

## Estimation de l'ensoleillement reçu par un capteur solaire

Dans cette note, nous essaierons de présenter les principes méthodologiques permettant d'estimer l'ensoleillement reçu par un capteur solaire, sans pour autant faire un exposé exhaustif de climatologie solaire.

L'énergie solaire provient des réactions thermo-nucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquant l'émission d'un rayonnement électromagnétique de très forte puissance, se présentant sensiblement comme celui d'un corps noir à 5 800 K.

Hors atmosphère, le rayonnement reçu par la terre varie selon la période de l'année entre 1 350 et 1 450 W/m<sup>2</sup>. Il est ensuite partiellement réfléchi et absorbé par l'atmosphère, de telle sorte que le rayonnement reçu au sol comporte une part directe I et une part diffuse D, le total variant entre 200 W/m<sup>2</sup> (ciel couvert), et environ 1 000 W/m<sup>2</sup> (au zénith par ciel clair). L'énergie reçue par une surface donnée dépend donc des conditions climatiques du lieu ainsi que de son inclinaison et de son orientation (figure 1).

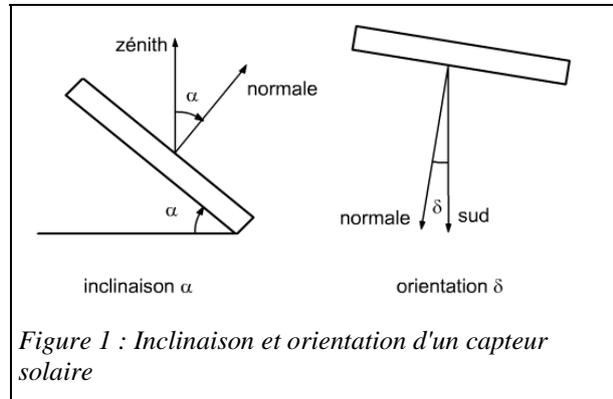


Figure 1 : Inclinaison et orientation d'un capteur solaire

L'ensoleillement total  $E_s$  reçu par un capteur solaire peut ainsi être décomposé entre une composante directe  $I \cos(i)$ , et une composante diffuse  $D$ , que l'on considère souvent comme indépendante de l'inclinaison, alors qu'en toute rigueur elle ne l'est pas. Dans certains cas<sup>1</sup>, il est souhaitable de tenir compte d'une composante de rayonnement direct réfléchi par les surfaces entourant le capteur. On introduit alors la notion d'albédo.

Des atlas du rayonnement solaire au sol sont publiés par les services météorologiques nationaux ou internationaux, sous forme de cartes et de tableaux, sur support papier ou électronique. Ils sont basés sur des relevés journaliers effectués dans des réseaux de stations météorologiques, et principalement sur deux grandeurs :

- la **durée d'insolation**, qui est la durée pendant laquelle le rayonnement direct est demeuré supérieur à une certaine valeur internationalement admise. On dispose de deux relevés par jour, l'un pour le matin, l'autre pour l'après-midi. L'unité employée est le dixième d'heure d'insolation, et l'appareil de mesure est appelé héliographe. ;
- le **rayonnement global** noté  $G_h$ , qui est l'énergie reçue en un temps donné par une surface horizontale de la part du soleil et du ciel sous forme de rayonnement de courte longueur d'onde. On dispose de relevés horaires, exprimés en J/cm<sup>2</sup>, l'appareil de mesure étant appelé pyranomètre.

Pour interpoler entre les stations des réseaux, il est aujourd'hui fréquent d'utiliser des données satellitaires. Par ailleurs, certaines stations sont exceptionnellement équipées de pyranomètres munis d'une bande pare-soleil qui masque la composante directe du rayonnement, permettant ainsi de mesurer le rayonnement diffus.

La durée d'insolation n'étant pas une mesure énergétique, on ne dispose le plus souvent pour déterminer l'ensoleillement reçu par un capteur que des relevés horaires du rayonnement global horizontal  $G_h$ . Il est donc nécessaire de disposer de méthodes aussi fiables que possible pour séparer les composantes directe et diffuse de  $G_h$ , méthodes généralement basées sur des corrélations statistiques validées à partir des relevés des stations où  $G_h$  et  $D$  sont mesurés simultanément.

L'une des manières à la fois simple et fiable consiste à corréler le rapport  $D/G_h$  à  $G_h/G_0$ , indicateur représentant le rapport du rayonnement global reçu sur terre au rayonnement global hors atmosphère, qui présente le grand avantage de pouvoir être déterminé sur la seule base de données astronomiques. De telles corrélations (1) sont dites du type Liu et Jordan, d'après le nom des scientifiques qui l'ont proposée au début des années 60 (pour des valeurs journalières et non horaires à l'époque).

$$D/G_h = a G_h/G_0 + b \quad (1)$$

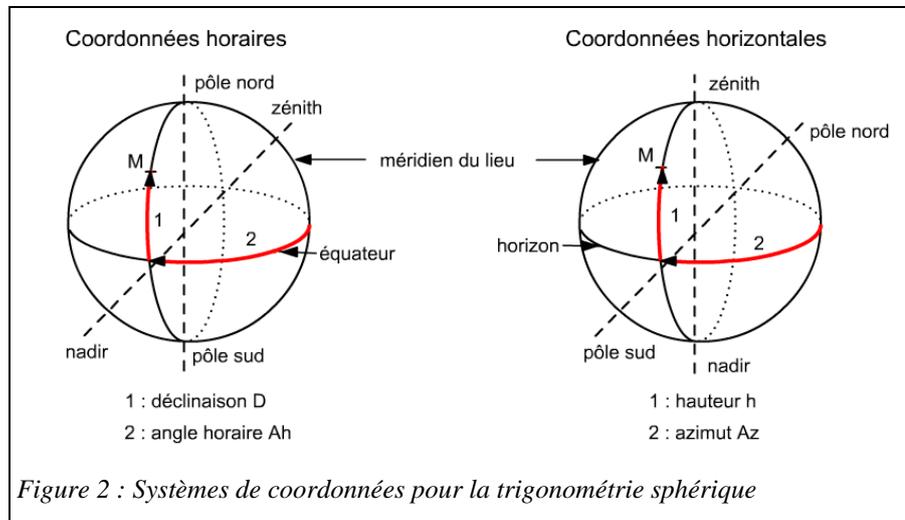
Les valeurs de  $a$  et  $b$  dans l'équation (1) dépendent bien évidemment du lieu considéré, et même de la saison si l'on veut être très précis.

<sup>1</sup> Par exemple pour un capteur orienté au sud en bord de mer ou devant une étendue neigeuse

Des corrélations analogues peuvent être établies avec d'autres indicateurs, dont la durée d'insolation, mais nous ne présenterons de manière détaillée dans cette section que celle correspondant à l'équation (1), et fournirons une petite macro Excel permettant d'effectuer ces calculs.

L'établissement des équations astronomiques suppose la définition de deux systèmes de coordonnées (figure 2) :

- les **coordonnées horaires**, dont un repère est donné par l'axe des pôles et le plan de l'équateur, le méridien du lieu étant pris comme origine. C'est dans ce repère que sont donnés les renseignements journaliers des tables astronomiques du soleil ;



- les **coordonnées horizontales**, dont un repère est donné par le vertical du lieu et le plan de l'horizon, le méridien du lieu étant pris comme origine. C'est le seul repère simple à utiliser localement pour mesurer l'inclinaison et l'orientation du capteur solaire, définies par les angles  $\alpha$  et  $\delta$ .

Dans le tableau 1, on trouvera indiquées successivement les notations utilisées pour les angles 1 et 2 dans les deux systèmes de coordonnées.

Tableau 1

	Coordonnées horaires	Coordonnées horizontales
Soleil	Déclinaison D	Hauteur h
	Angle horaire Ah	Azimut Az
Zénith	Latitude $\varphi$	Origine (o)
	Origine (o)	Origine (o)
Normale au capteur	dn	Inclinaison sur l'horizontale $\alpha$
	an	Orientation par rapport au sud $\delta$
Angle d'incidence des rayons solaires	i	i

Le calcul montre que i et h sont reliés par les équations suivantes :

$$\sin dn = \sin \varphi \cos \alpha - \sin \alpha \cos \varphi \cos \delta \quad (2)$$

$$\sin an = \sin \delta \sin \alpha / \cos dn \quad (3)$$

$$\sin h = \sin \varphi \sin D + \cos \varphi \cos D \cos Ah \quad (4)$$

$$\cos i = \sin dn \sin D + \cos dn \cos D \cos (Ah - an) \quad (5)$$

L'angle horaire se détermine très facilement : il vaut  $15^\circ$  par heure.

La valeur de la déclinaison D s'obtient facilement par (7) lorsqu'on connaît le jour de l'année considéré j. Posant

$$\Gamma = 2 \pi (j - 1) / 365 \quad (6)$$

$$D = (0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \sin \Gamma - 0,006758 \cos 2 \Gamma + 0,000907 \sin 2 \Gamma - 0,002697 \cos 3 \Gamma + 0,00148 \sin 3 \Gamma) \quad (7)$$

La valeur de la constante solaire hors atmosphère est donnée par (8).

$$I_0 = 1367 (1,00110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,001280 \sin \Gamma + 0,000719 \cos^2 \Gamma + 0,000077 \sin^2 \Gamma) \quad (8)$$

L'ensemble de ces relations permet de calculer  $I_0$ ,  $a_n$ ,  $d_n$ , puis  $h$  et  $i$  pour toute heure.

La corrélation (1) donne  $D$  et  $I$  connaissant  $G_h$  et  $G_0 = I_0 \sin h$ . L'ensoleillement  $E_s$  reçu par le capteur est alors donné par (9) :

$$E_s = I \cos i + D \quad (9)$$

Il est ainsi possible de déterminer l'ensoleillement reçu, heure par heure, par un capteur solaire plan fixe, quelles que soient son orientation  $\delta$  et son inclinaison  $\alpha$ . S'il s'agit d'un capteur à concentration, la part diffuse peut être négligée, et si le capteur est muni d'un dispositif de poursuite du soleil, les valeurs de  $\alpha$  et  $\delta$  doivent être recalculées à chaque pas de temps (un suivi double devrait garantir une incidence normale des rayons solaires).

## **BIBLIOGRAPHIE**

CASTEN F., GOLCHERT H.J. Atlas Européen du Rayonnement Solaire Grosschen, 1980

LIU B. Y. H., JORDAN R. C. The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. Solar Energy 4: 1-19. 1960.

LIU et JORDAN, "A rational procedure for predicting the long term average performance of flat plate solar energy collectors", Solar Energy, Vol. 7, p. 53, 1965.

ORGIL J. F., HOLLANDS. K. G. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. Solar Energy 19: 357-359. 1977.

PERRIN DE BRICHAMBAUT Ch. "Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels" (chap. XVII) Gauthier-Villars 1963.

PERRIN DE BRICHAMBAUT Ch, LAMBOLEY G. "Le rayonnement solaire au sol et ses mesures" Cahier AFEDES n° 1, 2ème édition, 1974.

SPENCER W. Fouries series representation of the position of the Sun, Search 2 (5), 172. 1971.