Métrologie Optique et Instrumentation

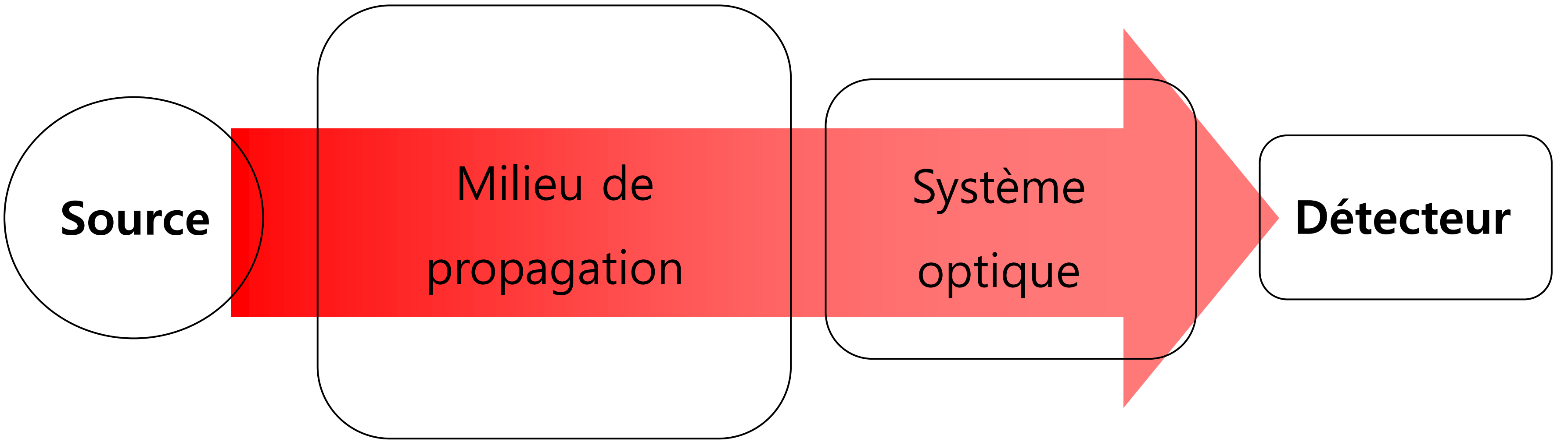
Session 1 : Qu'est-ce que la métrologie optique et quelles grandeurs nécessitent d'être mesurées ?

Photométrie

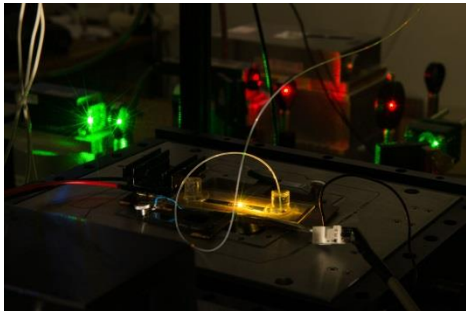
Julien Moreau, Institut d'Optique Graduate School, UPSaclay

Réseau Optique Photonique

La photométrie est une extension de l'optique géométrique qui cherche à quantifier la lumière depuis une source vers un détecteur



Grandeurs radiométriques



De (très) nombreuses grandeurs photométriques et géométriques pour caractériser des sources de lumière très diverses

Angle solide

Etendue

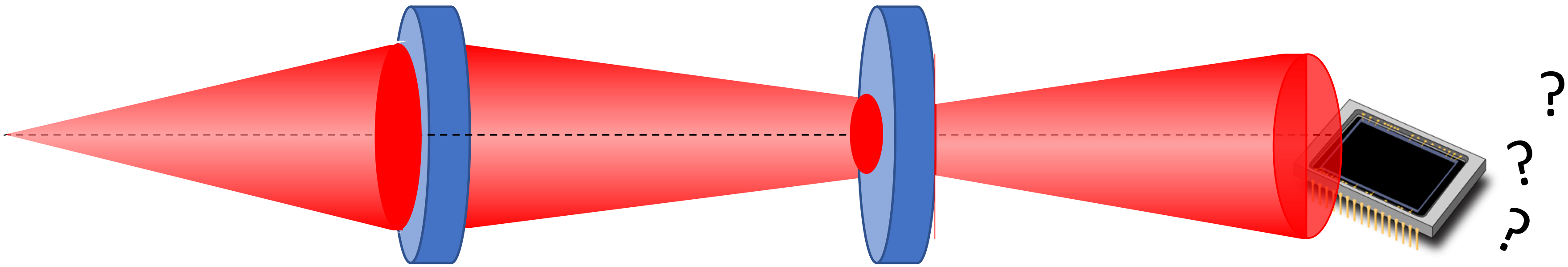
Luminance

Eclairement

Flux

Intensité

Quantifier la lumière



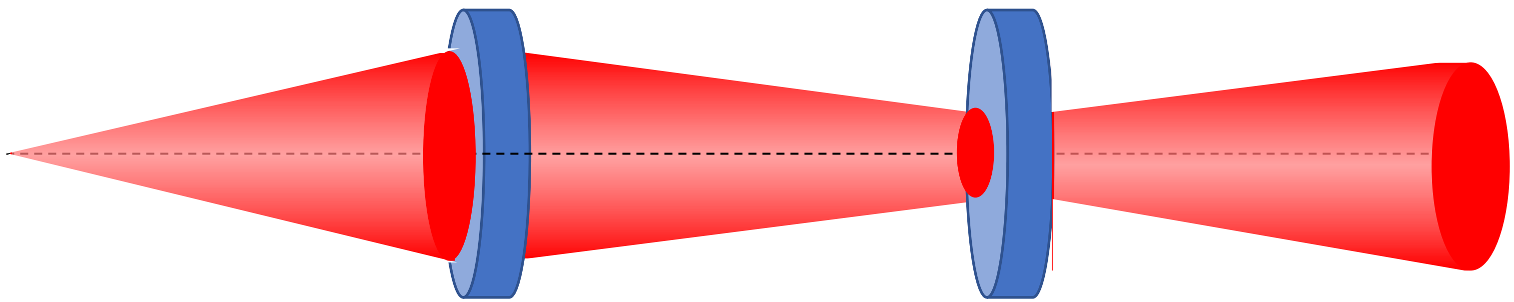
Pour connaitre (simplement) le flux reçu après un système optique, il est nécessaire de:

- **quantifier la quantité d'énergie** portée par ce faisceau
- **quantifier la géométrie** du faisceau au cours sa propagation
- Si possible, utiliser des **lois de conservation** pour ne pas avoir à faire de calcul!

Angle solide et étendue

Une façon simple de quantifier la géométrie d'un faisceau est d'utiliser son angle solide.

Mais l'angle solide a un inconvénient majeur : **il n'est pas conservé à la réfraction!**

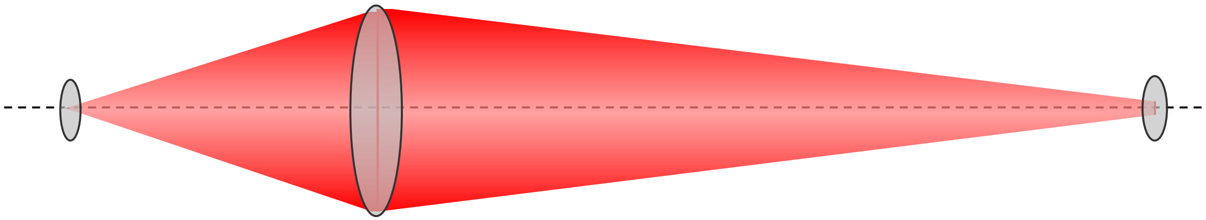


$$\Omega_1 \neq \Omega_2 \neq \Omega_3$$

→ On doit donc définir une autre quantité géométrique qui soit aussi caractéristique d'un faisceau lumineux et qui elle serait conservée lors de la propagation du faisceau

Construction de l'étendue

Peut on définir une quantité géométrique **G** qui caractérise complètement un faisceau de lumière et qui soit conservée lors de sa propagation ?



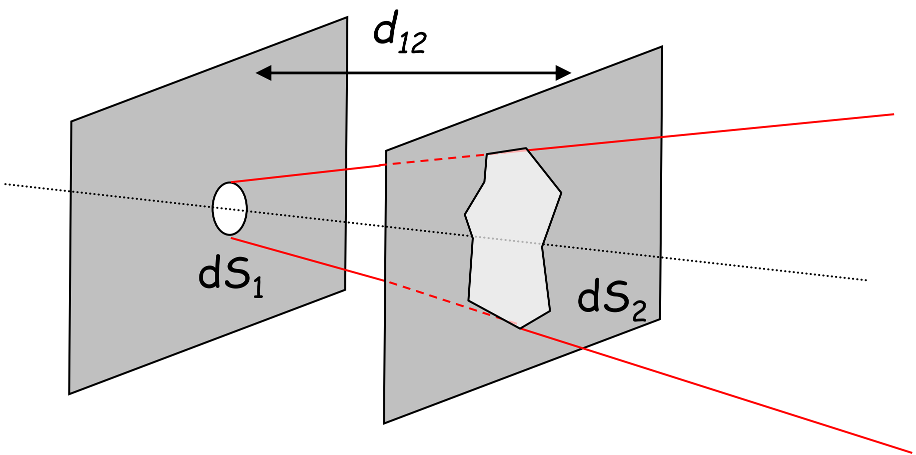
$$G_1 = G_2$$

Une première question est:

Combien de surface(s) et de distance(s) sont nécessaires pour définir un faisceau, dans le cadre de l'optique géométrique ?

Construction de l'étendue

→ Pour complètement caractériser un pinceau de lumière, il suffit de connaitre 2 surfaces perpendiculaires dS_1 et dS_2 et une distance d_{12} entre les deux surfaces:



Le pinceau de lumière est défini de façon unique.

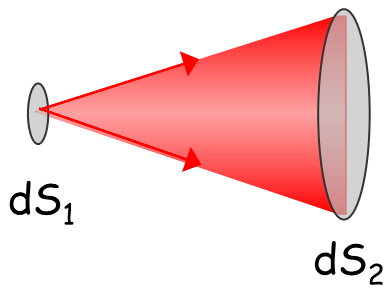
2 surfaces (dS_1 ,dS_2) et 1 distance d_{12} sont nécessaires et suffisantes. On peut donc définir de manière générale une quantité **d²G** tel que :

$$d^2G = dS_1{}^{\alpha} . dS_2{}^{\beta} . d_{12}{}^{\gamma}$$

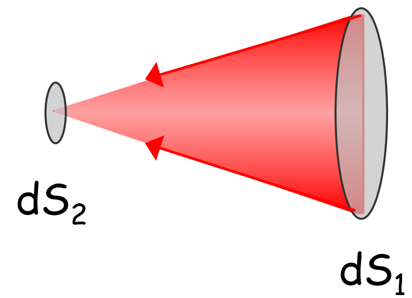
Construction de l'étendue

$$d^2G = dS_1{}^{\alpha}.dS_2{}^{\beta}.d_{12}{}^{\gamma}$$

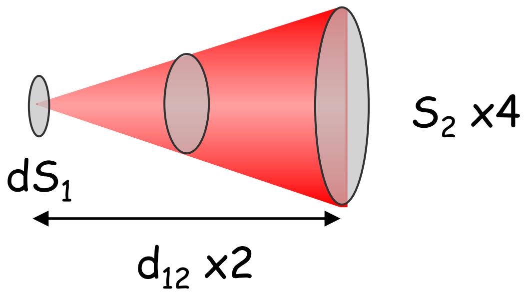
- Par symétrie (dS_1 et dS_2 joue le même rôle) on doit avoir : **β = α**



← pinceau identique ! →



- On remarque que l'on peut caractériser le même pinceau lumineux en utilisant une surface 2x plus loin mais 4x plus grande : **γ = -2α**

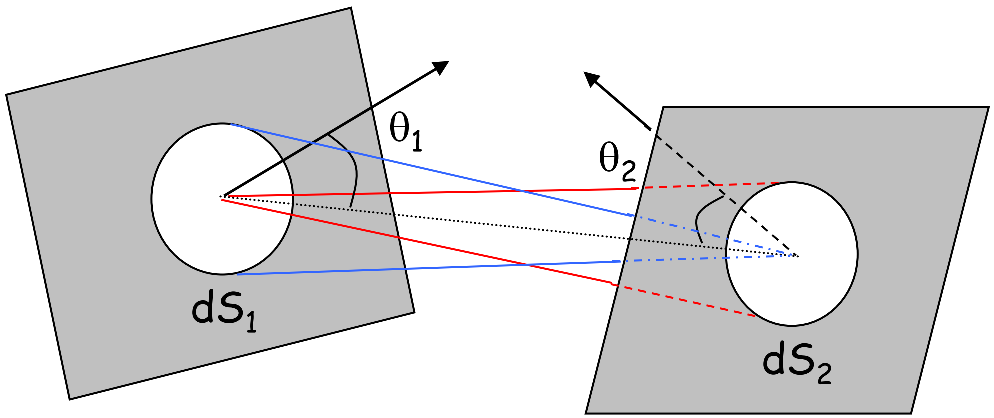


La quantité la plus simple est donc : $$d^2G = \left(\frac{dS_1.dS_2}{d_{12}{}^2}\right)^{\alpha}$$

Etendue optique: definition

Si on généralise le résultat précédent:

- à un milieu d'indice n quelconque : facteur n^2 (justifié plus loin!)
- des surfaces dS_1 et dS_2 non perpendiculaires à l'axe du pinceau de lumière. On doit alors considérer les surfaces projetées.



Finalement, on peut définir l'étendue d'un pinceau de lumière comme :

$$d^2G = n^2 \frac{dS_1 \cos(\theta_1).dS_2 \cos(\theta_2)}{d_{12}^2} = n^2 dS_1 \cos(\theta_1)\, d\Omega$$

Il existe quelques expressions/approximations macroscopiques de G qui permettent de l'utiliser sur des faisceaux réels

Etendue: expression macroscopique

2 surfaces coaxiales avec $S_1 << S_2$ et S_2 circulaire

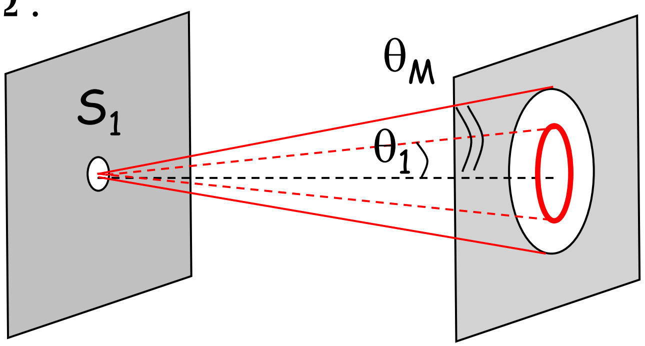
Exemple: photodiode en face d'une optique

On décompose la surface circulaire S_2 en anneaux élémentaires dont on connait une expression de l'angle solide dΩ :

$$d^2G = dS_1 \cos\theta_1 \, d\Omega$$

$$G = \iint dS_1 \cos\theta_1 \, d\Omega$$

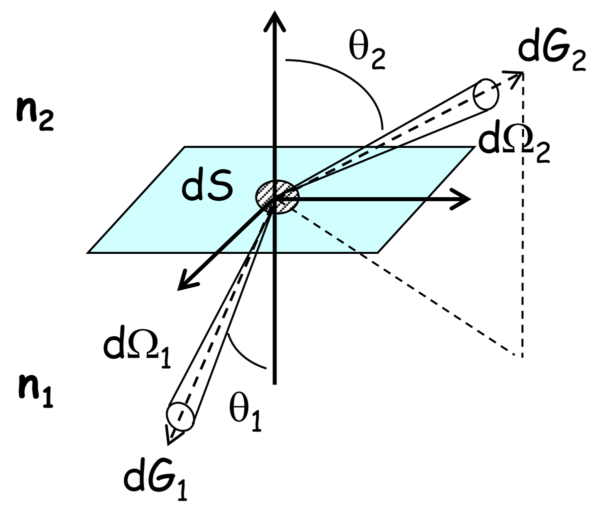
$$G = S_1 \int \cos\theta_1 . 2\pi \sin\theta_1 d\theta_1$$



$$G = \pi n^2 S_1 \sin^2(\theta_M)$$

Cette expression de l'étendue géométrique sera très utile dans les systèmes optiques.

Conservation de l'étendue



On considère une interface entre deux milieux d'indice n_1 et n_2 et un faisceau incident avec un angle θ_1. La lois de Descartes s'écrit:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

$$\rightarrow\ n_1 \cos(\theta_1)\, d\theta_1 = n_2 \cos(\theta_2)\, d\theta_2$$

On multiplie les deux précédentes équations:

$$n_1^2 \cos(\theta_1) \sin(\theta_1)\, d\theta_1 = n_2^2 \cos(\theta_2) \sin(\theta_2)\, d\theta_2$$

On multiplie par dS.dφ:

$$n_1^2 dS \cos(\theta_1)\, d\Omega_1 = n_2^2 dS \cos(\theta_2)\, d\Omega_2$$

On obtient donc: $\boxed{d^2G_1 = d^2G_2}$

Loi de conservation de G

Un système optique sans perte ne peut diminuer l'étendue d'un faisceau lumineux.

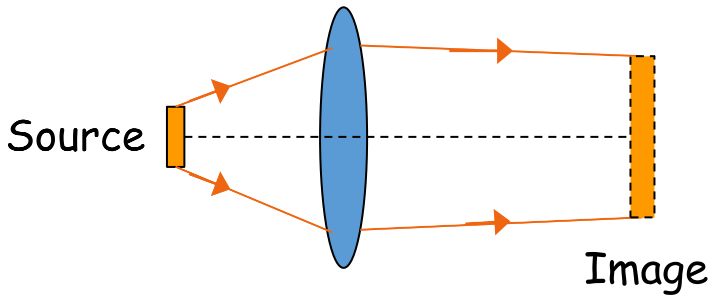
C'est la plus faible étendue d'un système s*ource – optiques – détecteur* qui va déterminer ces performances radiométriques.

Loi de conservation de G

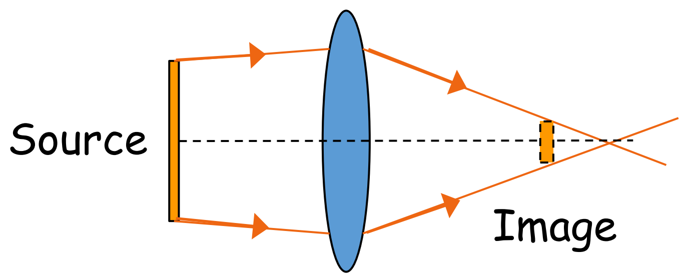
L'étendue géométrique d'un faisceau circulaire s'écrit: $G = \pi n^2 S_1 \sin^2(\theta)$

Quel est l'effet d'une optique ?

Surface x divergence = cst

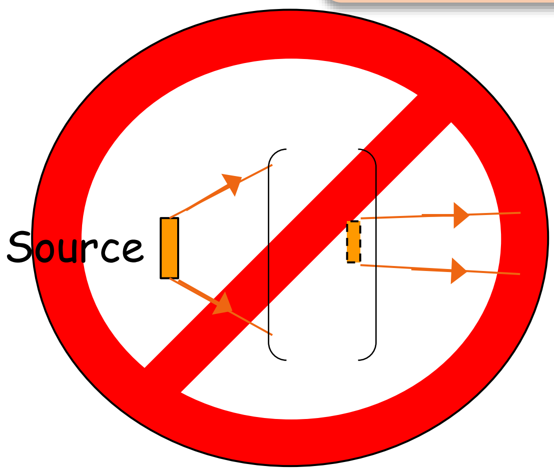


La divergence du faisceau a **diminué** mais la taille de l'image a **augmenté**
$\rightarrow$ G constant



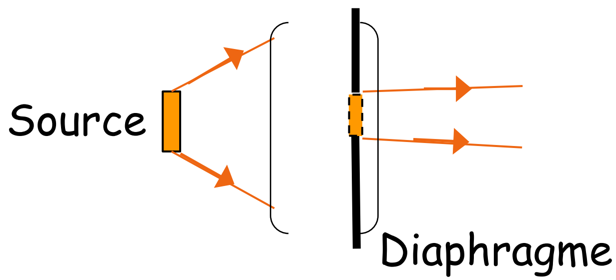
la taille de l'image a **diminué mais** la divergence du faisceau a **augmenté**
$\rightarrow$ G constant

Loi de conservation de G



La divergence **et** la taille de l'image ont **diminué tout en gardant le même flux**

→ Impossible !



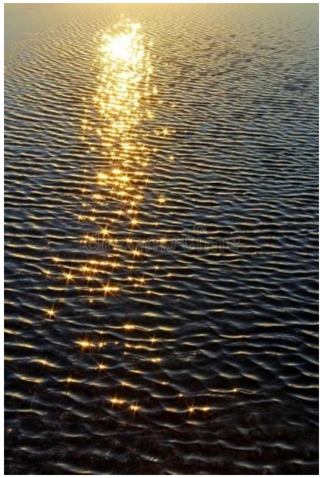
Avec un diaphragme, en **sacrifiant du flux**, il est possible de **réduire l'étendue géométrique**

Mathématiquement, l'étendue est l'équivalent optique de *l'entropie* en thermodynamique : un système physique doit fournir de l'énergie (ici, réduire le flux) pour réduire l'entropie.

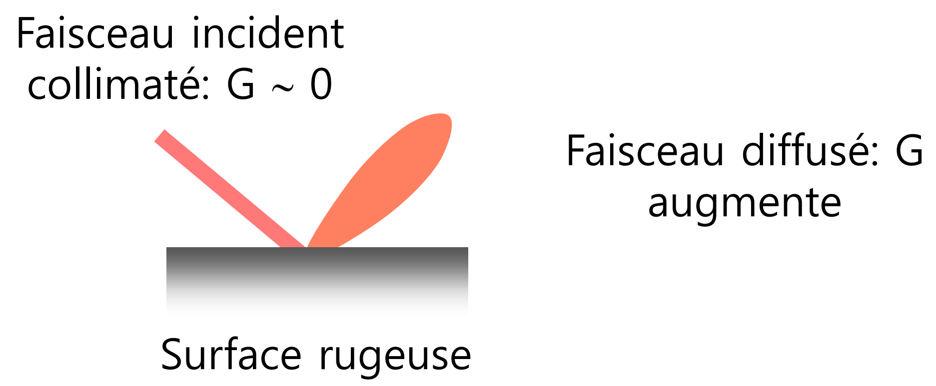
Etendue et diffusion

La diffusion de surface (rugosité) ou de volume va toujours augmenter l'étendue d'un faisceau.

L'étendue n'est donc pas conservée en présence de diffusion.

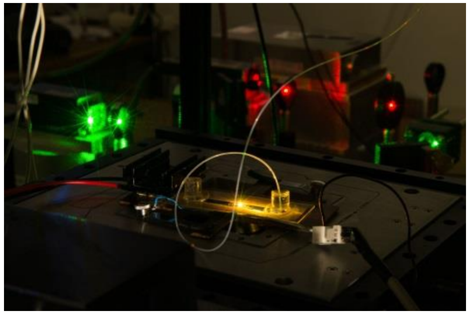


Réflexion de la lumière sur la surface de l'eau.



Cela n'est pas toujours un problème! Les optiques d'éclairage typiquement vont utiliser des surfaces diffusantes pour augmenter l'étendue afin d'obtenir un faisceau large et homogène.

Grandeurs radiométriques



De nombreuses grandeurs photométriques et géométriques pour caractériser des sources de lumière très diverses

Angle solide

Etendue

Luminance

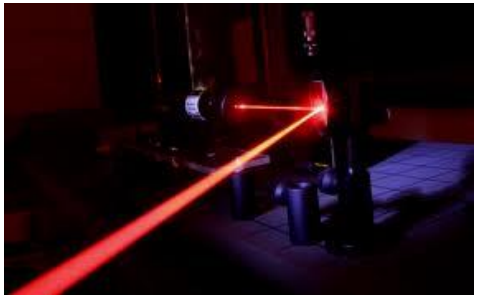
Eclairement

Flux

Intensité

Flux ou puissance

Un flux est une énergie par par seconde. Peut s'exprimer en Watt (W) ou en Lumen (lm, flux visuel)



Quelques valeurs typiques:

Pointeur laser: F_e = 1 mW

Lampe halogène: F_e = 10 à 100 W

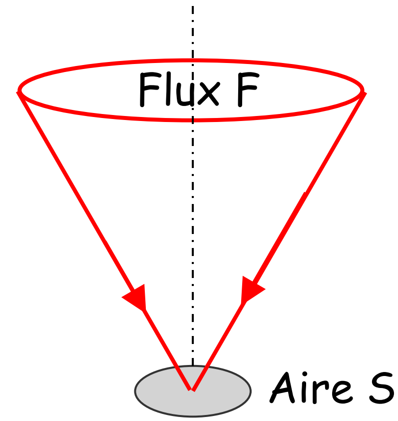
Le Soleil: $F_e = 4\ 10^{26}$ W

Cette quantité ne donne aucune information sur la distribution angulaire du rayonnement ou la géométrie de la source.

Eclairement

L'éclairement est une densité de flux reçu par unité de surface.

$$E(x,y) = \frac{dF(x,y)}{dS}$$



Quantité très utile et souvent plus pertinente que le flux (sur un détecteur, une source secondaire…).

Il s'exprime en $W.m^{-2}$ pour un éclairement énergétique et en lux ($lm.m^{-2}$) pour un éclairement visuel.

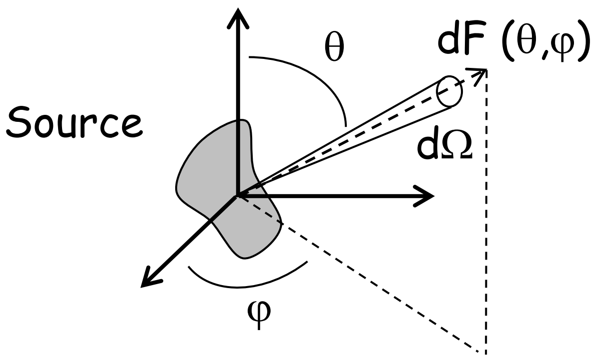
Eclairement

Quelques valeurs d'éclairement typiques:

	Eclairement (lux)	
Nuit noir avec nuages	< 0,01	Vision scotopique
Nuit de pleine lune	1	
Appartement bien éclairé	200 à 400	Vision photopique
Local de travail	200 à 3000	
Extérieur par ciel couvert	500 à 10 000	
Extérieur en plein soleil	50 000	

Intensité I

L'intensité d'une source est le flux émis par unité d'angle solide dans une direction d'observation donnée, exprimé en $W.sr^{-1}$ ou en Candela (cd)



$$I(\theta,\varphi) = \frac{dF(\theta,\varphi)}{d\Omega}$$

Sauf pour des cas particulier, l'intensité d'une source dépend en général de la direction d'observation.

Quelques ordres de grandeur :

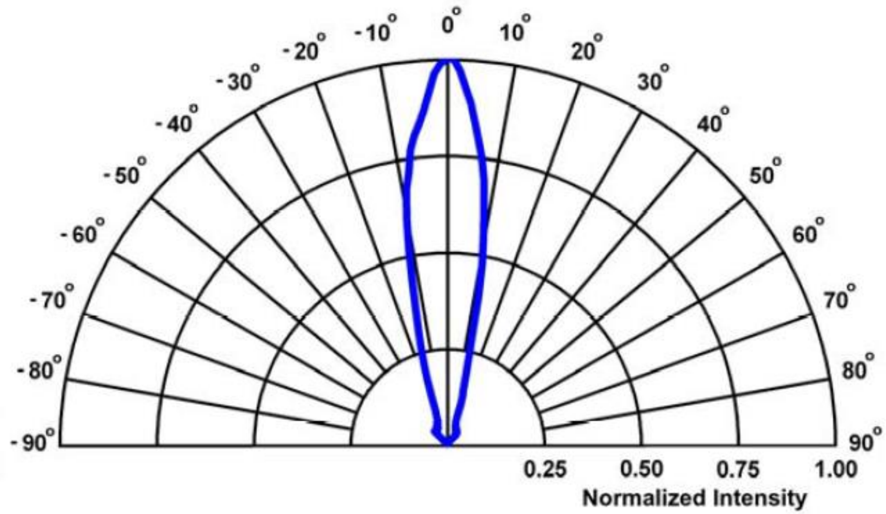
Pointeur laser rouge (1mW, divergence 1 mrad) : $I=F/\pi\alpha^2=1270\ W.sr^{-1}$

Lampe halogène (100W, tout l'espace) : $I=F/4\pi = 8\ W.sr^{-1}$

Soleil : $I=F/4\pi= 3.10^{25}\ W.sr^{-1}$

Intensité I

Le diagramme de variation de I en fonction de la direction d'observation est appelée <u>indicatrice</u> ou <u>diagramme de rayonnement</u>.



Angular diagram for a LED 635 nm (Thorlabs LED631E)

L'intensité est utile pour caractériser des sources quasi ponctuelles : laser, LED.

Mais ne donne aucune information sur la géométrie de la source: taille, distribution spatiale des émetteurs.

La candela

Historiquement, c'est l'intensité qui a été utilisée comme <u>unité de référence photométrique.</u> En pratique, des flammes obtenues grâce à des bougies calibrées servaient d'étalon photométrique.

Ces étalons ont commencés à avoir d'importantes applications industrielles avec l'apparition de l'éclairage public au 19ème siècle.

Lampe de Hefner (1884) permettant d'obtenir une flamme contrôlée

Platine en fusion. Adopté en 1889 comme nouvelle référence photométrique

En 1948, la conférence générale des poids et mesures définit la <u>candela</u> comme unité de mesure du système internationales d'unités.

Intensity

Il existe 7 unités de base dans le système international (SI)

• Longueur	Mètre
• Temps	Seconde
• Masse	Kilogramme
• Température	Kelvin
• Courant électrique	Ampère
• Quantité de matière	Mole
• **Intensité lumineuse**	**Candela**

Mais par abus de langage, très souvent « l'intensité » sera utilisée en physique pour désigner une puissance (en Watt) ou même un éclairement ($W.m^{-2}$) !

La candela

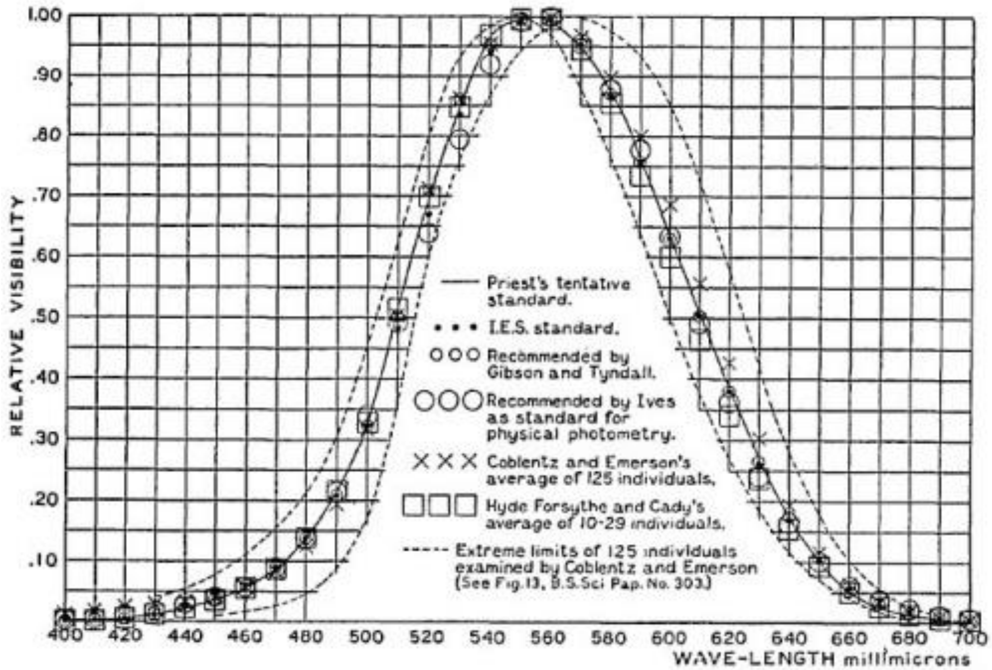
Depuis 2019, la définition de la candela est donnée par:

« La candela, symbole cd, est l'unité du SI d'intensité lumineuse dans une direction donnée. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×101^{2} *Hz,* K_{cd}*, égale à 683 lorsqu'elle est exprimée en lm* W^{-1}*. »*

Ce choix de 683, que l’on retrouve dans le maximum de la courbe d’efficacité lumineuse spectrale, a été fait pour une raison de cohérence avec les définitions et étalons précédents (depuis l’époque des bougies!).

Efficacité lumineuse V(λ)

Contrairement à presque toutes les autres définitions en physique qui essayent d'être indépendantes de l'observateur, cette loi, par nature, mélange physique et psychophysiologie humaine!



Un synthèse des différentes mesures de sensibilité ayant servis pour la définition de l'observateur standard 1924

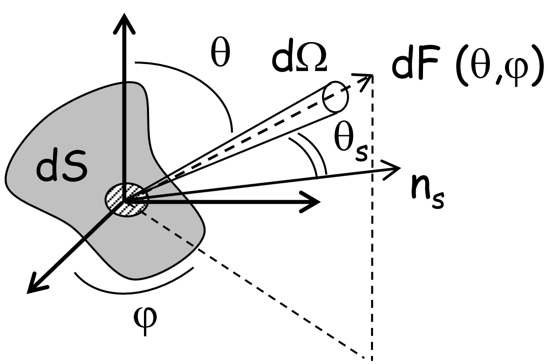
Il faut donc être conscient des nombreuses sources de variabilité : différences physiologiques entre individus et adaptation visuelle notamment (la vision intermédiaire, dite *mésoscopique*, n'est ainsi pas du tout traitée).

Luminance

On considère un élément de surface dA_s de la source émettant une intensité $dI(\theta,\varphi)$

La luminance de cet élément de surface, dans la direction (θ,φ) est définie par :

$$L(x,y,z,\theta,\varphi) = \frac{dI(\theta,\varphi)}{dS\cos(\theta_s)} = \frac{d^2F(\theta,\varphi)}{dS\cos(\theta_s)\,d\Omega}$$



$$\boxed{L(x,y,z,\theta,\phi) = n^2\frac{d^2F}{d^2G}}$$

L'unité de la luminance énergétique est le **W.m^{-2}.sr^{-1}**

L'unité de la luminance visuelle est le **cd.m^{-2}**

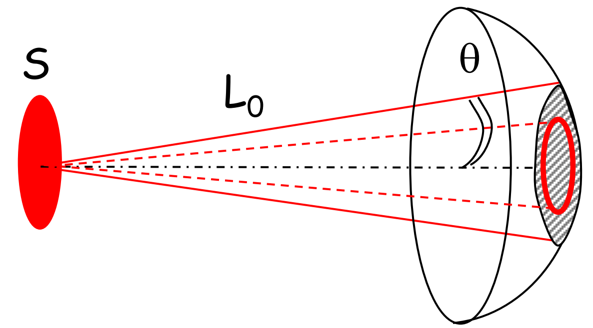
Source émettant un faisceau conique uniforme :

Pour une source de surface S émettant un faisceau conique de luminance uniforme L_0 (cas fréquemment rencontré) :

$$d^2F = L_0 d^2G$$

$$F_{tot} = L_0 \iint dS \cos(\theta_s)\, d\Omega$$

$$\boxed{L_0 = \frac{F_{tot}}{\pi.S.sin^2(\theta)}}$$



Example:

Lampe halogène (100W, supposée isotrope, filament de 2x5 mm) :

$L = 100/(\pi.2 10^{-3}.5 10^{-3}) = 3.2\ 10^6\ W.m^{-2}.sr^{-1}$

Source Lambertienne

Une source lambertienne à une luminance égale dans toutes les directions :

$L(\theta,\varphi)$ = constante

$$\boxed{L_{lambertian} = \frac{F_{tot}}{\pi . S}}$$

Un certain nombre de surfaces éclairées peuvent être modélisées par un rayonnement Lambertien. C'est le cas par exemple de surfaces rugueuses ou mates mais pas des surfaces lisses.

⚠ Une source lambertienne est différente d'une source dont l'intensité est la même dans toutes les directions !

Luminance

Quelques exemples typiques de sources et leurs luminances :

	Luminance (Cd/m^2)
Ciel de nuit noir	0,0004
Ciel bleu	5 000
Lampes économiques	10^4
Neige au soleil	10^4
LED de puissance	10^7
Disque Solaire	10^9

Une source lumineuse peut provoquer un éblouissement incommodant entre 3000 et 10 000 Cd/m^2.

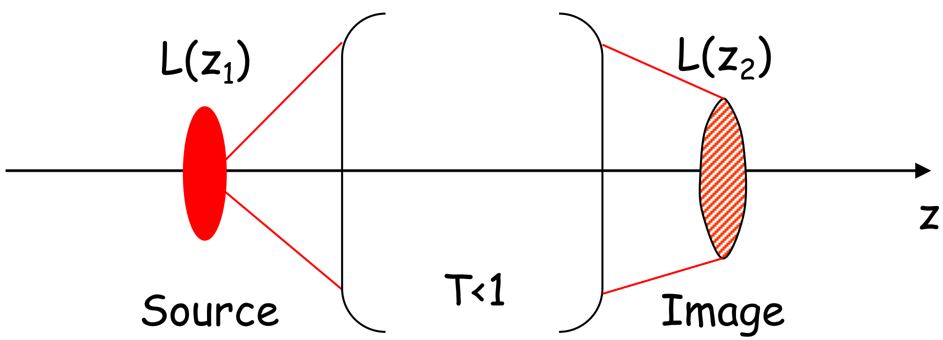
Au delà de 10^5 Cd/m^2, l'éblouissement devient neutralisant.

Conservation de G → conservation de la luminance

• En l'absence d'absorption ou de diffusion la luminance est conservée tout le long du trajet d'un faisceau lumineux.

En particulier, la luminance de l'image d'une source donnée par un système optique quelconque est au plus égale à celle de la source primaire.

• Dans le cas d'un milieu à pertes (absorbant mais non diffusant), on a simplement :

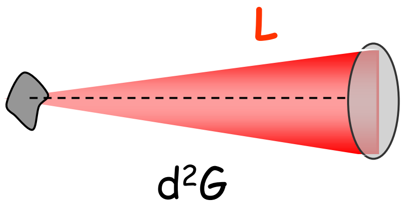


$$L(z_2) = T.L(z_1)$$

Relations fondamentales entre les grandeurs radiométriques:

Flux et luminance L:

$$d^2F = L.d^2G$$



Flux et intensité I:

$$dF = I.d\Omega$$

Si le faisceau est uniforme en luminance alors:

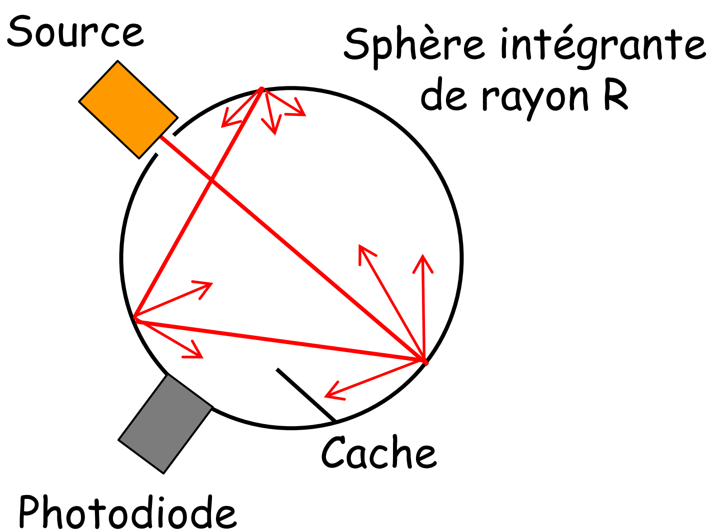
$$\boxed{F_{tot} = L_0.G = L_0\pi n^2 S.sin^2(\theta)}$$

Si le faisceau est uniforme en intensité alors:

$$\boxed{F_{tot} = I_0.\Omega \ = 2\pi.I_0(1 - \cos(\theta))}$$

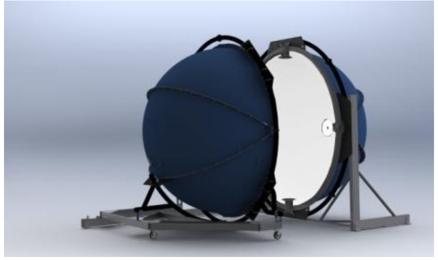
Sphère intégrante

Une sphère intégrante est une sphère creuse (diamètre de qq dizaines de cm à qq mètres) avec un revêtement très réfléchissant et diffusant sur une large bande spectrale (ρ~1). Permet une mesure du flux total émis par une source quelconque.



L'éclairement sur la photodiode est proportionnel au flux total émis par la source quelque soit son indicatrice.

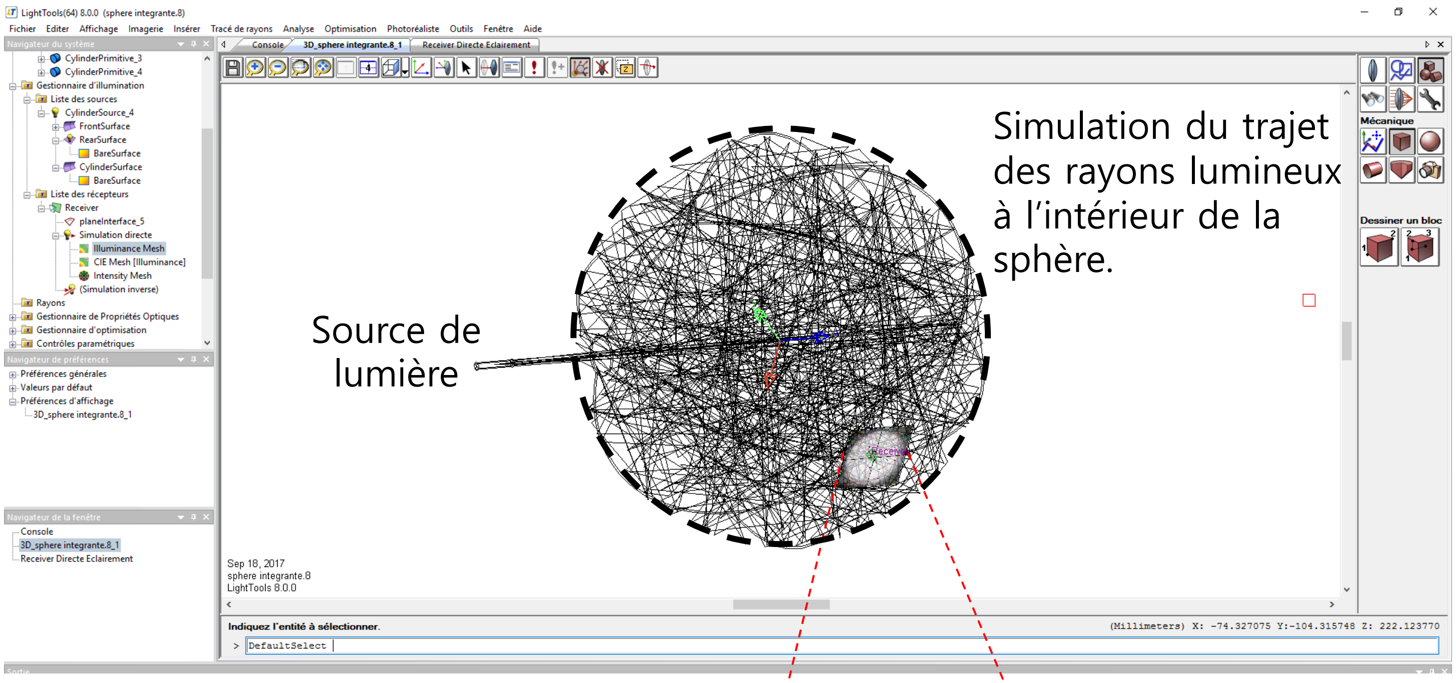
$$E = \frac{F_{tot}}{4\pi R^2}\frac{\rho}{1-\rho}$$

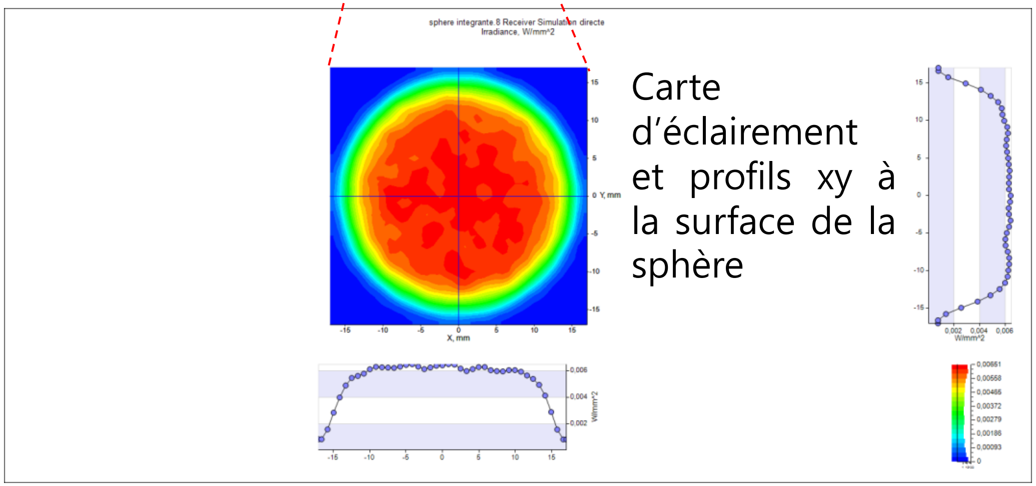


Sphère Intégrante de chez LabSphere©

Sphère intégrante

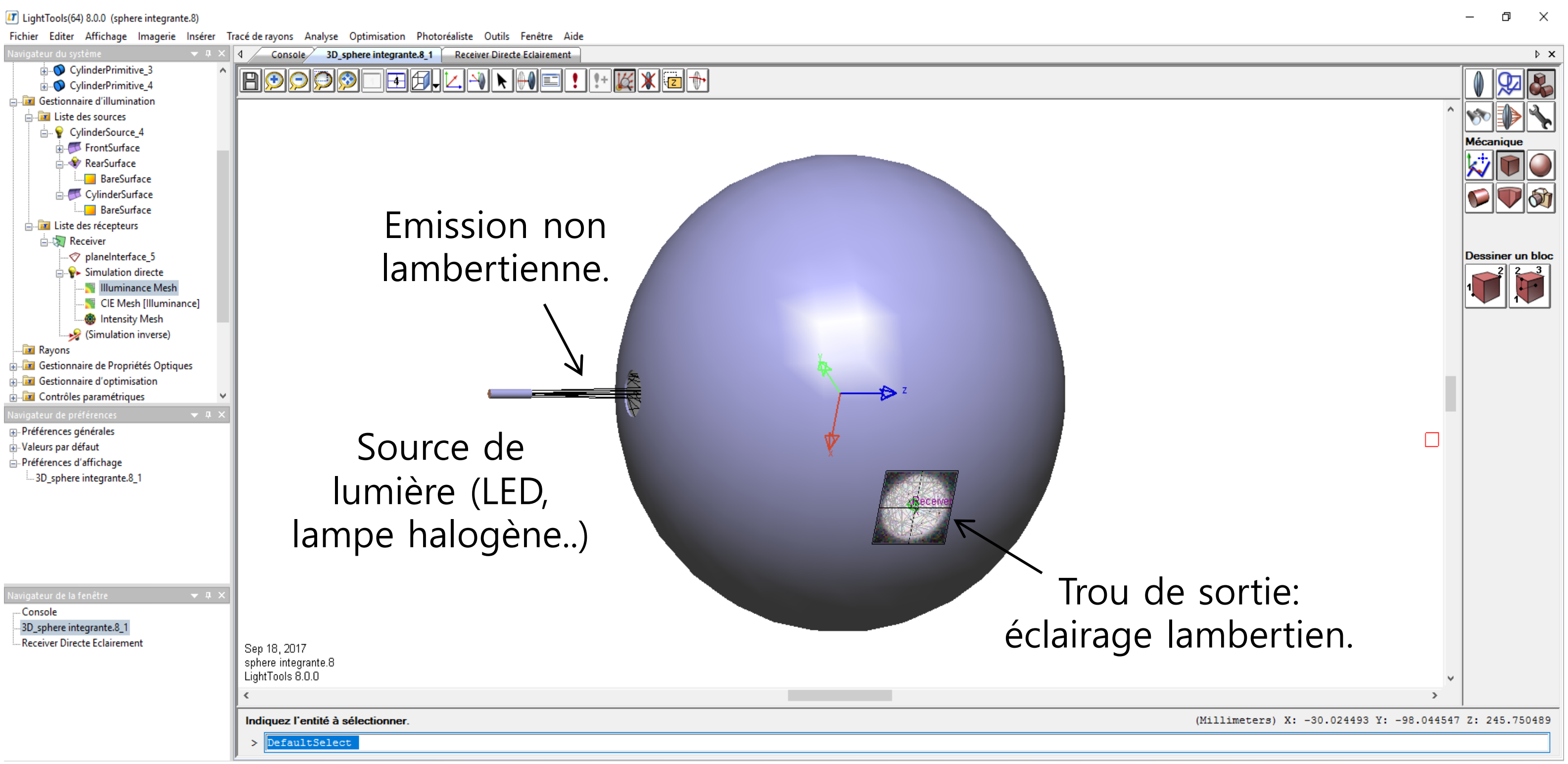
Simulation sous le logiciel de tracé de rayons: *Lighttools*





Sphère intégrante

Une autre application de la sphère intégrante est de pouvoir générer un éclairage lambertien à partir de n'importe quelle source de lumière. Il suffit simplement d'utiliser la lumière sortant par un petit trou à la surface de la sphère. Très utile pour calibrer des systèmes optiques ou des détecteurs.



Métrologie Optique et Instrumentation

Session 1 : Qu'est-ce que la métrologie optique et quelles grandeurs nécessitent d'être mesurées ?

Photométrie

Julien Moreau, Institut d'Optique Graduate School, UPSaclay

Réseau Optique Photonique