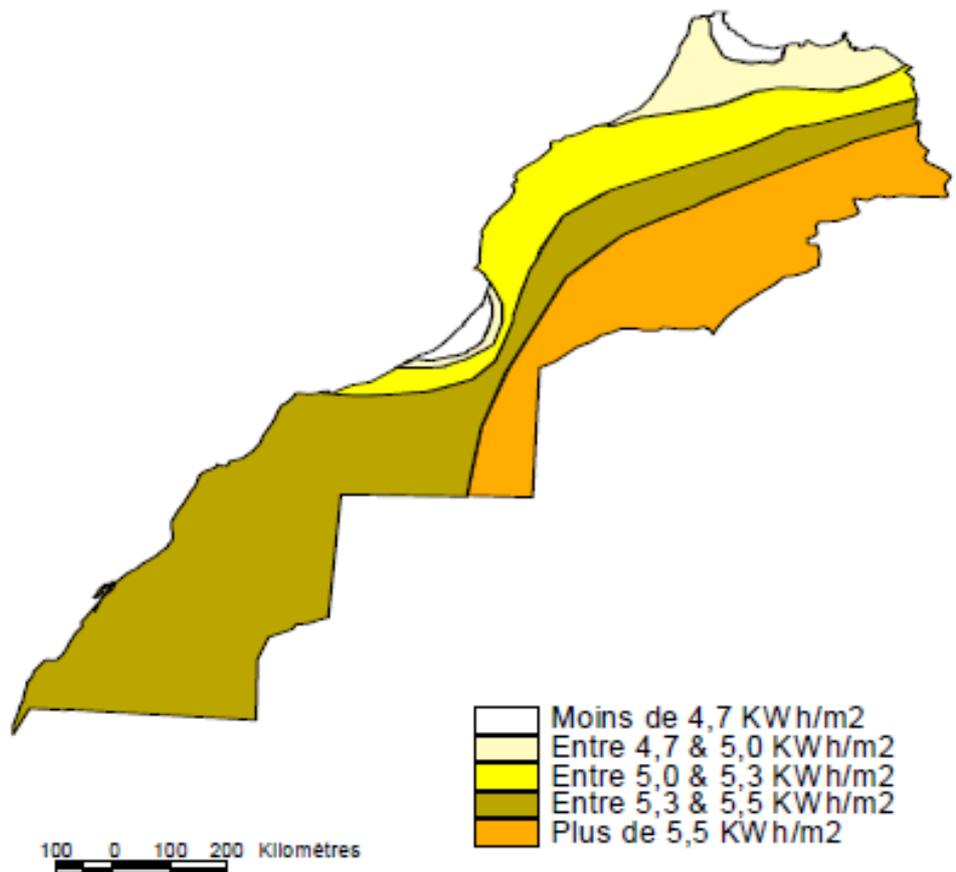


Chapitre II

Le Gisement solaire



L'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelables au premier rang desquelles l'énergie solaire. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt qu'on lui a porté à l'époque étaient sa gratuité (*nous y reviendrons*), sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile.

On s'est vite aperçu que l'énergie solaire, contrairement à une idée répandue, n'est pas tout à fait gratuite : son utilisation nécessite un investissement de départ souvent plus lourd que pour les sources d'énergie conventionnelles et nombre d'installations solaires sont aujourd'hui à l'arrêt faute d'avoir prévu un budget pour la maintenance des équipements.

Toutefois, sans être totalement gratuite, l'énergie solaire présente des coûts de fonctionnement réduits et offre dans certains cas une alternative économiquement rentable par rapport aux sources d'énergie conventionnelles.

Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire sera lié non seulement à ses avantages économiques (*qui grandiront au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossile diminueront*) mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement : pas de rejets polluants (*fumées contenant du CO_2 et des NO_x par les centrales thermiques*), pas de danger radioactif et de déchets encombrants (*centrales nucléaires*), possibilité de limitation de l'emploi des CFC (*production de froid solaire par adsorption*).

I. 1. Aperçu de la ressource

I. 1. 1. Le Soleil

Le Soleil est une étoile, la seule du système solaire, et la plus proche de nous. La plus proche après elle est Proxima du Centaure, située à 4,2 *année* lumières du Soleil.

Carte d'identité du soleil		
Âge	<i>4,6 milliards d'années</i>	
Diamètre équatorial	<i>1392530 Km</i>	
Circonférence	<i>4372544 Km</i>	
Distance par rapport à la Terre	<i>149598000 Km</i>	
Composition (<i>éléments/pourcentage</i>)	Hydrogène	73,46%
	Hélium	24,85%
	Oxygène	0,77%
	Carbone	0,29%
	Fer	0,16%
	Néon	0,12%
	Azote	0,09%
	Silicium	0,07%
	Magnésium	0,05%
	Soufre	0,04%
	Autres éléments	0,04%
Température	Noyau	15 000 000 K
	Zone radiative	1 500 000 K
	Zone de convection et photosphère	6 000 K
Densité (eau=1)	1,41	

Le noyau : il s'étend du centre à environ 0,2 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à $150\,000\text{ kg/m}^3$. C'est là qu'est produite l'énergie solaire.

La zone radiative : elle s'étend de 0,2 à 0,7 rayon solaire environ. Sa température est bien plus basse que celle du noyau, mais sa densité reste très forte. Cette zone joue un rôle important dans les transferts et le filtrage de l'énergie, du cœur vers la surface du Soleil.

La zone de convection : elle s'étend de 0,7 rayon solaire à 400 km de la surface du Soleil environ. Elle permet les échanges d'énergie entre la zone radiative et la photosphère. En raison de sa faible densité, les échanges dans cette zone se font par convection: les gaz chauds remontent à la surface, se refroidissent, puis redescendent, se réchauffent, remontent, et ainsi de suite.

La photosphère : elle s'étend sur les derniers 400 km du rayon de l'étoile. Une partie de la lumière visible que nous percevons y est produite. Elle est composée de gaz moins denses que les autres couches du Soleil.

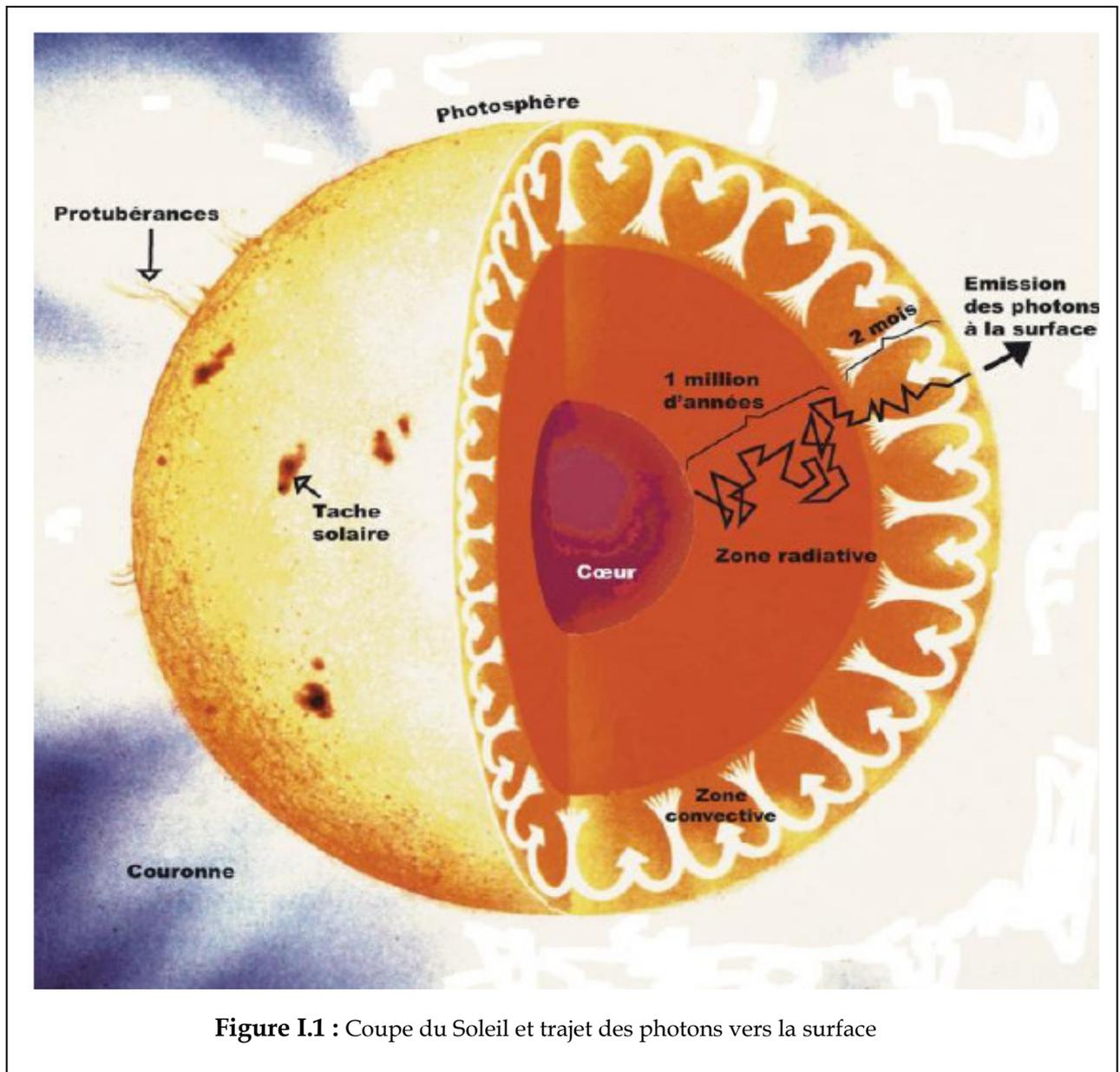


Figure I.1 : Coupe du Soleil et trajet des photons vers la surface

I. 1. 2. Les réactions thermo-nucléaires dans le soleil

Le Soleil produit de l'énergie grâce aux réactions de fusion nucléaire qui se produisent en son noyau, à cause de la chaleur et de la pression très élevées : les atomes d'hydrogène et leurs isotopes se heurtent violemment pour former de l'hélium 4 (${}^4_2\text{He}$), libérant en même temps une énorme quantité d'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique de basse longueur d'onde et de très haute fréquence : les rayons gamma.

Ainsi, chaque seconde, le Soleil transforme 600 millions de tonnes d'hydrogène en hélium et perd 4 millions de tonnes, expulsées dans l'espace sous forme de particule ou de rayonnement. Tous les atomes présents au cœur du Soleil peuvent fusionner. C'est ainsi que tous les éléments présents dans l'Univers ont été formés.

Après avoir été émis à la suite des réactions nucléaires à l'intérieur du noyau, les rayons gamma doivent, pour atteindre la surface, traverser la zone radiative du Soleil. Cependant, la zone radiative est opaque et très dense, et les rayons gamma

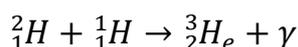
sont absorbés par les atomes de cette zone et sont réémis sous forme de photons de moindre énergie, à leur tour absorbés et réémis, jusqu'à atteindre la surface du Soleil, en passant par la zone de convection et la chromosphère.

Du coup, les photons produits à l'intérieur du noyau mettent parfois un temps estimé entre 20 000 et 50 millions d'années à atteindre la surface du Soleil mais toutes les longueurs d'onde du spectre de la lumière y sont représentées, ou presque. Puis, en 8 minutes en moyenne, à la vitesse de $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, les photons atteignent la Terre.

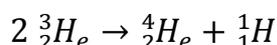
Deux atomes d'hydrogène fusionnent et libèrent un neutrino et un positron, formant un atome de deutérium (${}^2_1\text{H}$), un isotope de l'hydrogène :



L'atome formé fusionne avec un atome d'hydrogène et libère un photon gamma, formant un atome d'hélium 3 (${}^3_2\text{He}$), un isotope de l'hélium :



L'atome d'hélium 3 fusionne avec un autre atome d'hélium 3, formant deux atomes d'hydrogène et un atome d'hélium 4 :

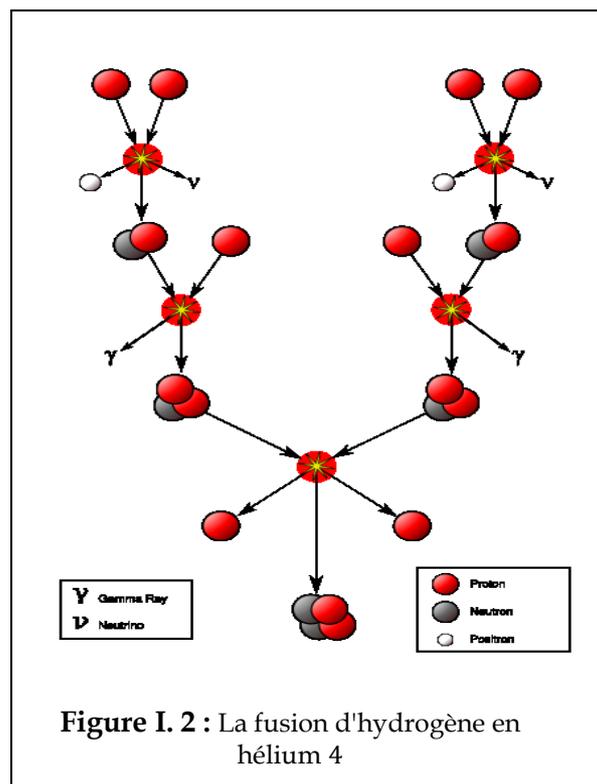


On estime aujourd'hui que le Soleil va encore «vivre» pendant 6 milliards d'années. Tout ce temps, il continuera à produire de l'énergie. L'énergie solaire est donc une source infinie d'énergie.

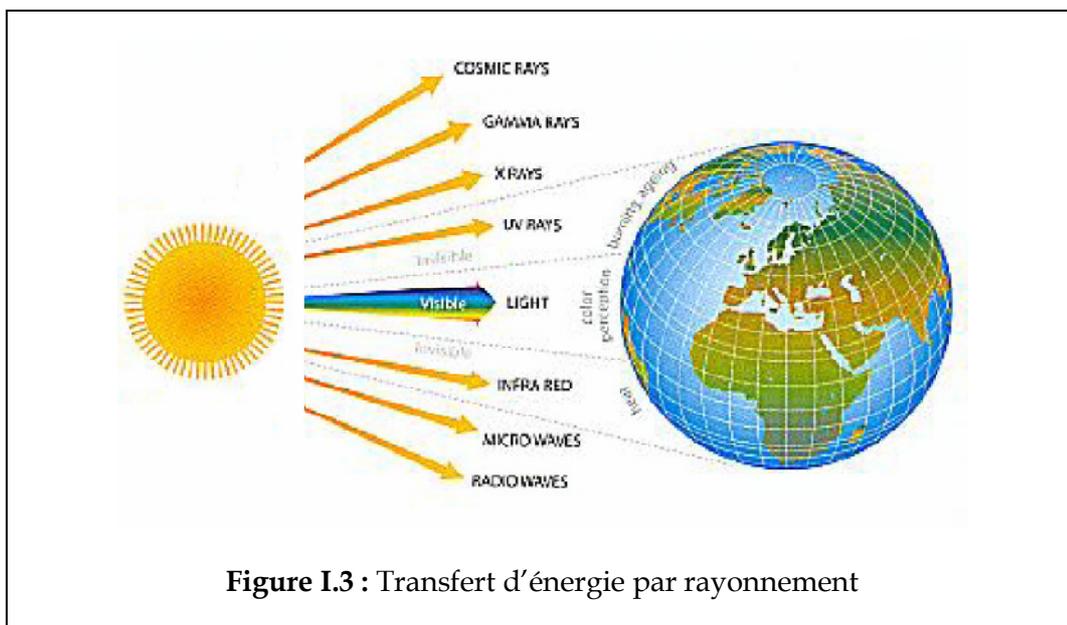
I. 1. 3. Énergie envoyé par le soleil dans l'espace

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de $2 \cdot 10^{27}$ tonnes.

Toute l'énergie du Soleil provient des réactions thermo-nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde $564 \cdot 10^6$ tonnes d'hydrogène en $560 \cdot 10^6$ tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E = mc^2$), ce qui représente une énergie totale de $36 \cdot 10^{22}$ kW.



Le soleil envoie dans l'espace une énergie qui est au niveau de la terre de l'ordre de 1300 W/m^2 . Une fois l'atmosphère traversée¹, la terre reçoit au niveau du sol à la verticale à midi, dans le cas idéal d'un temps clair et sec, de l'ordre de 1000 W/m^2 . Au niveau mondial, compte-tenu de l'ensoleillement réel, l'énergie solaire reçue au sol en moyenne annuelle se monte à environ $75\,000 \text{ GTep}^2$ ou $0,9 \text{ milliards de TWh}^3$. Cette énergie représente 6000 fois la consommation mondiale annuelle actuelle d'énergie ($12,5 \text{ GTep}$).



Les chiffres du soleil :

- Distance Terre-Soleil : environ 150 millions de kilomètres
- Diamètre : environ $1,4 \text{ million}$ de kilomètres ($\text{Terre} = 12\,700 \text{ km}$)
- Masse : environ $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ($\text{Terre} = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$)
- Masse volumique : $1,41 \text{ g/cm}^3$ ($\text{eau} = 1 \text{ g/cm}^3, \text{Terre} = 5,5 \text{ g/cm}^3$)
- Puissance rayonnée par le Soleil : $4 \cdot 10^{23} \text{ kW}$
- Énergie solaire reçue par la Terre : $1353 \text{ J/m}^2/\text{s}$
- Température au centre du Soleil : environ 14 millions de Kelvins ($0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Température de la "surface" du Soleil : environ $5\,800 \text{ K}$

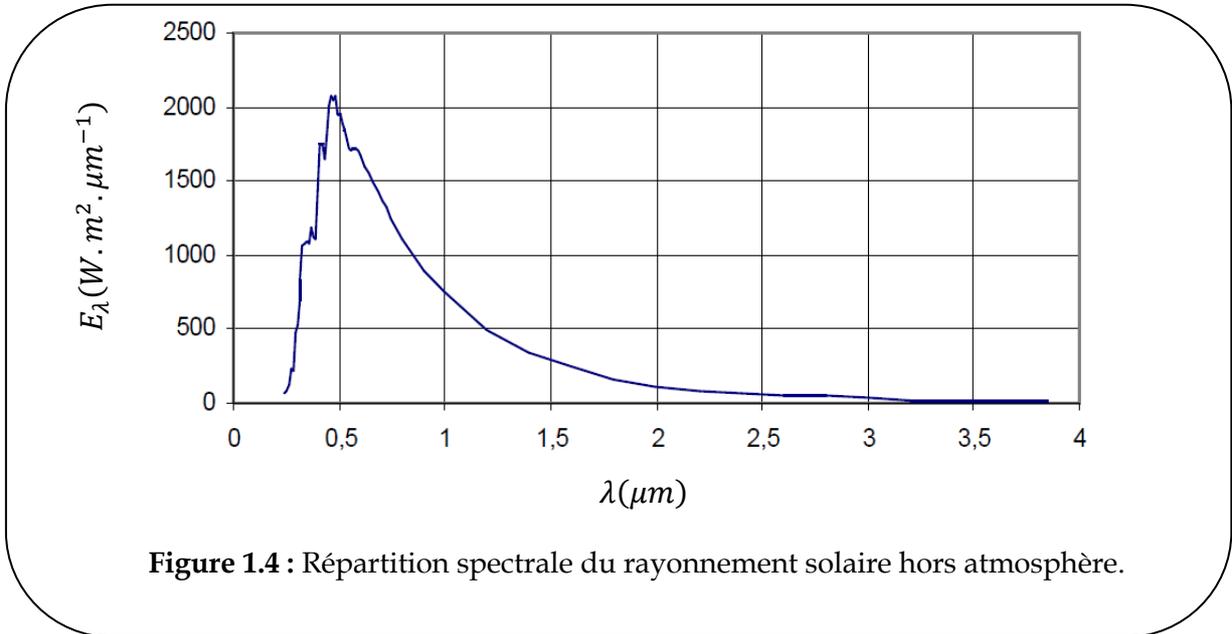
¹ L'atmosphère en réfléchit et en absorbe une partie.

² Tep : contenu énergétique d'une tonne de pétrole.

³ $1 \text{ GTep} = 11\,630 \text{ TWh}$

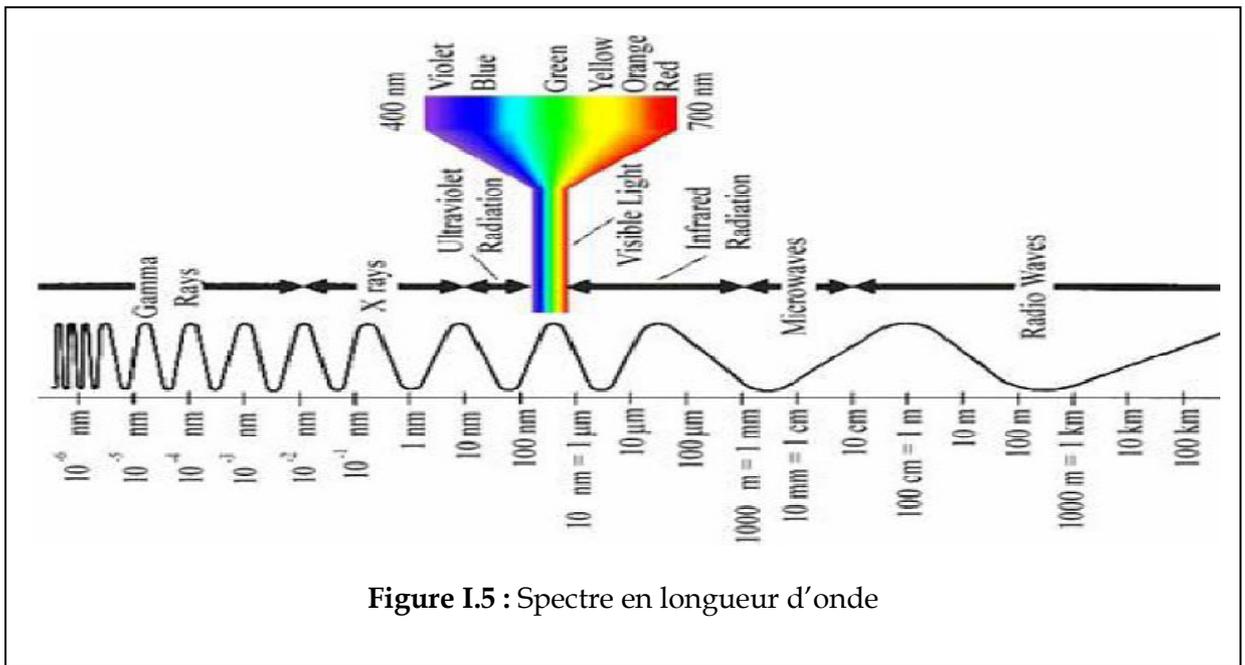
I. 1. 4. Le spectre en longueur d'onde du rayonnement solaire

On trouvera sur la *figure I. 4* la répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.



On notera que 98 % du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'onde inférieures à 4 μm . En première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777 K.

Rappel : le rayonnement visible possède des longueurs d'ondes entre 0,4 et 0,75 μm



I. 1. 5. Le rayonnement solaire

La rotation et l'inclinaison de la terre provoquent une variation de l'énergie disponible en fonction de la latitude en un point donné. De plus, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et les phénomènes météorologiques entraînent des variations quotidiennes qui augmentent, ou diminuent, le rayonnement solaire.

On distingue pour cela :

- **Le rayonnement direct**

Les rayons du soleil atteignent le sol terrestre sans subir de modification de leur trajectoire initiale. Les rayons restent parallèles.

- **Le rayonnement diffus**

En traversant l'atmosphère, les rayons du soleil rencontrent des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc... Ces obstacles ont pour effet de rediriger les rayons du soleil parallèles (à l'origine) en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.

- **Le rayonnement réfléchi**

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante (par exemple, la neige en montagne). Cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée.

- **L'Albédo** : L'albédo du système Terre Atmosphère est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi vers l'espace. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son *albédo* est élevé. Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont : les nuages, les surfaces de neige et de glace et les aérosols.

Exemple:

L'albédo de la neige fraîche est de 0,87, ce qui signifie que 87 % de l'énergie solaire est réfléchi par ce type de neige.

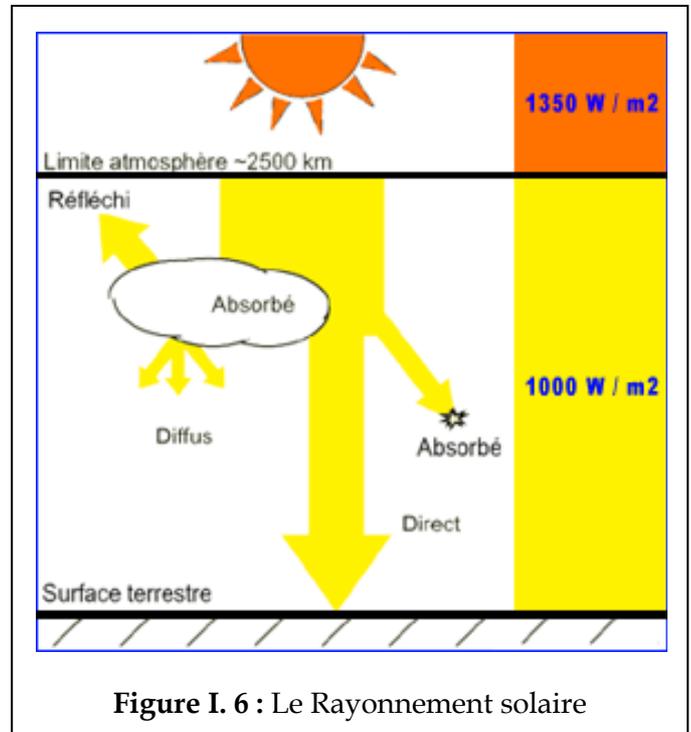
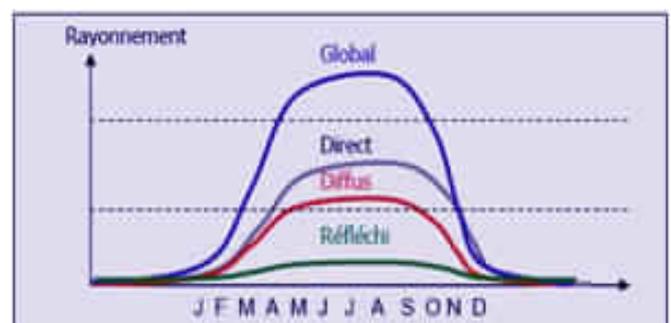


Figure I. 6 : Le Rayonnement solaire



La quantité globale d'énergie, sous forme de rayonnement, est la somme de tous les rayonnements ci-dessus.

I. 1. 6. Le flux de rayonnement solaire E et la constante solaire E_0

La valeur du flux de rayonnement solaire E reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne E_0 est appelée la constante solaire, elle vaut $E_0 = 1353 \text{ W.m}^{-2}$. En première approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année j par :

$$E = E_0[1 + 0,033 \cos(0.984 j)] \quad (\text{I.1})$$

Au niveau du sol, la puissance maximale perpendiculairement au rayonnement solaire est de 1000 W par temps ensoleillé alors qu'elle est de 1353 W hors atmosphère.

La puissance incidente par une unité de surface sur un plan donné est appelée *irradiance*. Elle est donnée en W/m^2 .

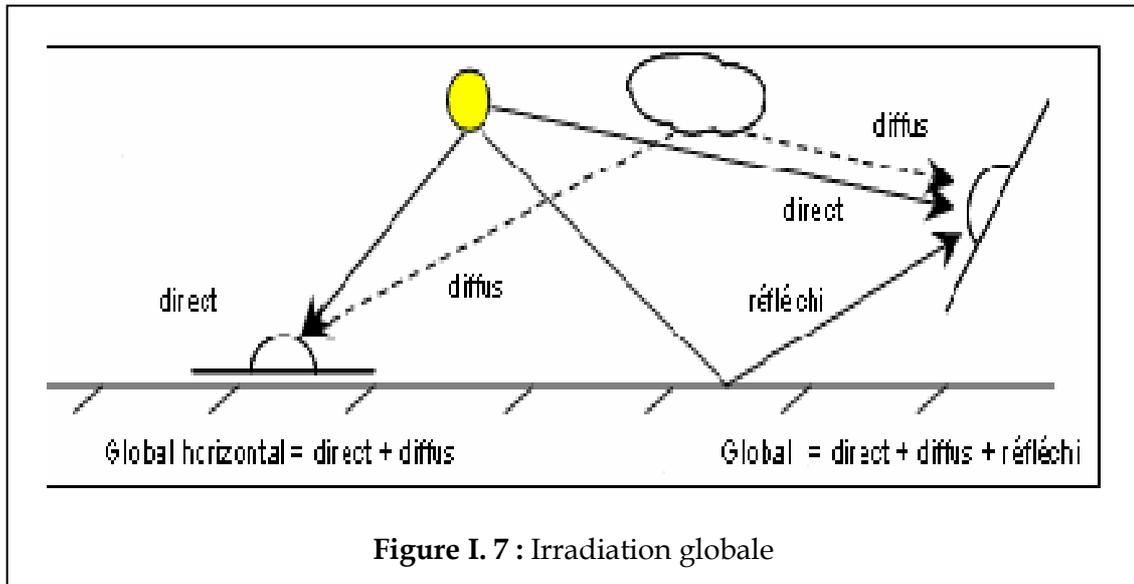
Par intégration des *irradiances* sur un intervalle de temps donné, on accède aux *irradiations* correspondantes, usuellement données en J/m^2 ou en kWh/m^2 .

I. 1. 7. L'irradiation globale

Pour pouvoir dimensionner une installation solaire, il est nécessaire de connaître la quantité d'énergie disponible.

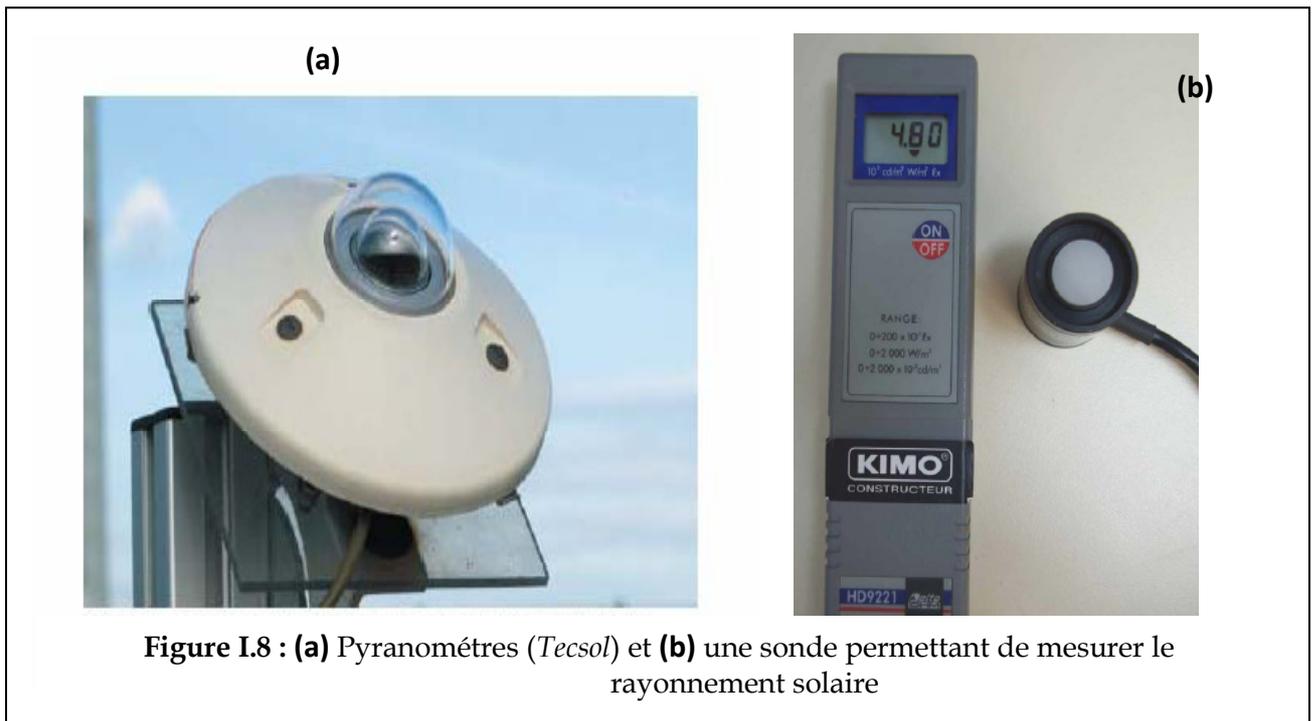
Dans un plan donné, l'*irradiation incidente*, appelée *irradiation globale*, est la somme de trois composantes :

- **L'irradiation directe** ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$), qui provient directement du soleil. Cette composante est nulle lorsque le soleil est caché par des nuages ou par un obstacle (bâtiment, masque lointain)
- **L'irradiation diffuse** ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$), qui correspond au rayonnement reçu de la voûte céleste, hormis le rayonnement direct.
- **L'irradiation réfléchie** ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$), qui correspond au rayonnement renvoyé par le sol et l'environnement. Cette composante est nulle sur un plan horizontal.



I. 1. 8. Mesure du Rayonnement Solaire

L'irradiation globale reçue sur une surface horizontale. Elle se mesure avec un *solarimètre* ou *pyranomètre* (figure I. 8 (a)).



Principe : Les *pyranomètres* (figure I. 8 (a)) délivrent une tension directement proportionnelle à l'irradiation. Cette tension provient d'une thermopile dont la partie supérieure s'échauffe par exposition à l'irradiation solaire alors que la partie inférieure protégée de cette irradiation sert de référence.

Ce sont des appareils coûteux : il y a donc peu de stations météorologiques qui en utilisent

Autre sonde de mesure de l'irradiation solaire (figure I. 8 (b)).

I. 1. 9. Potentiel solaire

La durée d'insolation est mesurée par des héliographes. La carte d'insolation du Maroc (*figure I.9*) nous montre :

- Le soleil se montre plus volontiers dans le sud et l'est du pays que dans le nord.
- Le Maroc dispose d'un gisement solaire de presque 320 jours/an et d'un potentiel moyen 5.5kWh/m².jour.

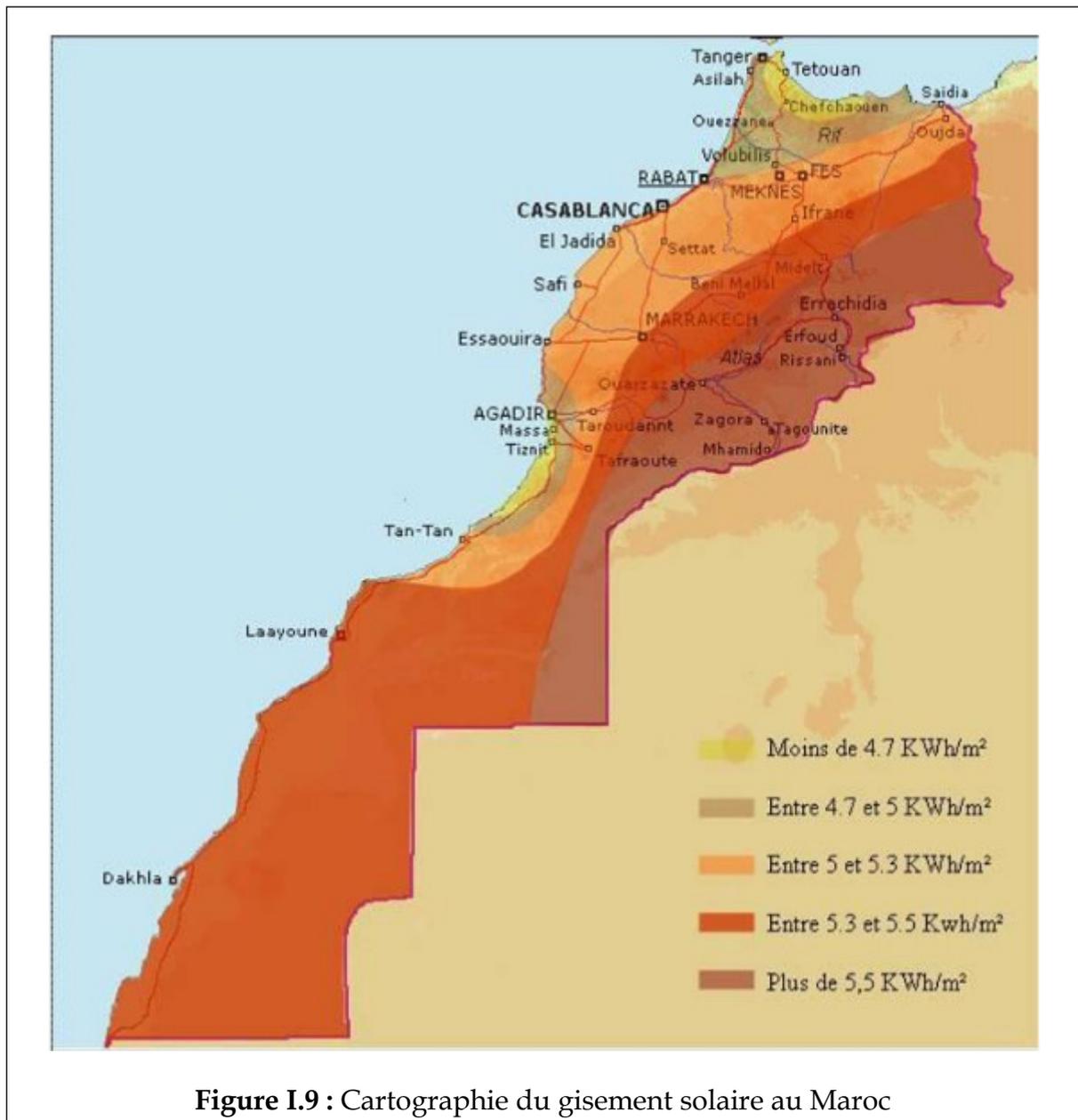
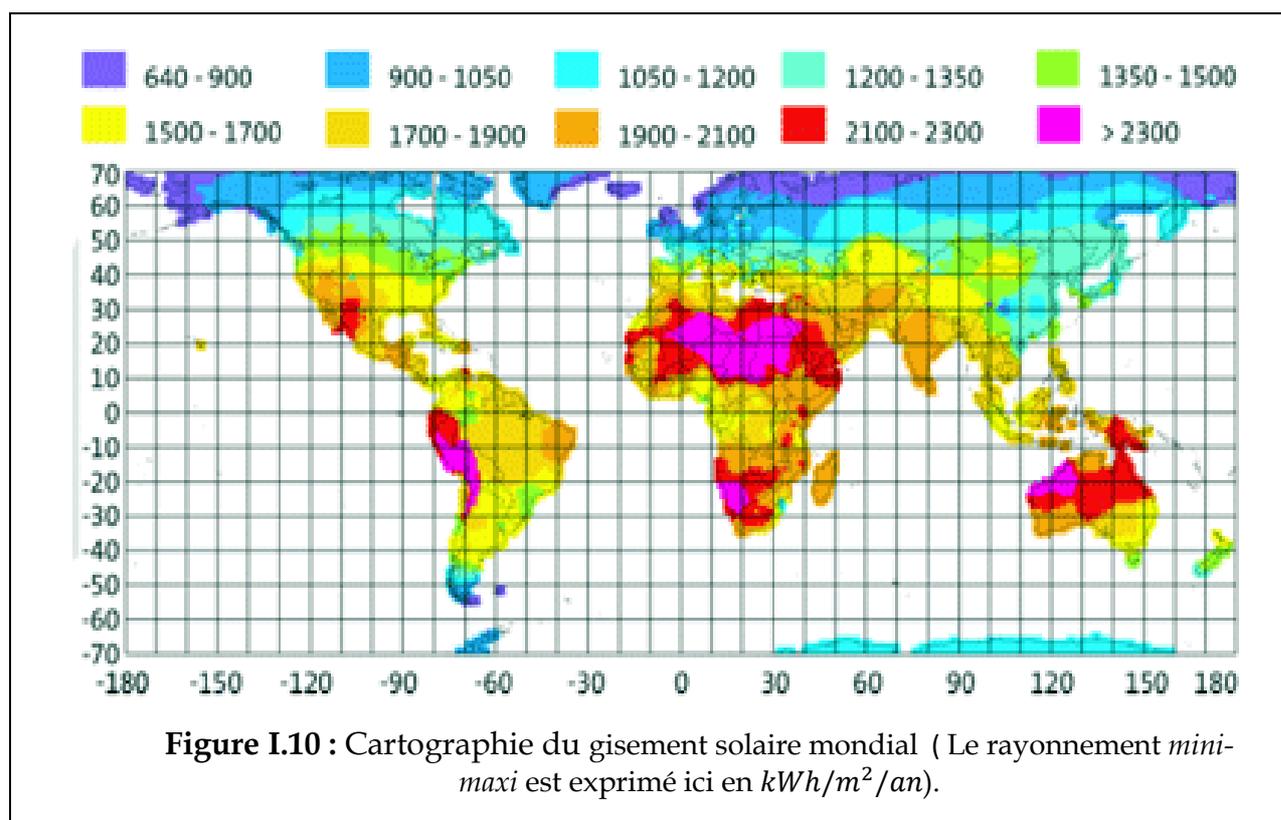


Figure I.9 : Cartographie du gisement solaire au Maroc

	Janvier	Mars	Mai	Juillet	Août	Octobre	Décembre
Agadir	3,66	5,54	6,82	6,64	6,03	4,94	3,13
Casablanca	2,7	4,79	6,39	6,89	6,36	4,04	2,38
Laâyoune	3,63	5,71	6,96	6,8	6,51	5	3,49
Essaouira	3,3	5,12	6,36	7,06	6,57	4,42	2,97
Fès	2,87	4,54	6,55	7,61	7,04	4,24	2,62
Marrakech	3,45	5,16	6,67	7,58	7,01	4,62	3,19
Nador	3,69	4,6	6,62	7,47	7,11	4,27	2,35
Ouarzazate	2,86	6,01	7,56	7,51	6,87	5,05	3,58
Oujda	2,89	4,69	6,67	7,65	6,65	4,3	2,67
Rabat salé	2,79	4,56	6,59	7,12	6,62	4,2	2,55
Safi	3,12	5,11	6,92	7,3	6,86	4,46	2,89
Tanger	2,53	4,48	6,78	7,62	7,08	4,11	2,3

Tableau donnant les Irradiations globales moyennes journalières de quelques villes du royaume en kWh/m^2 (Source: Météorologie Nationale).



La carte ci-dessus montre les valeurs annuelles moyennes de l'irradiation globale, en $kWh/m^2/an$. L'énergie solaire disponible diffère d'une zone géographique à l'autre, mais aussi au cours de l'année. Dans les zones désertiques proches de l'équateur, les valeurs d'irradiation annuelle peuvent atteindre les $2\ 200\ kWh/m^2/an$.

Les variations de l'énergie reçue sont fonction de plusieurs paramètres :

- durée d'ensoleillement;
- masse d'atmosphère traversée par les rayons solaire;
- inclinaison des rayons solaire;
- nébulosité (*nuages, brouillards,...*)

Les caractéristiques qualitatives et quantitatives d'ensoleillement d'un site sont des données essentielles pour tout concepteur d'installations solaires.

Nous allons nous intéresser dans la suite aux aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la Terre.

I. 2. Aspects géométriques: repérage du soleil

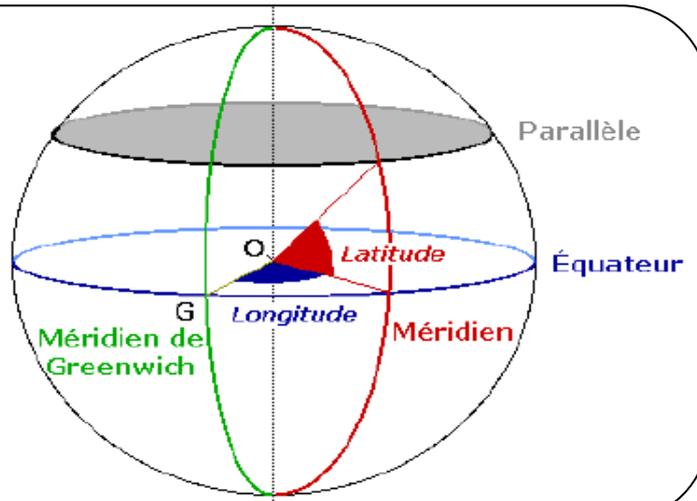
Nous allons nous intéresser ici aux aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la Terre dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la Terre et orienté dans une direction fixée. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire.

I. 2. 1. Repérage spatial

➤ Coordonnées géographiques

Pour repérer un point sur le Terre il faut connaître les deux angles suivants :

- **Latitude L** : Position angulaire par rapport à l'équateur
 $Sud - 90^\circ \leq L \leq +90^\circ Nord$
- **Longitude l** : Position angulaire par rapport au méridien de Greenwich
 $Est - 180^\circ \leq l \leq +180^\circ Ouest$

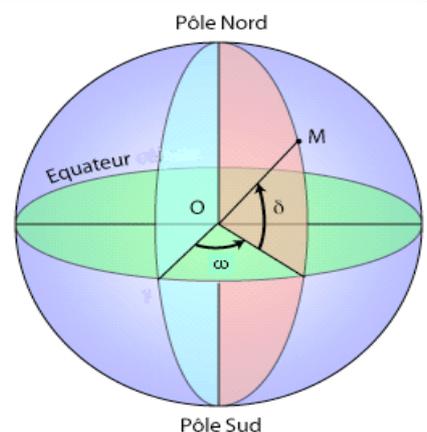


➤ Coordonnées horaires

Pour repérer un point du ciel depuis la terre

Angle horaire ω : Position angulaire du Soleil par rapport au méridien local. Il varie de 15° par heure avec la rotation de la Terre autour de son axe .

Déclinaison δ : Position angulaire du soleil par rapport au plan de l'équateur dépend du jour de l'année



➤ Coordonnées horizontales

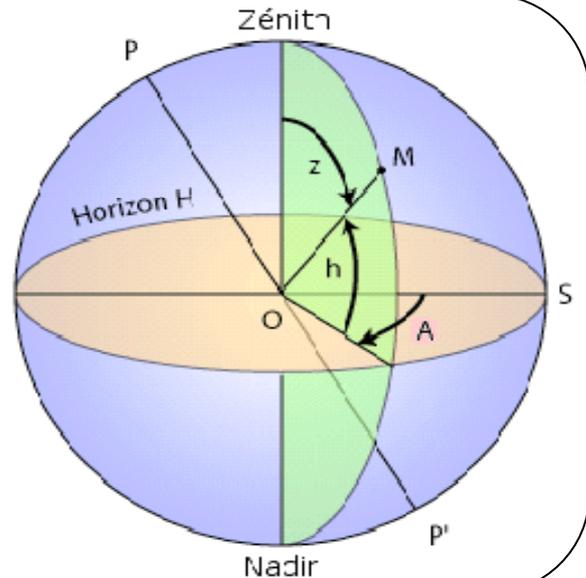
Pour repérer un point du ciel depuis un point d'observation terrestre

Azimut a : angle horizontal par rapport au sud (positive vers l'ouest)

$$-180^\circ \leq a \leq +180^\circ$$

Hauteur ou élévation h : angle verticale par rapport à l'équateur $0^\circ \leq h \leq 90^\circ$

Angle zénithal θ_z : angle verticale par rapport à l'équateur (complémentaire de h)
 $\theta_z = 90^\circ - h$ et $0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$



I. 2. 2. Mouvements de la Terre

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé *l'écliptique*.

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance *Terre/Soleil* ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675.106 km.

La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé *l'axe des pôles*. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé *l'équateur* (Figure I. 11).

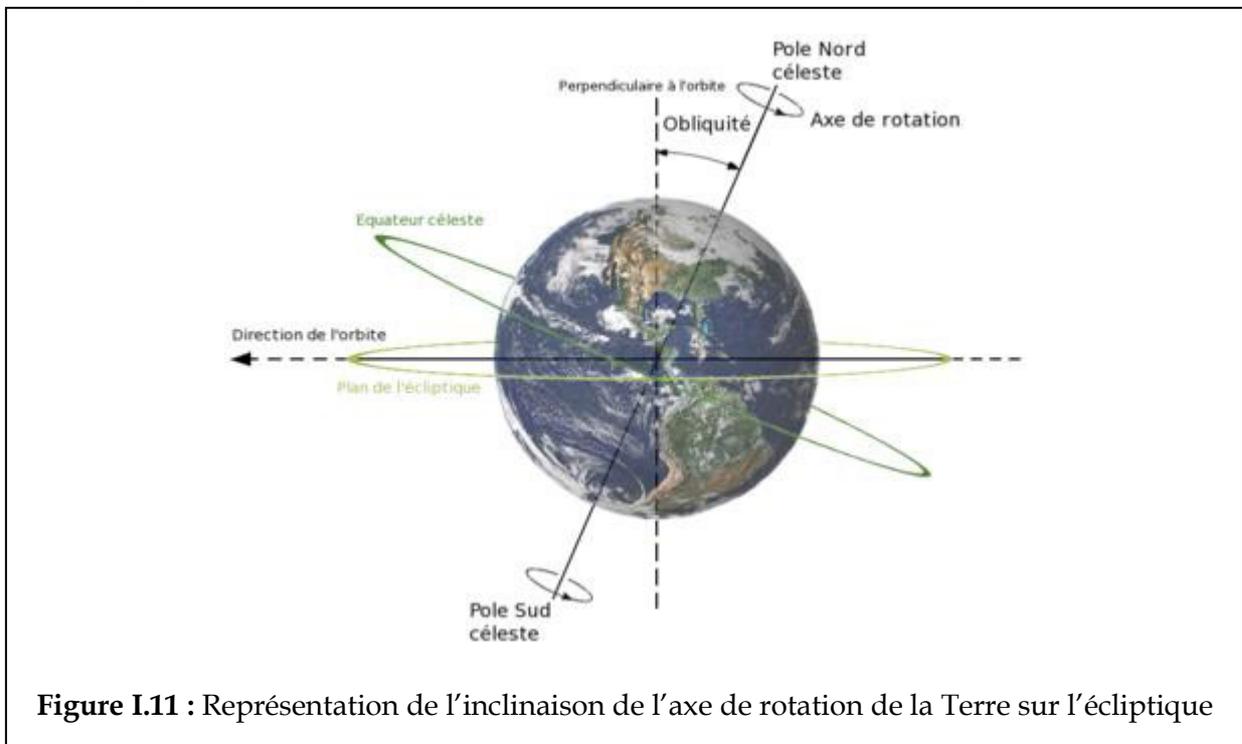


Figure I.11 : Représentation de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur l'écliptique

L'axe des pôles n'est pas *perpendiculaire* à l'*écliptique* : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé *inclinaison* et qui vaut $23^{\circ}27'$. Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la *figure I. 12* .

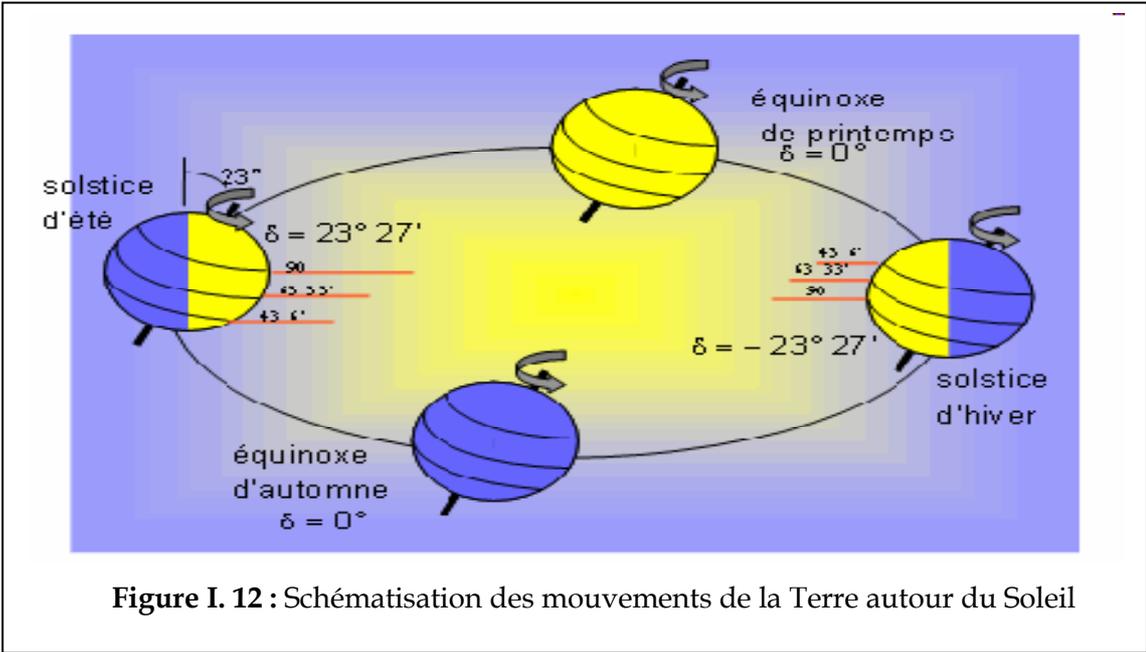
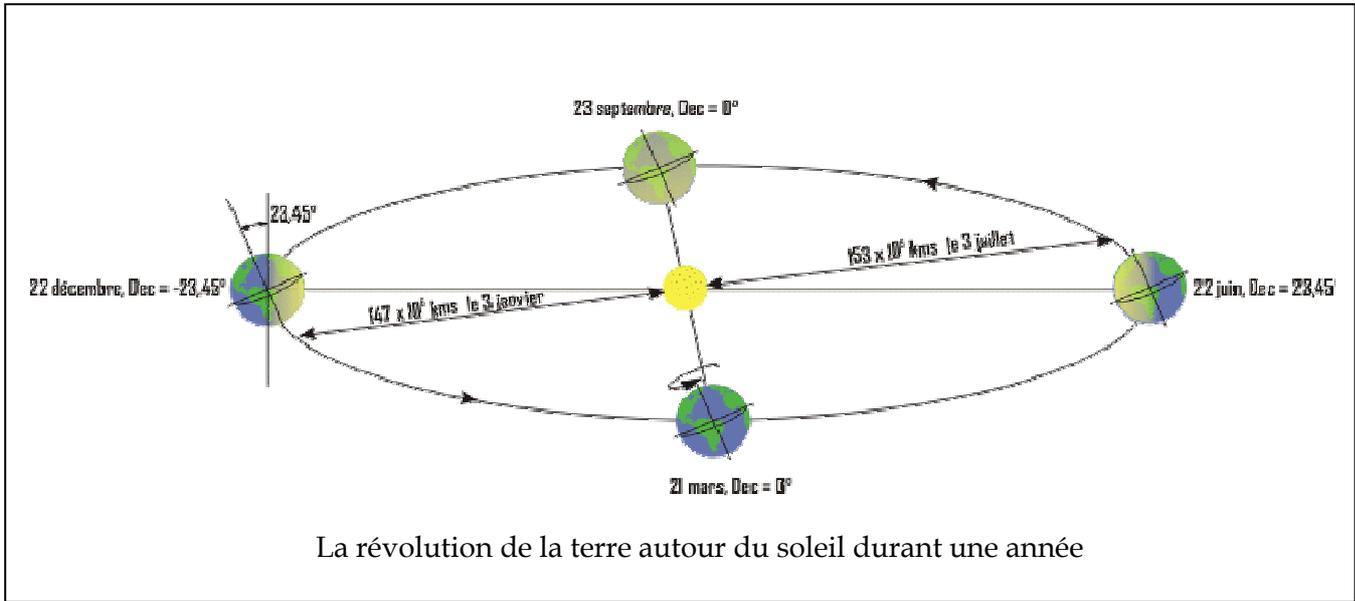


Figure I. 12 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

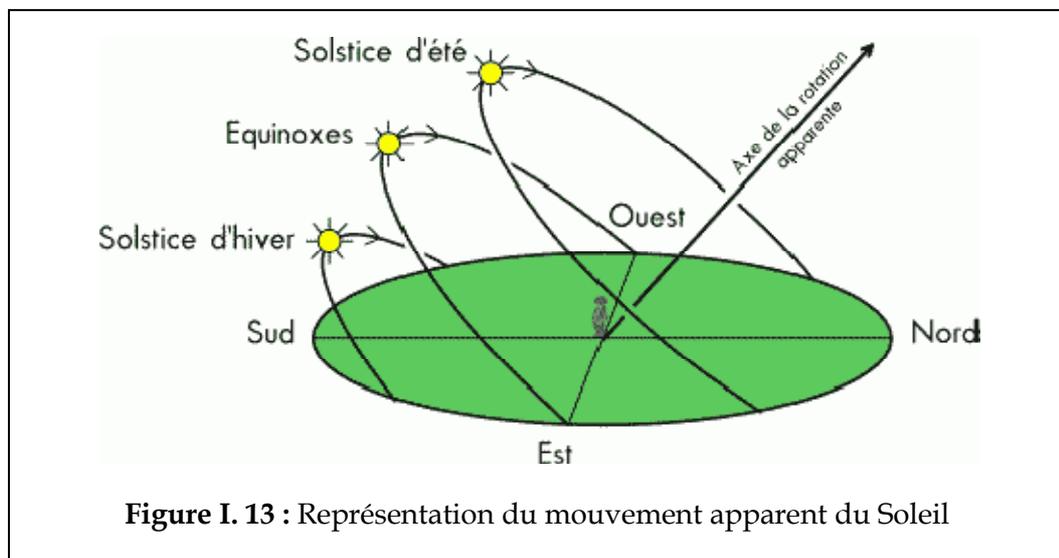
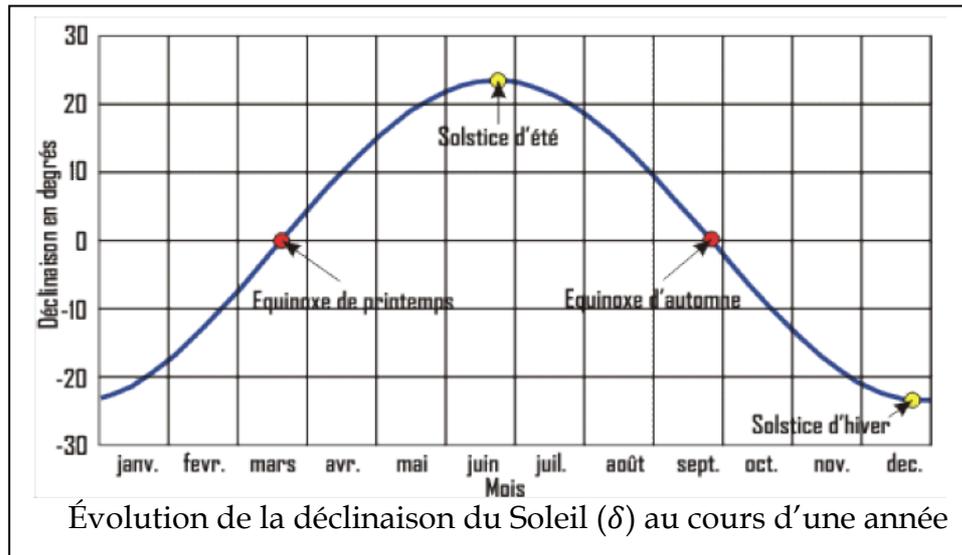


La révolution de la terre autour du soleil durant une année

On appelle *déclinaison* δ l'angle formé par la direction du Soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^{\circ}$ et $+23,45^{\circ}$. Elle est nulle aux *équinoxes* (21 mars et 21 septembre), *maximale au solstice d'été* (21 juin) et *minimale au solstice d'hiver* (21 décembre) (voir figure I. 13). La valeur de la déclinaison δ peut être calculée

<ul style="list-style-type: none"> Par la relation de Cooper : $\delta = 23,45^{\circ} \sin[0,98^{\circ}(j + 284)]$	<ul style="list-style-type: none"> Par la relation de Christian Perrin de Brichambaut : $\delta = \text{Arcsin} \left(\left(23,45^{\circ} \frac{\pi}{180} \right) \sin \left[\frac{2\pi}{365} (j - 80) \right] \right)$
--	---

Où j est le numéro du jour de l'année.

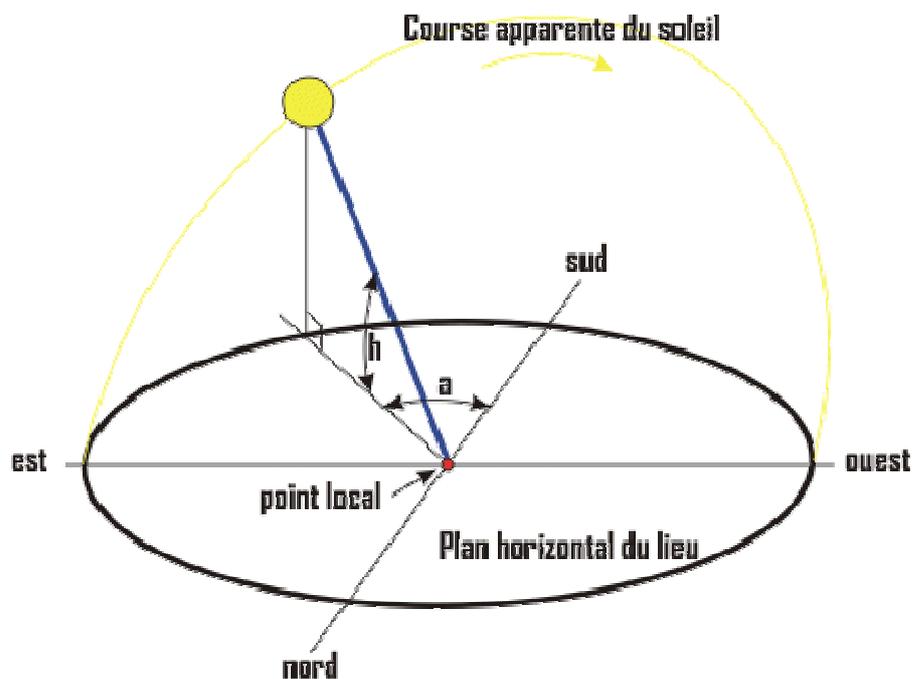
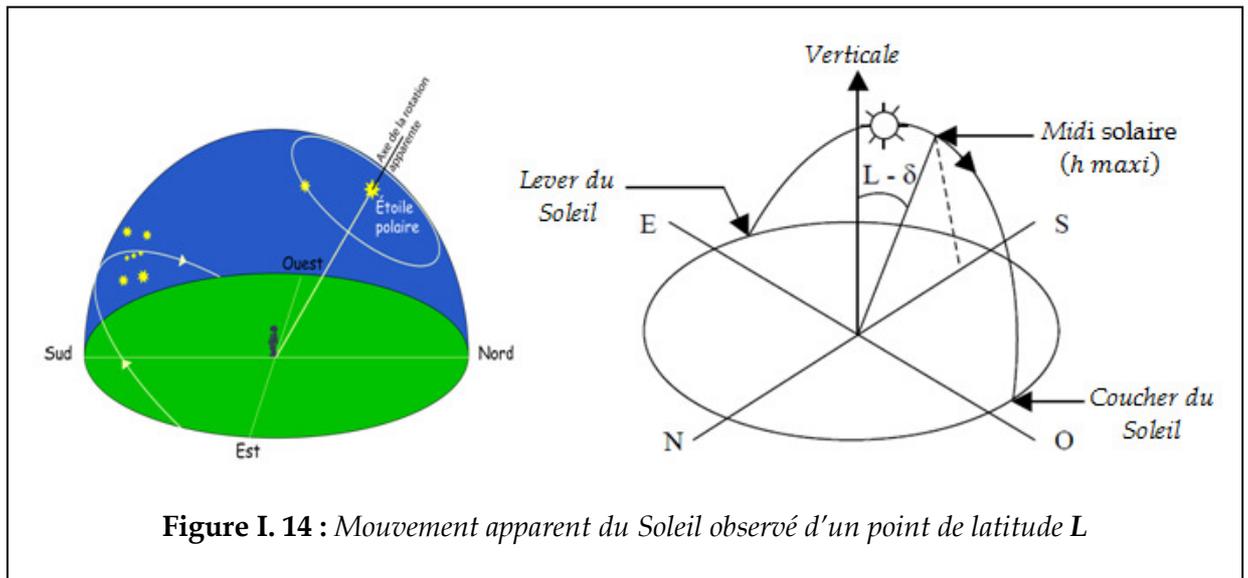


I. 2. 3. Mouvement apparent du Soleil

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la *figure I.14*

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à $(L - \delta)$.

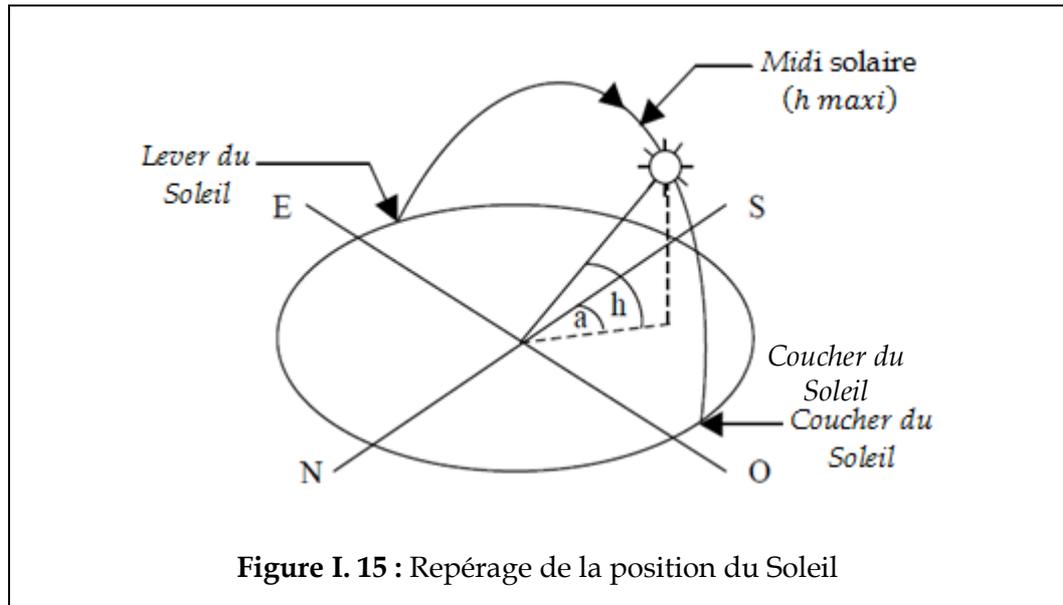
La durée du jour est de 12h aux *équinoxes* (équi=égal, nox=nuit), elle est inférieure à 12h entre le 21 *septembre* et le 21 *mars*, supérieure à 12h entre le 21 *mars* et le 21 *septembre*.



Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

- **L'azimut a** : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.
- **La hauteur h** du Soleil : c'est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal.

Ces deux angles sont représentés sur la figure I.15



Ces deux angles sont fonction de :

- La latitude L du lieu
- La date j (numéro du jour de l'année)
- L'heure solaire TS dans la journée.

La latitude L et la date j servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure TS donne sa position instantanée sur cette trajectoire.

On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en $24h$ et on a défini l'heure solaire TS en fixant $TS = 12h$ lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « zénith »).

On définit également l'angle horaire ω par :

$$\omega = 15^\circ(TS - 12)$$

ω est compté positivement l'après-midi.

La hauteur h du Soleil peut alors se déduire de la relation :

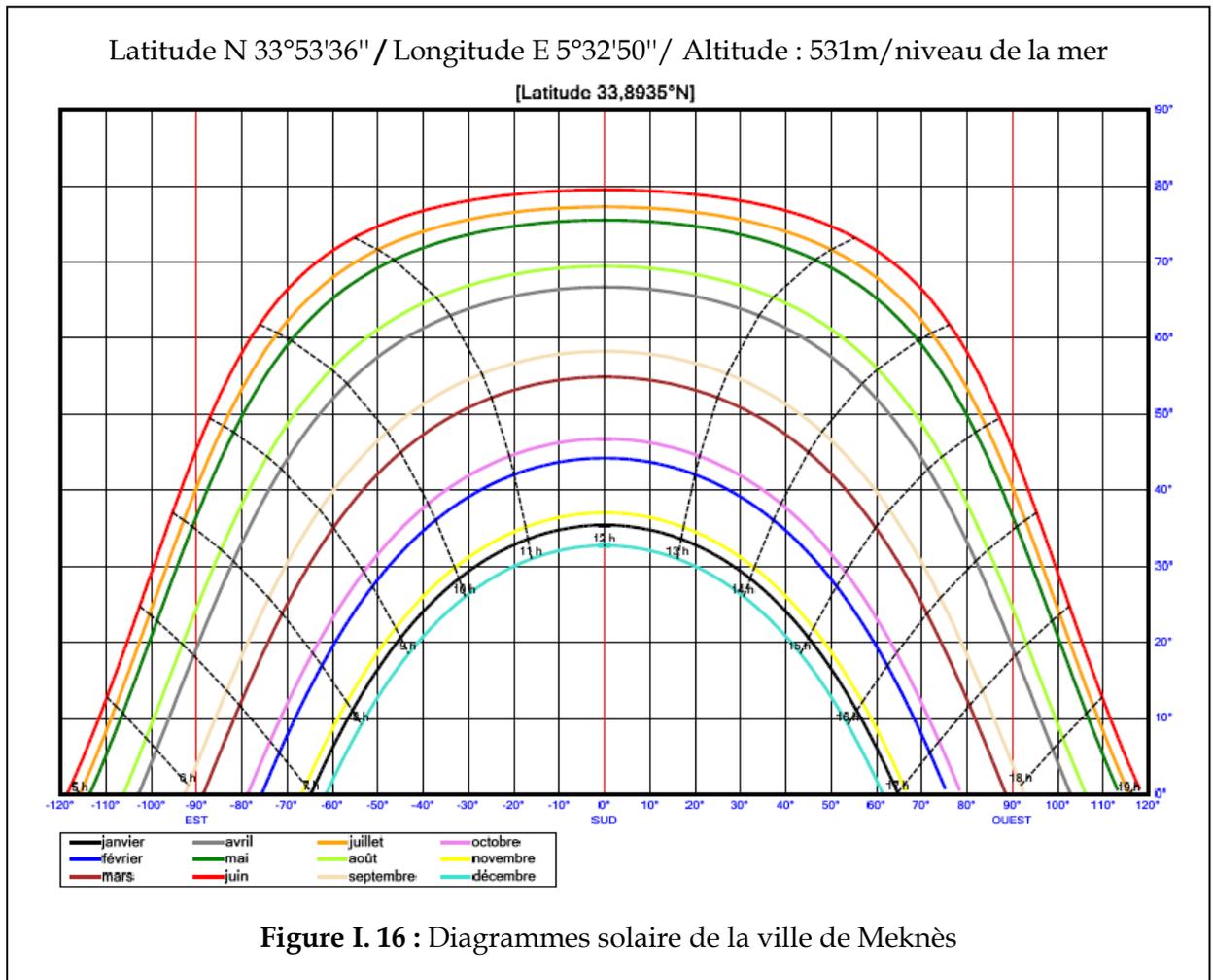
$$\sin(h) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(\omega)$$

L'angle des rayons solaires incidents par rapport à la normale au plan horizontal est : $\theta_z = \frac{\pi}{2} - h$ donc $\sin(h) = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_z\right) = \cos(\theta_z)$

Et l'azimut a par la relation :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(h)}$$

Des diagrammes solaires, tels que ceux présentés en figure I. 16, peuvent également permettre une détermination rapide, en un lieu de latitude L donnée, des valeurs de l'azimut a et de la hauteur h pour chaque heure (solaire) de la journée et chaque mois de l'année.



I. 2. 4. Heures et temps

I. 2. 3. 1. Durée du jour

Le module ω_l de l'angle horaire au lever du Soleil s'obtient en écrivant $\sin(h) = 0$ dans la formule $\sin(h) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(\omega)$, ce qui conduit à :

$$\cos(\omega_l) = -\tan(L)\tan(\delta)$$

L'heure solaire (*Temps Solaire*) $(TS)_l$ au lever du Soleil a donc pour valeur :

$$(TS)_l = 12 + \frac{\omega_l}{15}$$

L'angle horaire ω_c au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc $\omega_c = -\omega_l$.

L'heure solaire (*Temps Solaire*) $(TS)_c$ au coucher du Soleil a donc pour valeur :

$$(TS)_c = 12 + \frac{\omega_c}{15}$$

donc la durée du jour dj vaut :

$$dj = (TS)_c - (TS)_l = 2 \frac{\omega_c}{15}$$

I. 2. 3. 2. Relation entre temps légal et temps solaire

Les relations se rapportant au mouvement du Soleil utilisent le temps solaire TS qui diffère généralement du temps légal TL (*heure des montres*) du lieu considéré. Cette différence est liée à :

- La différence (*fixée par chaque pays*) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF du fuseau horaire dans lequel il se trouve :

$$C = TL - TCF$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (*temps solaire du méridien de Greenwich*) augmenté de la valeur du décalage horaire que l'on trouvera sur la figure I.16.

$$TCF = TU + \frac{(l - l_{ref})}{15}$$

- La variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du Soleil qui introduit un terme correctif appelé équation du temps et noté ET :

$$ET = -[0,0002 - 0,4797 \cos(\omega' j) + 3,2265 \cos(2\omega' j) + 0,0903 \cos(3\omega' j) + 7,3509 \sin(\omega' j) + 9,3912 \sin(2\omega' j) + 0,3361 \sin(3\omega' j)]$$

Où : j Numéro du jour de l'année, $\omega' = \frac{360}{366} = 0,984$ et ET Équation du temps (*terme correctif*) en mn.

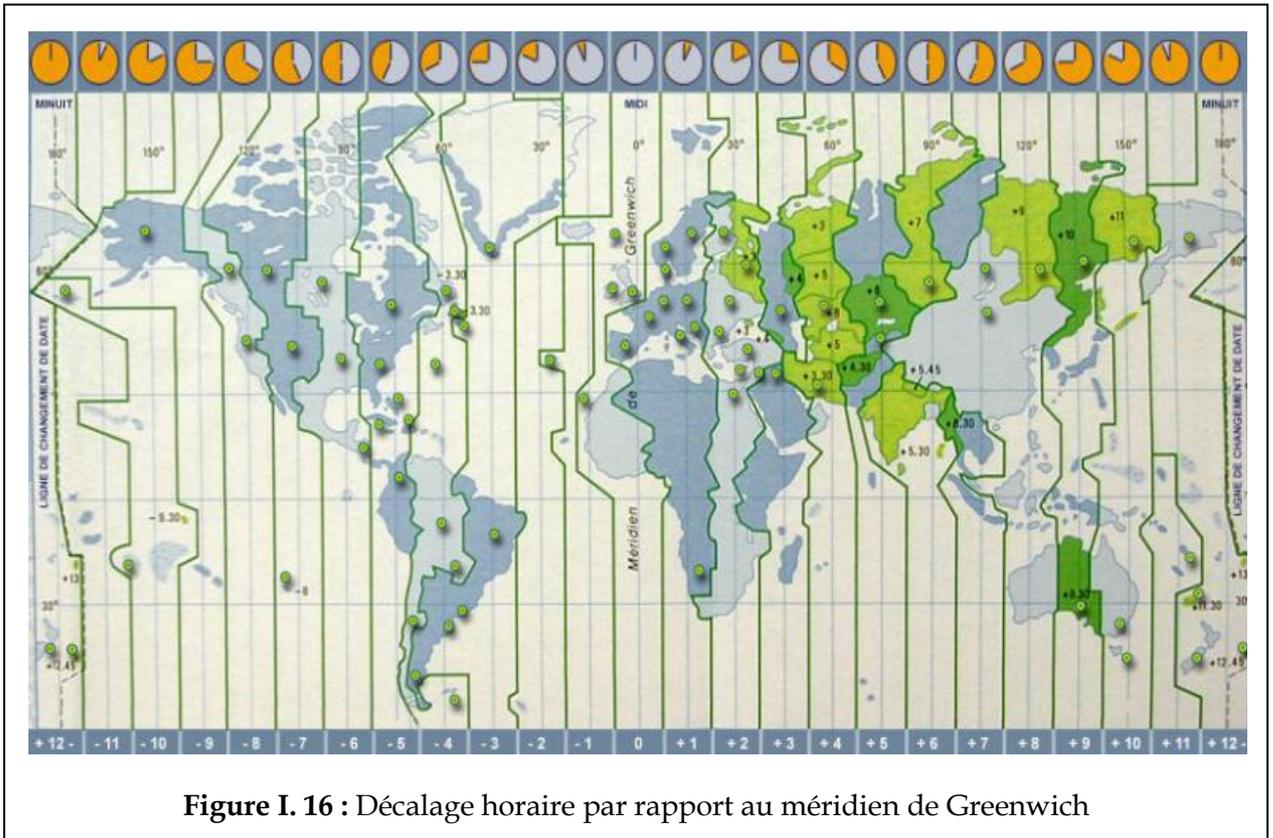
- La différence de longitude ($l - l_{ref}$) entre le lieu servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau) :

La relation entre le temps solaire TS , le temps universel et l'équation du temps est la suivante :

$$TS = TU + ET$$

Finalement, le temps solaire TS se calcule par la formule :

$$TS = TL - C + ET + \frac{(l_{ref} - l)}{15}$$



La correction maximale due à l'équation du temps est de l'ordre de 16 mn, on peut ne pas en tenir compte en première approximation. On trouvera les variations annuelles de la déclinaison et de l'équation du temps sur la *figure I.17*.

Le problème est souvent de déterminer la différence C entre TL et TCF en un lieu donné, on peut procéder de la manière suivante :

- Il est possible de connaître TL et TU (*écouter une radio internationale ...*) d'où $(TL - TU)$.
- La différence $(TCF - TU)$ peut être lue sur la *figure I.16*.
- On en déduit $C = (TL - TU) - (TCF - TU)$.

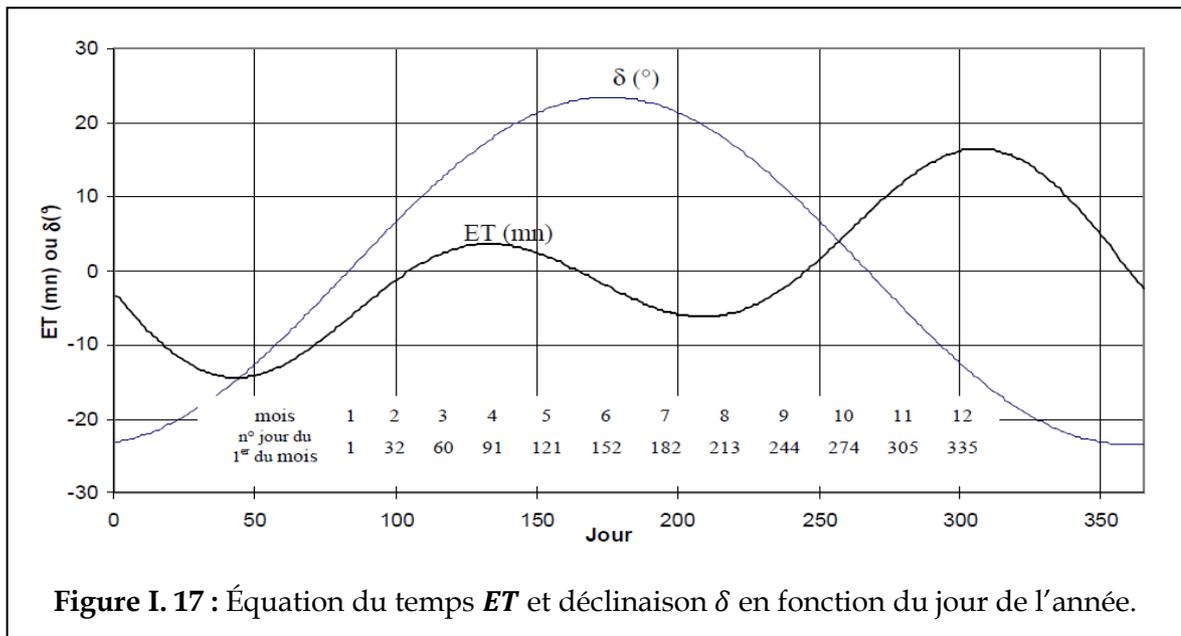


Figure I. 17 : Équation du temps ET et déclinaison δ en fonction du jour de l'année.

I. 2. 5. Durée et taux d'ensoleillement

I. 2. 5. 1. Durée d'ensoleillement

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le Soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y a beaucoup ou peu de nuages.

On appelle **durée effective d'ensoleillement** ou **insolation** SS le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. On appelle **rayonnement direct** le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le Soleil.

I. 2. 5. 2. Taux d'ensoleillement

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement SS_0 . On appelle **taux d'ensoleillement** ou **taux d'insolation** le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement :

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0}$$

La durée maximale d'ensoleillement SS_0 pour un site dégagé peut être prise égale à la durée du jour calculée par la formule $dj = 2 \frac{\omega_c}{15}$.

I. 3. Aspects énergétiques

I. 3. 1. L'atmosphère terrestre

I. 3. 1. 1. Composition

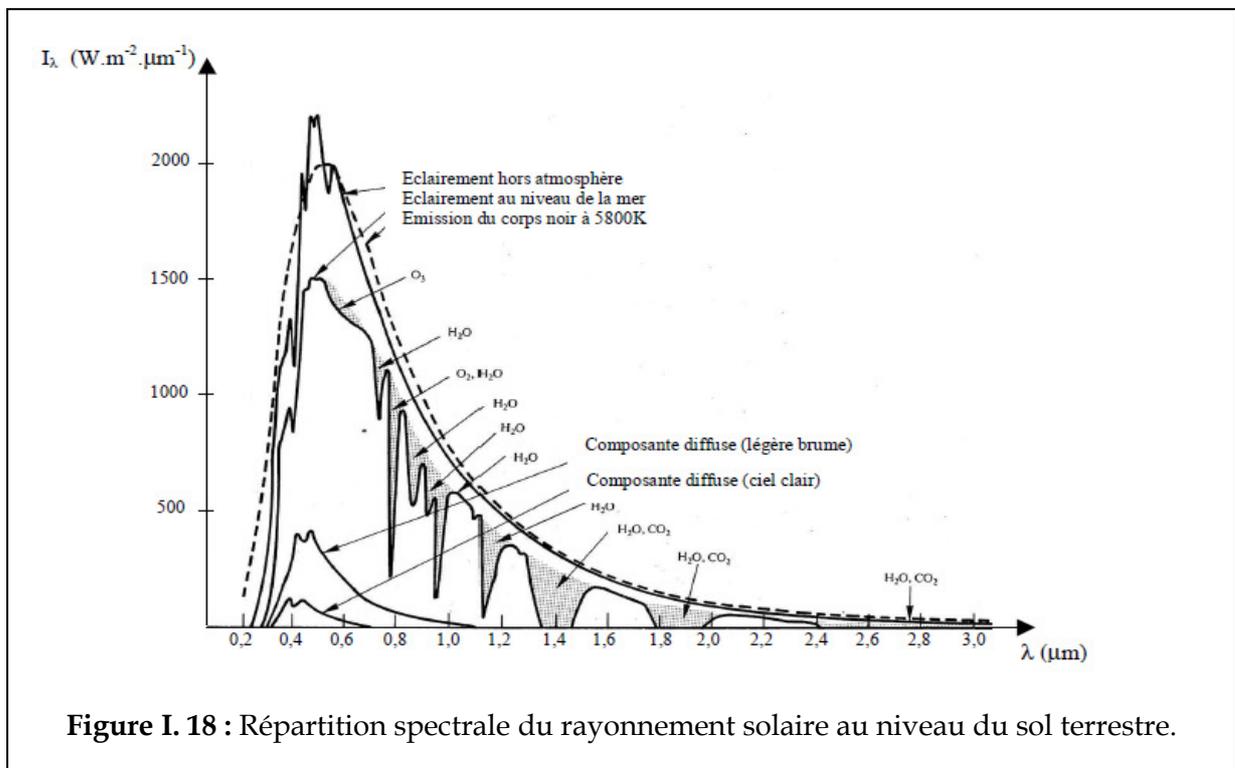
L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, ce sont :

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère entre 80 et 200 km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de :

- **Dioxyde de Carbone CO_2** (0,03%)
- **Vapeur d'eau** : en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- **Ozone O_3** située entre 10 et 30 km d'altitude.
- **Aérosols** : grains de sable, poussières, fumées...

On trouvera sur la *figure I.18* la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon la longueur d'onde.

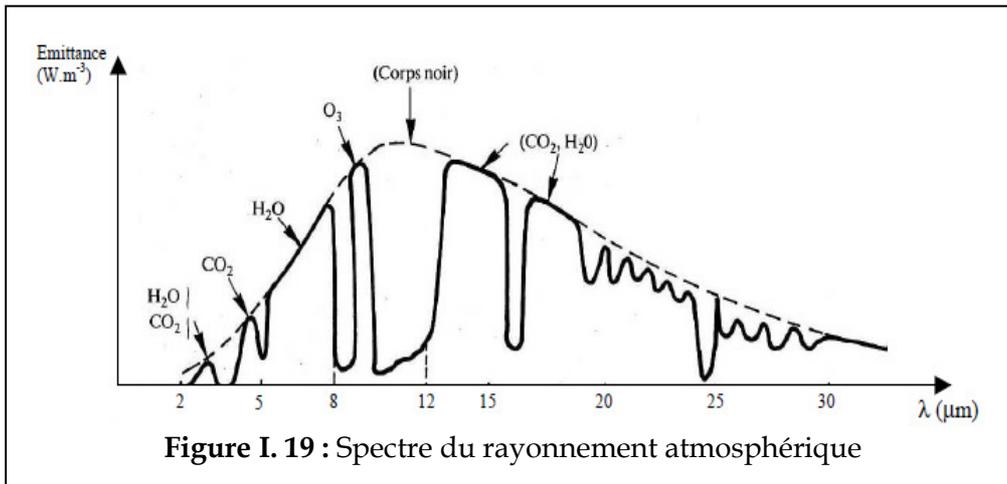


I. 3. 1. 2. Rayonnement du ciel et de l'atmosphère

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO_2 , O_3 , H_2O) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- Vers $14,7 \mu m$ pour le CO_2 .
- Entre 5 et $7 \mu m$ et entre 14 et $20 \mu m$ pour la vapeur d'eau.
- Vers $9,6 \mu m$ pour O_3 .

Ainsi que le montre la *figure I.19*, il s'agit d'un rayonnement émis dans les grandes longueurs d'onde ($> 3 \mu m$) contrairement au rayonnement solaire émis dans des longueurs d'ondes inférieures à $3 \mu m$.



La densité de flux Φ_{ciel} rayonnée par le ciel et l'atmosphère vers la Terre peut être calculé par :

$$\Phi_{ciel} = \sigma T_{ciel}^4 = \sigma \varepsilon_a T_a^4$$

Où T_{ciel} et ε_a sont donnés par l'une des corrélations suivantes :

$$T_{ciel} = T_a - 12$$

$$\varepsilon_a = 1 - 0,26 \exp(-7,77 \cdot 10^{-4} (T_a - 273)^2)$$

$$\varepsilon_a = 0,787 + 0,764 \ln\left(\frac{T_{ra}}{273}\right)$$

Où :

T_{ra} Température de rosée de l'air en K

T_a Température de l'air en K

I. 3. 2. Rayonnement solaire au sol

I. 3. 2. 1. Notations

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

- Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- Le rayonnement diffus est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus.

Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données dans le tableau suivant.

Irradiation solaire Énergie reçue pendant une certaine durée $W \cdot m^{-2} \cdot durée^{-1}$ ou $kWh \cdot m^{-2} \cdot durée^{-1}$	Directe	S	$G = S + D$
	Diffuse	D	
	Globale	G	
Éclairement solaire Flux instantané $W \cdot m^{-2}$	Direct	S^*	$G^* = S^* + D^*$
	Diffus	D^*	
	Global	G^*	

Tableau : Rayonnement solaire sur un plan horizontal : notations utilisées.

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le Soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par I .

Nous désignerons par :

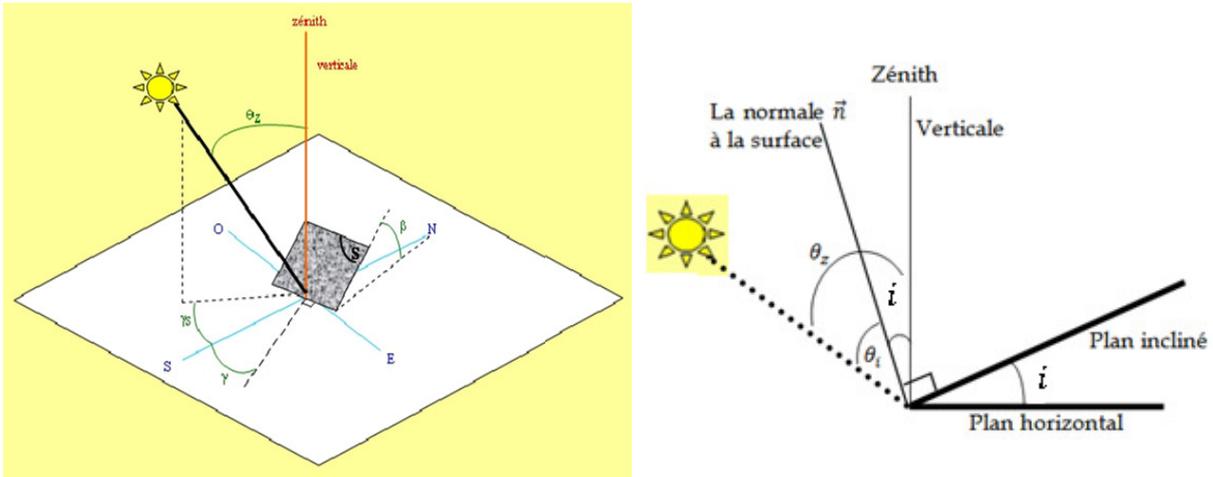
- I l'énergie reçue (irradiation) en $W \cdot m^{-2} \cdot durée^{-1}$ ou $kWh \cdot m^{-2} \cdot durée^{-1}$
- I^* le flux reçu (éclairement) en $W \cdot m^{-2}$

Nous avons la relation :

$$S^* = I^* \sin(h)$$

I. 3. 2. 2. Calcul de l'angle d'incidence sur un plan incliné

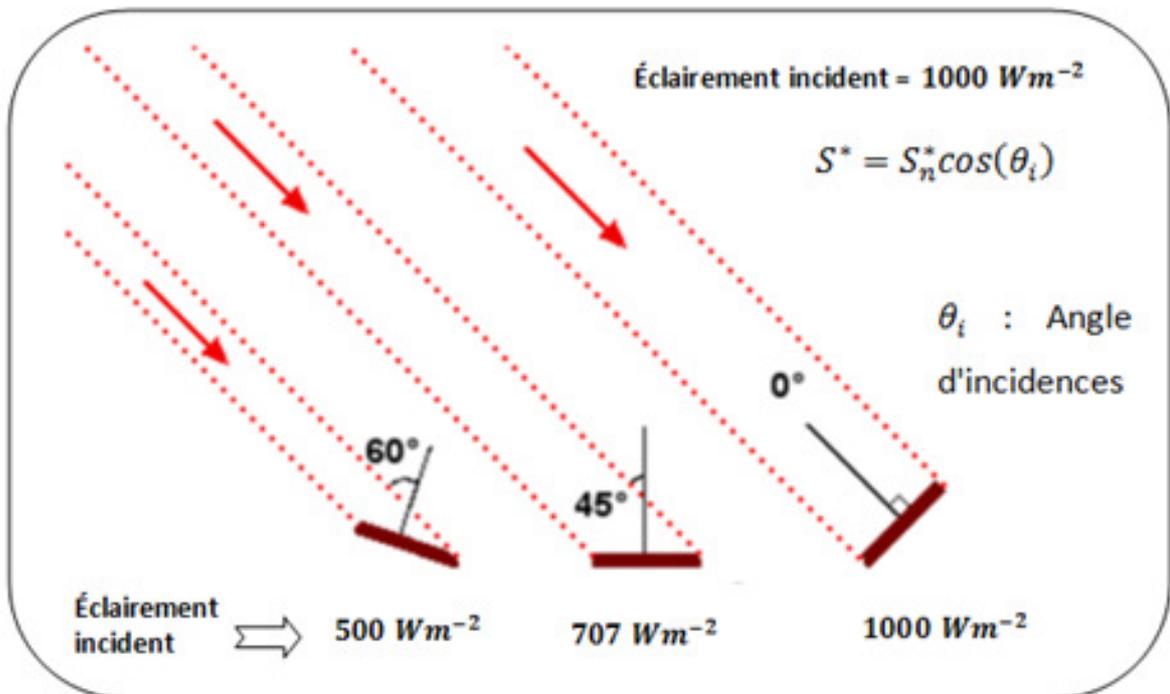
Soit un plan incliné (capteur solaire) d'un angle i par rapport au plan horizontal et orienté d'un angle γ par rapport au Sud. Les coordonnées horizontales (*hauteur angulaire h , azimuth a*) ainsi que l'angle d'incidence θ_i (l'angle d'incidence formé entre la normale au plan et la direction des rayonnements solaires "azimut de la normale du plan") sont montrés sur la figure suivante :



I. 3. 2. 3. Éclairement direct S^* (flux directionnel)

L'éclairement direct incident sur un plan quelconque dépend de :

- L'intensité du rayonnement incident,
- L'angle entre le rayonnement et le plan considéré (effet cosinus).



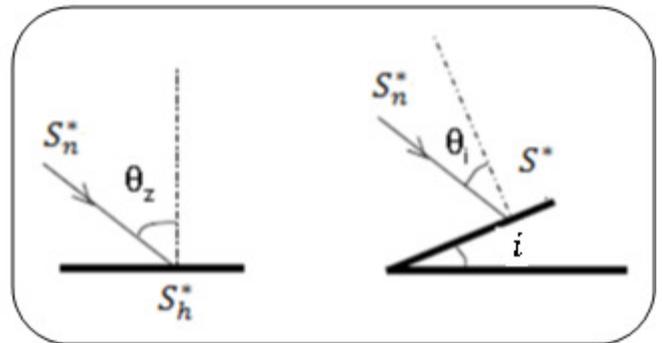
L'éclairement reçu sur la surface d'un plan quelconque est : $S^* = S_n^* \cos(\theta_i)$
 Avec θ_i l'angle d'incidence et S_n^* l'éclairement direct normal sur un plan incliné d'un angle i par rapport au plan horizontal.

- Dans le cas du plan horizontal $i = 0$
:

$$S_h^* = S_n^* \cos(\theta_z)$$

- Dans le cas d'un plan incliné ($i \neq 0$)
:

$$S^* = S_h^* \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_z)}$$



S_n^* : éclairement direct normal,
 S_h^* : Éclairement direct sur un plan Horizontal,
 S^* : Éclairement direct sur un plan Incliné,

L'angle d'incidence θ_i , formé entre la normale au plan et la direction des rayonnement solaires, peut être déterminé par les relations suivantes :

$$\cos(\theta_i) = \sin(L)\sin(\delta)\cos(i) - \cos(L)\cos(\delta)\sin(i)\cos(\gamma) + \cos(\delta)\sin(L)\sin(i)\cos(\gamma)\cos(\omega) + \cos(\delta)\cos(L)\cos(i)\cos(\omega) + \cos(\delta)\sin(i)\sin(\gamma)\sin(\omega)$$

où

$$\cos(\theta_i) = \cos(\theta_z)\cos(i) + \sin(\theta_z)\sin(i)\cos(a - \gamma)$$

Cas particuliers :

- Cas d'un capteur horizontal ($i = 0$) :

$$\cos(\theta_i) = \sin(h) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(\delta)\cos(L)\cos(\omega)$$
- Cas d'un capteur vertical ($i = 90^\circ$) orienté plein Sud ($\gamma = 0$) :

$$\cos(\theta_i) = \cos(h)\cos(a)$$

On peut évaluer l'éclairement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire par la relation :

$$I^* = 1370 \exp \left[- \frac{TLinke}{0,9 + 9,4 \sin(h)} \right]$$

Où $TLinke$ est le facteur de *Trouble de Linke* calculable par :

$$TLinke = 2,4 + 14,6 \beta + 0,4(1 + 2 \beta) \ln(p_v)$$

β est le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre égal à :

- $\beta = 0,05$ en zone rurale
- $\beta = 0,1$ en zone urbaine
- $\beta = 0,2$ en zone industrielle ou polluée

p_v est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en *mmHg*.

On en déduit

$$S^* = I^* \sin(h)$$

I. 3. 2. 4. Éclairement diffus

L'éclairement solaire diffus D^* sur un plan horizontal peut être déterminé en l'absence de toute mesure par :

$$D^* = 54,8 \sqrt{\sin(h)} \left[TL - 0,5 - \sqrt{\sin(h)} \right]$$

Où TL est le facteur de *Trouble de Linke* calculable par la formule

$$[TL = 2,4 + 14,6 \beta + 0,4(1 + 2 \beta) \ln(p_v)].$$

I. 3. 3. Rayonnement solaire sur un plan quelconque

Soit une surface plane inclinée d'un angle i par rapport à l'horizontale et orientée vers une direction faisant un angle γ avec la direction Sud (γ compté positivement vers l'Ouest). Le rayonnement global $G^*(i, \gamma)$ reçu par cette surface est la somme de 3 termes :

$$G^*(i, \gamma) = S^*(i, \gamma) + D^*(i, \gamma) + R^*(i, \gamma)$$

chacun des 3 termes se calculant de la façon suivante :

➤ **Éclairement direct :**

$$S^*(i, \gamma) = \frac{S^*}{\sin(h)} [\cos(h) \sin(i) \cos(a - \gamma) + \sin(h) \cos(i)]$$

➤ **Éclairement diffus :**

$$D^*(i, \gamma) = \frac{D^*}{2} [1 + \cos(i)]$$

➤ **Éclairement réfléchi :**

$$R^*(i, \gamma) = \frac{G^*}{2} \rho [1 - \cos(i)]$$

Où ρ est le facteur de réflexion du sol vis-à-vis du rayonnement solaire, ρ est appelé *l'albedo*. On trouvera ses valeurs en annexe 1.

I. 3. 4. Variations types du rayonnement

I. 3. 4. 1. Annuelle

La valeur de l'irradiation globale annuelle sur un plan horizontal dépend fortement de la latitude comme le montre la carte de l'ensoleillement sur la *figure I.20*.

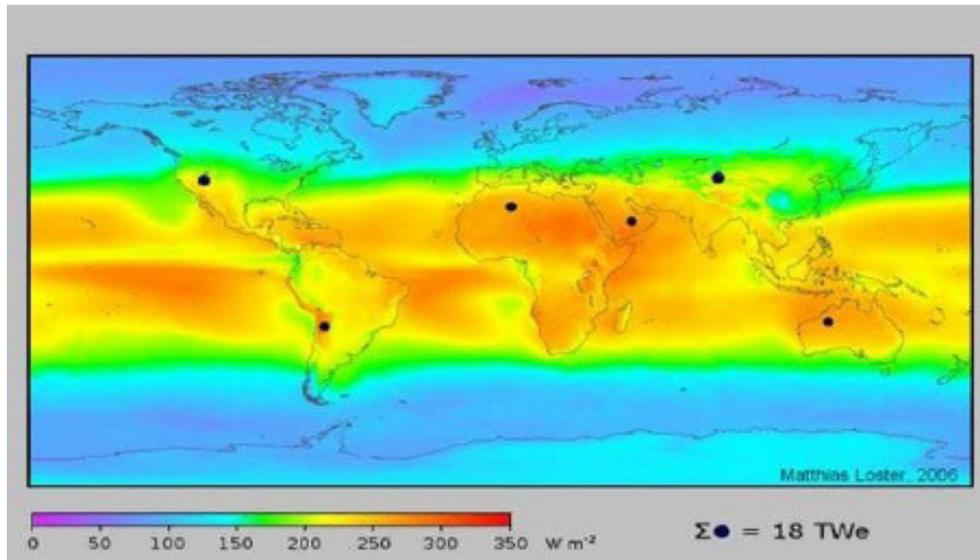
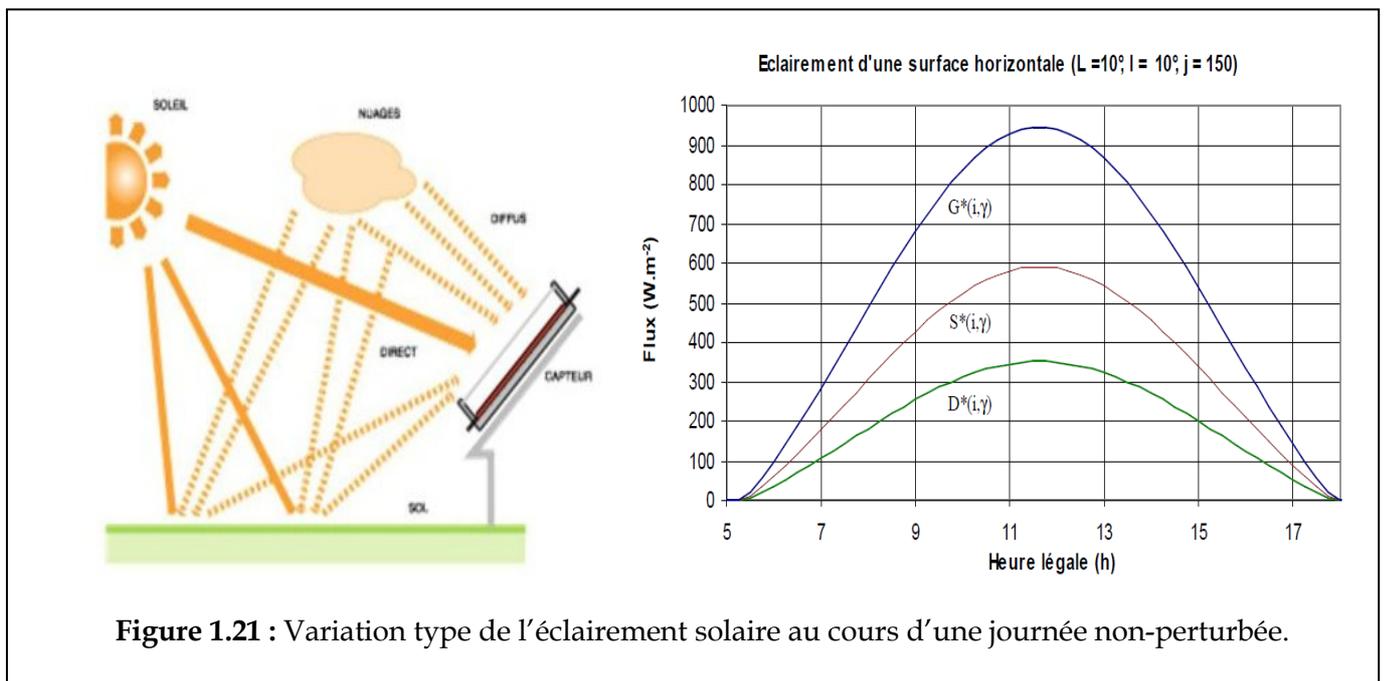


Figure I. 20 : Irradiation globale moyenne

I. 3. 4. 2. Journalière

L'éclairement solaire reçu par un capteur varie typiquement de la manière représentée sur la figure I.21 au cours d'une journée non-perturbée : nul la nuit, il augmente dès le lever du jour pour atteindre un maximum au midi solaire avant de décroître de nouveau jusqu'à s'annuler à la tombée de la nuit.



L'utilisation de l'énergie solaire est donc bien adaptée aux applications dont les besoins coïncident avec les heures d'ensoleillement maximum. Dans la plupart des cas, il existe un décalage qui nécessite un stockage pour satisfaire les besoins de la période de non-ensoleillement : ballon d'eau chaude associée à un capteur solaire pour les besoins en eau chaude en début de matinée, château d'eau associé à une pompe solaire pour les besoins nocturnes en eau.

ANNEXE 1 : VALEURS DE L'ALBÉDO
(Coefficient de réflexion global vis-à-vis du rayonnement solaire)

Valeurs de l'albédo pour le rayonnement solaire global

	Albédo(ρ)
TERRE (Planète)	0,20 à 0,60
SOL	
Couverture de neige fraîche	0,80 à 0,90
Couverture de neige tassée et vieillie	0,50 à 0,70
Terre cultivée nue	0,08 à 0,25
Prairie et herbages verts	0,12 à 0,25
Terre sableuse	0,15 à 0,25
Sable clair, sec ou mouillé	0,25 à 0,45
Forêts d'arbres à feuilles caduques en été	0,10 à 0,20
Forêts d'arbres à feuillage persistant en été	0,05 à 0,15
Forêt et neige	0,25 à 0,50
Herbe et végétation sèche	0,28 à 0,33
ETENDUES D'EAU (MERS, LACS)	
Eau parfaitement calme, $h > 30^\circ$	0,06 à 0,02
Eau parfaitement calme, $h < 10^\circ$	0,35 à 0,60
Mers et océans, $h > 30^\circ$	0,02 à 0,05
Mers et océans, $h < 10^\circ$	0,02 à 0,20
Vastes surfaces glacées	0,25 à 0,40
MATERIAUX DIVERS	
Argent poli	0,94
Argent oxydé	0,50
Aluminium poli	0,97
Aluminium oxydé	0,85
Béton	0,50
Charbon	0,15
Graviers	0,25
Asphalte	0,18
Chaux blanche	0,75
Papier blanc	0,85
Peintures blanches	0,90
Peintures noires mates	0,07
Verre à vitres	0,10
Plâtre blanc sec	0,90
Fibrociment	0,20
NUAGES	
Stratiformes	0,40 à 0,75
Cumuliformes	0,60 à 0,85