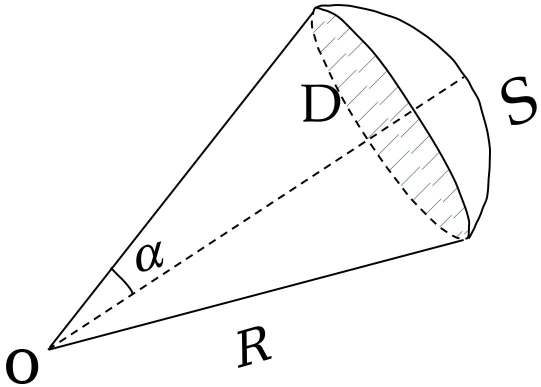
PHOTOMETRIE

Etude énergétique du rayonnement lumineux

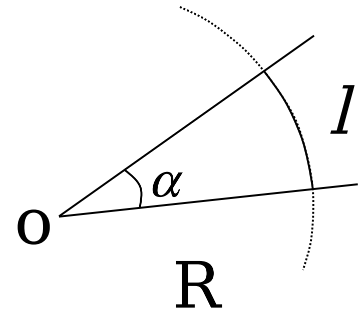
Pierre-Louis FRISON
pierre-louis.frison@u-pem.fr

Université Gustave Eiffel

Angle solide



Angle plan

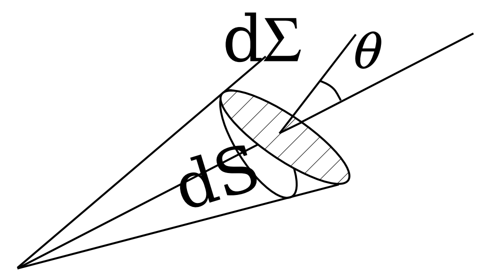


$$\alpha = \frac{l}{R}$$

Stéradians (sr)

$$\Omega = \int d\Omega = \int \frac{dS}{R^2} = \frac{R^2}{R^2} \int_{\theta=0}^{\alpha} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \sin\theta \; d\theta \; d\varphi$$

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\alpha)$$



<u>*Si Ω petit:*</u>

$$\Omega \approx \frac{D}{R^2} \approx \pi\alpha^2$$

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} = \frac{d\Sigma \cos\theta}{R^2}$$

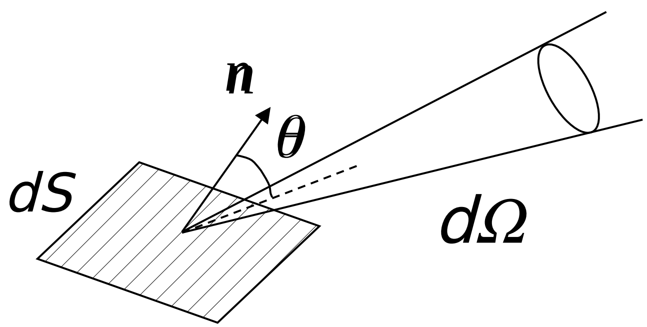
Grandeurs photométriques

***umineux**:* Puissance rayonnée par source le long des rayons lumineux

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \qquad (W)$$

mineux émis par source de surface élémentaire dS, placée en A, angle solide dΩ autour de la direction θ :

$$\delta^2\Phi = L \cos\theta \, dS \, d\Omega$$



luminance (W.m^{-2}sr^{-1})
radiance

L est indépendant de θ, la source est dite ***lambertienne***

Grandeurs photométriques (2)

***ensité** d’une source:* Flux rayonné / Unité d’angle solide

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \int_{Source} L \cos\theta \, dS$$ (W.sr^{-1})

***ittance** d’une source:* Flux rayonné / Unité de surface

tance

$$M = \frac{d\Phi}{dS} = \int_{hém.} L \cos\theta \, d\Omega$$ (W.m^{-2})

Si source est lambertienne: $$\boxed{M = L \int_{hém.} \cos\theta \, d\Omega = \pi L}$$

surface est éclairée par un flux incident: ***Eclairement***

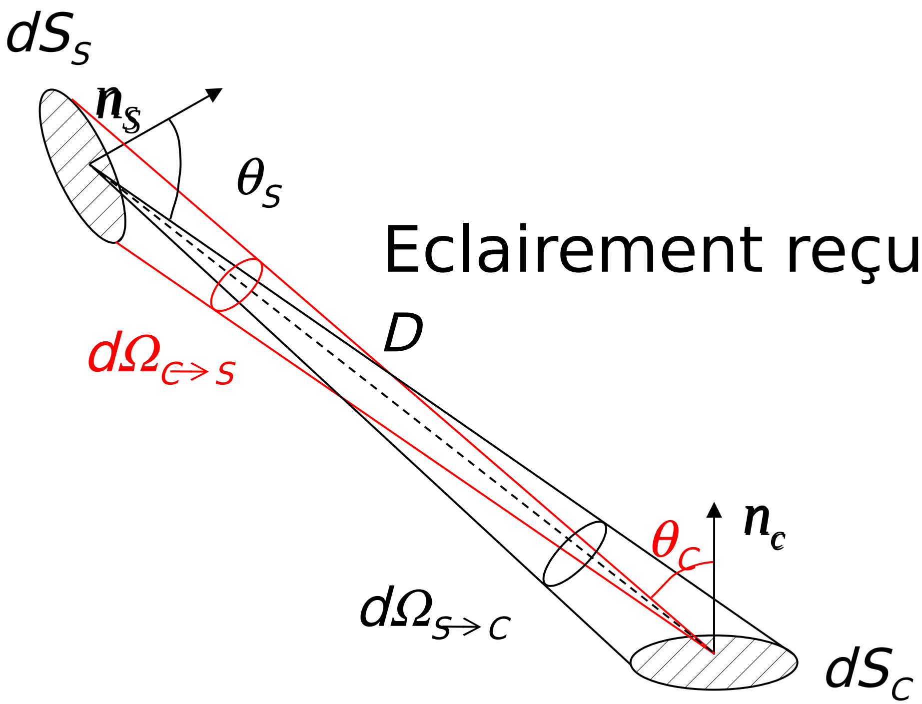
$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \int_{hém.} L \cos\theta \, d\Omega$$

Grandeurs photométriques (3)

irement *reçu par surface dS_C eclairée par source dS_S:*

Flux reçu par dS_C: $\delta^2\Phi = L_S \cos\theta_S \, dS_S \, d\Omega_{S\to C} = \dfrac{L_S \cos\theta_S \, dS_S \, dS_C \cos\theta_C}{D^2}$

$$= L_S \, dS_C \cos\theta_C \, d\Omega_{C\to S}$$

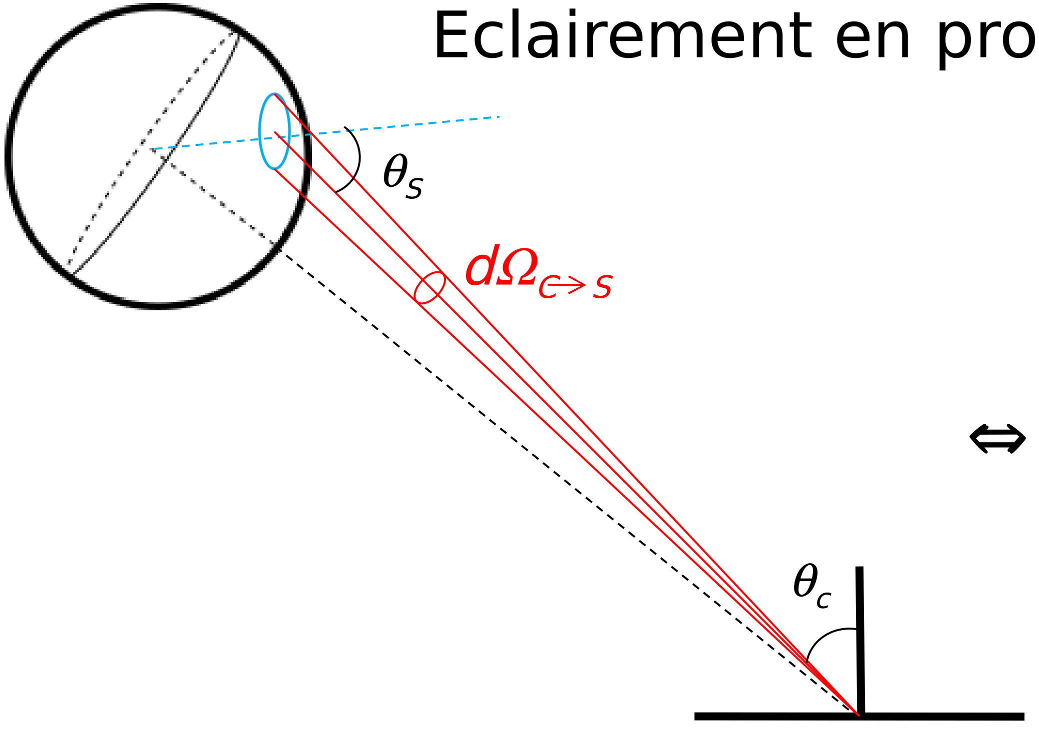


Eclairement reçu par dS_C: $\dfrac{\delta^2\Phi}{dS_C} = dE = \dfrac{L_S \cos\theta_S \, dS_S \cos\theta_c}{D^2}$

Grandeurs photométriques (4)

Eclairement en provenance de dS_S: $dE = \frac{L_S \cos\theta_S \, dS_S \cos\theta_c}{D^2}$

Eclairement en provenance de S:

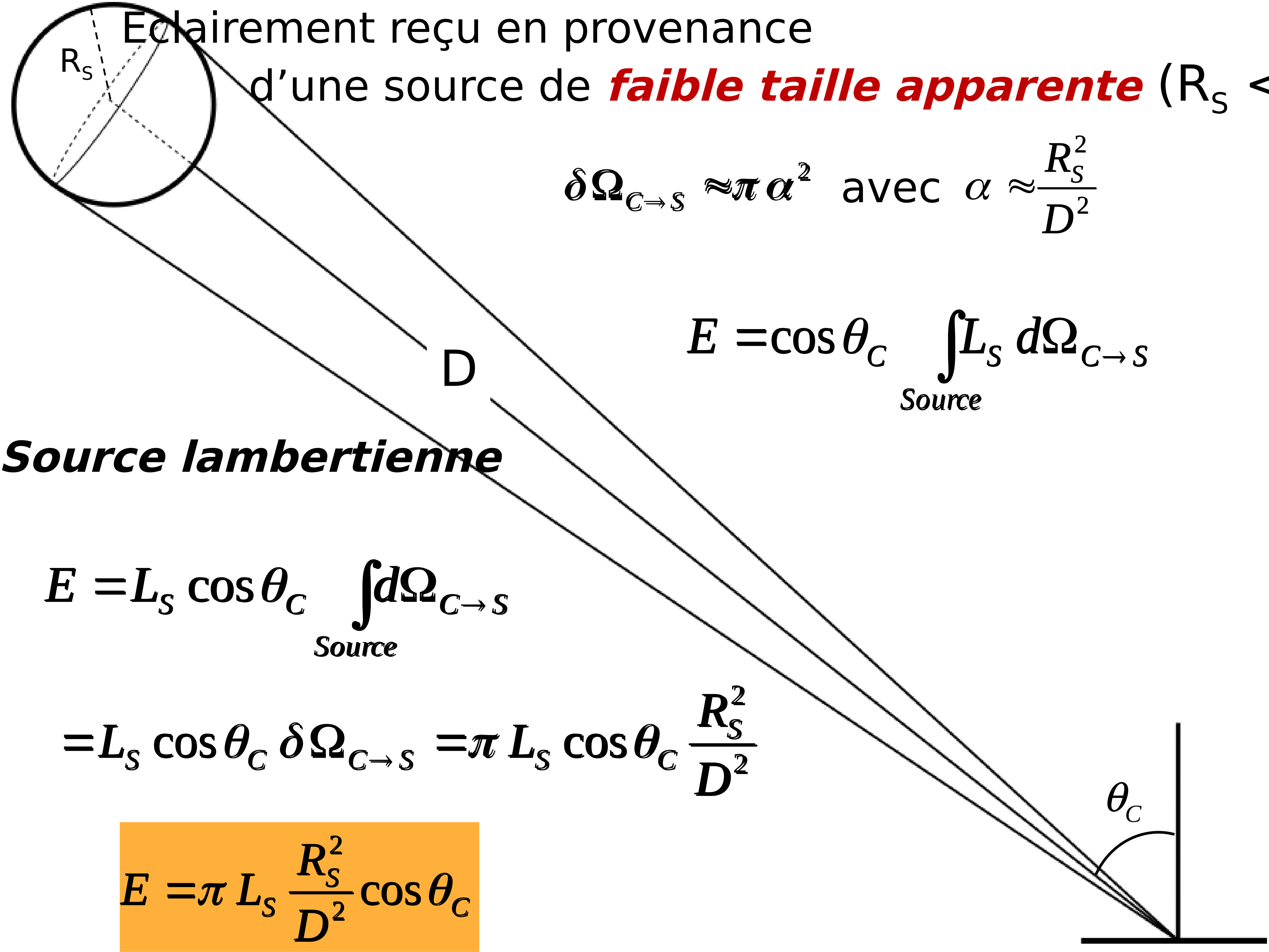


$$E = \int_{Source} \frac{L_S \cos\theta_S \, dS_S \cos\theta_C}{D^2}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{E = \int_{Source} L_S \cos\theta_C \, d\Omega_{C\rightarrow S}}$$

Eclairement reçu en provenance

d’une source de ***faible taille apparente*** (R_S <



$$\delta\Omega_{C\to S} \approx \pi\,\alpha^2 \quad \text{avec} \quad \alpha \approx \frac{R_S^2}{D^2}$$

$$E = \cos\theta_C \int_{Source} L_S \, d\Omega_{C\to S}$$

Source lambertienne

$$E = L_S \cos\theta_C \int_{Source} d\Omega_{C\to S}$$

$$= L_S \cos\theta_C \, \delta\Omega_{C\to S} = \pi\, L_S \cos\theta_C \frac{R_S^2}{D^2}$$

$$\boxed{E = \pi\, L_S \frac{R_S^2}{D^2} \cos\theta_C}$$

Mesures Optiques (0.4 – 5 μm)

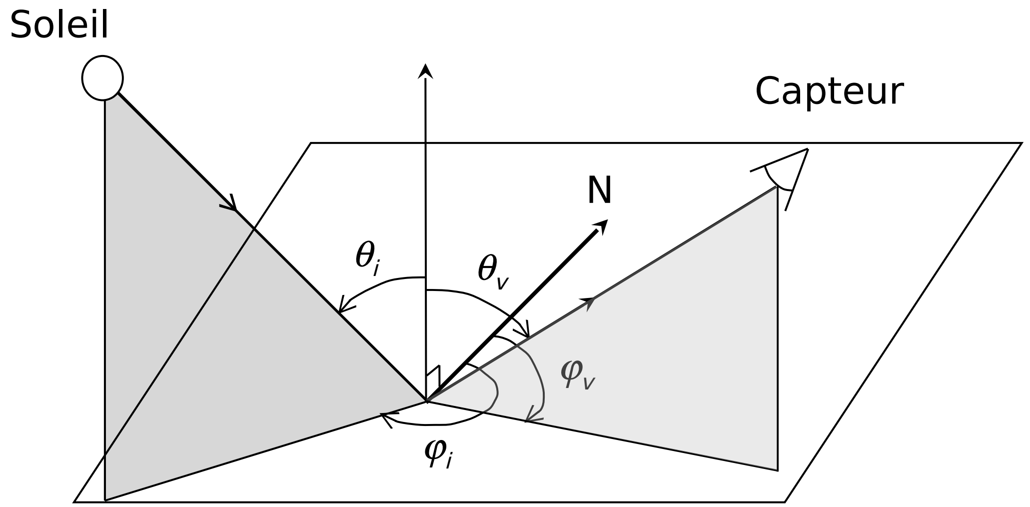
(Réflexion du rayonnement solair

éflectance: caractérise les surfaces étudiées

éflectance bidirectionnelle:

$$\rho(\theta_i,\varphi_i,\theta_v,\varphi_v,\lambda)=\frac{L_r}{E_i}=\frac{L_r}{L_i\cos\theta_i d\Omega_i}$$

Albédo: $a=\dfrac{\int_{h\acute{e}m.} L_r\cos\theta_v d\Omega_v}{\int_{h\acute{e}m} L_i\cos\theta_i d\Omega_i}=\dfrac{M}{E_i}$



Facteur de réflectance:

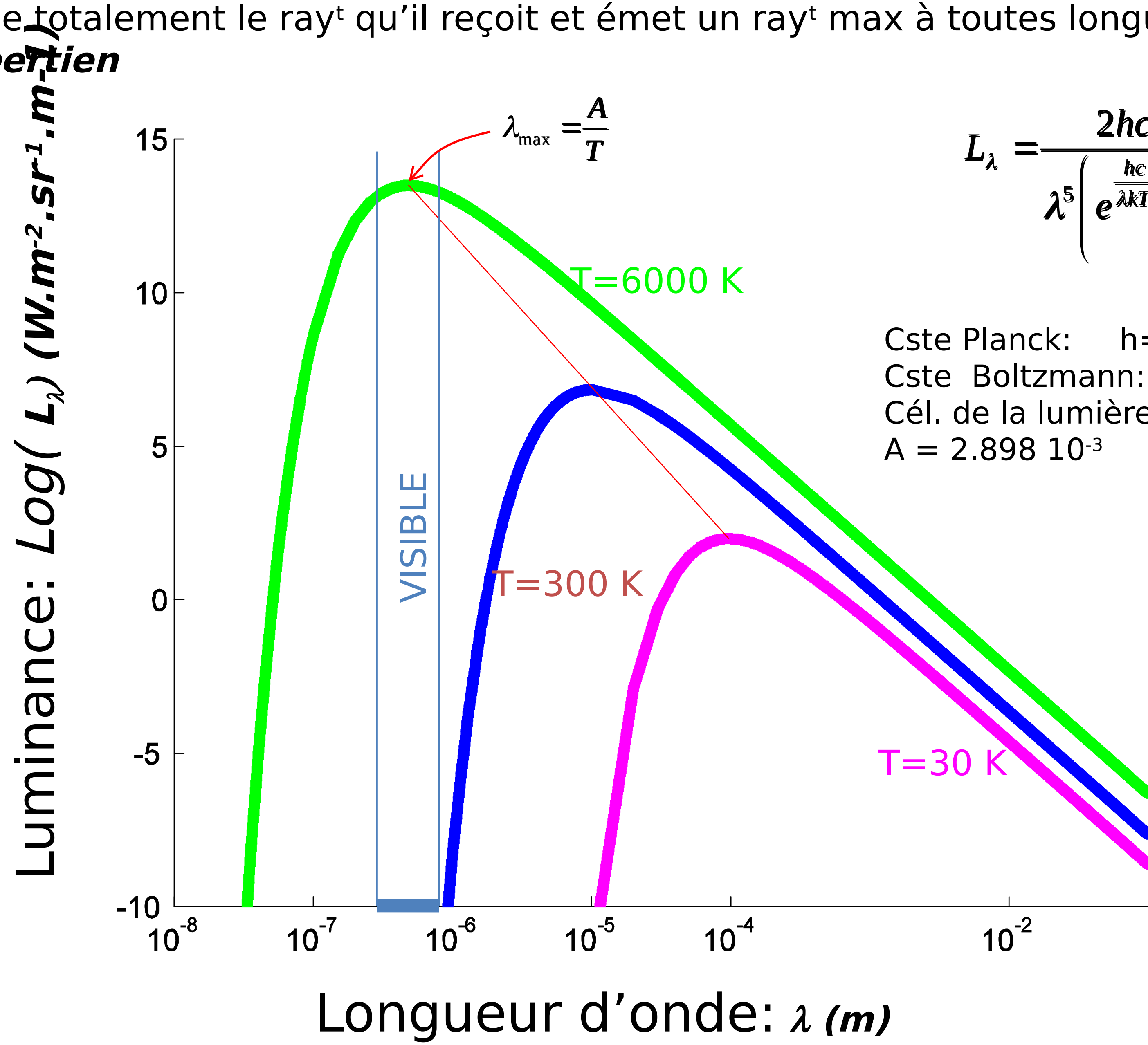
$$\rho_b=\frac{\rho_r}{\rho_r^{ref}}=\frac{L_r}{L_r^{ref}}=\frac{\pi L_r}{E_i}$$ avec $$E_i=L_{sol}\frac{\pi\ R_{sol}^2}{D_{ST}^2}\cos\theta_i \quad\Rightarrow\quad \boxed{\rho_b=\frac{1}{L_{sol}R_{sol}^2}D_{ST}^2\frac{L_r}{\cos\theta'}}$$

Le Rayonnement du corps noir

noir: Corps idéal en équilibre thermodynamique avec son environnemet.

Absorbe totalement le ray^t qu'il reçoit et émet un ray^t max à toutes longueurs d'onde

té: ***lambertien***



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

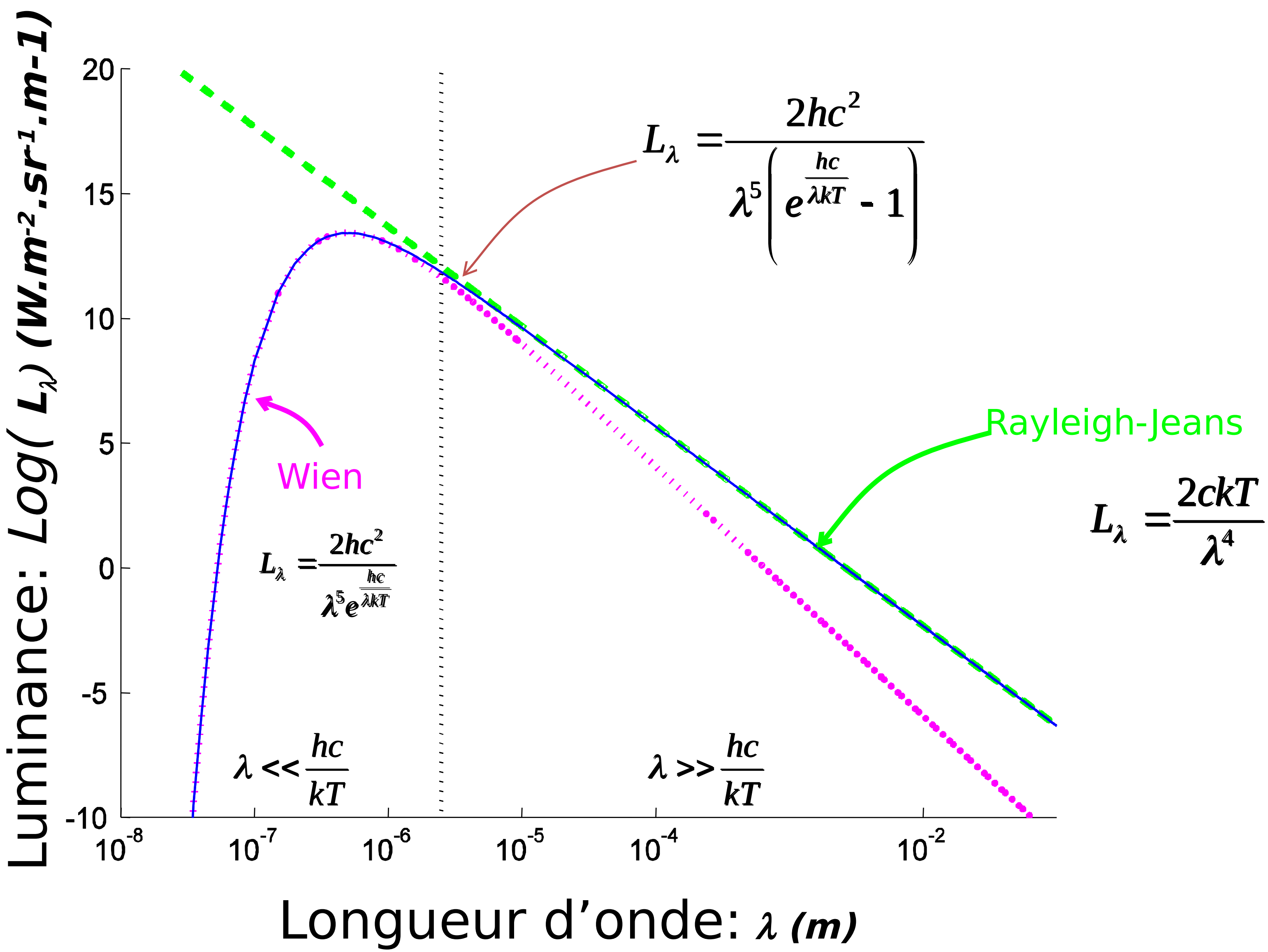
Cste Planck: h=6.62 10^{-34} SI

Cste Boltzmann: k=1.38 10^{-23} SI

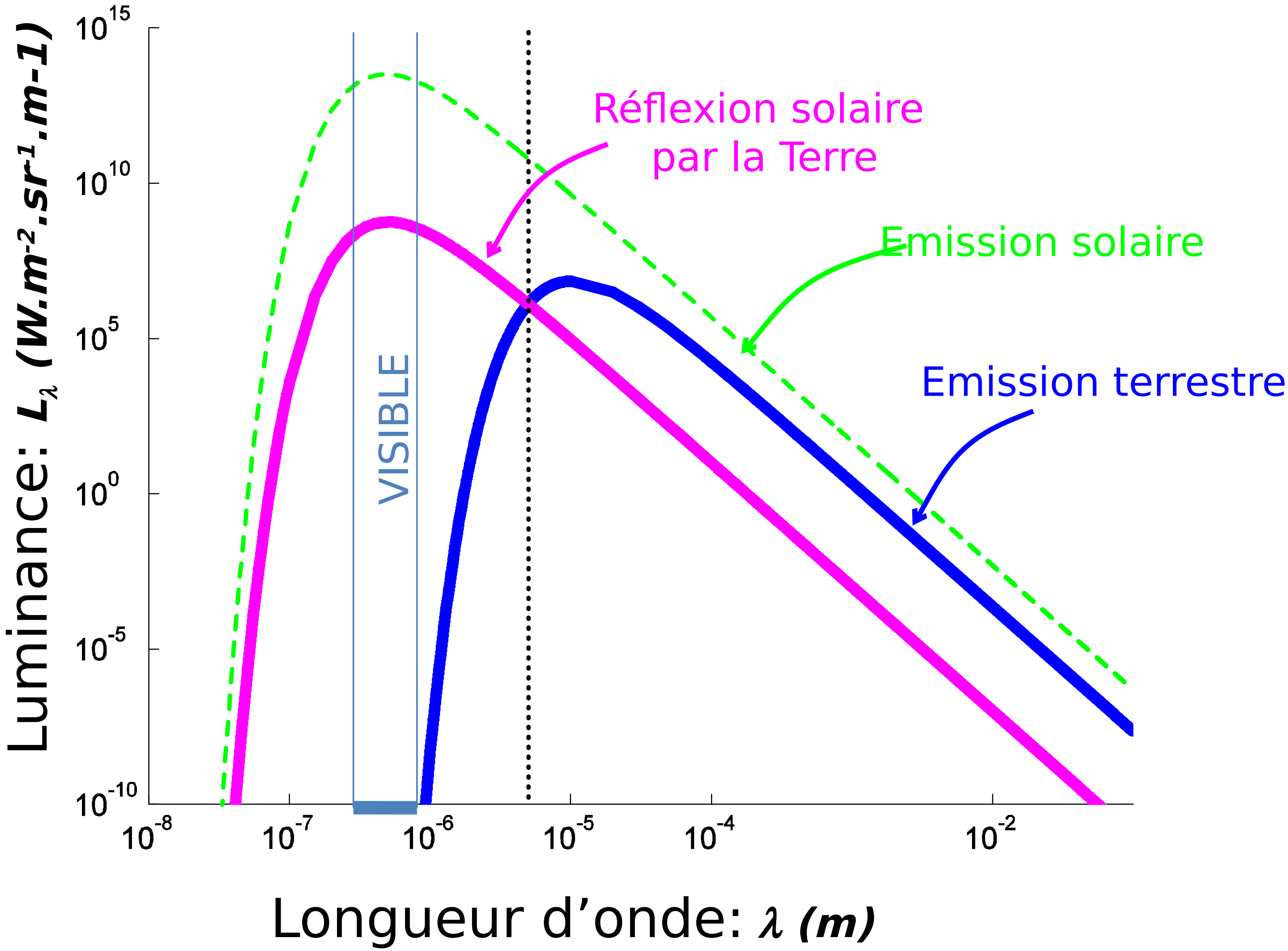
Cél. de la lumière: c= 3 10^8 m.s^{-1}

A = 2.898 10^{-3}

Rayonnement du corps noir: Approximations de Wien et de Rayleigh-Jeans



Le Rayonnement électromagnétique en provenance de la Terre



ermique + hyperfréquences passives (5 μm – 10 m
ayonnement émis par les surfaces)

Corps Noir (idéal): $L_\lambda = \dfrac{2ckT}{\lambda^4}$

Luminance du corps étudié

Luminance du corps noir équivalent à même température thermodynamique

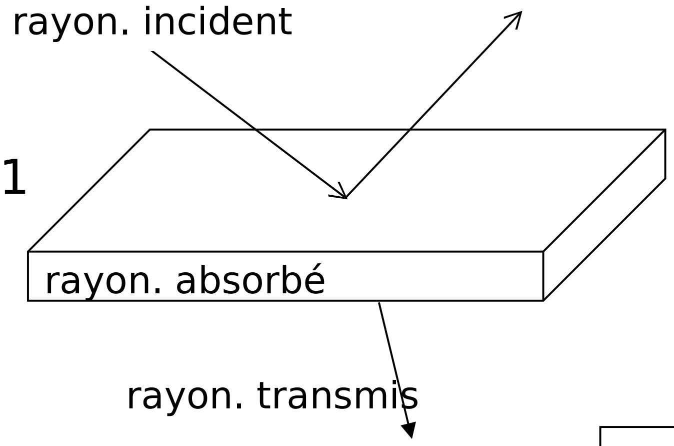
corps gris (naturels) $L_\lambda = \varepsilon(\lambda)\, L_\lambda^{cn}$

$0 \leq \varepsilon(\lambda) \leq 1$

mpérature de brillance T_b: *température thermodynamique du corps noir qui émettrait le même rayonnement que le corps étudié*

$$\frac{2ckT_b}{\lambda^4} = \varepsilon \frac{2ckT}{\lambda^4} \quad \Rightarrow \quad T_b = \varepsilon\, T$$

Conservation de l’énergie



$$0 \leq \begin{matrix} \rho_\lambda \\ \alpha_\lambda \\ \tau_\lambda \end{matrix} \leq 1$$

réflectance $\rho_\lambda = \dfrac{radiation \quad réfléchie}{radiation \quad incidente}$

absorptance $\alpha_\lambda = \dfrac{radiation \quad absorbée}{radiation \quad incidente}$

transmittance $\tau_\lambda = \dfrac{radiation \quad transmise}{radiation \quad incidente}$

$$\boxed{\rho_\lambda + \tau_\lambda + \alpha_\lambda = 1}$$

Cas particuliers:

Corps noir: $\rho = \tau = 0 \qquad \alpha = 1$
Corps opaque: $\tau = 0 \qquad \alpha + \rho = 1$

Loi de Kirchoff:
$\boldsymbol{\alpha = \varepsilon}$
(équilibre thermodynamique)

$\Rightarrow$ Corps noir: $\varepsilon = \alpha = 1$
Corps opaque: $\varepsilon + \rho = 1$

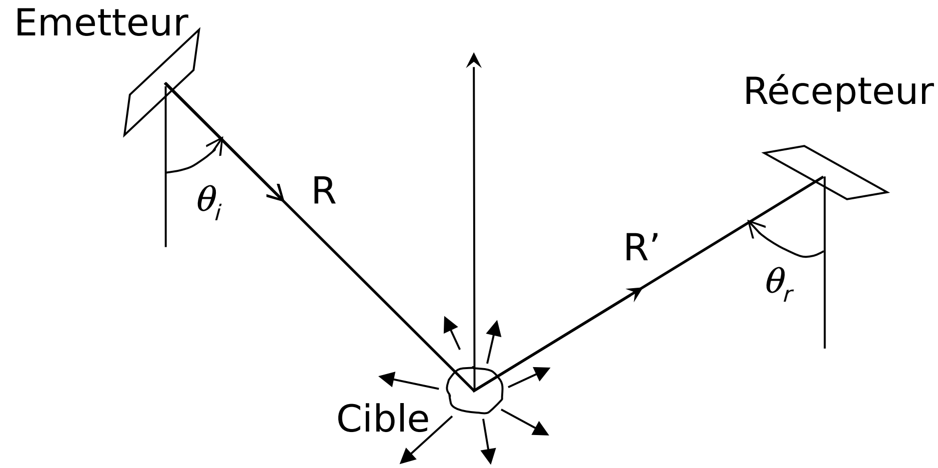
Radiometric quantities

***Integrated quantities* ***			***Spectral quantities*****		
Flux lumineux	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	*(W)*	***Flux spectral:***	$\Phi_\lambda = \frac{dQ}{dt}$	*(W.m^{-1})*
Emittance	***M***	(W.m^{-2})	***Emittance Spectrale***	M_λ	(W.m^{-2}. m^{-1})
Eclairement	***E***	(W.m^{-2})	***Eclairement spectral***	E_λ	(W.m^{-2}. m^{-1})
Intensité	***I***	(W.sr^{-1})	***Intensité spectrale***	I_λ	(W.sr^{-1}. m^{-1})
Luminance:	***L***	(W.m^{-2}.sr^{-1})	***Luminance Spectrale:***	L_λ	(W.m^{-2}.sr^{-1}.m^{-1})

er the whole or part of the
ectromagnetic spaectrum

** For a given wavelength
Sometimes, μm or le nm is preferd
than m for the unit associated to the

L'EQUATION RADAR



uissance émise par un radar:

$$P_i = \frac{P_e G_e}{4\pi} d\Omega$$

clairement reçu à distance R:

$$E_i = \frac{P_e G_e}{4\pi R^2}$$

uissance interceptée pas cible : $P_s = \frac{P_e G_e}{4\pi R^2} SER$

Section efficace radar (m^2)

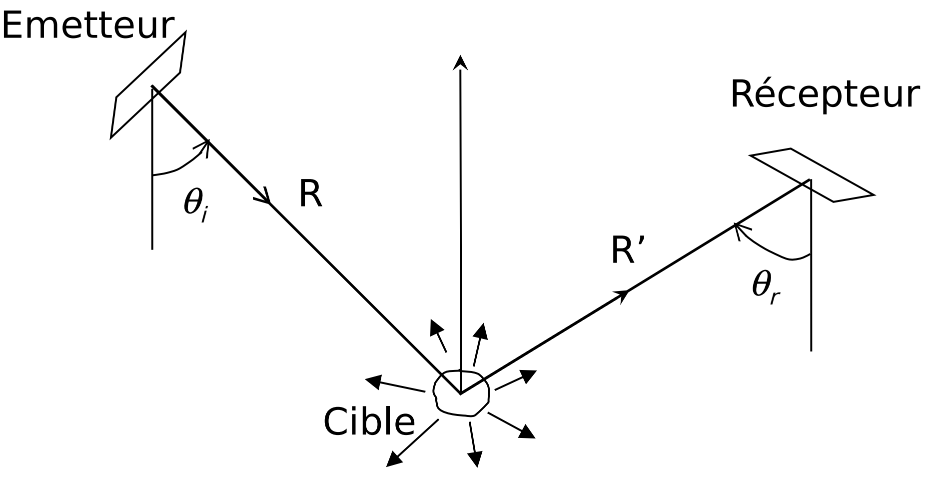
ensité émise par la cible (sup. isotrope) : $I = \frac{P_s}{4\pi} = \frac{P_e G_e}{4\pi R^2} \frac{SER}{4\pi}$

uissance reçue par surface dS à distance R' : $P_r = I\, d\Omega = I \frac{dS}{R'^2} = \frac{P_e G_e}{4\pi R^2} \frac{SER}{4\pi R'^2} dS$

L'EQUATION RADAR (2)

uis. reçue par dS à distance R':

$$P_r = \frac{P_e G_e}{4\pi R^2} \frac{SER}{4\pi R'^2} dS$$



Eclairement reçu à distance R':

$$E_r = \frac{P_e G_e}{4\pi R^2} \frac{SER}{4\pi R'^2}$$

Puissance reçue par antenne:

$$P_r = E_r \, dA = E_r \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} = \frac{P_e G_e}{4\pi R^2} \frac{SER}{4\pi R'^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$$

L'EQUATION RADAR (3)

uissance reçue par antenne: $dP_r = \frac{P_e G_e}{4\pi R^2} \frac{SER}{4\pi} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi R^2}$

as de cibles étendues:

coefficient de rétrodiffusion radar: $\sigma^0 = \frac{SER}{d\Sigma}$ (m²/m²)

$$dP_r = \frac{P_e G_e}{4\pi R^2} \frac{\sigma^0 d\Sigma}{4\pi} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi R^2}$$

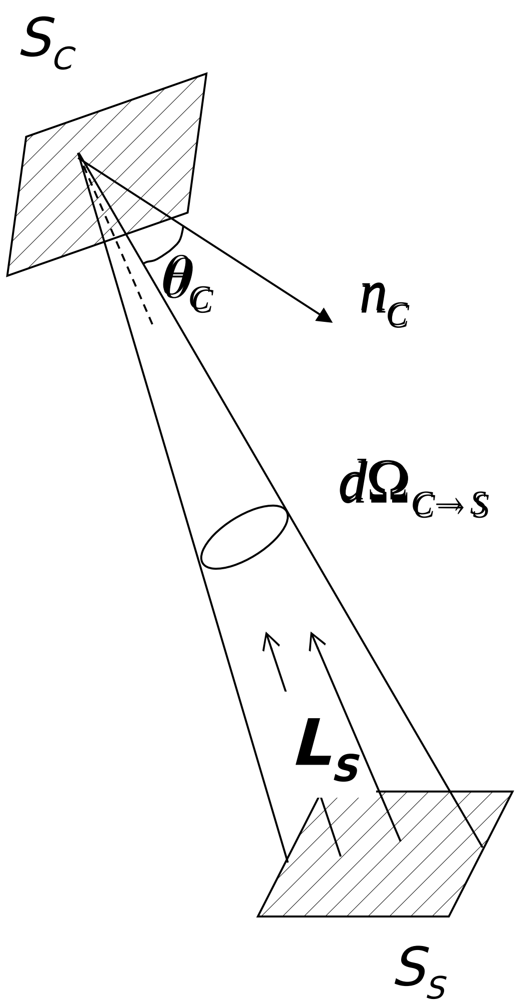
$$\boxed{\langle P_r \rangle = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{P_e \sigma^0}{R^4} \iint_{Surf.obs.} G_e G_r \, d\Sigma}$$

mètres surface estimés par un capteur

Paramètres systèmes

Flux mesuré:

$$\Phi = L_s \cos\theta_C \, S_C \, \Omega_{C \to S}$$



==> *estimation de* L_s

Optique:

réflectance $\rho_b = \dfrac{\pi L_r}{E_i}$

IR Therm. Mondes passives:

Température de brillance: $T_b = \dfrac{2ckL_\lambda}{\lambda^4} = \varepsilon_\lambda T$

Radar:

Coefficient de rétrodiffusion: $\sigma^0 \propto \rho_b = \dfrac{\pi L_r}{E_i}$