



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Physique
Option : Physique des Matériaux

THÈME :

Modélisation du rayonnement solaire global pour différentes définitions de la durée
du jour.

Préparé par : TEBANI Khaoula

Soutenu le : 03/07/2023

Devant le jury :

Président :	MAMRI Samir	MCB	Université de BBA
Rapporteur :	SAHNOUNE Yassine	MCB	Université de BBA
Examineur :	IMEKHLAF Anis	MCB	Université de BBA

Année Universitaire 2022-2023

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A ma chère mère,

A mon cher père,

Oui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mon frère Alla,

Et mes deux chères sœurs Aida et Rahil,

Pour leur soutien moral et leurs précieux conseils tout au long de mes études.

A mon cher mari,

Qui a toujours été à mes côtés et m'a soutenu, que dieu le garde comme soutien dans la vie nadir ksour

A la famille de mon mari,

Et surtout ma belle-mère, que dieu la protégée pour nous.

A ma famille,

Mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A toutes mes amis Masouda, Aya, khaira et khaoula ,

Qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Remerciements

Avant tout, je remerciai "Dieu", le tout puissant et le miséricordieux pour la volonté et la patience qu'il m'a attribué. Qu'il soit loué pour l'aide qu'il m'a fournie afin d'achever mes études et pour m'avoir guidé dans le droit chemin dans ma vie.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à :

Mon encadreur "SAHNOUNE Yassine", De m'avoir aidé à réaliser le travail demandé dans ce projet de fin d'étude.

Tous les membres de jury d'avoir participé à la commission des examinateurs en vue d'une évaluation prompte et à sa juste valeur.

Tout l'encadrement de département de science de matière que j'ai recueillie tout l'année.

Tous ceux qui ont contribué de loin ou près à la réalisation de ce travail.

Chapitre I

Figure I.1: différentes régions du soleil.....	4
Figure I.2 : les types du rayonnement solaire.....	9
Figure I.3 : trajet du rayonnement solaire dans l'atmosphère.....	10
Figure I.4: l'influence de l'heure de la journée	11
Figure I.5: Structure verticale thermique de l'atmosphère.....	14
Figure I.6: Description du nombre d'air masse.	15
Figure I.7: distribution de la masse de l'atmosphère en fonction de l'altitude.	16
Figure I.8 : spectre du rayonnement solaire.	19
Figure I.9: Réfraction atmosphérique.....	20

Chapitre II

Figure II.1 : Rapports géométriques : terre-soleil.....	23
Figure II.2 : Mouvement de la terre autour du soleil.....	24
Figure II.3 : Angle d'inclinaison de l'axe de la terre.....	24
Figure II.4: Mouvement de la terre autour du soleil.....	25
Figure II.5: La sphère céleste.	26
Figure II.6 : variation de la déclinaison au court de l'année.	28
Figure II.7: Repérage du soleil.	29
Figure II.8 : Schéma d'un héliographe de Campbell-Stokes.....	36
Figure II.9 : Exemple de pyranomètre.....	37
Figure II.10 : L'albédomètre pour la mesure de l'albedo du sol.....	38

Chapitre III

Figure III.1 : variation de l'irradiation globale hors atmosphère	40
Figure III.2 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Agstrom- Prescott.....	42
Figure III.3 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Angstrom- Prescott.....	43
Figure III.4 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Angstrom- Prescott.....	43
Figure III.5 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Angstrom-Prescott.....	44

Liste des figures

Figure III.6 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Angstrom-Prescott.	45
Figure III.7 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Angstrom-Prescott.	45

Chapitre I

<i>Tableau I.1</i> : caractéristique principale du soleil	5
<i>Tableau I.2</i> : Répartition de l'énergie du corps noir et du soleil.	8
<i>Tableau I.3</i> : Variation de constante solaire en fonction de nombre d'air masse pour une atmosphère de type méditerranéen	16

Chapitre II

<i>Tableau II.1</i> : les valeurs de la déclinaison des 15 jours de chaque mois de l'année.	27
<i>Tableau II.2</i> : Emplacement géographique des deux sites.....	32
<i>Tableau II.3</i> : les différentes définitions de la durée du jour.....	33

Chapitre III

<i>Tableau III.1</i> : Irradiation solaire globale hors atmosphère (MJ/m ² jour).....	39
<i>Tableau III.2</i> : fraction d'insolation des deux sites algériens.	41
<i>Tableau III.3</i> : les coefficients des corrélations du modèle d'Angstrom-Prescott pour Les Différente Sites.....	41
<i>Tableau III.4</i> : les paramètres statistiques pour le modèle du type d'Angstrom-Prescott.....	46

Introduction générale 1

Chapitre I

Influence de la couche atmosphérique sur le rayonnement solaire

I-1-Introduction..... 3

I-2- Le soleil..... 3

I-3-Les composition du soleil 3

 .I-3-1- Structure interne..... 3

 I-3-1-1-Le cœur 3

 I-3-1-2-La zone radiative interne..... 3

 I-3-1-3-La zone convective 4

 I-3-2-Structure externe 4

 I-3-2-1- La photosphère..... 4

 I-3-2-2 - La chromosphère..... 5

 I-3-2-3- La couronne 5

 I-3-2-4- L'héliosphère 5

I-4-Caractéristiques principales du soleil..... 5

I-5-constante solaire..... 5

I-6-Gisement solaire..... 6

I-7-L'origine d'énergie solaire..... 6

I-8-Nature d'énergie solaire 7

I-9- le rayonnement solaire 8

 I-9-1-Les types de rayonnement solaire..... 8

 I-9-1-1-le rayonnement direct..... 8

 I-9-1-2-le rayonnement diffus 8

 I-9-1-3-le rayonnement réfléchi..... 9

 I-9-1-4-le rayonnement global..... 9

 I-9-2-Caractéristiques du rayonnement solaire 9

I-10-Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère 12

 I-10-1-formation de l'atmosphère terrestre..... 12

 I-10-2-La composition de l'atmosphère 12

I-10-3-Régions atmosphérique.....	12
1-La troposphère.....	13
2-la stratosphère.....	13
3-la mésosphère	13
4-la thermosphère	13
I-10-4-Masse atmosphérique.....	14
I-10-5-l'épaisseur de l'atmosphère.....	16
I-10-6-l'absorption du rayonnement solaire	17
I-10-7-Absorption du rayonnement par les molécules atmosphériques	17
I-10-7-1-Absorption moléculaire.....	17
I-10-7-2-Absorption dans l'infra-rouge (IR).....	18
I-10-7-3-Absorption dans l'ultra-violet (UV)	18
I-10-8-La Diffusion atmosphérique.....	19
I-10-9-Réfraction atmosphérique.....	20
I-11-Distribution spectrale du rayonnement solaire au sol	21

Chapitre II

Calcul l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale

II-1-Introduction	22
II-2-Aspect géométrique du rayonnement solaire.....	22
II-2-1-Les mouvements de la terre	22
II-2-2-Mouvements de la terre autour du soleil	24
II-3-La sphère céleste.....	26
II-4- Repère géographique	26
II-4-1- La latitude φ	26
II-4-2- La longitude L	27
II-4-3-L'altitude.....	27
II-5-Repère équatorial	27
II-5-1- La déclinaison δ	27
II-5-2- Angle horaire (w).....	28
II-6-Répérage du soleil	28
II-6-1-L'azimut solaire (a)	28
II-6-2- La hauteur (h)	29

Table des matières

II-7-Relations de repérage du soleil	29
II-8- La durée du jour.....	30
II-9- Calcul de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale	30
II-9-1- L'irradiation solaire globale à la limite de l'atmosphère	30
II-9-2-Fraction d'insolation	31
II-10-Evaluation de l'irradiation globale sur différents sites Algériens	31
II-10-1-Procédures de calcul	32
II-11-Relations linéaires.....	32
II-11-1-Modèle d'Angström-Prescott	32
II-11-2- Ecart relatifs moyens algébriques	33
II-11-3-Le deuxième modèle.....	34
II-11-4-Le troisième modèle	35
II-11-5-Le quatrième modèle	35
II-12- Appareils de mesure	35
II-12-1-L'héliographe.....	35
• L'héliographe Campbell-Stokes.....	36
II-12-2-Le pyranomètre.....	36
II-12-3-L'albédomètre.....	37

Chapitre III

Résultats et discussion

III-1-Introduction	39
III-2- calcul de l'irradiation solaire globale hors atmosphère	39
III-3- La fraction d'insolation.....	40
III-4- Application du modèle du type d'Angstrom-Prescott	41
III-5 – Discussion.....	46
Références Bibliographiques	47
Conclusion générale.....	50

Le soleil a le potentiel de répondre à tous nos besoins. Pendant près de 5 milliards d'années, il a illuminé le ciel et les scientifiques estiment qu'il est à mi-chemin de sa durée de vie. Il est difficile d'imaginer qu'en une année, le soleil envoie vers la Terre une énergie quatre mille fois supérieure à celle consommée par l'ensemble de la population mondiale. Aujourd'hui, il semble absurde de ne pas profiter de cette opportunité, car nous disposons des moyens technologiques nécessaires. De plus, il est important de considérer que cette source d'énergie est gratuite, propre et inépuisable. Elle pourrait également nous affranchir de notre dépendance aux énergies fossiles ainsi qu'aux autres alternatives peu sûres ou polluantes par exemple l'énergie solaire.

L'énergie solaire est une forme d'énergie propre qui exploite principalement la lumière du soleil pour produire de l'électricité ou de la chaleur. Elle trouve deux utilisations principales : le chauffage direct de l'eau et des bâtiments, ainsi que la conversion en énergie lumineuse pour la production d'électricité. À notre époque, l'énergie solaire est largement adoptée, notamment dans les habitations, en raison de ses nombreux avantages que nous aborderons ci-dessous.

L'un des domaines les plus courants d'exploitation de l'énergie solaire est sa conversion en énergie thermique. Cela s'effectue en utilisant des panneaux solaires qui, lorsqu'ils sont exposés directement à la lumière du soleil, chauffent une couche de base. Cette énergie est ensuite utilisée pour alimenter les chauffe-eau solaires et le système de chauffage domestique. Un autre avantage de l'énergie solaire est son caractère illimité, car elle peut être utilisée sans restrictions ni obstacles. De plus, le processus d'installation des dispositifs technologiques pour capter les rayons solaires est rapide, ne nécessitant pas beaucoup de temps. De plus, cette forme d'énergie n'émet pas de dioxyde de carbone, ce qui est extrêmement important.

Dans le monde, l'Algérie compte plus de 3300 heures d'obscurité totale chaque année. Résultat, son climat est excellent pour l'utilisation de l'énergie solaire, pourtant il est peu connu. C'est ce qui a incité nous à commencer à regarder comment le rayonnement solaire se répartit sur cette immense zone.

Le présent travail est reparti en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre nous donnons quelques connaissances de base sur le soleil, nous examinons la répartition du rayonnement solaire à la limite extérieure de l'atmosphère et nous évaluons les différentes modifications que subit le rayonnement solaire en traversant la couche atmosphérique.

Introduction générale

- Au second chapitre, nous exposons les relations liant la position du soleil, la latitude et l'angle horaire. Nous mettons en évidence les différentes procédures de calcul de l'irradiation globale sur une surface horizontale hors atmosphère et sol pour quelques sites algériens.
- Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus en utilisant un modèle et une comparaison entre les résultats trouvés et ceux mesurés sera faite.

Chapitre I

**Influence de la couche atmosphérique
sur le rayonnement solaire.**

I-1-Introduction

Ce chapitre abordera des concepts fondamentaux sur notre étoile (le soleil), tels que ses dimensions, ses couches, l'origine de l'énergie rayonnante qu'elle produit, la nature de cette énergie et sa distribution à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, comme nous pouvons le voir. La formation de notre planète (la terre). Son atmosphère, sa composition, son impact sur le rayonnement solaire et les phénomènes optiques qui en résultent, ainsi que la distribution du rayonnement au sol. [1]

I-2- Le soleil

Le Soleil est l'étoile autour de laquelle tourne la Terre. Son énergie provient de la fusion de l'hydrogène en hélium. Sa température moyenne en surface est estimée à 5800 K. La photosphère, qui est la surface lumineuse normalement visible, a une épaisseur d'environ 100 km. La chromosphère se situe entre la photosphère et la couronne, c'est la couche inférieure de l'atmosphère solaire. Les taches solaires sont des zones sombres à la surface de l'objet, correspondant aux régions les plus froides de la photosphère. Elles présentent une grande diversité de forme et d'étendue. Des observateurs tels que Galilée ont observé ces taches se déplacer au fil du temps, toujours dans le même sens, ce qui démontre la rotation du Soleil. La sphère solaire finie se compose d'une photosphère ayant un rayon équivalent à 696 000 km, soit environ 109 fois le rayon équatorial de la Terre. Sa densité moyenne est seulement de 1,41, ce qui signifie que sa masse n'est que 333 000 fois celle de la Terre, bien que son volume soit 1,3 million de fois plus grand. La distance moyenne entre la Terre et le Soleil est d'environ 150 millions de km. [2]

I-3-Les composition du soleil

I-3-1- Structure interne

I-3-1-1-Le cœur

Le diamètre du noyau représente près d'un tiers du diamètre total. Les températures à l'intérieur varient de 7 à plus de 15,6 millions de kelvins, créant ainsi les conditions propices à une réaction de fusion thermonucléaire des noyaux d'hydrogène présents. Chaque seconde, environ 600 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en hélium, générant une masse qui se transforme en énergie et est émise sous forme de photons gamma. [3]

I-3-1-2-La zone radiative interne

Elle s'étend sur une distance comprise entre 0,3 et 0,7 fois le rayon solaire. Cette zone est assez transparente, permettant à l'énergie générée par le cœur de traverser et de se propager vers les

couches supérieures. La température diminue progressivement de 7 à 1 million de kelvins à mesure que l'on s'éloigne du centre et que l'on se rapproche de la zone radiante intérieure. [3]

I-3-1-3-La zone convective

Il débute à une distance équivalente à 0,7 fois le rayon solaire. La température diminue progressivement depuis 1 million de kelvins, atteignant seulement 15 000 K dans sa partie supérieure la plus profonde. Dans cette région, l'énergie est principalement transportée par convection, où le matériau de l'enveloppe effectue des mouvements circulaires verticaux. À la surface du soleil, on peut observer en permanence un phénomène dynamique appelé granulation, caractérisé par des motifs de "bouillonnement". [3]

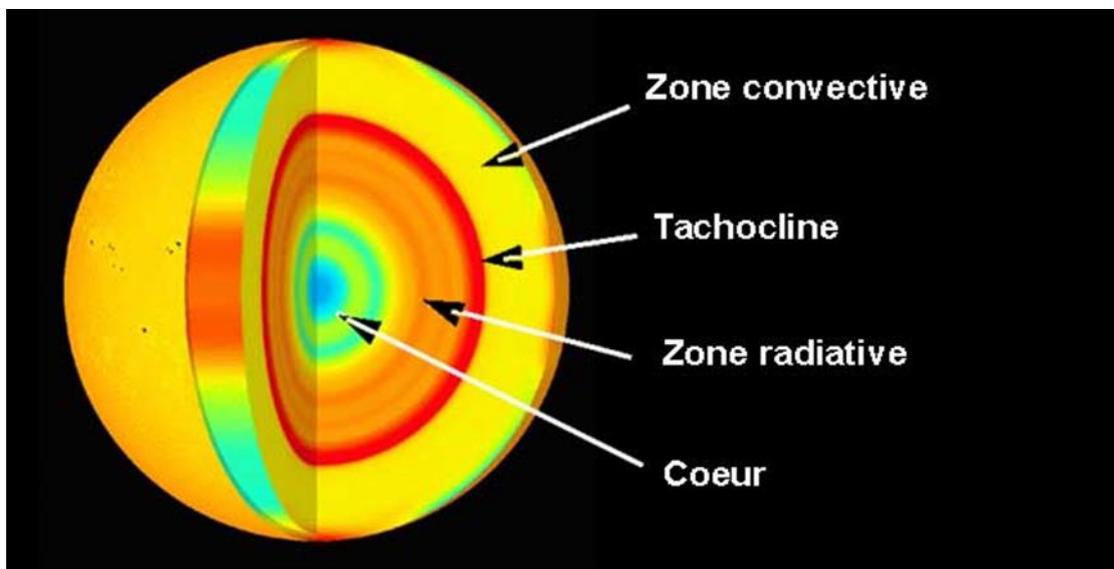


Figure I.1: différentes régions du soleil

I-3-2-Structure externe

I-3-2-1- La photosphère

La photosphère est la couche la plus profonde et visible du Soleil, formant sa surface apparente et émettant la majeure partie du rayonnement. C'est dans cette région que l'on trouve principalement de l'hydrogène neutre, et elle constitue l'enveloppe externe de la structure solaire. [4]

I-3-2-2 - La chromosphère

Elle se présente comme une couche hétérogène dont la température augmente vers l'extérieur, émettant une luminosité environ 100 fois moins intense que celle de la photosphère. Son rayonnement est principalement identifié par des raies d'émission brillantes. [4]

I-3-2-3- La couronne

La couronne est la couche externe du Soleil. Elle se compose d'un plasma de faible densité. Sa température augmente de manière spectaculaire, passant de 10 000 K à la base de la zone de transition à 2 000 000 K dans la couronne. Ce phénomène étonnant de "chauffage" de la couronne est toujours l'un des principaux sujets de recherche en physique solaire à ce jour. [4]

I-3-2-4- L'héliosphère

Une bulle dans le milieu interstellaire est formée par les vents solaires. Cette bulle s'étend jusqu'à 100 UA du Soleil. [4]

I-4- Caractéristiques principales du soleil

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau [1]

Tableau I.1 : caractéristique principale du soleil [5]

Caractéristique	Valeur
Masse	1.989×10^{30} kg
Diamètre	1.392×10^9 m
Masse volumique moyenne	1410 kg/m ³
Puissance rayonnée	3.83×10^{26} w
Température superficielle	5770° k
Vitesse de déplacement	216 km s ⁻¹

I-5- constante solaire

La constante solaire est un flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas la valeur qui a été retenue en 1890 est : $I_0 = 1367 \frac{w}{m^2}$

I_0 est variable autour de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable. [6]

(Trajectoire elliptique). la correction terre soleil est donnée par :

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(j - 2)\right) \quad (I.1)$$

La constant solaire corrigée est :

$$I = I_0 \cdot C_{t-s} \quad (I.2)$$

I-6-Gisement solaire

Le gisement solaire désigne l'ensemble des informations décrivant la variation du rayonnement solaire disponible sur une période donnée. Ces données sont utilisées pour simuler le fonctionnement d'un système d'énergie solaire et effectuer une estimation aussi précise que possible en fonction des besoins à satisfaire. [7]

La connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise :

√ Selon la densité des stations pour lesquelles on a des données.

√ Selon le nombre d'années de mesure disponibles.

√ Selon le pas de temps des données (Mois, jour, Heure).

√ Selon la nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe et diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol etc.....

I-7-L'origine d'énergie solaire

Le soleil tire son énergie des réactions thermonucléaires constantes qui se produisent à l'intérieur de son noyau, où la température atteint 15 millions de degrés. En raison de cette température extrême, une pression énorme est présente et toute la matière se trouve dans un état gazeux ou plasmatique. La couche externe visible du soleil, appelée la photosphère, a une température relativement basse qui décroît progressivement vers l'extérieur, atteignant environ 5800 °K. Les réactions thermonucléaires au sein du noyau solaire se produisent de manière cyclique, convertissant environ 564 millions de tonnes de dihydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium à chaque seconde, selon l'équation suivante :



L'hydrogène, qui constitue 71 % de la masse de la photosphère, représente seulement 34 % de la masse dans la partie centrale du soleil. Ce déplacement permanent a eu lieu il y a environ 4,5 milliards d'années. Les 4 millions de tonnes manquantes se volatilisent et se décomposent dans une

explosion nucléaire colossale. Ce processus est régi par la célèbre relation d'Albert Einstein ($E = mc^2$), qui stipule que toute disparition de masse (m) entraîne une conversion d'énergie équivalente à cette masse multipliée par le carré de la vitesse de la lumière. Ainsi, l'énergie fournie par le soleil équivaut à environ 1,7 milliard de réacteurs nucléaires, ce qui est véritablement astronomique.

Cependant, seule une petite fraction de cette puissance est reçue par le sol en raison de l'angle solide réduit entre le sol et notre planète par rapport au soleil. Cette fraction est environ deux milliards de fois moins importante, ce qui donne un chiffre encore très significatif d'environ $1,9 \times 10^{11}$ MW. Le système géo-atmosphérique réfléchit environ 30 % de l'énergie solaire, qui est interceptée et absorbée, tandis que les 70 % restants sont presque entièrement convertis en chaleur. [8]

I-8-Nature d'énergie solaire

Le rayonnement électromagnétique est constitué de «particules» lumineuses appelées photon. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ : [9]

$$E = hv = hc/\lambda \quad (I.4)$$

Où h est la constante de Planck, v la fréquence et c la vitesse de la lumière.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond à peu près à l'émission d'un corps noir jusqu'à 5800° K. Les données recueillies par les satellites, sont appelées AM0. Sa distribution d'énergie est divisée en :

Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \mu m$ 6.4 %

Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \mu m$ 48.0 %

Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \mu m$ 45.6 %

L'énergie rayonnée par la surface du soleil est d'environ 386 milliards mégawatts, dont 1.7 10¹⁷ Watt sont interceptés par la terre et 30 % de ce flux est réfléchi vers l'espace ,47 % sont absorbés et renvoyés dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge, 22.5 % sont utilisés comme énergie au pour l'évaporation atmosphérique et le cycle des précipitations, 0.5 % existe sous forme photosynthèse végétale. [9]

Le Tableau (I. 2) [9] représente les résultats de la distribution du rayonnement solaire obtenus par des études Thekaekara basées sur les observations par satellites entreprises par la NASA et celle d'un corps noir porté à une température proche de la température de surface du soleil .

Tableau I.2 : Répartition de l'énergie du corps noir et du soleil.

Longueur d'onde	Pourcentage de puissance solaire (W/m^2)	Pourcentage de puissance du corps noir à 5762 K
U-V $\lambda < 0.38\mu m$	7	9.9
Visible $0.38 < \lambda < 0.78\mu m$	47.34	46.4
I-R $0.78 < \lambda < 4\mu m$	45.1	43.6

I-9- le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est composé de photons ayant une plage de longueurs d'onde allant de l'ultraviolet ($0,2 \mu m$) à l'infrarouge lointain ($2,5 \mu m$). La notion d'AM (Air Mass) est utilisée pour caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Afin de prendre en compte la distance parcourue par les rayons, il est nécessaire d'introduire le concept de masse d'air (AM), qui correspond à la longueur relative du trajet traversé par le rayonnement solaire direct à travers l'atmosphère terrestre. Au niveau du sol, le rayonnement global reçu par une surface plane, quelle que soit son inclinaison, est constitué de trois composantes principales. [10]

I-9-1-Les types de rayonnement solaire

I-9-1-1-le rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. [10]

I-9-1-2-le rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. [10]

I-9-1-3-le rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (neige, sable...).il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé albédo (s) $0 \leq s \leq 1$. [10]

I-9-1-4-le rayonnement global

Un plan reçoit de la part du soleil un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions directes, diffus et réfléchi. [10]

$$\text{Rayonnement Global} = \text{Rayonnement direct} + \text{Rayonnement diffus} + \text{Rayonnement réfléchi}$$

**(albédo x rayonnement total horizontal)*

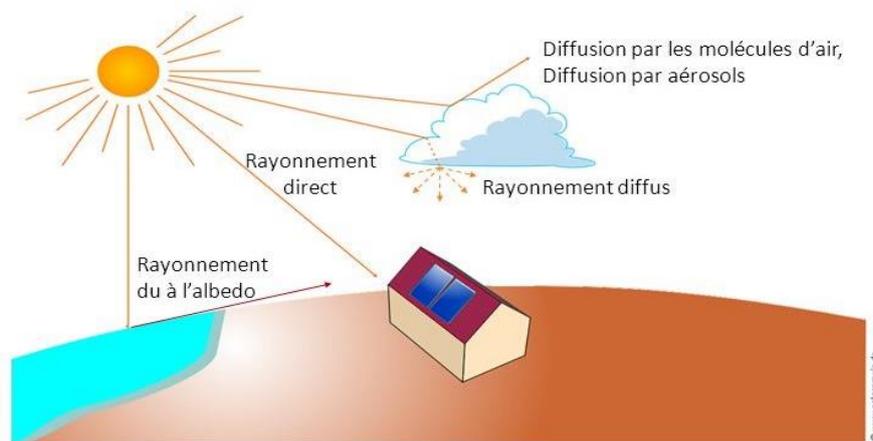


Figure I.2 : les types du rayonnement solaire

I-9-2-Caractéristiques du rayonnement solaire

A la limite de l'atmosphère terrestre, l'irradiante reçue par la surface la puissance moyenne extérieure placée perpendiculairement aux rayons du soleil est de 1367 W/m^2 à l'atmosphère terrestre, atteignant environ $\sim 1200 \text{ W/m}^2$ à la surface de la terre, une partie seulement le rayonnement traverse l'atmosphère jusqu'au sol. Une autre partie du rayonnement est diffusée presque uniforme répartie dans toutes les directions de l'espace. [11]

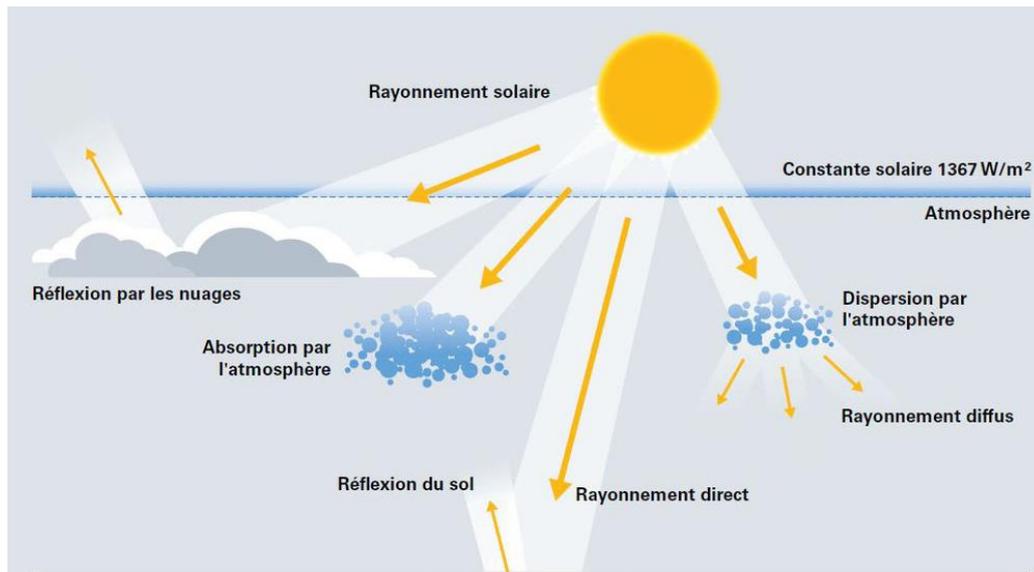


Figure I.3 : trajet du rayonnement solaire dans l'atmosphère

Le rayonnement solaire peut être converti en chaleur (grâce à des capteurs solaires thermiques), en électricité (modules photovoltaïques), en biomasse (photosynthèse). Le rayonnement solaire est extrêmement variable suivant

L'attitude du site

- La saison : durée d'ensoleillement, hauteur du soleil, proportion diffus/direct
- Les conditions météo : nébulosité, poussières, humidité, ...
- L'altitude : brouillard de plaines et vallées
- L'heure de la journée : hauteur /azimut du soleil.

La composition de l'atmosphère, le facteur le plus important pour évaluer la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre est l'épaisseur

D'atmosphère que le rayonnement doit traverser

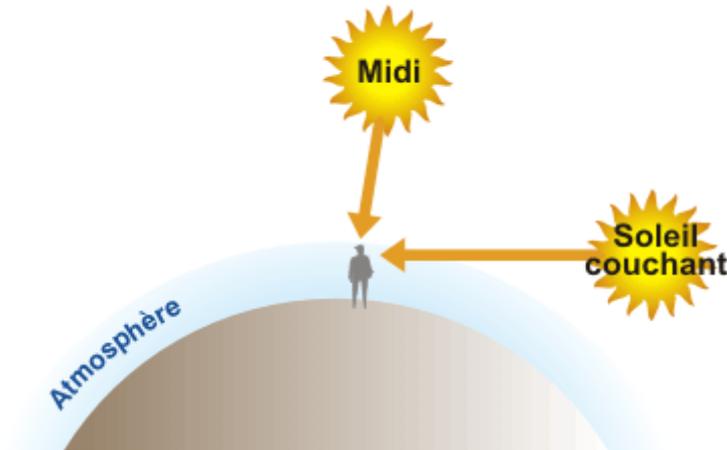


Figure I.4: l'influence de l'heure de la journée

Au midi, le Soleil est au zénith et ses rayons doivent traverser un mince air avant d'atteindre la Terre. Mais au début et à la fin de la journée, le Soleil est bas sur l'horizon ; il met plus de temps à traverser l'atmosphère. Plus l'atmosphère est épaisse, plus les particules de lumière sont absorbées et diffusées et plus dense. Ainsi, au coucher du Soleil, la lumière est suffisamment atténuée pour permettre à l'œil humain de regarder le Soleil sans trop d'éblouissement. Au lieu de cela, quant à mesure que l'altitude augmente, l'atmosphère traversée devient plus petite : dans les régions montagneuses, l'intensité du rayonnement augmente considérablement. [11]

L'épaisseur d'atmosphère traversée influence donc le spectre lumineux reçu. Les normes internationales définissent différents types de spectre : AM1 (pour air mass 1, lorsque le rayonnement a traversé une épaisseur d'atmosphère), AM0 (spectre à la surface externe de l'atmosphère), AM1.5 (spectre utilisé pour les tests standardisés des panneaux solaires correspondant à la traversée d'une atmosphère et demie).

Le rayonnement solaire reçu sur une surface varie donc au cours du temps en fonction de la position du Soleil et de la couverture nuageuse. La puissance solaire maximale à la surface de la Terre est d'environ $1\,000\text{ W/m}^2$ pour une surface perpendiculaire aux rayons.

I-10-Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère

I-10-1-formation de l'atmosphère terrestre

Durant le processus de refroidissement de la terre d'énormes quantités, de méthane, d'ammoniac de gaz carbonique, et d'eau furent rejetées du noyau de la terre vers l'extérieur; Ainsi c'est formé la première atmosphère. En agissant comme une serre cette atmosphère a réduit la perte de chaleur de la terre vers l'espace et notre planète demeura ainsi assez chaude pour que puisse naître la vie.

Les premières plantes apparurent il y a 2 milliards d'années et transformèrent une grande partie du gaz carbonique en oxygène. Ce processus se poursuit toujours et l'atmosphère d'aujourd'hui contient environ 78 % d'azote et 21 % d'oxygène.

L'atmosphère actuelle est faite d'un mélange de gaz et de particules qui entourent notre planète. L'atmosphère est si mince qu'on peut se représenter son épaisseur relativement à la terre comme la pelure d'une pomme relativement à l'ensemble du fruit. C'est la force d'attraction de la terre qui retient l'atmosphère autour du globe. [12]

I-10-2-La composition de l'atmosphère

La composition de l'atmosphère est à peu près la même pour les trois premières couches: 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0.9 % d'argon, 0.03 % de CO₂ et des traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets, les plus durs. L'essentiel des modifications subies par le rayonnement solaire se fait dans la troposphère par diffusion, diffraction, absorption, réfraction par des gaz de température et de densité croissante. La masse gazeuse totale traversée est de 10 tonnes /m²; elle équivaut à 7.8 km d'atmosphère ramenée aux conditions de température et de pression dites normales: T=0°C; p=1 013 mbar. Si ces gaz étaient tous ramenés aux conditions normales, on aurait 6.2 km d'azote, 1.7 km d'oxygène, 74 m d'argon, 30m de vapeur d'eau, 24 m de CO₂, 14 cm de Néon, 4 cm d'Hélium, quelques mm de Krypton, de méthane de NO et de NO₂ et seulement 5 mm d'ozone.[13]

I-10-3-Régions atmosphérique

L'atmosphère terrestre est divisée en plusieurs couches caractérisées entre autres par leur profil thermique vertical (ou profil vertical de température), c'est-à-dire par la façon dont la

température de l'air y croît, décroît ou reste constante lorsqu'on s'élève en altitude. On distingue, à partir de la surface : [14]

1-La troposphère

S'étendant jusqu'à une altitude d'environ 10 km (7 km aux pôles et 15 km dans la zone équatoriale), la troposphère constitue la couche atmosphérique qui renferme 80% de la masse totale de l'atmosphère. C'est dans cette région que se déroulent la plupart des processus météorologiques et chimiques. La température diminue en moyenne de 6,5°C par kilomètre, en raison d'un phénomène physique connu sous le nom de détente adiabatique, qui se produit jusqu'à la tropopause. Cette détente adiabatique favorise un mélange efficace de l'air grâce à des cellules de convection actives. Le temps de dilution de l'air dans la troposphère est d'environ 3 ans. [14]

2-la stratosphère

La stratosphère s'étend jusqu'à environ 50 km d'altitude. Elle renferme la majeure partie de l'ozone. La formation de l'ozone dans cette région est exothermique, ce qui engendre une inversion de température avec une augmentation constante jusqu'à atteindre un maximum à la stratopause. Cette structure thermique verticale extrêmement stable limite considérablement les mouvements verticaux de l'air, expliquant ainsi pourquoi la stratosphère est organisée en couches horizontales, conformément à son nom. Les mouvements atmosphériques y sont principalement horizontaux. En raison de l'absence de nuages et de précipitations, les particules résident dans la stratosphère pendant une durée très longue. [14]

3-la mésosphère

La mésosphère présente des caractéristiques similaires à celles de la troposphère. Cependant, les conditions nécessaires à la formation de l'ozone n'y sont plus présentes, ce qui signifie que le processus de détente adiabatique redevient prédominant. [14]

4-la thermosphère

Située au sommet a sa température contrôlée par l'absorption du rayonnement solaire ultraviolet dur et X, et varie beaucoup suivant l'activité solaire et l'alternance jour-nuit. Cette dernière couche peut également être appelée ionosphère ou exosphère. [14]

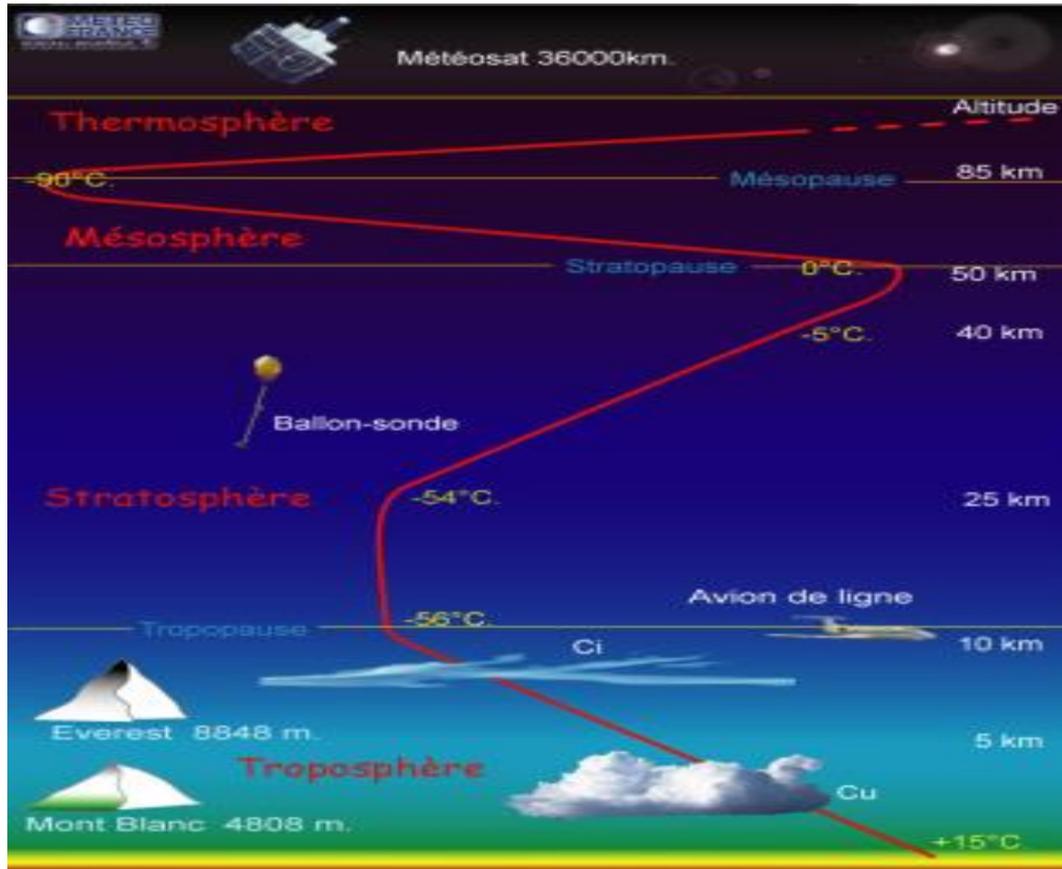


Figure I.5: Structure verticale thermique de l'atmosphère

I-10-4-Masse atmosphérique

Intensité des effets de diffusion et d'absorption, sur le rayonnement solaire le passage dans l'atmosphère est lié au nombre de molécules rencontrées rayonnement solaire. La loi de transmission est donnée par : [15]

$$\Phi_1 = \Phi_0 \exp(-kl) \quad (I.4)$$

Φ_1 : Le flux énergétique sortant après un parcours de longueur l.

Φ_0 : Le flux entrant.

K : le coefficient d'extinction qui caractérise l'absorption et la diffusion.

Le rapport Φ_1 / Φ_0 représente la fraction de la puissance transmise.

Prendre la masse d'air ou (nombre de masse d'air exprimé en AM) comme unité de référence est l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne au-dessus du niveau de la mer, à conditions normales

de pression et de température Pour tenir compte de la distance parcourue par un rayon, nous définissons un système pour référence, le concept de qualité de l'air ou de masse atmosphérique (AM) a été introduit pour définir traverser : [15]

$$AM = \frac{p}{1013} \frac{1}{\sin(h)} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \quad (I.5)$$

$f \cdot p$ (N/m) : pression.

$f \cdot h$ (°) : élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith).

$f \cdot z$ (Km) : altitude.

Dans les conditions normales et au niveau de la mer, l'expression simplifiée suivante est utilisée (AM est inversement proportionnel au sinus de la hauteur du soleil):

$$AM = \frac{1}{\sin(h)} \quad (I.6)$$

Ainsi, lorsque le soleil est au zénith ; nous disons que nous avons la condition AM1 car les rayons lumière traversant une unité d'épaisseur d'atmosphère (7.8 Km). Soleil à 30° horizon, obtenez la condition AM2. Hors atmosphère, à haute altitude, on définit état AM₀. Spectre AM1.5, correspondant à un angle solaire de 48.2° sur la surface de la terre.

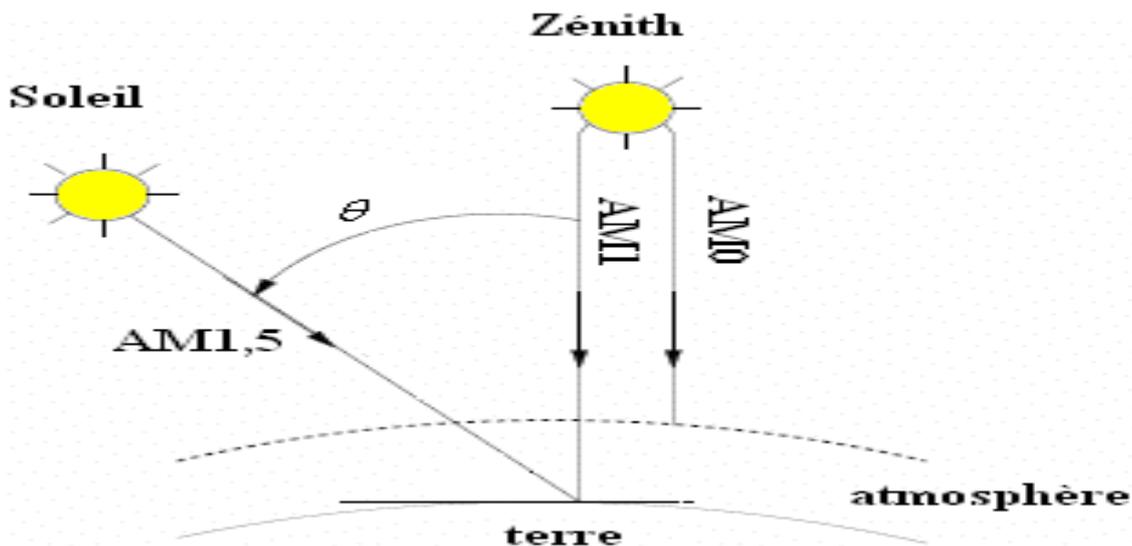


Figure I.6: Description du nombre d'air masse.

Il est important de comprendre l'aspect recouvert par le concept de nombre d'air masse, il caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire.

Le Tableau (I. 3) indique les valeurs de la constante solaire I0 en fonction du nombre d'air Masse

Tableau I.3 : Variation de constante solaire en fonction de nombre d'air masse pour une atmosphère de type méditerranéen

AM	0	1	1.5	2	3	4	5
I0 (W.m-2)	1353	931	834	755	610	530	430

I-10-5-l'épaisseur de l'atmosphère

En effet, plus on s'éloigne de la surface de la Terre moins l'atmosphère est dense, cela signifie que plus l'altitude augmente moins il y a de molécules dans un volume donné d'atmosphère. Le passage de l'atmosphère à l'espace est donc progressif et décider d'une limite supérieure pour l'atmosphère est d'autant plus difficile. Plusieurs approches permettent cependant de résoudre ce problème.

La notion de diminution de densité de l'atmosphère avec l'altitude, sans jamais vraiment atteindre une valeur de densité nulle est identique à celle d'une courbe s'approchant indéfiniment de son asymptote sans jamais la toucher. La figure illustre cette notion. Elle ne représente pas l'évolution de la densité de l'atmosphère avec l'altitude mais la distribution de la masse de l'atmosphère en fonction de l'altitude, qui a été déduite des valeurs de densité. L'axe des ordonnées indique la proportion massique de l'atmosphère. Sur cette figure l'asymptote est la ligne horizontale $m/M_{in} = 1$ (ligne rouge), on remarque que 90% de la masse atmosphérique en dessous de 16 km. [16]

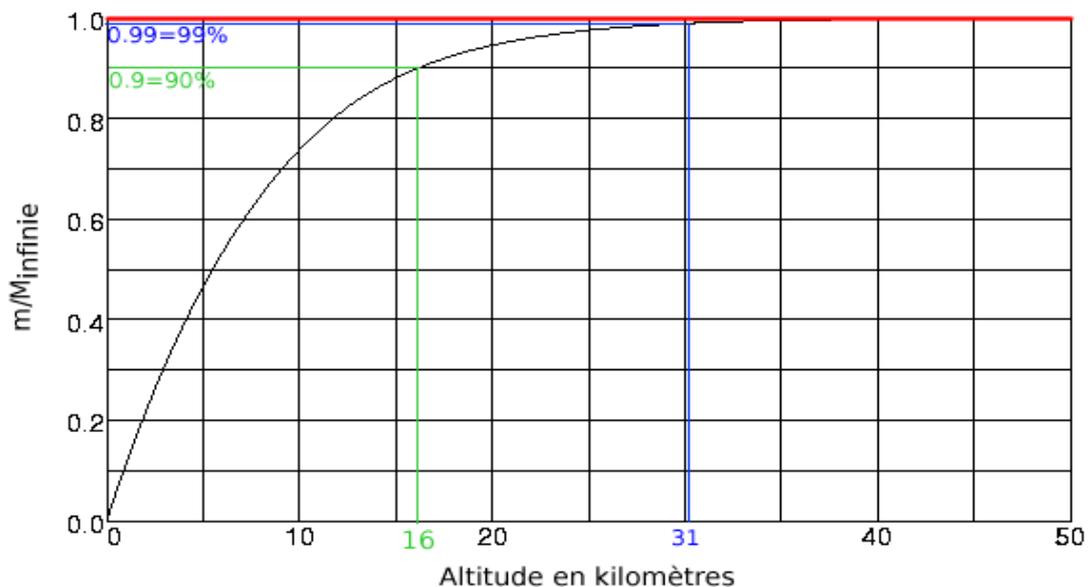


Figure I.7: distribution de la masse de l'atmosphère en fonction de l'altitude.

L'axe des abscisses représente l'altitude z en kilomètres. L'axe des ordonnées le rapport entre d'une part m , la masse de l'atmosphère comprise entre la surface du sol et l'altitude z et d'autre part M_{inf}

I-10-6-l'absorption du rayonnement solaire

L'absorption du rayonnement solaire est sélective et dépend principalement de quatre éléments qui sont : [17]

1 - **Ozone** (O_3) : Il absorbe des bandes fortes entre 0.2 et 0.3 μm , des bandes faibles de 0.45 à 0.7 μm et deux bandes IR à 10 et 14 μm . Il forme aussi un écran qui arrête les UV.

2-**Oxygène** (O_2) : Il absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers 0.69 et 0.76 μm).

3-**Gaz carbonique** (CO_2) : Il absorbe des unes parties de l'infrarouge lointain ($\lambda > 2\mu\text{m}$).

4- **Vapeur d'eau** qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR. On ne la rencontre pratiquement qu'au niveau du sol ($z < 5 \text{ km}$).

I-10-7-Absorption du rayonnement par les molécules atmosphériques

I-10-7-1-Absorption moléculaire

Au cours de leur pénétration dans l'atmosphère, les photons solaires entrent en collision avec les molécules atmosphériques et sont progressivement absorbées. L'absorption du rayonnement par les molécules atmosphériques est intimement liée à leurs caractéristiques énergétiques. Une molécule possède des niveaux énergétiques discrets ou quantifiés associés à des états de rotation, de vibration ou de configuration électronique. Un photon peut être absorbé lorsque son énergie correspond à une transition entre le niveau fondamental et un de ces états excités. D'autre part, une molécule peut être dissociée par des photons dépassant l'énergie d'ionisation de la molécule. Il y a alors un continuum énergétique d'absorption au-delà de l'énergie d'ionisation. [18]

Ainsi, on peut distinguer 4 types d'absorption suivant l'énergie du photon incident :

Ultraviolet : les molécules sont dissociées. L'absorption n'est pas quantifiée.

Visible : les molécules changent de configuration électronique. L'absorption est quantifiée.

Infrarouge : les molécules vibrent. L'absorption est quantifiée.

Micro-ondes : les molécules tournent. L'absorption est quantifiée.

I-10-7-2-Absorption dans l'infra-rouge (IR)

Les photons du domaine du visible ne sont pas absorbés par l'atmosphère et sont donc uniquement diffusés. Dans le domaine de l'infra-rouge, les photons émis par le Soleil deviennent moins nombreux que ceux émis par la Terre. Dans ce domaine l'absorption des photons est due à la transition depuis l'état fondamental vers un niveau de vibration de la molécule. Ces niveaux dépendent de la molécule considérée et sont discrets. Une même molécule peut donc avoir plusieurs bandes d'absorption correspondant à différents niveaux de vibration. [18]

I-10-7-3-Absorption dans l'ultra-violet (UV)

L'absorption photonique suivie de la dissociation de la molécule se caractérise généralement par un spectre continu au-dessus d'une certaine énergie (ou en dessous d'une certaine longueur d'onde). Celle-ci correspond au seuil minimal pour dissocier la molécule. Si un photon plus énergétique est absorbé, l'excédent énergétique est transformé en énergie cinétique de l'un des produits de la réaction photochimique. Les niveaux seuils de dissociation se situent dans l'Ultra-Violet pour les molécules atmosphériques.

- Les radiations solaires dans le domaine de l'UV sont totalement absorbées : Dans la mésosphère pour les radiations UV les plus énergétiques (longueur d'onde inférieure à 170 nm) par N₂O et l'oxygène moléculaire.

- Dans la stratosphère pour les radiations UV les moins énergétiques par l'oxygène moléculaire et l'ozone. [18]

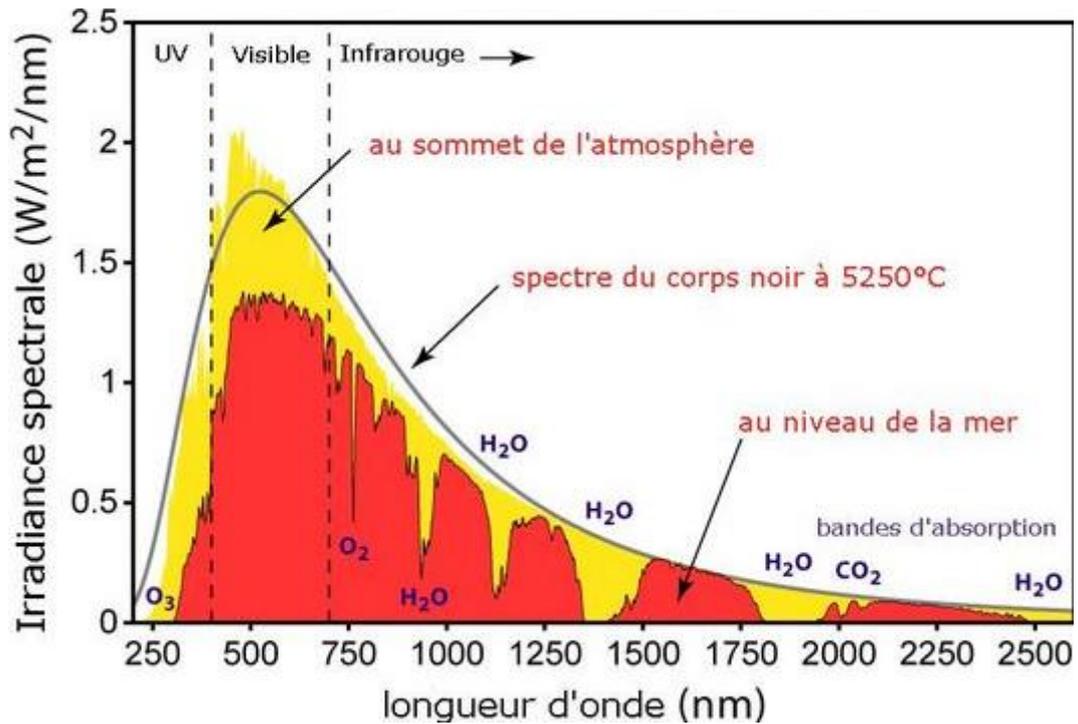


Figure 1.8 : spectre du rayonnement solaire.

I-10-8-La Diffusion atmosphérique

La diffusion est une redistribution du rayonnement solaire qui interagit avec les molécules gazeuses, les gouttelettes et les aérosols dans toutes les directions sans changement de longueur d'onde. Selon la taille des particules diffusantes par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, on distingue deux types de diffusion : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie.

La diffusion de Rayleigh affecte surtout les molécules d'air pur et sec comme l'azote et l'oxygène. C'est une diffusion sélective causée par les particules dont le diamètre est très inférieur à la longueur d'onde incidente. En moyenne, en prenant en compte la course du soleil et les différentes longueurs d'onde, environ 13% de rayonnement solaire incident subissent la diffusion de Rayleigh. Le coefficient d'extinction caractérisant ce type de diffusion.

La diffusion de Mie désigne la diffusion par les particules dont la taille est de même ordre de grandeur que les longueurs d'onde, comme pour la vapeur d'eau et les aérosols. Le coefficient d'extinction s'écrit [19] :

$$k_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (I.7)$$

Où α est lié à la taille des particules et varie entre 0 (pour les grosses particules) et 4 (pour les petites particules). La valeur moyenne pour les aérosols étant $\alpha = 1,3$.

Et β , le coefficient de trouble atmosphérique établi par Angström. Il représente la quantité aérosols présente dans l'atmosphère. Il vaut 0.02 pour un ciel très pur (bleu profond) et 0.2 pour un ciel pollué.

I-10-9-Réfraction atmosphérique

La masse volumique $\rho(z)$ de l'air atmosphérique diminue avec l'altitude z , cette diminution entraîne une variation de l'indice de réfraction de l'air, $n(z)$, donnée par : [12]

$$[n(z)]^2 = 1 + 2a' \frac{\rho(z)}{\rho(0)} \quad (I.8)$$

Avec $a' = n(0) - 1 = 2.932 \cdot 10^{-4}$ (pour la lumière blanche)

Qui engendre à son tour une déviation progressive des rayons lumineux qui suivent par la suite une trajectoire à concavité tournée vers le bas. C'est à cause de cette réfraction que la hauteur apparente du soleil est supérieure à sa hauteur réelle. La durée du jour est influencée par les deux phénomènes de crépuscule et de réfraction atmosphérique.

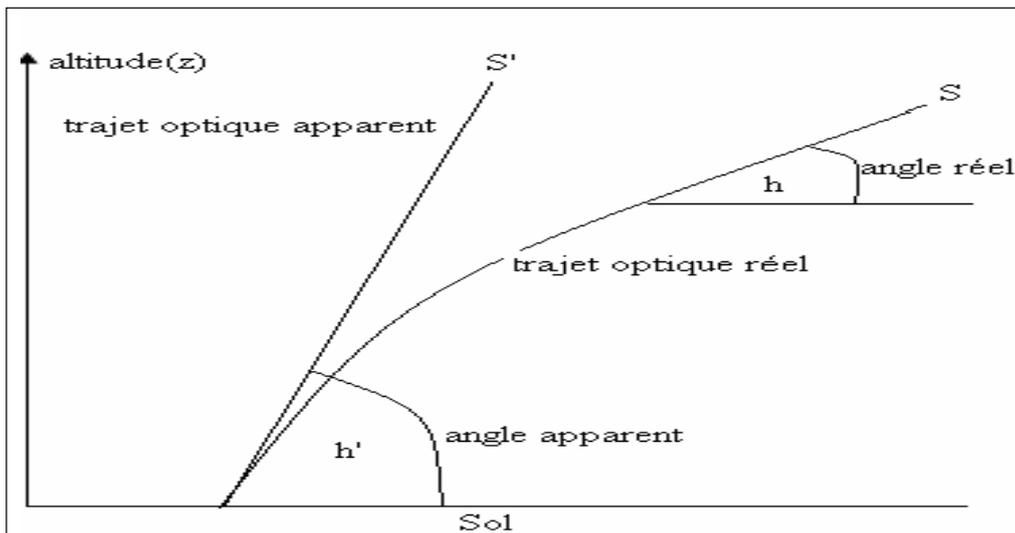


Figure I.9: Réfraction atmosphérique.

I-11-Distribution spectrale du rayonnement solaire au sol

Au sol le rayonnement solaire peut être décomposé en deux parties :

1. le rayonnement direct, on notera par (D') la puissance reçue par unité de surface normale aux rayons provenant au sol.
2. le rayonnement diffus provenant de toute la voûte céleste, on notera par (D) la puissance reçue par unité de surface.

La puissance globale du rayonnement solaire reçu au sol s'exprime comme étant la somme de la puissance diffuse et de la puissance directe pondérée par le cosinus de l'angle zénithal du soleil On a alors : [20]

$$H = D + D' = D + I \sin(h) \quad (I.9)$$

Avec

h : étant la hauteur du soleil

I : la puissance reçue par unité de surface et qui est exprimée en ($w.m^{-2}$).

Chapitre II

Calcul l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale

II-1-Introduction

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques notions sur le mouvement de la terre et du soleil, et le repérage de la position du soleil, la latitude et l'angle horaire. En fin du chapitre on donnera la procédure de calcul de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale hors atmosphère et au sol pour quelques sites algériens.

II-2-Aspect géométrique du rayonnement solaire

Dans l'objectif ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné positionné à la surface de la Terre et orienté dans une direction spécifique, nous allons nous concentrer sur les aspects géométriques du rayonnement solaire capté par notre planète. La compréhension de ce flux constitue la fondation pour concevoir des systèmes solaires efficaces. [21]

II-2-1-Les mouvements de la terre

Dans l'univers, tout est en constante évolution. On peut décomposer le mouvement de la Terre en deux composantes :

-Rotation autour de l'axe des pôles (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. Ce mouvement est responsable de l'alternance entre le jour et la nuit. Le jour solaire est défini comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs du soleil au méridien d'un lieu donné. Ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La Terre effectue une rotation complète en environ 24 heures ($T_r \approx 24h$). [22]

- Elle effectue une révolution autour du soleil chaque année, précisément en 365,25 jours, sur une trajectoire elliptique où le soleil est considéré comme un point fixe de cette ellipse. Cependant, on observe une variation de distance d'environ 3,3 % au cours de son parcours annuel, avec les valeurs suivantes :

Distance maximale : 152 millions de kilomètres.

Distance minimale : 147 millions de kilomètres.

- Une unité astronomique (1 UA), qui correspond à la distance moyenne de 149,5 millions de kilomètres, est utilisée pour mesurer cette distance. À la vitesse de la lumière, cela équivaut à 8,32 minutes. En d'autres termes, il faut 8,32 minutes pour que la lumière solaire atteigne la Terre. La

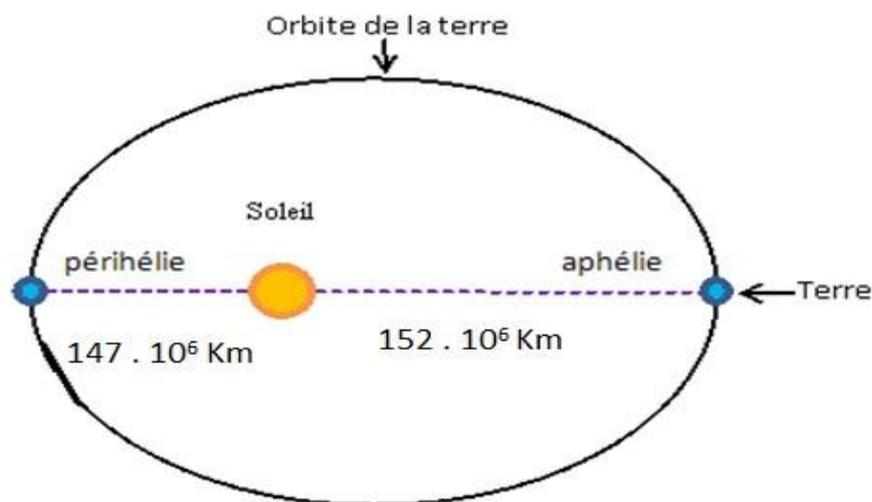
Chapitre II : calcul l'irradiation solaire globale sur un surface horizontale

variation de la distance entre le Soleil et la Terre a un impact sur l'intensité de l'irradiation sur la surface terrestre. C'est également l'une des causes de la variation des saisons.

Lorsque la Terre et le Soleil sont séparés par une unité astronomique, l'angle entre eux mesure 32 minutes. Cela indique que les rayons solaires incidents ne sont pas parfaitement parallèles. Cependant, cette divergence est si minime qu'elle est souvent négligée lors des calculs.

Le point de l'orbite terrestre le plus proche du Soleil est appelé périhélie. Il se situe à une distance de 147 millions de kilomètres et survient le 3 janvier. À cette période de l'année, l'hémisphère nord est en hiver tandis que l'hémisphère sud est en été.

En revanche, le point le plus éloigné du Soleil, appelé aphélie, est atteint le 3 juillet avec une distance de 150 millions de kilomètres. À ce moment-là, l'hémisphère nord est en été tandis que l'hémisphère sud est en hiver. [22]



Les rapports géométriques : terre-soleil est représentés par la figure :

Figure II.1 : Rapports géométriques : terre-soleil

Le mouvement de la terre autour du soleil est représenté par la figure :

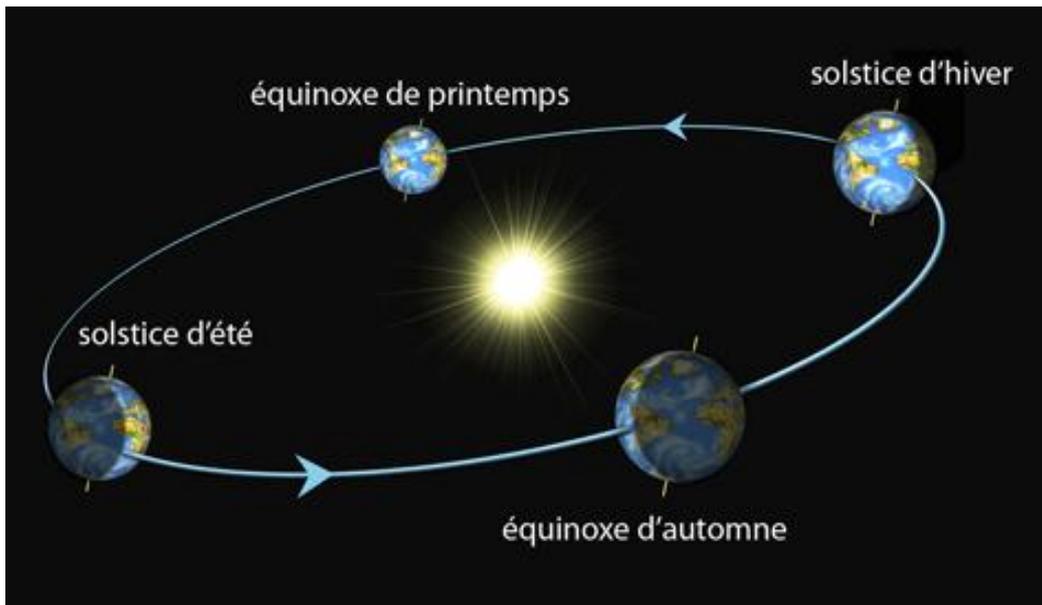


Figure II.2 : Mouvement de la terre autour du soleil.

Le plan équatorial, perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre, fait avec le plan de l'écliptique un angle constant appelé obliquité et noté δ_0 qui est égal à $23^{\circ}27'$

L'angle d'inclinaison de l'axe de la terre est représenté par la figure

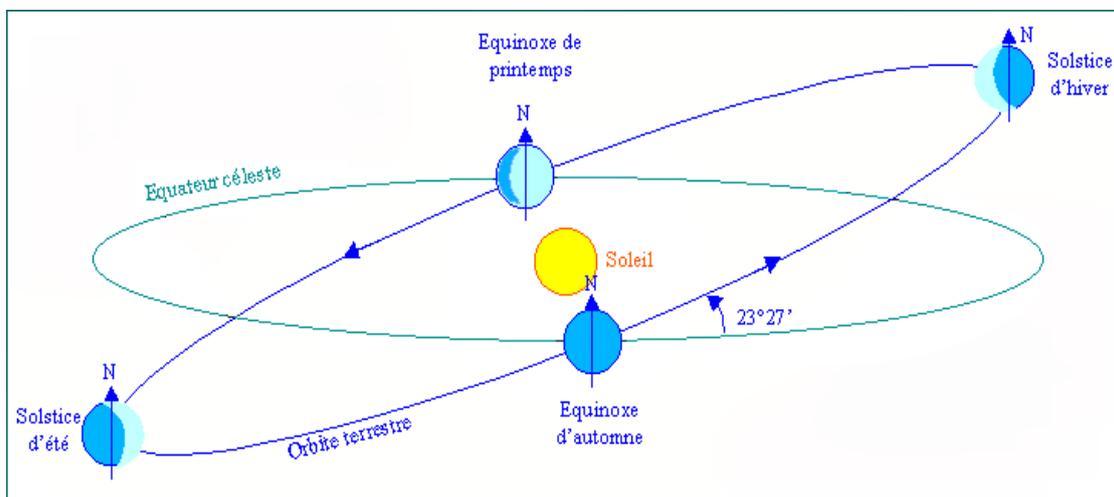


Figure II.3 : Angle d'inclinaison de l'axe de la terre.

II-2-2-Mouvements de la terre autour du soleil

La Terre fait un tour autour du Soleil en un an, dans un plan appelé « écliptique ». La Terre tourne 365.25 jours sur elle-même pendant qu'elle fait, dans le même sens, un tour autour du Soleil

Chapitre II : calcul l'irradiation solaire globale sur un surface horizontale

(Figure 4). Pendant cette révolution annuelle, l'axe de rotation de la Terre reste parallèle à lui-même, mais est incliné de 23.5° par rapport à la normale au plan de l'écliptique. [23]

Le mouvement de la Terre autour du Soleil s'effectue à une vitesse orbitale d'environ 30 km/s, entraînant à chaque année un parcours d'environ un milliard de kilomètres. Du point de vue du pôle Nord de la Terre, cette dernière parcourt son orbite dans le sens antihoraire. Cette direction correspond, à midi, à l'ouest d'un observateur situé sur l'équateur terrestre.

Au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est le plus près du soleil: 147 millions de Km et au solstice d'été qu'elle en est le plus éloigné: 153 millions de Km, la distance moyenne étant de 149,5 millions de Km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 Février) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) à une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle avec la normale du plan de l'écliptique.

L'écliptique céleste. On appelle déclinaison δ l'angle formé par l'axe Terre -Soleil avec le plan équatorial. La déclinaison varie de $+23^\circ 27'$ solstice d'été (21 juin), à $-23^\circ 27'$ solstice d'hiver (23 décembre), elle s'annule deux fois par an les 21 Février et 23 Septembre (ce sont les équinoxes) et elle est responsable des saisons. Les parties diurnes et nocturnes de la journée ont alors la même durée aux équinoxes la déclinaison passe par 0° ($-23^\circ 27' < \delta < +23^\circ 27'$). [23]

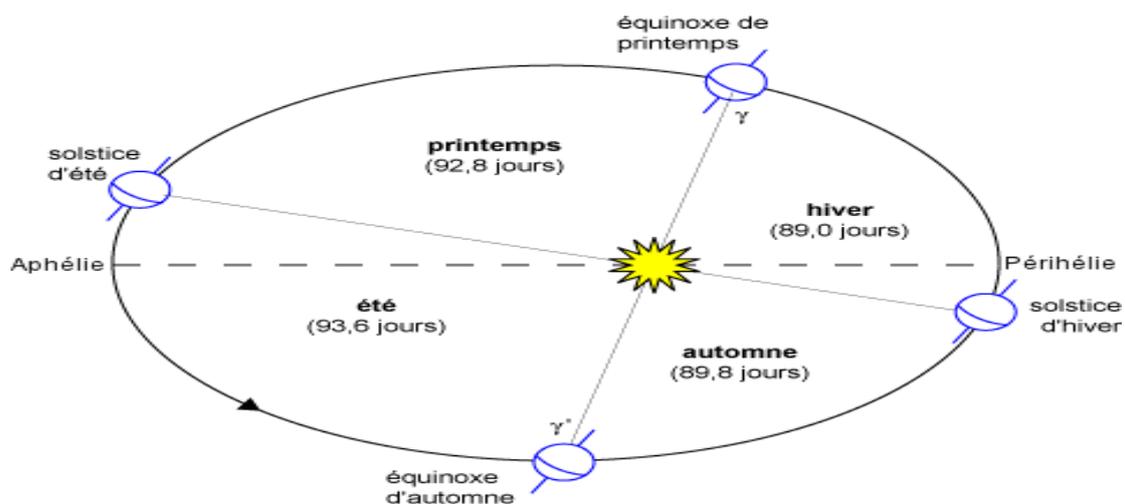


Figure II.4: Mouvement de la terre autour du soleil.

II-3-La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes Caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figure : [21]

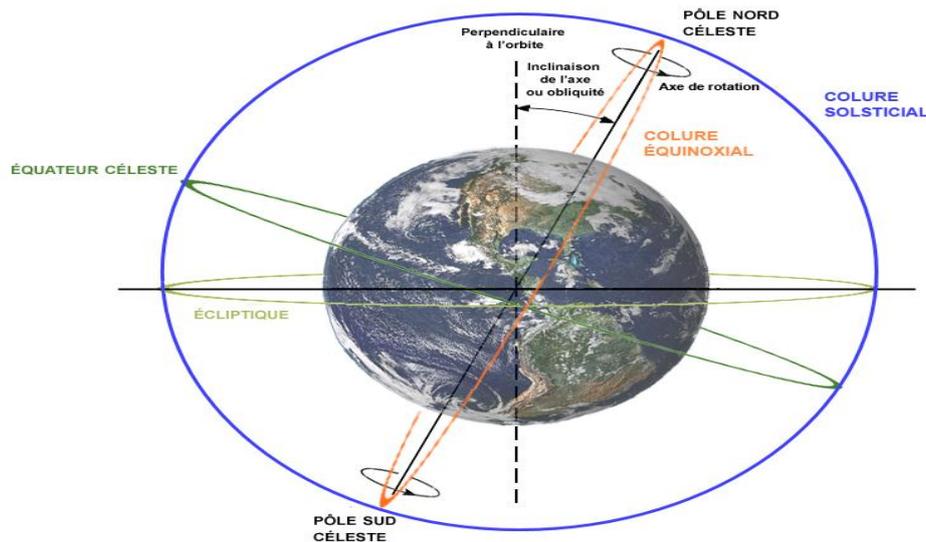


Figure II.5: La sphère céleste.

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

II-4- Repère géographique

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

II-4-1- La latitude φ

Donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie de 0° à l'équateur à 90° Nord (ou Sud) aux pôles. Elle représente la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur, φ varie de -90° à $+90^\circ$. [21]

Tel que : $\varphi > 0$ vers le nord,

$\varphi < 0$ vers le sud.

II-4-2- La longitude L

Permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest d'une ligne Nord- Sud de référence appelée le méridien Greenwich. [21]

L varie de -180° à $+180^\circ$

Tel que : $L > 0$ à l'est du méridien de Greenwich

$L < 0$ à l'ouest du méridien de Greenwich.

II-4-3-L'altitude

C'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence. [24]

II-5-Repère équatorial

II-5-1- La déclinaison δ

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre. la déclinaison varie de $-23^\circ 27'$ au solstice d'hiver à $+23^\circ 27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes, la déclinaison est donnée par la formule suivante : [25]

$$\delta = 23.45 \times \sin[0.980 \times (j + 284)] \quad (\text{II-1})$$

j est le nombre du jour (1-365).

Mois	Jour de l'année	Déclinaison selon () ($^\circ$)
Janvier	15	-21.58
Février	46	-13.98
Mars	74	-3.73
Avril	105	8.48
Mai	135	18.12
Juin	166	23.16
Juillet	196	21.97
Aout	227	14.82
Septembre	258	3.60
Octobre	288	-8.23
Novembre	319	-18.20
Décembre	349	-23.11

Tableau II.1 : les valeurs de la déclinaison des 15 jours de chaque mois de l'année.

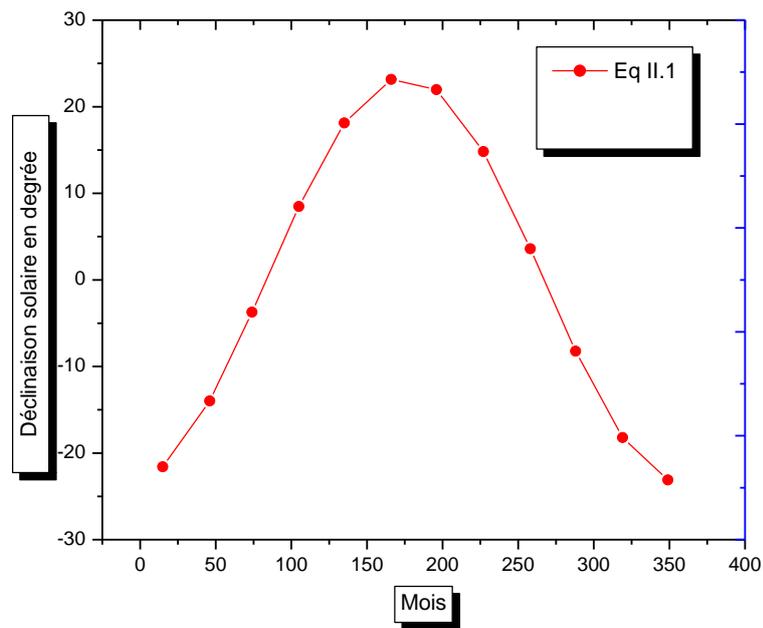


Figure II.6 : variation de la déclinaison au court de l'année.

II-5-2- Angle horaire (w)

L'angle horaire (encore note AH) du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre 0° et 360° . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi et augmente de 15° par heure. [26]

II-6-Répérage du soleil

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles.

II-6-1-L'azimut solaire (a)

Est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest. [21]

Note : l'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'azimut géographique, lequel est toujours mesuré

dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observations.

II-6-2- La hauteur (h)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir, On appelle quelquefois distance zénithale le complément de l'angle h : $z + h = 90^\circ$. [21]

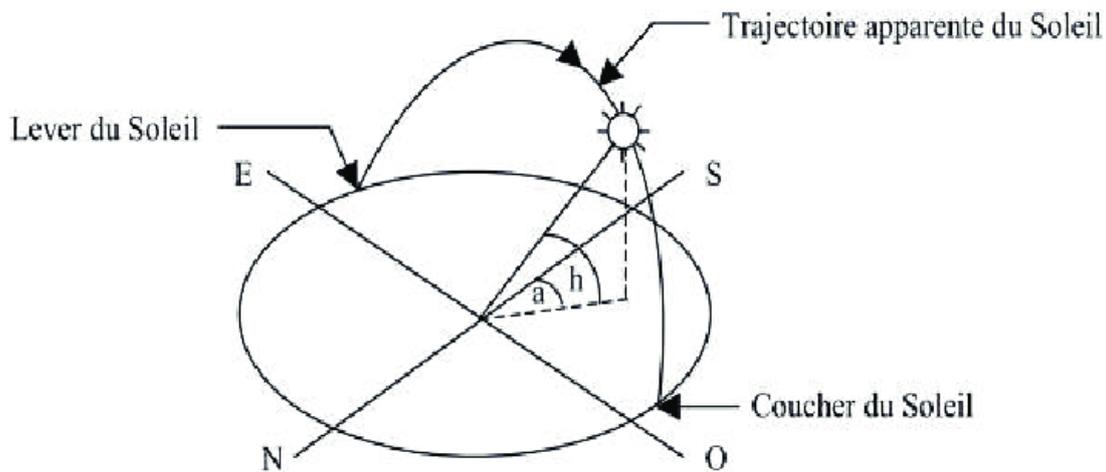


Figure II.7: Repérage du soleil.

II-7-Relations de repérage du soleil

La position du soleil peut être déterminée à l'aide de deux expressions, dans les qu'elle intervient la déclinaison, la latitude et l'angle horaire : [27]

$$\sin(h) = \sin(l) \sin(w) + \cos(l) \cos(\delta) \cos(w) \quad (\text{II-2})$$

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cos(w)}{\cos(h)} \quad (\text{II-3})$$

Avec :

L : la latitude du lieu.

δ : La déclinaison du soleil.

W : l'angle horaire.

h : la hauteur du soleil.

a : l'azimut du soleil.

II-8- La durée du jour

C'est l'intervalle de temps au cours du qu'elle le soleil se trouve au-dessus de l'horizon, si on néglige le phénomène de la réfraction atmosphérique cette intervalle s'obtient à partir des heures de lever et du coucher du soleil. [8]

La hauteur du soleil est nulle au coucher ($h=0$) donc.

$$\sin(h) = \sin(l) \sin(\delta) + \cos(l) \cos(\delta) \cos(w) = 0 \quad (\text{II-4})$$

Où WC est l'angle horaire du soleil au coucher.

Donc
$$\cos(w_c) = -tg(l) \cdot tg(\delta) \quad (\text{II-5})$$

Pour le lever du soleil on pose ($w_l = -w_c$) et l'heure solaire au lever est.

$$TS_{lever} = 12 + \frac{w_l}{15} = 12 - \frac{w_c}{15} \quad (\text{II-6})$$

La durée du jour (S_0) est l'intervalle de temps entre l'heure du coucher et l'heure du lever du soleil.

$$S_0 = TSc \cdot TSl \quad (\text{II-7})$$

II-9- Calcul de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale

II-9-1- L'irradiation solaire globale à la limite de l'atmosphère

En dehors de l'atmosphère le rayonnement solaire incident se réduit à sa composante directe. Pour un lieu donné le flux reçu par une surface horizontale est donné par : [8]

$$I_{oh} = I_{cs} \cdot \sin(h) \quad (\text{II-8})$$

I_{oh} : Flux sur une surface horizontale et pour une hauteur (h)

I_{cs} : La constante solaire.

Chapitre II : calcul l'irradiation solaire globale sur un surface horizontale

Pour avoir l'irradiation solaire globale (H_0 : MJ/m² .jour) sur une surface horizontale à la limite supérieure de l'atmosphère on intègre l'expression précédente sur l'intervalle d'un jour (du lever au coucher du soleil). Ce qui donne le résultat suivant :

$$H_0 = \left(\frac{24I_0}{\pi}\right) \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360j}{365}\right)\right) \cdot Z \quad (\text{II-9})$$

J= est le jour de l'année (c.-à-d. n =1 pour le 1^{er} janvier).

Le paramètre (Z) est donné par.

$$Z = \left(\cos l \cos \delta \sin w + 2\pi w \sin l \frac{\sin \delta}{360}\right) \quad (\text{II-10})$$

On remarque que l'irradiation global H_0 sur une surface horizontale en dehors l'atmosphère dépend de la constante solaire (I_{cs}), de la latitude du lieu considéré (L), de la déclinaison (δ) et de l'angle horaire (w).

II-9-2-Fraction d'insolation

C'est une grandeur mesurable dès qu'on connaît les durées d'insolation enregistrées par l'héliographe et qui s'en déduit par le rapport : [13]

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (\text{II-11})$$

Avec :

S : Durée d'insolation mesurée ou le temps durant lequel le soleil a brillé.

σ : Fraction d'insolation quotidienne.

S_0 : Durée maximale d'insolation ou durée astronomique du jour ; c'est l'intervalle entre le lever et le coucher du soleil.

II-10-Evaluation de l'irradiation globale sur différents sites Algériens

La connaissance de la distribution de la radiation solaire pour des stations particulières a une importance vitale pour le domaine agronomique, écologique et les systèmes photovoltaïques et thermiques et l'estimation de leurs performances. Dans la majorité des cas la mesure de l'irradiation solaire n'est pas disponible pour différents sites alors les équations de régression basées sur la durée

Chapitre II : calcul l'irradiation solaire globale sur un surface horizontale

d'insolation sont généralement utilisées pour l'estimation locale de l'irradiation solaire. Plusieurs modèles ont été proposés pour l'évaluation de la radiation solaire utilisant de différents paramètres. Certains modèles utilisent la durée relative d'insolation, l'humidité relative et d'autres utilisent la durée d'insolation et un facteur dépendant de la latitude et l'altitude. [12]

II-10-1-Procédures de calcul

Dans ce travail, les valeurs mesurées de l'irradiation solaire et de la durée d'insolation pour les sites algériens [27] « Alger, Tamanrasset » sont utilisées. Les coordonnées géographiques des sites sont présentées dans le Tableau

Site	Latitude (deg) (N)	Altitude(m)	Longitude (deg)
Alger	36.43	25	3.15 ^E
Tamanrasset	22.47	1378	5.31 ^E

Tableau II.2 : Emplacement géographique des deux sites.

II-11-Relations linéaires

Les relations linéaires entre le rayonnement solaire quotidien ou mensuel et l'insolation sont les modèles les plus simples et les meilleurs pour estimer le rayonnement solaire à un niveau horizontal aux endroits où des stations de mesure sont disponibles, ils peuvent être appliqués dans des endroits avec le même climat et les valeurs mesurées ne sont pas disponibles. Les constantes de ces relations mathématiques sont des coefficients basés sur le climat de la région étudiée, et sont bien représentées par le modèle d'Angström, qui a été présenté dans la relation. Généralement c'est la relation d'Angstrom qui est préférée car la valeur de (G_0) est liée seulement au numéro du jour et la latitude. [28]

II-11-1-Modèle d'Angström-Prescott

L'irradiation solaire et la durée d'insolation dépendent des effets combinés d'événements astronomiques et météorologiques. La première relation est arrivée dans la forme d'une expression linéaire (cas particulier) comme suggérée par Angstrom (1924). Sa formule a été employée dans des applications pratiques pendant plusieurs années pour estimer l'irradiation solaire globale quotidienne, mensuelle, et annuelle à partir des mesures de la durée d'insolation, selon l'expression suivante : [29]

Chapitre II : calcul l'irradiation solaire globale sur un surface horizontale

$$\frac{H}{H_0} = a_1 + b_1 \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{II-12})$$

H : est le rayonnement global moyen mensuel mesuré sur un plan horizontal (MJ.m⁻² .j⁻¹)

H₀ : est le rayonnement global moyen mensuel hors atmosphère sur un plan horizontal (MJ.m⁻² .J⁻¹)

S : : la durée de l'enseillement effective,

S₀ : la durée maximale d'enseillement ou durée du jour, son expression est

$$S_0 = \frac{2}{15} \cdot w \quad (\text{II-13})$$

Pour déterminer les constantes a et b dans l'équation, nous avons calculé le taux (H/H₀) et (S/S₀) pour chaque jours et chaque mois pour les différents sites

L'expression de l'angle horaire peut être modifiée si on introduit les différentes définitions de la durée du jour :

$$w_c = \cos^{-1} \left(\frac{\sin(h_0) - \sin(L) \cdot \sin(\delta)}{\cos(L) \cdot \cos(\delta)} \right) \quad (\text{II-14})$$

Ou h₀ : La hauteur du soleil à son coucher (ou lever).

Le Tableau (II.3) résume les différentes définitions du coucher du soleil, et la hauteur du soleil correspondant introduites dans les calculs [30]

Définition de la durée du jour	H ₀ (°)
Couche/lever du soleil est quand :	
-le centre du disque solaire est à l'horizon.	0
-le sommet du disque solaire est à l'horizon.	-0.2667
-le sommet du disque solaire apparaît à l'horizon.	-0.8333

Tableau II.3 : les différentes définitions de la durée du jour.

II-11-2- Ecartés relatifs moyens algébriques

Pour évaluer les résultats obtenus par les différents modèles nous avons calculé les écartés relatifs moyens algébriques suivants : [28]

- **MAE** (Mean Absolute Error) : mesure l'ampleur moyenne des erreurs dans une série de prévisions, sans tenir compte de leur direction, il mesure de précision pour les variables continues, son expression est donnée par :

$$MAE = \sum_i \frac{|d_i|}{n} \quad (II-15)$$

-**MBE** (Mean Bias Error), erreur de biais moyen, MBE est une indication de l'écart moyen des valeurs prédites à partir des données mesurées correspondantes et peut fournir des informations sur la performance à long terme des modèles, plus la MBE est basse, meilleure est la prédiction du modèle à long terme. Une valeur MBE positive indique la quantité de surestimation dans l'irradiation solaire directe prédiquée et vice versa. [31]

$$MBE = \sum_i \frac{d_i}{n} \quad (II-16)$$

- **RMSE** (Root Mean Square Error), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, RMSE fournit des informations sur la performance à court terme qui est une mesure de la variation des valeurs prédictives autour des données mesurées. Plus le RMSE est bas, plus l'estimation est précise elle est toujours positive:[31]

$$RMSE = \left[\sum_i \frac{d_i^2}{n} \right] \quad (II-17)$$

Pour mesure l'erreur relative on définit par la relation suivante :

$$d_i = (H_{i,m} - H_{i,c}) \times \left(\frac{100}{H_{i,m}} \right) \quad (II-18)$$

II-11-3-Le deuxième modèle

Dans ces modèles la fraction d'insolation et la température moyenne de l'air sont utilisées sous l'expression suivante. : [32]

$$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \sigma + c \cdot T_n \quad (II-19)$$

Avec :

a,b, c: sont les paramètres de ce modèle qui vont être déterminés par la méthode des moindres carrés et (T_n) la moyenne mensuelle de la température de l'air normalisée(T/T_{max}).

II-11-4-Le troisième modèle

Dans ce modèle on utilise la fraction d'insolation et un Paramètres climatique, qui est l'humidité relative moyenne de l'air, il est donné par l'expression suivants : [32]

$$\frac{H}{H_0} = a + b. \sigma + c. R \quad (\text{II-20})$$

a,b,c : sont les paramètres de ce modèle qui vent êtres détermines par la méthode des moindres carrés.

R : L'hamidité relative moyenne de l'air.

II-11-5-Le quatrième modèle

Dans ce modèle, exploite trois paramètres climatiques, la fraction d'insolation, température moyenne de l'air et l'humidité relative moyenne pour exprimer le rayonnement global horizontal. L'équation est donnée sous cette forme : [32]

$$\frac{H}{H_0} = a + b. \sigma + c. T_n + d. R \quad (\text{II-21})$$

a, b, c, d: sont les paramètres de ce modèle qui vont être déterminés par la méthode des moindres carrés.

T_n , R:étant respectivement, la moyenne mensuelle de la température de l'air normalisée l'humidité relative moyenne de l'air.

II-12- Appareils de mesure

II-12-1-L'héliographe

L'héliographe c'est un appareil simple mesure la durée d'insolation (les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement direct est supérieur à 120 W/m²).

• L'héliographe Campbell-Stokes :

C'est le premier héliographe qui fut inventé par J.F Campbell en 1853 et amélioré par G.G. Stokes en 1879. Il est constitué d'une boule de cristal de dix centimètres de diamètre, exposée au soleil, faisant effet de lentille concentrant le rayonnement infrarouge du soleil, tout en l'atténuant plus qu'une loupe, de manière à brûler une bande de papier rigide spécial placée à une distance judicieuse sous la boule sur un support incurvé. Le support de papier permet de déplacer ce dernier en fonction de la saison, c'est-à-dire de la hauteur maximale du soleil au-dessus de l'horizon. La lumière brûle le papier au fur et à mesure du déplacement du point focal, tant que le soleil brille. La bande de papier est graduée en heures, ou plus finement. Le papier ne brûle pas tant que la limite d'insolation n'a pas été atteinte, c'est la raison pour laquelle la mesure en hiver est imprécise et lorsque le soleil est filtré par des nuages qui bloquent rayons infrarouge. Le système ne fonctionne pas, également, à l'aube et au couchant où l'infrarouge est filtré par l'atmosphère. D'autre part, une graduation des molettes permette de régler l'inclinaison du support en fonction de la latitude du point où est installé l'héliographe. La bande est aussi valable pour des périodes différentes de l'année et en fonction de l'hémisphère où est installé l'héliographe. [8]



Figure II.8 : Schéma d'un héliographe de Campbell-Stokes.

II-12-2-Le pyranomètre

Les pyranomètres mesurent le rayonnement global (direct + diffus) de toute l'hémisphère céleste dans la bande de longueur d'onde 0.3 à 3 μm . Le pyranomètre d'Eppley est une thermopile adaptée à cet usage. La surface réceptrice comporte deux anneaux concentriques en Argent; l'anneau

intérieur est recouvert de noir, l'anneau extérieur recouvert de blanc. La différence de température mesurée entre les deux anneaux par des thermocouples en contact thermique avec les surfaces intérieures des anneaux mais isolés électriquement, peut être enregistrée à raison d'une lecture par heure sous forme d'une tension de sortie de l'ordre du mV (en fait $10\mu\text{V} / \text{W}/\text{m}^2$). [13]



Figure II.9 : Exemple de pyranomètre.

II-12-3-L'albédomètre

L'albédomètre est formé de deux pyranomètres identiques opposées : un dirigé vers le haut (ciel) l'autre vers le bas (terre), le premier qui est dirigé vers le haut mesure le rayonnement global (direct + diffus) incident sur le sol et le deuxième qui est dirigé vers le bas mesure le rayonnement global réfléchi par le sol.

L'albédo présente la fraction du rayonnement global réfléchi par le sol par rapport au rayonnement global incident. Il est possible d'obtenir le rayonnement net en calculant la différence entre le rayonnement global incident et le rayonnement global réfléchi. [27]



Figure II.10 : L'albédomètre pour la mesure de l'albèdo du sol.

Chapitre III

Résultats et discussion

III-1-Introduction

Dans ce Chapitre, une application des uns modèles déjà présente dans le chapitre précédant pour calculer l'irradiation solaire globale pour les deux sites algériens : Alger et Tamanrasset, et nous présentons des résultats obtenus est donnée et on finira par faire une comparaison entre ces résultats.

III-2- calcul de l'irradiation solaire globale hors atmosphère

Les valeurs de l'irradiation solaire hors atmosphère peuvent être calculées en utilisant l'équation suivante :

$$H_0 = \left(\frac{24I_0}{\pi}\right) \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360j}{365}\right)\right) \cdot z \quad (\text{III.1})$$

Et

$$Z = \left(\cos l \cos\delta \sin w + 2\pi w \sin l \frac{\sin\delta}{360}\right) \quad (\text{III.2})$$

Pour les deux sites algériens les résultats sont présentés sur le tableau :

Mois	Irradiation solaire globale hors atmosphère (MJ/m ² jour)	
	Alger	Tamanrasset
01	16.43	24.43
02	21.37	28.43
03	27.93	33.21
04	35.27	37.75
05	40.49	40.34
06	43.00	41.31
07	42.42	41.11
08	38.77	39.56
09	32.42	36.10
10	25.08	31.21
11	18.63	26.25
12	15.44	23.59

Tableau III.1 : Irradiation solaire globale hors atmosphère (MJ/m²jour).

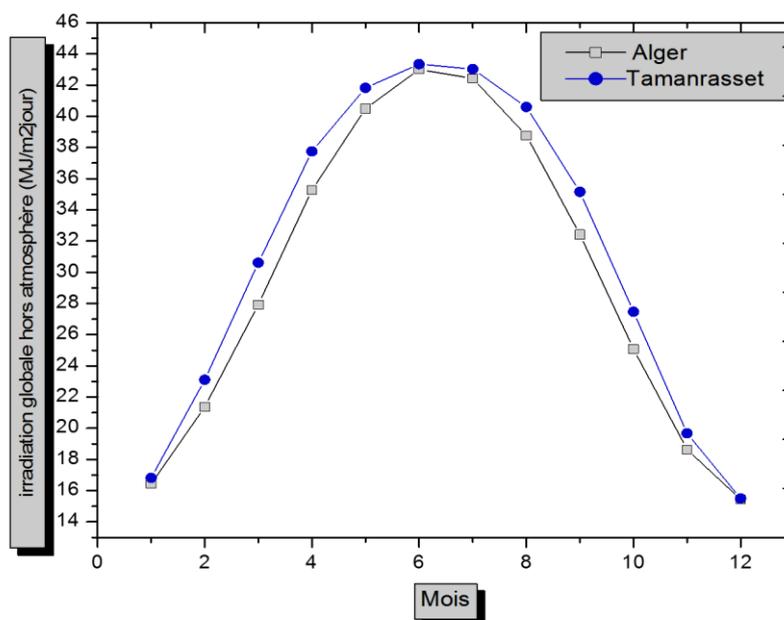


Figure III.1 : variation de l'irradiation globale hors atmosphère

La figure (III.1) montre que :

- pour Alger l'irradiation solaire globale hors atmosphère a des valeurs très importantes, et atteignent un maximum autour de 43 MJ/m²jour pendant les mois d'été, et atteignent un minimum autour de 16 MJ/m²jour pendant l'hiver.

- pour Tamanrasset a un minimum autour de 24 MJ/m²jour pendant l'hiver, mais possède un maximum un peu inférieur par rapport aux autres sites.

III-3- La fraction d'insolation

Dans ce travail, les valeurs moyennes mensuelles mesurée du rayonnement solaire et de la durée d'insolation journalière sur deux site algériennes sont utilisées (Alger, Tamanrasset). Les héliographes de Camblèll-stokes sont utilisés pour la mesure de la durée d'insolation ce qui permet le calcul de la fraction d'insolation. la période d'enregistrement est de 25 ans et les résultats sont comme suit :

Station/mois	Alger	Tamanrasset
Jan	0.48	0.78
Février	0.56	0.81
Mars	0.60	0.84
Avril	0.61	0.77
Mai	0.71	0.76
Juin	0.71	0.83
Juillet	0.78	0.75
Aout	0.80	0.77
Septembre	0.74	0.73
Octobre	0.62	0.77
Novembre	0.51	0.81
Décembre	0.49	0.79

Tableau III.2 : fraction d'insolation des deux sites algériens.

III-4- Application du modèle du type d'Angstrom-Prescott

Dans notre travail on a adopté le modèle d'Angstrom-Prescott (abordé au 2^{ème} chapitre) pour la modalisation de l'irradiation solaire globale telle les coefficients (a_1 et b_1) sont déterminés par la méthode des moindres carrés pour les différentes définitions de la durée du jour, et les résultats sont illustrés dans le tableau (III.3).

Site	Hauteur du soleil	a_1	b_1
Alger	$h_0=0$	0.3025	0.3361
	$h_0=-0.2667$	0.3028	0.3364
	$h_0=-0.8333$	0.3032	0.3374
Tamanrasset	$h_0=0$	0.6508	0.1882
	$h_0=-0.2667$	0.6540	0.1872
	$h_0=-0.8333$	0.6561	0.1887

Tableau III.3 : les coefficients des corrélations du modèle d'Angstrom-Prescott pour Les Différente Sites.

Les résultats de calcul de (H_{calcul}) l'irradiation solaire globale pour les deux sites choisis (Alger + Tamanrasset) sont présente dans les figures suivants (III.2, III.3, III.4 pour Alger et III.5, III.6, III.7 pour Tamanrasset).

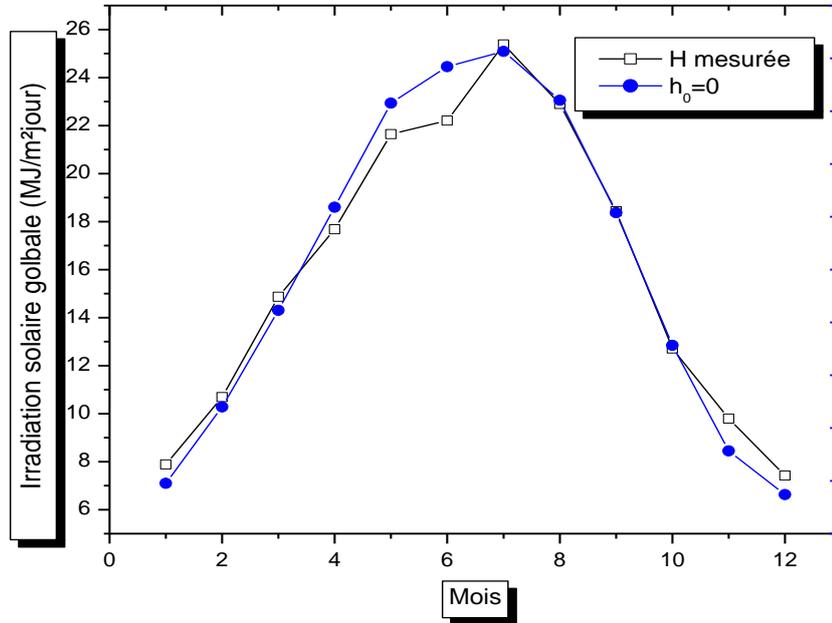


Figure III.2 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Agstrom- Prescott.

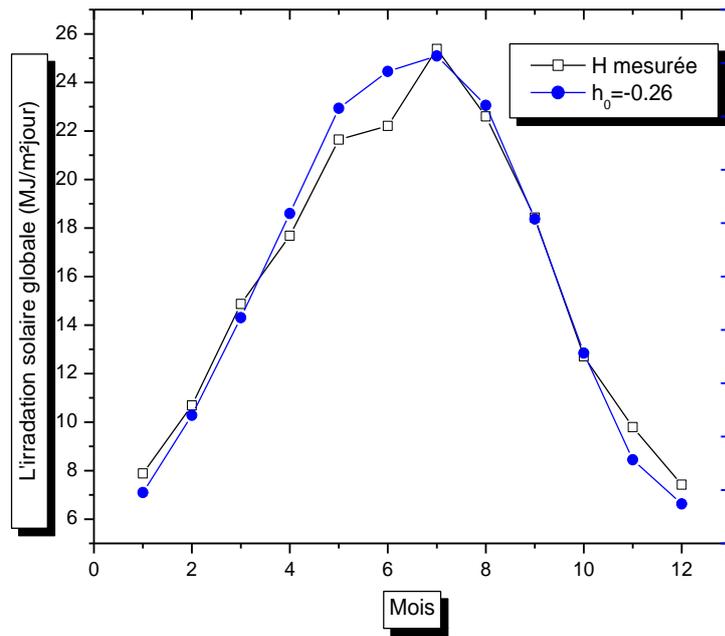


Figure III.3 :L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Angstrom-Prescott.

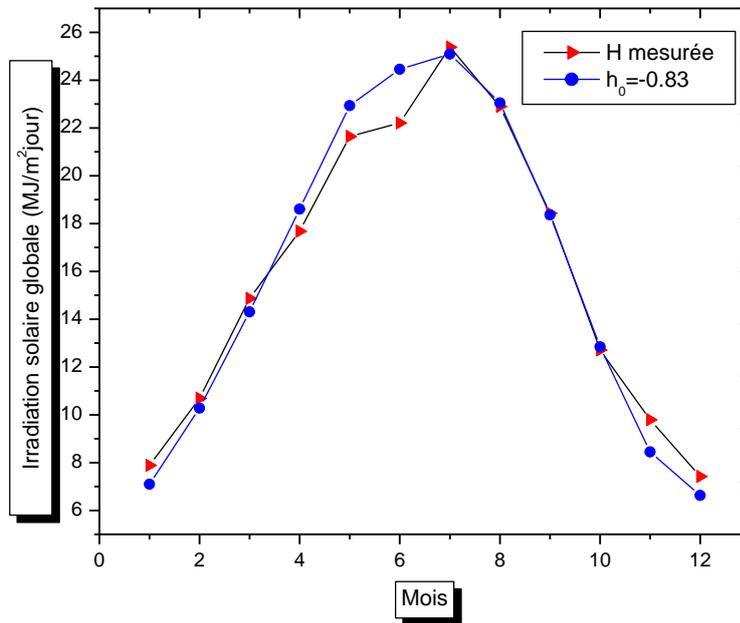


Figure III.4 :L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Angstrom-Prescott.

• Nos résultats modélisés pour les différentes définitions de la durée du jour sont généralement proches de ceux mesurés. Ils sont presque conformes pour la période allant de janvier jusqu'au mois de mai, ainsi que pour les périodes de juillet à décembre. Un écart acceptable est observé pour les résultats du mois de juin.

- La même remarque peut être faite pour les autres définitions de la durée du jour, c'est-à-dire pour $h_0 = -0.26$ et $h_0 = -0.83$. En général, la qualité de nos résultats met en évidence la validité de l'utilisation de différentes définitions de la durée du jour pour la modélisation du rayonnement solaire global en Algérie.

• L'irradiation solaire globale mesurée sur Tamanrasset est présente dans les Figure (III.5, III.6, et III.7).

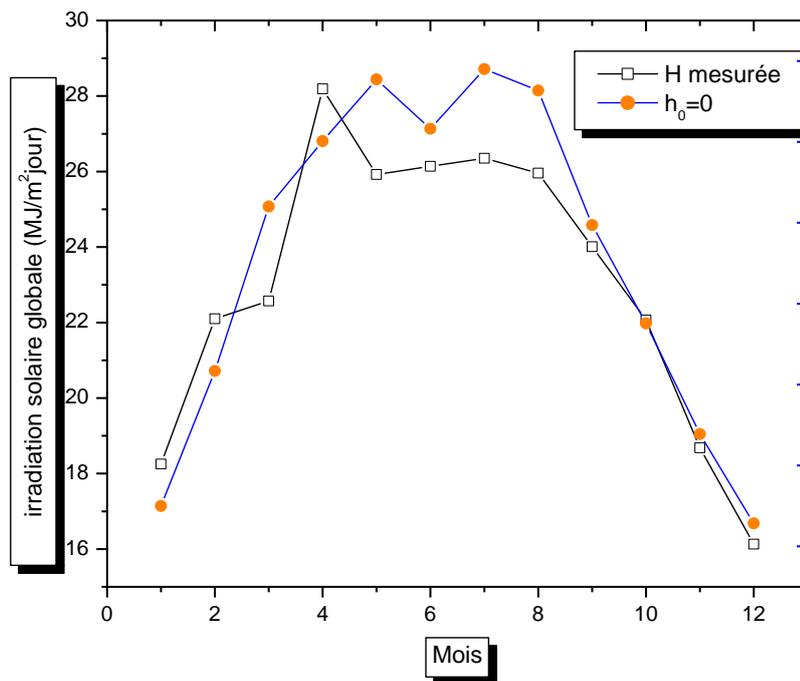


Figure III.5 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Angstrom-Prescott.

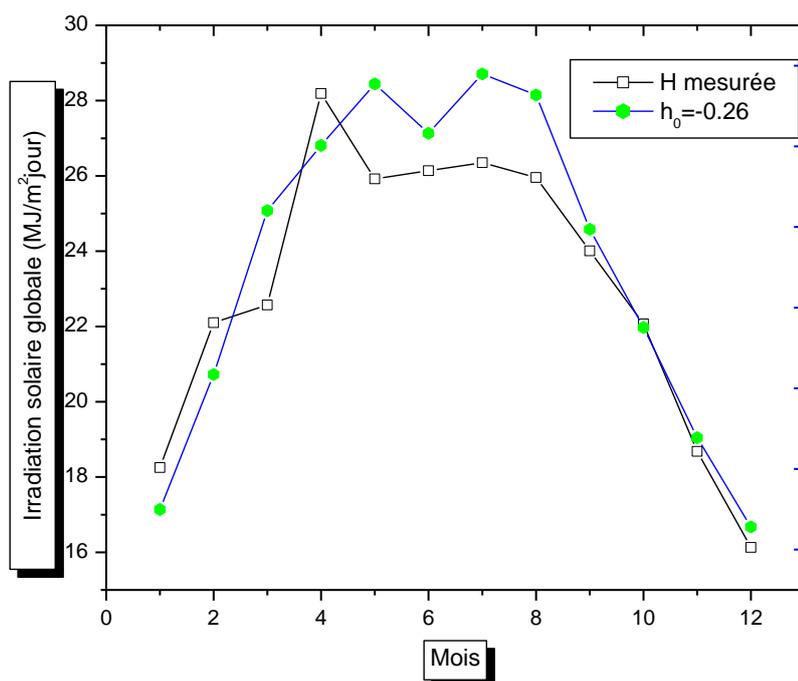


Figure II.6 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Angstrom-Prescott.

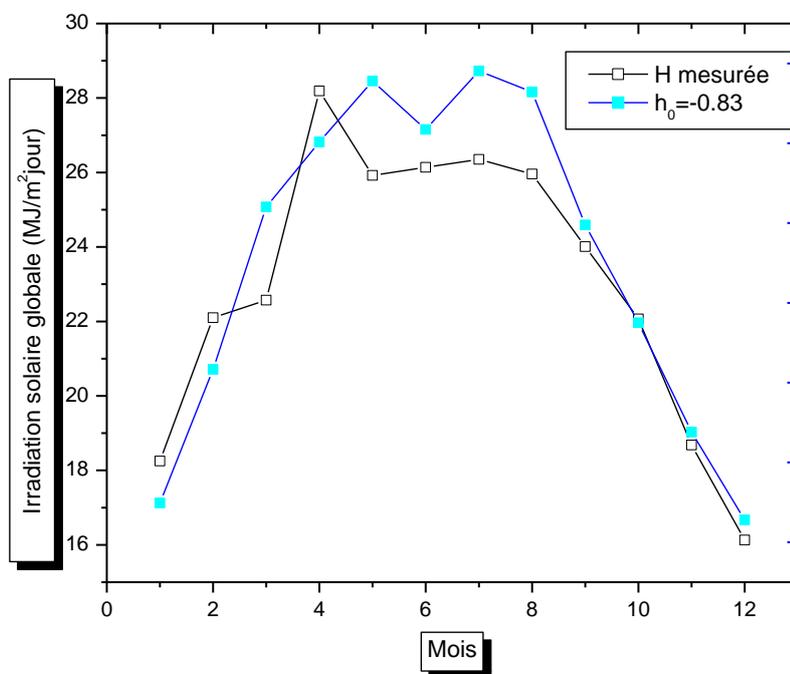


Figure III.7 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Angstrom-Prescott.

• Nos résultats, modélisés pour les différentes définitions de la durée du jour, présentent un léger décalage pour la période allant de janvier jusqu'au mois de mai, mais sont presque conformes pour la période de septembre à décembre. Cet écart est acceptable pour les résultats des mois de juin, juillet et août.

➤ Il est très facile de voir que on a La même observation peut être faite pour les autres définitions de la durée du jour, c'est-à-dire pour $h_0 = -0.2667$ et $h_0 = -0.8333$.

• On présente dans le tableau (III.4) les valeurs des paramètres statistiques (MBE, RMSE, MAE) Pour le premier modèle d'Angstrom-Prescott afin d'évaluer sa performance d'estimation de l'irradiation sur deux site considérés.

Site	Hateur du soleil	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)
Alger	$h_0 = 0$	-0.1281	3.0470	3.6504
	$h_0 = -0.2667$	-0.1282	3.0487	3.6521
	$h_0 = -0.8333$	-0.1284	3.0497	3.6539
Tamanrasset	$h_0 = 0$	-0.2934	4.5170	5.3657
	$h_0 = -0.2667$	-0.2932	4.5157	5.3647
	$h_0 = -0.8333$	-0.2958	4.5335	5.3880

Tableau III.4 : les paramètres statistiques pour le modèle du type d'Angstrom-Prescott.

III-5 – Discussion

D'après le tableau (III.3), Les coefficients des corrélations du modèle d'Angstrom-Prescott (les a_1) varient entre 0.3025 et 0.3032 pour Alger, entre 0.6508 et 0.6561 pour Tamanrasset.

Les b_1 varient entre 0.3361 et 0.3374 pour Alger, entre 0.1882 et 0.1887 pour Tamanrasset.

Le tableau (III.4) montre les indicateurs statistique de précision le modèle de type d'Angstrom-Prescott en introduisant différents définitions du coucher (ou du lever) du soleil. On remarque que le maximum d'erreur obtenu est : - RMSE=3.6539 % pour Alger ou $h_0 = -0.8333$, 5.3880 % pour Tamanrasset ou $h_0 = -0.8333$.

Les meilleurs résultats sont obtenus (avec un minimum d'erreur) tel que pour Alger : RMSE=3.6504 % ou $h_0 = 0$ (coucher du centre du disque solaire), pour Tamanrasset RMSE=5.3647 % ou $h_0 = -0.2667$ % (coucher du sommet du disque solaire).

Références Bibliographiques

- [1] S. Abdelmoumien, .O. Youcef, Etude du rayonnement solaire global (Willaya de Biskra) pour la gestion de la production d'énergie photovoltaïque, université Mohamed khdir, Biskra, 2019/2020.
- [2] Géométrie solaire sur site Internet. [Http://www.outilssolaires.com/Glossaire/spin geometrie.htm](Http://www.outilssolaires.com/Glossaire/spin_geometrie.htm) (consulté le 22/05/2009).
- [3] J. Canada, (1988) Global solar radiation in Pays Valencia no using sunshine hours. International Journal of Ambient Ennery, (4): 197-201.
- [4] BOUMELIT Zinne Labadie, Activité Solaire, Vent Solaire et Géomagnétisme durant les Cycles Solaires N°23 et24, mémoire magistère, option géophysique Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- [5] M. Salmi « Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques ».Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, (2012).
- [6] B.sidi Mohammed El Amine, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, thèse de doctorat, université de abou-belkaid, Tlemcen, 2008/2009.
- [7] M, Capéou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger, (1985).
- [8] N. Mohamed, Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire, thèse de magister, université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [9] J. Côtier, A. Mermoud, J. Villa, J. Graf, Centrales photovoltaïques, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, Berne. (1996)
- [10] M. N. Mchaliikh et C. H. Hamada, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïques en fonctionnement autonome et connecté au réseau», Mémoire de master, université kadi Merbah, Ouargla, 2013.
- [11] A. Djabouabellah, «étude et mesure des données solaire d'un gisement sommaire dans une zone isole», Thème de Master, Université Ahmed draya, Adrar, 2014/2015.
- [12] S. Yassine, «Modélisation Du rayonnement solaire sur Quelques sites algériens», Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 02/07/2007.
- [13] A. Ricaud, Gisement solaire et transferts énergétiques, université de CERGY-PONTOISE, 2011.

Références Bibliographiques :

- [14] Site Internet : https://ressources.unisciel.fr/geochimie/co/Structure_de_l_atmosphere.html.2 , 27/05/2023 ,22:42.
- [15] C. P. Brichambaut ,et C. Vague, Le gisement solaire : Evaluation de la ressource énergétiques, (1982)
- [16] Site Internet : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/epaisseur-atmosphere.xml>, 27/05/2023,22 :19.
- [17] M. Salmi, « Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques ».Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, (2012).
- [18]Site Internet : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/bilan-radiatif-terre2.xml> ,28/05/2023,17:55.
- [19] B. Djelloul, «détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie», thèse de doctorat, université africaine Ahmed draia, Adrar, 2018/2019.
- [20] Viorel Badescu. Modeling solar radiation at the earth's surface, Springer 2008
- [21] H. B. Mohammed « Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid,Telmcen, 06 juillet 2011.
- [22] M .Ziad, «Caractérisation Radiométriques Des Sites de Bouzaréah et de Ghardaïa » Mémoire de magister, Université de Saad Dahleb, Blida, Octobre2007.
- [23] B .Djelloul, «Détermination Du Gisement Solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie», Thèse de Doctorat, Université Africaine Ahmed Draia, Adrar, 2018/2019.
- [24] N. Benalouache, « L'énergie solaire pour la production d'électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d'échelles», Thèse de docteur, Université de Sfax, 30/06/ 2017.
- [25] S. Benkaciali, " Modélisation de l'irradiation solaire globale incidente sur un plan incliné" Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°2 245 – 252(2014).
- [26] B. keltoum, A. zeyneb,« Modélisation et analyse du rayonnement solaire sur un plan incliné sur site d'Adrar » , Mémoire du Master ,Université d'Adrar, 2013.

Références Bibliographiques :

- [27] M. Capderou , Atlas solaire de l'Algérie, Office des publications universitaires, T1-3, 198(1988).
- [28] B. Anouar, «contribution à la modélisation du rayonnement solaire comme un paramètre climatologique pour des applications photovoltaïques en Algérie», Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf, M'sila ,07/04/2021.
- [29] Sen. Zekai , Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, Springer 2008.
- [30] J. Almorox, C. Hontoria, Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. Energy Conversion and Management, 45:1529- 35. (2004)
- [31] National Centers For Environmental Information, Consulté Octobre 2018, www.ncdc.noaa.gov.
- [32] E. O Falayi, J. O Adepitan, A. B. Rabiou, Empirical models for the correlation of global solar radiation with meteorological data for Iseyin, Nigeria, International Journal of Physical Sciences Vol. 3 (9), pp. 210-216, September 2008.

Conclusion générale

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie les plus importantes car elle est renouvelable et propre. De plus, la possibilité de l'exploiter est directement liée aux conditions climatiques. Afin de développer les technologies de consommation de cette énergie, nous devons apprécier de manière proactive le rayonnement solaire.

Le pays le plus ensoleillé du monde est l'Algérie. Dans le monde c'est l'Algérie. Le nombre d'heures d'insolation augmente à environ 3300 heures chaque année. L'environnement est excellent pour utiliser l'énergie solaire dans une variété de domaines, mais on ne comprend pas bien comment le rayonnement solaire est distribué.

L'objectif de ce travail est d'appliquer un modèle à deux sites différents en Algérie pour estimer l'irradiation solaire mondiale et réaliser une étude comparative des résultats obtenus.

Le présent travail est réparti en trois chapitres

Dans le premier chapitre, nous avons découvert les concepts fondamentaux du soleil et la distribution du rayonnement solaire dans la limite externe de l'atmosphère, ainsi que les diverses modifications subies par le rayonnement solaire lors de son passage à travers les différentes couches de l'atmosphère.

Comme mentionné dans le chapitre deux, il existe des relations entre la position du soleil, la latitude, l'angle horaire et le rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère. Par conséquent, nous avons proposé différents modèles pour évaluer le rayonnement terrestre. Le premier modèle est de type Angström, qui propose différentes définitions pour la durée du jour. Le deuxième modèle présente une partie de l'ensoleillement, tandis que le troisième modèle présente la moyenne de l'humidité relative. Enfin, le dernier modèle fournit la température maximale mensuelle de l'air.

Le chapitre trois présente les résultats que nous avons obtenus à partir du modèle Angstrom Prescott. Notre étude s'est principalement concentrée sur l'évaluation du rayonnement solaire disponible dans les sites sélectionnés. Les résultats obtenus mettent en évidence l'efficacité du modèle adopté dans le domaine de l'énergie solaire en Algérie.

Conclusion générale

Les valeurs des coefficients de corrélation varient en fonction de l'emplacement. La différence entre les valeurs mesurées et calculées du rayonnement solaire est acceptable, donc il est recommandé d'utiliser le modèle proposé pour évaluer le rayonnement solaire pour les différents sites en Algérie.

ملخص

هذا العمل هو مساهمة في تقييم الاشعاع الشمسي الشامل في الجزائر. فقد قمنا بطرح اربعة نماذج مختلفة, النموذج الاول يستعمل مدة الاشعاع النسبية بحيث ادرجنا تعريفات مختلفة لمدة النهار. اما النموذج الثاني يعتمد على عامل الرطوبة النسبية والثالث و الرابع يدرجان درجة حرارة الهواء القصوى. حيث قمنا بنمذجة مفصلة لتقييم الاشعاع الشمسي في الجزائر بشكل عام بواسطة برنامج ماطلاب , وذلك باستعمالنا للنموذج الاول و خصننا الدراسة على كل من ولاية تمنراست و الجزائر. فتحصلنا على نتائج اظهرت ان هذا النموذج موثوق ودقيق لتقييم الاشعاع الشمسي الكلي في الجزائر.

الكلمات المفتاحية الاشعاع الشمسي الكلي في الجزائر. الاشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي. سطح الافقي. مدة الاشعاع النسبية.

Résumé

Ce travail constitue une contribution importante à l'évaluation globale du rayonnement solaire en Algérie. Nous avons proposé quatre modèles distincts. Le premier modèle utilise la durée relative du rayonnement ou nous avons inclus différentes définitions de la durée du jour. Le deuxième basé sur le facteur d'humidité relative, le troisième et le quatrième modèle intègrent la température maximale de l'air. Nous avons réalisé une modélisation pour évaluer le rayonnement solaire en Algérie, où on a utilisé le logiciel Matlab. Notre étude s'est concentrée sur les régions de Tamanrasset et Alger. Les résultats obtenus ont démontré que ce modèle est fiable pour modéliser le rayonnement solaire global en Algérie.

Mots clés : Irradiation solaire globale en Alger, Irradiation solaire hors atmosphère, fraction d'insolation.

Abstract

This work represents an important contribution to the overall assessment of solar radiation in Algeria. We have proposed four distinct models. The first model uses the relative radiation duration, where we have included different definitions of daylight duration. The second incorporate the relative humidity factor, third, and fourth models based on the maximum air temperature, respectively. We conducted a thorough study to evaluate solar radiation in Algeria in general, using the Matlab software. Our study focused on the regions of Tamanrasset and Algiers. The obtained results have demonstrated that this model is valid for assessing the overall solar radiation in Algeria

Key words: Total solar radiation in Algeria, Solar outside the atmosphere, Sunshine duration.