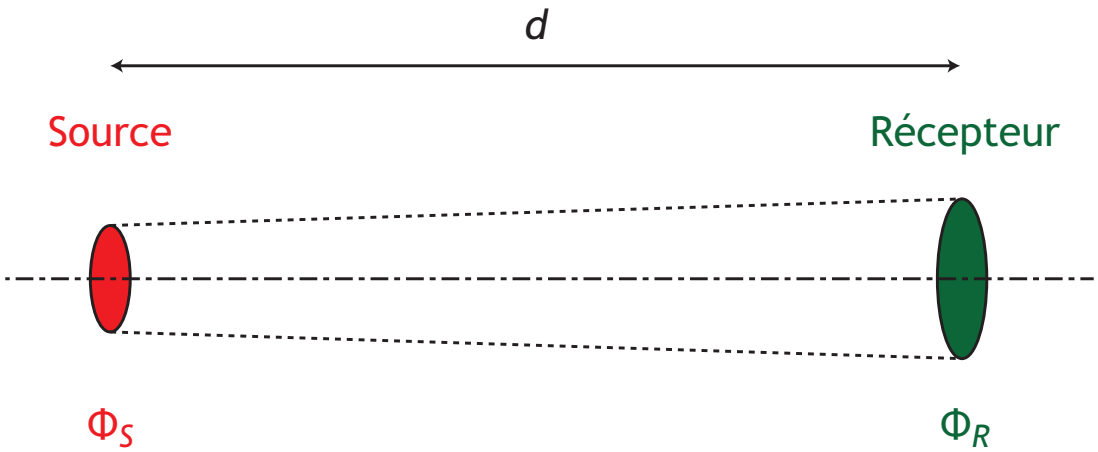
Définition

Les **collecteurs de flux** sont destinés à capter le maximum de rayonnement émis par la source. Pour cela, le champ en réception du système est supérieur aux dimensions de l'objet : l'objet n'est pas résolu par le système optique, dont il est le diaphragme de champ.



Transfert de flux par imagerie

Sans optique

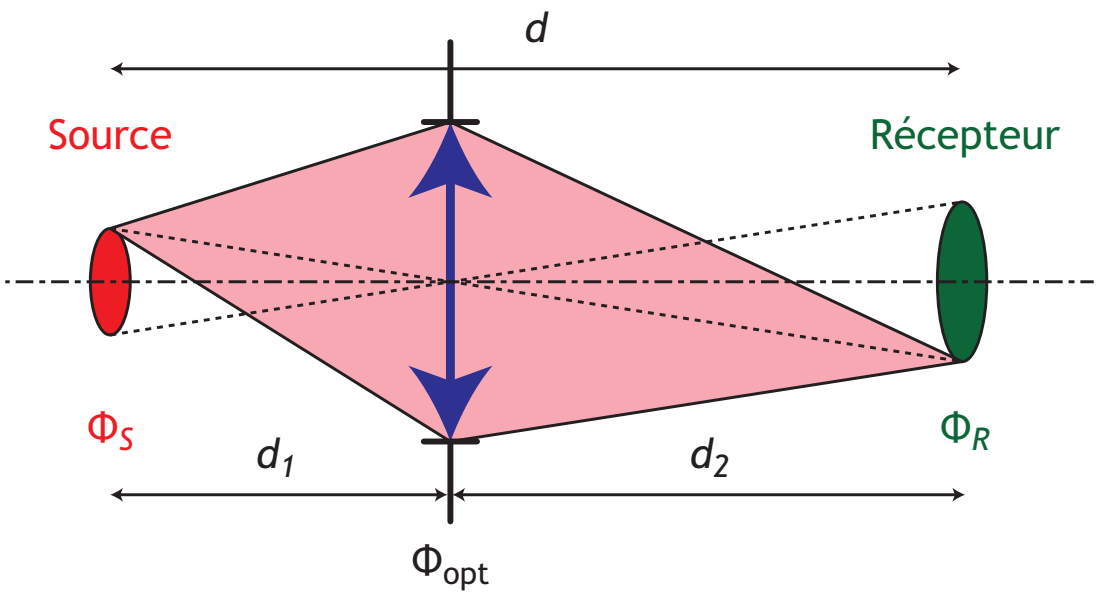


On souhaite capter un maximum de flux délivré par une source lambertienne ($L_S = 1$ W.m^2.sr^{-1}) de diamètre $\Phi_S = 1$ mm avec un détecteur de diamètre $\Phi_R = 2$ mm situé à une distance $d = 1$ m.
En l'absence de toute lentille, le flux reçu par le détecteur est :

$$F_{R_0} = L\, S_S \frac{S_R}{d^2} = L \frac{\pi \Phi_S^2}{4} \frac{\pi \Phi_R^2}{4} \frac{1}{d^2} = 2{,}46 \cdot 10^{-12}\ \text{W}$$

Transfert de flux par imagerie

Solution à 1 lentille



$$\frac{\Phi_S}{d_1} = \frac{\Phi_R}{d - d_1}$$

$$d_1 = \frac{\Phi_S}{\Phi_S + \Phi_R} d$$

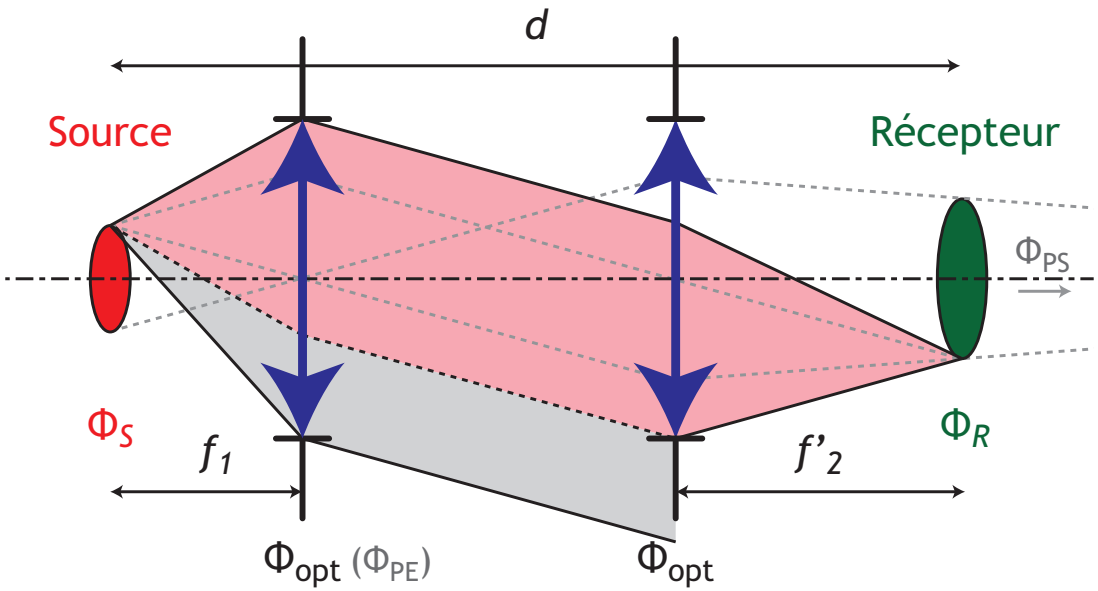
$$d_1 = 333 \text{ mm}$$

En intercalant une lentille simple avec la contrainte que le diamètre de la lentille n'excède pas une valeur $\Phi_{opt} = 15$ mm (on prend $\mathcal{T}_{opt} = 92\%$), le flux capté est maximal quand l'image de la source couvre exactement le détecteur :

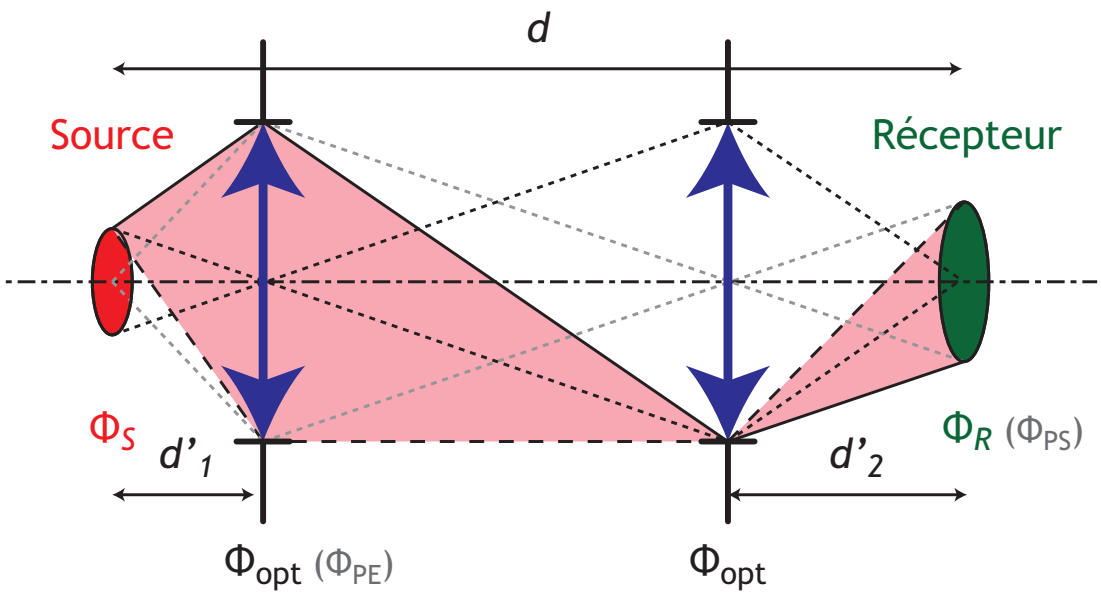
$$F_{R_1} = \mathcal{T}_{opt} L S_S \frac{S_{opt}}{{d_1}^2} = \mathcal{T}_{opt} L \frac{\pi \Phi_S^2}{4} \frac{\pi \Phi_{opt}^2}{4} \frac{1}{{d_1}^2} = 1{,}14 \cdot 10^{-9} \text{ W} \approx 463 \times F_{R_0}$$

Transfert de flux par imagerie

Solution à 2 lentilles



Avec deux lentilles en configuration {collimateur + collecteur} : la source est à nouveau imagée sur le détecteur avec un grandissement transversal $|g_y| = f'_2/f'_1$.
Cela entraîne forcément du vignettage : le cône de lumière issu d'un bord de la source devient un tube incliné d'un angle $\theta = \Phi_S/2f_1$. Une partie de la lumière incluse dans ce tube n'est pas interceptée par le collecteur donc pas captée par le récepteur.



$$\frac{\Phi_S}{d_1'} = \frac{\Phi_{\text{opt}}}{d-(d_1'+d_2')} \quad (\mathcal{L}_1)$$

$$\frac{\Phi_R}{d_2'} = \frac{\Phi_{\text{opt}}}{d-(d_1'+d_2')} \quad (\mathcal{L}_2)$$

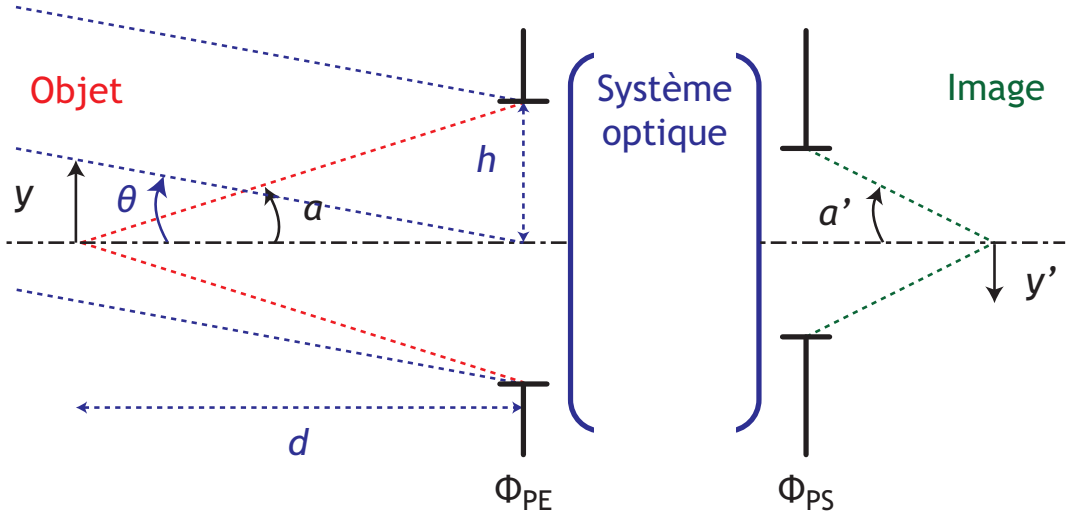
$$d_1' = \frac{\Phi_S}{\Phi_{\text{opt}}+\Phi_S+\Phi_R}\, d$$

$$d_1' = 55{,}6 \text{ mm}$$

Il faut conjuguer non pas source et détecteur, mais les différentes pupilles : la source est imagée sur $\mathcal{L}_1$ par $\mathcal{L}_2$, et $\mathcal{L}_1$ est imagée sur le détecteur par $\mathcal{L}_2$. Le cône de lumière issu d'un point du bord de la source est intégralement capté par le récepteur (pupille de sortie) :

$$F_{R_2} = (\mathcal{T}_{\text{opt}})^2\, L\, \frac{\pi\Phi_S^2}{4}\, \frac{\pi\Phi_{\text{opt}}^2}{4}\, \frac{1}{d_1'^2} = 3{,}80\cdot 10^{-8}\ \text{W} \approx 33\times F_{R_1} \approx 15280\times F_{R_0}$$

Facteur de concentration d'un collecteur de flux



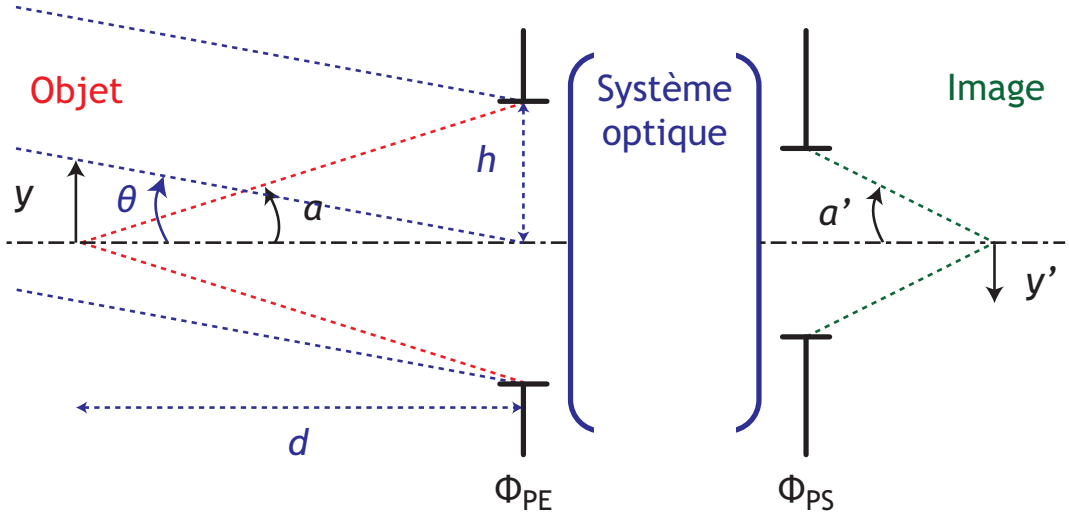
Définition

On définit le **facteur de concentration** comme le gain en éclairement dans un système collecteur de flux :

$$\rho = \frac{E_{\text{foyer}}}{E_{\text{sol}}} = \tau_{\text{opt}} \left(\frac{\Phi_{PE}}{\Phi_R} \right)^2$$

C'est le transfert optimal que l'on peut obtenir si tous les rayons entrant dans la pupille d'entrée du système (de diamètre Φ_{PE}) sont captés par le détecteur (de diamètre Φ_R).

Facteur de concentration d'un collecteur de flux



Optimisation du facteur de concentration

La relation des sinus d'Abbe contraint le facteur de concentration :

$$\theta \frac{\Phi_{PE}}{2} = \frac{\Phi_R}{2} \sin\alpha' \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{\Phi_{PE}}{\Phi_R}\right)^2 = \left(\frac{1}{\theta}\right)^2 \sin^2\alpha' \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{\tau_{opt}}{(\theta N)^2}$$

⚠ Le cas optimal où $\alpha' = \pi/2$ et $N = 1/2$ est peu compatible avec le réel dans un système aplanétique (incidence trop grande).

Concentrateurs solaires

$$\rho = \frac{\tau_{opt}}{(\theta N)^2}$$

Le Soleil est vu sous 0,5°. Si on suppose que le système n'a aucune perte et qu'il est ouvert à son maximum, soit N=1/2 alors le facteur de concentration maximale vaut environ 40000.

Four solaire d'Odeillo



Le four solaire l'été (source : wikipedia)

Le four solaire d'Odeillo, situé dans les Pyrénées, est une parabole de 40 mètres de diamètre et 18 mètres de rayon de courbure. Il concentre la lumière à son foyer et permet d'obtenir des températures très élevées (3500°) en quelques secondes. Son facteur de concentration est de 16000.
L'écart est lié au défaut de forme (la parabole est construite avec 9500 facettes courbées mécaniquement) et aux aberrations (une parabole n'est pas aplanétique).