Chapitre 6.1 – L'intensité du rayonnement solaire

La luminosité du Soleil

À partir de caractéristique du Soleil comme une estimation[1] de sa température à sa surface de 5772 K et son rayon équatorial de 696 342 km, nous pouvons évaluer la luminosité à la surface du Soleil ainsi que sa puissance radiative à l'aide de la loi Stefan-Boltzmann :

Luminosité surfacique du Soleil	Luminosité du Soleil
$I_\odot = 6,293 \times 10^7 \ \text{W/m}^2$	$L_\odot = L_\text{S} = 3,83 \times 10^{26} \ \text{W}$

Preuve :

À partir de la loi de Stefan-Boltzmann $I = \sigma T^4$, évaluons $L_\odot$:

$$I = \sigma T^4 \quad \Rightarrow \quad (I_\odot) = \sigma T^4 \qquad \text{(Remplacer termes)}$$

$$\Rightarrow \quad I_\odot = \left(5,67 \times 10^{-8} \ \text{W}/\left(\text{m}^2 \times \text{T}^4\right)\right)(5772 \ \text{K})^4 \qquad \text{(Remplacer valeurs numériques)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{I_\odot = 6,293 \times 10^7 \ \text{W/m}^2} \quad \blacksquare \qquad \text{(Évaluer } I_\odot\text{)}$$

En considérant le Soleil comme une sphère, évaluons la puissance totale radiative du Soleil :

$$I = \frac{P}{A} \quad \Rightarrow \quad P = IA \qquad \text{(Isoler } P\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad P = I\left(4\pi r^2\right) \qquad \text{(Remplacer } A = 4\pi r^2$$

$$\Rightarrow \quad (L_\odot) = (I_\odot) 4\pi \left(R_\text{Soleil}\right)^2 \qquad \text{(Remplacer terme)}$$

$$\Rightarrow \quad L_\odot = \left(6,293 \times 10^7 \ \text{W/m}^2\right) 4\pi \left(696342 \times 10^3 \ \text{m}\right)^2 \qquad \text{(Remplacer valeurs numériques)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{L_\odot = 3,8345 \times 10^{26} \ \text{W/m}^2} \quad \blacksquare \qquad \text{(Évaluer } L_\odot\text{)}$$

La constante solaire

À partir de la luminosité du Soleil et de la distance Terre-Soleil, nous pouvons évaluer la constante solaire correspondant à l'intensité lumineuse su Soleil sur l'orbite de la planète Terre :

$$S = 1,36 \ \text{kW/m}^2$$

(Intensité toutes longueurs d'ondes confondues)

Preuve :

À partir de la distance Terre-Soleil estimé à une unité astronomique (1 UA) de

$$D_\text{Terre-Soleil} = 1 \ \text{UA} = 1,496 \times 10^{11} \ \text{m} \quad ,$$

[1] Référence : https://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil

nous pouvons évaluer l'intensité lumineuse du Soleil à cette distance considérant le Soleil comme étant une source omnidirectionnelle (isotrope) :

$$I = \frac{P}{A} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{P}{\left(4\pi r^2\right)} \qquad \text{(Appro. de la source omnidirectionnelle)}$$

$$\Rightarrow \quad (S) = \frac{(L_S)}{4\pi\left(D_{\text{Terre-Soleil}}\right)^2} \qquad \text{(Remplacer termes)}$$

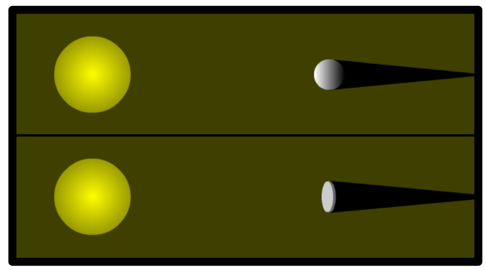
$$\Rightarrow \quad (S) = \frac{\left(3{,}83\times10^{26}\ \text{W}\right)}{4\pi\left(1{,}496\times10^{11}\ \text{m}\right)^2} \qquad \text{(Remplacer valeurs numériques)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{S = 1362\ \text{W/m}^2} \quad \blacksquare \qquad \text{(Évaluer } S\text{)}$$

Le flux d'une source directionnelle sur une demi-sphère

Afin d'évaluer la portion d'énergie que la Terre reçoit du Soleil, il nous faudra évaluer le flux énergétique intercepté par une demi-sphère correspondant à la partie éclairée de la Terre.

De plus, si le rayonnement est uniforme en module et orientation sur la surface de la demi-sphère, alors la surface d'une demi-sphère de rayon r d'interception du rayonnement est équivalent à la surface d'un disque de rayon r :

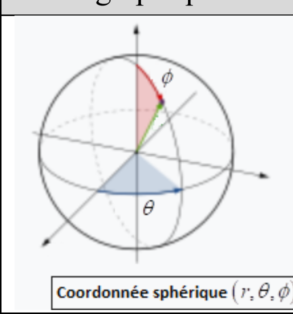


L'équivalence du flux sur une surface de demi-sphère et d'un disque.

Flux par intégral	Flux uniforme sur une surface A_{int}	Flux d'un rayonnement uniforme $\vec{I}_0$ sur une surface sphérique
$\Phi_\gamma = \iint \vec{I}\cdot \mathrm{d}\vec{A}$	$\Phi_\gamma = I_0 A_{\text{int}}$	$\Phi_{\text{sphère}} = \Phi_{\text{disque}} = I_0\, \pi r^2$

Preuve :

Considérons un rayonnement $\vec{I}$ constant que nous devons évaluer traversant la surface d'une demi-sphère de rayon r. En raison de la forme de la surface (demi-sphère), nous utiliserons des éléments infinitésimaux de surface $\mathrm{d}\vec{A}$ en coordonnées sphériques (r,θ,ϕ) :

Coordonnée correspondante	Bornes dans les paramètres (r,θ,ϕ)	Élément de surface $\mathrm{d}\vec{A}$	Représentation graphique
$x = r\sin(\phi)\cos(\theta)$ $y = r\sin(\phi)\sin(\theta)$ $z = r\cos(\phi)$	$r\in[0,\infty]$ (rayon de la sphère) $\theta\in[0,2\pi]$ (angle du plan xy) $\phi\in[0,\pi]$ (angle à l'axe z)	$\mathrm{d}\vec{A} = r^2\sin(\phi)\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}\phi\,\hat{r}$	

Pour déterminer l'orientation $\hat{r}$ de la normale à la surface de l'élément infinitésimal $\mathrm{d}\vec{A}$, nous utiliserons le fait que la coordonnée d'un point (x, y, z) sur une sphère de rayon $r = 1$ est exactement identique à la normale à la surface ce qui nous donnera

$$\hat{r} = \sin(\phi)\cos(\theta)\vec{i} + \sin(\phi)\sin(\theta)\vec{j} + \cos(\phi)\vec{k} \quad .$$

Pour simplifier notre calcul, nous allons considérer un <u>rayonnement constant parallèle à l'axe *x*</u>, mais orienté selon l'axe négatif afin de représenter un rayonnement pointant vers l'intérieur de la demi-sphère ce qui donnera le rayonnement

$$\vec{I} = -I_0\,\vec{i} \quad .$$

Évaluons maintenant le flux Φ du rayonnement $\vec{I}$ traversant vers l'intérieur de la demi-sphère de rayon égal à r :

$$\Phi = \iint \vec{I} \cdot \mathrm{d}\vec{A} \qquad \text{(Définition du flux)}$$

$$\Rightarrow \quad \Phi = \iint \left(-I_0\,\vec{i}\right) \cdot \mathrm{d}\vec{A} \qquad \text{(Remplacer } \vec{I} = I_0\,\vec{i}\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \Phi = -I_0 \int_{\theta=-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\phi=0}^{\pi} \vec{i} \cdot \left(r^2 \sin(\phi)\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}\phi\,\hat{r}\right) \qquad \text{(} \mathrm{d}\vec{A} = r^2\sin(\phi)\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}\phi\,\hat{r} \text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \Phi = -I_0\, r^2 \int_{\theta=-\pi/2}^{\pi/2} \mathrm{d}\theta \int_{\phi=0}^{\pi} \sin(\phi)\,\mathrm{d}\phi \;\; \vec{i} \cdot \hat{r} \qquad \text{(Séparer l'intégrale indépendante)}$$

$$\Rightarrow \quad \Phi = -I_0\, r^2 \int_{\theta=-\pi/2}^{\pi/2} \mathrm{d}\theta \int_{\phi=0}^{\pi} \sin(\phi)\,\mathrm{d}\phi \;\; \vec{i} \cdot \left(\sin(\phi)\cos(\theta)\vec{i} + \sin(\phi)\sin(\theta)\vec{j} + \cos(\phi)\vec{k}\right) \qquad \text{(Remplacer } \hat{r}\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \Phi = -I_0\, r^2 \int_{\theta=-\pi/2}^{\pi/2} \mathrm{d}\theta \int_{\phi=0}^{\pi} \sin(\phi)\,\mathrm{d}\phi \;\; \left(\sin(\phi)\cos(\theta)\right) \qquad \text{(Effectuer produit scalaire)}$$

$$\Rightarrow \quad \Phi = -I_0\, r^2 \int_{\theta=-\pi/2}^{\pi/2} \cos(\theta)\,\mathrm{d}\theta \int_{\phi=0}^{\pi} \sin^2(\phi)\,\mathrm{d}\phi \qquad \text{(Séparer l'intégrale indépendante)}$$

$$\Rightarrow \quad \Phi = -I_0\, r^2 \int_{\theta=-\pi/2}^{\pi/2} \cos(\theta)\,\mathrm{d}\theta \int_{\phi=0}^{\pi} \left(\frac{1-\cos(2\phi)}{2}\right)\mathrm{d}\phi \qquad \text{(Identité : } \sin^2(x) = \frac{1-\cos(2x)}{2}\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \Phi = -\frac{I_0\, r^2}{2} \int_{\theta=-\pi/2}^{\pi/2} \cos(\theta)\,\mathrm{d}\theta \left(\int_{\phi=0}^{\pi} \mathrm{d}\phi - \int_{\phi=0}^{\pi} \cos(2\phi)\,\mathrm{d}\phi\right) \qquad \text{(Distribuer l'intégrale)}$$

$$\Rightarrow \quad \Phi = -\frac{I_0\, r^2}{2} \left[\sin(\theta)\right]_{-\pi/2}^{\pi/2} \left(\left[\phi\right]_0^{\pi} - \left[\frac{\sin(2\phi)}{2}\right]_0^{\pi}\right) \qquad \text{(Résoudre les intégrales)}$$

$$\Rightarrow \quad \Phi = -\frac{I_0\, r^2}{2} \left((1)-(-1)\right)\left(\left((\pi)-(0)\right) - \left(\frac{(0)}{2} - \frac{(0)}{2}\right)\right) \qquad \text{(Évaluer l'intégrale)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\Phi = -I_0\, \pi r^2} \qquad \blacksquare \qquad \text{(Simplifier, négatif pour flux entrant)}$$

L'irradiance incidente moyenne du rayonnement solaire

À partir de la constante solaire S, nous pouvons évaluer une irradiance incidente moyenne $\bar{I}_{\text{inc}}$ du rayonnement solaire sur l'ensemble de la surface de la Terre en considérant la courbure de la Terre ainsi que la rotation de celle-ci exposant que la moitié de sa surface au rayonnement du Soleil (responsable des jours et nuits).

En exploitant l'équivalence du calcul de flux $\Phi_{\text{demi-sphère}} = \Phi_{\text{disque}} = I_0\,\pi r^2$ pour le rayonnement du Soleil, nous obtenons la relation suivante :

https://education.nationalgeographic.org/resource/the-reason-for-the-seasons/
Exposition de la moitié de la surface de la Terre au Soleil.

L'irradiance incidente moyenne	L'irradiance incidente moyenne sur Terre
$\bar{I}_{\text{inc}} = \dfrac{\Phi_\gamma}{A_{\text{inc}}}$	$\bar{I}_{\text{inc}} = \dfrac{S}{4} = 340\ \text{W/m}^2$

Preuve :
Pour évaluer l'irradiance incidente moyenne $\bar{I}_{\text{inc}}$, il suffit d'évaluer le flux Φ_γ associé à la constante solaire S reçu sur la surface de la Terre et de le diviser par la surface incidente totale de la Terre :

$$\bar{I}_{\text{inc}} = \frac{\Phi_\gamma}{A_{\text{inc}}} \quad \Rightarrow \quad \bar{I}_{\text{inc}} = \frac{(\Phi_{\text{disque}})}{(A_{\text{sphère}})} \qquad (\Phi_\gamma = \Phi_{\text{disque}} \text{ et } A_{\text{inc}} = A_{\text{sphère}})$$

$$\Rightarrow \quad \bar{I}_{\text{inc}} = \frac{(S\,\pi r^2)}{A_{\text{sphère}}} \qquad (\Phi_{\text{disque}} = I_0\,\pi r^2 \text{ et } I_0 = S)$$

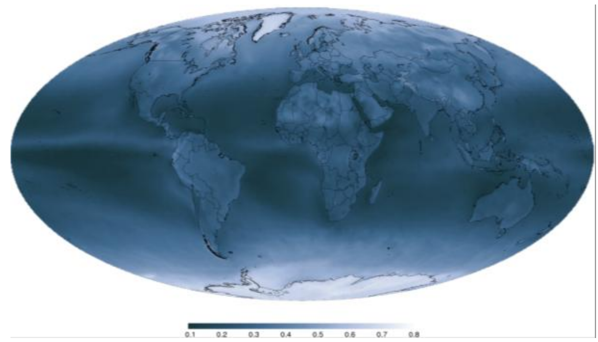
$$\Rightarrow \quad \bar{I}_{\text{inc}} = \frac{S\,\pi (R_T)^2}{(4\pi R_T{}^2)} \qquad (\text{Remplacer } A_{\text{sphère}} = 4\pi R_T{}^2 \text{ et } r = R_T)$$

$$\Rightarrow \quad \bar{I}_{\text{inc}} = \frac{S}{4} \quad \blacksquare \qquad (\text{Simplifier})$$

En moyenne, sur une journée et sur l'ensemble de la surface de la Terre, pour chaque m^2 de surface de la Terre, le Soleil expose un rayonnement sur la Terre en haute atmosphère à une puissance de 340 W ce qui revient à une irradiance incidente moyenne de 340 W/m^2.

Albédo

L'albédo α est un paramètre macroscopique qui détermine une fraction du rayonnement solaire qui sera réfléchi directement dans l'espace. La fraction de rayonnement réfléchi n'aura ainsi aucune interaction (échange énergétique) avec les différents composants atmosphériques, terrestres ni océaniques de la Terre outre que de retourner vers l'espace.


Cartographie de l'albédo à la surface de la Terre.

Pour la planète Terre, l'albédo moyen[2] est estimé à une valeur de

$$\alpha = 0{,}3 .$$

Il est à noter que ce paramètre est très complexe à déterminer :

- L'albédo α n'est pas constant sur la surface de la Terre :
    - Les surfaces enneigées réfléchissent davantage la lumière.
    - Les surfaces océaniques absorbent davantage la lumière.

- L'albédo α varie dans le temps :
    - Selon les saisons, des surfaces peuvent se couvrir de neige.

Albédo et l'irradiance absorbée et réfléchi

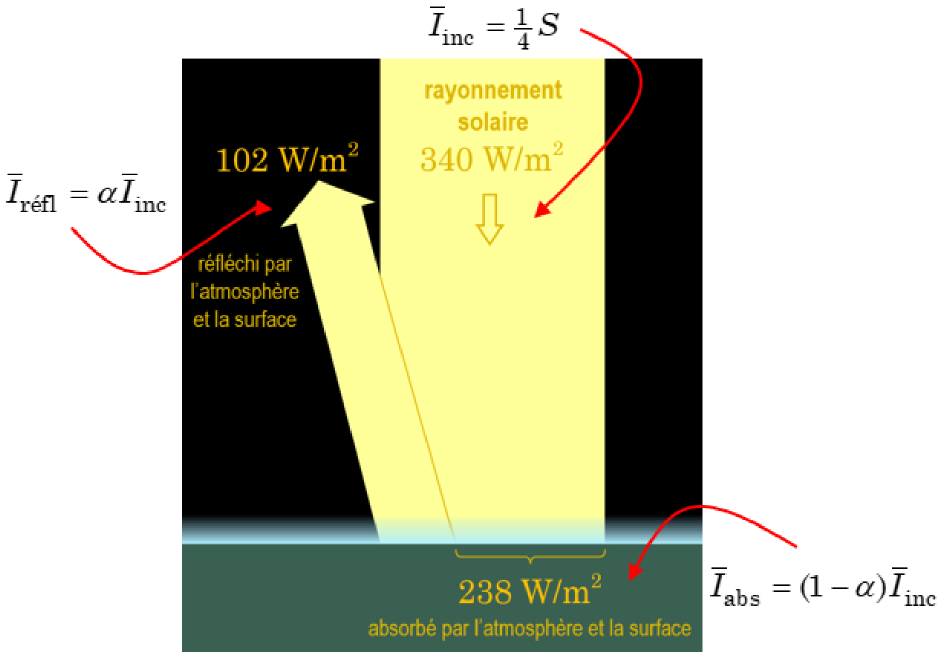
À partir de l'albédo α et de l'irradiance incidente $\overline{I}_{\text{inc}}$, nous pouvons évaluer l'irradiance absorbée $\overline{I}_{\text{abs}}$ et l'irradiance réfléchie $\overline{I}_{\text{réfl}}$ de notre planète Terre :

Constance solaire de l'étoile	Irradiance incidente sur la planète	Irradiance absorbée par la planète	Irradiance réfléchie par la planète
$S = \dfrac{L_{\text{É}}}{4\pi {D_{\text{É-P}}}^2}$	$\overline{I}_{\text{inc}} = \dfrac{S}{4}$	$\overline{I}_{\text{abs}} = (1-\alpha)\overline{I}_{\text{inc}}$	$\overline{I}_{\text{réfl}} = \alpha \overline{I}_{\text{inc}}$

où S : Constance solaire de l'étoile à l'emplacement de la planète (W/m^2).
$L_{\text{É}}$: Luminosité de l'étoile (W).
$D_{\text{É-P}}$: Distance entre l'étoile et la planète (m).
$\overline{I}_{\text{inc}}$: Irradiance incidente moyenne du rayonnement de l'étoile (W/m^2).
α : Facteur d'albédo (sans unité).
$\overline{I}_{\text{abs}}$: Irradiance moyenne absorbée (W/m^2).
$\overline{I}_{\text{réfl}}$: Irradiance moyenne réfléchie (W/m^2).

[2] Cette moyenne est réalisée sur l'ensemble de la surface de la planète et sur plusieurs années.

Pour la Terre éclairé par le Soleil, nous avons $L_{É} = L_{S}$, $D_{É\text{-}P} = 1\,\text{UA}$, $S = 1{,}36\ \text{kW/m}^2$ et $\alpha = 0{,}3$ ce qui nous les résultats suivants :

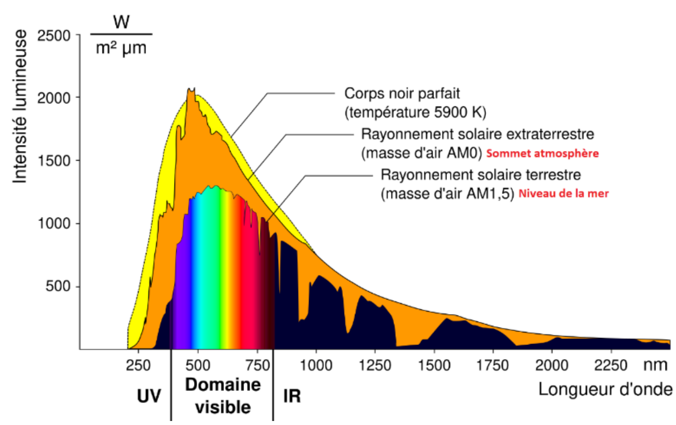


Le rayonnement du Soleil à différentes hauteurs en atmosphère de la Terre

Lorsque l'on considère l'atmosphère de la Terre pour évaluer irradiance absorbée à la surface de celle-ci provenant du Soleil, le résultat devient beaucoup plus complexe à décrire car il faudrait considérer :

- Le Soleil n'est pas un corps noir parfait.
- Il y a des raies d'absorption à même le Soleil.
- Il y a des raies d'absorption dans l'atmosphère de la Terre.

Pour toutes ces raisons, l'estimation de 238 W/m² d'irradiation absorbée ne permet pas de distinguer facilement la distribution des longueurs d'onde de lumière en jeu, leur lieu d'interaction (atmosphère, terrestre, océan) ni la nature de leur interaction (réflexion, absorption, diffusion).



https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire
Spectre de la lumière du Soleil intercepté à différente altitude de la Terre.