

# Radiométrie Photométrie Colorimétrie

Xavier Granier <[xavier.granier@institutoptique.fr](mailto:xavier.granier@institutoptique.fr)>

Julien Moreau <[julien.moreau@institutoptique.fr](mailto:julien.moreau@institutoptique.fr)>

Romain Pacanowski <[romain.pacanowski@institutoptique.fr](mailto:romain.pacanowski@institutoptique.fr)>

# Bibliographie pour ce cours

## Livres en Français

«*Bases de radiométrie optique* »  
(J.L. Meyzonnette, T. Lépine, édition Cépaduès)

## Livres en Anglais

«*Introduction to Radiometry and Photometry* »  
(R. McCluney, Optoelectronics library)  
«*Radiometry and the detection of optical radiation* »  
( R.W. Boyd, Wiley editor)

«*Color Imaging: Fundamentals and applications*»  
(E. Rheinard, E. A. Khan, A. O. Akyuz, G. M. Johnson, AK Peters)  
«*High-dynamic Range Imaging:*  »  
(E. Rheinard, , Morgan Kaufmann)

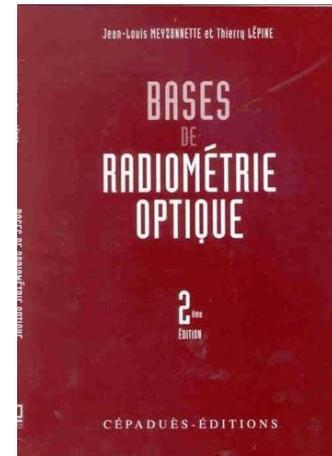
# EBook

La médiathèque de l'Institut propose l'accès à un certain nombre de ebooks

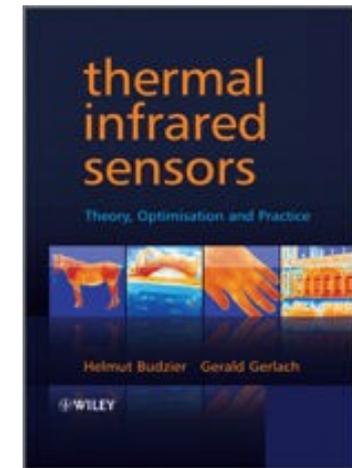
<https://www.dawsonera.com> (login/mot de passe identique au wifi)



Possibilité de lire en ligne ou de télécharger pendant une durée limitée (quelques jours) le catalogue des ebooks de l'Institut.



**Bases de radiométrie optique**  
Jean-Louis Meyzonnette & Thierry Lépine



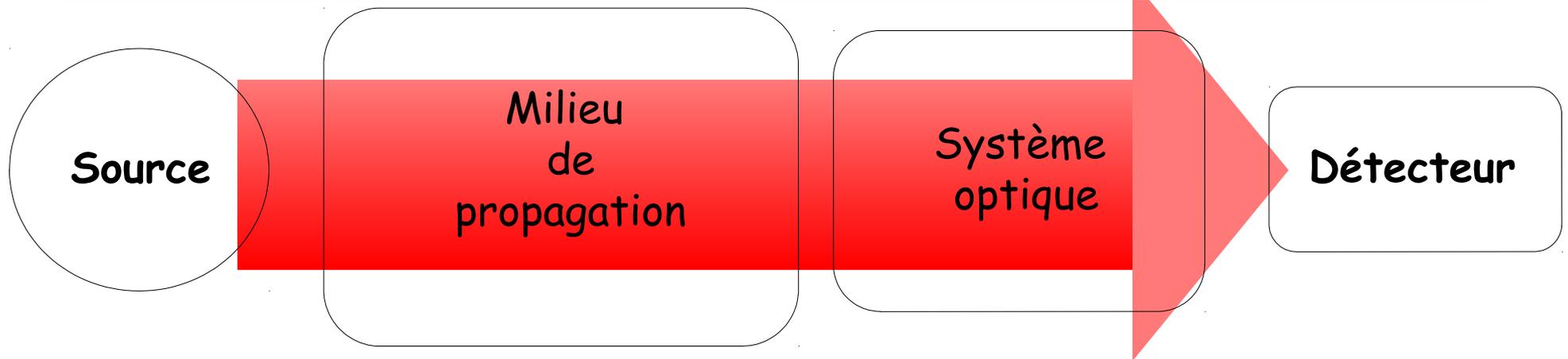
**Thermal infrared sensors**  
Helmut Budzier And Gerald Gerlach.

# Radiométrie : Objectifs

Comprendre et modéliser

la propagation de la lumière sur l'ensemble d'un système,  
depuis la source jusqu'au détecteur

Permet de répondre à la question (simple) : *quelle quantité de lumière ?*



La radiométrie permet aussi de :

- *Dimensionner un système optique*
- *Modéliser le milieu de propagation*
- *Prédire le signal sur le détecteur*
- *Évaluer le bruit de fond dans une mesure...*

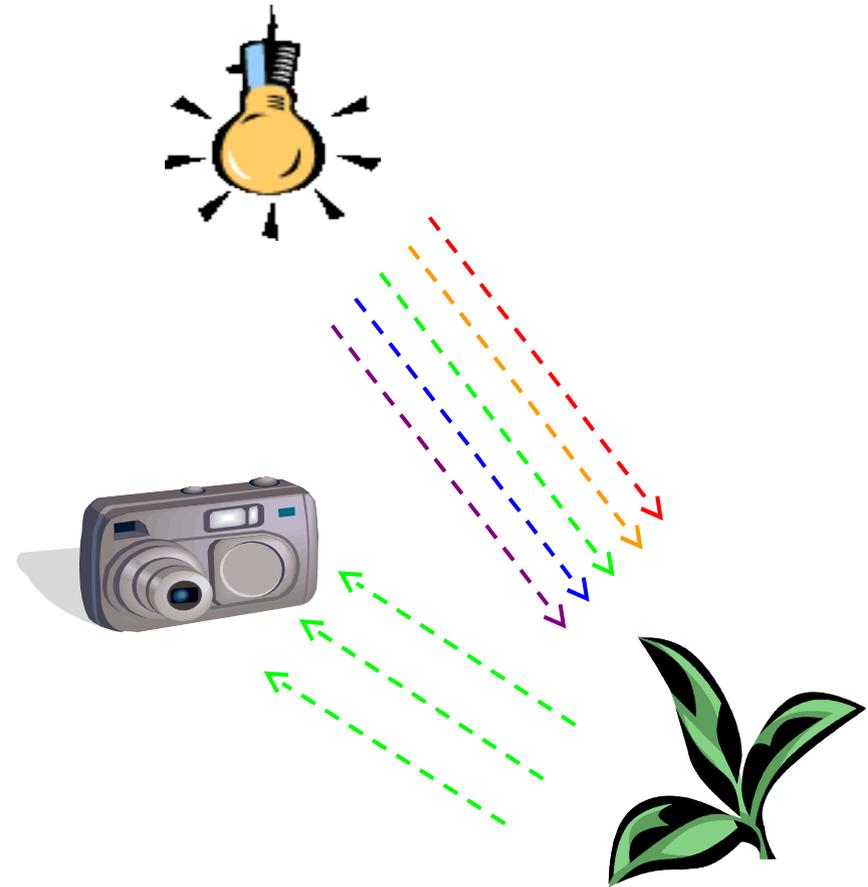
# Colorimétrie / photométrie : objectifs

Comprendre ce que l'on mesure sur un détecteur et le caractériser

Caractériser les propriétés de surfaces, de volume

La colorimétrie permet aussi de :

- *Comparer les différents détecteurs*
- *Calibrer ces détecteurs*
- *Identifier des éléments*



# Applications

## Grand public

Cinéma, Photographie, Télévision



## Biomédical

Instrumentation Optique, Imagerie médicale



## Industrielle

Photovoltaïque, Éclairage, Visualisation, Surveillance, Contrôles non destructifs



## Spatial

Observation planétaire ou spatiale, conception de satellites.



## Défense

Identification, Navigation, Pilotage



# Plans du cours

---

## 1. Caractérisation d'un rayonnement

1. **Grandeurs géométriques et radiométriques**
2. Cas des systèmes optiques

## 2. Sources lumineuses

1. Le Corps noir : modèle et propriétés
2. Autres sources de lumière

## 3. Colorimétrie

1. **Grandeurs photométriques et espaces de couleurs**
2. **Mesure, Restitution, Calibration des couleurs**

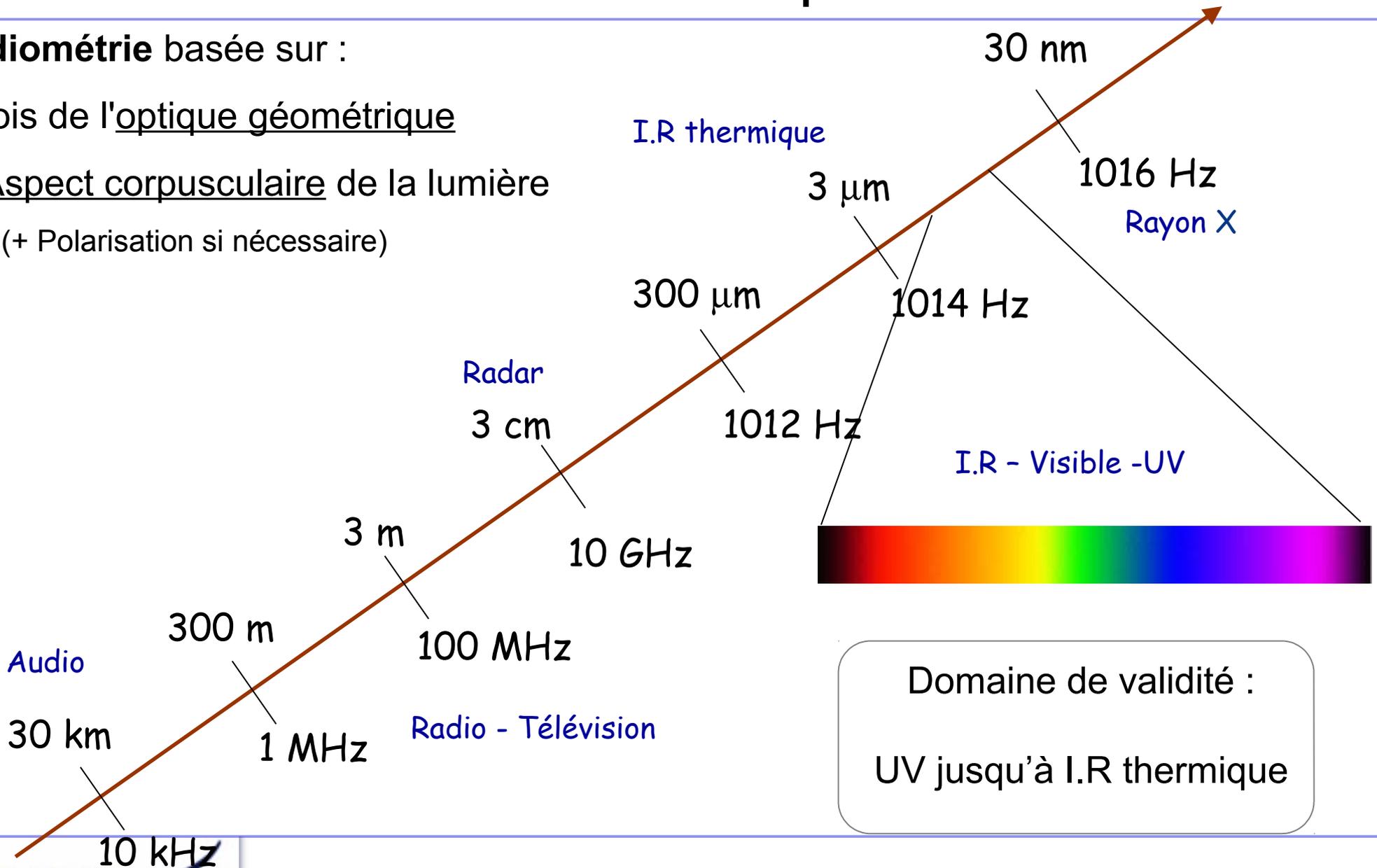
## 4. De la source au détecteur

1. Propriétés de réflexions

# Radiométrie et spectre

**Radiométrie** basée sur :

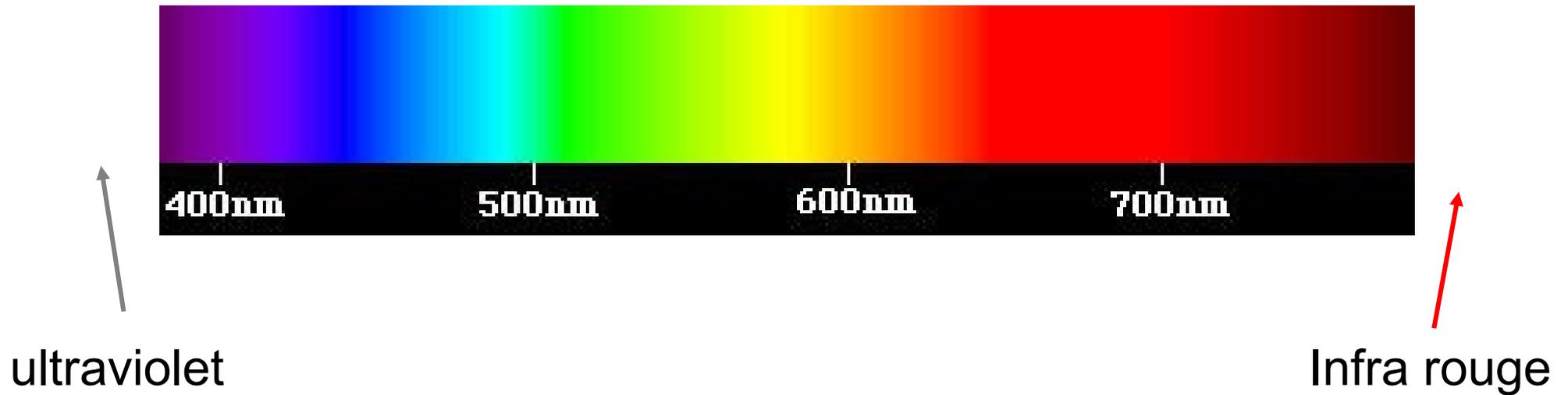
- Lois de l'optique géométrique
- Aspect corpusculaire de la lumière  
(+ Polarisation si nécessaire)



Domaine de validité :  
UV jusqu'à I.R thermique

# Spectre visible

Le domaine du visible :  $380 \leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$



# Grandeurs



Quelles grandeurs photométriques et géométrique pour définir des sources de lumière aussi diverses ?

Angle solide

Luminance

Flux

Intensité

Étendue géométrique

# Énergie des photons

- Lumière monochromatique

$$\text{Énergie d'un photon : } e_{\lambda} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$\text{Constante de Planck : } h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$\text{Vitesse de la lumière : } c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

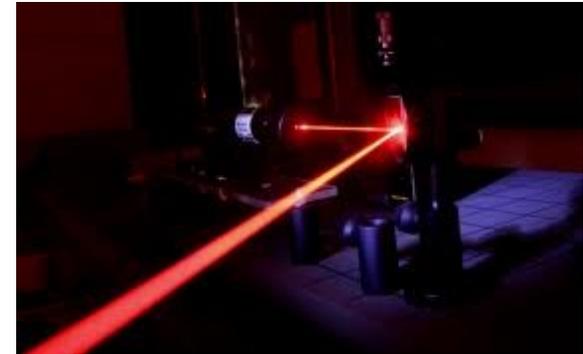
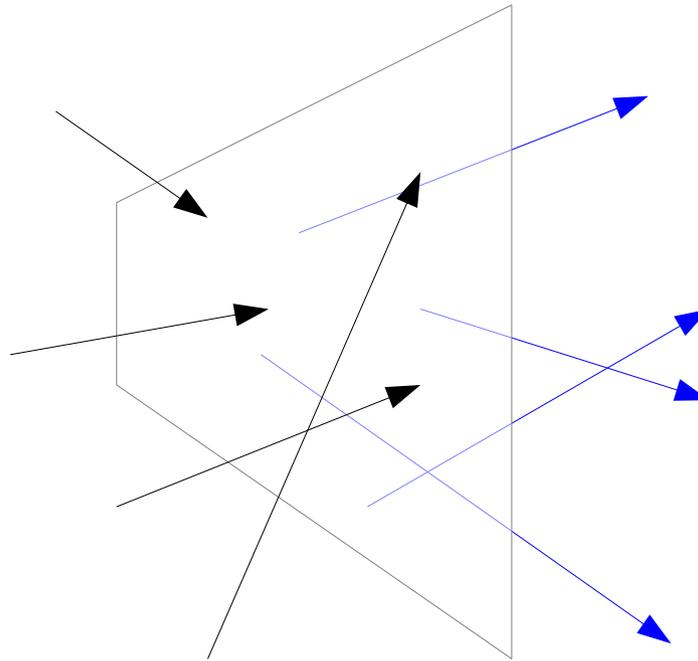
$\lambda$  : longueur d'onde (m)

- Propagation de la lumière
  - Un photon est absorbé par un matériau
  - Son énergie est réémise à une longueur d'onde donnée
- Énergie totale reçue ou émise en Joule (J) : notée Q

# Flux énergétique / Puissance

Un **Flux énergétique** ou une **Puissance** est une quantité d'énergie par unité de temps, exprimé en Watt :  $W = J.s^{-1}$

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t}$$



# Flux / Puissance

## Flux photonique:

Pour un rayonnement monochromatique, un flux photonique est un nombre de photons par unité de temps

$$F_{ph} = F_e / \frac{hc}{\lambda}$$

## Quelques ordres de grandeur :

- Pointeur laser rouge :  $F_e = 1 \text{ mW}$
- Lampe halogène :  $F_e = 20\text{-}100 \text{ W}$
- Soleil :  $F_e = 4E^{26} \text{ W}$

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

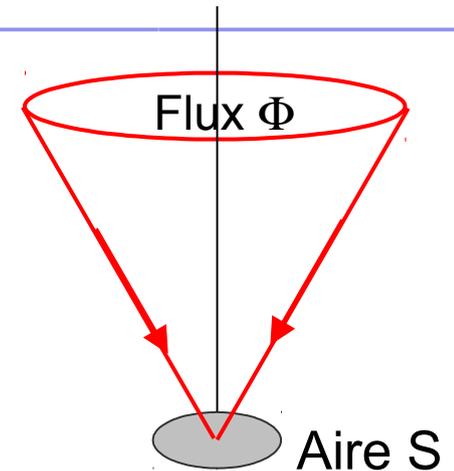
# Éclairement énergétique

## Eclairement :

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

$$E = \frac{\partial \Phi}{\partial S}$$

- Quantité très utile et souvent plus pertinente que le flux (sur un détecteur, une source secondaire... ).
- Il s'exprime en W.m<sup>-2</sup>



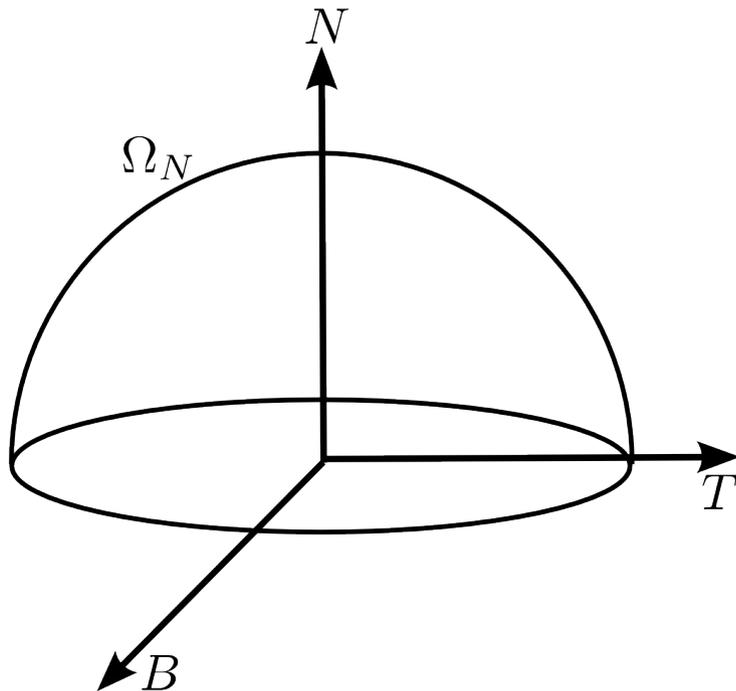
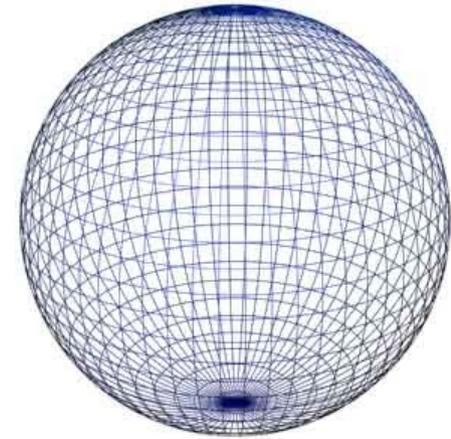
## Exitance :

- L'exitance est une densité de flux émis par unité de surface.

$$M = \frac{\partial \Phi}{\partial S}$$

# Espaces de directions : paramétrisation

Sphère unité :  $S^2$



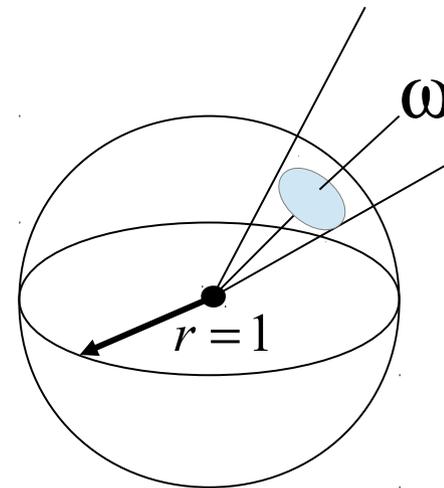
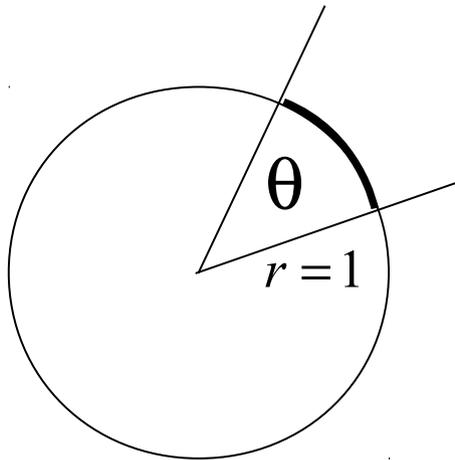
*Hémisphère* :  $\Omega_N$

# Angle solide

- Extension en 3D d'un angle en 2D
- Pinceau de directions
- Stéradian : sr

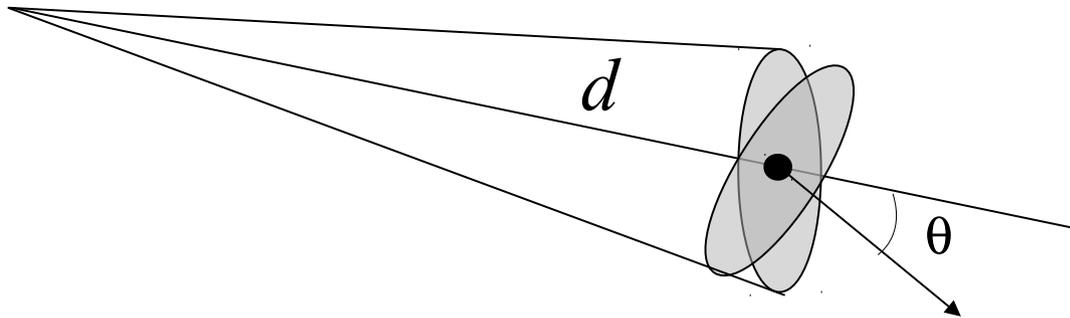
- Généralisation

l'angle solide sustenté par une surface en P est l'aire de cette surface projetée sur la sphère unité centrée en P.



# Angle solide : formulation

- Unité : stéradian (sr)
- L'angle solide est noté  $\Omega$
- Pour une surface infinitésimale  $dA$  située à une distance  $d$  et orientée de  $\theta$  depuis la direction  $\omega$ , l'angle solide est :



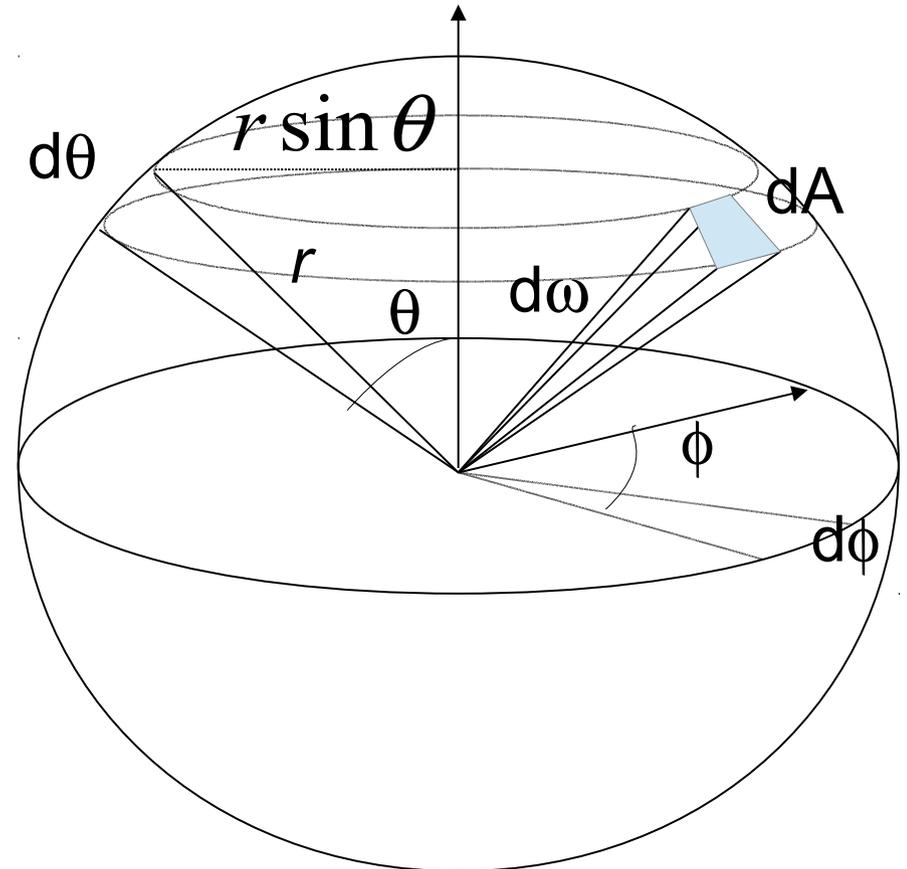
$$d\Omega = \frac{dA \cos \theta}{d^2}$$

# Angle solide différentiel

- Élément d'intégration = intégrand des intégrales sphériques ou hémisphériques.

$$dA = (r d\theta)(r \sin \theta d\phi)$$

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi$$



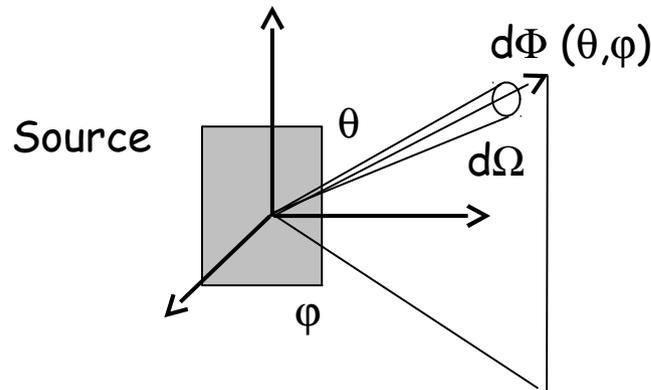
# Exemple d'intégration : sphère unité

$$\begin{aligned} \text{Aire} &= \int_{\Omega} d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} d\varphi \sin \theta d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi [-\cos \theta]_0^{\pi} \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi \cdot 2 \\ &= 4 \cdot \pi \end{aligned}$$

# Intensité énergétique

## Intensité :

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



$$I(\theta, \varphi) = \frac{\partial \Phi(\theta, \varphi)}{\partial \Omega}$$

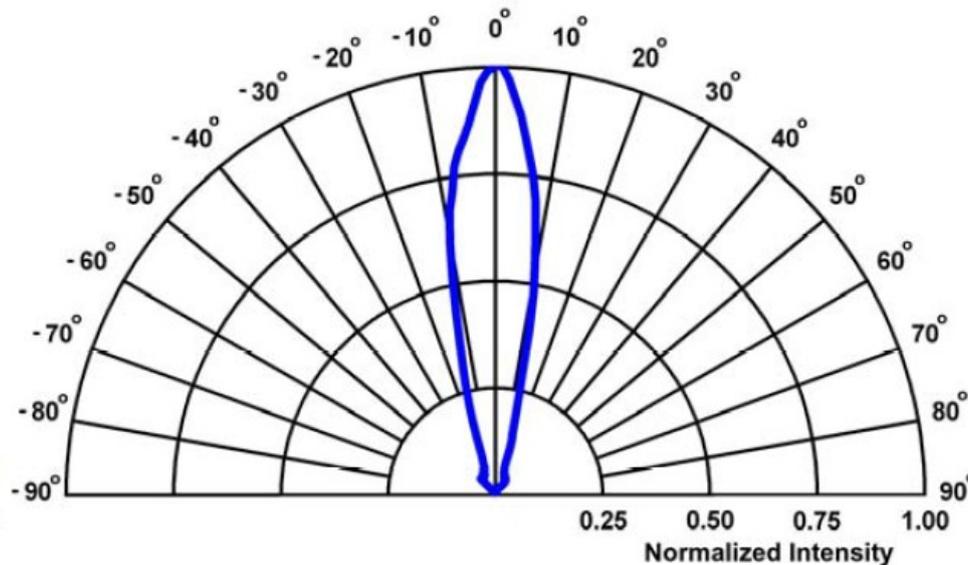
Sauf pour des cas particulier (étoiles, sources Lambertiennes), l'intensité d'une source dépend en général de la direction d'observation.

## Quelques ordres de grandeur :

- Pointeur laser rouge (1mW, divergence 1 mrad) :  $I = 1270 \text{ W.sr}^{-1}$
- Lampe halogène (100W, demi-espace) :  $I = 16 \text{ W.sr}^{-1}$
- Soleil :  $I = 3,2\text{E}^{25} \text{ W.sr}^{-1}$

# Intensité

- Le diagramme de variation de  $I$  en fonction de la direction d'observation est appelée **indicatrice** ou **diagramme de rayonnement**.



Indicatrice d'une LED 635 nm  
(Thorlabs LED631E)

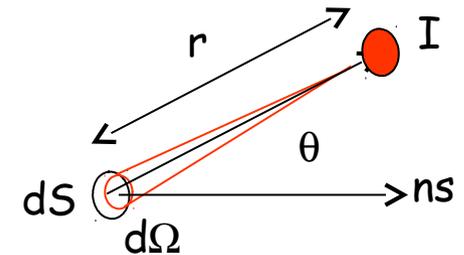
- L'intensité
  - est utile pour des sources quasi ponctuelles vu du détecteur
  - Ne donne aucune information sur la géométrie de la source : taille, distribution spatiale des émetteurs.

**Loi de Bouguer et décroissance en 1/r<sup>2</sup>:**

Pour une source d'intensité  $I$ , éclairant une surface  $dS$  :

$$dF = I \cdot d\Omega = I \cdot \frac{dS \cos \theta}{r^2}$$

L'éclairement de cette surface est donc :



$$E = I \cdot \frac{\cos \theta}{r^2}$$

→ Eclairement maximal pour une surface perpendiculaire à la source et nulle pour une source à 90°

**Pierre Bouguer (1698-1758)**, Mathématicien et physicien français. Auteur des premières mesures quantitatives en photométrie. Auteur de la loi de Beer-Lambert, de la loi de variation d'intensité avec l'inclinaison, d'une mesure du seuil différentiel de détection de l'œil humain et de l'anomalie de Bouguer en gravimétrie. Elu à l'Académie de Science et à la Royal Society.

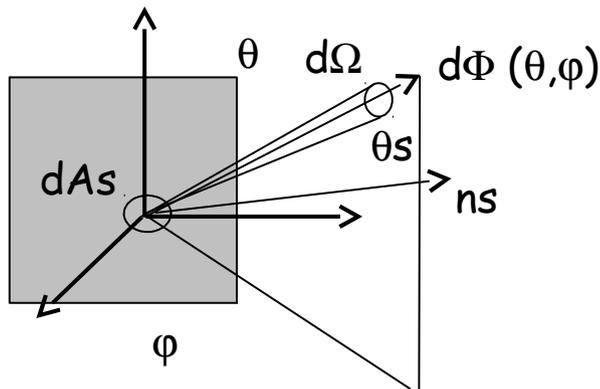


# Luminance énergétique

## Luminance :

- 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  $(\theta, \varphi)$  est définie par :

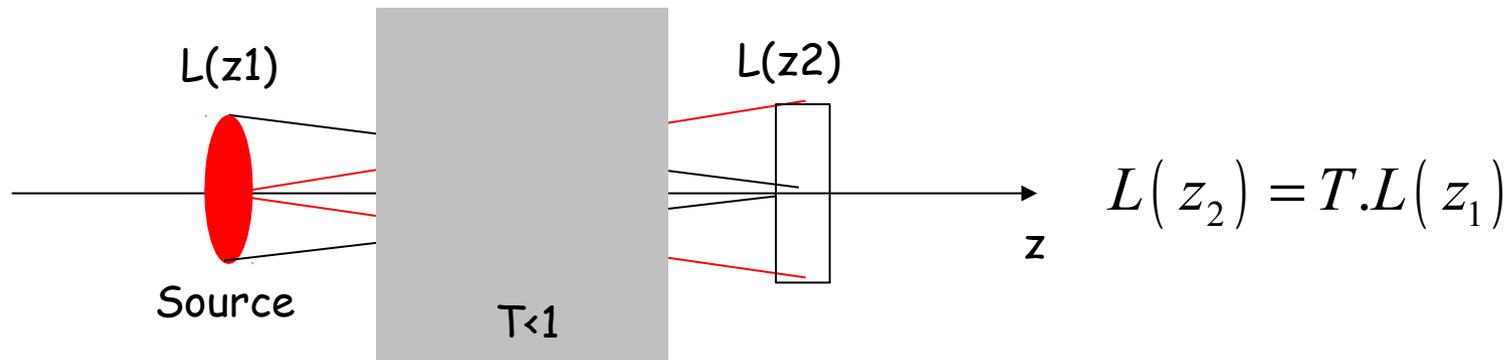
$$L(x, y, z, \theta, \varphi) = \frac{\partial I(\theta, \varphi)}{\partial A_s \cos \theta_s} = \frac{\partial^2 \Phi(\theta, \varphi)}{\partial A_s \cos \theta_s \partial \Omega}$$



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

# Conservation de la luminance

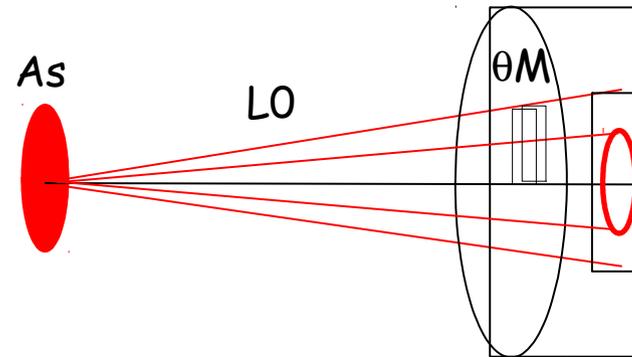
- En l'absence d'absorption ou de diffusion **la luminance est conservée** tout le long du trajet d'un faisceau lumineux (rayon lumineux).
- En particulier, la luminance de l'image d'une source donnée par un système optique quelconque est au plus égale à celle de la source primaire.
- Dans le cas d'un milieu à pertes (transmission:  $T < 1$ ), on a simplement :



# Luminance

## Source émettant un faisceau conique uniforme :

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



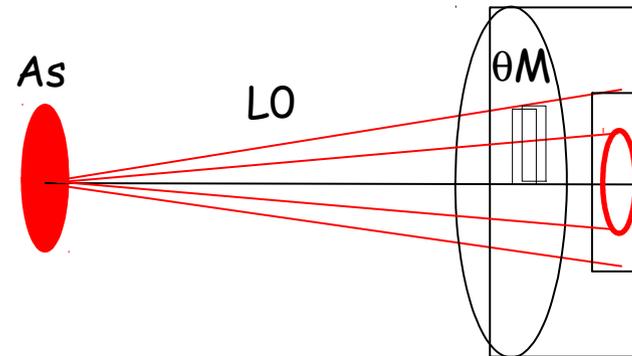
# Luminance

## Source émettant un faisceau conique uniforme :

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

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

$$L_0 = \frac{F_{tot}}{\pi \cdot A_s \cdot \sin^2(\theta_M)}$$



# Source lambertienne

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

$$L(\theta, \varphi) = \text{constante}$$

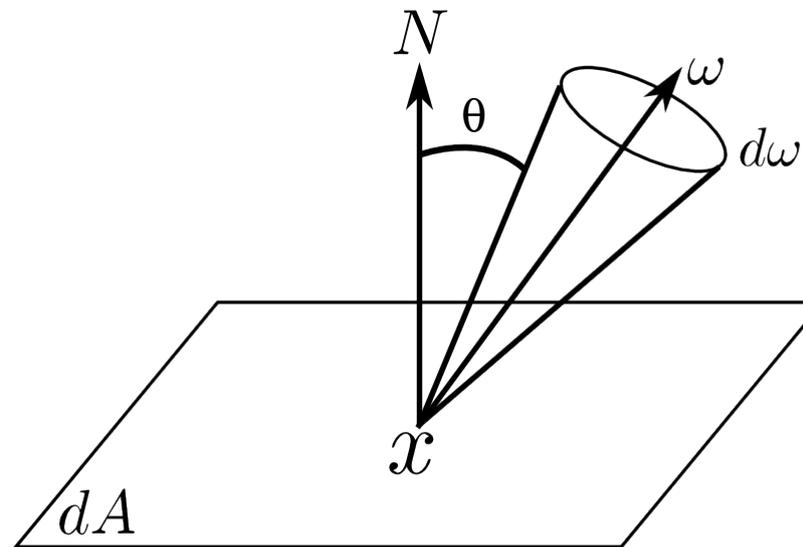
$$L_{\text{lambertien}} = \frac{F_{\text{tot}}}{\pi \cdot A_s}$$

Un certain nombre de surfaces éclairées peuvent être modélisées par un rayonnement Lambertien. C'est le cas par exemple de surface 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 !**

# Unités énergétiques

	Unité	Définition	Name	Nom	Nom CG
$Q$	J		Radiant energy	Énergie	
$F, P, \Phi$	$W = J.s^{-1}$	$dQ/dt$	Radiant power	Flux	
$B$	$W.m^{-2}$	$dP/dA$	Radiant exitance	Exitance	Radiosité
$E$	$W.m^{-2}$	$dP/dA$	Irradiance	Éclairement	Irradiance
$I$	$W.sr^{-1}$	$dP/d\omega$	Radiant intensity	Intensité	
$L$	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	$d^2P/(dA \cos \theta d\omega)$	Radiance	Luminance	Radiance



# Relations élémentaires entre les grandeurs

- Distinguer (notation de Dutré et al 2004)
  - Luminance incidente :  $L(x \leftarrow \omega_i)$
  - Luminance sortante :  $L(x \rightarrow \omega_o)$

- Relations

$$\text{Flux} : \Phi = \int_A \int_{\Omega_N} L(x \rightarrow \omega_o) \langle N, \omega_o \rangle d\omega_o dA_x$$

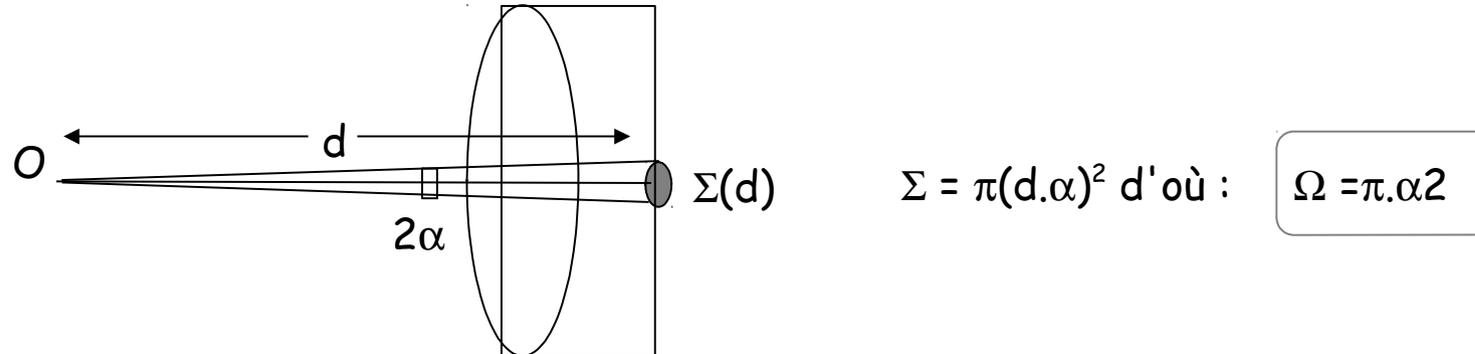
$$\text{Éclairement} : E(x) = \int_{\Omega_N} L(x \leftarrow \omega_i) \langle N, \omega_i \rangle d\omega_i$$

$$\text{Exitance} : B(x) = \int_{\Omega_N} L(x \rightarrow \omega_o) \langle N, \omega_o \rangle d\omega_o$$

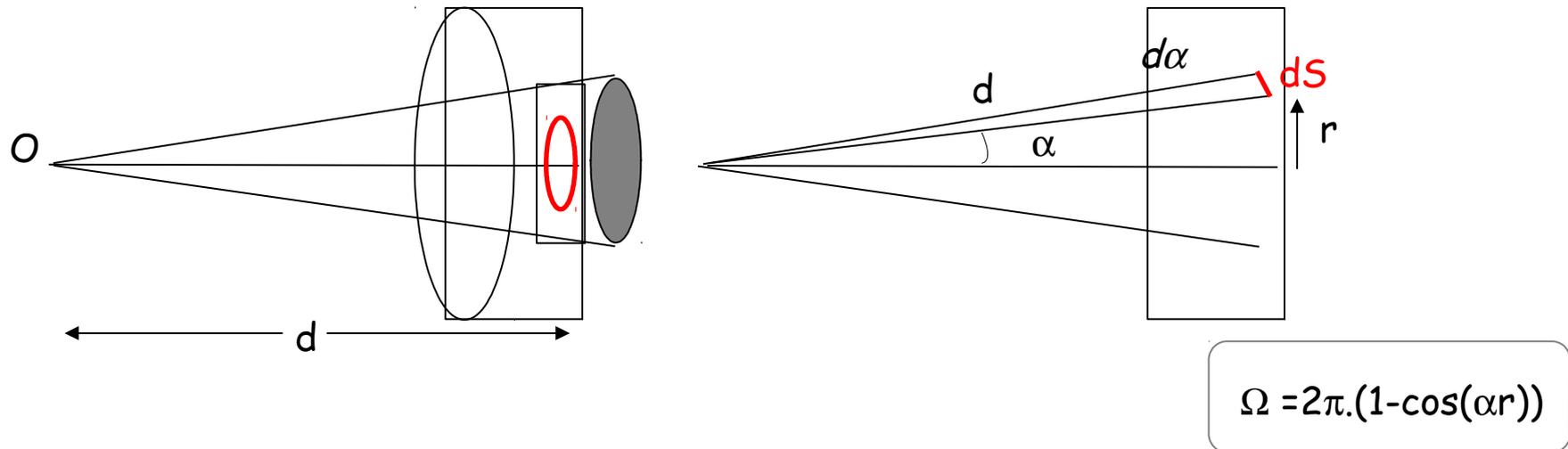
$\langle N, \omega \rangle$  Cosinus de l'angle entre la normale et la direction

# Autres angles solides

- Angle solide d'un petit disque de rayon angulaire  $\alpha \ll 1$



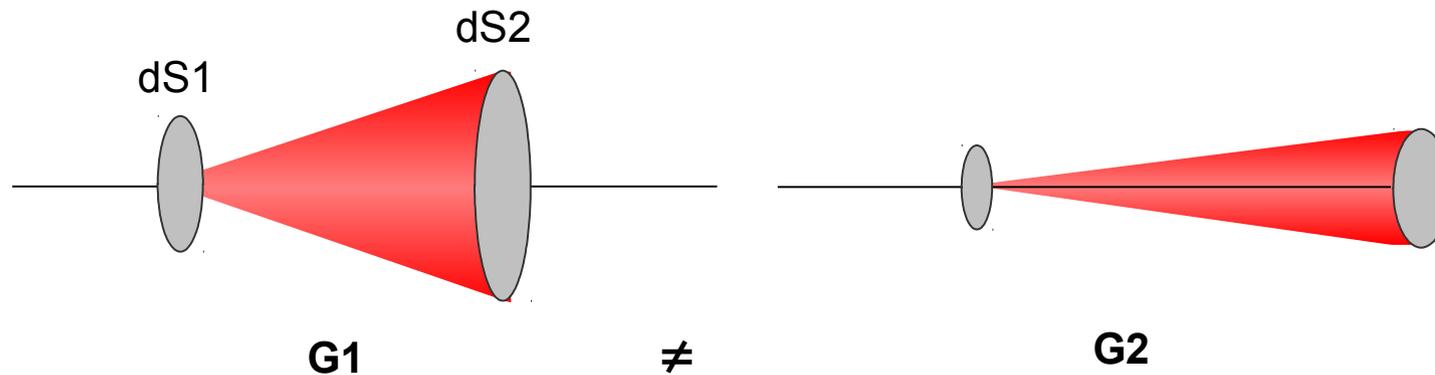
- Angle solide d'un disque quelconque de rayon angulaire  $\alpha r$  :



# Étendue géométrique

## Construction ad hoc de l'étendue géométrique:

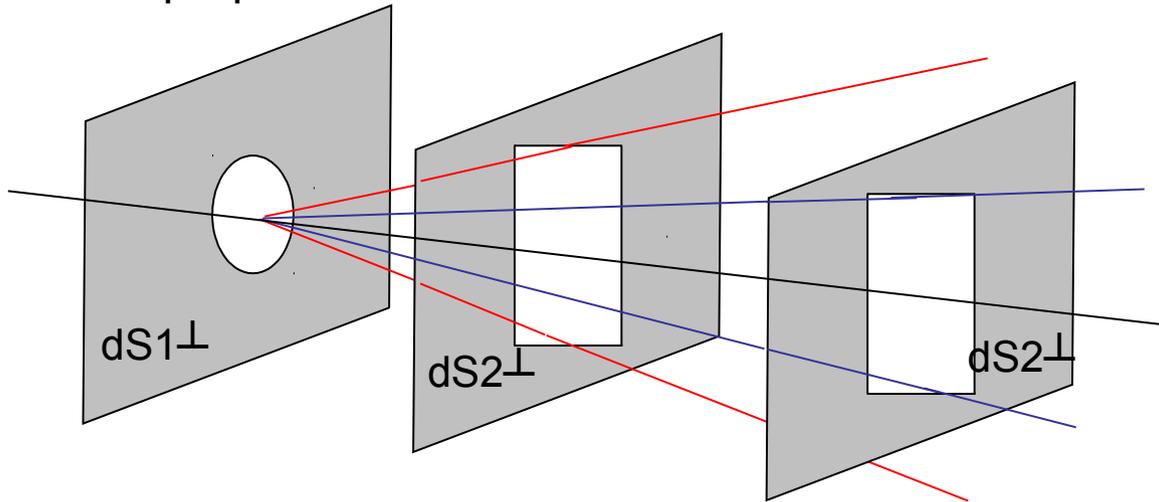
Existe-t'il une quantité géométrique équivalente  $G$  qui caractérise complètement un pinceau de lumière issu de  $dS1$  vu de  $dS2$  et qui soit conservée lors de sa propagation ?



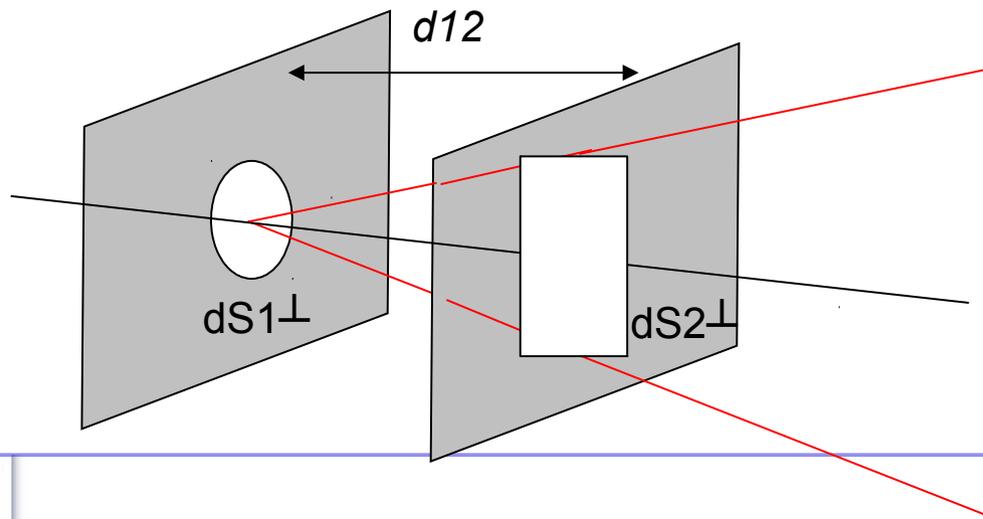
Combien de surface(s) et de distance(s) sont nécessaires pour définir un faisceau, dans le cadre de l'optique géométrique ?

# Étendue géométrique

- 2 surfaces perpendiculaires  $dS1^\perp$  et  $dS2^\perp$



- 2 surfaces perpendiculaires  $dS1^\perp$  et  $dS2^\perp$  + distance  $d12$  entre les deux surfaces



# Étendue géométrique

→ 2 surfaces ( $dS_{1\perp}$ ,  $dS_{2\perp}$ ) et 1 distance  $d_{12}$  sont nécessaires et suffisantes.

On définit de manière générale une quantité  $G$  tel que :

$$d^2G = dS_{1\perp}^\alpha \cdot dS_{2\perp}^\beta \cdot d_{12}^\gamma$$

- Par symétrie ( $dS_1$  et  $dS_2$  joue le même rôle) on doit avoir :  $\beta = \alpha$
- On remarque que si on multiplie par 2 la distance, alors l'une des surface doit être augmentée de 4 pour caractériser le même pinceau :  $\gamma = -2\alpha$

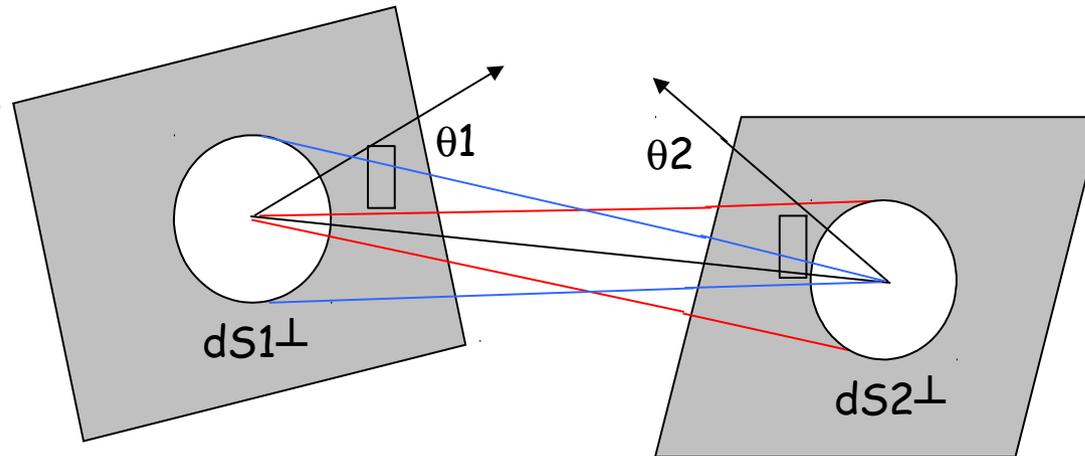
$$d^2G = (dS_{1\perp} \cdot dS_{2\perp})^\alpha \cdot d_{12}^{-2\alpha}$$

- La quantité la plus simple est donc :  $d^2G = \frac{dS_{1\perp} \cdot dS_{2\perp}}{d_{12}^2}$

# Étendue géométrique

On généralise :

- à un milieu d'indice  $n$  quelconque :  $d_{12}' = d_{12}/n$
- des surface  $dS_1$  et  $dS_2$  non perpendiculaire à l'axe du pinceau de lumière. On considère alors les surface projetées.



On définit donc **l'étendue géométrique** comme :

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

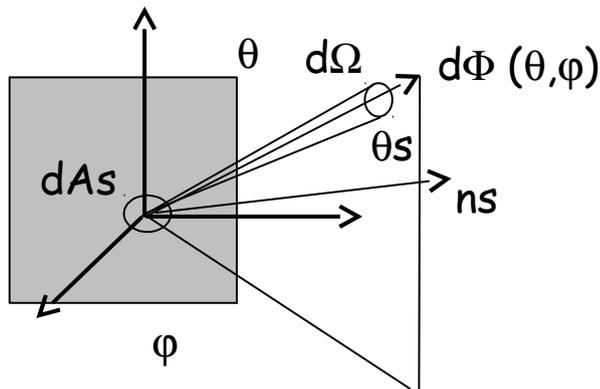
Unité :  $\text{m}^2 \cdot \text{sr}$

# Luminance énergétique

## Luminance :

- 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  $(\theta, \varphi)$  est définie par :

$$L(x, y, z, \theta, \varphi) = \frac{\partial I(\theta, \varphi)}{\partial A_s \cos \theta_s} = \frac{\partial^2 \Phi(\theta, \varphi)}{\partial A_s \cos \theta_s \partial \Omega}$$



$$L(x, y, z, \theta, \varphi) = \frac{\partial^2 \Phi(\theta, \varphi)}{\partial^2 G}$$

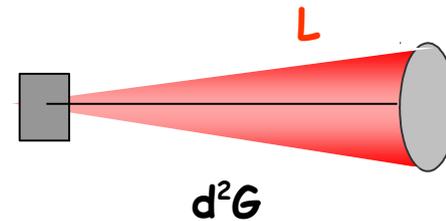
- L'unité de la luminance énergétique est le **W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>**

# Relations radiométriques

Relations 'fondamentales' entre les grandeurs radiométriques:

Flux et luminance  $L_s$  :

$$d^2 F_s = L_s \cdot d^2 G$$



Flux et intensité  $I$ :

$$dF = I \cdot d\Omega$$

Si et uniquement si, le faisceau est uniforme en luminance (resp. en intensité) alors:

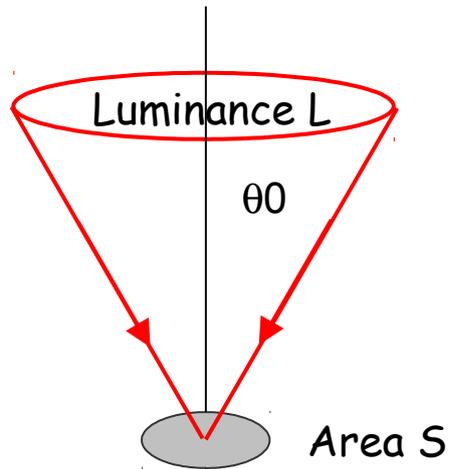
$$F_{\text{faisceau}} = L_{\text{faisceau}} \cdot G_{\text{faisceau}}$$

$$F = I \cdot \Omega$$

# Relations radiométriques

Eclairement d'une surface :

Si une surface est éclairée par un rayonnement de luminance uniforme :



$$E = \frac{F}{S} = \frac{L \cdot G}{S}$$

Si l'éclairage est hémisphérique (éclairage Lambertien):

L'étendue géométrique d'un demi-espace est  $\pi$  et NON  $2\pi$

# Étendue géométrique

On peut écrire l'étendue géométrique sous différentes formes :

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



$$d^2G = n^2 dS_1 \cos(\theta_1) d\Omega_2$$

i.e. le produit de la surface apparente  $dS_1$  par l'angle solide de  $dS_2$  vu par  $dS_1$

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



$$d^2G = n^2 d\Omega_1 dS_2 \cos(\theta_2)$$

i.e. le produit de la surface apparente  $dS_2$  par l'angle solide de  $dS_1$  vu par  $dS_2$

# Étendue géométrique

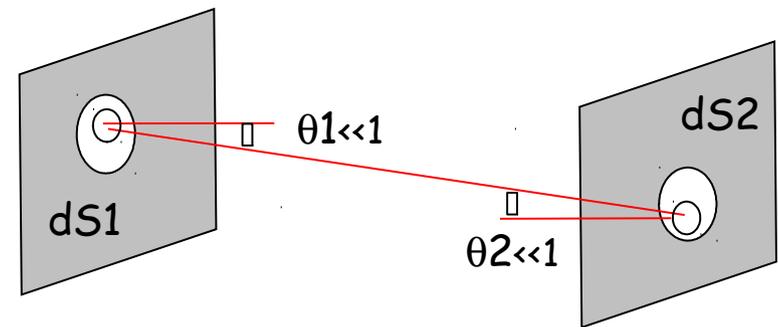
Dans le cas d'un faisceau de lumière non élémentaire:

$$G = \iint \iint \frac{dS_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot dS_2 \cdot \cos(\theta_2)}{d_{12}^2}$$

Calcul plus ou moins compliqué suivant la configuration !

**Cas élémentaire de 2 petites surfaces, coaxiales, éloignées ( $r_1 \ll d$  et  $r_2 \ll d$ ).**

→ détecteur regardant une source lointaine, sans optique.



# Étendue géométrique

Dans le cas d'un faisceau de lumière non élémentaire:

$$G = \iint \iint \frac{dS_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot dS_2 \cdot \cos(\theta_2)}{d_{12}^2}$$

Calcul plus ou moins compliqué suivant la configuration !

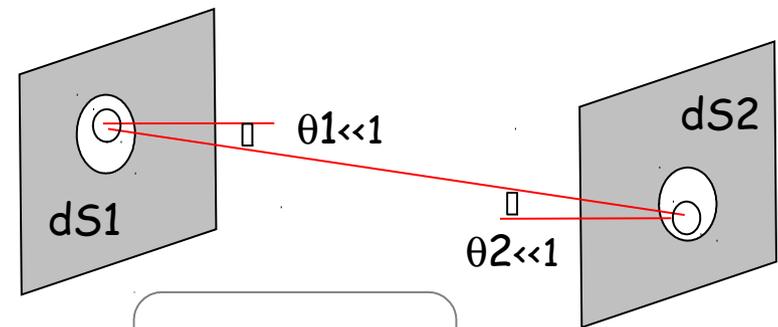
**Cas élémentaire de 2 petites surfaces, coaxiales, éloignées ( $r_1 \ll d$  et  $r_2 \ll d$ ).**

→ détecteur regardant une source lointaine, sans optique.

$$d^2 G \approx: \frac{dS_1 \cos(\theta_1) \cdot dS_2 \cos(\theta_2)}{d^2}$$

$$d^2 G \approx: \frac{dS_1 \cdot dS_2}{d^2}$$

$$G \approx \iint \frac{dS_1 \cdot dS_2}{d^2}$$

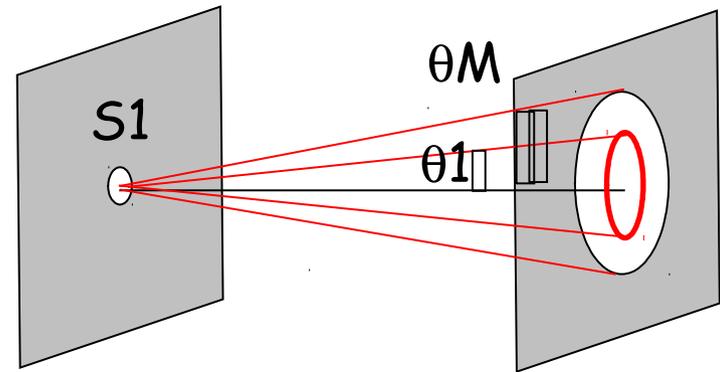


$$G \approx \frac{S_1 \cdot S_2}{d^2}$$

# Étendue géométrique

**Cas très classique de 2 surfaces circulaires, coaxiales avec  $S1 \ll S2$**

- détecteur au foyer d'une lentille



# Étendue géométrique

**Cas très classique de 2 surfaces circulaires, coaxiales avec  $S_1 \ll S_2$**

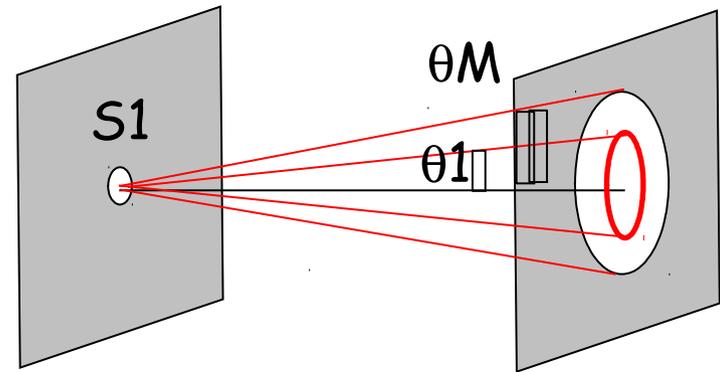
○ détecteur au foyer d'une lentille

$$d^2G \approx dS_1 \cos(\theta_1) d\Omega_1$$

$$G \approx \iint dS_1 \cos(\theta_1) d\Omega_1$$

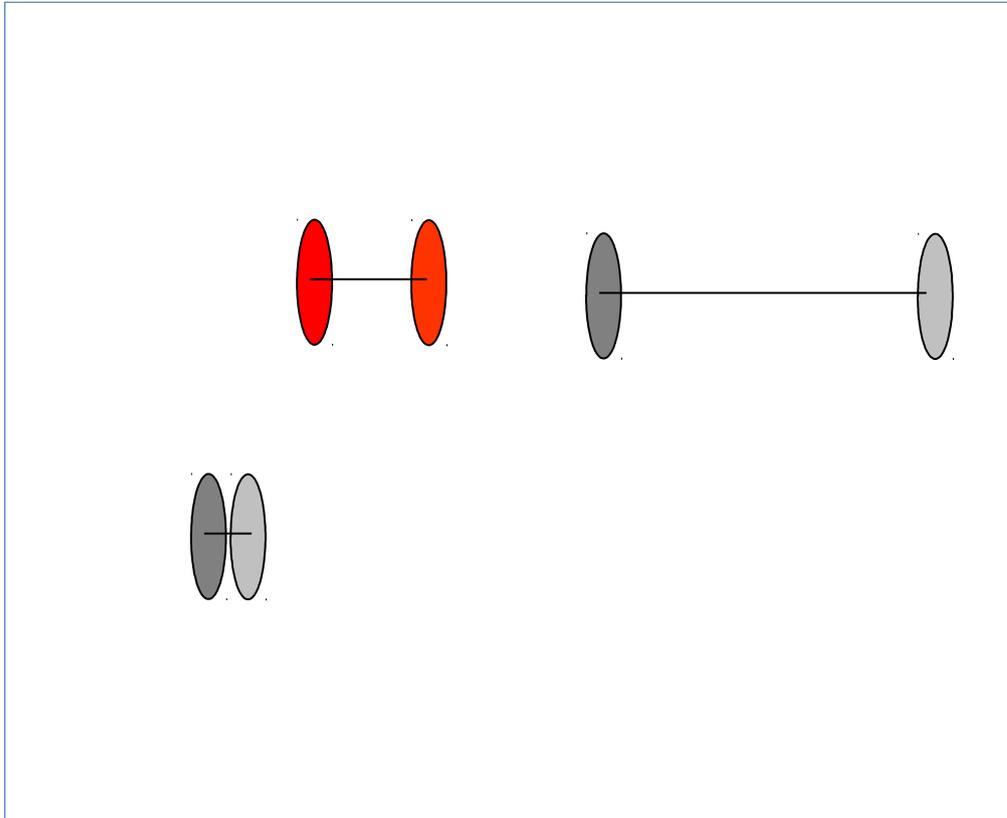
$$G \approx S_1 \int \cos(\theta_1) 2\pi \sin(\theta_1) d\theta_1$$

$$G \approx \pi S_1 \left[ \sin^2(\theta_1) \right]_0^{\theta_M}$$



$$G \approx \pi S_1 \sin^2(\theta_M)$$

Que ce passe t'il si S1 est de même taille que S2 ?

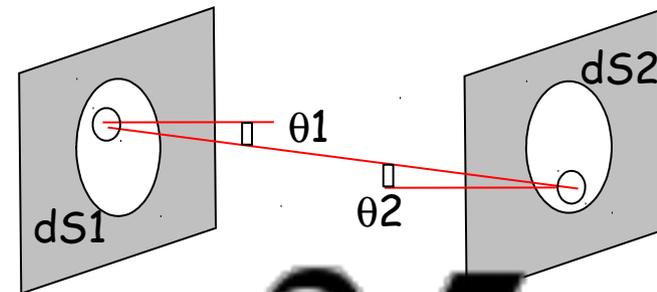


**Calcul approché :**

$$G \approx \pi S_1 \sin^2(\theta_M)$$

**Calcul exact (numérique !) :**

$$G_{exact} = \iiint \frac{dS_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot dS_2 \cdot \cos(\theta_2)}{d_{12}^2}$$



→ Erreur non négligeable lorsque la distance entre les deux surfaces devient du même ordre de grandeur que le diamètre des surfaces.

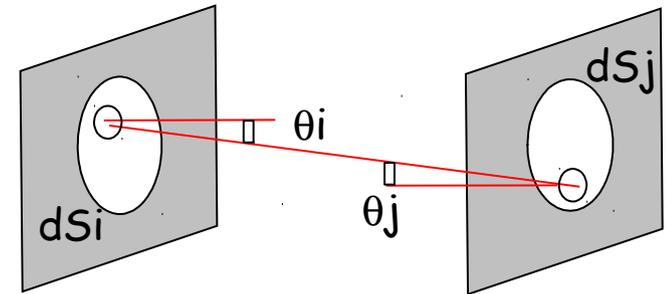
35

# Facteur de Forme (thermique)

- Facteur de forme
  - % d'étendue géométrique
    - Normalisation par l'étendue maximale
  - % d'énergie transférée

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi A_i} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{d_{ij}^2} ds_j ds_i$$

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad \sum_j F_{ij} \leq 1$$

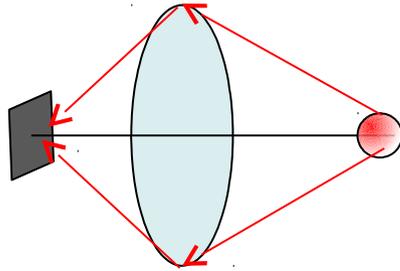


# Étendue géométrique

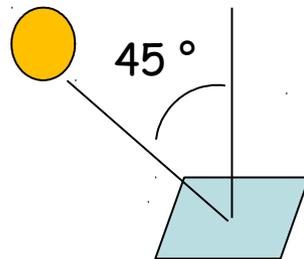
Les 2 surfaces S1 et S2 sont les 2 surfaces limitantes du systèmes : cela peut être la source, le détecteur, une optique ou un diaphragme.

## Exemples:

- Une photodiode ( $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ ) et une optique de 4 cm de diamètre de focal 10 cm



- Un panneau solaire de  $1\ \text{m}^2$  regardant le soleil de diamètre angulaire  $0,5^\circ$  à  $45^\circ$  du zénith

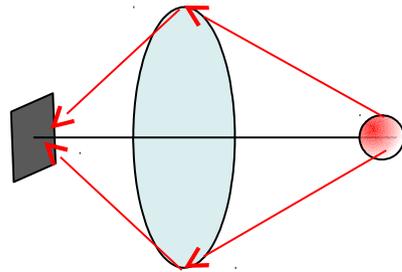


# Étendue géométrique

Les 2 surfaces S1 et S2 sont les 2 surfaces limitantes du systèmes : cela peut être la source, le détecteur, une optique ou un diaphragme.

## Exemples:

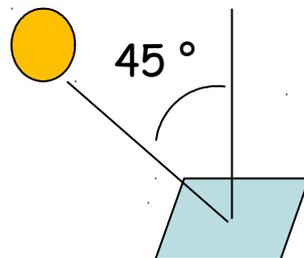
- Une photodiode (100  $\mu\text{m}$  x 100  $\mu\text{m}$ ) et une optique de 4 cm de diamètre de focal 10 cm



$$G \approx \pi \cdot (100\text{E}^{-6})^2 \cdot \sin^2(2/(10^2 + 2^2)^{1/2})$$

$$G \approx 1,2\text{E}^{-9}$$

- Un panneau solaire de 1  $\text{m}^2$  regardant le soleil de diamètre angulaire 0,5° à 45° du zénith



$$G \approx \pi \cdot 1 \cdot \cos(45) \cdot \sin^2(0,25)$$

$$G \approx 4,2\text{E}^{-5}$$

# Étendue géométrique

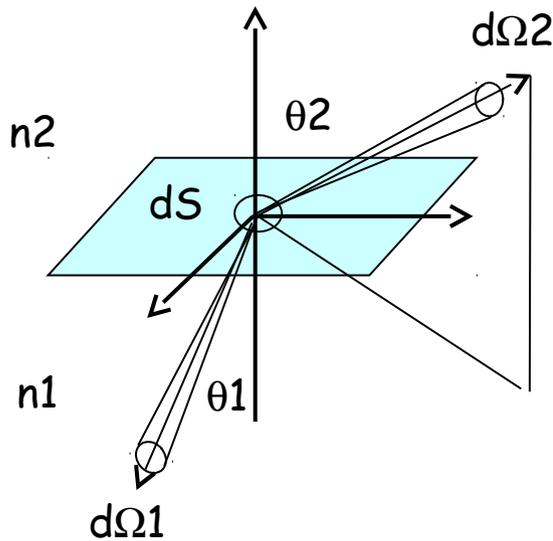
On considère une interface entre deux milieux d'indice  $n_1$  et  $n_2$  et un faisceau incident avec un angle  $\theta_1$

Les lois de Snell - Descartes s'écrivent:

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

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

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



D'autre part :  $r d\theta_1 r \sin(\theta_1) d\varphi = d\Sigma_1$

$$\text{D'où : } \sin(\theta_1) d\theta_1 d\varphi = \frac{d\Sigma_1}{r^2} = d\Omega_1$$

# Étendue géométrique : réfraction / réflexion

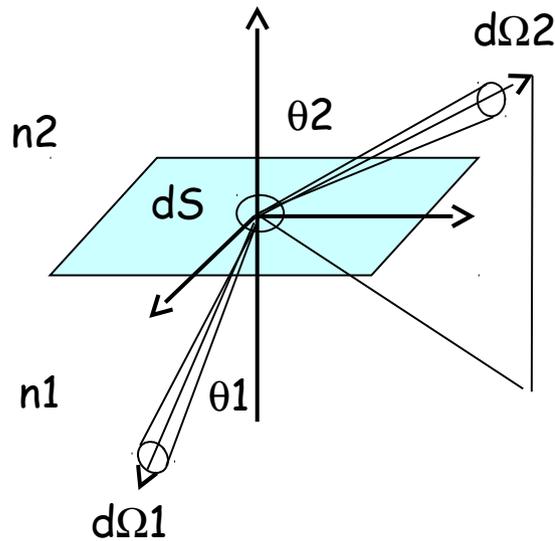
On considère une interface entre deux milieux d'indice  $n_1$  et  $n_2$  et un faisceau incident avec un angle  $\theta_1$

Les lois de Snell - Descartes s'écrivent:

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

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

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



D'autre part :  $r d\theta_1 r \sin(\theta_1) d\varphi = d\Sigma_1 \longrightarrow$

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

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

D'où :  $\sin(\theta_1) d\theta_1 d\varphi = \frac{d\Sigma_1}{r^2} = d\Omega_1$

# Étendue géométrique : réfraction / réflexion

On obtient :  $dG_1 = dG_2$

Le même résultat peut être démontré pour la réflexion (avec  $\theta_1 = \theta_2$  et  $n_1 = n_2$ )

**Il y a conservation de l'étendue géométrique à la réflexion/réfraction**

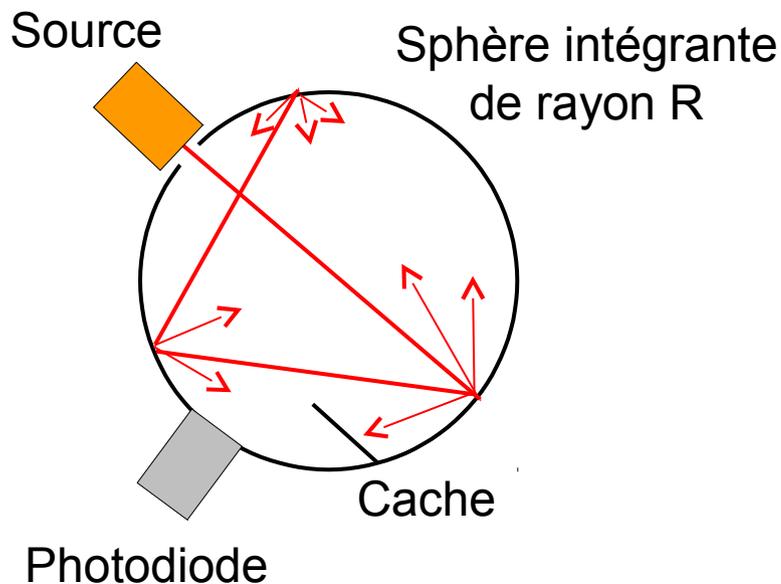
Un système optique, à partir du moment où l'on reste dans le même milieu, ne peut donc pas augmenter l'étendue géométrique d'un faisceau lumineux. Il peut seulement la réduire (diaphragme).

En conséquence, c'est la plus faible étendue géométrique d'un système *source – optiques – détecteurs* qui va déterminer ces performances radiométriques

# Sphère intégrante

**Mesure du flux total d'une source non uniforme :**

**Sphère intégrante:** sphère creuse (diamètre de qq dizaines de cm à qq mètres) avec un revêtement très réfléchissant et diffusant sur une large bande spectrale ( $\rho \sim 1$ ).

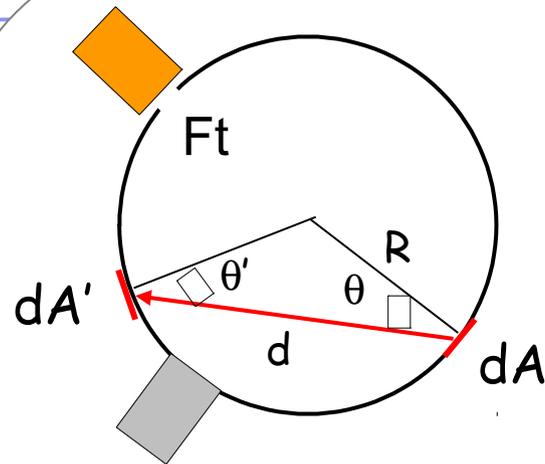


L'éclairement sur la photodiode est proportionnel au flux total émis par la source quelque soit son indicatrice.

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

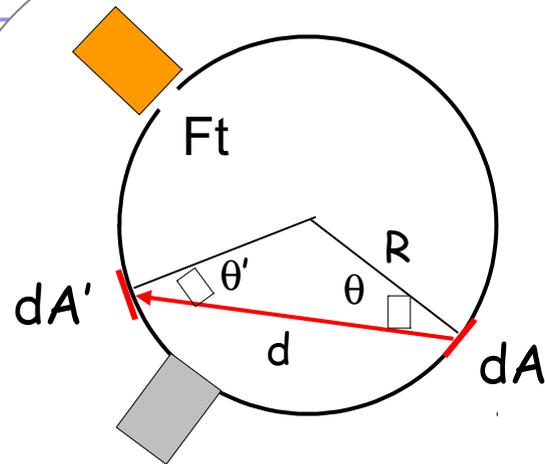


Sphère Intégrante de chez LabSphere©



**Démonstration:** Considérons un flux  $dF$  incident sur l'élément  $dA$ , la surface interne de la sphère étant lambertienne, sa luminance s'écrit :

$$L = \frac{\rho dF}{\pi dA}$$



**Démonstration:** Considérons un flux  $dF$  incident sur l'élément  $dA$ , la surface interne de la sphère étant lambertienne, sa luminance s'écrit :

$$L = \frac{\rho dF}{\pi dA}$$

Le flux reçu par l'élément  $dA'$  provenant de  $dA$  :

$$d^2 F' = L \cdot d^2 G = L \cdot \frac{dA \cdot \cos\theta \cdot dA' \cdot \cos\theta'}{d^2}$$

$$dE' = L \cdot \frac{dA \cdot \cos\theta \cdot \cos\theta'}{d^2} \longrightarrow dE' = L \cdot \frac{dA}{4R^2} = \frac{\rho}{4\pi R^2} dF$$

$$\text{Or } \theta = \theta' \text{ et } d = 2R \cdot \cos\theta$$

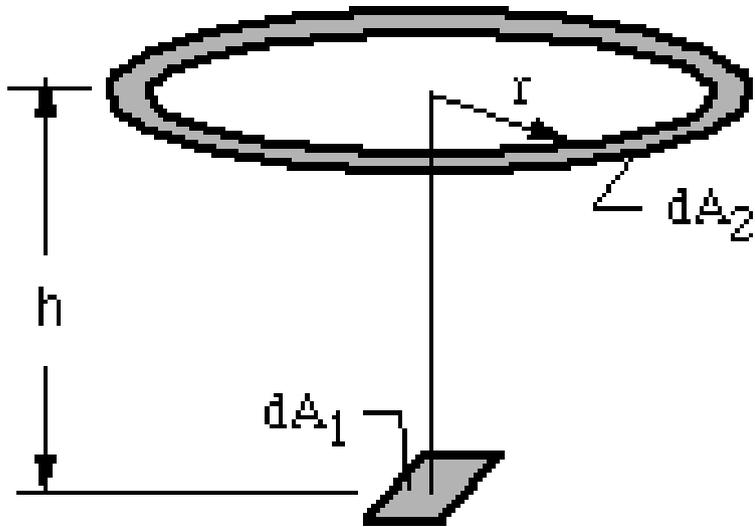
Donc le flux reçu par  $dA'$  provenant de l'ensemble de la sphère est :  $E' = \frac{\rho}{4\pi R^2} F_t$

Il faut aussi tenir compte du flux réfléchis après 1,2,...n réflexions :

$$E_{tot} = (\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots) \frac{1}{4\pi R^2} F_t$$

$$E_{tot} = \frac{\rho}{1 - \rho} \cdot \frac{1}{4\pi R^2} F_t$$

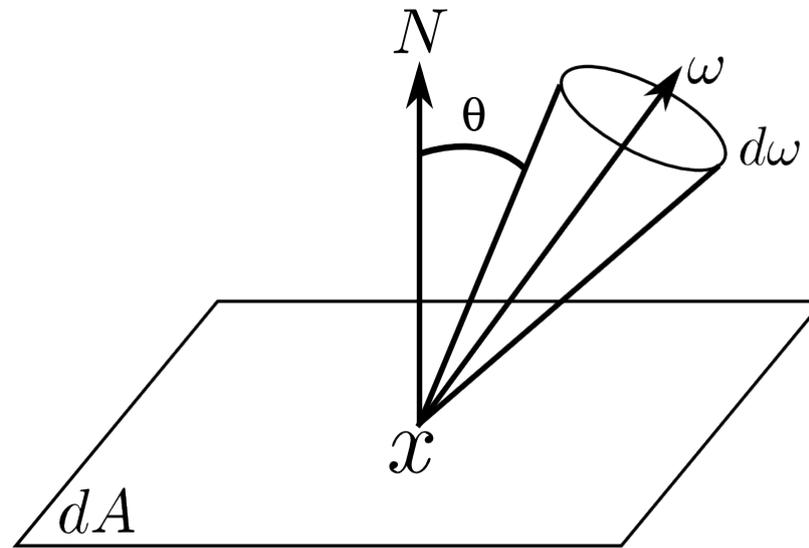
# Étendue géométrique



$$d^2 G = dA_1 dA_2 \frac{h^2}{(h^2 + r^2)^2}$$

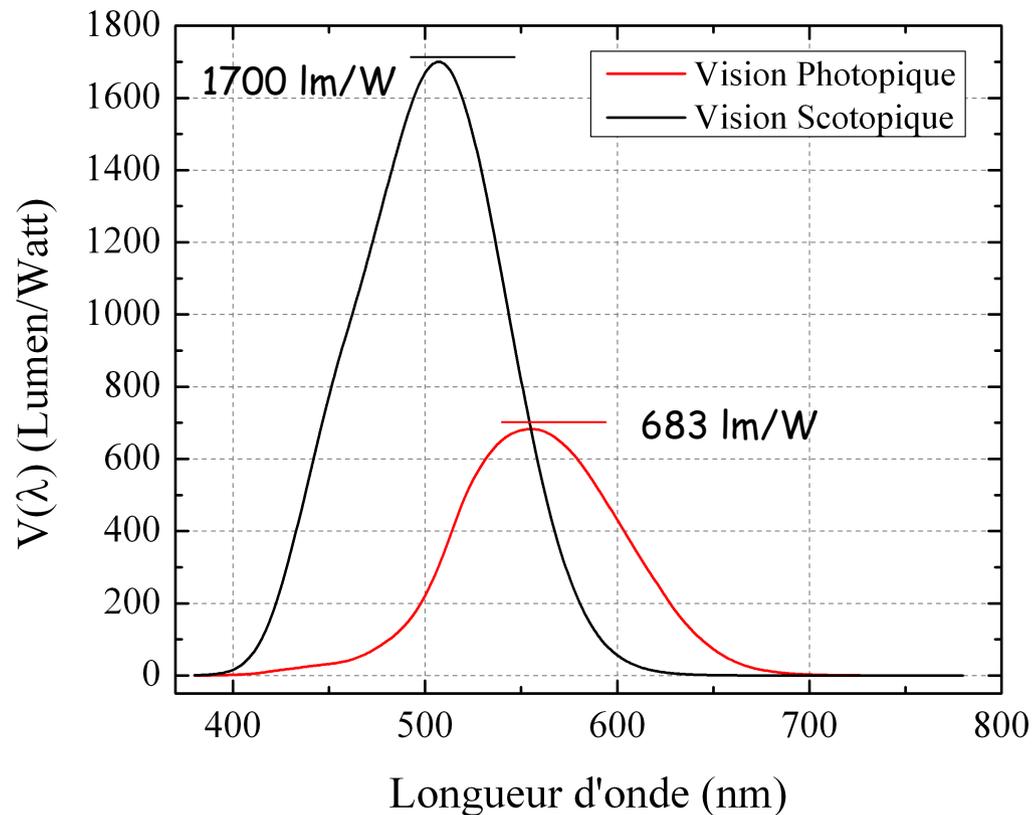
# Unités visuelles (domaine visible)

	Unité	Définition	Nom	Unité	Nom
$Q$	J		Énergie	lm.s	talbot
$F, P, \Phi$	$W = J.s^{-1}$	$dQ/dt$	Flux	lm	lumens
$B$	$W.m^{-2}$	$dP/dA$	Exitance	$lm.m^{-2}$	
$E$	$W.m^{-2}$	$dP/dA$	Éclairement	lux	
$I$	$W.sr^{-1}$	$dP/d\omega$	Intensité	cd	candela
$L$	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	$d^2P/(dA \cos \theta d\omega)$	Luminance	$cd.m^{-2}$	nit



# Flux visuel

Pour beaucoup d'applications, seule la partie visible du spectre est pertinente.  
L'unité du flux visuel est le **Lumen (lm)**. L'efficacité lumineuse spectrale est définie par :



Rayonnement monochromatique:

$$F_v(\lambda) = F_e(\lambda) \cdot V(\lambda)$$

Rayonnement polychromatique :

$$F_v = \int dF_e(\lambda) \cdot V(\lambda)$$

**Exemple** : Pointeur laser rouge 1mW à 635 nm;  $V_{\text{relatif}}(635) = 0.22$

$$F_v = 2,2E^{-4} \text{ lm}$$

# Efficacité lumineuse

Valeur de l'efficacité lumineuse spectrale :

$\lambda$ (nm)	Vph (lm/W)
----------------	------------

400	1,9
425	15,5
450	32
475	76,9
500	220,6
525	574,8
550	679,6
575	625,2

$\lambda$ (nm)	Vph (lm/W)
----------------	------------

600	431
625	219,2
650	73,1
675	15,8
700	2,8
725	0,5
750	0,08

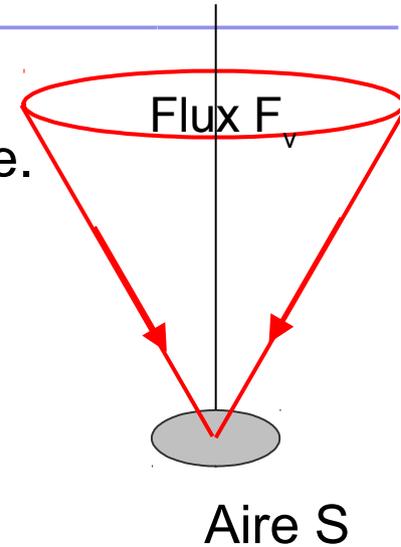
# Éclairement visuel

## Éclairement :

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

$$E = \frac{\partial F_v}{\partial S}$$

- Quantité très utile et souvent plus pertinente que le flux visuel (sur un détecteur, une source secondaire... ).
- Il s'exprime en **lux** (**lm.m<sup>-2</sup>**)



## Exitance :

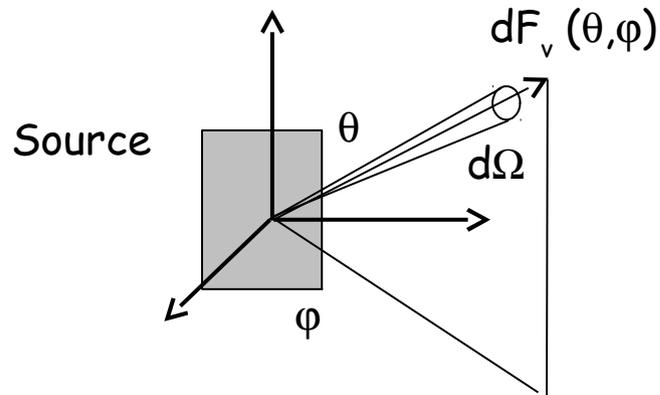
- L'exitance est une densité de flux visuel émis par unité de surface.

$$M = \frac{\partial F_v}{\partial S}$$

# Intensité visuelle

## Intensité :

L'intensité d'une source est le flux émis par unité d'angle solide dans une direction d'observation donnée, exprimé en Candela (cd)



$$I_v(\theta, \varphi) = \frac{\partial F_v(\theta, \varphi)}{\partial \Omega}$$

# Ambiguïté de l'intensité

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           |
| • <b>Intensité lumineuse</b> | <b>Candela</b> |

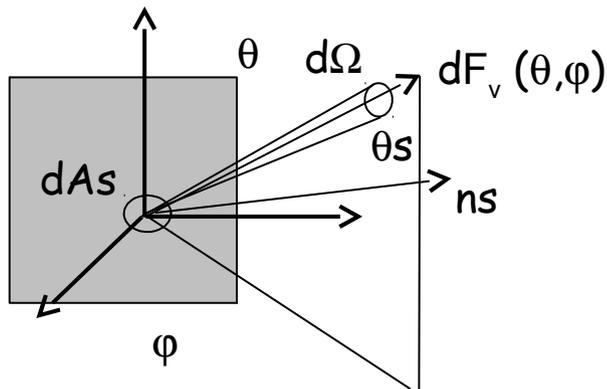
Mais par abus de langage, très souvent « l'intensité » sera utilisée pour désigner une puissance (en Watt) ou même un éclairement ( $\text{W.m}^{-2}$ ) !

# Luminance visuelle

## Luminance :

- 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  $(\theta, \varphi)$  est définie par :

$$L_v(x, y, z, \theta, \varphi) = \frac{\partial I_v(\theta, \varphi)}{\partial A_s \cos \theta_s} = \frac{\partial^2 F_v(\theta, \varphi)}{\partial A_s \cos \theta_s \partial \Omega}$$



$$L_v(x, y, z, \theta, \varphi) = \frac{\partial^2 F_v(\theta, \varphi)}{\partial^2 G}$$

- L'unité de la luminance visuelle est le **cd.m<sup>-2</sup>**

# Quelques luminances visuelles

	Luminance (cd/m <sup>2</sup> )
Ciel de nuit noir	0,0004
Ciel bleu	5 000
Lampes économiques	$1 \cdot 10^4$
Neige au soleil	$1 \cdot 10^4$
LED de puissance	$2 \cdot 10^7$
Disque Solaire	$1,6 \cdot 10^9$

Une source lumineuse peut provoquer un éblouissement incommode entre 3000 et 10 000 cd/m<sup>2</sup>.

Au delà de 105 cd/m<sup>2</sup>, l'éblouissement devient neutralisant.