

A.1-Rayonnement Global Estimé Recu Par Une Surface D'inclinaison Quelconque

Generalites Sur L'énergie Solaire

L'énergie solaire est la plus ancienne source d'énergie. Elle est à l'origine de toutes les sources d'énergie dites traditionnelles : Bois, tourbe, charbon, gaz naturel, pétrole et énergie du vent.

Le calcul des performances des capteurs solaires nécessite la connaissance du flux solaire incident en fonction du temps, c'est à dire en fonction de la position du soleil par rapport à la terre. La terre tourne sur elle-même suivant un axe de rotation possédant une inclinaison constante par rapport au plan de l'écliptique, avec lequel l'équateur fait un angle de $23,45^\circ$. Elle tourne aussi dans le plan de l'écliptique autour du soleil (Figure. A,1).

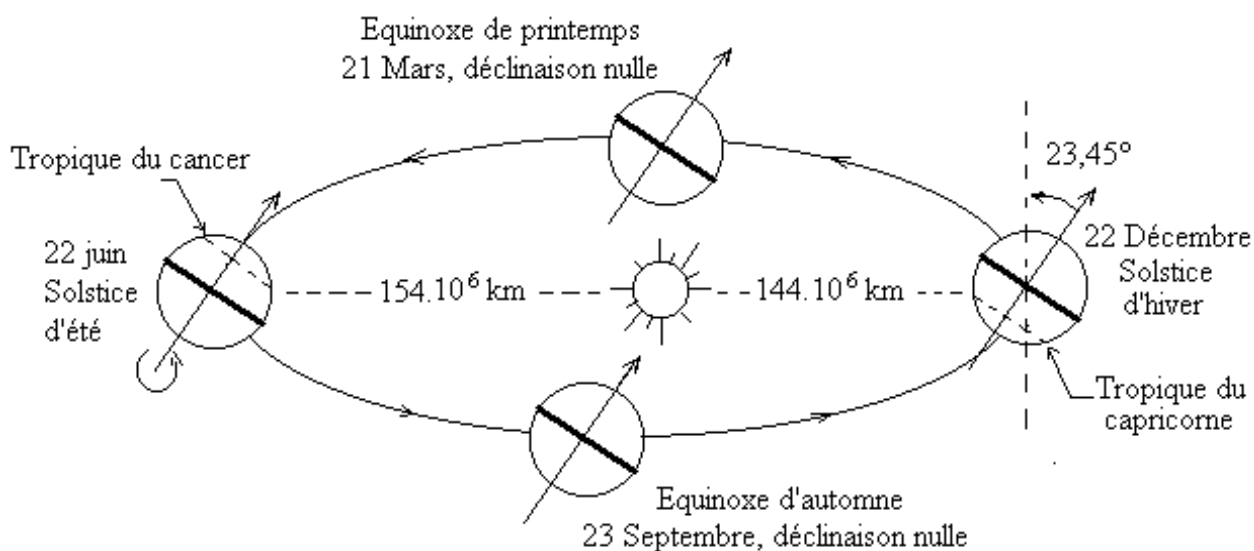


Figure. A.1. Mouvement de la terre autour du soleil

Donnees Geometriques Et Astronomiques

- **Latitude** : elle représente l'angle entre le lieu de la terre et le plan de l'équateur, il est compté positivement vers le nord,
- **Déclinaison** : c'est la latitude des points de la terre qui sont atteints par le soleil au zénith (midi-solaire),
- **Angle horaire** : c'est l'angle formé par le plan vertical du lieu et le plan méridien passant par le centre du soleil,

Position Du Soleil

La position du soleil en un lieu, à une date et à un instant quelconque dépend de deux angles :

- **Azimut** : c'est l'angle que fait la projection, sur le sol, de la direction du soleil avec la direction du sud, il est mesuré positivement du Sud vers l'Ouest et nul à midi TSV,
- **Hauteur du soleil** : c'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le sol, il varie de 0° à 90° dans l'hémisphère sud (Nadir) et s'annule au lever et au coucher du soleil et est maximal au midi-solaire.

Rayonnement Global Reçu Par Une Surface Inclinée

Le rayonnement solaire global « I_g » arrivant sur une surface orientée au Sud d'inclinaison « β » (Figure. A,2) est formé de rayonnement direct et de rayonnement diffus. Il peut être estimé à n'importe quel instant et dans n'importe quel endroit, et peut être déterminé à partir d'un algorithme de calcul, il s'écrit :

$$I_g = I_{dn} + D_c(\beta) + D_s(\beta)$$

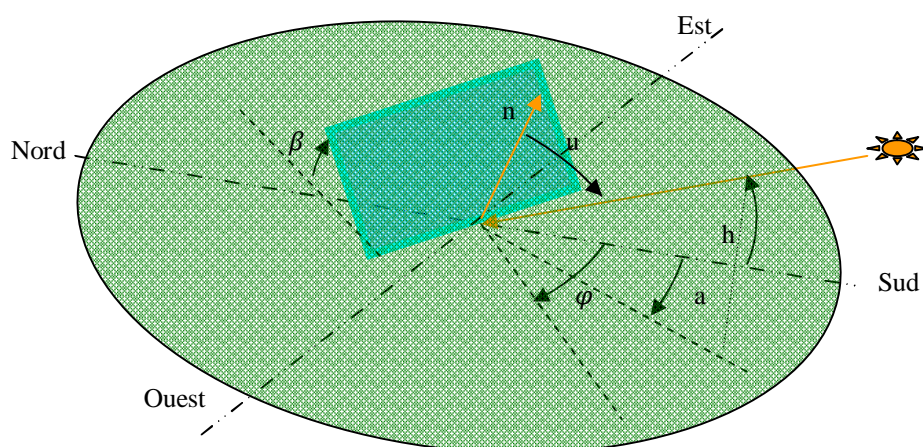


Figure. A.2. Caractéristiques géométriques d'un capteur plan orienté de φ avec le sud (a : azimuth)

- I_{dn} est le rayonnement normal reçu par une surface d'inclinaison « β »

$$I_{dn} = I_d \cos(u)$$

u est l'angle que fait la normale à la surface de captation avec la direction des rayons solaires

I_d est le rayonnement direct provenant du ciel (W/m^2), on utilise généralement les formules semi-empiriques suivantes [6] :

$$\text{- Ciel Très Clair (CTC) : } I_d = 1210 \exp\left(-\frac{1}{6 \sin(h+1)}\right)$$

$$\text{- Conditions Normales de Ciel Clair (CNCC) : } I_d = 1230 \exp\left(-\frac{1}{3,8 \sin(h+1,6)}\right)$$

$$\text{- Ciel Clair Pollué (CCP) : } I_d = 1260 \exp\left(-\frac{1}{2,3 \sin(h+3)}\right)$$

la hauteur du soleil « h » étant en degrés

- $D_c(\beta)$ est le rayonnement diffus provenant du ciel, reçu par une surface d'inclinaison « β »

$$D_c(\beta) = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} D_h$$

D_h est le rayonnement diffus provenant du ciel intercepté par une surface horizontale (W/m²) :

- Ciel Très Clair (CTC) : $D_h = \frac{3}{4} 125 \sin(h)^{0,4}$

- Conditions Normales de Ciel Clair (CNCC) : $D_h = 125 \sin(h)^{0,4}$

- Ciel Clair Pollué (CCP) : $D_h = \frac{4}{3} 125 \sin(h)^{0,4}$

- $D_s(\beta)$ est le rayonnement diffus provenant du sol capté par une surface horizontale (W/m²) :

$$D_s(\beta) = \alpha_{\text{sol}} \frac{1 - \cos(\beta)}{2} (I_d \sin(h) + D_h)$$

α_{sol} est la réflectivité ou albédo du sol, il dépend de la nature de celui-ci. Quelques valeurs moyennes sont résumées dans le tableau (A1).

Nature du sol	Albédo
Sol enneigé	0,70
Sol recouvert de feuilles mortes	0,30
Herbe verte	0,26
Forêt en automne ou champs dorés	0,26
Galets de pierres blanches	0,20
Herbe sèche	0,20
Sol argileux	0,17
Forêt en hiver (arbres conifères sans neige)	0,07
Plan d'eau (soleil haut $h > 30^\circ$)	0,07

Tab. A.1. quelques valeurs de l'albédo en fonction de la nature du sol

A.2-Propriétés Thermophysiques De L'air

Dans une plage moyenne de température (notre domaine d'application), les propriétés physiques de l'air varient linéairement avec sa température. D'après [65 et 66], elles s'écrivent comme suit (T_f en °C) :

- La conductivité thermique

$$\lambda_f = 0,02624 + 0,0000758(T_f - 27)$$

- La viscosité cinématique

$$\mu_f = (1,983 + 0,00184(T_f - 27)) \cdot 10^{-5}$$

- La capacité calorifique

$$Cp_f = 1005,7 + 0,066(T_f - 27)$$

- La masse volumique

$$\rho_f = 1,1774 - 0,00359(T_f - 27)$$

- La viscosité dynamique

$$v_f = \frac{\mu_f}{\rho_f}$$

A.3-Propriétés Thermophysiques de certains corps

- Matériaux divers

Nature	T °C	ρ kg m ⁻³	Cp J kg ⁻¹ °C ⁻¹	λ w m ⁻¹ °C ⁻¹
Amiante	20			0.16
Asphalte	20	2115	920	0.062
Caoutchouc (naturel)	20	1150		0.28
Caoutchouc (vulcanisé)	20	1100	2010	0.13
Carton	20	86	2030	0.048
Cuir	0	998		0.159
Glace	20	920	2040	1.88
Papier	20			0.48
Plexiglass	20	1190	1465	0.19
Sable	20	1515	800	0.2-1.0
Sciure	20			
Terre mouillée	20	1900	2000	2
Terre sèche	20	1500	1900	1
Verre	20	2700	840	0.78

- Matériaux de construction

Nature	T °C	ρ kg m ⁻³	Cp J kg ⁻¹ °C ⁻¹	λ w m ⁻¹ °C ⁻¹
Ardoise	20	2400	879	2.2
Basalte	20	2850	881	1.6
Béton caverneux	20	1900	879	1.4
Béton plein	20	2300	878	1.75
Bitume (cartonné)	20	1050	1305	0.23
Bois feuillus légers	20	525	3143	0.15
Bois feuillus mi-lourds	20	675	3156	0.23
Bois feuillus très légers	20	375	3147	0.12
Bois résineux légers	20	375	3147	0.12
Bois résineux mi-lourds	20	500	3160	0.15
Bois résineux très légers	20	375	3147	0.12
Brique terre cuite	20	1800	878	1.15
Calcaire dur	20	2450	882	2.4
Calcaire tendre	20	1650	879	1
Carrelage	20	2400	875	2.4
Contre-plaqué okoumé	20	400	3000	0.12
Contre-plaqué pin	20	500	3000	0.15
Granite	20	2600	881	3
Gravier (vrac)	20	1800	889	0.7
Grès	20	2500	880	2.6
Lave	20	2350	881	1.1
Marbre	20	2700	881	2.9
Parquet	20	700	3143	0.2
Plâtre	20			0.48

- Métaux, alliages et céramiques

Nature	T °C	ρ kg m ⁻³	Cp J kg ⁻¹ °C ⁻¹	λ w m ⁻¹ °C ⁻¹
Acier au carbone	20	7833	465	54
	200			48
	600			35
Acier inox 15%Cr, 10%Ni	20	7864	460	20
Acier inox 18%Cr, 8%Ni	20	7816	460	1603
	600			22
Acier inox 25%Cr, 20%Ni	20	7864	460	13
Alumine	20			29
Aluminium	20	2707	896	204
	400			249
Argent	20	10525	234	407
Bronze 75%Cu, 25%Sn	20	8666	343	26
Carbone	20			147
Carbure de silicium	20			13
Chrome	20	2118	7160	449
Constantan 60% Cu, 40%Ni	20	8922	410	22.7
Cuivre	20	8954	383.1	386
	400			363
Duralumin	20	2787	883	164
Etain	20	7304	226	64
Fer	20	7870	452	73
Fonte	20	7849	460	59
Laiton 70%Cu, 30%Zn	20	8522	385	111
	400			147
Magnésie	38	270		0.067
Or	20	1336	19300	129
Platine	20			72
Plomb	20	11373	130	35
Sodium liquide	100			81.5
Titane	20			16
Tungstène	20	19350	134	163
Zinc	20	7144	384	112
Zircone	20			4

- Matériaux isolants

Nature	T °C	ρ kg m ⁻³	Cp J kg ⁻¹ °C ⁻¹	λ w m ⁻¹ °C ⁻¹
Balsa	20	85		0.054
Copeaux bois	23			0.059
Coton	20	80	1300	0.06
Kapok	30			0.035
Laine de roche	20	20	880	0.047
	20	55	880	0.038
	20	135	880	0.041
Laine de verre	20	8	875	0.051
	20	10	880	0.045
	20	15	880	0.041
	20	40	880	0.035
Liège expansé	20	120	2100	0.044
Moquette	20	200	1300	0.06
Polyuréthane (mousse rigide)	20	32	1300	0.03
	20	50	1360	0.035
	20	85	1300	0.045
PVC (mousse rigide)	20	30	1300	0.031
	20	40	1300	0.041
Polystyrène expansé	20	12	1300	0.047
	20	14	1300	0.043
	20	18	1300	0.041
	20	28	1300	0.037