



Chapitre 2. Le Soleil comme source d'énergie

© NASA

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Spectre du Soleil
3. Position du Soleil
4. Rayonnement solaire sur une surface captatrice

1. Introduction

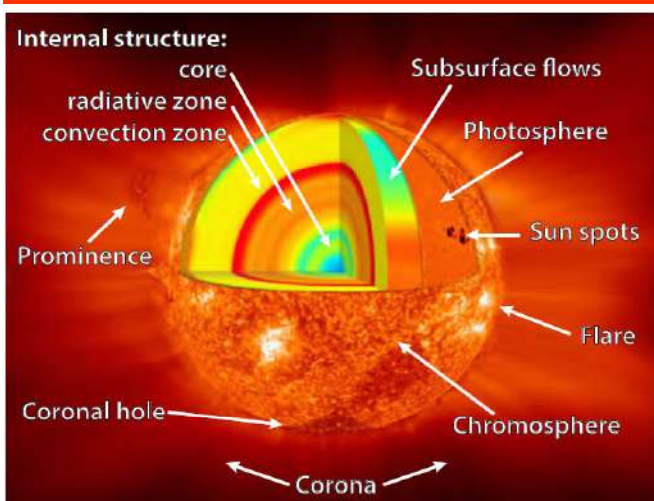
1. Introduction

1.1. Le Soleil : quelques caractéristiques

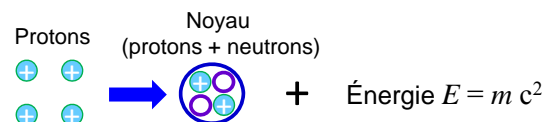
1.2. Spectre électromagnétique

1.3. Un peu de vocabulaire

1.1. Le Soleil



Le Soleil est composé d'un mélange de gaz (plasma) avec une prédominance en hydrogène (92%). Au cœur de l'étoile, les conditions de température et de pression sont telles que les électrons sont séparés des noyaux (protons + neutrons) des atomes et sont propices à une réaction géante de **fusion thermonucléaire** :



Hydrogène → Hélium + Énergie cinétique + rayons gamma + neutrinos

Cette énergie est transférée à la surface du Soleil, d'où s'échappent uniformément dans tout l'espace un **rayonnement électromagnétique** et aussi des particules (vent solaire).

Distance moyenne à la Terre d	$149,6 \times 10^6$ km (1 unité astronomique, UA)
Rayon R_s	696×10^3 km (≈ 109 fois celui de la Terre)
Volume	$1,3 \times 10^6$ fois celui de la Terre
Masse	$1,993 \times 10^{27}$ kg (332 000 fois celle de la Terre)
Masse volumique (au cœur)	$> 10^5$ kg·m ⁻³ (plus de 100 fois celle de l'eau)
Pression (au cœur)	$> 10^9$ atm
Température (au cœur)	15×10^6 K
Température (à la surface) T_s	5800 K
Puissance rayonnée P_s	384×10^{24} W

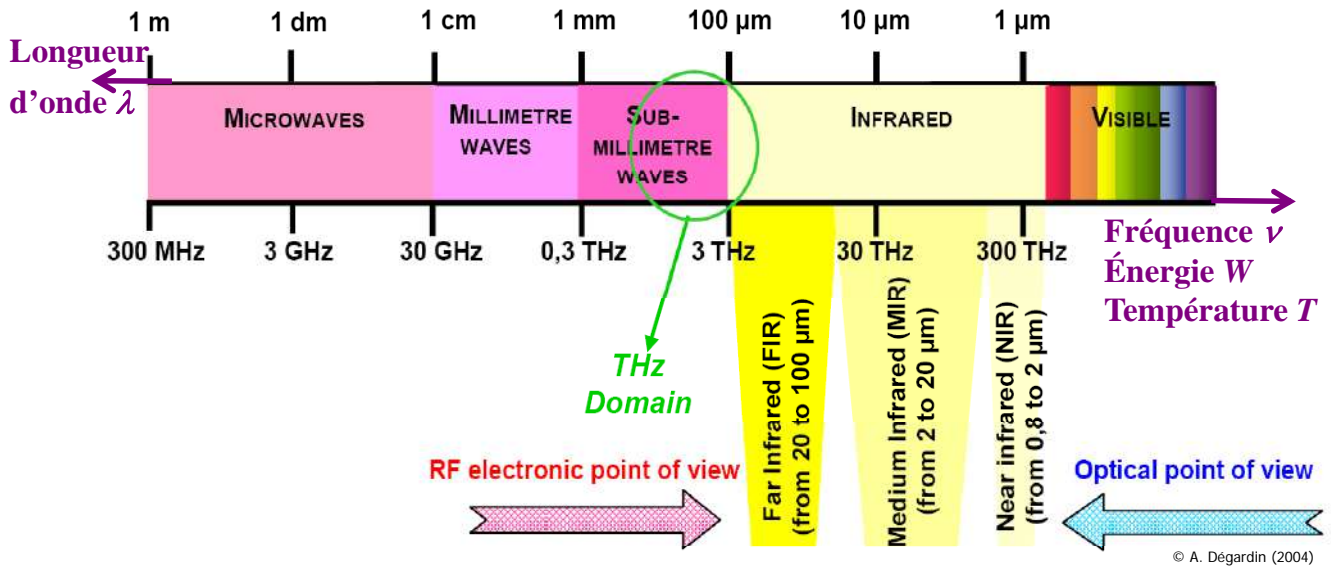
1.2. Spectre électromagnétique

$$W_{(J)} = h \nu_{(Hz)} = hc / \lambda_{(m)} = k_B T_{(K)}$$

$$h = 6,6262 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$c = 2,997928 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

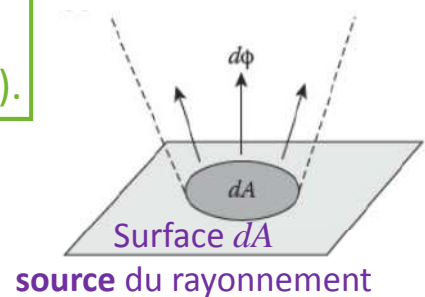
$$k_B = 1,3803 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$$



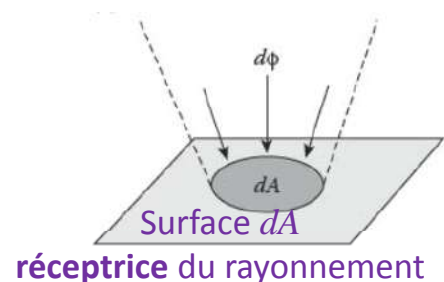
© A. Dégardin (2004)

1.3. Un peu de vocabulaire (1)

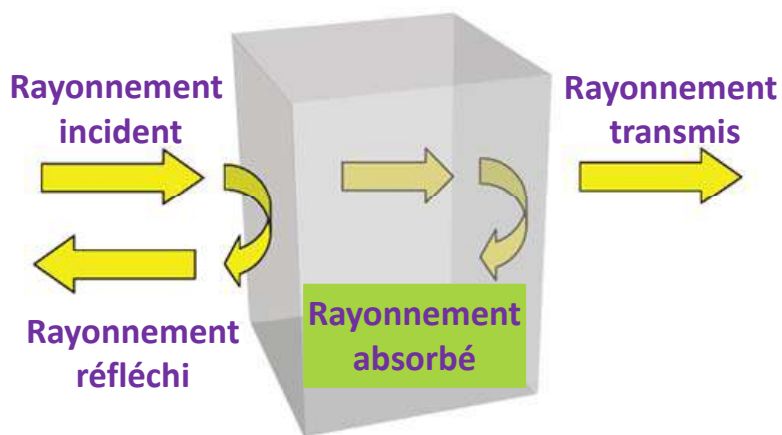
Exitance (radiant exitance) : M (unité : $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
C'est la puissance qui quitte une surface (source).



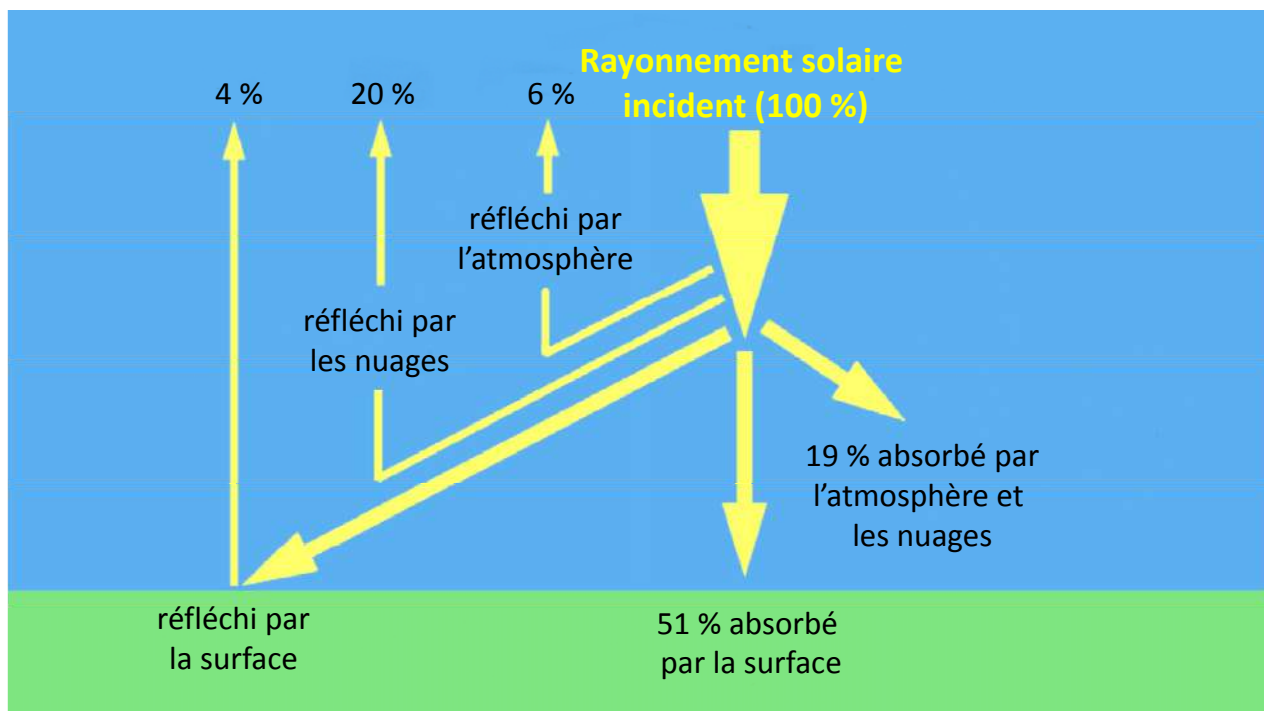
Irradiance (irradiance) ou éclairement (insolation) : E (unité : $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
C'est la puissance qui arrive sur une surface (détecteur, capteur).



1.3. Un peu de vocabulaire (2)



1.3. Un peu de vocabulaire (3)



2. Spectre du Soleil

2. Spectre du Soleil



Max Planck
(1858 – 1947)

2.1. Lois du rayonnement du corps noir

- a. Corps noir : définition
- b. Loi de Planck – Loi de Stefan-Boltzmann
- c. Loi de déplacement de Wien
- d. Constante solaire

2.2. Spectre solaire

- a. Extraterrestre
- b. Nombre de masse d'air



Josef Stefan
(1835 – 1893)



Ludwig Boltzmann
(1844 – 1906)



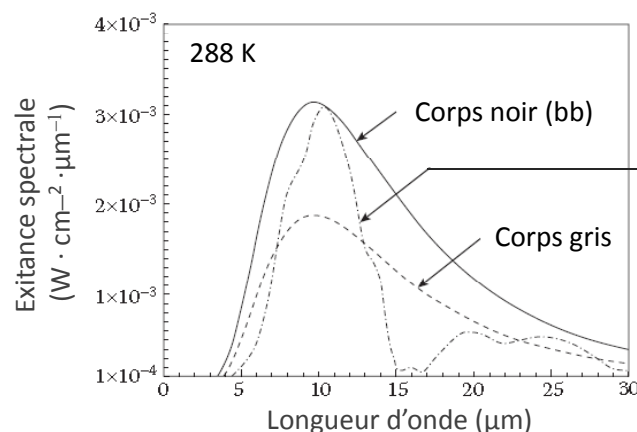
Wilhelm Wien
(1864 – 1928)

2.1. Lois du rayonnement du corps noir

a. Définition du corps noir

Tout corps porté à une température T émet un rayonnement.

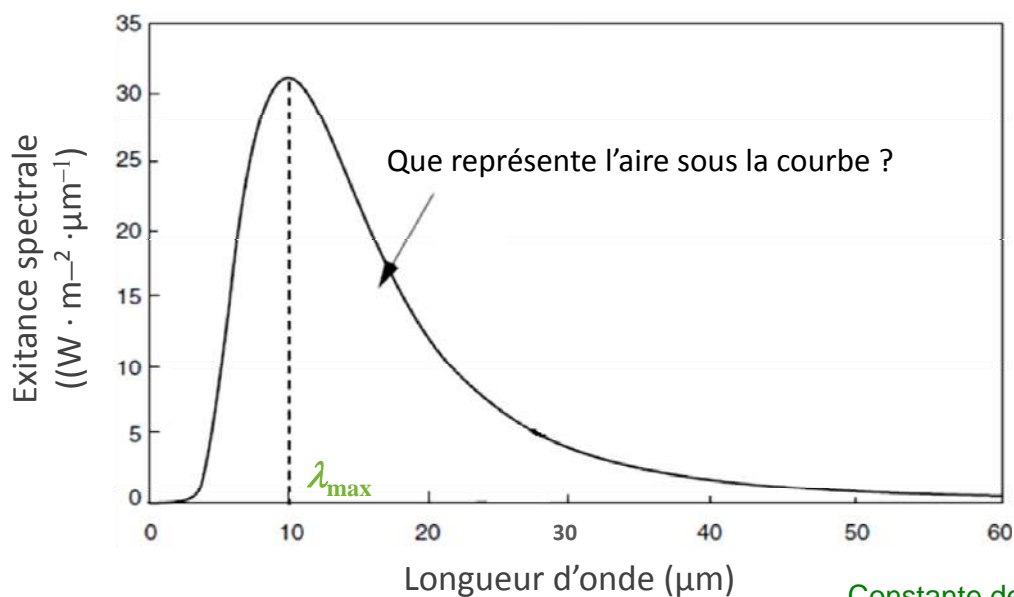
Corps noir (*black body*) : source thermique idéale
= absorbant parfait et émetteur parfait



Corps dont le rayonnement s'approche de celui du corps noir dans une gamme de longueurs d'onde sélectives

2.1.b. Loi de Planck – Loi de Stefan-Boltzmann

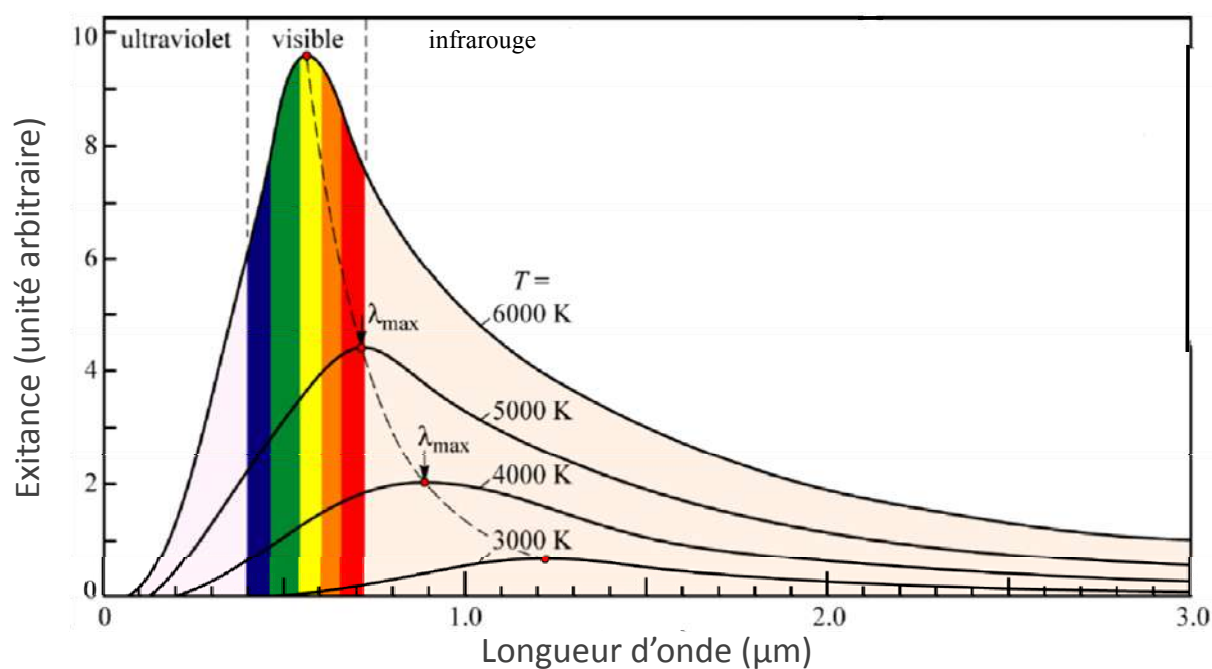
Courbe de l'**exitance spectrale** $M_{bb\lambda}$ d'un corps noir porté à $T_0 = 288\text{ K}$
(**expression de la loi de Planck**)



Constante de Stefan-Boltzmann

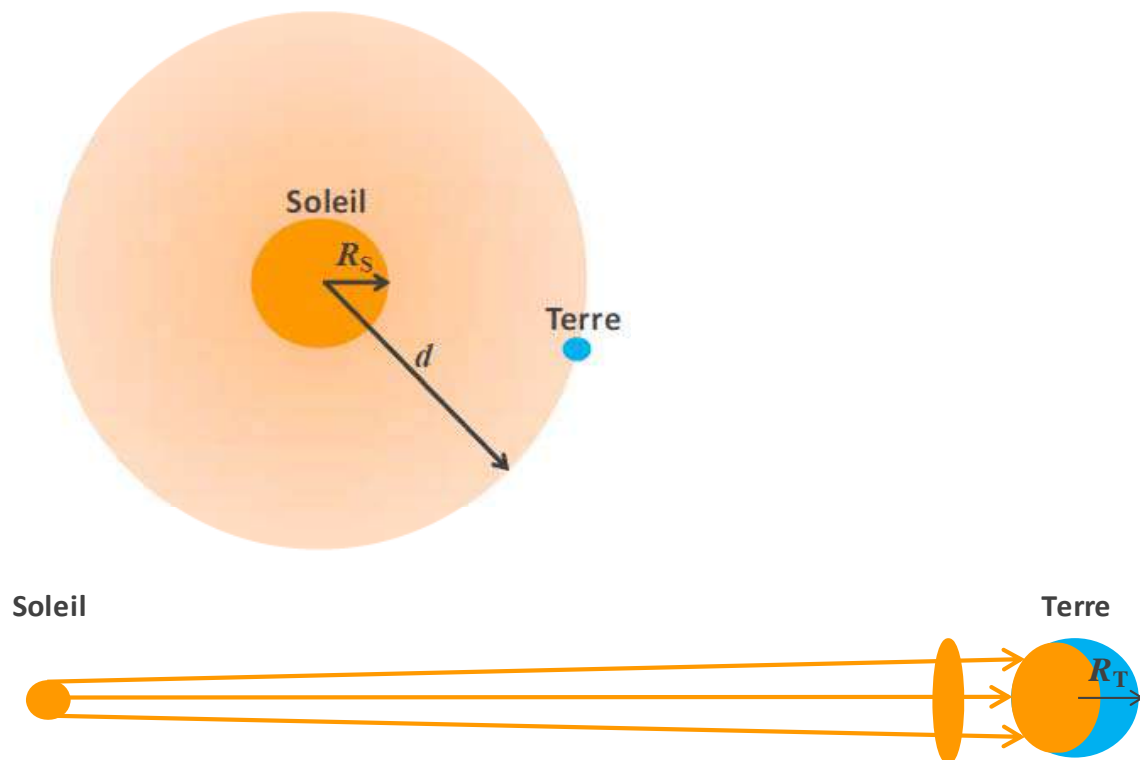
$$\sigma \approx 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

2.1.c. Loi de déplacement de Wien



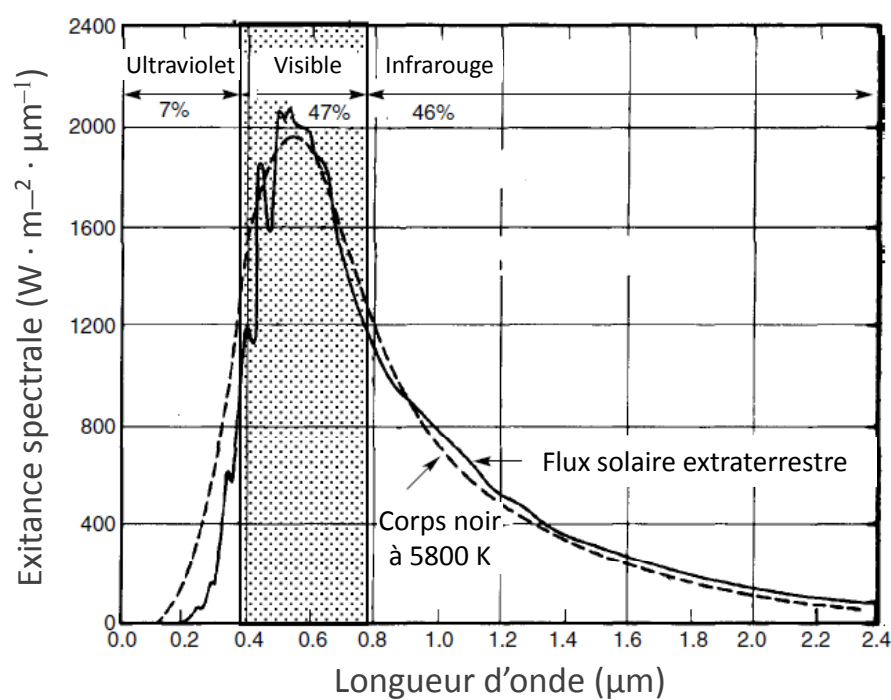
Source : © E.F. Schubert (2018)

2.1.d. Constante solaire



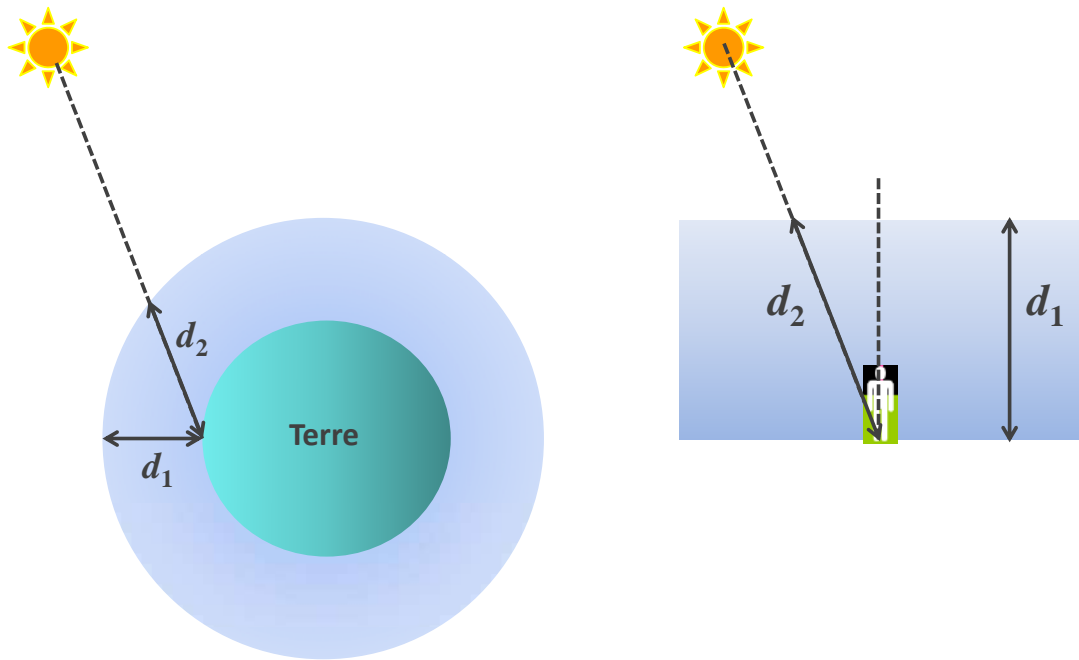
2.2. Spectre solaire

a. Extraterrestre

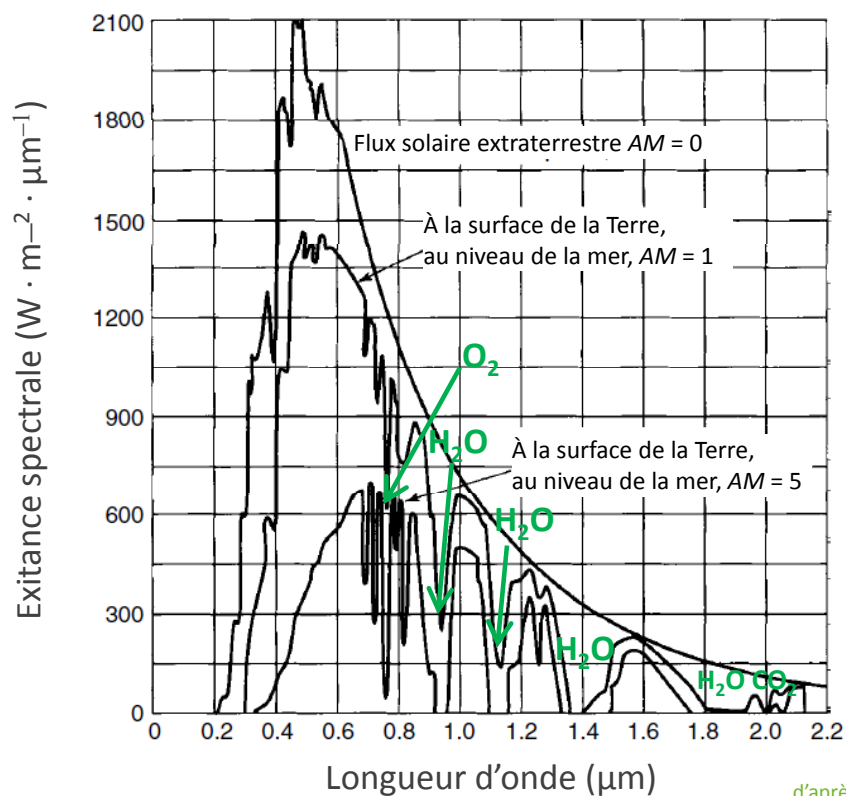


Source : Kuen et al. (1998),
d'après *Trans. ASHRAE* 64, 50 (1958).

2.2.b. Nombre de masse d'air (*air mass*) (1)



2.2.b. Nombre de masse d'air (*air mass*) (2)



Source : Kuen et al. (1998),
d'après *Trans. ASHRAE* 64, 50 (1958).

3. Position du Soleil

3. Position du Soleil

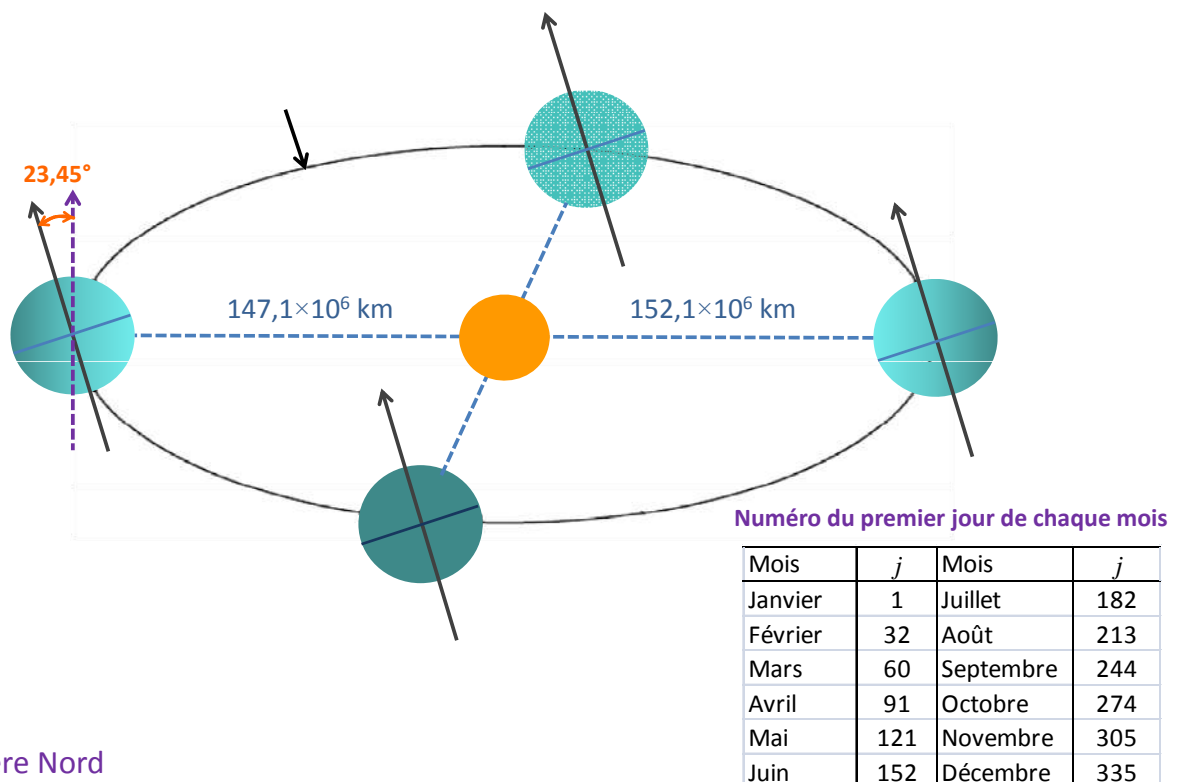
3.1. Système Terre-Soleil

3.2. Comment se repérer à la surface de la Terre ?

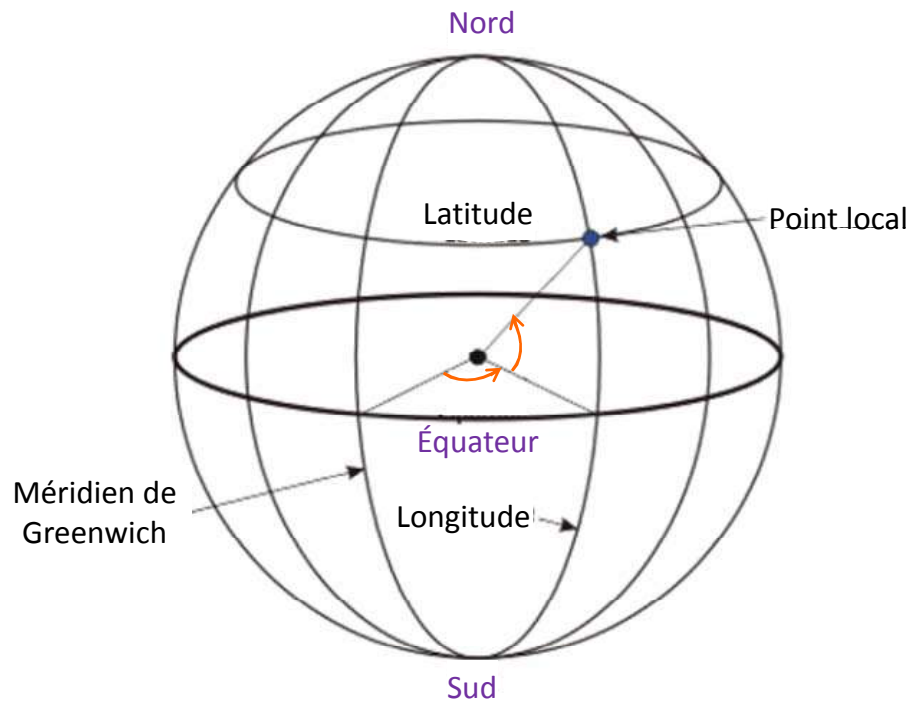
3.3. Comment repérer la position du Soleil dans le ciel ?

3.4. Diagrammes solaires

3.1. Système Terre-Soleil : orbite de la Terre

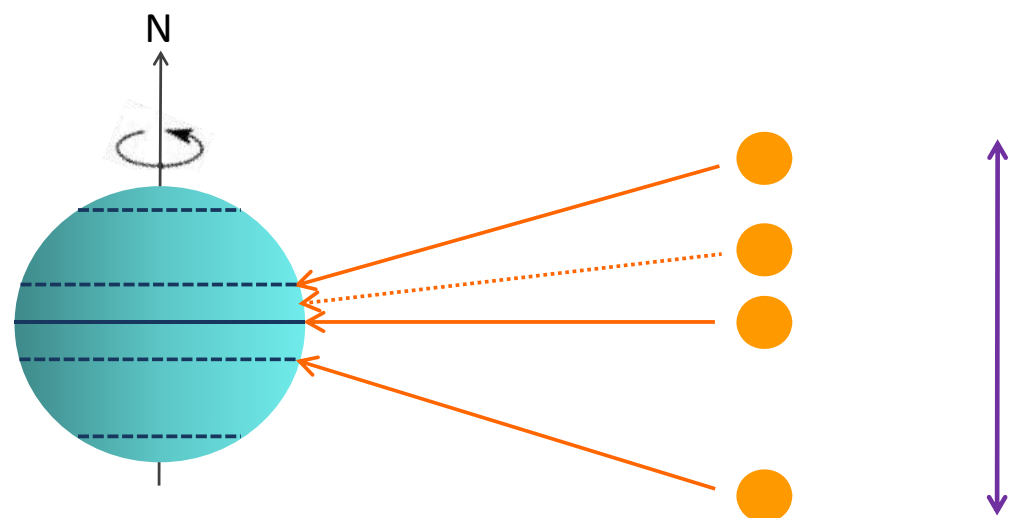


3.2. Comment se repérer à la surface de la Terre ?



3.3. Comment repérer la position du Soleil ? (1)

Variation de l'angle de déclinaison δ au cours de l'année
(Représentation géocentrique, référence : cercle équateur céleste)

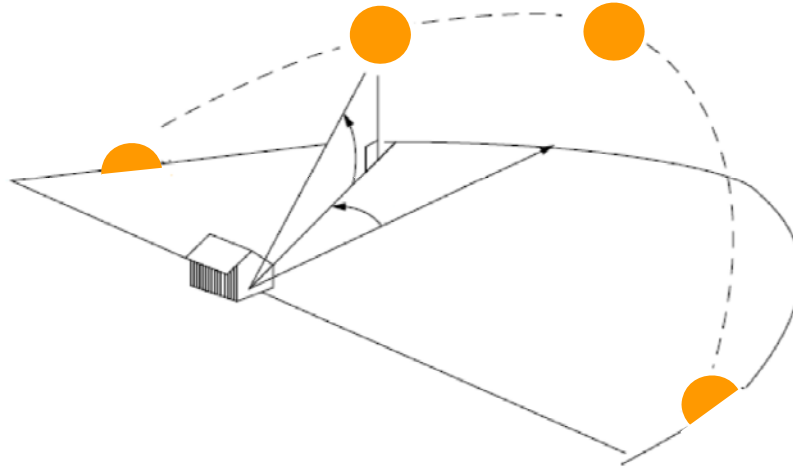


3.3. Comment repérer la position du Soleil ? (2)

Position du soleil au cours de la journée

a = azimut et h = hauteur du Soleil

(référence : cercle horizon)

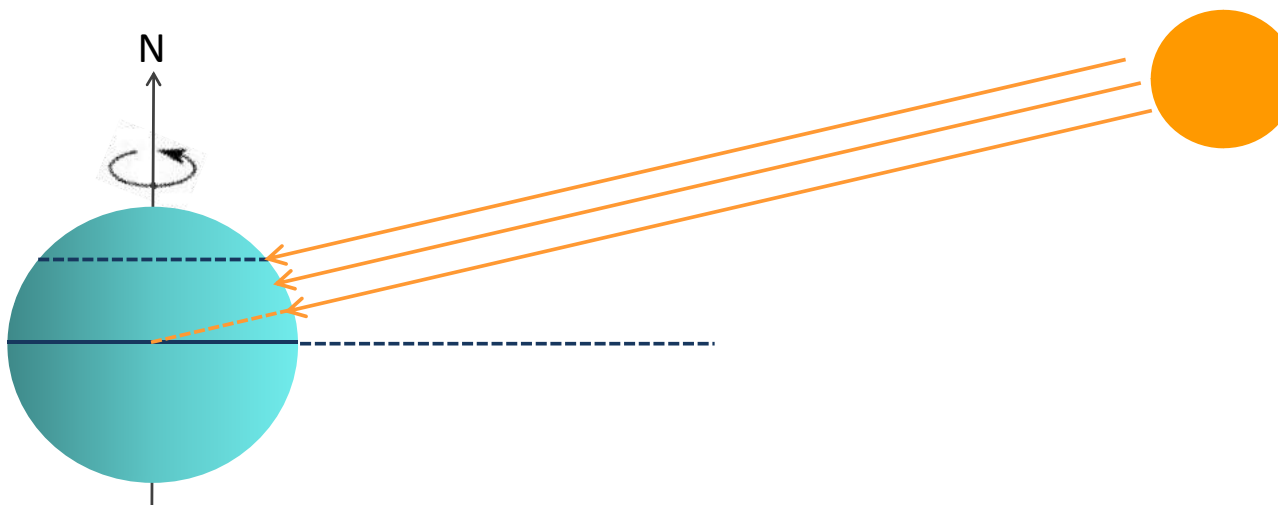


Hémisphère Nord

3.3. Comment repérer la position du Soleil ? (3)

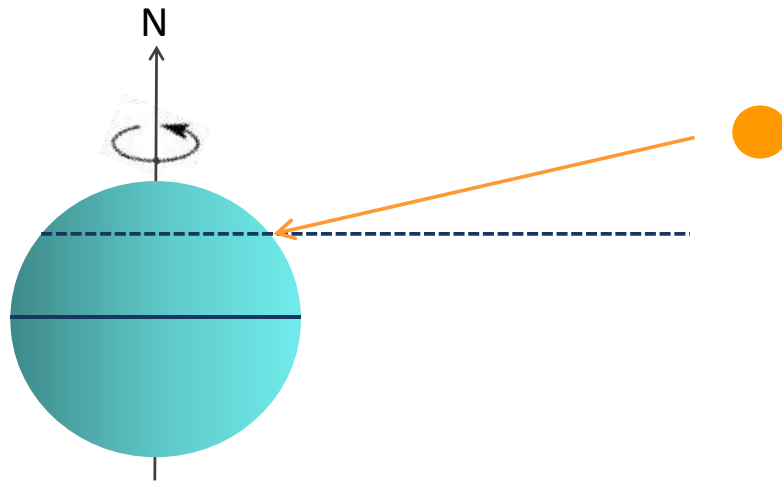
Hauteur h_z du Soleil au point de culmination (= midi solaire = zénith solaire)

(référence : cercle horizon)



3.3. Comment repérer la position du Soleil ? (4)

Hauteur h_z du Soleil au point de culmination (= midi solaire = zénith solaire)
(référence : cercle horizon)



Hémisphère Nord

3.3. Comment repérer la position du Soleil ? (5)

Temps solaire – Angle horaire
(Référence : cercle équateur céleste)

Ici, nous ne travaillons qu'avec le **temps solaire**.

Hémisphère Nord

3.3. Comment repérer la position du Soleil ? (6)

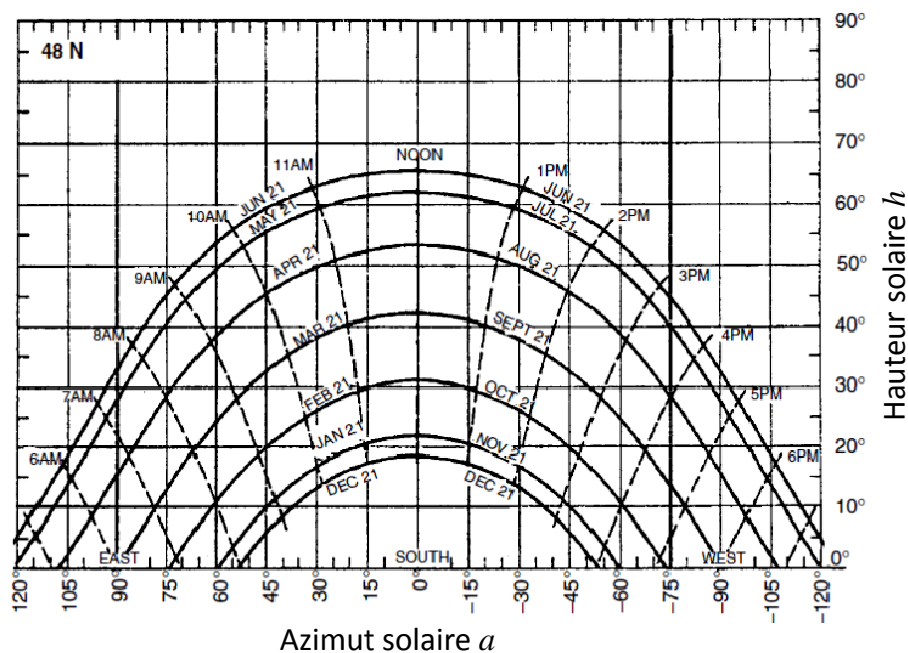
Position du Soleil en n'importe quel moment du jour
(Équivalence entre les systèmes de coordonnées)

$$\begin{aligned}\cos h \cos a &= \cos \delta \cos H \sin \Phi - \sin \delta \cos \Phi ; \\ \cos h \sin a &= \cos \delta \sin H ; \\ \sin h &= \cos \delta \cos H \cos \Phi + \sin \delta \sin \Phi .\end{aligned}$$

$$\text{Si } \cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan \Phi}, \text{ alors } |a| \leq 90^\circ ; \text{ sinon } |a| \geq 90^\circ .$$

3.4. Diagrammes solaires

Diagramme hauteur – azimut de la course du Soleil pendant une année
($\Phi = 48^\circ \text{ N}$).

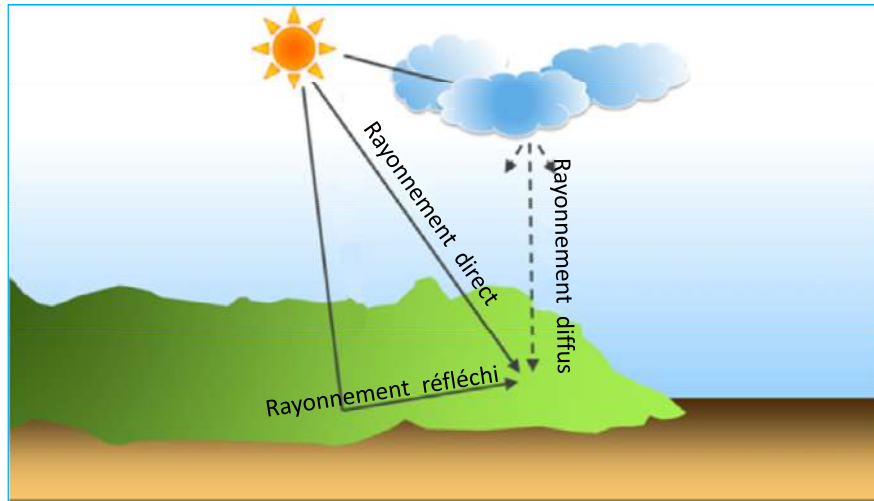


Source : © John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (2004).

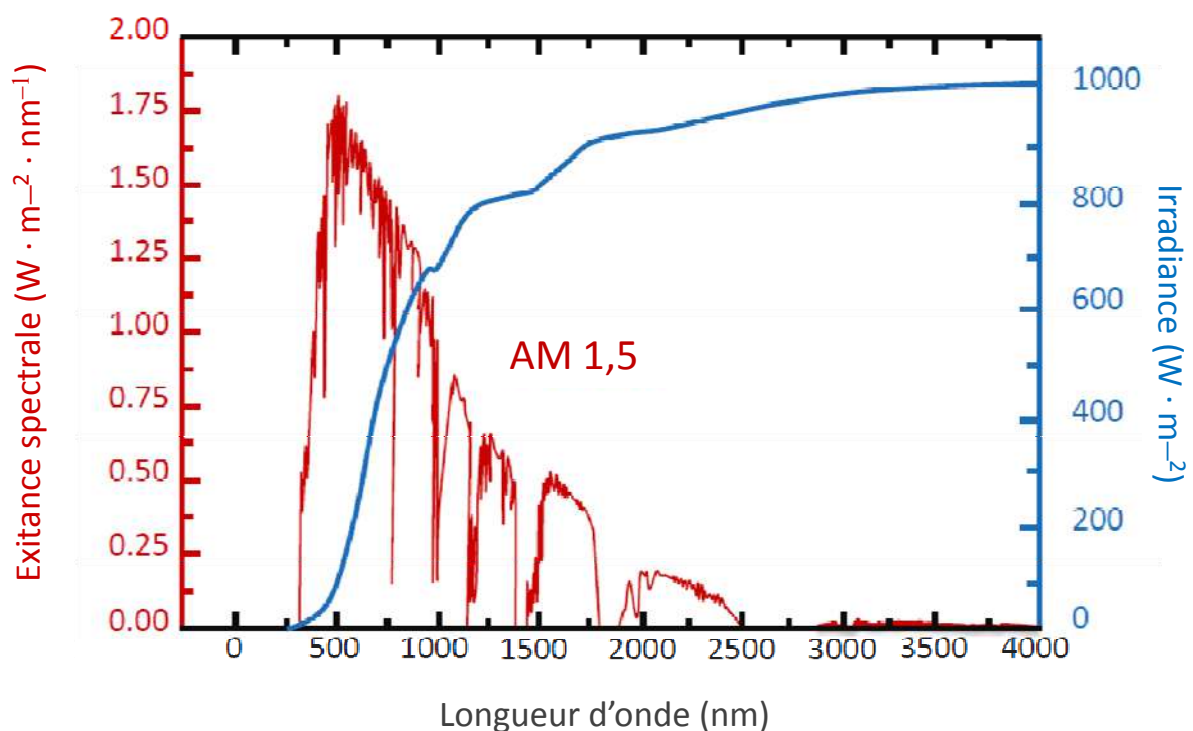
4. Rayonnement sur une surface captatrice

4. Rayonnement sur une surface captatrice

- 4.1. Irradiance
- 4.2. Éclairement sur le plan horizon
- 4.3. Éclairement sur un panneau incliné
- 4.4. Systèmes de *tracking* du Soleil



4.1. Irradiance



4.2. Éclairement sur le plan horizon

Éclairement direct sur le plan horizon :

$$E_i = A \exp(-k \cdot AM), \text{ où}$$

$$\begin{cases} A = 1160 + 75 \sin \left[\frac{360}{365} (j - 275) \right], \\ k = 0,174 + 0,035 \sin \left[\frac{360}{365} (j - 100) \right], \\ \text{et } AM = \text{nombre de masse d'air.} \end{cases}$$

Éclairement diffus sur le plan horizon :

$$E_d = CE_i,$$

$$\text{où } C = 0,095 + 0,04 \sin \left[\frac{360}{365} (j - 100) \right].$$

4.3. Éclairement sur un panneau incliné

Éclairement direct sur un panneau incliné :

$$E_{ip} = E_i \cos \theta_p, \text{ où}$$

$$\cos \theta_p = \cos h \cos(a - a_p) \sin \beta_p + \sin h \cos \beta_p.$$

Éclairement diffus sur un panneau incliné :

$$E_{dp} = E_d \left(\frac{1 + \cos \beta_p}{2} \right).$$

