



# 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 en  
fonction du crépuscule en quelques sites  
algériens**

**Préparé par : Belayadi Amani**

Soutenu le : 19 /09/2023

**Devant le jury :**

<b>Président :</b>	Imekhlaf Anis	MCB	Université de BBA
<b>Rapporteur :</b>	Machouma Farid	MAA	Université de BBA
<b>Examineur :</b>	Yassine sahnoun	MCA	Université de BBA

**Année Universitaire 2022-2023**

## Dédicace

---

# Dédicace

Je dédie ce travail de recherche pour celui qui m'a appris le sens de la vie mon père Samir et à la source de l'amour et du don ma mère Nadjia.

Je dédie à ma chère sœur Hiba, à son mari Taki Eddine et à leurs enfants Tamim et Norsine.

A mon bras droit mon frère Lezhari .

A tous mes amies : Saaida, Lamia , Roumaissa, Houda, Hadjer, Fatma, Henen, Aaychouch, Massouda.

A mon formateur en développement humain Mahir et mon ami Salim.

Puisse DIEU vous donne bonheur et réussite, bon santé.

## Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, Qui m'a aidé dans ma vie et dans mes études, Qui nous a donné la volonté et le succès.

J'aimerais, à remercier monsieur le professeur Sahnoune Yassinen, pour tous les efforts qu'il a déployés avec moi et tous les précieux conseils qu'il m'a donnés en chemin.

Je tiens aussi à remercier les membres de jury monsieur Mechouma et Imakhlaf à accepter de discuter et évaluer mon travail de recherche.

Tous mes remerciements mes parents.

Je voudrais remercier tous les professeurs et enseignants de ma vie académique.

# Liste des figures

---

## Chapitre I

<i>Figure I.1 : Coupe schématique du soleil [1]</i> .....	2
<i>Figure I.2 : Spectre du rayonnement solaire [8]</i> .....	7
<i>Figure I.3 : La structure verticale de l'atmosphère [10]</i> .....	10
<i>Figure I.4 : Définition d'air masse [11]</i> .....	11
<i>Figure I.5: Phénomène de réfraction atmosphérique [18].</i> .....	15
<i>Figure I.6: Les composantes de rayonnement solaire reçus au sol [19].</i> .....	15

## Chapitre II

<i>Figure II.1 : mouvement de la terre [27]</i> .....	20
<i>Figure II.2 : Mouvement de la terre autour du Soleil. [29]</i> .....	21
<i>Figure II.3: Variation de déclinaison au court de l'année .</i> .....	24
<i>Figure II.4: Coordonnées horizontales du soleil [34].</i> .....	26
<i>Figure II.5 : Pyranomètre d'Eppley [45]</i> .....	36
<i>Figure II.6 : Pyrhéliomère [45]</i> .....	36
<i>Figure II .7 : L'héliographe de Campbell-Stockes[46]</i> .....	37

## Chapitre III

<i>Figure III.1: L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Agstrom –prescott</i> .....	41
<i>Figure III.2 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Agstrom –prescott</i> .....	43
<i>Figure III.3 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Agstrom –prescott</i> .....	44
<i>Figure III.4 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Agstrom –prescott.</i> .....	45
<i>Figure III.5 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset</i> .....	46
<i>Figure III.6 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Agstrom –prescott.</i> .....	47

## Liste des figures

---

*modèle de type d'Agstrom –prescott* .....48

**Figure III.7 :** *L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Agstrom –prescott* .....48

# Liste des tableaux

---

## Chapitre I

<i>Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil [1].</i> .....	4
<i>Tableau I.2 : La masse atmosphérique en fonction de l' hauteur du soleil</i> .....	12
<i>Tableau I.3 : Potentiel solaire</i> .....	17

## Chapitre II

<b>Tableaux II.1</b> : Les valeurs de la déclinaison du 15 <sup>ème</sup> jour de chaque mois de l'année. ....	23
<b>Tableau II.2</b> : Emplacement géographique des deux sites.....	30
<b>Tableau (II. 3)</b> : résume les différentes définitions le phénomène de crépuscule et l'hauteur du soleil correspondantes introduites dans les calculs [41].....	32

## Chapitre III

<i>Tableau III.1 : Irradiation solaire globale hors atmosphère (<math>MJ/m^2</math> jour).</i> .....	40
<i>Tableau III. 2 : Fraction d'insolation des deux sites algériens.</i> .....	42
<i>Tableau III. 3 : Les coefficients des corrélations du modèle d'Angstrom-Prescott pour les Différents sites.</i> .....	42
<i>Tableau III. 4 : les valeurs des paramètres statistiques (MBE, MAE et RMSE statistique).</i>	49

# Table des matières

---

1.1. Introduction général.....	2
--------------------------------	---

## Chapitre I

1.1. Introduction.....	3
I.2. Le soleil.....	3
I. 3. Le rayonnement solaire.....	5
1.3.1. Origine et nature de rayonnement solaire.....	5
1.4. Influence de l'atmosphère terrestre sur le rayonnement solaire.....	7
1.4.1. Structure de l'atmosphère.....	7
I.4.1.1 La composition de l'atmosphère terrestre.....	7
I.4.1.2. La structure verticale de l'atmosphère.....	8
1.4.2. Masse atmosphérique.....	10
I.4.3. Absorption de la radiation solaire.....	12
I.4.5. Distribution du rayonnement solaire par l'atmosphère.....	14
I.4.6. Réfraction atmosphérique.....	14
I.5. Les composantes de rayonnement solaire reçus au sol.....	15
I.5.1. Le rayonnement direct.....	16
I.5.2. Le rayonnement diffus.....	16
I.5.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	16
I.5.4. Le rayonnement global.....	16
I.6. Applications énergétiques du rayonnement solaire.....	17
I.7. Potentiel solaire en Algérie.....	17

## Chapitre II

II.1. Introduction :.....	20
II.2. Mouvement de la Terre.....	20
II.2.1. Rotation de la terre autour de son axe.....	20
II.2.2. Mouvement de la Terre autour du Soleil :.....	21
II.3. Repérage d'un site à la surface de la terre (coordonnées géographiques).....	21

# Table des matières

---

II.3.1 La latitude L .....	21
II.3.2 La longitude.....	22
II.3.3 L'altitude .....	22
II.4.Modélisation des paramètres géométriques et atmosphériques.....	22
II. 4.1. Déclinaison du Soleil ( $\delta$ ) :.....	22
II.4.2. L'angle horaire w.....	24
II.4.3 Hauteur du soleil h.....	25
II.4.4 Azimut du soleil (a) .....	25
II.4.5 La durée du jour.....	26
II.4.6. Influence du phénomène de réfraction atmosphérique sur le calcul de la durée du jour.....	27
II.4.7.Influence du crépuscule sur le calcul de la durée du jour.....	27
II.5. Calcul de l'irradiation solaire sur une surface horizontale.....	28
II.5.1. En dehors de l'atmosphère .....	28
II.5.2 Fonction d'insolation .....	30
II. 6 Evaluation de l'irradiation globale .....	30
II.6.1. Procédures de calcul .....	30
II.6.2. modèle du type d'Angstrom-Prescott .....	31
II.6.2 Calcul de la durée du jour :.....	31
II.7 Diffusion à travers les couches supérieures de l'atmosphère .....	32
II.7.1 Définition du crépuscule.....	32

## Chapitre III

III .1 Introduction.....	40
III. 2 Calcul de l'irradiation solaire globale hors atmosphère .....	40
<i>III.3. Application des modèles aux différents sites .....</i>	<i>41</i>
III .2. 1 Application du modèle du type d'Angstrom-Prescott.....	42
Pour Alger .....	42
pour Tamanrasset .....	45
<i>III.4.Discussion.....</i>	<i>49</i>
Conclusion général.....	50

## Introduction générale

L'énergie solaire est renouvelable, propre, dispensée, à tous sans ségrégation autre que climatique. L'énergie solaire, en français désigne l'énergie provenant du soleil. Elle se manifeste sous forme de lumière et de chaleur émises par le soleil et peut être captée et utilisée pour produire de l'électricité ou de la chaleur à l'aide de dispositifs comme les panneaux solaires photovoltaïques ou les systèmes de chauffage solaire. Il s'agit d'une source d'énergie propre et renouvelable. Toutes ces propriétés exigent l'estimation performante de l'irradiation solaire afin de développer des techniques de consommation (conversion) de l'énergie solaire (distillateurs et cellules solaires . . .). L'Algérie est parmi les pays qui ont un grand nombre d'heure d'insolation, il est autour de 3300h/an, mais la distribution de l'irradiation solaire n'est pas bien connue et estimée. Malheureusement, dans la majorité des stations les mesures de l'irradiation solaire ne sont pas disponibles. Les équations de régression basées sur la durée d'insolation sont généralement utilisées pour l'estimation locale de l'irradiation solaire globale. Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de l'irradiation solaire pour différents sites algériens.

- Le premier chapitre a abordé plusieurs aspects importants du rayonnement solaire. Nous avons exploré Origine et nature de rayonnement solaire et comment il est influencé par l'atmosphère terrestre. Nous avons également examiné les différents types de rayonnement solaire qui sont reçus au sol. En outre, nous avons discuté des applications énergétiques du rayonnement solaire, mettant en évidence son potentiel dans ce domaine.
- Le deuxième chapitre a traité des méthodes de calcul de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale, nous avons rappelé des relations de calcul de position du soleil en

fonction de la latitude et de l'angle horaire, et l'irradiation solaire hors atmosphère. Nous avons proposé le modèle de type d'Angstrom-Prescott (définitions de la durée du jour) pour l'évaluation de l'irradiation au sol.

- Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus à partir de la modélisation du rayonnement solaire en fonction du crépuscule sur deux sites algériens. J'ai analysé les données recueillies et nous avons comparé les résultats avec les mesures expérimentales disponibles. Nous avons également discuté des implications de ces résultats et de leur pertinence pour le développement des systèmes solaires en Algérie



# Chapitre I :

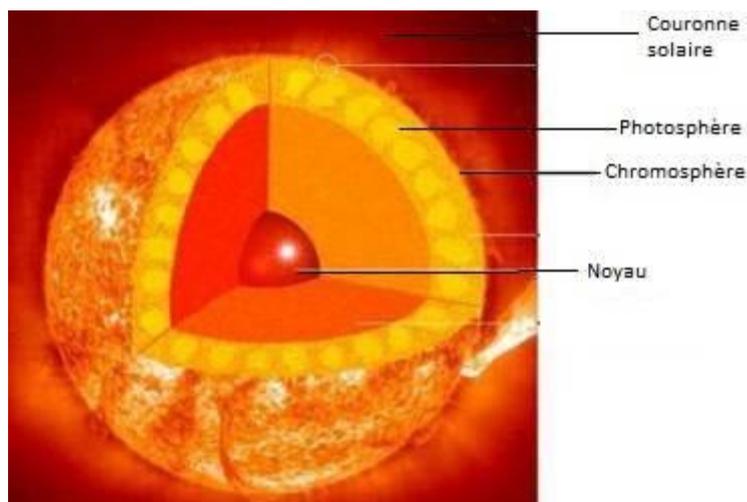
## Généralité sur Le rayonnement solaire

## 1.1. Introduction

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables elle est considérée comme l'une des énergies les plus faciles à exploiter. Comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaires à une partie de ses besoins. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et à tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation et l'irradiation globale. Dans ce chapitre nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir : Le soleil, Le rayonnement solaire, Origine et nature de rayonnement solaire, Influence de l'atmosphère terrestre sur le rayonnement solaire, Les composantes de rayonnement solaire reçus au sol, Mesure du rayonnement solaire et Potentiel solaire en Algérie.

## 1.2. Le soleil

Sur le plan cosmogonique le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre.



*Figure I.1 : Coupe schématique du soleil [1]*

## Généralité sur Le rayonnement solaire

---

Le tableau suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil :

*Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil [1].*

Caractéristique	Valeur
Masse	$1,989 \times 10^{30}$ Kg
Diamètre	$1,392 \times 10^9$ m
Masse volumique moyenne	$1410$ Kg m <sup>-3</sup>
Puissance rayonnée	$3,83 \times 10^{26}$ W
Température superficielle	5770 K

La structure du soleil est schématisée sur la figure (I.1). On distingue quatre zones particulières; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [2]:

- Le noyau : c'est le cœur du soleil, sa température est très élevée ( $15 \times 10^6$  K) ainsi que sa pression ( $2 \times 10^{11}$  bars) et sa densité ( $\sim 105$  Kg m<sup>-3</sup>), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre.  
L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.
- La photosphère : est une couche d'environ 300 Km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil.
- La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8 000 Km et une température de 20 000 K environ.
- La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.

Le soleil est composé chimiquement [2] de 70 % d'hydrogène et d'environ 28 %

d'hélium et le 2 % restant étant mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

- ❖ La constante solaire notée  $I_0$  exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de  $1 \text{ m}^2$  située à une distance de 1 UA et exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence de l'atmosphère. Pour la terre, c'est donc la densité de l'énergie au sommet de l'atmosphère. La première valeur moyenne estimée de la constante solaire était  $1353 \text{ w m}^{-2}$  (réf), cette valeur a été mise à jour en 1977 à  $1377 \text{ w m}^{-2}$  et plus tard l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) a adopté une valeur de  $1367 \text{ w.m}^{-2}$ . La dernière valeur de la constante solaire est de l'ordre de  $1366.1 \text{ w m}^{-2} .\text{m}^{-2}$ . Pour le jour n, [3].

### I. 3. Le rayonnement solaire

Le soleil émet en permanence, dans toutes les directions de l'espace, des rayonnements électromagnétiques composés de « grains » de lumière appelés photons. Ces rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière  $C$  ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère [4] . La terre capte dans sa haute atmosphère une énergie d'environ  $1367 \text{ w/m}^2$ , relativement indépendante du lieu où l'on est sur la terre. Ces  $1367 \text{ w/m}^2$  vont être absorbés partiellement par l'atmosphère. Pour que la terre capte cette énergie, les rayons lumineux doivent être perpendiculaire à la surface de l'atmosphère et ne dépend pas pratiquement que de l'épaisseur de l'atmosphère traversée (de l'ozone, de la vapeur d'eau, du  $\text{CO}_2$ ...), et donc essentiellement de l'altitude et du lieu où l'on est.

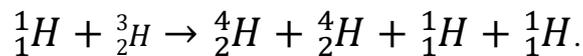
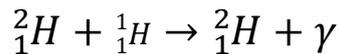
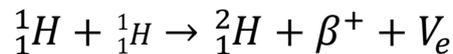
#### 1.3.1. Origine et nature de rayonnement solaire

La source de rayonnement solaire est le soleil, qui est une étoile de taille moyenne de notre système solaire. Il est composé de gaz ionisé et sa température atteint des millions de degrés Celsius au noyau, ce qui permet la fusion nucléaire des atomes d'hydrogène en hélium, libérant une quantité colossale d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Cette énergie est ensuite émise dans toutes les directions de l'espace, y compris vers la Terre, où elle est reçue et utilisée pour diverses applications telles que l'énergie solaire [5].

Le rayonnement solaire est généré par des processus nucléaires qui se produisent dans le noyau du Soleil. Ces processus impliquent principalement la fusion de noyaux d'hydrogène en hélium, qui libère une énorme quantité d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Cette énergie est ensuite transportée de la zone de fusion jusqu'à la surface du Soleil, où elle est émise sous forme de lumière et de chaleur. Le processus de fusion

nucléaire qui produit l'énergie solaire est appelé la réaction de fusion proton-proton. Cette réaction implique la fusion de deux noyaux d'hydrogène pour former un noyau d'hélium, avec la libération d'un neutrino, d'un positron et d'une grande quantité d'énergie. Cette réaction se produit en plusieurs étapes, avec différentes réactions secondaires qui se produisent dans des conditions de température et de pression différentes.

La compréhension de l'origine du rayonnement solaire repose sur des observations et des mesures précises, ainsi que sur des modèles théoriques sophistiqués. Les chercheurs étudient les propriétés de la lumière solaire dans différentes longueurs d'onde, ainsi que les processus qui se produisent à l'intérieur du Soleil, pour mieux comprendre l'origine du rayonnement solaire [6]. Le processus dominant commence par la fusion de deux protons puis se poursuit par l'apport d'un troisième proton :



- Le spectre de rayonnement solaire peut être divisé en trois régions principales : l'ultraviolet (UV), le visible et l'infrarouge (IR). L'UV est subdivisé en trois bandes : l'UV-C (100-280 nm), l'UV-B (280-315 nm) et l'UV-A (315-400 nm). Le visible est la région du spectre qui peut être perçue par l'œil humain et se situe entre 400 et 700 nm. L'IR est subdivisé en deux bandes : l'IR à ondes courtes (700-2500 nm) et l'IR à ondes longues (2500-4000 nm). La connaissance du spectre de rayonnement solaire est importante pour la conception et l'optimisation des systèmes solaires thermiques et photovoltaïques, ainsi que pour l'évaluation des risques liés à l'exposition aux UV [7].

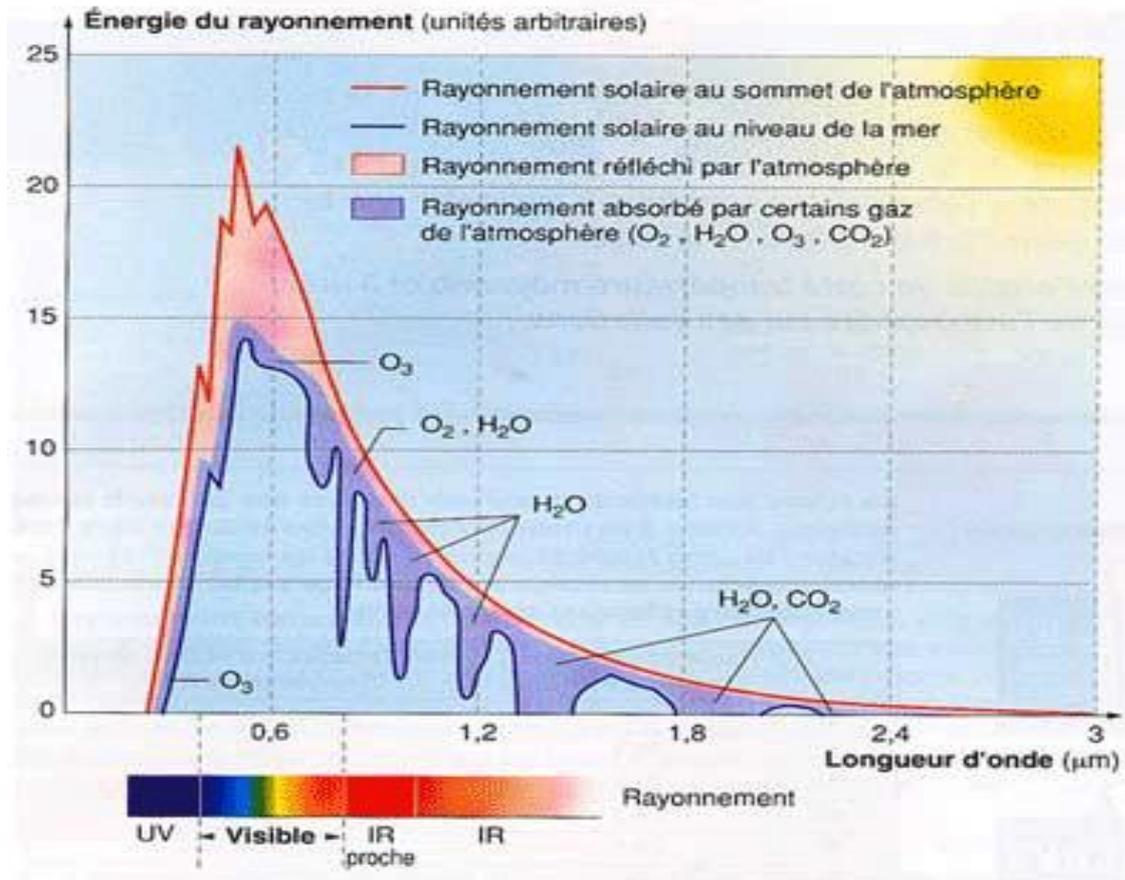


Figure 1.2 : Spectre du rayonnement solaire [8]

### 1.4. Influence de l'atmosphère terrestre sur le rayonnement solaire

#### 1.4.1. Structure de l'atmosphère

##### 1.4.1.1 La composition de l'atmosphère terrestre

L'atmosphère est la plus fine couche d'air qui enveloppe la Terre. Sans elle, la vie n'est plus possible sur notre planète. Elle désigne l'enveloppe gazeuse entourant la terre solide. L'atmosphère protège la vie sur Terre en absorbant le rayonnement solaire UV, en réchauffant la surface par la rétention de chaleur (effet de serre) et en réduisant les écarts de température entre le jour et la nuit. L'étude de climat passe forcément par l'étude de l'atmosphère et ces composantes, c'est au niveau de cette enveloppe que se produisent les processus météorologiques

2-1-La composition de l'atmosphère terrestre : L'atmosphère terrestre est une couche de gaz entourant la terre. On considère que sa constitution est la suivante :

- 78 % de diazote ( $\text{N}_2$ ).

- 21% de dioxygène (O<sub>2</sub>).
- 1 % de gaz divers ( Ar, CO<sub>2</sub>, ...)[9]

La couche la plus éloignée de l'atmosphère monte jusqu'à 500 km d'altitude. Toutefois la partie la plus importante de l'atmosphère est groupée dans les basses couches. La partie dans laquelle les phénomènes météorologiques sont concentrés évolue entre 7 km d'altitude aux pôles et 15 km à l'équateur. La moitié de la masse de l'atmosphère est concentrée dans les 5 premiers kilomètres d'altitude et 90 % dans les 20 premiers. Les hautes couches présentent donc une densité très faible].

### I.4.1.2.La structure verticale de l'atmosphère

En fonction de la répartition verticale des températures on distingue quatre couches dans les 500 premiers km de l'atmosphère : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et l'thermosphère. a-Troposphère La plus basse couche de l'atmosphère s'appelle la troposphère. Elle s'élève entre 8 km aux pôles et 16 km au dessus de l'Équateur. La frontière entre la troposphère et la stratosphère est la tropopause, délimitée par des températures qui se stabilisent. La température diminue avec l'augmentation de l'altitude de 0,60°C toute les 100 m, en moyenne, par suite de la raréfaction de l'air et de l'éloignement progressif du substrat. La troposphère est la plus dense des quatre couches de l'atmosphère et elle contient jusqu'à 75% de la masse de l'atmosphère. Elle se compose principalement d'azote (78%) et d'oxygène (21%) avec seulement de petites concentrations d'autre gaz en trace. Presque toute la vapeur d'eau ou humidité atmosphérique se trouve dans la troposphère[9].

- **La troposphère :** est couverte par la tropopause, une région où la température est stable. La température de l'air commence alors à s'élever dans la stratosphère. Une telle augmentation de la température empêche beaucoup de convection d'air au delà de la tropopause, et par conséquent la plupart des phénomènes climatiques (y compris les nuages porteurs d'orages, les cumulonimbus) , sont confinés à la troposphère. C'est la couche la plus troublée, agitée sans cesse de mouvements verticaux et horizontaux.
- **Stratosphère :** La stratosphère est la deuxième couche principale de l'atmosphère. Elle se trouve au-dessus de la troposphère et est séparée d'elle par la tropopause. Elle occupe la région de l'atmosphère d'environ 12 à 50 kilomètres, bien que sa limite inférieure est plus haute à l'équateur et plus basse aux pôles. La stratosphère définit une couche dans laquelle les températures s'élève avec l'augmentation de l'altitude. En haut de la stratosphère l'air

mince peut atteindre des températures près de 0°C. Cette élévation de la température est provoquée par l'absorption des rayons ultraviolets (UV) du Soleil par la couche d'ozone. Un tel profil de température crée des conditions atmosphériques très stables, et la stratosphère manque de la turbulence de l'air qui est si répandue dans la troposphère. En conséquence, la stratosphère est presque totalement exempte de nuages ou d'autres formes de temps. La stratosphère fournit quelques avantages pour le vol de longue distance parce qu'elle est au-dessus des temps orageux et a des vents forts, réguliers et horizontaux. La stratosphère est séparée de la mésosphère, qui se trouve au-dessus d'elle, par la stratopause.

- **Mésosphère** : La mésosphère (littéralement sphère moyenne) est la troisième couche la plus élevée dans notre atmosphère, occupant la région de 50 kilomètres à 80 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre, au-dessus de la troposphère et de la stratosphère, et au-dessous de la thermosphère. Elle est séparée de la stratosphère par la stratopause et de la thermosphère par la mésopause. Les températures dans la mésosphère chutent avec l'augmentation de l'altitude jusqu'à environ -100°C. La mésosphère est la plus froide des couches atmosphériques. En fait elle est plus froide que la plus basse des températures enregistrées en Antarctique. Il y fait assez froid pour geler de la vapeur d'eau en nuages de glace.
- **Thermosphère** : La couche la plus haute est la thermosphère. La thermosphère commence à 90-100 km et va jusqu'à 1280 kilomètre l'altitude. La pression y devient presque nulle et les molécules d'air sont très rares. L'ultraviolet solaire de très courtes longueurs d'onde est absorbé entre 100 et 150 kilomètres d'altitude par l'oxygène moléculaire. La température augmente avec l'altitude et se maintient jusqu'à un niveau appelé "thermopause" situé de 250 kilomètre à 500 kilomètres suivant l'activité solaire comme après cette la thermopause la température oscille entre 300°C et 1600°C suivant l'énergie reçu par le Soleil. Les températures sont élevées, mais comme la densité de matière est extrêmement faible il ferait très froid pour nous puisque les quelques molécules d'air ne sont pas assez pour transférer une chaleur convenable pour nous. La thermosphère est la région où près des pôles se forment les aurores boréales et australes[9].

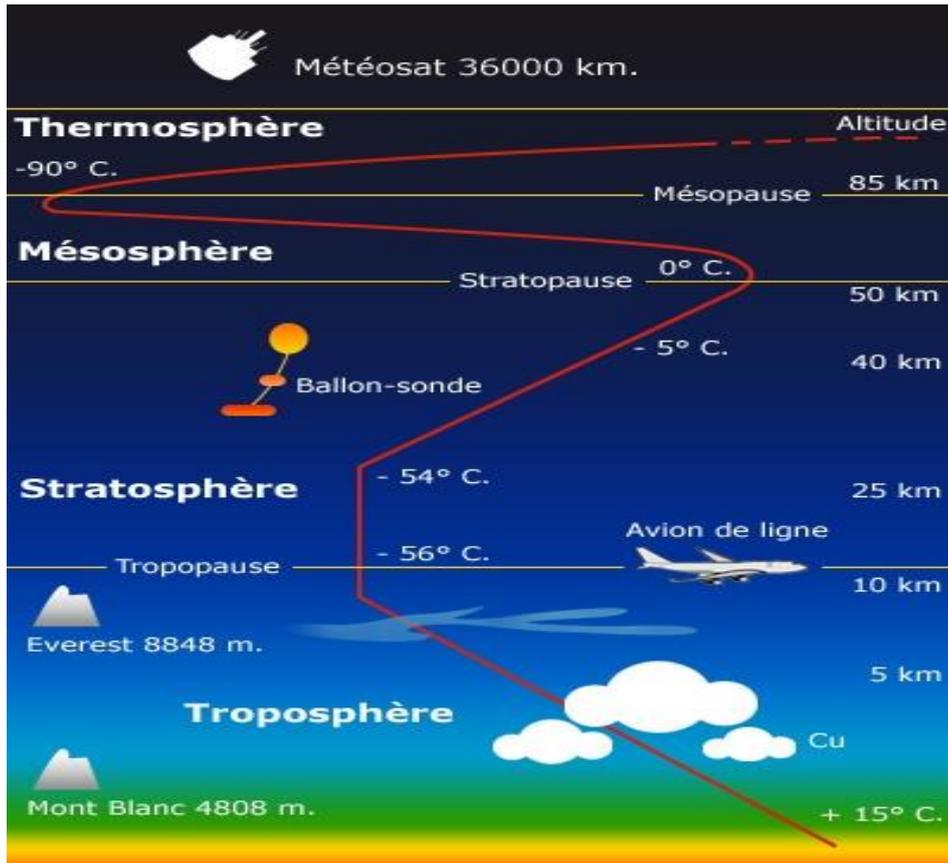


Figure I.3 : La structure verticale de l'atmosphère [10]

### 1.4.2. Masse atmosphérique

La quantité de molécules que rencontre le rayonnement solaire lors de sa traversée de l'atmosphère est directement liée à l'intensité des effets de diffusion et d'absorption qu'il subit. En effet, plus il y a de molécules, plus le rayonnement est susceptible d'être absorbé et diffusé, ce qui a un impact sur son intensité. La loi de transmission est donnée par [11] :

$$\phi = \phi_0 \cdot \exp(-Kl) \quad (\text{I.1})$$

Tel que :

$\phi$ : Flux énergétique sortant après un parcours de longueur ( $l$ ) dans l'atmosphère.

$\phi_0$ : Flux énergétique incident.

$K$  : coefficient d'extinction caractérisant l'absorption et la diffusion.

La masse atmosphérique, également appelée masse d'air (AM), représente l'épaisseur verticale moyenne de l'atmosphère au niveau de la mer (voir figure 2). Dans des conditions normales

de température et de pression, la masse atmosphérique peut être définie par l'expression suivante [12] :

$$AM = \frac{P}{1013} \cdot \frac{1}{\sin h} \exp\left(-\frac{Z}{7.8}\right) \quad (I.2)$$

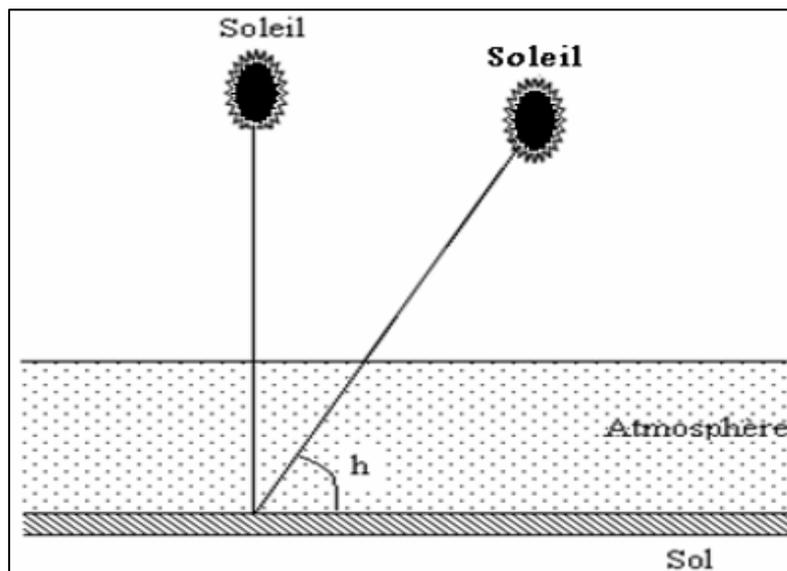
Où  $p$ : pression de l'air (N/m<sup>2</sup>)

$h$  : hauteur solaire, sur l'horizon ( $h=90^\circ$  au zénith)

$z$  : altitude en (km)

Dans les conditions normales ( $p=1013$  N/m<sup>2</sup>) et au niveau de la mer ( $Z=0$ ), l'expression de la masse atmosphérique est simplifiée à :

$$AM = \frac{1}{\sin h} \quad (I.3)$$



*Figure I.4 : Définition d'air masse [11]*

La masse atmosphérique, également appelée masse d'air (AM), correspond à l'épaisseur verticale moyenne de l'atmosphère au niveau de la mer dans des conditions normales de température et de pression. Cette grandeur permet de quantifier l'influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire. En effet, l'intensité du rayonnement solaire subit des effets de diffusion et d'absorption à travers l'atmosphère, et cette intensité dépend de la quantité de molécules rencontrées par le rayonnement solaire, elle-même liée à la masse atmosphérique.

## Généralité sur Le rayonnement solaire

---

En pratique, la masse atmosphérique varie en fonction de la hauteur du soleil dans le ciel. Ainsi, pour le soleil au zénith ( $h=90^\circ$ ), la masse atmosphérique est égale à 1 ( $AM_1$ ), tandis que pour le soleil vu sous un angle de  $30^\circ$ , la masse atmosphérique est de 2 ( $AM_2$ ). Le cas où la masse atmosphérique est égale à 0 correspond à l'étude du rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère terrestre (référence  $AM_0$ ).

Le tableau (I.2) ci-joint présente les valeurs de la masse atmosphérique calculée et mesurée en fonction de la hauteur du soleil [13] :

*Tableau I.2 : La masse atmosphérique en fonction de l' hauteur du soleil*

<b>h (°)</b>	<b>AM calculée</b>	<b>AM<sub>mesurée</sub></b>
90	1,000	1,000
70	1,060	1,064
60	1,160	1,154
50	1,310	1,304
40	1,560	1,304
30	2,00	1,995
20	2,924	2,906
15	3,864	3,821
12	4,810	4,716
10	5,759	5,616
6	9,570	8,900
5	11,474	10,461

### I.4.3. Absorption de la radiation solaire

Lorsque le rayonnement solaire pénètre dans l'atmosphère terrestre, il subit différents phénomènes d'interaction avec les molécules et les particules présentes dans l'atmosphère. L'absorption est l'un de ces phénomènes, où le rayonnement est absorbé par les molécules et les particules présentes dans l'atmosphère.

## Généralité sur Le rayonnement solaire

---

Les principaux gaz responsables de l'absorption du rayonnement solaire sont les gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) et l'ozone (O<sub>3</sub>). Ces gaz sont présents en petites quantités dans l'atmosphère, mais ils ont un impact significatif sur le rayonnement solaire.

L'absorption se produit lorsque les photons du rayonnement solaire sont capturés par les molécules de gaz à effet de serre. Ces molécules absorbent le rayonnement dans des bandes de fréquences spécifiques, qui dépendent de la structure moléculaire et de l'énergie des niveaux quantiques impliqués. Cette absorption d'énergie conduit à une augmentation de la température de l'atmosphère, qui est à l'origine de l'effet de serre.

L'absorption du rayonnement solaire est un processus complexe qui dépend de nombreux facteurs, tels que la densité de l'atmosphère, l'altitude, la latitude, l'heure de la journée, la saison, la présence de nuages et d'aérosols, ainsi que la composition de l'atmosphère. Les modèles climatiques utilisent des données mesurées et des simulations pour estimer la quantité d'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère, ce qui est essentiel pour comprendre et prédire le climat de la Terre [14].

Le processus d'absorption du rayonnement solaire est sélectif et dépend principalement de quatre facteurs qui sont :

**1- Ozone (O<sub>3</sub>)** : Il absorbe des bandes fortes entre 0,2 et 0,3  $\mu\text{m}$ , des bandes faibles de 0,45 à 0,7  $\mu\text{m}$  et deux bandes IR à 10 et 14  $\mu\text{m}$ , il forme aussi un écran qui arrête les UV.

**2- Oxygène (O<sub>2</sub>)** : Il absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers 0,69 et 0,76 $\mu\text{m}$ ).

**3- Gaz carbonique (CO<sub>2</sub>)** : Il absorbe des une partie de l'infrarouge lointain ( $\gamma > 2\mu\text{m}$ ).

**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 ( $z < 5 \text{ km}$ ) [15].

### 1.3.4. Diffusion du rayonnement solaire

La diffusion du rayonnement solaire est un phénomène qui se produit lorsque les photons de lumière solaire interagissent avec les molécules et les particules de l'atmosphère. Ce processus de diffusion est à l'origine de la diffusion de la lumière dans toutes les directions et de la coloration du ciel en bleu pendant la journée.

La diffusion peut être de deux types : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie. La diffusion de Rayleigh se produit lorsque les photons de lumière solaire interagissent avec les molécules d'air, tandis que la diffusion de Mie se produit lorsque les photons interagissent avec des particules plus grosses telles que les aérosols, les nuages et les gouttelettes d'eau.

La diffusion du rayonnement solaire a des effets importants sur le climat de la Terre, car elle peut affecter la quantité de lumière solaire atteignant la surface de la Terre, ainsi que la quantité de lumière réfléchiée dans l'espace. Elle peut également influencer la température de l'atmosphère et le comportement des nuages [14].

### **I.4.5. Distribution du rayonnement solaire par l'atmosphère**

Le rayonnement solaire est distribué dans l'atmosphère terrestre de manière inégale en raison des différentes couches de l'atmosphère et des phénomènes tels que la réflexion, la diffusion et l'absorption. La majorité du rayonnement solaire qui atteint la terre est dans la forme de rayonnement visible, avec des longueurs d'onde allant de 400 à 700 nanomètres.

Cependant, une partie du rayonnement est réfléchiée par les nuages, la surface terrestre et les océans. De plus, une partie du rayonnement est absorbée par l'ozone et d'autres gaz dans la haute atmosphère.

La distribution du rayonnement solaire peut également varier en fonction de la latitude, de l'heure de la journée et de la saison. Les régions équatoriales reçoivent généralement plus de rayonnement solaire que les régions polaires, où l'angle d'incidence du rayonnement est plus faible. De plus, le rayonnement solaire est plus intense pendant les heures de la journée où le soleil est directement au-dessus de la tête, et plus faible pendant les heures du matin et du soir [16].

### **I.4.6. Réfraction atmosphérique**

Lorsque l'on s'élève en altitude, la masse volumique de l'air diminue. Cette diminution de densité a un effet sur l'indice de réfraction de l'air, ce qui entraîne une déviation des rayons lumineux. Cette déviation suit une trajectoire courbée vers le bas, ce qui explique pourquoi la hauteur apparente du soleil est plus élevée que sa hauteur réelle. Les phénomènes de crépuscules réfraction atmosphérique influencent la durée du jour [17]

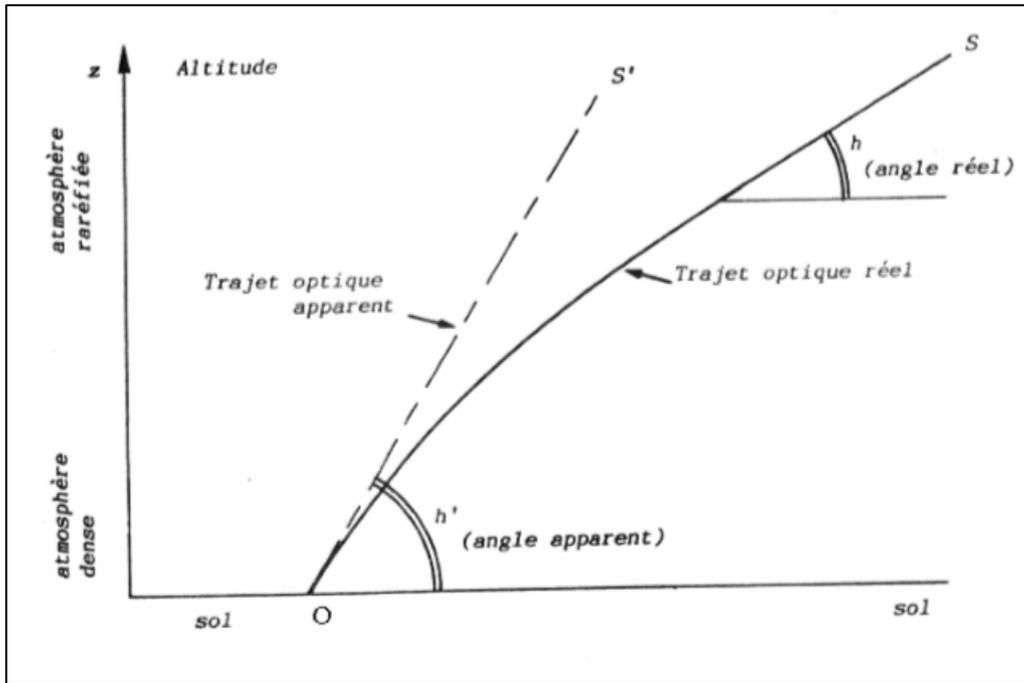


Figure I.5: Phénomène de réfraction atmosphérique [18].

## I.5. Les composantes de rayonnement solaire reçus au sol

Le rayonnement solaire se compose de différentes composantes, chacune ayant des caractéristiques spécifiques

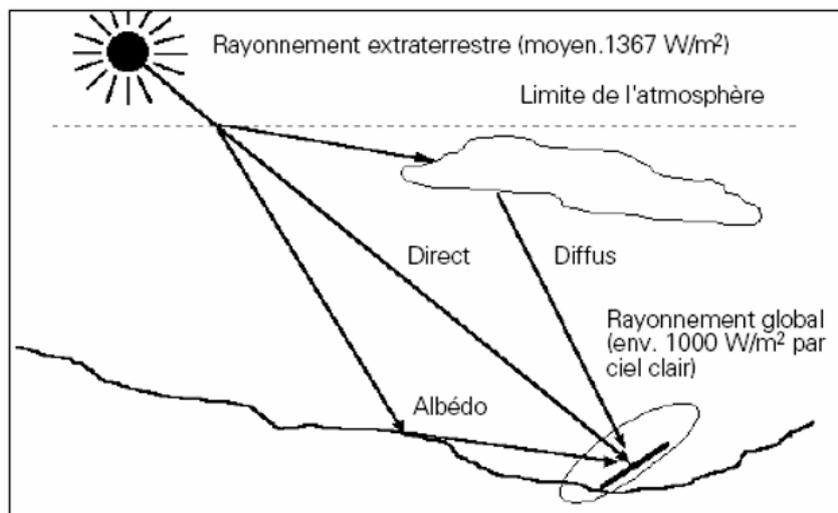


Figure I.6: Les composantes de rayonnement solaire reçus au sol [19].

### **I.5.1. Le rayonnement direct**

Le rayonnement direct est la composante du rayonnement solaire qui parvient directement à la surface terrestre sans avoir été diffusée ou réfléchi par l'atmosphère. Il est généralement associé à une intensité lumineuse élevée et est plus important pendant les heures ensoleillées de la journée.

Le rayonnement direct est influencé par plusieurs facteurs, tels que l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur la surface terrestre, la couverture nuageuse, la qualité de l'air et la présence d'aérosols ou de poussières dans l'atmosphère. Il peut également varier en fonction de la latitude, de l'altitude et de la saison [20].

### **I.5.2. Le rayonnement diffus**

Le rayonnement diffus est une composante du rayonnement solaire qui est diffusée dans toutes les directions par les particules atmosphériques telles que les molécules d'air, les aérosols et les nuages. Contrairement au rayonnement direct, le rayonnement diffus ne provient pas d'une source unique, mais est plutôt réparti dans l'ensemble du ciel. Le rayonnement diffus est important car il contribue à l'éclairement global, qui est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus, et qui représente la quantité totale de rayonnement solaire atteignant une surface donnée. La proportion de rayonnement diffus par rapport au rayonnement direct dépend des conditions atmosphériques, telles que la couverture nuageuse et la pollution atmosphérique [21].

### **I.5.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol**

Lorsque le rayonnement solaire atteint la surface terrestre, une partie de celui-ci est absorbée et une autre partie est réfléchi. On appelle albédo cette fraction du rayonnement réfléchi par le sol. L'albédo dépend de la nature de la surface terrestre, que ce soit une prairie, de la terre ou un désert par exemple. Il est important de prendre en compte le rayonnement réfléchi par le sol uniquement pour les surfaces inclinées [22].

### **I.5.4. Le rayonnement global**

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus qui atteint une surface horizontale. Il représente la quantité totale d'énergie solaire qui arrive sur une surface donnée [23].

### I.6. Applications énergétiques du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire offre de nombreuses possibilités pour la production d'énergie. Les applications énergétiques du rayonnement solaire comprennent notamment les panneaux solaires photovoltaïques, les panneaux solaires thermiques, les centrales solaires thermiques, les éoliennes solaires et les lampes solaires. Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent la lumière du soleil en électricité, tandis que les panneaux solaires thermiques convertissent la lumière du soleil en chaleur. Les centrales solaires thermiques utilisent des miroirs pour concentrer la lumière du soleil sur un récepteur pour produire de la vapeur qui fait tourner une turbine pour générer de l'électricité. Les éoliennes solaires combinent des panneaux solaires et des éoliennes pour produire de l'énergie électrique de manière plus stable et constante, tandis que les lampes solaires utilisent des panneaux solaires pour stocker l'énergie du soleil et alimenter des lampes LED la nuit. Ces applications énergétiques du rayonnement solaire peuvent contribuer à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à atténuer les impacts du changement climatique [24].

### I.7. Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus importants au monde, avec une durée d'insolation annuelle dépassant les 2000 heures sur la quasi-totalité de son territoire et atteignant les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. En moyenne, l'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est d'environ 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le nord du pays et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le sud. Le tableau 2 synthétise le potentiel solaire en Algérie [25].

*Tableau I.3 : Potentiel solaire*

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'insolation (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

### Références Bibliographiques:

- [1] : J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1ère édition, page 25, ELLIPES, Paris, 2004.
- [2] : B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité : électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004.
- [3] : B.sidi Mohammed El Amine, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, thèse de doctorat, université de abou-belkaid, Tlemcen, 2008/2009.
- [4] : Boubaker, S., Benghanem, M., Mellit, A., Lefza, A., Kahouli, O. and Kolsi, L., Deep Neural Networks for Predicting Solar Radiation at Hail Region, Saudi Arabia, J. IEEE Access, Vol. 9, no., pp. 36719-36729, (2021).
- [5] : "Sun" - NASA Solar System Exploration, <https://solarsystem.nasa.gov/solarsystem/sun/overview/>
- [6] : "The Origin of the Solar System" par Stephen J. Mojzsis et al., publié dans la revue scientifique Science en 2017.
- [7] : Kalogirou, S. A. (2014). Solar energy engineering: processes and systems. Academic Press.
- [8] : Site Internet : [http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/nte/geosciences/geodyn\\_ext/Exercices/ExosTT1Atmosphere.htm](http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/nte/geosciences/geodyn_ext/Exercices/ExosTT1Atmosphere.htm)  
12/09/2023 ,15 :08.
- [9] : Site Internet : <https://www.univ-chlef.dz/fsnv/wp-content/uploads/Chapitre2-structure-generale-de-latmosphere.pdf>,12/09/2023,15:11.
- [10] :Site Internet :<https://e.educlever.com/img/2/7/6/8/276833.jpg>,12/09/2023 ,15 :25.
- [11] : Brichambaut C. P et Vauge C, (1982) Le gisement solaire : Evaluation de la ressource énergétiques.
- [12] :Y. Sahnoune. Modélisation du rayonnement solaire sur quelques sites algériens. Mémoire de magister (2007), université de Sétif.
- [13] : V. Etienne, Physique de l'atmosphère ; Phénomènes d'absorption et de diffusion dans l'atmosphère. Gautier Villard, Tome 3, Paris (1966).
- [14] :Liou, K. N. (2002). An introduction to atmospheric radiation (2nd ed.). Academic Press. C. H. M. [15]P. Duncan, Solar Energy 5, 385 (1982).
- [16] : Gerald R. North, John A. Pyle, Fuqing Zhang (2019) Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Vol 1, page 58, Second Edition, Academic Press.
- [17] : Capderou M. Atlas solaire de l'Algérie. Office des publications universitaires, T1-3,1988.

- [18] : Capderou M, (1988) Atlas Solaire de l'Algerie. Office des publications Universitaires, T.1-3.
- [19] : Cottier J, Mermoud A, Villg J, Graf J, (1996) Centrales photovoltaïques, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, Berne.
- [20] : "Solar Radiation Measurements" par Frank Vignola, Joseph Michalsky et Thomas Stoffel, dans l'encyclopédie "Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences", publiée par Elsevier en 2015.
- [21] : Renne, D., Geiger, A., & Hentschel, G. (2010). Renewable Energy: Technology, Economics and Environment (p. 18)
- [22] : Brochure, (2000), « Dimensionnement et installation des systèmes Solaires PV pour l'éclairage domestique », Centre de Développement des Energies Renouvelables Royaume du Maroc Marrakech édition l'UNESCO et l'IEPF Marrakech 29 juillet 2000.
- [23] : P. Bessemoulin and J.Oliviéri, "Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette", La Météorologie 8e série - n° 31 – septembre (2000).
- [24] : "Applications de l'énergie solaire", Energie+, Gouvernement du Canada, 2021.
- [25] : M. Salmi, «Contribution à La Quantification De L'irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques», Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif (2012).

# **Chapitre II :**

**Procédures de calcul de l'irradiation  
globale sur une surface horizontale**

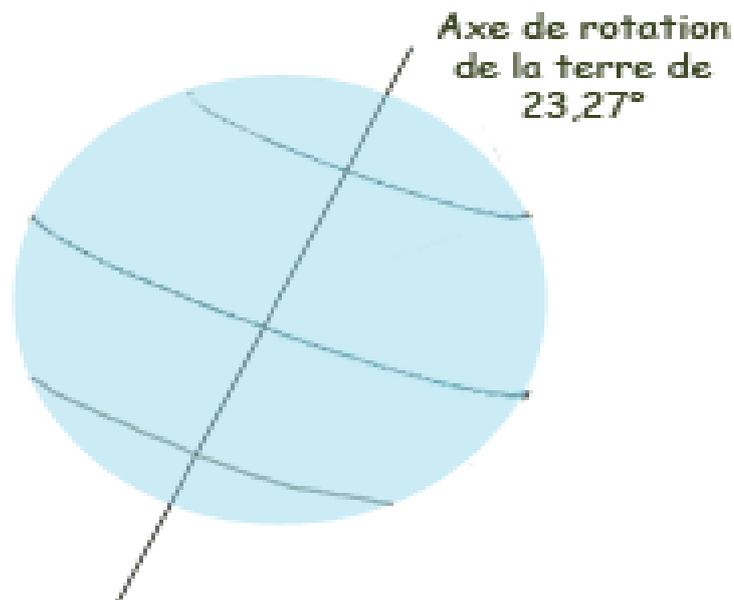
## II.1. Introduction :

Ce chapitre explore le mouvement de la Terre et du Soleil, en soulignant les relations entre la position du Soleil, la latitude et l'angle horaire. Nous examinons la durée du crépuscule et proposons des modèles pour évaluer l'irradiation solaire globale sur deux sites en Algérie.

## II.2. Mouvement de la Terre :

### II.2.1. Rotation de la terre autour de son axe

La Terre effectue également une rotation sur elle-même une période de 24 heures, autour de son axe (connu sous le nom d'axe des pôles), qui est incliné de  $23^{\circ}27'$  par rapport au plan de l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre) [26] (*Figure II.1*).

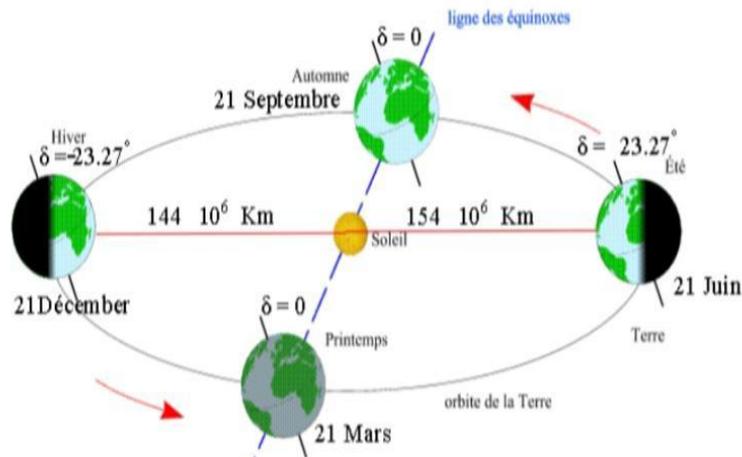


*Figure II.1 : mouvement de la terre [27].*

### II.2.2. Mouvement de la Terre autour du Soleil :

La Terre suit une orbite elliptique quasi-circulaire autour du Soleil, avec une période de 365,25 jours (figure II.2). Le plan de cette orbite est connu sous le nom de plan de l'écliptique. Au solstice d'hiver (21 décembre), la Terre est la plus proche du Soleil, à environ 144 millions de kilomètres, tandis qu'au solstice d'été, elle est la plus éloignée, à environ 154 millions de

kilomètres. La distance moyenne entre la Terre et le Soleil est d'environ 149,5 millions de kilomètres. Aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (21 septembre), la Terre croise le petit axe de son orbite [28].



*Figure II.2 : Mouvement de la terre autour du Soleil. [29]*

### II.3. Repérage d'un site à la surface de la terre (coordonnées géographiques)

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :

#### II.3.1 La latitude $L$

C'est l'angle  $L$  que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial, Si  $L > 0$ , le site se trouve dans l'hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud,

### **II.3.2 La longitude**

C'est l'angle formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu Considéré, La longitude est comprise entre -180 (vers l'ouest) et +180 (vers l'est), Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes,

**II.3.3 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 [30]

## **II.4. Modélisation des paramètres géométriques et atmosphériques**

### **II. 4.1. Déclinaison du Soleil ( $\delta$ ) :**

La déclinaison est l'angle formé par le plan de l'équateur terrestre et la direction Terre-Soleil. Cet angle varie symétriquement tout au long de l'année, de -23°26' à +23°26' [31].

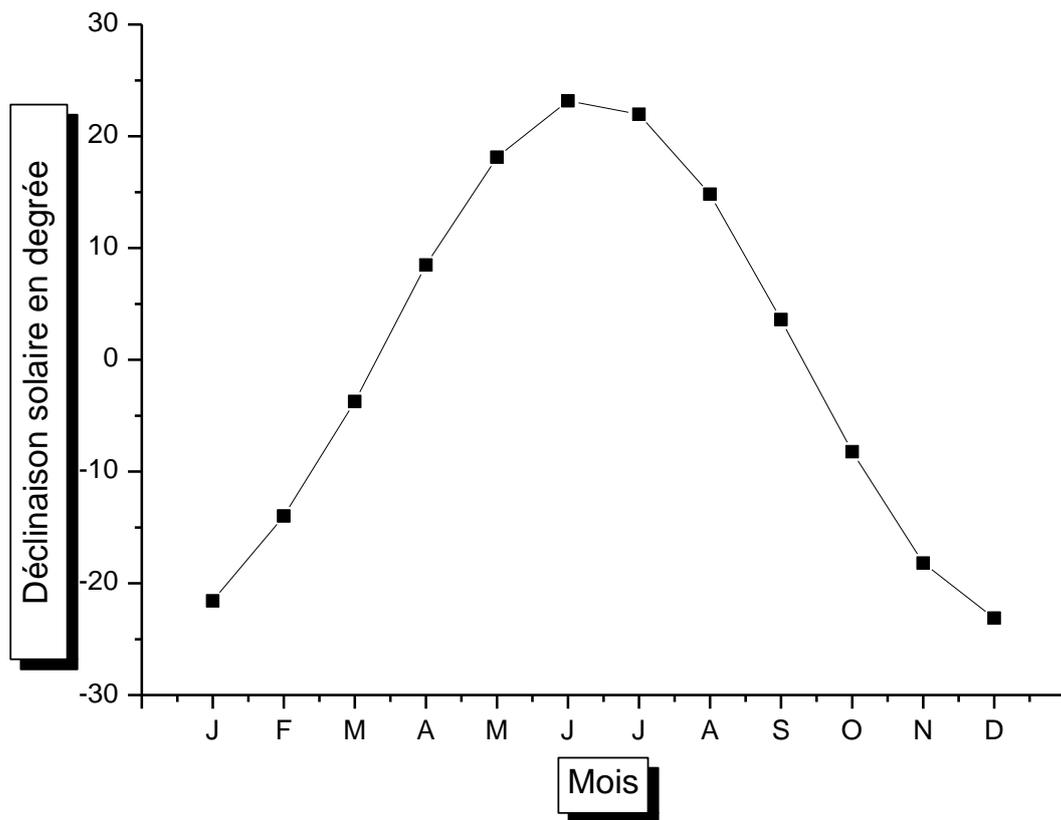
La valeur de la déclinaison peut être calculée avec une bonne précision en utilisant la formule suivante :

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin[0.980(j + 284)] \quad (\text{II. 1})$$

où j représente le numéro du jour.

**Tableaux II.1** : Les valeurs de la déclinaison du 15<sup>ème</sup> jour de chaque mois de l'année.

Mois	Jour de l'année	Déclinaison Selon (II.1)(°)
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



*Figure II.3: Variation de déclinaison au court de l'année .*

#### II.4.2. L'angle horaire $w$

L'angle horaire  $w$  est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire de l'astre (soleil) avec le plan contenant le méridien céleste. Il est compté sur l'équateur, positivement à l'ouest, négativement à l'est.

Les deux coordonnées ( $\omega$  et  $\delta$ ) sont aussi appelées coordonnées semi locales Puisque l'angle horaire  $\omega$  dépend du lieu d'observation, contrairement à la déclinaison  $\delta$ [32].

### II.4.3 Hauteur du soleil $h$

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal (c'est-à-dire tangent au sol) (figure II. 3) elle est donné par la relation suivante :

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

Où ,  $\delta$  est la déclinaison,  $\omega$  est l'angle horaire,  $L$  est latitude ,  $h$  est hauteur du soleil[33].

Le coucher du soleil correspond un hauteur nul du soleil avec l'horizon ( $h=0$ ) .

### II.4.4 Azimut du soleil ( $a$ )

L'azimut correspond à l'angle formé entre le plan du méridien local et le plan vertical passant par le soleil l'azimut est mesuré négativement vers l'est et positivement vers l'ouest.

La formule suivante peut être utilisée pour calculer l'azimut :

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

Où,  $\delta$  représente la déclinaison du Soleil,  $w$  est l'angle horaire et  $h$  est l'angle d'élévation du Soleil [33].

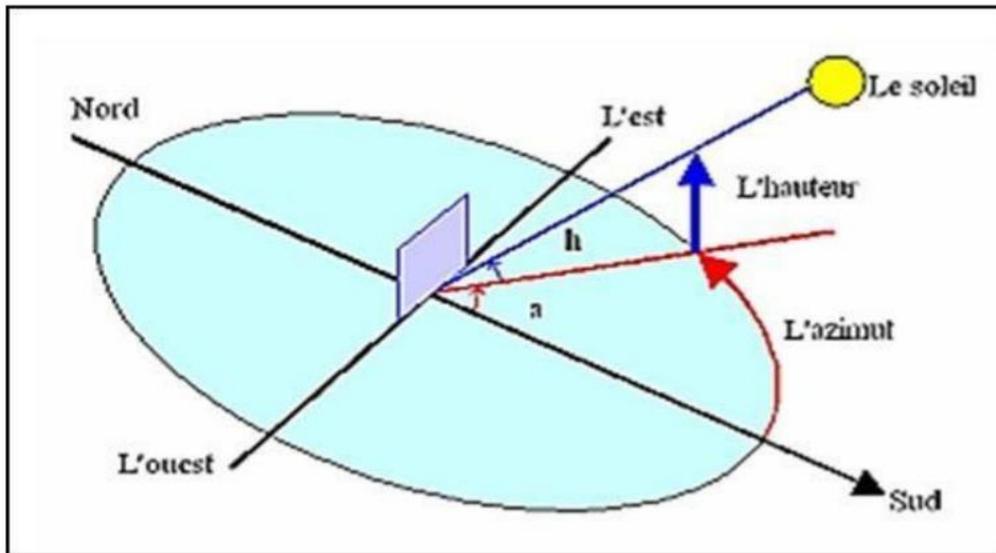


Figure II.4: Coordonnées horizontales du soleil [34].

#### II.4.5 La durée du jour

Elle est définie comme l'intervalle du temps pendant lequel le soleil se trouve au dessus de L'horizontal, sans tenir compte les phénomènes de réfraction atmosphérique, cette intervalle du temps est obtenu à partir des heures du lever et de coucher du soleil [35].

L'heure solaire au coucher sera donc :

$$TS_{coucher} = 12 + \frac{w_c}{15} \quad (\text{II. 4})$$

Pour le lever : ( $w_l = -w_c$ ), et l'heure solaire au lever sera :

$$TS_{lever} = 12 + \frac{w_l}{15} = 12 - \frac{w_c}{15} \quad (\text{II. 5})$$

La durée du jour  $S_0$  entre l'heure du coucher l'heure de lever du soleil :

$$S_0 = TS_{coucher} - TS_{lever} \quad (\text{II. 6})$$

#### **II.4.6. Influence du phénomène de réfraction atmosphérique sur le calcul de la durée du jour**

Si on tient compte du phénomène de réfraction atmosphérique [36] (la hauteur réelle du soleil est inférieure à la hauteur apparente), le coucher du soleil a lieu pour l'angle horaire  $W'_c$  défini par :

$$\cos(W'_c) = \frac{\sin(h_0) - \sin(\delta)\sin(L)}{\cos(\delta)\cos(L)} \quad (\text{II. 7})$$

La valeur obtenue de  $W'_c$  avec  $h_0 = 0^\circ$  donne l'heure du coucher du soleil (centre du disque solaire)

La durée du jour  $S'_0$  peut être donnée par :

$$S'_0 = \frac{2}{15} W'_c \quad (\text{II. 8})$$

#### **II.4.7. Influence du crépuscule sur le calcul de la durée du jour**

Si on tient compte du phénomène de crépuscule [36] (diffusion du rayonnement solaire par les couches supérieures de l'atmosphère au coucher ou lever du soleil), le coucher du soleil a lieu pour l'angle horaire  $w''_c$  défini par

$$\cos w''_c = \frac{\sin(h_1) - \sin(\delta)\sin(L)}{\cos(\delta)\cos(L)} \quad (\text{II. 9})$$

$h_1$  = est défini par :

$h_1 = -6^\circ$  pour le crépuscule civil.

$h_1 = -12$  pour le crépuscule nautique.

$h_2 = -18$  pour le crépuscule astronomique.

$$w'_c = \cos^{-1} \left[ \frac{\sin(h_0) - \sin(\delta) \sin(L)}{\cos(\delta) \cos(L)} \right] \quad \text{II. 10)}$$

$$w''_c = \cos^{-1} \left[ \frac{\sin(h_1) - \sin(\delta) \sin(L)}{\cos(\delta) \cos(L)} \right] \quad \text{(II. 11)}$$

La durée du jour dans ce cas " $S_0$ " peut être donnée :

$$S_0'' = \frac{2}{15} w''_c \quad \text{(II. 12)}$$

## II.5. Calcul de l'irradiation solaire sur une surface horizontale

### II.5.1. En dehors de l'atmosphère

A la limite extérieure de l'atmosphère, le rayonnement incident correspond au seule composante directe du rayonnement seule provenant directement du soleil est composé de rayons supposés parallèles entre eux.

Pour un site donné, le flux sur une surface horizontale  $I_{Oh}$  est égal à la composante du flux solaire, on a:

$$I_{Oh} = I_0 \sin(h) \quad (\text{II. 13})$$

L'irradiation solaire globale hors atmosphère sur un plan horizontal s'obtient en intégrant l'expression précédente entre le lever et le coucher du soleil [37]. On obtient :

$$H_0 = \left( \frac{24I_0}{\pi} \right) \left( 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360j}{365} \right) \right) \cdot Z \quad (\text{II. 14})$$

Le paramètre  $Z$  est donné par :

$$Z = (\cos L \cos \delta \sin w + 2 \pi w \sin L / 360) \quad (\text{II. 15})$$

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

Où  $H_0$  est l'irradiation solaire globale hors atmosphère ( $\text{MJ}/\text{m}^2\text{jour}$ ) sur un plan horizontal.

L'expression de  $H_0$  est en fonction de la constante solaire  $I_0$ , la latitude du site  $L$ , la déclinaison  $\delta$  et l'angle horaire  $w$ . La constante solaire  $I_0$  est l'énergie solaire reçue par unité de surface placée perpendiculairement au rayon lumineux dans l'espace au voisinage de la terre, à la distance.

## II.5.2 Fonction d'insolation

La fonction d'insolation quotidienne  $\sigma$  est donnée par l'expression suivante [38].

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (\text{II. 16})$$

Où  $S_0$  est la durée astronomique du jour ou l'intervalle de temps entre le lever et le coucher du soleil.  $S$  est la durée d'insolation quotidienne, elle est le temps pendant lequel le soleil était visible.

## II. 6 Evaluation de l'irradiation globale

### II.6.1. Procédures de calcul

Dans ce travail, les valeurs mesurées de l'irradiation solaire et de la durée d'insolation pour les sites algériens [39] « Alger et Tamanrasset » sont utilisées. Les coordonnées géographiques des sites sont présentées dans le Tableau :

**Tableau II.2** : Emplacement géographique des deux sites.

Site	Latitude (deg) (N)	Altitude (m)	Longitude (deg)
Alger	36,43	25	3,15 <sup>E</sup>
Tamanrasset	22,47	1378	5,31 <sup>E</sup>

### **II.6.2. modèle du type d'Angstrom-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, on a trois modèles du type d'Angstrom-Prescott, mais on a utilisé le Premier modèle, selon l'expression suivante : [40]

$$\frac{H}{H_0} = a_1 + b_1 \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{II. 17})$$

Où  $H$  et  $H_0$  sont respectivement l'irradiation solaire globale ( $\text{MJ}/\text{m}^2\text{Jour}$ ) et l'irradiation solaire Hors atmosphère (extraterrestre) ( $\text{MJ}/\text{m}^2$  jour) sur un plan horizontal,

$S$  et  $S_0$  sont respectivement la durée d'insolation locale et la durée maximale d'insolation,

$a_1$  et  $b_1$  sont des Constantes à déterminées par la méthode des moindres carrés.

### **II.6.2 Calcule de la durée du jour :**

Est une variable importante pour les études écologique et agro-environnementale. Elle dépend de différentes définitions du coucher/lever du soleil et du crépuscule. La durée du jour est donnée par :

$$S_0 = \frac{2}{15} W_c \quad (\text{II. 18})$$

$W_c$ : L'angle horaire

L'expression de l'angle horaire peut être modifiée si on introduit les différentes définitions de la durée du jour [6] :

$$W_c = \cos^{-1} \left( \frac{\sin h_0 - \sin L \sin \delta}{\cos L \cos \delta} \right) \quad (\text{II. 19})$$

Ou  $h$  : l'hauteur du soleil à son coucher (ou lever).

**Le Tableau (II. 3)** : résume les différentes définitions le phénomène de crépuscule et l'hauteur des soleils correspondants introduits dans les calculs [41]

Définition de la durée du jour	Le centre de disque solaire est à l'horizon	Crépuscule (cock-lebur)	Crépuscule (civil)
$h_0(0)$	0	-4	-6

## II.7 Diffusion à travers les couches supérieures de l'atmosphère

Si l'atmosphère n'existait pas, l'obscurité la plus complète surviendrait dès que le soleil disparaîtrait sous l'horizon. Cependant, la lumière solaire, diffusée par les couches supérieures de l'atmosphère encore illuminées par le soleil, permet une transition graduelle entre le jour et la nuit, ou la nuit et le jour. Ce phénomène est appelé crépuscule.

### II.7.1 Définition du crépuscule

Le crépuscule correspond principalement à une lueur dans le ciel qui suit le coucher du soleil ou précède son lever. Cette lueur est causée par l'éclairage des couches supérieures de

l'atmosphère par le soleil déjà sous l'horizon. Le crépuscule du matin est appelé aurore ou aube. De plus, le crépuscule est également une période de temps qui précède ou suit immédiatement le passage du soleil à l'horizon. Selon la latitude et le moment de l'année, le crépuscule peut même remplacer complètement la nuit. Par exemple, dans les régions polaires, il y a de longues nuits de plusieurs mois qui sont souvent caractérisées par de longs crépuscules. Bien sûr, ces durées varient tout au long de l'année en raison de l'inclinaison changeante du soleil.

Dans la pratique, trois définitions du crépuscule sont couramment utilisées :

### **II.7.2 Le crépuscule civil**

A été introduit pour définir le moment où la luminosité a suffisamment diminué pour qu'il soit nécessaire d'utiliser un éclairage urbain. On convient ainsi que le crépuscule civil dure tant que le soleil est situé à moins de  $6^\circ$  sous l'horizon, en tenant compte de la réfraction atmosphérique, qui élève sa position d'environ  $36^\circ$  d'arc lorsqu'il est à l'horizon. Aux latitudes supérieures à environ  $58^\circ$ , il existe une période de l'année où le crépuscule civil du soir se termine exactement lorsque le crépuscule civil du matin commence, et pendant cette période, il ne fait jamais complètement nuit. Ce moment si particulier nourrit l'imaginaire des pays nordiques sous le nom de "nuits blanches".

### **II.7.3 Le crépuscule nautique**

Dure tant que la position du soleil, corrigée de la réfraction atmosphérique, est supérieure à  $12^\circ$  sous l'horizon. On estime que c'est la condition nécessaire pour distinguer les formes générales des objets situés à terre (ou en mer) par beau temps.

### **II.7.4 Le crépuscule astronomique**

Dont la définition repose sur le besoin de déterminer le moment où la nuit sera suffisamment sombre pour offrir des conditions d'observation optimales des astres, dure tant que le soleil est situé à moins de  $18^\circ$  sous l'horizon, en tenant également compte de la réfraction. Aux latitudes supérieures à environ  $49^\circ$ , il existe une période de l'année où le

crépuscule astronomique du soir se termine exactement lorsque le crépuscule astronomique du matin commence, et pendant cette période, il fait nuit, mais la nuit n'est pas totalement noire, et les étoiles les plus faibles ne peuvent pas être vues. Le phénomène du crépuscule astronomique est particulièrement notable lors du solstice d'été[42].

## **II.8 L'erreur relative**

On définit l'erreur relative par :

$$d_i = (H_{i,m} - H_{i,c}) * \left( \frac{100}{H_{i,m}} \right) \quad (\text{II. 20})$$

$H_{i,m}$  ,  $H_{i,c}$  sont respectivement les valeurs mesurées et les valeurs calculées de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale.

Pour évaluer le succès de ce modèle, trois statistiques différentes des mesures ont été adoptées, fréquemment utilisées dans la littérature. Ces mesures sont (RMSE ;MBE ;MAE) sont testées sur la base des mesures statistiques suivantes pour n nombre de points de données :

- RMSE (Root mean square error) Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne :

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:[43]

$$\text{RMSE} = \sum_i \left[ \frac{d_i^2}{n} \right]^{0.5} \quad (\text{II. 21})$$

- MBE (Mean bias error) Erreur de biais moyen :

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. [43]

$$\text{MBE} = \sum_i \frac{d_i}{n} \quad (\text{II. 22})$$

- **(MAE) (Average absolute errors) Erreur absolue moyenne :** 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 [43] :

$$\text{MAE} = \sum_i \frac{|d_i|}{n} \quad (\text{II. 23})$$

## II .9. Appareils des mesures :

### Pyranomètre

C'est l'appareil le plus utile puisqu'il évalue, à l'aide d'une thermopile, l'ensemble du rayonnement solaire (direct+diffus) sur une surface donnée et sur un large spectre de 0,3 à 3 [µm] de longueur d'onde. Son globe de verre lui confère une grande acceptante angulaire, proche de la demi-sphère (il collecte les rayons venant de toutes les directions, même les rayons rasants). Il peut également mesurer la part diffuse du rayonnement, on masque alors le rayonnement direct avec un cache en forme d'arceau qui suit la trajectoire du soleil pour éliminer la contribution directe du rayonnement [44]



*Figure II.5 : Pyranomètre d'Eppley [45]*

**Le pyréliomètre:**

C'est un instrument destiné à la mesure de l'intensité du rayonnement solaire direct. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi. Ainsi cet instrument ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil[45].



*Figure II .6 : Pyréliomètre [45].*

**L'héliographe :**

Qu'est l'instrument dont l'origine est la plus ancienne. Il donne la durée d'insolation ou plus exactement la période du jour pendant laquelle le rayonnement solaire a dépassé un certain seuil. C'est sur un papier qui se déplace que le rayonnement solaire concentré à l'aide de dispositif optique, laisse son empreinte en le brûlant sur une longueur qui donne la durée du jour. Cet appareil n'est pas très intéressant pour le photovoltaïque, car il ne renseigne pas sur l'intensité du rayonnement [46].



*Figure II .7 : L'héliographe de Campbell-Stockes[46]*

## Références Bibliographiques

[26] : M .Ziad, «Caractérisation Radiométriques Des Sites de Bouzaréah et de Ghardaïa » Mémoire de magister, Université de Saad Dahleb, Blida, Octobre2007.

[27] : 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.

[28] : Hamdani Maamar ‘’ Etude et Effet l'orientation de Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa ‘’. Mémoire de Magister Energie Renouvelables. Université Abou-Bakar Belkid Tlemcen.2011.

[29] : REDDAH Takieddine ‘’ Etude et dimensionnement d'un système solaire combiné Application: Logement individuel type F3 à Batna ‘’. Mémoire de Magister Option : Energétique. Université de batna.2015.

[30] : K. Bouchouicha. and B.Oulimar,: La chaine de mesure radiométrique à l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar, International Conference on Energy and Sustainable Developmenticesd'13, Adrar - Algeria 19-20 February (2013).

[31] : Benmeriem Fatiha ‘’Contribution a l'analyse de la faisabilité énergétique d'une installation de production de l'eau chaude sanitaire par voie solaire’’. Mémoire de magister. Université de Hassiba Benbouali. Chlef. 2009.

[32] : S. Newcomb. On the principal fundamental constants of astronomy. 1895.

[Noël, 2004] F. Noël. Solar cycle dependence of the apparent radius of the Sun. Astron.

[33] hathi mémoire

[34] : Khoudrane Ismail ‘’ Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques ‘’. Mémoire de master en énergétique. Université de Ksdi Merbah Ouargla 2014.

[35] : N. Mohamed, Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire, thèse de magister, université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.

[36] : Capderou M, (1988) Atlas Solaire de l'Algerie. Office des publications Universitaires, T.1-3.

[37] : Chegaar M, and Chibani A, (2001) Global solar radiation estimation in Algeria. Energy Conversion and Management, 42 (8):967-973.

[38] : A. Ricaud, Gisement solaire et transferts énergétiques, université de CERGY-PONTOISE, 2011.

[39] : M. Capderou , Atlas solaire de l'Algérie, Office des publications universitaires, T1-3, 198(1988).

[40]: Sen. Zekai , Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, Springer 2008.

[41] : J. Almorox, C. Hontoria, Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. Energy Conversion and Management, 45:1529- 35. (2004)

[42] : Canada J, (1988) Global solar radiation in Pais Valenciano using sunshine hours. International Journal of Ambient Energy, (4): 197-201.

[43]: National Centers For Environmental Information, Consulté Octobre 2018, [www.ncdc.noaa.gov](http://www.ncdc.noaa.gov).

[44] : Amara Karima; " Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension ". Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou, 2014/2015.

[45] : Karimi Siham; " Contribution à l'analyse des performances du système PV raccordé au réseau sous différent conditions climatique dans un milieu saharien ". Université d'Adrar 2017/2018.

[46] : Amara Karima; " Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension ". Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou, 2014/2015.

# Chapitre III :

## Résultats et discussion

### III .1 Introduction

Ce chapitre, est réservé pour les résultats obtenus par notre méthode de calcul de s valeurs de l'irradiation globale sur une Surface horizontalesur pour les deux sites (Alger et Tamanrasset) ou nous avons utilisé le modèle d'Angstrom-Prescott puis on a comparé ces résultats avec d'autre mesurées.

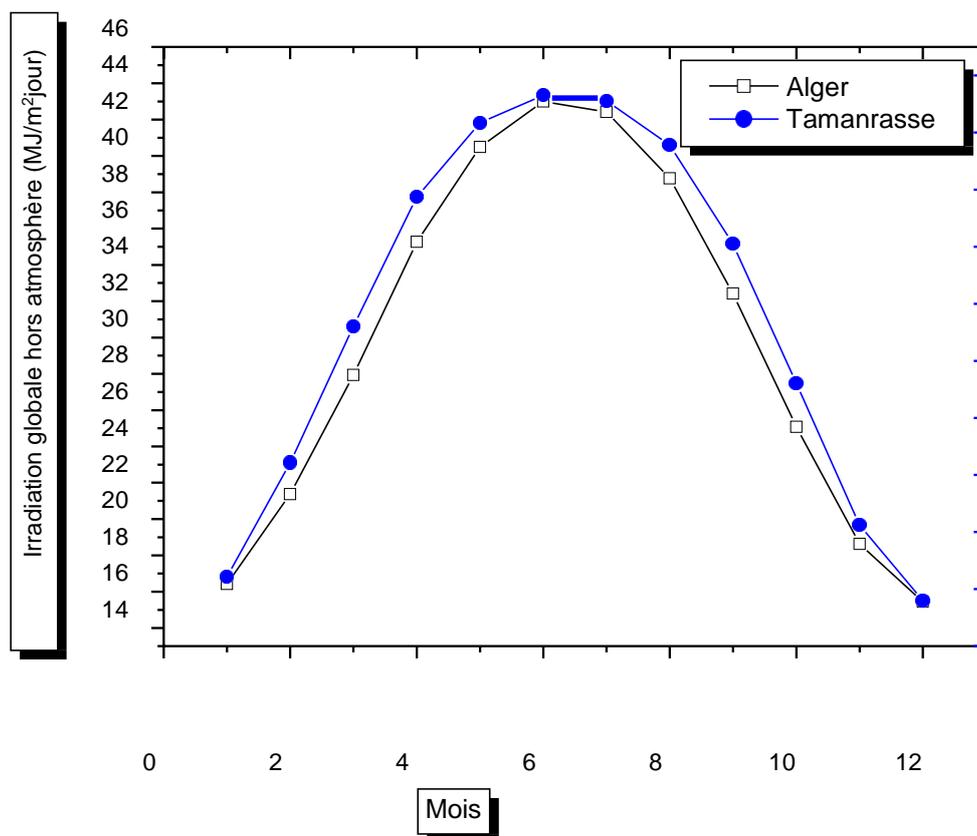
### III. 2 Calcul de l'irradiation solaire globale hors atmosphère

Les valeurs de l'irradiation solaire globale hors atmosphère (extraterrestre) peuvent être calculées en utilisant l'équation (II.14) pour les deux sites algériens. Les résultats sont présentés sur ce tableau :

*Tableau III.1 : Irradiation solaire globale hors atmosphère (MJ/m<sup>2</sup> jour).*

Mois	Alger	Tamanrasset
1	16.43	24.43
2	21.37	28.43
3	27.93	33.21
4	35.27	37.75
5	40.49	40.34
6	43.00	41.31
7	42.42	41.11
8	38.77	39.56
9	32.42	36.10
10	25.08	31.21
11	18.63	26.25
12	15.44	23.59

La figure (III.1) montre la variation de l'irradiation solaire globale hors Atmosphère pour Alger. Elle atteint un maximum autour de 43 MJ/m<sup>2</sup>Jour , Pendant les mois d'été, et atteint un minimum autour de 16 MJ/m<sup>2</sup>Jour pendant l'hiver. Tamanrasset a un minimum autour de 25 MJ/Jour pendant l'hiver, mais possède un maximum un peut inférieur par rapport aux autres sites.



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

### ***III.3. Application des modèles aux différents sites***

Dans le cadre de cette étude, nous utilisons les valeurs moyennes mensuelles mesurées de l'irradiation solaire globale quotidienne et de la durée d'insolation quotidienne sur deux sites en Algérie, (Alger et Tamanrasset). La durée d'enregistrement de la durée d'insolation est de 25 ans, tandis que celle de l'irradiation solaire globale est d'au moins 10 ans. Les mesures de l'irradiation solaire globale ont été réalisées à l'aide des pyranomètres de Robitzsh et Kipp-Zone, tandis que les héliographes de Campbell-Stokes ont été utilisés pour mesurer la durée d'insolation.

Les mesures de la durée d'insolation nous permettent de calculer la fraction d'insolation en divisant la durée d'insolation par la durée astronomique du jour.

## Résultats et discussion

La fraction d'insolation pour les deux sites en Algérie est indiquée dans le Tableau (III.1).

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

Station \ mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nou	Dec
Alger	0.48	0.56	0.60	0.61	0.71	0.71	0.80	0.74	0.74	0.62	0.51	0.49
Tamanrasset	0.78	0.81	0.84	0.77	0.76	0.69	0.75	0.77	0.73	0.77	0.81	0.79

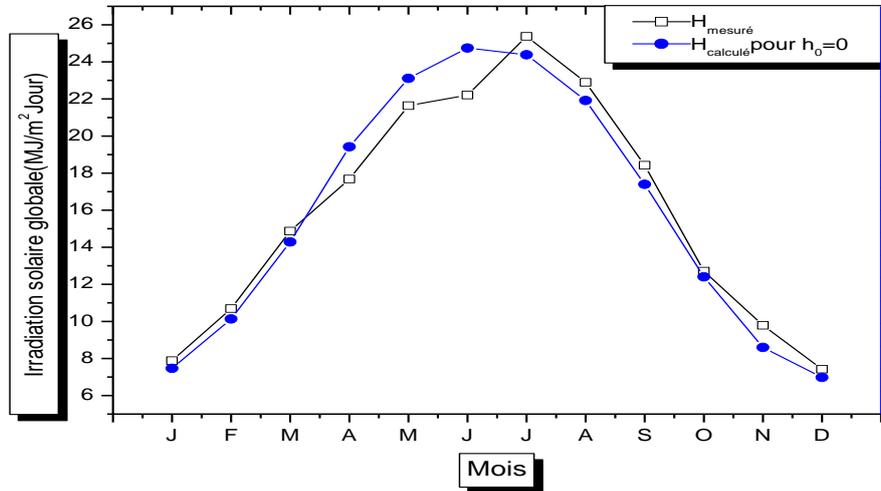
### III .2. 1 Application du modèle du type d'Angstrom-Prescott

Le tableau (III. 2) présente les coefficients des corrélations du modèle d'Angstrom Prescott (les  $a_1$  et  $b_1$ ) déterminées par la méthode des moindres carrées pour les Différentes définitions de la durée du jour.

**Tableau III. 3 : Les coefficients des corrélations du modèle d'Angstrom-Prescott pour les Différents sites.**

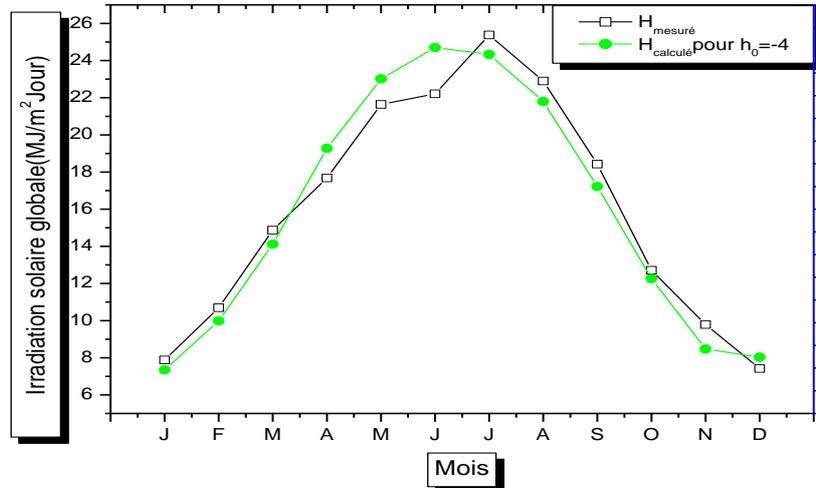
Site	Hauteur du soleil	$a_1$	$b_1$
Alger	$h_0=0$	0.3836	0.2781
		0.3897	0.2849
	$h_0=-6$	0.3936	0.2876
Tamanrasset	$h_0$	0.5819	0.2357
	$h_0=-4$	0.6150	0.2306
	$h_0=-6$	0.6302	0.2291

- Nous avons appliqué les relations précédente pour faire notre calcul qui été résumédans ces graphes :
  - **Pour Alger**



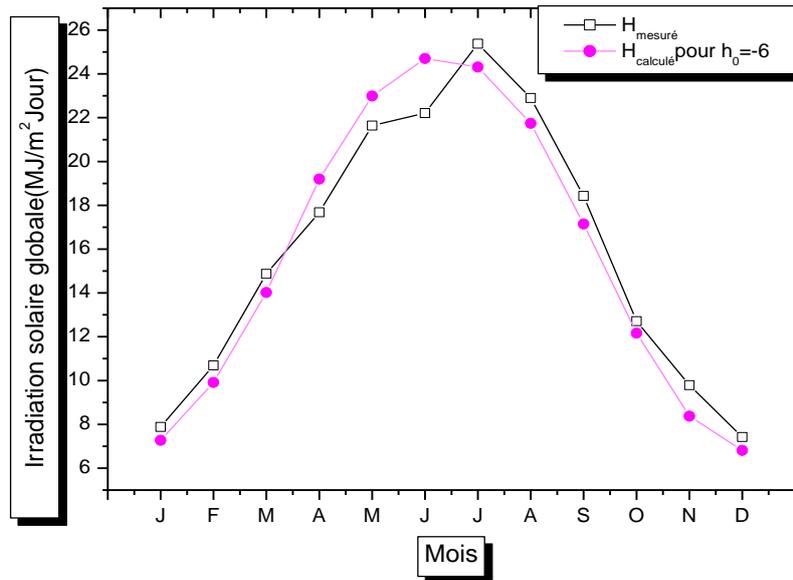
*Figure III.2 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Agstrom –prescott*

- ✓ La figure III.3 présente la variation de l'irradiation global hors atmosphère en fonction de mois pour  $H$  mesurée et  $h_0=-4$ , on peut dire que notre comparaison est acceptable. Avec une petite différence dans ces mois " avril mai juin ".



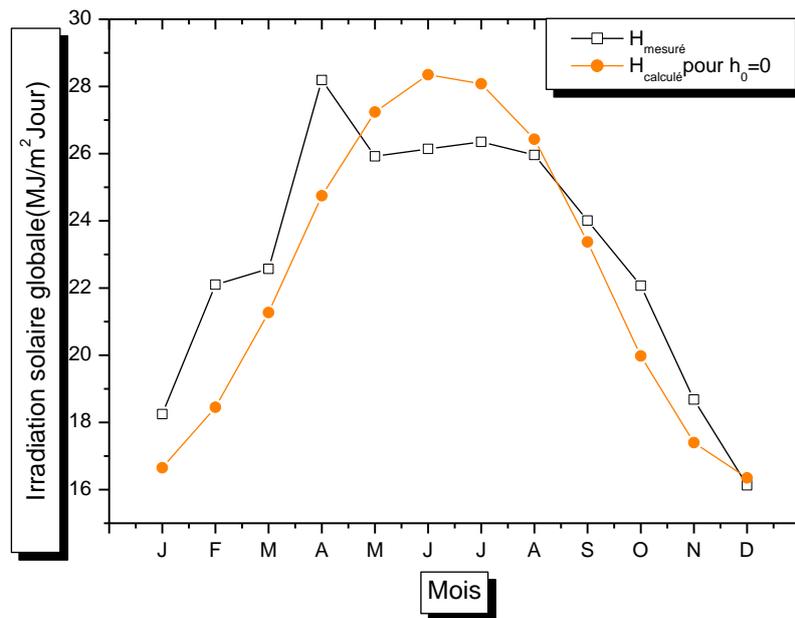
*Figure III.3 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Agstrom –prescott*

- ✓ La figure III.4 présent la variation de l'irradiation global hors atmosphère en fonction de mois pour  $H$  mesurée et  $h_0=-6$  , on peut dire que notre comparaison est symétrique. Avec un petite différence dans ces mois " mai juin juillet".



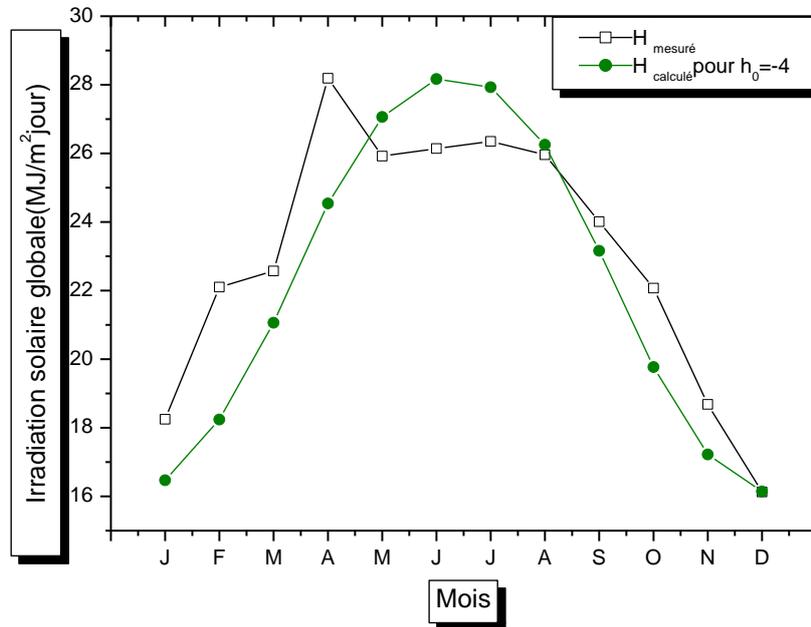
*Figure III.4 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Agstrom – prescott.*

- pour Tamanrasset
- ✓ La figure III.5 présente la variation de l'irradiation globale hors atmosphère en fonction de mois pour H mesurée et  $h_0=0$ , on remarque que notre comparaison est différente. Car on a un écart remarquable.



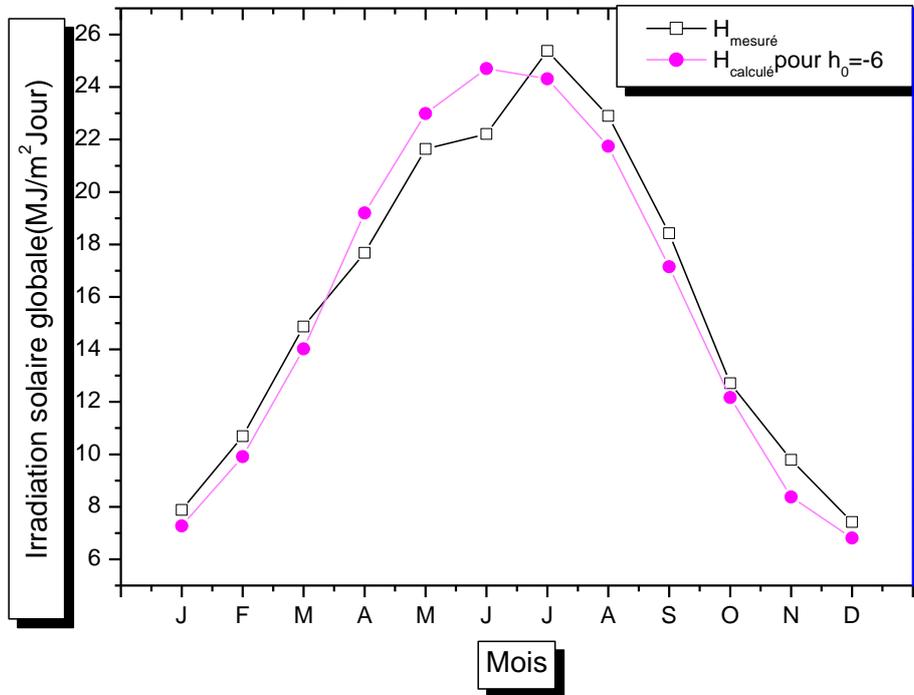
*Figure III.5 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Agstrom –prescott*

- ✓ La figure III.6 présente la variation de l'irradiation globale hors atmosphère en fonction du mois pour H mesurée et h<sub>0</sub>=-4, il est très facile de dire que notre comparaison est différente dans les mois de janvier à septembre. Et de septembre décembre sont acceptables.



**Figure III.6 :** L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Agstrom –prescott.

- ✓ La figure III.7 présente la variation de l'irradiation globale hors atmosphère en fonction du mois pour H mesurée et  $h_0=-6$ , il est très facile de dire que notre comparaison est variée dans les mois de janvier à septembre. Et acceptables pour septembre de décembre.



*Figure III.7 : L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Agstrom –prescott*

## Résultats et discussion

On présente dans le Tableau (III. 3) les valeurs des paramètres statistiques (MBE, MAE et RMSE statistique) pour le premier modèle d'Angstrom-Prescott afin d'évaluer sa Performance d'estimation de l'irradiation solaire sur les deux sites considérée.

**Tableau III. 4 :** les valeurs des paramètres statistiques (MBE, MAE et RMSE statistique).

Site	Hauteur	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)
Alger	$h_0=0$	-0.3587	4.5366	6.1777
	$h_0=-4$	-0.3598	4.5366	6.1777
	$h_0=-6$	-0.3598	4.5726	6.1848
Tamanrasset	$h_0=0$	-0.4285	5.4174	6.5405
	$h_0=-4$	-0.4285	5.5009	6.5670
	$h_0=-6$	-0.4301	5.5351	6.5751

### III.4 .Discussion

- ✓ Le tableau (III.2) présente les coefficients des corrélations du modèle d'Angstrom Prescott (les  $a_1$  et  $b_1$ ), pour Alger et Tamanrasset avec hauteur du soleil, on peut voir que les paramètres :( $a_1$ ) varient entre 0.3836 et 0.3936 pour Alger, entre 0.5819 a 0.6302 pour Tamanrasset, Les  $b_1$  allant de 0.2781 à 0.2876 pour Alger, de 0.2291 a 0.2357.
- ✓ Le tableau (III.2) présente les valeurs des paramètres statistiques (MBE, MAE et RMSE statistique).
  - ❖ Pour Alger, on peut dire facilement que les valeurs de MBE, MAE, RMSE, sont bonnes. Puisque elles sont varié entre ( -0.3587, -0.3598),( 4.5366, 4.5726),( 6.1777, 6.1848).
  - ❖ Pour Tamanrasset, les valeurs de MBE, MAE, RMSE sont acceptables car sont changé entre (-0.4301, -0.4285),( 5.4174, 5.5351)( 6.5405, 6.5751).

# Conclusion générale

Le rayonnement solaire joue un rôle crucial dans de nombreux domaines tels que l'énergie solaire, l'agriculture et la météorologie. La modélisation précise du rayonnement solaire crépuscule revêt une importance particulière, car cette période marque la transition entre le jour et la nuit, et elle influence divers processus naturels et activités humaines.

La région de Tamanrasset et Alger en Algérie est caractérisée par un ensoleillement intense tout au long de l'année. Comprendre et modéliser le rayonnement solaire crépuscule dans ces régions spécifiques est d'une grande importance pour plusieurs raisons. Premièrement, cela permettra d'optimiser la planification de l'utilisation de l'énergie solaire et de concevoir des systèmes énergétiques plus efficaces. Deuxièmement, cela aura un impact sur les activités agricoles, en fournissant des informations précieuses sur les conditions de lumière disponibles pour les plantes. Enfin, cela contribuera à améliorer les prévisions météorologiques et les modèles climatiques.

Cependant, la modélisation du rayonnement solaire crépuscule présente des défis en raison de la complexité des processus physiques impliqués. Des facteurs tels que la variation de l'angle d'incidence du soleil, l'absorption et la diffusion de la lumière par l'atmosphère, ainsi que la présence éventuelle de nuages, doivent être pris en compte pour obtenir des estimations précises du rayonnement solaire.

Dans ce mémoire de fin d'études, nous nous proposons de réaliser une modélisation du rayonnement solaire crépuscule à Tamanrasset et Alger, en Algérie. Nous utiliserons des mesures du rayonnement solaires pour l'utilisation du modèle d'Agstrom prescott un modèle fiable. Notre objectif est d'estimer le rayonnement solaire disponible

Les résultats de cette étude fourniront des informations importantes sur le rayonnement solaire crépuscule à Tamanrasset et Alger, permettant ainsi d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire, d'améliorer les prévisions météorologiques et de mieux comprendre les conditions environnementales locales. De plus, ces connaissances pourront servir de base pour d'autres études dans le domaine de l'énergie solaire, de l'agriculture et de la climatologie.

En conclusion, ce mémoire de fin d'études se concentrera sur la modélisation du rayonnement solaire crépuscule à Tamanrasset et Alger, en Algérie. L'objectif principal est de

## Conclusion générale

---

fournir des estimations précises du rayonnement solaire pendant cette période cruciale de la journée, en utilisant des données météorologiques et des paramètres atmosphériques appropriés. Les résultats de cette recherche contribueront à l'amélioration de l'utilisation de l'énergie solaire, de la prévision météorologique et de la compréhension des conditions environnementales locales.

## Résumé

Ce mémoire a pour objectif l'évaluation de l'irradiation solaire en Algérie en vue de soutenir le développement des technologies de conversion d'énergie solaire. L'énergie solaire, en tant que source d'énergie propre et renouvelable, est accessible à tous, indépendamment des conditions climatiques. Bien que l'Algérie bénéficie d'un ensoleillement abondant, la répartition précise de l'irradiation solaire demeure peu connue et concentre sur l'importance de l'irradiation solaire en Algérie, en mettant en avant les méthodes de calcul, les modèles prédictifs, et les résultats obtenus pour différents sites. Il contribue à une meilleure compréhension de l'irradiation solaire dans la région et à son exploitation pour promouvoir l'énergie solaire.

Mot clés : Le rayonnement solaire, le crépuscule, Irradiation solaire, hors atmosphère

## Abstract

This dissertation aims to evaluate solar irradiation in Algeria with a view to supporting the development of solar energy conversion technologies. Solar energy, as a clean and renewable energy source, is accessible to everyone, regardless of climatic conditions. Although Algeria benefits from abundant sunshine, the precise distribution of solar irradiation remains little known and focuses on the importance of solar irradiation in Algeria, highlighting calculation methods, predictive models, and the results obtained for different sites. It contributes to a better understanding of solar irradiation in the region and its exploitation to promote solar energy.

Keywords: Solar radiation, twilight, solar irradiation, outside the atmosphere

## ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى تقييم الإشعاع الشمسي في الجزائر بهدف دعم تطوير تقنيات تحويل الطاقة الشمسية ، باعتبارها مصدرًا نظيفًا ومتجددًا للطاقة، متاحة للجميع، بغض النظر عن الظروف المناخية. على الرغم من أن الجزائر تستفيد من أشعة الشمس الوفيرة، إلا أن التوزيع الدقيق للإشعاع الشمسي لا يزال غير معروف كثيرًا ويركز على أهمية الإشعاع الشمسي في الجزائر، مع تسليط الضوء على طرق الحساب والنماذج التنبؤية والنتائج التي تم الحصول عليها لمواقع مختلفة. ويساهم في فهم أفضل للإشعاع الشمسي في المنطقة واستغلاله لتعزيز الطاقة الشمسية.

الكلمات المفتاحية : الإشعاع الشمسي، الشفق، الإشعاع الشمسي، خارج الغلاف الجوي