

I.1 INTRODUCTION

L'énergie solaire est une énergie renouvelable énorme et inépuisable, rayonne sur la terre avec une puissance de 160 KWh/m^2 par an dans toutes les longueurs d'ondes du spectre de la lumière visible. Cette énergie renouvelable est une préoccupation mondiale et d'actualité surtout si elle est exploitée dans la conversion de l'énergie solaire en électricité, qui est l'un des enjeux de la politique énergétique de notre siècle.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrée sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre même les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara.

Par conséquent, la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement est de 5 KWh/m^2 [1], soit près de 700 KWh/m^2 par an au nord et de 2263 kwh/m^2 au sud, ce qui favorise l'utilisation de l'énergie solaire dans différents domaines tel que la production de l'électricité, le séchage agroalimentaire, etc.

La connaissance de ce gisement est d'un intérêt majeur pour concevoir et dimensionner les systèmes énergétiques solaires. Ainsi, un bon dimensionnement n'est possible que si les mesures sont disponibles d'une manière continue dans l'espace et dans le temps. La meilleure manière pour cela est de disposer d'une série de mesures continues du rayonnement solaire arrivant au sol issues des différentes stations météorologiques. Compte tenu de l'étendue du territoire Algérien qui est d'environ 2 millions et demi de km^2 et de sa position géographique, la densité de son réseau est très insuffisante pour une bonne prise en charge de la mesure du rayonnement solaire. Dans ce chapitre on va essayer de donner une vision générale sur les rayonnements solaires reçu par sol et ses composantes ; et on va passer au gisement solaire en Algérie afin de choisir le bon modèle d'estimation de rayonnement solaire.

I.2 RAYONNEMENT SOLAIRE

I.2.1 Le Soleil

Le soleil est une sphère gazeuse de 1392109m de diamètre ; c'est une étoile résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce type de nuage est essentiellement composé d'hydrogène, d'hélium, et dans une moindre mesure de carbone, d'azote et d'autres éléments. Le noyau du Soleil (400.000Km de diamètre) à une température de l'ordre de 15.106 à 16. 106 K et agit comme un réacteur thermonucléaire. Les réactions de fusion nucléaire y transforment l'hydrogène en Hélium en libérant 4109 kg/s d'énergie de masse selon la célèbre équation d'Einstein [2] [3] [4] :

$$E = mc^2 \quad (I.1)$$

I.2.2 Distance Terre-Soleil

Le soleil est situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la terre, Cette distance varie peu au cours de l'année (+/- 1.65 %) car l'excentricité de l'orbite terrestre est peu accentuée, d'où la terre suit une révolution elliptique autour du soleil (en réalité elle est légèrement circulaire) .La période de révolution est définie a une année. L'angle entre l'axe de rotation de la terre et le plan écliptique est de 66.55°, ce qui donne un angle de 23.45°entre l'équateur et le plan de l'écliptique et la figure (1.1) représenté la distance terre-soleil au cours de l'année [2] [3].

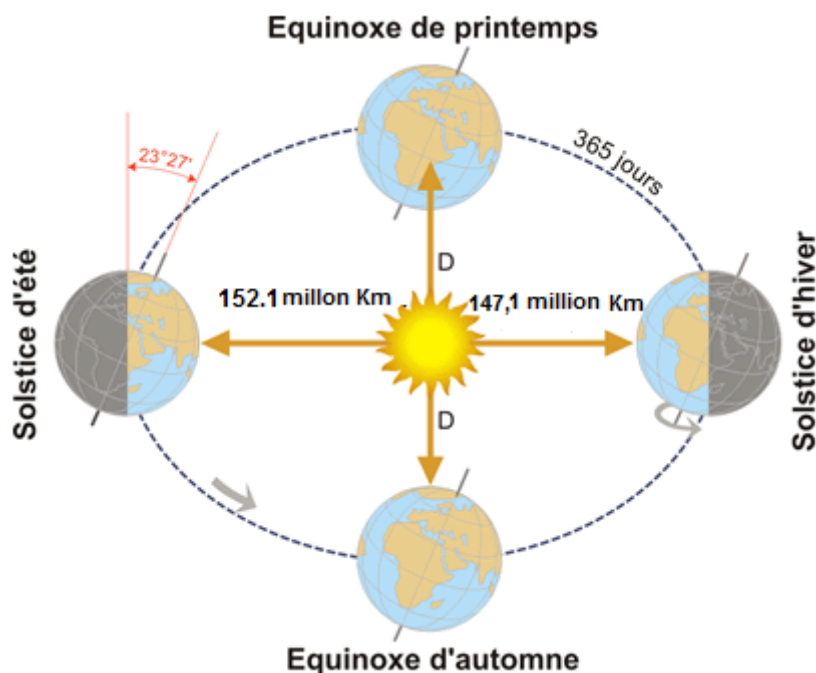


Figure (I.1) : Distance Terre –Soleil

I.2.3 Rayonnement hors atmosphère-Constante solaire

La variation de la distance terre soleil conduit néanmoins à des variations d'éclairement de 6.7 % au bénéfice de l'hiver. On estime par ailleurs qu'entre les périodes calmes et les périodes de grandes éruptions solaires, la variation d'intensité ne dépasse pas 4 %. Le rayonnement solaire incident sur la surface de la terre appelé généralement insolation, est mesuré comme énergie par unité de temps et unité de surface (ou puissance par unité de surface). Les unités les plus communes sont le Watt par mètre carré (W/m²). La quantité de radiation solaire reçue sur une surface normale hors de l'atmosphère terrestre à la distance moyenne D_0 entre la terre et le soleil est appelé constante solaire C_s . La constante solaire peut être calculée à partir de la température de surface du soleil. Celle-ci est estimée à $T=5\,780\text{ °K}$ [3], [4], Loi de Stephan :

$$\sigma T^4 \cdot 4\pi R_s^2 = I_0 4\pi D_0^2 \quad (\text{I.2})$$

Avec R_s : rayon du soleil ; D_0 distance moyenne terre-soleil d' où

$$I_0 = \sigma \left(\frac{R_s}{D_0} \right)^2 \cdot T^4 \quad (\text{I.3})$$

La valeur de cette constante est 1366 W/m^2 (selon la norme ASTM E490-00a) Mesurée par la NASA cette constante a pour valeur $I_0=1367(\text{W/m}^2)$ La valeur admise depuis 2008 est égale à $1\,360,8 \pm 0,5\text{ W/m}^2$. Les unités les plus communes pour la mesure de l'insolation, rayonnement solaire à la surface de la terre (Énergie par unité de temps et unité de surface), sont Watt par mètre carré (W/m²).

I.2.4 Rayonnement solaire reçu par la terre

La distance terre soleil change durant l'année, le minimum 1.471011m au solstice d'hiver (21 décembre) et le maximum de $1.521\,1011\text{m}$ au solstice d'été (21 juin). De ce fait, la quantité de rayonnement solaire interceptée par la terre varie dans l'année, le maximum est au solstice d'été, l'équation décrivant cette variation est [2] [3] :

$$I_{ex} = I_0 \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \quad (\text{I.4})$$

Où :

$$\left(\frac{D}{D_0}\right)^2 = 1.00011 + 0.034221 \cos(x) + 0.00128 \sin(x) + 0.000719 \cos(2x) + 0.000077 \sin(2x) \quad (I.5)$$

$$x = 360(N-1)/365$$

N : le numéro de jour à partir de 1^{er} janvier

La formule approximative suivante peut être utilisée sans introduire trop de pertes dans la précision des détails :

$$I_{ex} = I_0 \left\{ 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right\} \quad (I.6)$$

I.2.5 Repérage d'un point sur la surface de la terre

I.2.5.1 coordonnées terrestres

La latitude du lieu (φ):

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle Équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur, est indiquée en tant que latitude de 0°, le pôle nord par latitude +90° et le pôle sud par la latitude -90°. Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud.

Longitude(λ) :

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre -180° et +180°, à tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est du méridien de Greenwich, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest du méridien de Greenwich.

L'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une Surface de référence théorique (niveau moyen de la mer).

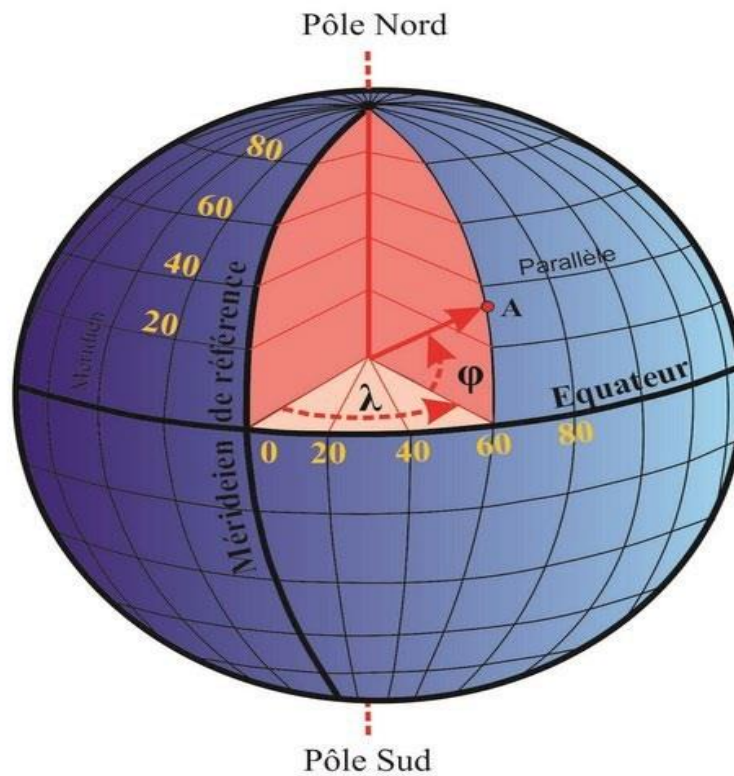


Figure (I.2) : les coordonnées terrestres

Détermination de la direction du soleil

Pour un lieu donné on repère la direction du soleil de deux manières :

- par rapport au plan horizontal du lieu désigné par les coordonnées horizontales liées à un point donné de la Terre.
- par rapport au plan équatorial de la terre désigné par les coordonnées équatoriales.

I.2.5.2 Coordonnées horizontales**a - L'azimut du soleil (a) :**

C'est l'angle que fait sur le plan horizontal la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle (a) est noté avec les mêmes conventions que l'azimut du plan α [5].

b- La hauteur du soleil (h) :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal.

La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(AH) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (1.7)$$

Où AH est l'angle horaire et δ la déclinaison du soleil.

Varie entre 90 et -90

- Zénith : $h = +90$

- Nadir : $h = -90$

$h > 0$ correspond au jour

$h < 0$ correspond à la nuit

$h = 0$ correspond au lever et au coucher du soleil

Dans la figure (3) on représente les coordonnées horizontales :

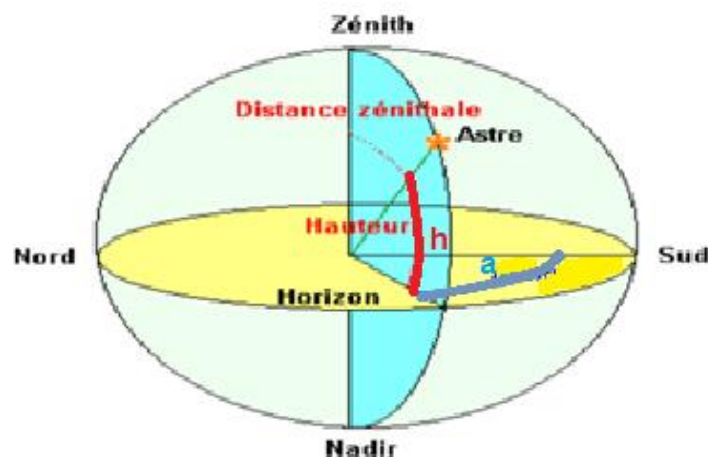


Figure (I.3) : coordonnées horizontales [6]

I.2.5.3 Coordonnées équatoriales**a- L'angle horaire (AH) :**

C'est l'angle que font sur le plan équatorial les projections de la direction du soleil et de la direction du sud pour le lieu considéré figure (I.4). Il rend compte de la rotation quotidienne de la terre autour de l'axe des pôles et on a la relation :

1 heure de temps = 15° d'angle horaire [7].

$AH < 0$ le matin

$AH > 0$ après midi

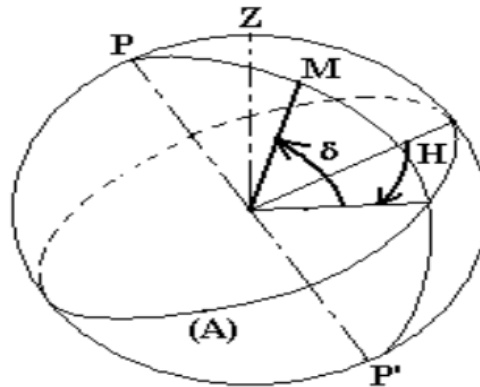
$AH = 0$ à midi

b- La déclinaison du soleil δ :

C'est l'angle de la direction du soleil avec le plan équatorial figure (1.4). δ varie entre deux valeurs extrêmes : $-\delta_o \leq \delta \leq \delta_o$; Avec $\delta_o = 23.27'$

La déclinaison δ (N), en fonction du jour de l'année, est représentée par la formule approchée suivante [7] :

$$\sin(\delta) = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot (284 + N)\right) \quad (I.7)$$



Figure(I.4) : coordonnées équatoriales [7]

La déclinaison varie sinusoïdalement au cours de l'année. Elle est maximum ($23.27'$) le 22 juin, au solstice d'été ; minimum ($-23.27'$), le 21 décembre, au solstice d'hiver. Aux périodes de solstice, les variations de la déclinaison sont faibles. La déclinaison est nulle le 21 mars et le 23 septembre, aux équinoxes de printemps et d'automne, périodes de variation rapide de la déclinaison.

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure (I.5) :

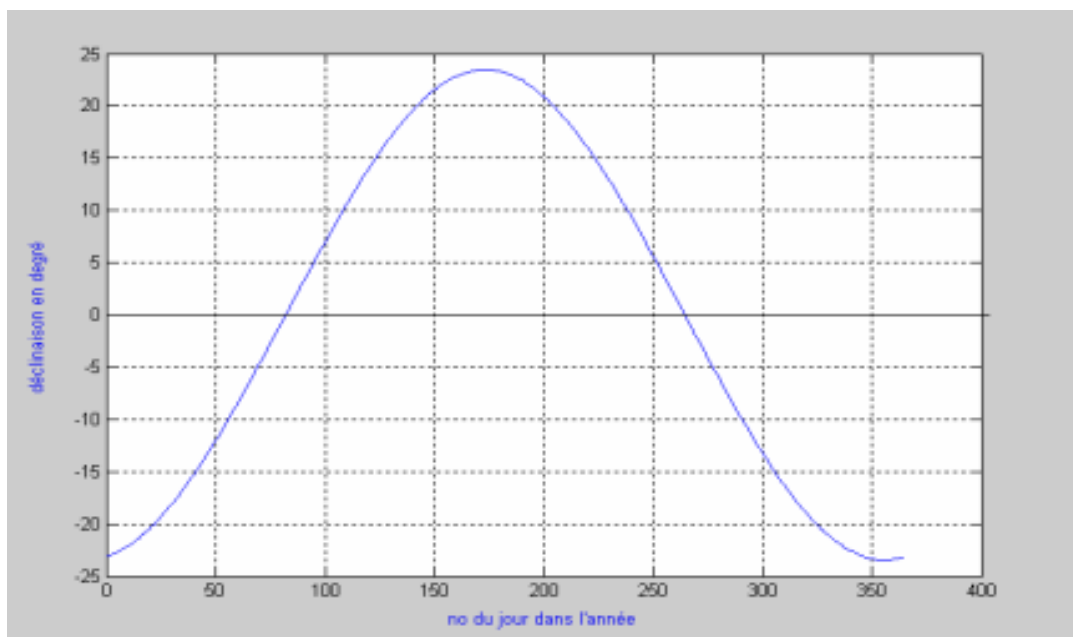


Figure (I.5) : Variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année [7]

I.2.6 Composantes du rayonnement solaire

Le soleil émet une énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique. Le rayonnement émis par le soleil constitue un spectre allant des ultraviolets à l'infrarouge en passant par le spectre visible où il émet un maximum d'énergie. La constante solaire de 1350 W/m^2 est l'énergie atteignant une surface normale aux rayons solaires hors atmosphère, or nous cherchons à déterminer le rayonnement solaire après que les rayons aient traversés l'atmosphère. L'effet de la traversée de l'atmosphère réfléchit, absorbe ou diffuse des parties de ce rayonnement. On appelle ces différents rayonnements : composantes solaires. [8]

La figure (I.6) présente la courbe d'énergie du corps noir à 6000 K , le rayonnement solaire hors de l'atmosphère et le rayonnement solaire au niveau de la mer en fonction de la longueur d'onde. Ces courbes montrent que 9,2 % de l'énergie de ce spectre se trouve dans l'ultraviolet, 42,2% dans le visible et de 48,8% dans l'infrarouge.

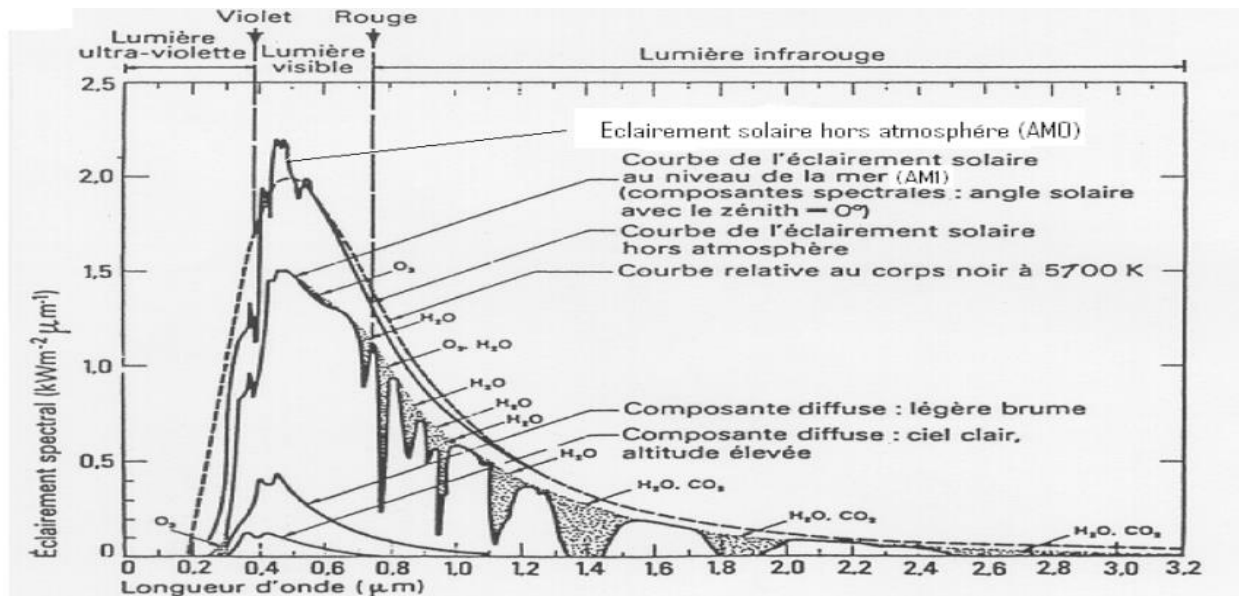


Figure (I.6) Spectre d'absorption du rayonnement solaire au niveau de la mer [8]

La composante directe

Représente le flux solaire qui atteint directement la paroi quand celle-ci est exposée au soleil. Elle dépend de la hauteur du soleil et de l'angle d'exposition de la paroi au soleil à l'instant considéré.

La composante diffuse

Qui provient des multiples diffractions et réflexions du rayonnement solaire direct par les nuages.

Le rayonnement diffus est composé de trois parties

$$d = d1 + d2 + d3$$

Avec :

d_1 diffus du ciel

d_2 diffus du sol

d_3 diffus rétro diffusé

I.2.6.1 : Diffus du ciel

Le rayonnement diffus incident en provenance du ciel d_1 est donné par [9] :

$$d_1 = d_d \cos i + d_i (1 + \sin \gamma/2) + d_h \cos \gamma \quad (I.8)$$

Avec :

- d_d composante directe ou solaire : elle provient du voisinage du soleil
- d_i composante isotrope : elle correspond à un ciel de luminance uniforme
- d_h composante du cercle de l'horizon : elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques.

I.2.6.2-Diffus du sol

Le sol est caractérisé par son coefficient de réflexion ρ appelé albédo ; c'est le rapport de l'énergie solaire réfléchiée par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, avec 0 correspondant au noir, pour un corps sans aucune réflexion et 1 au miroir parfait, pour un corps diffusant dans toutes les directions et n'absorbant rien du rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit. Les valeurs de l'albédo pour différents types de surfaces sont données par le tableau suivant [9] :

Type de surface	Albédo ρ (0 à 1)
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Surface de la mer	0,05 à 0,15
Sol sombre	0,05 à 0,15
Cultures	0,15 à 0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Glace	0,30 à 0,40
Neige tassée	0,40 à 0,70
Neige fraîche	0,75 à 0,90
Miroir	1

Tableau (I.1) : Valeurs de l'albédo pour différentes surfaces. [9]

I.2.6.3 : Diffusion rétro-diffusée

Le diffus du sol est rétro-diffusé c'est-à-dire qu'une partie est diffusée à nouveau par le ciel vers le sol d_3 c'est la composante due à la rétro-diffusion.

La composante réfléchie

Représente la partie du flux interceptée par la paroi suite aux réflexions solaires produites par l'environnement proche.

L'environnement proche est représenté par un plan horizontal renvoyant une part du flux global incident (direct et diffus), la partie réfléchie dépend de l'albédo. L'albédo est le rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire incidente, il est lié à l'environnement alentour du capteur solaire, sa valeur est comprise entre 0 et 1, et il est d'autant plus important que la surface est réfléchissante (neige, miroir).

I.2.7 : Appareils de mesure

I.2.7.1 : Mesure de la fraction d'insolation

La durée d'insolation est mesurée à l'aide d'un héliographe figure (1-7(1-2)), c'est un appareil simple constitué d'une sphère de verre focalisant les rayons du soleil sur une bande de papier graduée en heures. Ce papier spécial est brûlé lorsque le soleil brille et lorsque l'éclairement du rayonnement direct est supérieur à 120 W/m^2 . [10]

I.2.7.2 : Mesure du rayonnement solaire global

On mesure la puissance du rayonnement solaire globale sur une surface horizontale grâce à un pyranomètre figure (8). Un pyranomètre comprend une double coupelle de verre, un thermophile (série de thermocouples) et un système d'enregistrement de la force électromotrice produite par ce thermophile sous l'action d'un rayonnement. Quand l'instrument est exposé à la radiation solaire, une différence de température est créée entre les secteurs noirs et les secteurs blancs. Cette différence de température est détectée par la thermophile qui convertit l'énergie thermique en énergie électrique. Ce courant peut être mesuré et amplifié et le signal de millivolt est converti par un facteur de calibrage en un flux en watt par mètre carré. Les coupelles de verre filtrent la bande de longueurs d'onde à mesurer (en général de 0,3 à 3mm) et limitent la condensation de vapeur d'eau. Pour mesurer uniquement le rayonnement diffus, on ajoute un pare-soleil (bande métallique circulaire) qui protège le pyranomètre du rayonnement solaire direct. Le pyranomètre, appelé "solarimètre" dans le passé, fait partie de l'instrumentation classique des parcs météorologiques ; il est placé sur une surface horizontale [11].

I.2.7.3 : Mesure du rayonnement direct :

Les radiations solaires directes peuvent être mesurées par un Pyrhéliomètre figure (I.9). Contrairement au pyranomètre un disque noir détecteur est placé à la base du tube dont l'axe est aligné avec la direction des rayons solaires, ainsi la radiation diffusée est bloquée par la surface du détecteur. Le Pyrhéliomètre est continuellement pointé directement au soleil tout au long du jour. Cette grandeur est nulle lorsque le soleil est occulté par les nuages [11].

La radiation diffusée peut être déterminée par la soustraction de la radiation directe de la radiation globale.



Figure (I 7.a):Héliographe de Campbell Stokes



Figure (I 7.b) : Héliographe à fibresoptique



Figure (I .8) : Pyranomètre



Figure (I .9) : Pyrhéliomètre

I.3 : GISEMENT SOLAIRE

I.3.1 : Gisement solaire mondial

L'énergie solaire reçue est inégalement répartie dans le monde. Dans les régions les plus chaudes du globe, l'ensoleillement annuel peut atteindre $2\,300\text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$ (Energie reçue par une surface de 1 m^2 pendant une année). En Europe centrale l'ensoleillement moyen est de $1\,100\text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$. La figure suivante représente la Moyenne annuelle du Rayonnement solaire journalier sur un plan horizontal

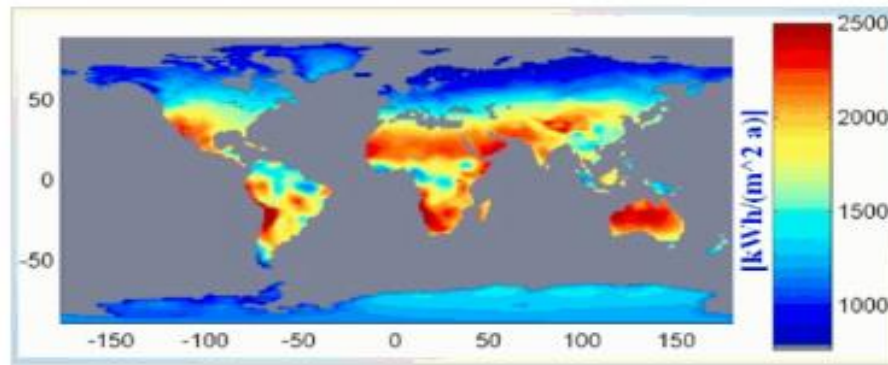


Figure (I.10) : Moyenne annuelle du Rayonnement solaire journalier sur un plan horizontal [12]

I.3.2 : Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement Solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure (I.10).

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au Niveau du territoire [13]

Algérien est représenté dans le tableau(I.2) selon l'ensoleillement reçu annuellement.

potentiel solaire en Algérie : tableau de statistiques degrés d'ensoleillement par zone			
régions	côtières	hauts-plateaux	Sahara
superficie %	4	10	86
durée moyenne d'ensoleillement par an	2650	3000	3500
énergie moyenne reçu KWh/m²/an	1700	1900	2650

Tableau(I.2) : l'ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [13]

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [13]. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figure I.11)

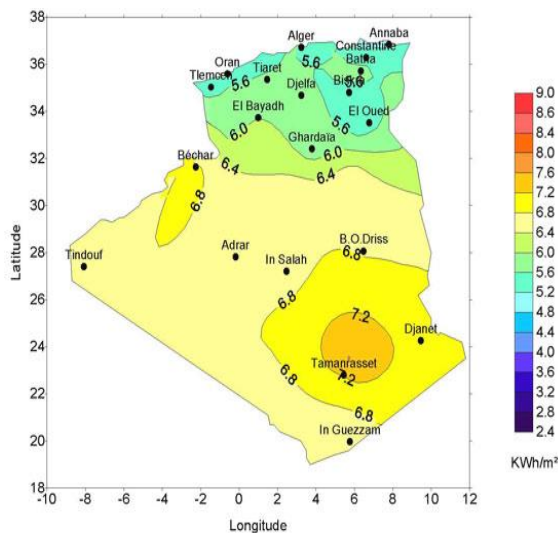


Figure I -11.a : moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude de lieu

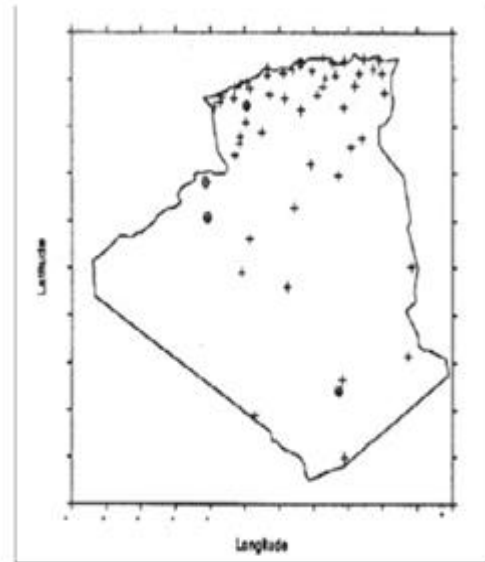


Figure I -11.b : répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N réparties sur tout le territoire algérien (figure I -11(a.b)) [13]. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

I.4 CONCLUSION

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se compose du rayonnement direct provenant directement du soleil et du rayonnement diffus, la somme du direct et de la diffuse donne le rayonnement global. Ces composantes peuvent être mesurées directement par différents instruments de mesure ou bien elles peuvent être estimées par des modèles analytiques qui sont établis après plusieurs mesures expérimentales qui On va les présenter dans le chapitre suivant.