

## Chapitre II: Notions de rayonnement solaire

### I. Le soleil comme un corps noir

La température à la surface du soleil avoisine les 5800 K. Le spectre du rayonnement solaire s'avère donc similaire à celui d'un corps noir de 5800 K.

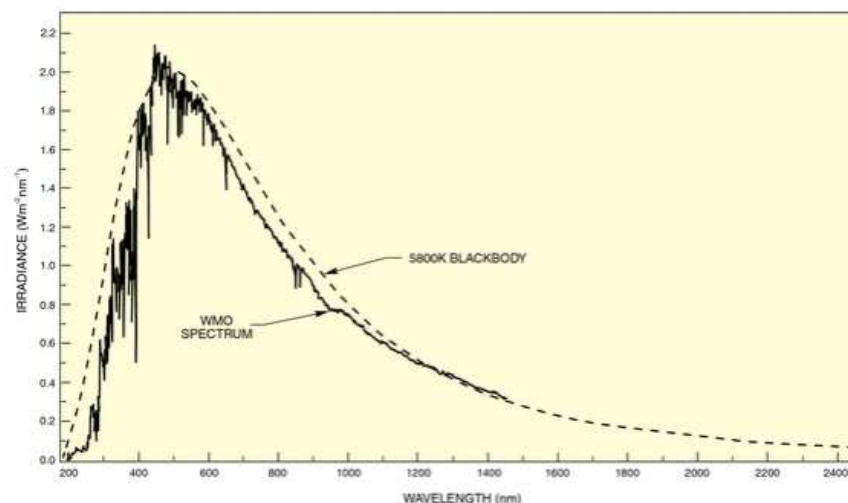


Figure II.1: Spectre de rayonnement à l'extérieur de l'atmosphère terrestre comparé au spectre d'un corps noir à 5800 K (newport).

### II. Spectre du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2  $\mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain (2,5  $\mu\text{m}$ ). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement de:

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4  $\mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8  $\mu\text{m}$ ).

L'intégralité du rayonnement qui atteint le sol traverse l'atmosphère, ce qui modifie le spectre en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion.

L'oxygène et l'azote atomiques et moléculaires absorbent le rayonnement de très courte longueur d'onde, faisant effectivement obstacle au rayonnement aux longueurs d'onde de <190 nm. L'absorption par l'oxygène moléculaire contenu dans l'atmosphère du rayonnement ultraviolet de courte longueur d'ondes entraîne un phénomène de photodissociation (de l'oxygène) qui engendre à son tour une production d'ozone. L'ozone absorbe fortement les ultraviolets de longueurs d'ondes plus élevées entre 200 et 300 nm (bande de Hartley), mais absorbe peu le rayonnement visible. La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et, dans une moindre mesure, l'oxygène, absorbent de manière sélective dans l'infrarouge proche.

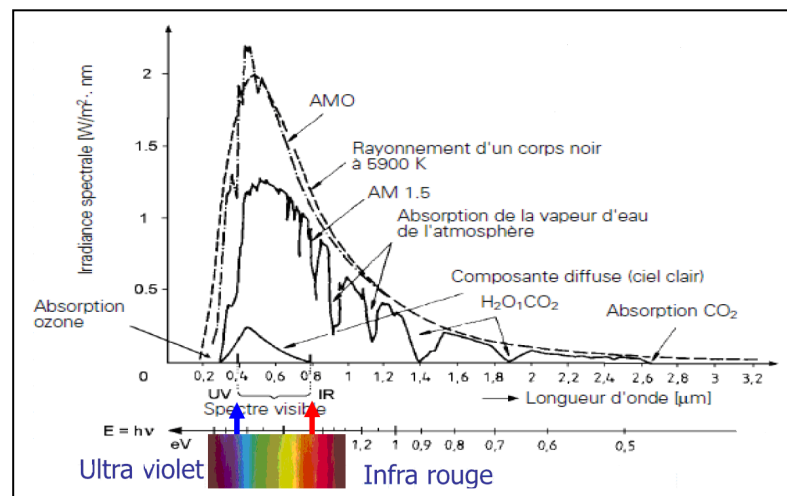


Figure II.2: Densité spectrale de l'irradiation AM0 (extraterrestre) et AM1.5 (épaisseur de 1.5 atmosphère, correspondant à une hauteur du soleil de 48° au niveau de la mer)

La diffusion (de particules) de Rayleigh dépendante de la longueur d'onde et la diffusion par les aérosols et autres particules en suspension dans l'air, dont notamment les gouttelettes d'eau, modifient également le spectre du rayonnement qui atteint le sol (c'est à ces deux phénomènes que le ciel doit sa couleur bleue).

### III. Grandeurs liées à l'éclairement solaire

#### a) Constante solaire

On appelle constante solaire l'éclairement énergétique du Soleil sur l'atmosphère extérieure lorsque le Soleil et la Terre se trouvent distants d'une UA – une UA (unité astronomique) est la distance séparant la Terre du soleil, soit 149.597.890 km. Les valeurs actuellement admises sont proches de  $1360 \text{ W/m}^2$ . La constante solaire désigne l'éclairement intégré total sur la totalité du spectre (Figure II.3).



Figure II.3: La constante solaire.

### b) Masse d'air

On appelle masse d'air ou Air Mass, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphérique traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu.

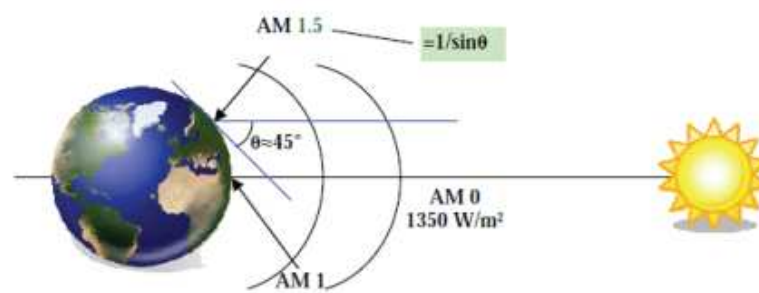


Figure II.4: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

On dit qu'on a les conditions AM1 lorsque le soleil est au zénith, AM2 lorsqu'on a une inclinaison de 30°. Hors atmosphère à haute altitude, on est dans les conditions AM0.

Les courbes ci-dessous (figure II.5) représentent le spectre solaire pour différentes valeurs de Air Mass, noté AM. L'indice après AM représente le nombre d'atmosphère traversé, AM0 est donc le spectre solaire hors atmosphère, AM2 est le spectre solaire ayant traversé 2 épaisseurs d'atmosphère (hauteur de 30° du soleil au dessus de l'horizon).

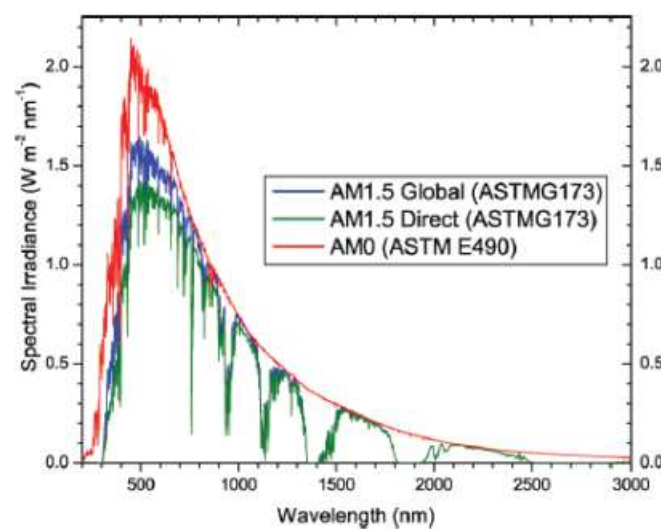


Figure II.5: Spectre au niveau du sol

### c) Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell-Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qui brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les

moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d’insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d’observation ou caché par les nuages.

Au défaut d’héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d’évaluer la durée théorique du jour ; c’est-à-dire, celle qu’il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil.

**d) Albédo**

Albédo= rapport de l’énergie solaire réfléchie par unité de surface sur l’énergie solaire incidente. Il varie selon la surface du sol.

Surfaces du sol	Albédo
Surface d’eau	0.01 à 0.1
Forêt	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1 à 0.3
Sol nul	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5 à 0.7
Neige fraîche	0.8 à 0.95

Tableau II.1 : Quelques valeurs d’albédo.

**IV. Composition du rayonnement solaire**

La radiation solaire qui arrive à la superficie terrestre se divise en trois parties: la radiation directe, la radiation diffusée et la radiation reflétée. La somme des trois radiations forme la radiation globale (G):

- La radiation directe (I) est formée par les rayons en provenance directe du soleil. Cette partie provient d’une source quasi ponctuelle et se caractérise par une directivité élevée. Par conséquence, l’orientation d’un module photovoltaïque est fortement influencée par la radiation directe. En général, la radiation directe est la plus intense.
- La radiation diffusée (D) provient de toute la voûte céleste sauf celle qui vient du soleil. En fait, l’atmosphère absorbe et disperse une partie de la radiation provenant du soleil. La radiation diffusée est donc la radiation dispersée qui arrive à la superficie terrestre. Bien que aléatoire, on peut supposer qu’elle arrive à la superficie d’une manière uniforme et donc son effet est majeur si le module est horizontal. En général, la radiation diffusée n’est pas intense mais plutôt vaste et elle se fait plus importante en conditions nuageuses.

- La radiation réflétée (R) est due à la réflexion d'une partie de la radiation incidente sur la surface ou d'autres objets voisins au module. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige). Sa contribution à la radiation globale est très petite. L'incidence de la radiation réflétée est maximale si le module est vertical et elle s'annule si le module est horizontal.

- Le rayonnement terrestre total est appelé rayonnement global (G). Il convient en ce qui concerne l'éclairement global de définir la direction de la surface cible.

La figure suivante montre la radiation et ses différentes parties.

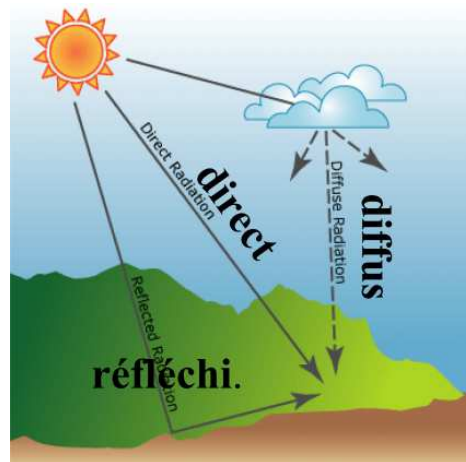


Figure II.6: Rayonnement global total au niveau du sol et ses composantes directes, diffuses et réfléchies.

La radiation globale incidente sur la surface terrestre et par conséquent sur une surface quelconque dépend de la position géographique, du mouvement du soleil et de l'orientation de la surface. La radiation est maximale si la surface est orientée face au soleil, c'est-à-dire, perpendiculaire à la ligne qui unit la position de l'installation avec le soleil. Puisque le soleil bouge, l'orientation varie et il faut donc trouver l'orientation la plus appropriée.

Dans une atmosphère estivale sans nuage typique et avec un angle zénithal de  $0^\circ$ , les  $1367 \text{ W/m}^2$  qui atteignent l'atmosphère extérieure sont réduits à un rayonnement du faisceau direct de  $1050 \text{ W/m}^2$  environ et à un rayonnement global d'environ  $1120 \text{ W/m}^2$  sur une surface horizontale au niveau du sol.

## V. Irradiance disponible sur la surface de la terre

Au delà de la constante solaire de l'ordre de  $1360 \text{ W/m}^2$  qui ne tient pas compte de la traversée de l'atmosphère, l'énergie disponible à la surface terrestre est moindre et dépend de l'exposition dans le temps et la localisation. En effet, l'ensoleillement d'une surface est plus important quand cette surface fait directement face au Soleil. Lorsque l'angle augmente entre la direction normale à la surface et

celle des rayons du Soleil, l'ensoleillement est réduit proportionnellement au cosinus de l'angle. Cela explique la répartition de l'ensoleillement et donc du potentiel solaire sur la Terre.

La production d'électricité photovoltaïque dépend de l'ensoleillement du lieu et de la température, et donc de sa localisation géographique, de la saison et de l'heure de la journée.

#### a) Variation diurne et annuelle

Les figures suivantes montrent les variations diurnes et annuelles typiques du flux radiatif solaire global. La demi-largeur réelle et la position maximale de la courbe dépendent de la latitude et de la saison. L'impact des nuages est pris en compte. Enfin, la figure de droite présente l'éclairement solaire global au soleil de midi mesuré dans l'Arizona, montrant la variation annuelle.

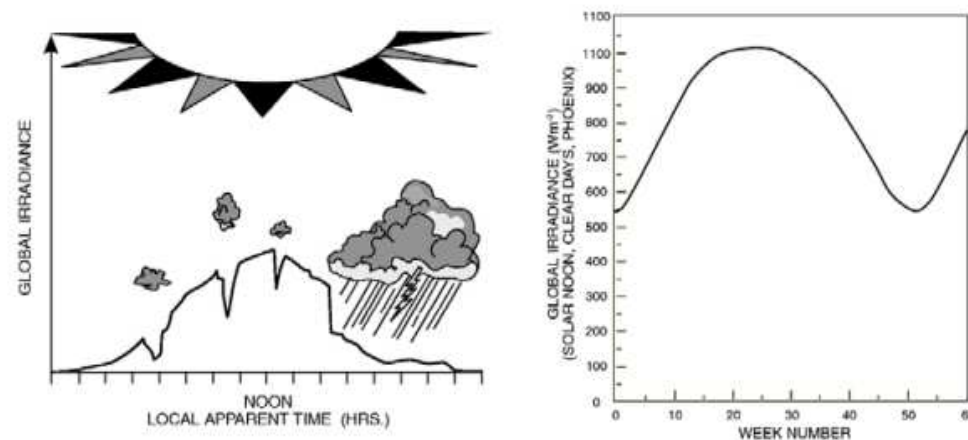


Figure II.7: Variations diurnes du flux radiatif solaire global un jour nuageux et annuellement (newport).

#### b) Angle permettant de projeter le flux incident sur la surface du capteur

Les figures suivantes illustrent les angles qui rentrent en jeu dans le calcul de l'irradiance disponible à un moment de la journée, pour une localisation spatiale et un montage spécifique angulaire du capteur.

*Déclinaison :  $\delta$*

La déclinaison est l'angle situé entre l'équateur et la distance du centre de la Terre au centre du Soleil. Comme l'axe de la Terre est incliné à  $23,45^\circ$ , la déclinaison varie au cours d'une année de  $\pm 23,45^\circ$ . En été et en hiver, la déclinaison atteint son maximum. En revanche, au printemps et à l'automne, elle s'élève à  $0^\circ$ .

*Azimut :  $\alpha$*

L'azimut solaire est l'angle que fait le plan vertical du soleil avec le plan méridien du lieu. On le mesure à partir du Sud, vers l'Est ou vers l'Ouest ( $0^\circ$  pour le Sud,  $180^\circ$  pour le Nord). Les lignes verticales du diagramme figurent les angles azimutaux de  $10^\circ$  en  $10^\circ$ .

*Élévation du soleil ou hauteur :  $\gamma$*

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal. Les lignes horizontales du diagramme figurent les hauteurs angulaires de 10° en 10° au-dessus de l'horizon (0° pour le plan horizontal et 90° pour le zénith).

Comme le Soleil se « déplace » dans le ciel pendant la journée, son élévation se modifie sans cesse.

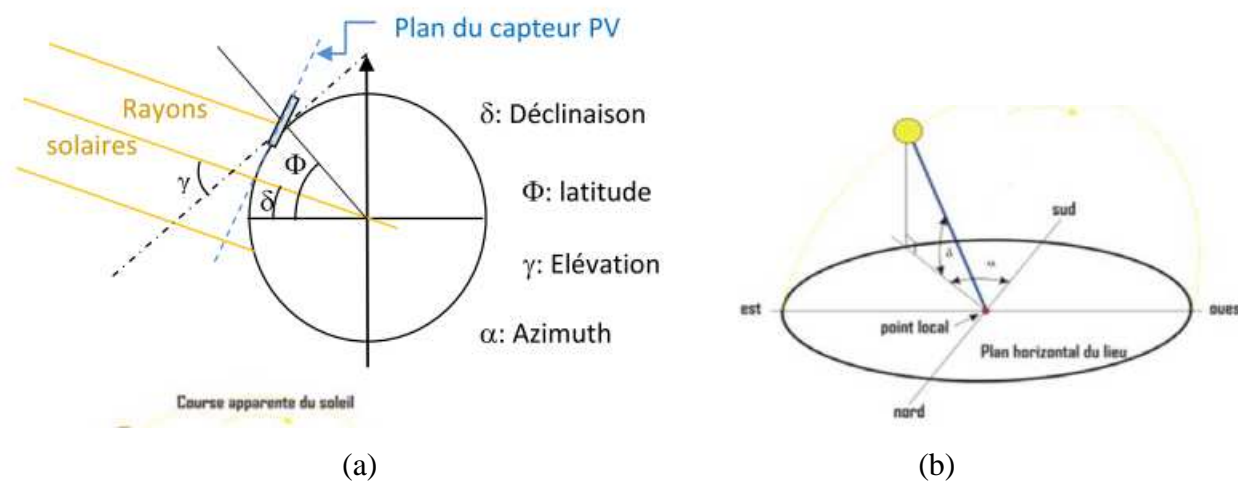


Figure II.8: (a) Schéma de principe de la terre et des angles rentrant dans le calcul de l'irradiance. (b) Vue locale de l'utilisateur avec azimut et élévation.

### Angle du capteur : $\theta$

Lorsque le rayonnement touche une surface horizontale, l'angle d'incidence du capteur doit être pris en compte. On introduit alors un rendement d'utilisation en comparant la surface d'un plan horizontal avec un plan incliné perpendiculaire au Soleil et pour la même puissance de rayonnement.

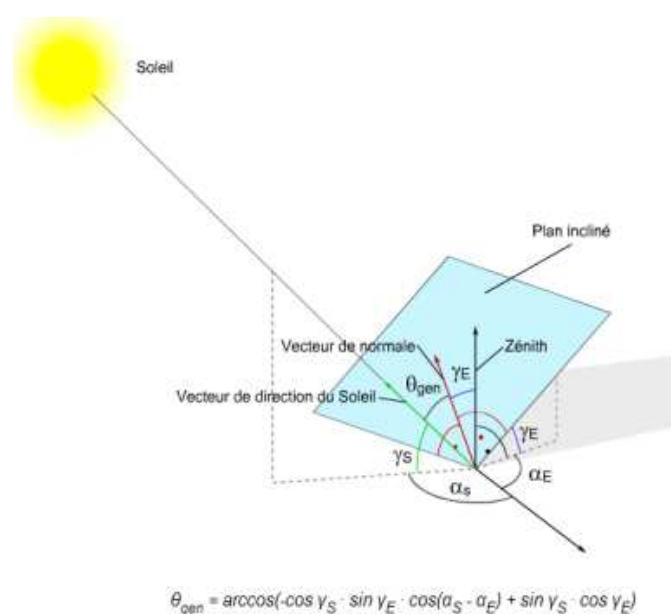


Figure II.9: Représentation des angles projetés terre-soleil et capteur-horizon