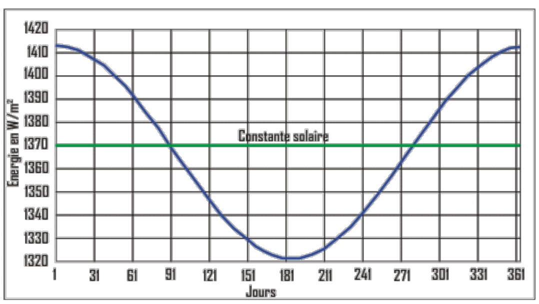
Accès aux pages...

L'ENERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire, non polluante et gratuite.
La terre reçoit quotidiennement un flux important d'énergie solaire. La puissance de ce rayonnement est fonction de plusieurs critères; conditions météorologiques, diffusion atmosphérique (phénomènes de dispersion, de réflexion et d'absorption).

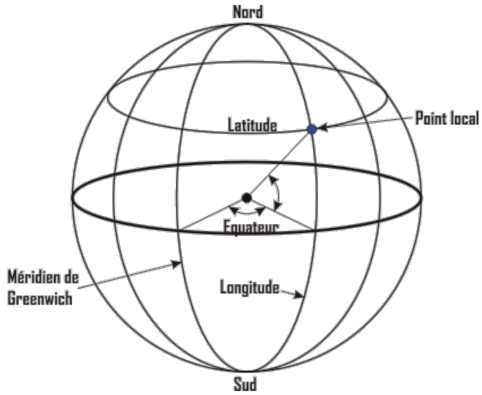
A la distance moyenne du soleil à la terre (environ 150 x 10^6 kms), une surface normale au rayonnement solaire (perpendiculaire à ce rayonnement) hors atmosphère reçois environ 1367 W/m². Cet éclairement est appelée constante solaire. Compte tenu de la trajectoire elliptique de la terre autour du soleil, la distance d'éloignement la plus grande se produisant le 3 juillet avec environ 153 x 10^6 kms et la plus petite se produisant le 3 janvier avec environ 147 x 10^6 kms, cette constante varie de +-3,4% en passant par un maximum en janvier avec environ 1413 W/m² et un minimum en juin avec environ 1321 W/m². L'énergie reçu en fonction du jour de l'année peut être calculée avec la formule suivante :
E_{Sol} = 1367 x (1 + 0,0334 x Cos(360 x (j - 2,7206) / 365,25)), en W/m²
j étant le numéro d'ordre du jour dans l'année (1 pour le 1er janvier)
Le graphique ci-dessous est issus de cette formule.



En France la quantité d'énergie solaire moyenne reçue par an est d'environ 1115 KWh/m².an mais bien évidemment ceci dépend du lieu où l'on se trouve. Par exemple Lille reçoit en moyenne 1050 KWh/m².an pour une durée moyenne d'ensoleillement de 1600 h tandis que Nice reçoit 1550 KWh/m².an pour une durée moyenne d'ensoleillement de 2800 h.

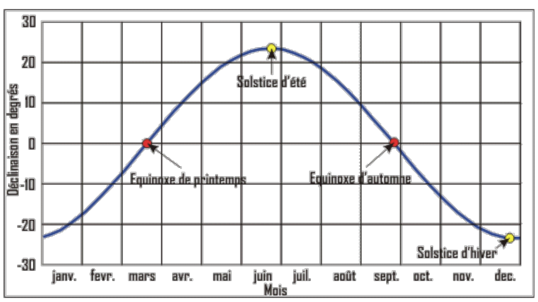
Calculs solaires.
Note 1 : les valeurs sont exprimées en degrés, pour convertir :
Degrés -> Radians : Radians = Degrés x Pi / 180
Radians -> Degrés : Degrés = Radians x 180 / Pi
Note 2 : l'unité de temps employé ici est l'heure solaire vrai (t_{SV}). Pour la France $t_{SV} = t_{Local} - 1$ en hiver et $t_{SV} = t_{Local} - 2$ en été.

La latitude et la longitude.
La latitude (Lat) est l'angle formé par le plan équatorial et le vecteur "centre de la terre->point local". L'angle pour la France est d'environ 42°N (milieu de la Corse) à 51°N (au voisinage de Dunkerque).
La longitude (Lon) est l'angle formé par le méridien de référence (méridien de Greenwich) et le méridien du point local. L'angle est négatif vers l'ouest et positif vers l'est. Cet angle varie de -5° pour la pointe de Bretagne à +9,5° pour le coté est de la Corse. Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle même (360°) chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc chaque degré de longitude représente 4 minutes. Il y a donc un écart d'environ (9,5 + 5) x 4 = 58 mn entre la pointe de Bretagne et Bastia.

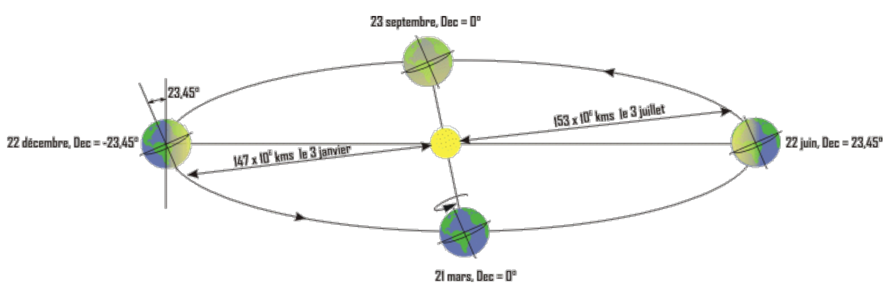


- *La déclinaison.*
  La déclinaison (Dec) est l'angle que forme le vecteur "centre de la terre->soleil" et le plan équatorial de la terre. La déclinaison varie de +23°,45 en degrés décimaux (23° 27' en degrés sexagésimaux) au solstice d'été (22 juin) à -23,45° au solstice d'hiver (22 décembre) (+ ou -23°,27' en degrés sexagésimaux) en passant par la valeur 0 aux équinoxes (21 mars et 23 septembre). Cette déclinaison est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestres par rapport au plan écliptique ce qui nous donne les différentes saisons (la terre est plus proche du soleil en hiver mais pour la France les rayons étant plus rasants, la chaleur reçue est plus faible). Cette inclinaison est constante (voir le croquis de la révolution de la terre autour du soleil ci-dessous).
  La déclinaison est obtenue avec l'équation suivante :
  Dec = ArcSin(0,3978 x Sin(v_a x (j - (81 - 2 x Sin($v_{a°}$ x (j - 2))))))
  où v_a est la vitesse angulaire moyenne de rotation de la Terre en degrés/jour, v_a = 360 / 365,25
  et j est le numéro d'ordre du jour dans l'année (1 pour le 1er janvier)
  Cette formule peut être simplifier tout en donnant une précision suffisante :
  Dec = ArcSin(0,398 x Sin(0,985 x j - 80))

  Ci-dessous un graphique montrant la déclinaison solaire au cours d'une année



  Ci-dessous un croquis montrant la révolution de la terre autour du soleil durant une année



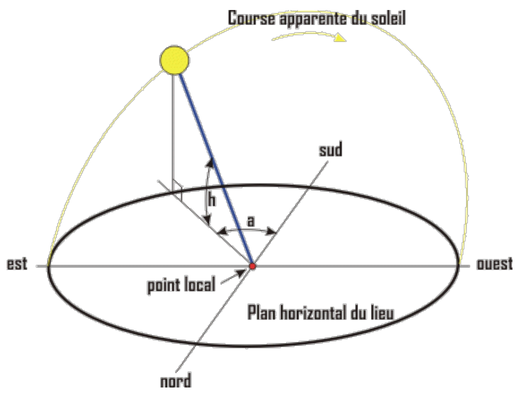
- *L'angle horaire.*
  L'angle horaire (Ah) mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu (zénith). Cet angle horaire est négatif si le temps solaire est inférieur à 12 h.
  L'angle horaire est obtenu de la façon suivante :
  Ah = 180 x (t_{SV} / 12 - 1)
  ou encore :
  Ah = 360 x (t_{SV} - 12) / 24
  A noter que le calcul de l'angle horaire est très complexe mais pour le sujet qui nous intéresse, les calculs exécutés ici sont suffisamment précis.

- *Position du soleil.*
  La position du soleil est exprimée par deux angles que sont :

  - La hauteur du soleil.
    La hauteur du soleil (h), ou encore l'altitude, est l'angle formé par le plan horizontal du lieu considéré et le vecteur "point local->soleil" (trait bleu sur le croquis ci-dessous). Cette hauteur du soleil intervient fortement sur la valeur de l'éclairement solaire et pour apprécier cette valeur en un point et une heure donnés il est nécessaire de calculer cette hauteur. La formule classique est la suivante :
    h = ArcSin(Sin(Lat) x Sin(Dec) + Cos(Lat) x Cos(Dec) x Cos(Ah))
    Exemple, quelle est la hauteur du soleil à 10 h vrai le 1er juillet pour Mulhouse ?
    Ah = 180 x (10 / 12 - 1) = -30°
    j = 30 + 28 + 31 + 30 + 31 + 30 + 1 = 181 jours
    Dec = ArcSin(0,398 x Sin(0,985 x 181 - 80)) = 23,19°

Mulhouse, Lat = 47,6°
h = ArcSin(Sin(47,6) x Sin(23,19) + Cos(47,6) x Cos(23,19) x Cos(-30)) = 55,85°

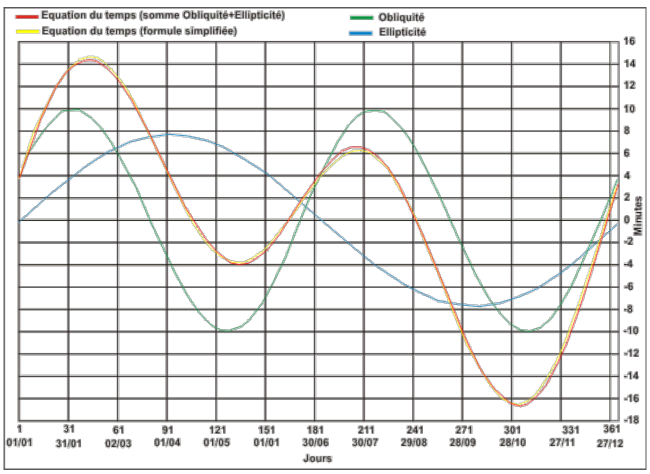
- L'azimut du soleil.
  L'azimut solaire (a) est l'angle horizontal formé par le plan méridien (axe nord-sud) et le plan vertical du vecteur "point local->soleil". Le signe de l'azimut est le même que celui de l'angle horaire.
  a = ArcSin((Cos(Dec) x Sin(Ah)) / Cos(h))
  Exemple avec les valeurs précédentes :
  a = ArcSin((Cos(23,19) x Sin(-30)) / Cos(55,85)) = -54,96°



- *Heures de lever et de coucher du soleil.*
  A partir de la latitude et de la déclinaison, il est possible de connaître l'heure solaire vrai du lever et du coucher de soleil :
  $t_{SVLever}$ = 12 - (ArcCos(-Tan(Lat) x Tan(Dec))) / 15
  $t_{SVCoucher}$ = 12 + (ArcCos(-Tan(Lat) x Tan(Dec))) / 15

- *Durée d'insolation.*
  La durée d'insolation représente la durée maximale de la journée :
  Di = 2 / 15 x ArcCos(-Tan(Lat) x Tan(Dec))

- *Equation du temps.*
  L'équation du temps permet la correction due aux irrégularités du mouvement de la terre qui varie selon la date de +14 mn à -16 mn. Cette équation donne la différence entre le temps solaire moyen (qui peut être indiqué par une montre) et le temps solaire vrai (indiqué par un cadran solaire).
  Le graphique ci-dessous montre différentes courbes :
  - la courbe verte est l'obliquité de la terre due à l'inclinaison de son axe
  - la courbe bleue est l'ellipticité de la terre due à l'excentricité de son orbite
  - la courbe rouge est l'équation du temps qui résulte de la somme de l'oblicité et de l'ellipticité
  - la courbe jaune est l'équation du temps avec une formule simplifiée (voir plus bas)



Formules de calcul de l'équation du temps :
Ellipticité (courbe bleue) :
C = (1,9148 x Sin(357,5291 + 0,98560028 + j) + 0,02 x Sin(2 x (357,5291 + 0,98560028 x j)) + 0,0003 x Sin(3 x (357,5291+0,98560028 x j))) x 4
Obliquité (courbe verte) :
O = (-2,468 x Sin(2 x (280,4665 + 0,98564736 x j)) + 0,053 x Sin(4 x (280,4665 + 0,98564736 x j)) - 0,0014 x Sin(6 x (280,4665 + 0,98564736 x j)) x 4
j étant le numéro d'ordre du jour dans l'année (1 pour le 1er janvier)
Equation du temps (courbe rouge) :
E = C + O

Formule simplifiée (courbe jaune) qui donne un résultat relativement précis puisque les deux courbes sont pratiquement superposées :
E = -9,87 x Sin(2 x ((2 x Pi x (j - 81)) / 365) x 180 / Pi) + 7,53 x Cos(((2 x Pi x (j - 81)) / 365) x 180 / Pi) + 1,5 x Sin(((2 x Pi x (j - 81)) / 365) x 180 / Pi)

- Prise en compte de l'équation du temps.

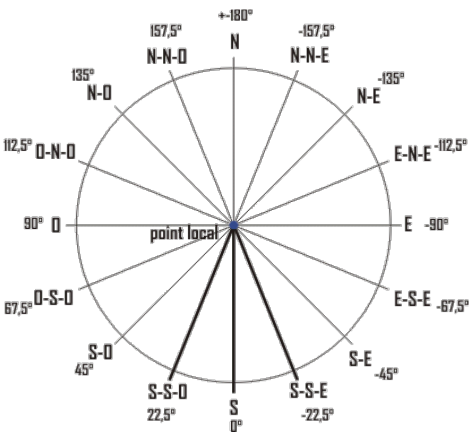
Pour connaître l'heure légale moyenne à partir de la lecture de l'heure solaire vrai (lue sur un cadran solaire) il est nécessaire d'effectuer une correction.
Cette correction doit prendre en compte le décalage de l'heure légale par rapport à l'heure solaire (+1 heure en hiver et +2 heures en été) et la longitude du lieu.
Note : la longitude est notée négativement à l'Est et positivement à l'Ouest, le point de référence étant le méridien de Greenwich.
Exemple :
Mulhouse, longitude = 7°20'24" Est en degrés sexagésimaux soit -7,34 degrés décimaux
Nous sommes le 15 janvier
Notre cadran solaire indique 11h30mn
L'heure l'égale moyenne est alors :
Correction de l'équation du temps :
E = -9,87 x Sin(2 x ((2 x Pi x (15 - 81)) / 365) x 180 / Pi) + 7,53 x Cos(((2 x Pi x (15 - 81)) / 365) x 180 / Pi) + 1,5 x Sin(((2 x Pi x (15 - 81)) / 365) x 180 / Pi) = 9,35, en mn décimales
Correction de longitude :
L = 4 x -7,34 = -29,36, en mn décimales
Heures décimales :
h = 11 + 1 + (9,35 + 4 x -7,34 + 30) / 60 = 12,1665
Conversion en h:mn:s :
h = 12
mn = 0,1665 x 60 = 9,99 (soit 9 minutes)
s = 0,99 x 60 = 59,4 (soit 59 secondes arrondies)

L'heure légale à Mulhouse ce 15 janvier à 11h30mn heure solaire vrai est 12:09:59

- Conversion degrés sexagésimaux <> décimaux.
  Pour ceux que ça intéresse, la formule Excel ci-dessous convertie des degrés décimaux en degrés sexagésimaux (cellule de référence B2) :
  Cette formule convertie la latitude, remplacer SI(B2<0;"\S";"\N") par SI(B2<0;"\E";"\O") pour la longitude (en fin de formule).
  =CONCATENER(TRONQUE(ABS(B2));"° ";SI(TRONQUE(60*(ABS(B2)-TRONQUE(ABS(B2))))<10;"0"&TRONQUE(60*(ABS(B2)-TRONQUE(ABS(B2))));TRONQUE(60*(ABS(B2)-TRONQUE(ABS(B2)))));"' ";SI(TRONQUE(60*(60*(ABS(B2)-TRONQUE(ABS(B2)))-TRONQUE(60*(ABS(B2)-TRONQUE(ABS(B2))))))<10;"0"&TRONQUE(60*(60*(ABS(B2)-TRONQUE(ABS(B2)))-TRONQUE(60*(ABS(B2)-TRONQUE(ABS(B2))))));TRONQUE(60*(60*(ABS(B2)-TRONQUE(ABS(B2)))-TRONQUE(60*(ABS(B2)-TRONQUE(ABS(B2)))))));"""";SI(B2=0;"";SI(B2<0;"\S";"\N")))
  Cette formule effectue la conversion inverse (cellule de référence C2) :
  Cette formule convertie la latitude, remplacer CHERCHE("s";C2) par CHERCHE("e";C2) pour la longitude (en début de formule).
  =SI(ESTERREUR(CHERCHE("s";C2));"";"-")&ARRONDI(GAUCHE(C2;CHERCHE("°";C2)-1)+STXT(C2;CHERCHE("'";C2)-2;2)/60+STXT(C2;CHERCHE("""";C2)-2;2)/3600;4)

- *Le coefficient d'icidence.*
  Le coefficient d'incidence (C_I) est l'angle formé par le rayonnement solaire avec la perpendiculaire d'une surface. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil et son azimut et d'autre part par l'orientation (o) et l'inclinaison (i) du plan récepteur. Ainsi, chaque plan récepteur peut être défini par un couple de valeurs, soit (o, i). L'orientation est négative vers l'est et positive vers l'ouest, elle peut être indiquée par une direction géographique comme par exemple nord-nord-est (voir la rose d'orientation ci-dessous). Quant à l'inclinaison, elle est égale à 0° pour un plan horizontal et 90° pour un plan vertical. Si le coefficient d'incidence est négatif, la surface du plan considéré ne reçoit pas de rayon solaire direct, si il est égal à 0 les rayons sont rasant.

  Rose d'orientation. En traits gras, les orientations qui sont les plus favorables.



  Le calcul du coefficient d'incidence est obtenu avec la formule suivante :
  C_I = Sin(i) x Cos(h) x Cos(o - a) + Cos(i) x Sin(h)
  Exemple avec une surface plane orientée sud-Est et inclinée à 45° :
  o = -45°
  i = 45°
  h = 55,85°
  a = -54,95°
  C_I = Sin(45) x Cos(55,85) x Cos(-45 - -54,95) + Cos(45) x Sin(55,85) = 0,976

- *Energie solaire disponible.*
  Note : ne seront pas abordées ici les explications techniques et complexes et les formules employées seront relativement simplifiées mais donnant toutes fois une précision suffisante.

  Il faut savoir que l'énergie solaire (constance solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère, 1367 W/m²) subit une altération par sa traversée de l'atmosphère, seulement une partie de cette énergie est disponible au sol. Ce rayonnement solaire se décompose en deux parties principales qui sont le rayonnement solaire direct (I*) et le rayonnement solaire diffus (D*). Le total de ces deux rayonnements est appelé le rayonnement solaire global (G*).

  - Le rayonnement solaire direct.
    Le rayonnement solaire direct arrive à traverser l'atmosphère mais subit malgré tout une atténuation de son intensité. Pour calculer ce rayonnement la démarche est la suivante :
    -1 Définir l'altitude du point local pour connaître la pression atmosphérique (P_{Atm}) :
    $P_{Atm} = 101325 \times (1 - 2,26 \times 10^{-5} \times z)^{5,26}$, en Pa
    où z est l'altitude en mètres

-2 Définir la pression de vapeur saturante (Pvs), le taux moyen d'humidité relative (HR) et la pression partielle de vapeur d'eau (Pv) :
Pvs = 2,165 x (1,098 + T / 100)^{8,02}, en mmHg (millimètre de mercure)
HR moyen = 50% (0,5)
Pv = Pvs x HR
où T est le température de l'air en °C
-3 Définir la masse d'air optique relative (m) d'où en découle l'épaisseur optique de Rayleigh (E_R) qui détermine l'atténuation due à la diffusion :
m = P_{Atm} / (101325 x Sin(h) + 15198,75 x (3,885 + h)$^{-1,253}$)
E_R = 1 / (0,9 x m + 9,4)
où h est la hauteur du soleil en degrés
-4 Définir le facteur de trouble de Linke :
T_L = 2,4 + 14,6 x B + 0,4 x (1 + 2 x B) x ln(Pv)
où B est le coefficient de trouble atmosphérique qui prend une valeur de :
B = 0,02 pour un lieu situé en montagne
B = 0,05 pour un lieu rural
B = 0,10 pour un lieu urbain
B = 0,20 pour un lieu industriel (atmosphère polluée)
Ln est le logarithme népérien

Le rayonnement solaire direct sur un plan récepteur normal à ce rayonnement vaut donc :
I* = E_{Sol} x EXP(-E_R x m x T_L), en W/m²
EXP, fonction inverse de Ln (e^x ou $e^\wedge$ sur les calculatrices)
Il est possible de simplifier l'obtention de I_{Sol} avec la formule suivante :
I* = E_{Sol} x EXP(-T_L / (0,9 + 9,4 x Sin(h))), en W/m²

Exemple pour un plan récepteur normal aux rayonnement solaire avec les valeurs précédemment obtenues :
h = 55,85°
Altitude du logement 260 m
Température de l'air 20 °C
Humidité relative 50% soit 0,5
B = 0,10
E_{Sol} = 1321,47 W/m² (181 jours)

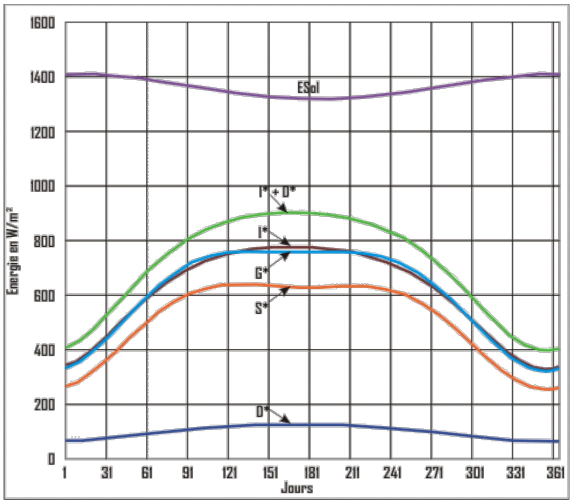
- Pression atmosphérique du lieu :
P_{Atm} = 101325 x (1 - 2,26 x 10^{-5} x 260)^{5,26} = 98232 Pa
- Pression partielle de vapeur :
Pvs = 2,165 x (1,098 + 20 / 100)^{8,02} = 17,54 mmHg
Pv = 17,54 x 0,5 = 8,77 mmHg
- Epaisseur optique de Rayleigh :
m = 98232 / (101325 x Sin(55,85) + 15198,75 x (3,885 + 55,85)$^{-1,253}$) = 1,17
E_R = 1 / (0,9 x 1,17 +9,4) = 0,095
- Facteur de trouble de Linke :
T_L = 2,4 + 14,6 x B + 0,4 x (1 + 2 x B) x ln(Pv) = 4,90

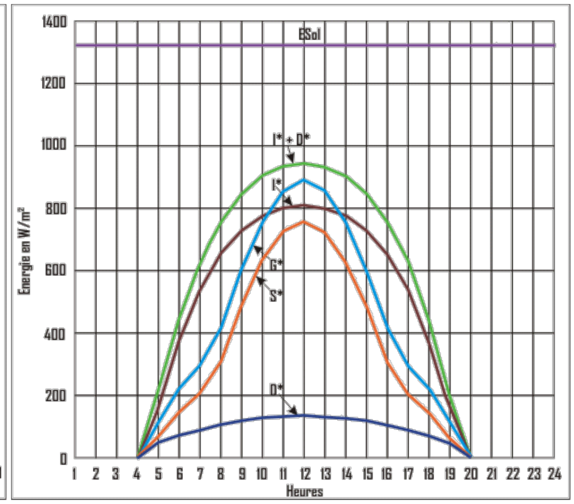
I* = 1321,47 x EXP(-0,095 x 1,17 x 4,9) = 766,52 W/m²
Avec la formule simplifiée :
I* = 1321,47 x EXP(-4,90 / (0,9 + 9,4 x Sin(55,85))) = 751,39 W/m²

- Le rayonnement solaire diffus.
Le rayonnement solaire diffus arrive sur le plan récepteur après avoir été réfléchi par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol. On suppose que le rayonnement solaire diffus n'a pas de direction prédominante (donc isotrope) de ce fait, l'orientation du plan récepteur n'a pas d'importance, seule son inclinaison en a. Ainsi sur un plan récepteur d'inclinaison i, D* est égal à :
D* = 125 x Sin(h)^{0,4} x ((1 + Cos(i)) / 2) + 211,86 x Sin(h)^{1,22} x ((1 - Cos(i)) / 2), en W/m²
Exemple d'un plan incliné à 45° :
D* = 125 x Sin(55,85)^{0,4} x ((1 + Cos(45)) / 2) + 211,86 x Sin(55,85)^{1,22} x ((1 - Cos(45)) / 2) = 123,54 W/m²
On appelle albédo la fraction du rayonnement solaire renvoyé par une surface (ici le sol), ce coefficient d'albédo a été intégré dans la formule ci-dessus avec une valeur moyenne de 0,22. Ce coefficient est fonction de la nature du sol, de sa température et de sa capacité à réfléchir le rayonnement solaire.

- Rayonnement solaire global.
La somme de ces deux rayonnements représente le rayonnement global :
G* = S* + D*
où S* est la valeur du rayonnement solaire direct sur un plan récepteur (o, i) et qui est égal à :
S* = I* x C_I
C_I étant le coefficient d'orientation présenté plus haut
Avec les trois exemples précédents (C_I vaut 0,976), G* est égal à :
G* = 766,52 x 0,976 + 123,54 = 871,66 W/m²
Le rayonnement global est le rayonnement maximal qu'il est possible d'avoir sur un plan récepteur (o, i) donné, par exemple un capteur solaire thermique. La transformation de cette énergie en énergie utilisable (ici à des fins de chaleur) est fonction des caractéristiques du capteur solaire, donc, cette énergie est encore atténuée par le rendement du capteur c'est à dire de sa capacité à rendre utilisable cette énergie.

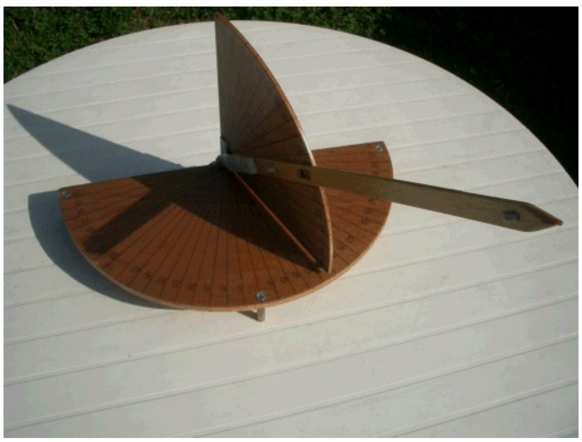
Ci-dessous deux graphiques représentant les différents rayonnements solaires pour une latitude de 47,6° avec une altitude de 260 m. L'inclinaison du plan récepteur est de 45° et son orientation de 0° (plein sud) :
- sur une année à 10 heures vrais
- sur une journée avec le N° du jour 181





L'énergie solaire qui arrive sur le capteur est représenté par la courbe bleu clair (G*), avec un capteur solaire motorisé, la courbe G* serait égale à la courbe I* + D* (vert clair) soit, pour l'exemple ci-dessus, 14,2% sur l'année et 28,6% sur la journée.

- *Les masques solaires.*
  Les masques solaires sont les ombres portées par les obstacles environnants (arbres, montagnes, bâtiments, etc...) sur un point donné (ici des capteurs solaires). Lors de la conception du projet, il est très important de prêter attention aux masques solaires et d'en mesurer l'incidence sur les capteurs solaires. La mesure des masques n'est pas chose aisée pour les capteurs solaires car ils se trouvent généralement sur le toit et la position n'est pas des plus confortable pour effectuer des mesures.
  Afin de connaître l'impact des masques sur les capteurs solaires, il est possible d'utiliser plusieurs instruments pouvant mesurer des angles (rapporteurs avec fil à plomb par exemple) mais une façon simple est d'utiliser un clinomètre. Cet instrument permet d'effectuer un relever angulaire de hauteur et azimutal des différents masques. Il est possible de construire un clinomètre à l'aide de deux planches de contre-plaqué, un pivot quelconque et un réglet en bois servant de viseur (voir photo ci-dessous).



  - Méthode de mesure.
    Matériel nécessaire; un clinomètre, une boussole et un niveau.
    Afin d'effectuer un relevé des angles des masques, se positionner au plus près de l'emplacement prévu pour les capteurs solaires, à l'aide de la boussole installer le clinomètre avec le degré azimutal 0° direction Sud et positionner le clinomètre de niveau dans les deux sens puis commencer le balayage du paysage de la gauche vers la droite en effectuant une visée de chaque obstacle pouvant porter ombrage aux capteurs solaires. Pour ce faire, viser les uns après les autres les points de l'obstacle à l'aide du réglet et relever le couple d'angles (azimut et hauteur) de chaque points puis reporter ces relevés sur le diagramme solaire du lieu considéré (fonction de la latitude).