

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir Elibrahimi – Bordj Bou  
Arreridj Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences de la Matière



جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريريج »

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم علوم المادة

# Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLOME DE Master

**Filière : Physique**

**Option : Physique énergétique et énergie renouvelables**

**THÈME**

**MODELISATION DE LA COMPOSANTE  
DIRECTE DU RAYONNEMENT SOLAIRE  
PAR LA METHODE DE PSO**

**Préparé par :**

**Merzougui Hassina**

**Soutenu le : 29/06/2025**

**Devant le jury :**

<b>Président :</b>	<b>Mechouma Farid</b>	<b>MAA</b>	<b>Univ BBA</b>
<b>Rapporteur :</b>	<b>Sahnoune Yassine</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ BBA</b>
<b>Examineur 1:</b>	<b>Imakhlaf Anis</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ BBA</b>
<b>Examineur 2:</b>	<b>Regaigui Elgasm</b>	<b>MAA</b>	<b>Univ BBA</b>

**Année Universitaire 2024-2025**

---

## **Remerciment**

*Louange à Dieu, car c'est par Sa grâce que les bonnes œuvres s'accomplissent,  
et par Son aide que les objectifs se réalisent.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à  
toutes les personnes qui m'ont soutenu(e) tout au long de mon parcours  
universitaire, en particulier :*

- *À mon encadrant, Monsieur **Sahnoune Yassine**, pour son accompagnement bienveillant, ses conseils précieux, sa patience et sa disponibilité constante.*
- *À l'ensemble de mes professeurs, pour la qualité de leur enseignement et leur générosité intellectuelle.*
- *À ma chère mère, pour son amour inconditionnel, ses prières silencieuses, son soutien indéfectible et ses innombrables sacrifices.*
- *À toutes les personnes qui m'ont encouragé(e) et soutenu(e), de près ou de loin.*

***Je vous suis profondément reconnaissant(e).***

---

## ***Dédicace***

***Ma chère maman,***

*Ta tendresse, tes sacrifices et tes prières silencieuses ont toujours été mon refuge. Ton amour inconditionnel est le pilier de tout ce que j'ai accompli.*

***À mon cher papa,***

*Merci pour ton soutien constant, ta patience infinie et ta confiance en moi. Ta force tranquille et ton exemple m'ont guidée à chaque étape.*

***Ma sœur Houda,***

*Ma complice, mon amie, ma confidente. Ton écoute, ta générosité et ton soutien moral ont été essentiels dans mon **parcours**.*

***À mon frère Abdelkrim,***

*Merci pour ta sagesse, ton soutien indéfectible et tes conseils éclairés. Ta présence bienveillante a toujours su me rassurer.*

***À sa femme,***

*Merci pour ta douceur, ta compréhension et ta gentillesse sincère. Ton soutien discret m'a touchée profondément.*

***À leur fille Roudaina,***

*Petite étoile de la famille, ta joie et ton innocence illuminent nos vies. Tu es une source de bonheur au quotidien.*

***À mes frères et sœurs,***

*Merci pour votre amour fraternel, vos encouragements et votre patience. Vous avez chacun contribué, à votre manière, à cette réussite.*

***À mes professeurs,***

*Je vous exprime ma plus profonde gratitude pour votre encadrement exemplaire, votre disponibilité et la passion avec laquelle vous transmettez le savoir. Vous êtes des artisans de lumière.*

***Alhamdoulillah***, qui, par Sa grâce, permet l'accomplissement des bonnes choses.

---

## Tables des matières

Remerciment .....	I
Dedicase .....	II
Tables des matières .....	III
List des figures .....	VI
List des tableaux.....	VIII
Introduction générale.....	1

### Chapitre I : Introduction au rayonnement solaire

I-1- Introduction .....	3
I.2 Le Soleil .....	3
I.2.1 Définition .....	3
I.2.2 Carte d'identité du Soleil .....	3
I.2.3 La composition interne du soleil .....	4
I.2.4. La constante solaire .....	5
I.3 Le rayonnement solaire.....	6
I.3.1 Origine et nature de rayonnement solaire .....	6
I.3.2 Le cycle Proton –Proton.....	7
I.3.3 Le cycle du carbone -azote-oxygène:.....	7
I.3.4 Le spectre du rayonnement extraterrestre .....	8
I.4 Influence de l'atmosphère terrestre sur le rayonnement solaire .....	9
1.4.1 Structure de l'atmosphère.....	9
I.4.2 La masse d'air .....	10
I.4.3 Absorption de Le rayonnement solaire .....	12
I.4.4 Absorption et diffusion du rayonnement solaire dans l'atmosphère .....	13
I.4.5 Réfraction atmosphérique .....	14
I-5 Les composantes de rayonnement solaire reçus au sol.....	15
1.5.1 Le rayonnement direct .....	15

---

1.5.2 Le rayonnement diffus.....	15
1.5.3 Rayonnement réfléchi (Albédo) .....	15
1.5.4 Rayonnement global .....	16
I.8 Gisement solaire en Algérie.....	16
I.9. Conclusion .....	18

## **Chapitre II : Détails des calculs**

II.1 Introduction : .....	20
II.2. repérage des site géographique :.....	20
II.2.1 Données astronomiques et paramètres orbitaux .....	20
II.2.2 Paramètres de position terrestre (latitude, longitude, inclinaison).....	20
II.2.3 Mouvement apparent du terre et déclinaison solaire .....	20
II.2.4 La déclinaison : .....	22
II.2.5 Calcul de l'angle horaire .....	23
II.3 Repérage du soleil .....	23
II.3.1 L'azimut solaire (a).....	24
II.3.2 La hauteur solaire (h).....	24
II.4 Repérages de soleil et la durée de jour .....	25
II.4.1 Relations de repérage du soleil .....	25
II.4.2 La durée du jour .....	25
II.5 Composantes du rayonnement solaire .....	26
II.5.1 Rayonnement extraterrestre ( $H_0$ ) : calcul et signification.....	26
II.5.2. Irradiation solaire globale journalière hors atmosphère.....	26
II.5.3 Fraction d'insolation .....	27
II.6. Évaluation de l'Irradiation Solaire Globale sur troix Sites Représentatifs en Algérie.....	28
II.6.1 Importance de la connaissance de la distribution du rayonnement solaire .....	28
II.7 Modélisation Empirique de l'Irradiation Solaire Globale .....	29
II.7.1 Introduction aux modèles linéaires .....	29

---

II.7.2 Modèle d'Angström-Prescott.....	29
II.7.3 Évaluation de la performance des modèles.....	30
II.7.4 Modèles paramétriques élargis .....	31
II.8 Optimisation par l'essaim de particules(PSO) .....	31
II.8.1 Mise en œuvre de l'algorithme PSO :.....	33
II.8.2 Méthodes de mesure du rayonnement solaire.....	35
II.9 Conclusion .....	38

### **Chapitre III : Résultat et discussion**

III.1 Introduction .....	40
III.2. Choix des jours types du mois : .....	40
III.3 Estimation de l'irradiation solaire globale hors atmosphère :.....	40
III.4 Utilisation du modèle pour les diverses sites en utilisant la méthode des moindre carre	43
III.5 Utilisation du modèle pour les diverses sites en utilisant la methode PSO.....	47
III.6 Les paramètre a et b: .....	51
III.7 Conclusion.....	52
Conclusion générale .....	54
Références bibliographique.....	57
Résumé .....	59

---

## List des figure

Figure I.1 coupe schématique du soleil. ....	5
Figure I.2 Diagramme de cycle du carbone. ....	8
Figure I.3 Spectre du rayonnement solaire.....	8
Figure I.4 la structure verticale de l’atmosphère. ....	10
Figure I.5 Masse d’air. ....	11
Figure I.6 Réfraction atmosphérique.....	15
Figure I.7 composantes de rayonnement solaire reçus au sol. ....	16
Figure I. 8 Carte de l’insolation mondiale montrant la quantité d’énergie solaire (en heures d’éclairement) reçue chaque jour par une surface présentant l’inclinaison optimale pendant le mois le moins ensoleillé de l’année. ....	17
Figure II.1. Rotation de la Terre autour de son axe.....	21
Figure II.2. Mouvements de la terre autour du soleil. ....	22
Figure II.3. variation de la déclinaison au court de l’année. ....	23
Figure II.4. repérage de soleil.....	24
Figure II.5. Organigramme d’optimisation des paramètres de la relation d’Angstrom. ....	34
Figure.II.6 Evolution de la fonction objective. ....	36
Figure.II.7. Le pyranomètre ombré .....	36
Figure II.8. Pyrhéliomètre .....	37
FigureII.9. Exemples de capteurs par ordre croissant de complexité et de précision dans la caractérisation du rayonnement solaire. ....	37
Figure III.1. L’irradiation solaire globale pour les 3 sites.....	42
Figure III.2. L’irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d’Angström –Prescott.....	44
Figure III.3. L’irradiation solaire mesurée et estimée pour Oran par le modèle de type d’Angström –Prescott.....	45
Figure III.4. L’irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d’Angström –Prescott.....	46

---

Figure III.5. L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Angström –Prescott(PSO).....	47
Figure III.6. L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Oran par le modèle de type d'Angström –Prescott(PSO).....	49
Figure III.7. L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Angström –Prescott(PSO).....	50

---

## Liste des Tableaux

Tableau I.1. Indique les valeurs de la constante solaire en fonction du nombre d'air masse ..	12
Tableau II.1. Les coordonnées géographiques de ces stations .....	28
Tablea III.1. le jour type de chaque mois. ....	40
Tableau III.2. Irradiation solaire hors atmosphérique pour les trois site (MJ/m2. jour) .....	41
Tableau III.3. La fraction d'insolation pour les trois sites. ....	43
Tableau III.4. la déclinaison = delta , Ho, H calculer, W(rad) pour Alger. ....	44
Tableau III.5. la déclinaison = delta , Ho, H calculer, W(rad) pour Oran.....	45
Tableau III.6. la déclinaison = delta , Ho, H calculer, W(rad) pour Tamanrasset. ....	46
Tableau III.7. la déclinaison = delta , Ho, H calculer, W(rad) pour Alger(PSO). ....	48
Tableau III.8. la déclinaison = delta , Ho, H calculer, W(rad) pour Oran(PSO).....	49
Tableau III.9. la déclinaison = delta , Ho, H calculer, W(rad) pour Tamanrasset (PSO). ....	50
Tableau III.10. les paramètres a et b de modelé, et le RMSE .....	51

---

# **Introduction Générale**

---

### **Introduction générale**

La production d'énergie constitue l'un des défis majeurs du XXI<sup>e</sup> siècle. Face à l'épuisement progressif des ressources fossiles et à leur impact environnemental considérable — notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre — les énergies renouvelables apparaissent comme une alternative incontournable. Propres, inépuisables et à faible empreinte carbone, elles représentent une réponse durable aux besoins croissants en énergie de nos sociétés modernes.

Parmi ces sources, l'énergie solaire occupe une place de choix, en particulier en Algérie, pays doté d'un des plus importants potentiels solaires au monde. Avec plus de 3000 heures d'ensoleillement par an dans certaines régions, l'Algérie bénéficie de conditions idéales pour le développement et l'exploitation de cette ressource naturelle. Toutefois, pour pouvoir tirer pleinement parti de cette richesse, une modélisation précise du rayonnement solaire est essentielle, notamment durant les périodes critiques comme le crépuscule, où les conditions atmosphériques et la position du soleil influencent fortement l'irradiation reçue.

Ce travail s'inscrit dans cette démarche. Il vise à modéliser le rayonnement solaire global dans trois villes algériennes représentatives de climats différents : Alger, Oran et Tamanrasset. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle empirique d'Angstrom-Prescott, largement reconnu pour son efficacité dans l'estimation de l'irradiation solaire à partir de la durée d'insolation. Afin d'optimiser la précision du modèle et de l'adapter aux spécificités locales de chaque site, une technique d'optimisation par essaim de particules (PSO) a été appliquée pour ajuster les coefficients du modèle.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre présente les notions fondamentales liées au rayonnement solaire, à son origine, ses composantes, ainsi que l'influence de l'atmosphère terrestre sur sa propagation.
- Le deuxième chapitre est consacré aux outils géométriques et mathématiques nécessaires au calcul de l'irradiation solaire. Il introduit également le modèle d'Angstrom-Prescott et les méthodes de mesure utilisées.
- Le troisième chapitre présente les résultats, l'application du modèle aux trois villes choisies, et l'impact de l'optimisation PSO sur la précision des estimations.

---

# **Chapitre I :**

## **Introduction au rayonnement solaire**

---

## **Chapitre I : Introduction au rayonnement solaire**

### **I-1- Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'étude de notions fondamentales relatives au Soleil, incluant ses dimensions, sa structure en couches, l'origine et la nature de son rayonnement énergétique, ainsi que la distribution de cette énergie à l'interface de l'atmosphère terrestre. Il aborde subséquentement l'historique de la formation de la Terre, la composition et la stratification de son atmosphère, l'influence de celle-ci sur le rayonnement solaire incident, les phénomènes optiques atmosphériques en résultant, et la répartition du rayonnement solaire atteignant la surface terrestre.

### **I.2 Le Soleil**

#### **I.2.1 Définition**

Le Soleil est une étoile, constituant l'unique étoile du système solaire et la plus proche de la Terre. L'étoile la plus proche après lui est Proxima du Centaure, localisée à 4,2 années-lumière du Soleil. Le Soleil demeure jusqu'à présent la source d'énergie la plus considérable, en dépit de la distance importante qui le sépare de la Terre ( $149.6 \times 10^6$  kilomètres). Il se présente comme une immense sphère lumineuse constituée principalement de gaz ionisé, et représente le plus grand corps céleste au sein du système solaire. Ses dimensions sont telles qu'il pourrait englober plus d'un million de planètes Terre. [1]

#### **I.2.2 Carte d'identité du Soleil**

Le soleil est une étoile de type spectral (couleur jaunâtre, correspondant à une température de surface légèrement inférieure à 6000 K), située à environ 150 millions kilomètres de la terre, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène et apparaît sous un angle d'un peu plus d'un demi-degré.

La composition massique du Soleil est d'environ 75 % d'hydrogène, 25 % d'hélium et près de 0,1 % d'éléments plus lourds que l'hélium (désignés comme métaux). En termes de nombre d'atomes, cela équivaut à 92,1 % d'hydrogène et 7,8 % d'hélium. Ces proportions varient selon la région considérée : en surface, les proportions massiques sont de 70 % d'hydrogène, 28 % d'hélium et 2 % de métaux. Cependant, dans les régions centrales, les modèles indiquent seulement 35 % d'hydrogène et 63 % d'hélium. Cette différence s'explique par le fait que depuis sa formation, il y a 4,57 milliards d'années, le Soleil a consommé approximativement la moitié

de ses réserves d'hydrogène nucléaire. Cela le situe donc à peu près à la moitié de sa durée de vie sur la séquence principale.

- **Diamètre** : Le Soleil possède un diamètre de 1,392 million de kilomètres. Celui-ci équivaut à 109 diamètres terrestres (ce qui correspond à une superficie 12 000 fois plus grande que celle de notre planète, et à un volume 1,3 million de fois supérieur). Il convient d'ajouter que notre étoile, étant une masse fluide en rotation, n'est pas parfaitement sphérique.

- **Masse** : La masse de notre étoile est de 330 432 fois celle de la Terre, soit environ  $1,99 \times 10^{30}$  kg. À lui seul, le Soleil constitue 99,8 % de la masse totale du système solaire. Cette masse diminue de façon progressive au cours de l'évolution stellaire : une petite proportion (une perte de 4 millions de tonnes par seconde) est due à la conversion de masse en énergie, responsable du rayonnement solaire.

- **Densité** : La connaissance de la masse et des dimensions solaires permet de déduire sa densité. Celle-ci est approximativement de  $1,41 \text{ g/cm}^3$  (ou  $1,41 \text{ kg/litre}$ ), signifiant qu'un litre de matière solaire a une masse de 1,41 kg. Comparativement à la densité terrestre, celle du Soleil est de 0,256.

- **Température** : La température solaire varie selon la région étudiée. Au centre, elle excède 15 millions de kelvins. En surface (photosphère), la température effective est de 5785 K. Toutefois, la couronne présente des températures qui peuvent dépasser le million de kelvins.

- **Rotation** : Le Soleil tourne sur lui-même autour d'un axe incliné de  $7,25^\circ$  par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique. La période de rotation de cette masse gazeuse qu'il constitue varie en fonction de la latitude. Les régions équatoriales effectuent une rotation complète en 25,6 jours terrestres. À une latitude de  $60^\circ$ , la période de rotation est de 30,9 jours. Elle atteint 36 jours au voisinage des pôles, indiquant que le Soleil n'est pas une sphère à rotation homogène. [3]

### **1.2.3 La composition interne du soleil**

- Le noyau** : C'est la région centrale du Soleil, caractérisée par une température extrêmement élevée ( $15 \times 10^6 \text{ K}$ ), une pression considérable ( $2 \times 10^{11} \text{ bars}$ ) et une forte densité ( $\sim 10^5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), cette dernière diminuant à mesure que l'on s'éloigne du centre. L'énergie générée au sein du noyau se propage initialement par diffusion radiative, puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère, d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique dans l'espace. [4]

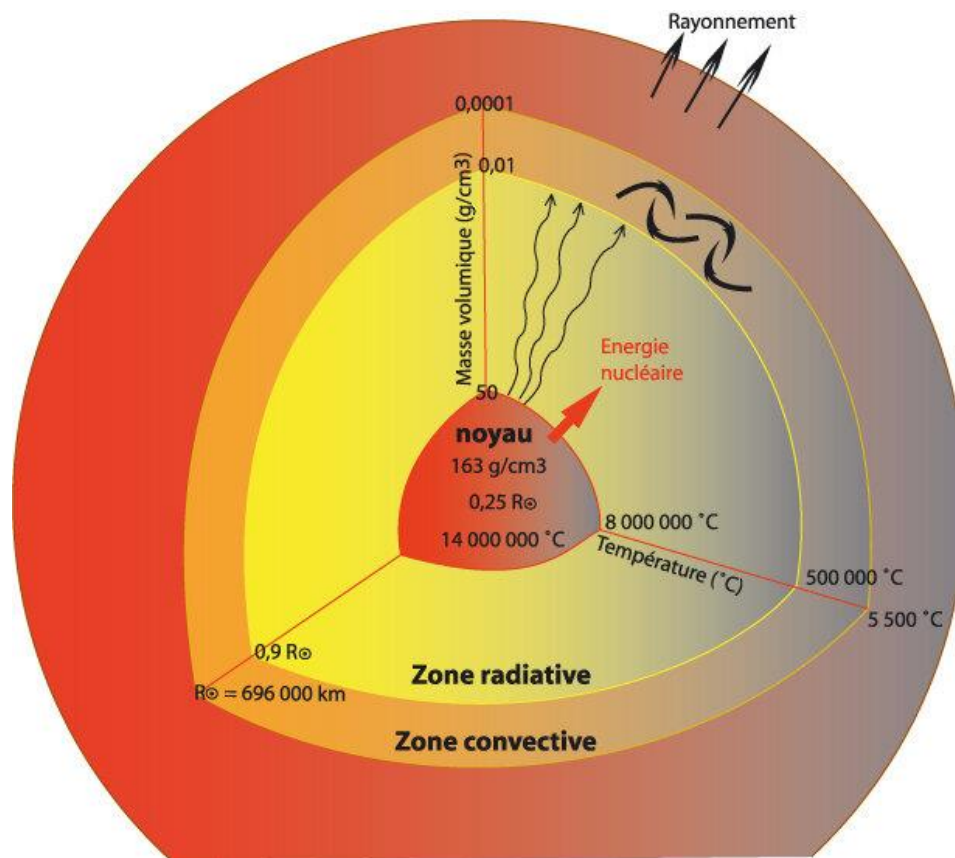


Figure I.2 coupe schématique du soleil. [5]

- **La photosphère** : C'est une couche d'environ 300 km d'épaisseur affichant une température de 5770 K. Elle correspond à la surface visible du Soleil.

- **La chromosphère** : Elle constitue l'atmosphère inférieure du Soleil. Son épaisseur est d'environ 8 000 km et sa température avoisine les 20 000 K.

- **La couronne** : Elle constitue la prolongation de la chromosphère, et non celle de la photosphère comme on le croit parfois à tort. Dépourvue de frontière nette, elle se compose de gaz très peu denses et fortement ionisés. En temps normal, elle ne peut pas être observée directement depuis la Terre, car sa lumière est éclipsée par la clarté du ciel durant la journée. On ne peut l'apercevoir qu'à l'occasion d'une éclipse solaire totale. Sa température est extrêmement élevée, atteignant plus d'un million de kelvins. Quant à la composition chimique générale du Soleil, elle est constituée d'environ 70 % d'hydrogène et de près de 28 % d'hélium, le reste — environ 2 % — étant formé d'un mélange de plus d'une centaine d'autres éléments chimiques connus. [3]

#### I.2.4. La constante solaire

La constante solaire représente le flux d'énergie reçu par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires, en dehors de l'atmosphère terrestre. Dans ce contexte, la valeur adoptée est de

1367 W/m<sup>2</sup>, correspondant au spectre dit Air Mass 0 (AM0). Cette intensité varie légèrement au cours de l'année en raison de l'orbite elliptique de la Terre autour du Soleil, ce qui modifie la distance entre les deux astres. Une correction liée à cette variation Terre-Soleil permet d'ajuster la valeur du flux reçu [6] :

$$c_{t-5} = 1 + 0.034 \cos \left( \frac{360}{365} (j - 2) \right) \quad (I.1)$$

j: numéro du jour à partir du 1<sup>er</sup> janvier.

La constante solaire corrigée est :

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

### **I.3 Le rayonnement solaire**

Le Soleil émet constamment un rayonnement électromagnétique omnidirectionnel, composé de photons, qui voyagent à la vitesse de la lumière (c). Il faut en moyenne 499 secondes, soit environ 8 minutes et 19 secondes, pour que ce rayonnement parvienne à l'atmosphère terrestre.

À la limite supérieure de l'atmosphère, la Terre reçoit une puissance d'environ 1367 W/m<sup>2</sup>, une valeur qui demeure relativement stable partout sur la planète. Cependant, cette énergie est partiellement absorbée lors de sa traversée de l'atmosphère. Pour une réception optimale, les rayons solaires doivent atteindre l'atmosphère de manière perpendiculaire. L'énergie solaire réellement captée est donc principalement déterminée par l'épaisseur de l'atmosphère traversée, qui est influencée par la concentration d'ozone, de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, ainsi que par l'altitude et la localisation géographique du lieu d'observation. [3]

#### **I.3.1 Origine et nature de rayonnement solaire**

L'énergie solaire est considérée comme une ressource inépuisable à l'échelle humaine. Le Soleil fonctionne comme une gigantesque centrale thermonucléaire, libérant une puissance colossale de 3,82×10<sup>26</sup> watts sous forme de photons. Ce rayonnement résulte de la fusion de 596 millions de tonnes d'hydrogène par seconde, converties en 592 millions de tonnes d'hélium, la différence (soit 4 millions de tonnes par seconde) étant transformée en rayonnement gamma.

Bien que chaque centimètre carré de la surface solaire émette environ 6 kilowatts, seule une infime fraction (5 milliardièmes, soit 5×10<sup>-9</sup>) de cette énergie atteint la Terre. Ce phénomène est basé sur la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un seul noyau d'hélium, processus qui libère 25 000 mégawatts par gramme et par seconde, ce qui représente l'équivalent énergétique de 100 milliards de bombes H d'une mégatonne.

La fusion (à ne pas confondre avec la fission nucléaire) se produit sous l'effet de la pression intense au cœur du Soleil, rapprochant les noyaux d'hydrogène jusqu'à leur fusion. Un seul gramme d'hydrogène libère 140 milliards de calories, ce qui correspond à 0,14 W/cm<sup>2</sup>.

L'énergie générée au centre du Soleil se propage vers la surface d'abord par rayonnement, puis par convection. La zone convective se termine à la photosphère, une couche d'environ 200 km d'épaisseur d'où est émis la quasi-totalité du rayonnement visible. Cette couche présente une texture granuleuse due à des mouvements turbulents ; chaque granule peut dépasser la taille de la France et persister de 10 minutes à plus de 10 heures, en fonction de sa dimension.[6]

Deux cycles ont été imaginés par les astrophysiciens pour décrire les étapes conduisant à cette fusion.

### **I.3.2 Le cycle Proton –Proton**

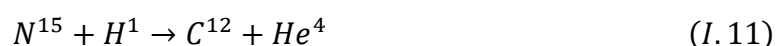
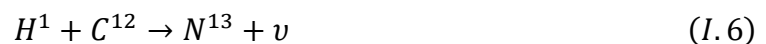
Le cycle proton -proton fournit 90% de l'énergie solaire. Les réactions nucléaires régissant ce cycle sont données par les équations suivantes :



La notation  $H$  représente le noyau de l'atome d'hydrogène 1, c'est-à-dire un proton. Il y a émission de positrons  $\beta^+$ (rayonnement bêta), de neutrinos  $\nu_e$  et de photons  $\gamma$  (rayonnement électromagnétique). [7]

### **I.3.3 Le cycle du carbone -azote-oxygène:**

En 1938, Hans Bethe et Carl von Weizsäcker ont découvert le cycle du carbone (aussi appelé cycle CNO), qui représente les 10 % restants de l'énergie solaire. Ce cycle implique des réactions entre le carbone et l'azote, et il se répète tant qu'il y a de l'hydrogène disponible. Les transformations sont illustrées par les réactions chimiques suivantes :



Ce cycle peut être schématisé par le diagramme ci-dessous.

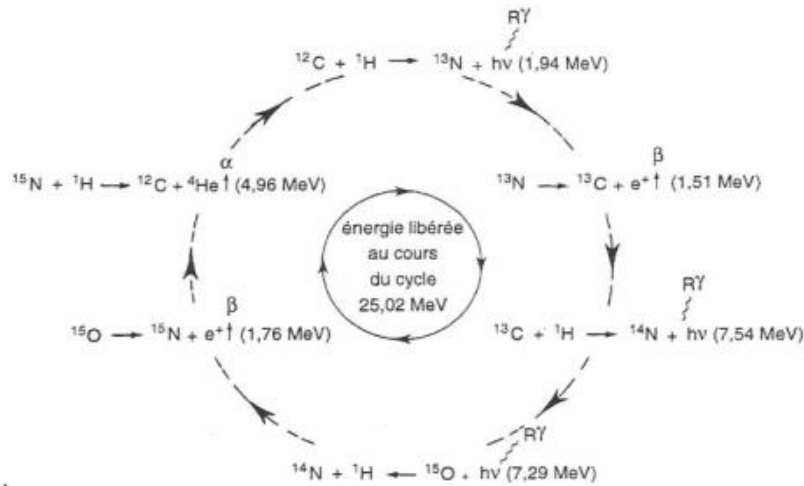


Figure I.3 Diagramme de cycle du carbone. [7]

### I.3.4 Le spectre du rayonnement extraterrestre

Le spectre du rayonnement solaire se compose de trois régions principales: l'ultraviolet (UV), le visible et l'infrarouge (IR). L'ultraviolet est lui-même subdivisé en trois bandes : l'UVC (de 100 à 280 nm), l'UV-B (de 280 à 315 nm) et l'UV-A (de 315 à 400 nm). La lumière visible, perceptible par l'œil humain, s'étend de 400 à 700 nm. Enfin, l'infrarouge est divisé en deux bandes : l'IR à ondes courtes (de 700 à 2500 nm) et l'IR à ondes longues (de 2500 à 4000 nm).

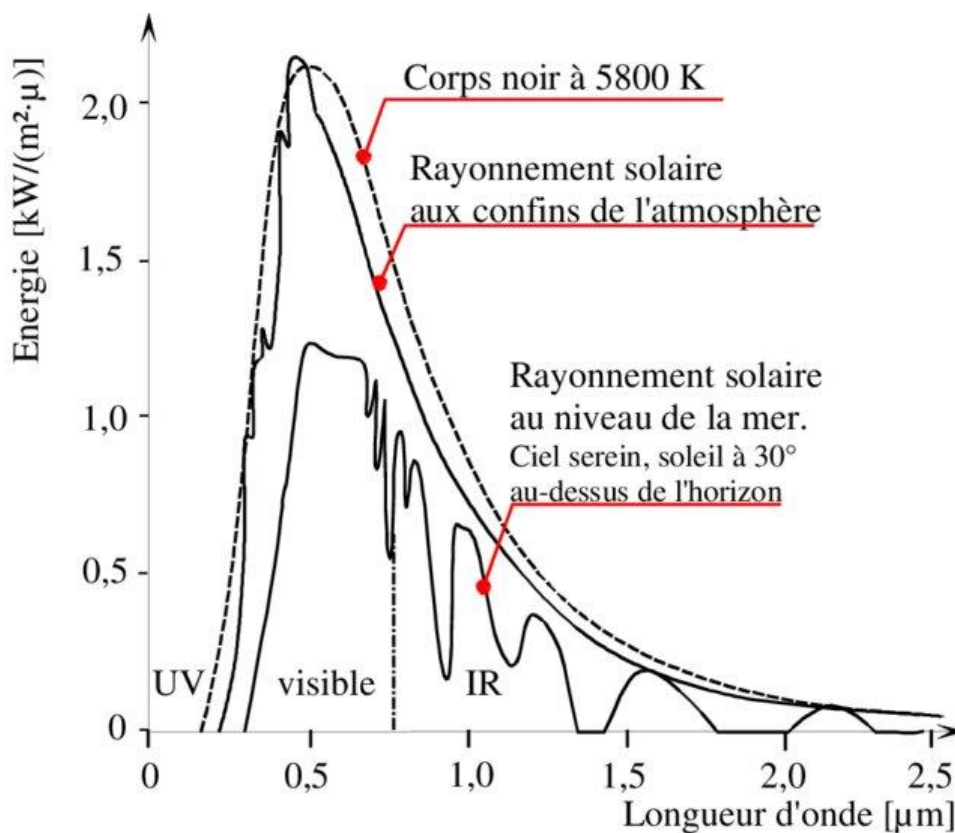


Figure I.4 Spectre du rayonnement solaire.[8]

Comprendre ce spectre est crucial pour la conception et l'optimisation des systèmes solaires, qu'ils soient thermiques ou photovoltaïques, ainsi que pour évaluer les risques associés à l'exposition aux UV. [3]

## **I.4 Influence de l'atmosphère terrestre sur le rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire subit des modifications significatives en traversant l'atmosphère terrestre, dont les caractéristiques impactent directement la quantité et la qualité de l'énergie atteignant la surface.

### **1.4.1 Structure de l'atmosphère**

#### **a. Composition de l'atmosphère terrestre**

Les trois premières couches atmosphériques présentent une composition relativement stable : environ 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0,9 % d'argon et 0,03 % de dioxyde de carbone. Des traces d'autres gaz sont également présent, ainsi que de la vapeur d'eau dans la troposphère et une fine couche d'ozone dans la stratosphère. Cette dernière joue un rôle crucial en absorbant une grande partie des rayons ultraviolets les plus énergétiques [9].

#### **b. Régions atmosphériques**

L'atmosphère terrestre est stratifiée en plusieurs couches distinctes, définies notamment par leur profil thermique vertical, c'est-à-dire la variation de la température de l'air en fonction de l'altitude. En partant de la surface, on distingue :

- **La Troposphère** S'étendant jusqu'à environ 10 km d'altitude (7 km aux pôles et 15 km à l'équateur), la troposphère représente 80 % de la masse atmosphérique totale. C'est le siège de la majorité des phénomènes météorologiques et chimiques. La température y diminue en moyenne de 6,5°C par kilomètre jusqu'à la tropopause, en raison de la détente adiabatique. Ce processus favorise un brassage efficace de l'air grâce à des cellules de convection actives. Le temps de dilution de l'air dans cette couche est d'environ 3 ans.
- **La Stratosphère** Située au-dessus de la troposphère, elle s'étend jusqu'à environ 50 km d'altitude et contient la majeure partie de l'ozone atmosphérique. La formation de l'ozone est une réaction exothermique, ce qui provoque une inversion de température : celle-ci augmente constamment avec l'altitude jusqu'à un maximum à la stratopause. Cette grande stabilité thermique verticale limite fortement les mouvements d'air ascendants, expliquant la structure en couches horizontales de la stratosphère. Les mouvements atmosphériques y sont donc principalement horizontaux, et l'absence de nuages et de précipitations entraîne une très longue durée de résidence des particules.

- **La Mésosphère** Directement au-dessus de la stratosphère, la mésosphère voit sa température redescendre avec l'altitude, atteignant un minimum d'environ  $-80^{\circ}\text{C}$  vers 80 kilomètres. C'est dans cette couche que les météores s'enflamment en entrant dans l'atmosphère, en raison de la friction avec l'air [10].
- **La Thermosphère** (ou Ionosphère/Exosphère) Située au sommet de l'atmosphère, sa température est directement influencée par l'absorption du rayonnement solaire ultraviolet et des rayons X. Elle varie considérablement en fonction de l'activité solaire et de l'alternance jour-nuit. Cette dernière couche est également connue sous les noms d'ionosphère ou d'exosphère [11].

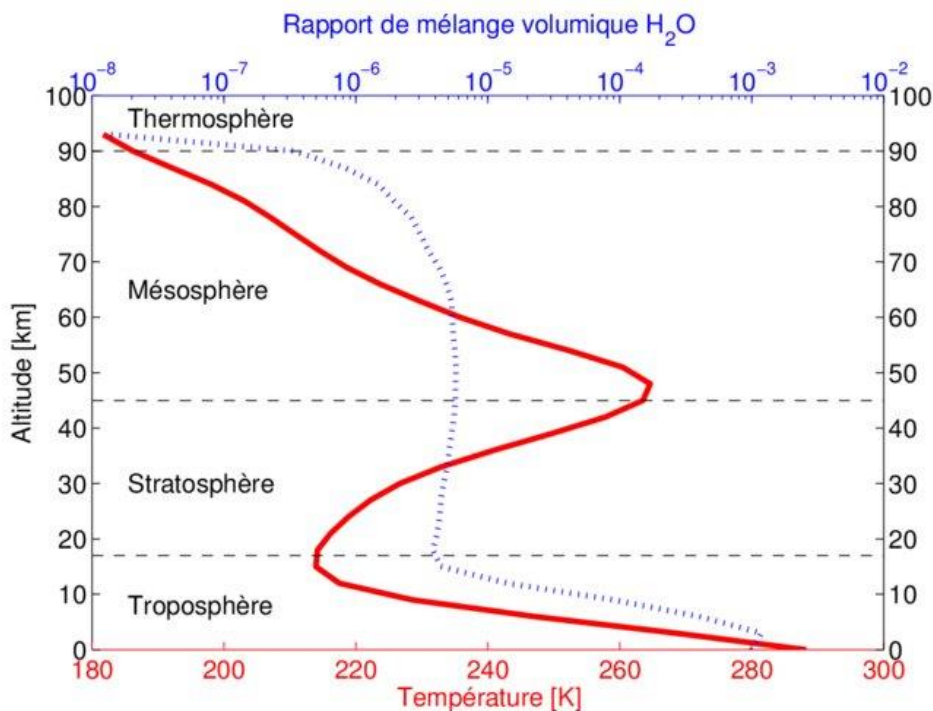


Figure I.5 la structure verticale de l'atmosphère. [12]

#### I.4.2 La masse d'air

La masse gazeuse totale traversée par le rayonnement solaire est estimée à 10 tonnes par mètre carré ( $10\text{t}/\text{m}^2$ ). Cette masse équivaut à une colonne atmosphérique de 7,8 km d'épaisseur si elle était ramenée aux conditions normales de température et de pression (CNTP), soit  $T=0^{\circ}\text{C}$  et  $P=1013\text{mbar}$ . Dans ces conditions normalisées, l'atmosphère serait composée approximativement de 6,2 km d'azote ( $\text{N}_2$ ), 1,7 km d'oxygène ( $\text{O}_2$ ), 74 m d'argon ( $\text{Ar}$ ), 30 m de vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), 24 m de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), 14 cm de néon ( $\text{Ne}$ ), 4 cm d'hélium ( $\text{He}$ ), quelques millimètres de krypton ( $\text{Kr}$ ), de méthane ( $\text{CH}_4$ ), de monoxyde d'azote ( $\text{NO}$ ) et de dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ), et seulement 5 mm d'ozone ( $\text{O}_3$ ).

En prenant comme référence une épaisseur verticale moyenne de l'atmosphère réduite à 7,8 km (CNTP), et en la modélisant comme une couche plane et stratifiée horizontalement, la longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux dont l'inclinaison par rapport à l'horizontale est donnée par l'angle  $h$  peut être exprimée par la relation suivante :

$$OM = \frac{OA}{\sin(h)} \tag{I.12}$$

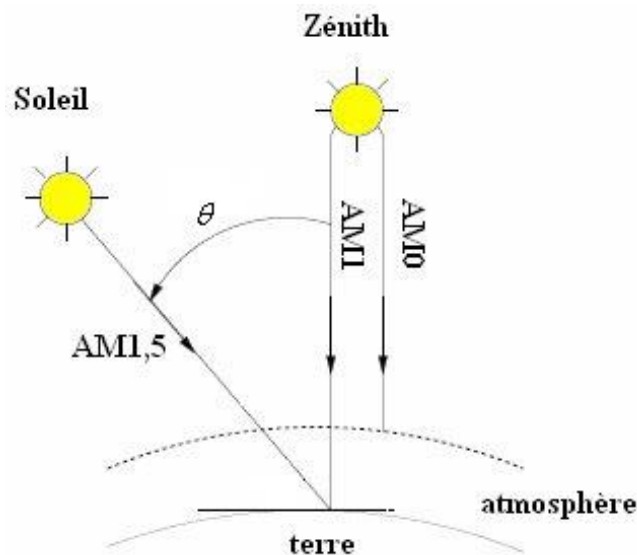
La longueur du rayon qui traverse l'atmosphère, pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit le nombre d'air masse défini par :

$$m = \frac{P}{1013} \frac{1}{\sin(h)} e^{\left(\frac{-z}{7.8}\right)} \tag{I.13}$$

Avec :

$P$  (hPa ou mbar) : pression,  $h$  (degré) : élévation du soleil sur l'horizon ( $90^\circ$  au zénith),  $z$  (Km) : altitude. Dans les conditions normales et au niveau de la mer (ou  $z=0$  Km,  $P=1013$  hPa ou mbar), on obtient l'expression suivante :

$$m = \frac{1}{\sin h} \tag{I.14}$$



**Figure I.6 Masse d'air. [13]**

On cite autres conditions tel que :

- AM0 : Hors atmosphère à haute altitude, on définit les conditions AM0.
- AM1 : Lorsque le soleil est au zénith, on dit que l'on a les conditions AM1 car les rayons lumineux traversent une épaisseur d'atmosphère unité (7.8 Km).

- AM1,5 : Le nombre 1,5 indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1,5 fois supérieur au parcours le plus fois supérieure au parcours le plus court du soleil, c'est- à-dire lorsqu'il est au zénith. AM2 : On obtient les conditions.

- AM2 lorsque le soleil est situé à 30° sur l'horizon. Le groupe de physique du Solide du CNRS a établi des modèles d'irradiante spectrale pour n'importe quelles conditions. [1]

**Tableau I.1. Indique les valeurs de la constante solaire en fonction du nombre d'air  
masse**

AM	0	1	1.5	2	3	4
E (W/m <sup>2</sup> )	1367	931	834	755	610	530

### **I.4.3 Absorption de Le rayonnement solaire**

L'atmosphère terrestre modifie significativement le spectre du rayonnement solaire incident à travers deux processus fondamentaux : l'absorption par les gaz atmosphériques et la diffusion par les molécules d'air, les aérosols et les nuages.

#### **a. L'absorption atmosphérique**

L'absorption du rayonnement solaire par les gaz atmosphériques est un phénomène sélectif, n'affectant que des longueurs d'onde spécifiques. Les principaux gaz responsables de cette absorption sont la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), l'ozone (O<sub>3</sub>), l'oxygène (O<sub>2</sub>) et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). La vapeur d'eau, en tant que constituant atmosphérique majeur après l'azote et l'oxygène, présente plusieurs bandes d'absorption importantes à des longueurs d'onde supérieures à 0,65 µm, avec une bande particulièrement large et forte entre 2,4 et 2,8 µm. Son absorption propre contribue à environ 10 % de l'atténuation totale. L'ozone est le principal absorbant dans la région ultraviolette, caractérisé par une forte bande d'absorption pour les longueurs d'onde inférieures à 0,3 µm et une absorption plus faible entre 0,45 et 0,7 µm. L'oxygène, quant à lui, présente deux bandes d'atténuation étroites mais faibles dans le visible, à 0,69 et 0,76 µm. Enfin, le dioxyde de carbone absorbe le rayonnement dans cinq bandes principales situées à 1,46 ; 1,60 ; 2,04 ; 2,75 et 4,27 µm [14].

#### **b. La diffusion**

La diffusion correspond à une redistribution du rayonnement solaire dans toutes les directions sans modification de longueur d'onde, résultant de son interaction avec les molécules gazeuses, les gouttelettes d'eau et les aérosols. La nature de la diffusion dépend de la taille des particules diffusantes par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, distinguant ainsi deux types principaux : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie.

La diffusion de Rayleigh concerne principalement les molécules d'air pur et sec, telles que l'azote et l'oxygène. Il s'agit d'une diffusion sélective causée par des particules dont le diamètre est nettement inférieur à la longueur d'onde incidente. En moyenne, environ 13 % du rayonnement solaire incident subit ce type de diffusion, compte tenu des différentes longueurs d'onde et de la trajectoire solaire. Le coefficient d'extinction caractéristique de la diffusion de Rayleigh est donné par la relation :

$$Kr(\lambda) = 0.008735 \times \lambda^{-4} \quad (\text{I. 15})$$

#### **I.4.4 Absorption et diffusion du rayonnement solaire dans l'atmosphère**

L'atmosphère terrestre modifie significativement le spectre du rayonnement solaire incident à travers deux processus fondamentaux : l'absorption par les gaz atmosphériques et la diffusion par les molécules d'air, les aérosols et les nuages.

##### **a. L'absorption atmosphérique**

L'absorption du rayonnement solaire par les gaz atmosphériques est un phénomène sélectif, n'affectant que des longueurs d'onde spécifiques. Les principaux gaz responsables de cette absorption sont la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), l'ozone (O<sub>3</sub>), l'oxygène (O<sub>2</sub>) et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). La vapeur d'eau, en tant que constituant atmosphérique majeur après l'azote et l'oxygène, présente plusieurs bandes d'absorption importantes à des longueurs d'onde supérieures à 0,65 µm, avec une bande particulièrement large et forte entre 2,4 et 2,8 µm. Son absorption propre contribue à environ 10 % de l'atténuation totale. L'ozone est le principal absorbant dans la région ultraviolette, caractérisé par une forte bande d'absorption pour les longueurs d'onde inférieures à 0,3 µm et une absorption plus faible entre 0,45 et 0,7 µm. L'oxygène, quant à lui, présente deux bandes d'atténuation étroites mais faibles dans le visible, à 0,69 et 0,76 µm. Enfin, le dioxyde de carbone absorbe le rayonnement dans cinq bandes principales situées à 1,46 ; 1,60 ; 2,04 ; 2,75 et 4,27 µm [14].

##### **b. La diffusion**

La diffusion correspond à une redistribution du rayonnement solaire dans toutes les directions sans modification de longueur d'onde, résultant de son interaction avec les molécules gazeuses, les gouttelettes d'eau et les aérosols. La nature de la diffusion dépend de la taille des particules diffusantes par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, distinguant ainsi deux types principaux : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie.

La diffusion de Rayleigh concerne principalement les molécules d'air pur et sec, telles que l'azote et l'oxygène. Il s'agit d'une diffusion sélective causée par des particules dont le diamètre est nettement inférieur à la longueur d'onde incidente. En moyenne, environ 13 % du

rayonnement solaire incident subit ce type de diffusion, compte tenu des différentes longueurs d'onde et de la trajectoire solaire. Le coefficient d'extinction caractéristique de la diffusion de Rayleigh est donné par la relation :

$$Kr(\lambda) = 0.008735 \cdot \lambda^{-4} \quad (I.6)$$

La diffusion de Mie décrit la diffusion par des particules dont la taille est comparable à celle des longueurs d'onde du rayonnement, comme c'est le cas pour la vapeur d'eau et les aérosols. Le coefficient d'extinction pour ce type de diffusion s'exprime comme suit :

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

Dans cette équation,  $\alpha$  est un paramètre lié à la taille des particules, variant de 0 pour les grosses particules à 4 pour les petites particules, avec une valeur moyenne de 1,3 pour les aérosols. Le paramètre  $\beta$ , quant à lui, est le coefficient de trouble atmosphérique établi par Ångström, qui représente la quantité d'aérosols présente dans l'atmosphère. Sa valeur varie de 0,02 pour un ciel très pur (bleu profond) à 0,2 pour un ciel pollué.

Les phénomènes d'absorption et de diffusion par les nuages réduisent considérablement le rayonnement solaire reçu au sol, en particulier pour les longueurs d'onde supérieures à 1  $\mu\text{m}$ . Les nuages sont constitués de particules dont les dimensions sont notablement supérieures aux longueurs d'onde des rayonnements ultraviolet et visible, ce qui rend la diffusion par les nuages indépendante de la longueur d'onde dans cette partie du spectre solaire. L'atténuation du rayonnement par les nuages dépend essentiellement de leur épaisseur, de leur nature et de leur distribution spatiale. Même une couche nuageuse très fine peut renvoyer une part significative du rayonnement incident vers l'espace. En revanche, l'absorption du rayonnement par les nuages est moins prononcée, les nuages les plus épais n'absorbant qu'environ 8 % de l'énergie incidente [11].

### **I.4.5 Réfraction atmosphérique**

La diminution de la masse volumique de l'air avec l'altitude entraîne une variation progressive de l'indice de réfraction atmosphérique. Ce phénomène provoque une déviation des rayons lumineux, leur faisant suivre une trajectoire dont la concavité est tournée vers le bas. Cette réfraction est la raison pour laquelle la hauteur apparente du Soleil observée depuis la Terre est supérieure à sa hauteur réelle (Figure I-7). De fait, la durée du jour est directement influencée par cette réfraction atmosphérique, en synergie avec les phénomènes crépusculaires [16].

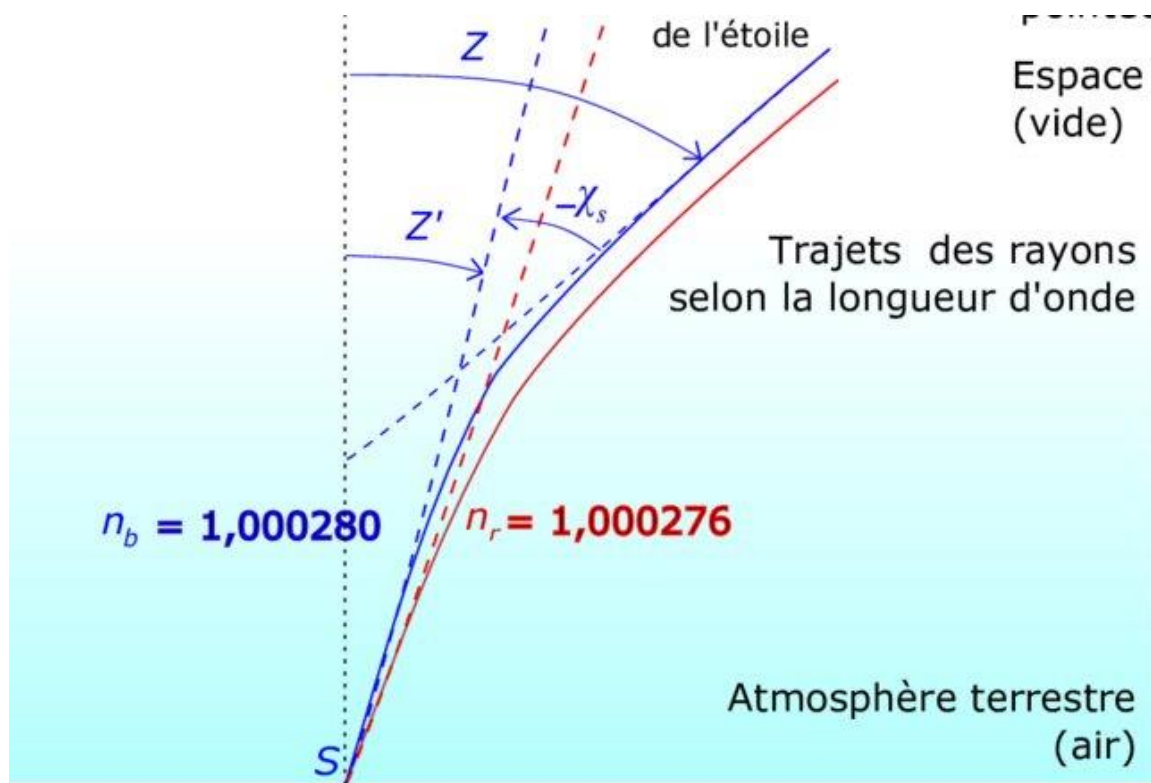


Figure I.7 Réfraction atmosphérique.[15]

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

Le rayonnement électromagnétique émis par le Soleil est fortement altéré lors de son passage à travers l'atmosphère terrestre. Par conséquent, seules ses composantes les plus importantes et actives parviennent jusqu'à la surface du sol : le rayonnement direct et le rayonnement diffus. Une troisième composante est le rayonnement réfléchi par le sol (l'albédo), issu du rayonnement solaire global.

### 1.5.1 Le rayonnement direct

Il s'agit du rayonnement solaire qui atteint directement la surface terrestre sans n'avoir été ni absorbé ni diffusé par l'atmosphère.

### 1.5.2 Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le résultat de la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par les divers constituants gazeux de l'atmosphère, ainsi que par les nuages, les molécules d'air et les poussières. Il est dû à l'absorption et à la diffusion du rayonnement solaire par l'atmosphère, puis à sa réflexion par ces éléments.

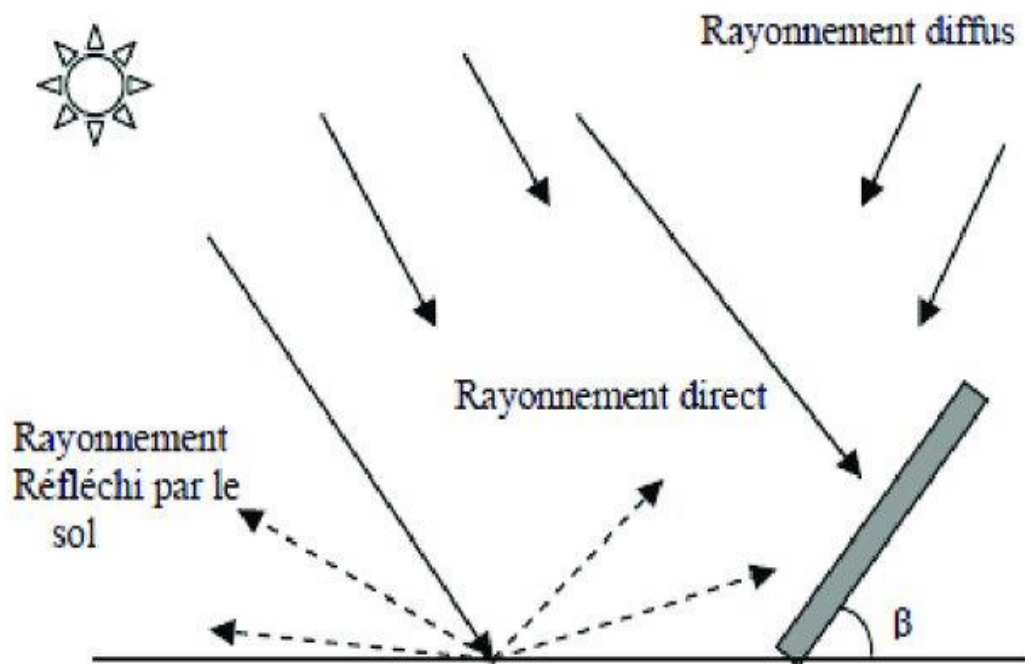
### 1.5.3 Rayonnement réfléchi (Albédo)

L'albédo est défini comme la fraction du rayonnement solaire global réfléchi par une surface. Plus spécifiquement, l'albédo du système Terre-atmosphère représente la portion de l'énergie

solaire renvoyée vers l'espace, sa valeur étant comprise entre 0 et 1. Une surface plus réfléchissante présente un albédo plus élevé. Les contributeurs majeurs à l'albédo terrestre incluent les nuages, ainsi que les surfaces enneigées et glacées. À titre d'exemple, la neige fraîche possède un albédo de 0,87, ce qui signifie qu'elle réfléchit 87 % de l'énergie solaire incidente. À l'opposé, un corps noir parfait, qui absorberait toutes les longueurs d'onde, aurait un albédo nul, tandis qu'un miroir parfait, réfléchissant la totalité des longueurs d'onde sans en absorber, aurait un albédo égal à 1.

### 1.5.4 Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La Figure I.8 illustre schématiquement les différentes composantes du rayonnement solaire tel que reçu au niveau du sol [11].



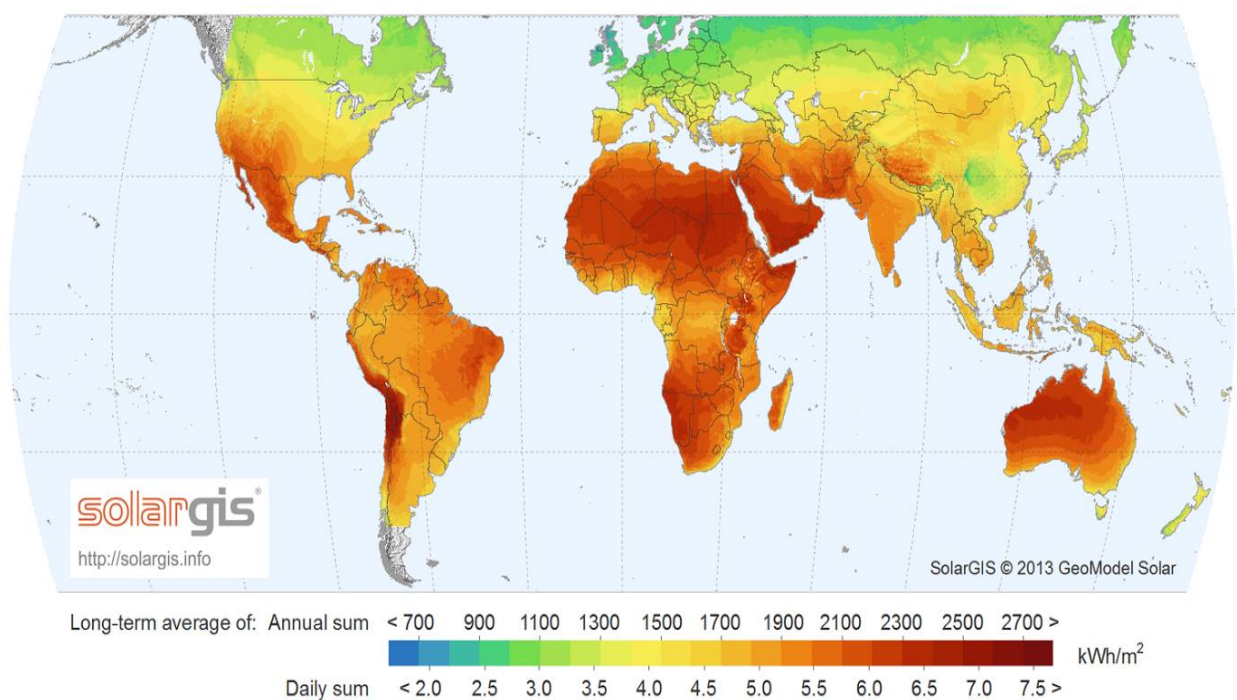
*Figure I.8 composantes de rayonnement solaire reçus au sol. [14]*

### I.8 Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire, souvent désigné par le terme d'insolation solaire ou d'irradiation solaire, représente l'ensemble des données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible sur une période donnée. Cette base de données exhaustive est essentielle pour simuler précisément le fonctionnement des systèmes énergétiques solaires et pour un dimensionnement aussi exact que possible afin de satisfaire une demande énergétique spécifique. Ses applications s'étendent

à des domaines variés tels que l'agriculture, la météorologie, la production d'énergie et la sécurité publique.

De par sa situation géographique, l'Algérie bénéficie de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. Comme l'illustre la Figure I.9, la durée d'ensoleillement annuelle sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2 000 heures et peut atteindre jusqu'à 3 900 heures dans les régions des Hauts Plateaux et du Sahara. L'énergie solaire quotidienne reçue sur une surface horizontale de 1 mètre carré (m<sup>2</sup>) est d'environ 5 kilowattheures (kWh) sur la majeure partie du pays. Cela représente une moyenne annuelle d'environ 1 700 kWh/m<sup>2</sup> dans les régions du Nord et de 2 263 kWh/m<sup>2</sup> dans le Sud. Le potentiel énergétique solaire théorique total pour l'Algérie dépasse les 5 milliards de gigawattheures (GWh).



**Figure I. 9 Carte de l'insolation mondiale montrant la quantité d'énergie solaire (en heures d'éclairement) reçue chaque jour par une surface présentant l'inclinaison optimale pendant le mois le moins ensoleillé de l'année. [17]**

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (DLR) a conclu que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus significatif de l'ensemble du bassin méditerranéen. Ce potentiel est estimé à 169 000 térawattheures par an (TWh/an) pour les applications de solaire thermique à concentration (CSP) et à 13,9 TWh/an pour la production d'énergie photovoltaïque (PV). Cet immense potentiel solaire algérien est l'équivalent de la découverte de 10 grands gisements de gaz naturel comparables à Hassi R'Mel. La répartition de

ce potentiel solaire par région climatique sur le territoire algérien est présentée dans le Tableau I.3, en fonction de l'ensoleillement annuel reçu. [14]

**Tableau I.2. Le gisement solaire en Algérie.**

<b>Régions</b>	<b>Régions côtières</b>	<b>Hauts plateaux</b>	<b>Sahara</b>
<b>Superficie (%)</b>	4	10	86
<b>Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)</b>	2650	3000	3500
<b>Energie moyenne reçue (kWh/m<sup>2</sup> /an)</b>	1700	1900	2650

## **I.9. Conclusion**

À travers ce chapitre, nous avons pu appréhender l'importance fondamentale du Soleil en tant que source principale d'énergie pour notre planète. En partant de sa définition, de ses caractéristiques physiques et de sa structure interne, nous avons ensuite exploré les mécanismes du rayonnement solaire et les interactions de ce rayonnement avec l'atmosphère terrestre. Ces éléments nous ont permis de mieux comprendre les différentes composantes du rayonnement solaire atteignant la surface terrestre. Enfin, l'étude du gisement solaire en Algérie a mis en évidence le fort potentiel énergétique du pays, faisant du territoire algérien un espace favorable à l'exploitation de l'énergie solaire. Cette base théorique constitue un socle essentiel pour aborder les technologies de conversion de l'énergie solaire dans les chapitres suivants.

---

# **Chapitre II :** **détails des calcules**

---

## Chapitre II : détails des calculs

### II.1 Introduction :

Ce chapitre a pour principal objectif de présenter les paramètres astronomiques et géographiques nécessaires à la modélisation du rayonnement solaire global. Il met en évidence les méthodes de calcul de l'irradiation solaire à partir de la position apparente du Soleil et introduit le modèle empirique d'Angström-Prescott, ainsi que son optimisation par l'algorithme PSO, afin d'estimer avec précision l'irradiation reçue au sol sur différents sites en Algérie.

### II.2. repérage des sites géographique :

#### II.2.1 Données astronomiques et paramètres orbitaux

Pour déterminer un site géographique à la surface de la Terre, il est d'abord nécessaire d'étudier la rotation de la Terre autour de son axe ainsi que sa révolution autour du Soleil. Il faut également prendre en compte le mouvement du Soleil dans l'univers.

#### II.2.2 Paramètres de position terrestre (latitude, longitude, inclinaison)

La localisation d'un point sur la surface terrestre repose principalement sur trois paramètres géographiques essentiels :

- **Latitude ( $\varphi$ )** : Elle indique la position d'un point par rapport à l'équateur. La latitude varie de  $0^\circ$  à l'équateur jusqu'à  $+90^\circ$  au pôle Nord et  $-90^\circ$  au pôle Sud. Elle représente donc la distance angulaire entre le point considéré et le plan équatorial. Par convention,  $\varphi > 0$  correspond à l'hémisphère Nord, tandis que  $\varphi < 0$  correspond à l'hémisphère Sud.

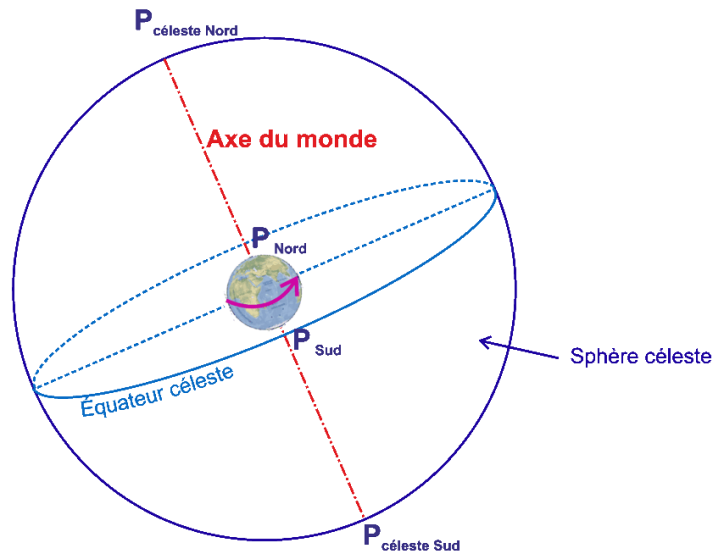
- **Longitude (L)** : Elle localise un point à l'Est ou à l'Ouest par rapport au méridien de référence, le méridien de Greenwich. La longitude varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ , avec  $L > 0$  indiquant une position à l'Est de Greenwich et  $L < 0$  à l'Ouest.

- **Inclinaison de l'axe terrestre (obliquité)** : L'axe de rotation de la Terre est incliné d'un angle constant d'environ  $23^\circ 27'$  par rapport à la normale au plan de l'écliptique. Cette inclinaison est responsable des variations saisonnières et de l'inclinaison des rayons solaires sur la surface terrestre.[18]

#### II.2.3 Mouvement apparent du terre et déclinaison solaire

Dans l'univers, tout est en mouvement permanent. Le mouvement de la Terre peut être décomposé en deux composantes majeures :

- **Rotation de la Terre autour de son axe** : La Terre tourne autour de l'axe passant par les pôles Nord et Sud dans le sens trigonométrique (d'Ouest en Est). Ce mouvement est responsable de l'alternance du jour et de la nuit. Une rotation complète dure environ 24 heures, période définie comme le jour solaire moyen, divisé en 24 heures égales.[19]



*Figure II.1. Rotation de la Terre autour de son axe.*

- **Révolution de la Terre autour du Soleil** : La Terre effectue une révolution complète autour du Soleil en environ 365,25 jours, suivant une trajectoire elliptique où le Soleil occupe un foyer. La distance entre la Terre et le Soleil varie de 147 millions de kilomètres (périhélie, début janvier) à 152 millions de kilomètres (aphélie, début juillet), avec une distance moyenne d'environ 149,5 millions de kilomètres, appelée unité astronomique (UA). Cette variation influence l'intensité de l'irradiation solaire et les saisons.[19]

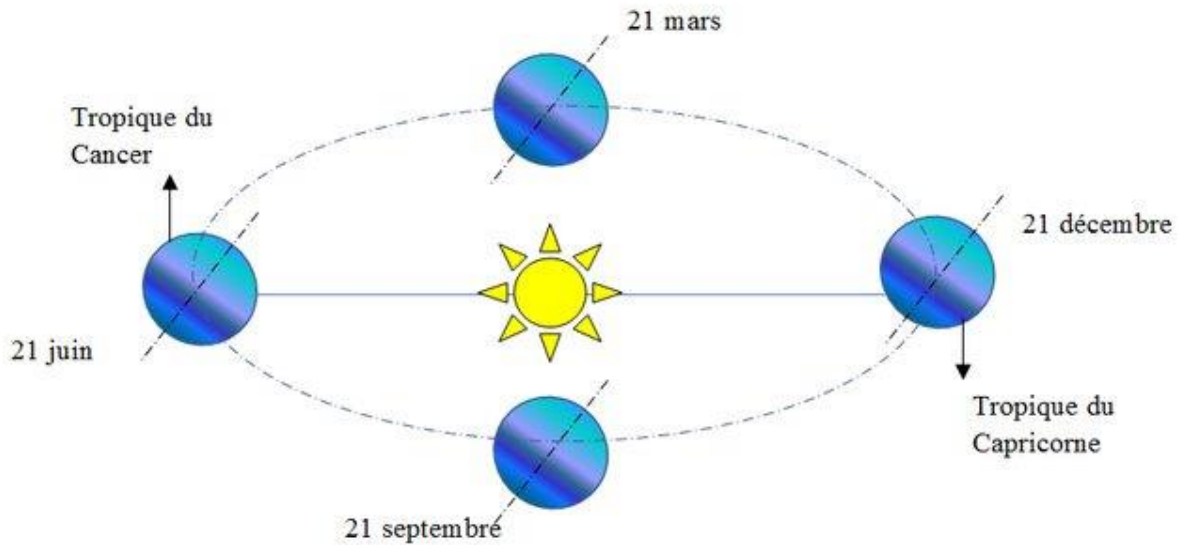


Figure II.2. Mouvements de la terre autour du soleil.[20]

## II.2.4 La déclinaison :

Le plan de l'écliptique, dans lequel la Terre effectue sa révolution, est incliné par rapport au plan équatorial terrestre d'environ  $23^{\circ}27'$  (obliquité). Cette inclinaison entraîne la variation de la déclinaison solaire ( $\delta$ ), définie comme l'angle formé entre le rayon Terre-Soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie cycliquement entre  $+23^{\circ}27'$  au solstice d'été (21 juin) et  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver (21 décembre), s'annulant aux équinoxes de printemps et d'automne (21 mars et 23 septembre). Cette variation est à l'origine de la succession des saisons et de l'alternance des durées du jour et de la nuit au cours de l'année. [21]

la déclinaison est donnée par la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \times \sin[0.980 \times (j + 284)] \quad (II.1)$$

Ou j représente le nombre des jours.

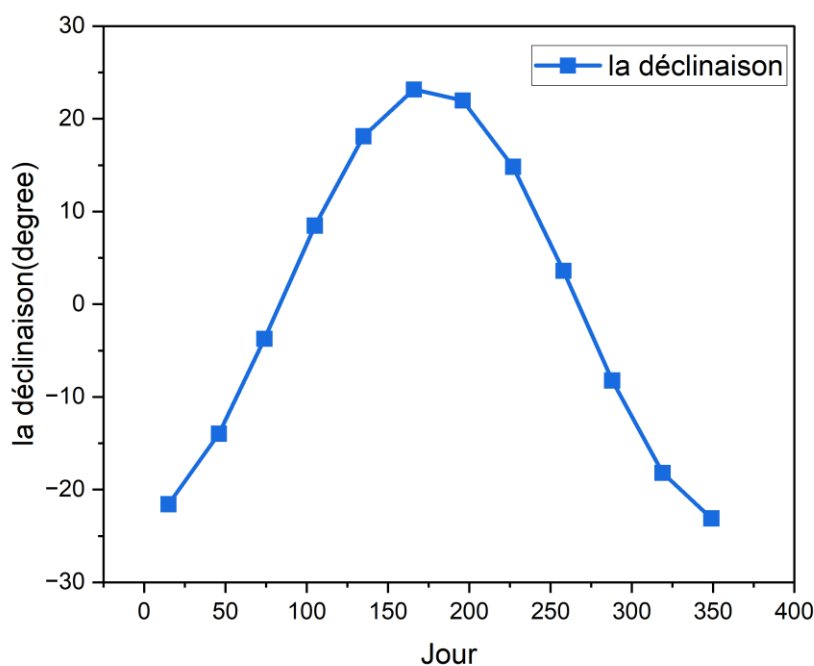


Figure II.3. variation de la déclinaison au cours de l'année.

### II.2.5 Calcul de l'angle horaire

L'angle horaire (noté AH) du Soleil est défini comme l'angle entre le plan méridien du lieu d'observation et le plan contenant la direction du Soleil. En prenant comme référence le méridien de Greenwich, cet angle varie de 0° à 360°. À midi solaire, l'angle horaire est nul, il est négatif le matin avant midi et positif l'après-midi, augmentant d'environ 15° chaque heure. L'angle horaire se calcule généralement à partir de l'heure solaire locale (HSL) selon la formule [22] :

$$AH = 15^\circ \times (HSL - 12) \quad (II.2)$$

où l'heure solaire locale est exprimée en heures. Ainsi, à midi solaire (HSL = 12h), AH = 0°. Une heure avant midi, AH = -15°, et une heure après midi, AH = +15°, ce qui reflète la position apparente du Soleil par rapport au méridien local.

### II.3 Repérage du soleil

Le repérage du Soleil s'effectue à l'aide de deux angles fondamentaux, à savoir l'angle d'élévation (ou hauteur solaire) et l'azimut solaire.

### II.3.1 L'azimut solaire (a)

L'azimut solaire est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (pour l'hémisphère Nord) ou Nord (pour l'hémisphère Sud) et la projection, sur le plan horizontal local, de la droite reliant la Terre au Soleil. Cet angle est compté de 0° à 360°, généralement d'Ouest en Est, ou bien de 0° à 180° à partir du Sud vers l'Ouest.

Il convient de noter que l'azimut solaire est négatif le matin (côté Est), nul ou égal à 180° à midi solaire, et positif l'après-midi (côté Ouest), quel que soit l'hémisphère. L'azimut solaire diffère ainsi de l'azimut géographique, qui est toujours mesuré à partir du Nord dans le sens des aiguilles d'une montre, indépendamment de l'hémisphère d'observation.[23]

### II.3.2 La hauteur solaire (h)

La hauteur solaire est l'angle formé entre la direction du Soleil et sa projection horizontale. Elle est mesurée de 0° à 90° vers le zénith, et de 0° à -90° vers le nadir. On parle parfois de distance zénithale, qui correspond à l'angle complémentaire de la hauteur solaire, vérifiant la relation :

$$z + h = 90^\circ \tag{II.3}$$

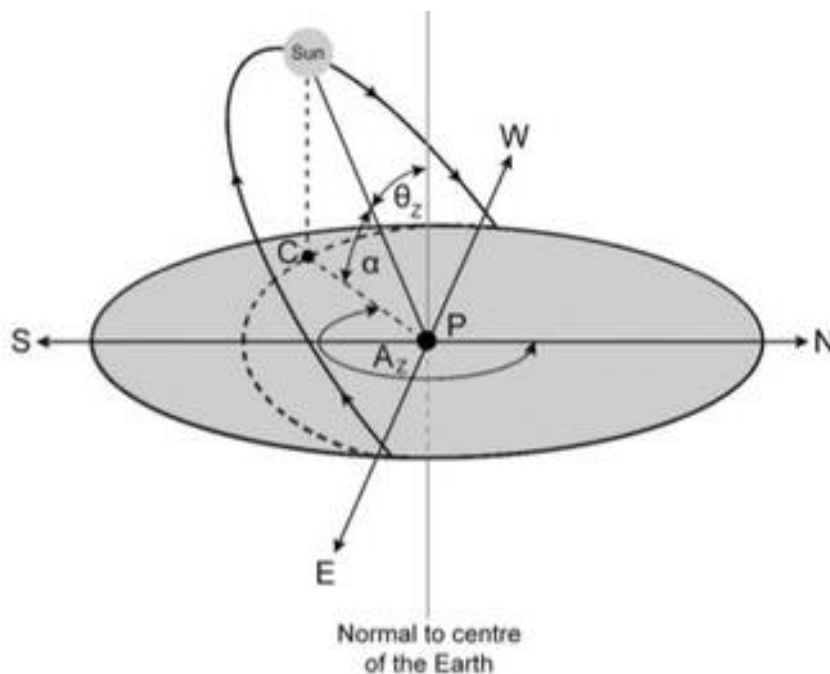


Figure II.4. repérage de soleil.[24]

## II.4 Repérages de soleil et la durée de jour

### II.4.1 Relations de repérage du soleil

La position du Soleil dans le ciel à un instant donné peut être déterminée à partir de deux angles principaux, qui dépendent de paramètres géographiques et astronomiques : la déclinaison solaire ( $\delta$ ), la latitude du lieu ( $L$ ) et l'angle horaire. Ces paramètres permettent de calculer la hauteur solaire et l'azimut solaire selon les relations suivantes [25] :

$$\sin(h) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(W) \quad (II.4)$$

Cette équation exprime la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, c'est-à-dire l'angle entre la direction du Soleil et le plan horizontal local.

L'azimut solaire, qui correspond à la direction du Soleil mesurée sur le plan horizontal, est donné par :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cos(W)}{\cos(h)} \quad (II.5)$$

Cet angle indique l'orientation du Soleil par rapport au Sud (dans l'hémisphère Nord) ou au Nord (dans l'hémisphère Sud).

### II.4.2 La durée du jour

La durée du jour correspond à la période pendant laquelle le Soleil est visible au-dessus de l'horizon, c'est-à-dire entre le lever et le coucher du Soleil. En négligeant les effets de réfraction atmosphérique, cette durée peut être calculée à partir de l'angle horaire au coucher du Soleil, noté  $W_c$ . Au moment du coucher, la hauteur solaire est nulle ( $h=0$ ), ce qui conduit à l'expression suivante pour l'angle horaire au coucher [16] :

$$\cos(W_c) = -\tan(L) \times \tan(\delta) \quad (II.6)$$

L'angle horaire au lever du Soleil est symétrique à celui du coucher, donc :

L'heure solaire locale au lever du Soleil s'exprime par :

$$T_{S\ lever} = 12 + \frac{W_l}{15} = 12 - \frac{W_c}{15} \quad (II.7)$$

La durée du jour  $S_0$  correspond à la différence entre l'heure du coucher et celle du lever :

$$S_0 = T_{S\ coucher} - T_{S\ lever} \quad (II.8)$$

Ainsi, en fonction de la latitude et de la déclinaison solaire, il est possible de déterminer précisément combien de temps le Soleil restera visible chaque jour à un endroit donné.

## **II.5 Composantes du rayonnement solaire**

### **II.5.1 Rayonnement extraterrestre ( $H_0$ ) : calcul et signification**

En dehors de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire incident peut être considéré comme constitué uniquement de sa composante directe. Cela signifie que les effets de diffusion, de réflexion et d'absorption par l'atmosphère sont négligeables à cette altitude. Ainsi, le flux solaire reçu par une surface horizontale à un instant donné dépend uniquement de la position du Soleil par rapport à cette surface, et s'exprime par la relation suivante [16] :

$$I_{oh} = I_{cs} \cdot \sin(h) \quad (II.9)$$

où :

- $I_{oh}$  représente le flux solaire instantané ( $W/m^2$ ) reçu sur une surface horizontale hors atmosphère,
- $I_{cs}$  est la constante solaire (environ  $1367 W/m^2$ , bien que sa valeur varie légèrement au cours de l'année),
- $h$  est la hauteur solaire, c'est-à-dire l'angle entre le Soleil et l'horizon.

### **II.5.2. Irradiation solaire globale journalière hors atmosphère**

Pour obtenir l'irradiation solaire globale journalière  $H_0$  (en  $MJ/m^2/jour$ ) sur une surface horizontale située à la limite supérieure de l'atmosphère, on intègre le flux instantané sur la durée du jour (du lever au coucher du Soleil). Cette intégration donne l'expression suivante [16] :

$$H_0 = \left(\frac{24I_0}{\pi}\right) \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360j}{365}\right)\right) \cdot Z \quad (II.10)$$

où :

- $H_0$  est l'irradiation journalière hors atmosphère sur une surface horizontale,
- $j$  est le jour de l'année (par exemple,  $j=1j = 1j=1$  pour le 1er janvier),
- $I_0$  est la valeur moyenne de la constante solaire (en général  $1367 W/m^2$ ),

- le facteur  $1 + 0.033 \cdot \cos(365/360 \cdot j)$  modélise la variation annuelle de la distance Terre-Soleil,
- $Z$  est un facteur géométrique qui dépend de la latitude, de la déclinaison solaire et de l'angle horaire.

Le paramètre  $Z$  s'exprime comme suit :

$$Z = \cos(l) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \frac{2\pi}{360} \cdot \omega_s \cdot \sin(l) \cdot \sin(\delta) \quad (II.11)$$

où :

$l$  est la latitude du lieu d'observation (en radians),  $\delta$  est la déclinaison solaire, qui varie selon le jour de l'année,  $\omega_s$  est l'angle horaire au coucher du Soleil, donné par la relation mentionnée précédemment (II.3).

Ces relations montrent que l'irradiation solaire globale hors atmosphère dépend fortement de la latitude géographique, de la déclinaison solaire (fonction du jour de l'année), ainsi que de la constante solaire.

### **II.5.3 Fractions d'insolation**

La fraction d'insolation quotidienne, notée  $\sigma$ , est une grandeur mesurable qui représente la proportion du jour pendant laquelle le soleil a effectivement brillé. Elle est déterminée à partir des données enregistrées par un héliographe, un instrument permettant de mesurer la durée effective d'ensoleillement au cours d'une journée.

La fraction  $\sigma$  s'exprime par la relation suivante [26] :

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (II.12)$$

Avec :

- $\sigma$  : Fraction d'insolation quotidienne (sans unité),
- $S$  : Durée d'insolation mesurée (en heures) — c'est le temps pendant lequel le soleil a réellement brillé sans obstruction,
- $S_0$  : Durée maximale d'insolation (en heures), aussi appelée durée astronomique du jour — elle correspond à l'intervalle entre le lever et le coucher du soleil en conditions idéales.

## II.6. Évaluation de l'Irradiation Solaire Globale sur trois Sites Représentatifs en Algérie

### II.6.1 Importance de la connaissance de la distribution du rayonnement solaire

La caractérisation spatiale du rayonnement solaire pour des localisations spécifiques est d'une importance capitale dans plusieurs domaines, notamment en agronomie, en écologie, ainsi que pour la conception et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques et thermiques. En effet, l'irradiation solaire influence directement le rendement des cultures, la gestion des ressources naturelles, ainsi que la production d'énergie renouvelable.

Cependant, dans de nombreux sites, en particulier dans les régions en développement, les données directes de mesure de l'irradiation solaire sont souvent absentes ou insuffisantes. Pour pallier ce manque, des modèles empiriques sont fréquemment utilisés. Ces modèles reposent essentiellement sur des équations de régression établies à partir de la durée d'insolation mesurée localement.

De nombreux modèles ont été proposés dans la littérature pour estimer le rayonnement global, en mobilisant divers paramètres météorologiques. Certains se fondent uniquement sur la durée relative d'insolation, tandis que d'autres incorporent des variables supplémentaires telles que l'humidité relative, ou encore des facteurs géographiques comme la latitude et l'altitude du site.[27]

### II.6.2 Méthodologie et données utilisées pour l'évaluation

Dans le cadre de ce travail, l'évaluation de l'irradiation solaire globale a été réalisée pour deux sites représentatifs en Algérie : Alger, Oran, et Tamanrasset. Ces trois localités ont été choisies en raison de leurs contrastes géographiques et climatiques marqués. Les données utilisées comprennent à la fois la durée d'insolation journalière mesurée et les valeurs enregistrées de l'irradiation solaire globale.

Les coordonnées géographiques de ces stations sont données dans le tableau suivant :

*Tableau II.1. Les coordonnées géographiques de ces stations*

Localisation	Alger	Oran	Tamanrasset
Longitude(deg)	3.15E	0° 38' O	3.31E
Altitude (m)	25	109	1378

Latitude (deg)	36.43	35.63	22.47
----------------	-------	-------	-------

## II.7 Modélisation Empirique de l'Irradiation Solaire Globale

### II.7.1 Introduction aux modèles linéaires

L'estimation de la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface terrestre est essentielle dans de nombreux domaines, notamment l'agriculture, les études climatiques ainsi que les systèmes d'énergie photovoltaïque ou thermique. En l'absence de données de mesures directes pour certains sites, il est courant de recourir à des modèles empiriques fondés sur des paramètres facilement observables, tels que la durée d'insolation.

Parmi les modèles actuellement utilisés, les relations linéaires basées sur l'irradiation globale et la durée d'ensoleillement sont les plus simples à mettre en œuvre, tout en demeurant efficaces. Ces relations sont particulièrement pertinentes dans les zones géographiques où les conditions climatiques sont comparables à celles ayant servi à la détermination des coefficients du modèle. En raison de sa simplicité et de sa performance, le modèle d'Angström-Prescott est celui qui est le plus largement employé.[28]

### II.7.2 Modèle d'Angström-Prescott

Proposé initialement par Angström (1924) et amélioré par Prescott, ce modèle exprime le rapport entre le rayonnement solaire global et le rayonnement extraterrestre, en fonction de la fraction d'insolation [28] :

$$\frac{H}{H_0} = a_1 + b_1 \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (II.13)$$

où :

- $H$  : Irradiation solaire globale moyenne sur un plan horizontal ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \text{j}^{-1}$ ),
- $H_0$  : Irradiation solaire extraterrestre sur le même plan,
- $S$  : Durée effective d'ensoleillement (heures),
- $S_0$  : Durée maximale d'ensoleillement (heures), calculée selon :

$$S_0 = \frac{2}{15} \cdot w \quad (II.14)$$

L'angle horaire  $\omega$  est donné par l'expression suivante :

$$w_c = \cos^{-1} \left( \frac{\sin(h_0) - \sin(L) \cdot \sin(\delta)}{\cos(L) \cdot \cos(\delta)} \right) \quad (II.15)$$

Avec :

- $h_0$  : Hauteur solaire à l'horizon (°),
- $L$  : Latitude du site (°),
- $\delta$  : Déclinaison solaire (°).

### II.7.3 Évaluation de la performance des modèles

L'efficacité des modèles est évaluée à l'aide d'indicateurs statistiques couramment utilisés en modélisation :

**a. Erreur Absolue Moyenne (MAE) :**[28]

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i| \quad (II.16)$$

**b. Erreur Moyenne de Biais (MBE) :**

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (II.17)$$

**c. Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) :**

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (II.18)$$

L'erreur relative est définie par :

$$d_i = (H_{i,m} - H_{i,c}) \cdot \left( \frac{100}{H_{i,m}} \right) \quad (II.19)$$

Avec :

- $H_{i,m}$  : Valeur mesurée,
- $H_{i,c}$  : Valeur calculée.

## II.7.4 Modèles paramétriques élargis

D'autres modèles empiriques ont été développés en intégrant davantage de paramètres météorologiques afin d'améliorer la précision des estimations.[29]

### a. Modèle 2 : Ensoleillement et température moyenne

Ce modèle inclut la température moyenne de l'air, normalisée par rapport à sa valeur maximale :

$$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \sigma + c \cdot T_n \quad (II.20)$$

- $\sigma = \frac{s}{s_0}$ ,
- $T_n = \frac{T}{T_{\max}}$  : Température moyenne normalisée.

### b. Modèle 3 : Ensoleillement et humidité relative

Ce modèle utilise la fraction d'ensoleillement ainsi que l'humidité relative moyenne de l'air :

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

- R : Humidité relative moyenne (%).

### c. Modèle 4 : Modèle combiné

Enfin, le modèle le plus complet intègre trois variables météorologiques :

$$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \sigma + c \cdot T_n + d \cdot R \quad (II.22)$$

où les coefficients a, b, c, d sont déterminés par la méthode des moindres carrés.

## II.8 Optimisation par l'essai de particules(PSO)

L'optimisation par essaim de particules (*PSO: Particle Swarm Optimisation* ) est une technique évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Le degré d'optimalité est mesuré par une fonction fitness (aptitude) définie par l'utilisateur [32]. La *PSO* diffère des autres méthodes de calcul évolutionnaire de façon que les membres de la population appelés particules sont dispersés dans l'espace du problème [29-32]. Le comportement de l'essaim doit être décrit comme s'il

s'agissait du comportement d'une seule particule. Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Les particules sont les individus et elles se déplacent dans l'espace de recherche. Ce processus est basé sur deux règles :

- Chaque particule est dotée d'une mémoire qui lui permet de mémoriser le meilleur point par lequel elle est déjà passée et elle a tendance à retourner vers ce point.
- Chaque particule est informée du meilleur point connu au sein de son voisinage et elle va tendre à aller vers ce point.

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre elles. La nouvelle position d'une particule est déterminée en fonction de sa propre valeur et de celle de ses voisines.

Soit  $X_i(t)$  la position de la particule  $P_i$  au temps  $t$  sa position est modifiée en ajoutant une vitesse  $V_i(t)$  à sa position courante. Les équations formalisant le mouvement d'une population composée de  $N$  particules sont données par [29] :

$$V_i(t + 1) = w V_i(t) + \varphi_1 R_1(t) (X_{P_{bi}}(t) - X_i(t)) + \varphi_2 R_2(t) (X_{P_g}(t) - X_i(t)) \quad (II. 23)$$

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t) \quad (II. 24)$$

Chaque particule  $P_i (i = 1, 2, 3 \dots N)$  dans l'essaim est caractérisée par :

- Sa position courante  $X_i(t)$ , qui réfère à une solution candidate pour le problème d'optimisation considéré à l'itération  $t$ .
- Sa vitesse  $V_i(t)$
- La meilleure position  $X_{P_{bi}}(t)$  identifiée durant sa trajectoire antécédente. Soit  $X_{P_g}(t)$  la meilleure position globale identifiée dans le processus de recherche pour toutes les particules dans la population. La position optimale est mesurée avec la fonction fitness défini suivant le problème d'optimisation.
- $R_1(t)$  et  $R_2(t)$  sont des variables aléatoires générées d'une distribution uniforme dans l'intervalle  $[0, 1]$ .

-  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont deux constantes d'accélération régulant les vitesses relatives par rapport aux meilleurs positions locales et globales.

- L'inertie  $w$  est utilisée comme un compromis entre l'exploration locale et globale de l'essaim.

L'équation (II.23) permet le calcul de la vitesse à l'itération  $t + 1$  pour chaque particule en combinant linéairement la position et la vitesse (à l'itération  $t$ ) et les distances qui séparent la position courante de la particule de son antécédente meilleure position et la meilleure position globale, respectivement. La mise à jour de la position de la particule est réalisée à travers l'équation (IV.4). Les équations (IV.4) et (IV.5) sont itérées jusqu'à ce que la convergence soit atteinte [30].

Notre objectif est de trouver les valeurs optimales des paramètres ( $a_1$  et  $b_1$  qui sont les particules) de l'équation d'Angstrom-Prescott, permettant d'obtenir une estimation précise de l'irradiation solaire globale. Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi de minimiser l'erreur entre les valeurs expérimentales de l'irradiation solaire globale et les valeurs calculées par la relation d'Angstrom-Prescott selon la fonction objective (*fitness*) définie par le critère suivant :

$$J = |y_{cal_{exp}}| \tag{II. 25}$$

### **II.8.1 Mise en œuvre de l'algorithme PSO :**

Les étapes pour optimiser les paramètres ( $a, b$ ) sont les suivantes :

1- on initialise aléatoirement les paramètres  $a$  et  $b$  dans les contraintes suivantes :

$$0 \leq a \leq 1$$

$$0 \leq b \leq 1$$

2- on détermine la valeur minimale de fonction *fitness*  $F$ , qui peut être formulée comme suit :

$$F(a_i, b_i) = \min(J) \quad i = 1, 2, \dots, N_{max} \tag{II. 26}$$

$N_{max}$  : L'itération maximale.

3- on renvoie la fonction *fitness* au programme de **PSO**.

4- le programme de **PSO**, évaluer la fonction  $F$  pour garder la meilleure valeur de  $a$  et  $b$ , vérifier l'itération actuelle par rapport à l'itération maximale pour relancer une nouvelle itération

et modifier les valeurs de a et b au moyen des équations (II.24) et (II.25) pour aller à une autre itération.

Si l'itération courante devient égale à l'itération maximale la procédure s'arrête, sinon la procédure continue en revenant au point 2.

Les valeurs choisies des paramètres de PSO sont :  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0.1$ ,  $N_{max}$  et  $w = 1$ .

Après avoir appliqué l'algorithme d'optimisation **PSO**, les valeurs de a et b pour les zones considérées, sont fixées a différentes valeurs respectivement.

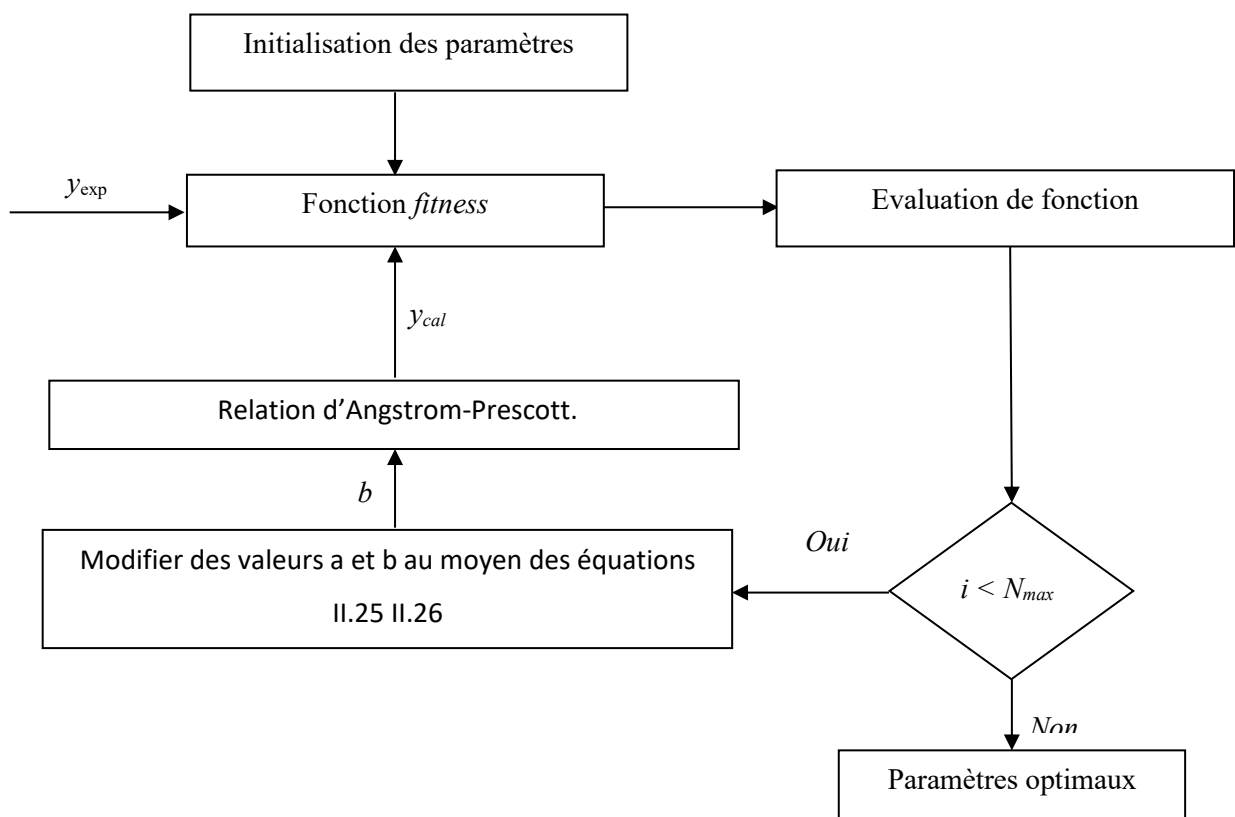
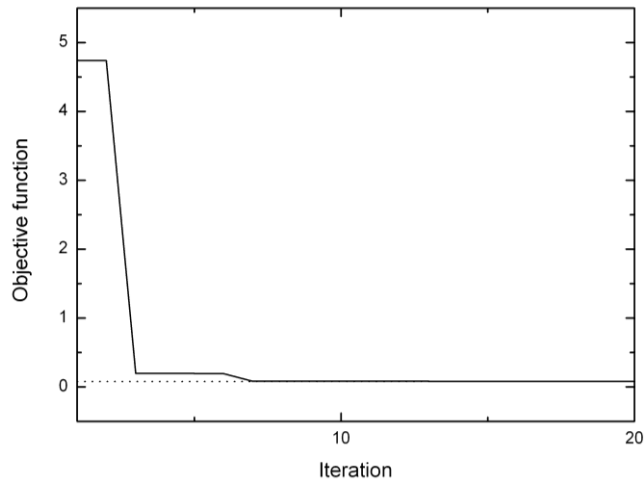


Figure II.5. Organigramme d'optimisation des paramètres de la relation d'Angstrom.

Ainsi, l'évolution de la fonction fitness est représentée par la figure (II.5).



**Figure.II.6 Evolution de la fonction objective.**

La fonction fitness atteint une valeur finie puisque l'écart de l'erreur est convergé à zéro.

## II.8 Méthodes de mesure du rayonnement solaire

La mesure de l'irradiation solaire globale repose principalement sur l'utilisation d'un capteur actinométrique spécifique : le pyranomètre. Cet instrument intègre une thermopile qui génère une tension proportionnelle à l'énergie reçue. Lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire, la face supérieure de la thermopile s'échauffe, tandis que la face inférieure, protégée de la lumière, sert de référence thermique. Cette différence de température permet d'évaluer précisément le flux d'irradiation globale incident sur une surface horizontale.

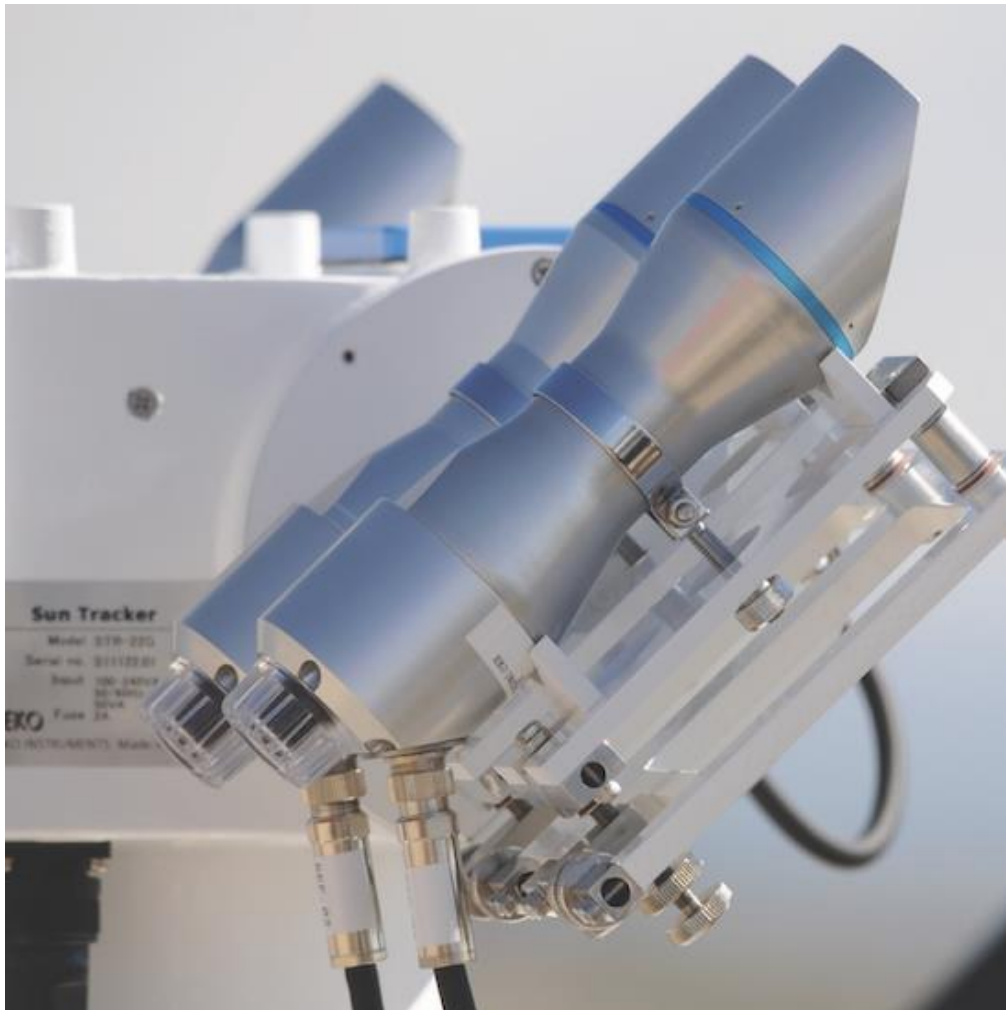
D'autres capteurs, moins répandus, permettent de mesurer séparément les composantes directes et diffuse du rayonnement [31]:

**a. Le pyranomètre ombré :** est muni d'un anneau métallique fixe qui masque le disque solaire, empêchant ainsi la réception du rayonnement direct. Il ne mesure donc que la composante diffuse du rayonnement global.



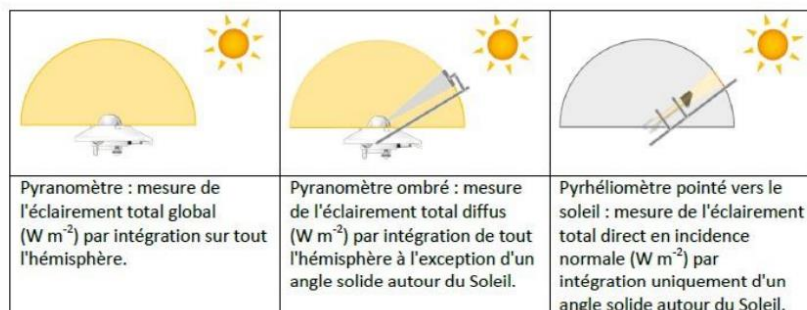
*Figure.II.7. Le pyranomètre ombré*

**b. Le pyréliomètre** : quant à lui, est équipé d'un système de suivi solaire automatique permettant de maintenir le capteur constamment orienté vers le soleil. Il est exclusivement dédié à la mesure du rayonnement direct.



**Figure II.8. Pyrhéliomètre**

Ces instruments, par leur nature et leur complexité, sont relativement rares dans les réseaux de mesure. Leur disponibilité décroît en fonction du niveau de sophistication de l'appareil. Par exemple, sur l'ensemble du réseau de stations météorologiques de Météo-France, on recense environ 450 pyranomètres contre un seul pyrhéliomètre en France métropolitaine[31].



**Figure II.9. Exemples de capteurs par ordre croissant de complexité et de précision dans la caractérisation du rayonnement solaire.**

- Pyranomètre
- Pyranomètre ombré
- Pyrhéliomètre

Pour les sites dépourvus de dispositifs de mesure directe, il est possible d'estimer l'irradiation à l'aide d'interpolations ou extrapolations basées sur les données des stations les plus proches. Toutefois, il convient de noter que la précision de ces estimations diminue significativement avec l'éloignement géographique de la station de référence.

## **II.9 Conclusion**

Ce chapitre a présenté les bases de la modélisation du rayonnement solaire ainsi que les méthodes de calcul associées. Après avoir décrit les instruments de mesure (pyranomètre, pyrhéliomètre, héliographe), nous avons montré l'importance des modèles empiriques, notamment celui d'Angström-Prescott, pour estimer l'irradiation solaire dans les régions où les données ne sont pas disponibles.

Nous avons ensuite examiné plusieurs modèles basés sur des variables climatiques telles que la durée d'insolation, la température de l'air et l'humidité relative. La performance de ces modèles a été évaluée à l'aide d'indicateurs statistiques comme le MAE, le MBE et le RMSE.

---

# **Chapitre III :**

## **Résultats et discussion**

---

## Chapitre III : Résultats et discussion

### III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus à partir de notre méthode de calcul de l'irradiation globale sur une surface horizontale, appliquée aux trois sites étudiés : Alger, Oran et Tamanrasset. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle d'Angström-Prescott, puis nous avons comparé les résultats obtenus avec les données mesurées disponibles.

### III.2. Choix des jours types du mois :

Pour estimer de manière fiable l'irradiation solaire journalière moyenne reçue hors atmosphère, il est courant d'utiliser un jour représentatif, appelé jour type du mois. Ce jour est choisi de manière à ce que ses caractéristiques (par exemple l'irradiation, la position du soleil, etc.) soient aussi proches que possible de la moyenne mensuelle réelle. En d'autres termes, il s'agit d'un jour moyen symbolique, permettant de simplifier les calculs sans sacrifier la précision.

Le concept de "jour type du mois" a été introduit par Klein, et repose sur une liste de jours standardisés pour chaque mois de l'année. Ces jours sont définis par leur position dans l'année (numéro du jour dans le calendrier julien) et sont souvent choisis autour du 15 de chaque mois, car cette date est généralement représentative de la période mensuelle.

**Tableau III.1. le jour type de chaque mois.**

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc
Jour type	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10
Numéro du jour ( <i>Hd</i> )	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

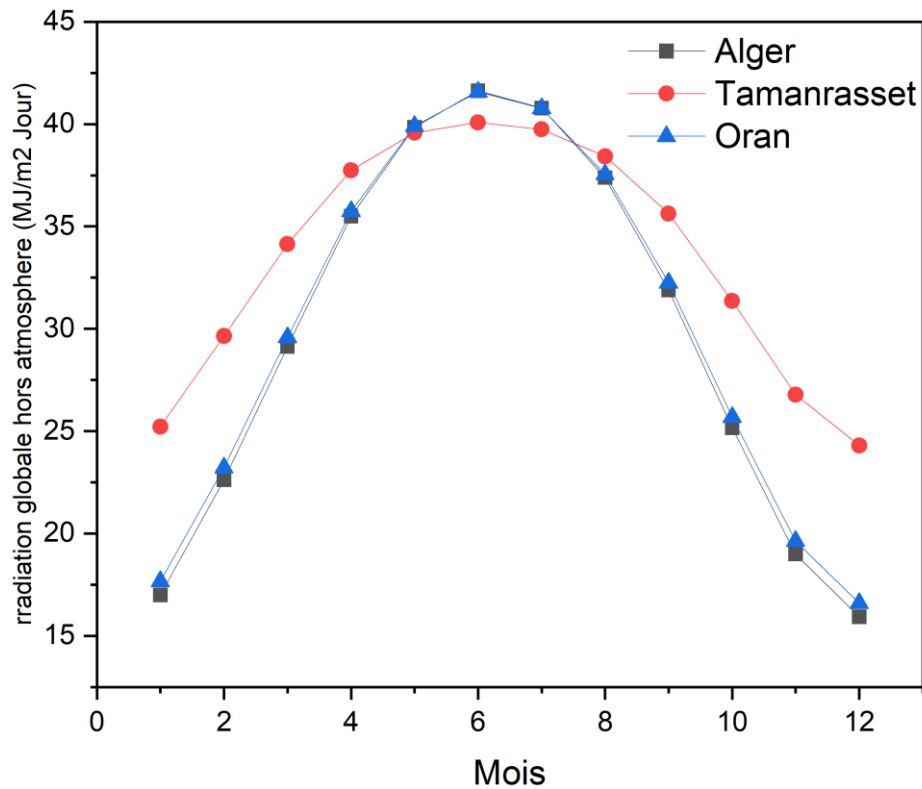
### III.3 Estimation de l'irradiation solaire globale hors atmosphère :

Les valeurs de l'irradiation solaire globale hors atmosphère (également appelée irradiation extraterrestre) ont été calculées pour les trois sites et sont représenté dans le tableau (III.2) étudiés en Algérie, à savoir Alger, Oran et Tamanrasset, en utilisant l'équation (II.10). Ces résultats constituent une base de comparaison essentielle pour évaluer la précision des modèles appliqués et analyser le potentiel solaire de chaque région.

**Tableau III.2. Irradiation solaire hors atmosphérique pour les trois site (MJ/m2. jour)**

Mois	Alger	Tamanrasset	Oran
JAN	16.995	25.217	17.655
FEV	22.620	29.645	23.211
MAR	29.136	34.138	29.589
AVR	35.496	37.745	35.744
MAI	39.846	39.576	39.896
JUI	41.626	40.076	41.571
JUL	40.780	39.737	40.767
AOU	37.389	38.426	37.542
SEP	31.890	35.630	32.250
OCT	25.157	31.351	25.692
NOV	18.997	26.782	19.633
DEC	15.931	24.297	16.597

La figure ci-dessus (III.1) montre la différence entre les trois sites. En analysant plus en détail les données du tableau, on observe des profils climatiques distincts qui reflètent parfaitement la géographie variée de l'Algérie.



**Figure III.1. L'irradiation solaire globale pour les 3 sites.**

Les villes côtières, Alger et Oran, affichent des courbes annuelles quasiment identiques, typiques d'un climat méditerranéen. Les valeurs minimales sont enregistrées au cœur de l'hiver, en décembre, avec environ 15.9 pour Alger et 16.6 pour Oran. À partir de là, on assiste à une augmentation rapide et continue tout au long du printemps, pour culminer en juin avec des pics respectifs de 41.6 et 41.5. S'ensuit une descente progressive durant l'automne pour retrouver les niveaux bas de l'hiver. L'amplitude entre la valeur la plus basse de l'hiver et la plus haute de l'été y est donc très marquée, supérieure à 25 points, ce qui témoigne de saisons bien distinctes.

Le site de Tamanrasset, situé au cœur du Sahara, présente un profil radicalement différent. La caractéristique la plus frappante est son niveau de base en hiver, qui est bien plus élevé. Le minimum, atteint également en décembre, est de 24.3, une valeur que les villes du nord n'atteignent qu'au milieu du printemps. Bien que la valeur maximale en été, autour de 40.1, soit légèrement inférieure à celle d'Alger et d'Oran, la variation saisonnière est beaucoup moins prononcée. L'écart entre le minimum hivernal et le maximum estival n'est que d'environ 16 points. Cela indique une stabilité beaucoup plus grande tout au long de l'année, caractéristique des climats arides et plus proches des tropiques, avec des hivers particulièrement doux.

### III.4 Utilisation du modèle pour les divers sites en utilisant la méthode des moindres carres

Ce travail utilise les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire globale et de la durée d'ensoleillement journalier pour trois localités algériennes : Alger, Oran et Tamanrasset.

Les données sur la durée d'ensoleillement couvrent une période de 25 ans, tandis que celles sur l'irradiation solaire s'étendent sur au moins une décennie. Les mesures de l'irradiation ont été obtenues via des pyranomètres (Robitzsh et Kipp-Zonen), et celles de la durée d'insolation proviennent d'héliographes de type Campbell-Stokes.

Enfin, les données sur la durée d'insolation permettent de calculer la fraction d'insolation, définie comme le rapport entre la durée d'ensoleillement mesurée et la durée astronomique du jour.

**Tableau III.3. La fraction d'insolation pour les trois sites.**

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct.	Nov	Déc
<b>Alger</b>	0.48	0.56	0.60	0.61	0.71	0.71	0.78	0.8	0.74	0.62	0.51	0.49
<b>Tamanrasset</b>	0.78	0.81	0.84	0.77	0.76	0.96	0.75	0.77	0.73	0.77	0.81	0.97
<b>Oran</b>	0.53	0.53	0.54	0.63	0.69	0.69	0.80	0.79	0.72	0.66	0.53	0.53

#### a. Alger :

Les résultats de calcul de l'irradiation solaire globale ( $H_{calc}$ ) pour Alger, présentés dans la figure III.2, sont très proches des valeurs mesurées ( $H_{mesure}$ ) pour la majeure partie de l'année. On observe une excellente concordance entre  $H_{calc}$  et  $H_{mesure}$  de janvier jusqu'à fin avril, ainsi que de septembre à décembre. Un écart remarquable est cependant noté durant les mois de mai, juin, juillet et août, où  $H_{calc}$  a tendance à légèrement sous-estimer l'irradiation par rapport à  $H_{mesure}$ , avec un pic de divergence autour du jour 200 (fin juillet - début août) où  $H_{mesure}$  atteint son maximum annuel.

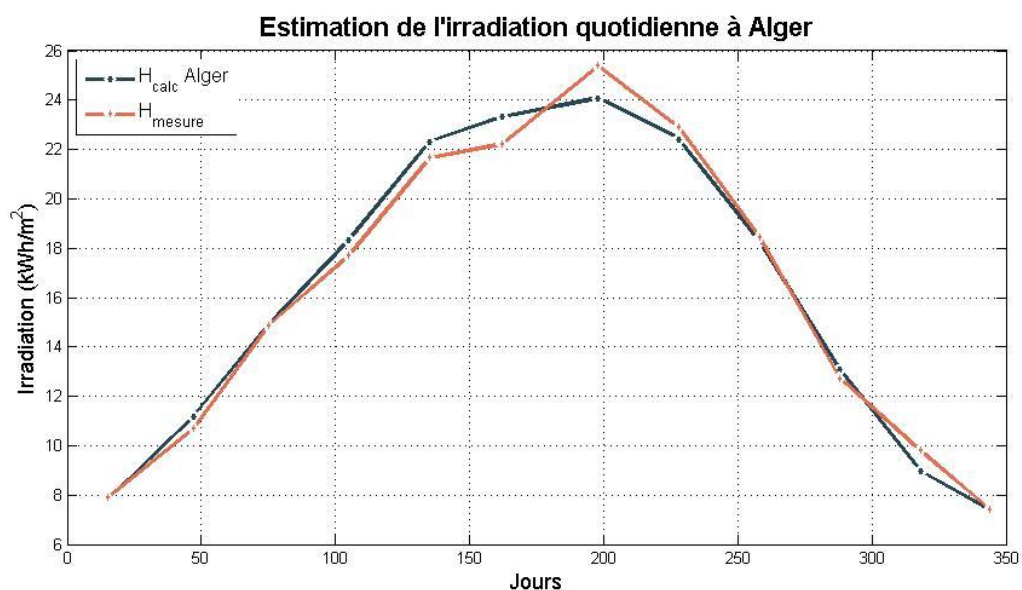


Figure III.2. L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Angström –Prescott.

Tableau III.4. la déclinaison = delta ,  $H_0$ ,  $H$  calculer,  $W(\text{rad})$  pour Alger.

Mois	Delta	$H_0$	$H$ calculer	$W(\text{rad})$
JAN	-21.2727	16.9958	7.8038	1.2762
FEV	-12.6089	22.6201	11.178	1.4032
MAR	-2.04197	29.1360	14.909	1.5442
AVR	9.480770	35.4962	18.319	1.6956
MAI	18.67362	39.8467	22.310	1.8255
JUI	23.03792	41.6264	23.307	1.8934
JUL	21.34557	40.7807	24.084	1.8664
AOU	13.98931	37.3898	22.409	1.7576
SEP	3.343031	31.8907	18.275	1.6143
OCT	-8.21774	25.1571	13.094	1.4629
NOV	-18.0408	18.9973	8.9725	1.3254
DEC	-22.8406	15.9317	7.3850	1.2513

**b. Oran :**

La figure III.3 montre une bonne corrélation entre les valeurs calculées ( $H_{\text{calc}}$ ) et mesurées ( $H_{\text{mesure}}$ ) de l'irradiation solaire pour Oran. Similaire à Alger, la période de janvier à avril et de septembre à décembre présente une forte concordance. Un écart plus prononcé est visible durant

la période estivale, spécifiquement de fin mai à début septembre. Dans cette période,  $H_{calc}$  semble généralement sous-estimer légèrement  $H_{mesure}$ , bien que l'on observe un rapprochement des courbes autour du jour 200 (fin juillet - début août), où  $H_{mesure}$  est à son apogée.

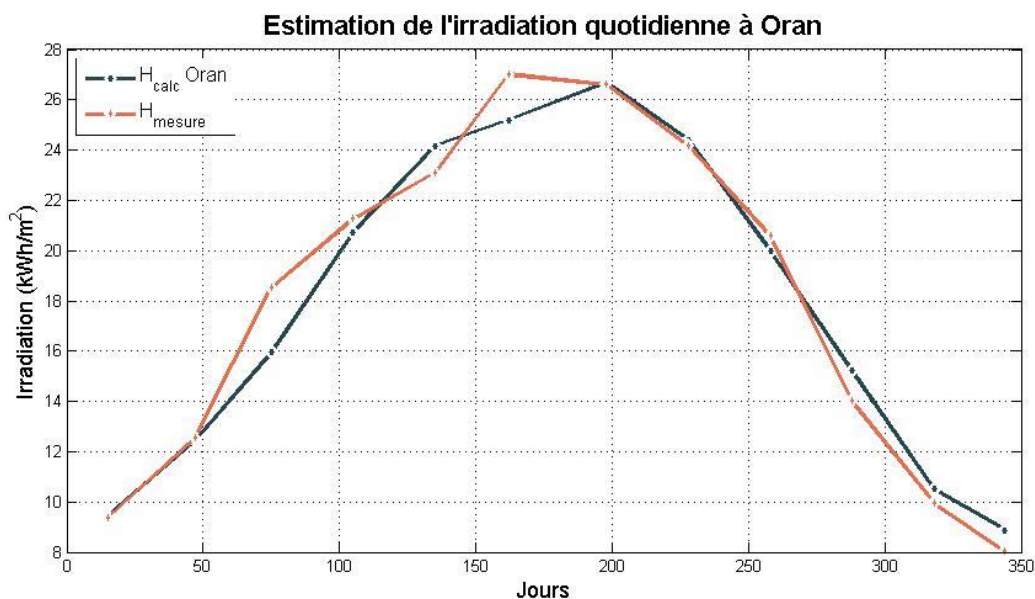


Figure III.3. L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Oran par le modèle de type d'Angström –Prescott.

Tableau III.5. la déclinaison = delta ,  $H_0$ ,  $H$  calculer,  $W(rad)$  pour Oran.

Mois	Delta	$H_0$	$H$ calculer	$W(rad)$
JAN	-21.2727	17.6559	9.44339	1.28799
FEV	-12.6089	23.2116	12.4148	1.40977
MAR	-2.04197	29.5894	15.9573	1.54523
AVR	9.480770	35.7441	20.7030	1.69077
MAI	18.67362	39.8960	24.1693	1.81545
JUI	23.03792	41.5715	25.1843	1.88051
JUL	21.34557	40.7670	26.6855	1.85468
AOU	13.98931	37.5426	24.4084	1.75031
SEP	3.343031	32.2508	19.9668	1.61267
OCT	-8.21774	25.6928	15.2231	1.46710
NOV	-18.0408	19.6334	10.5010	1.33517
DEC	-22.8406	16.5977	8.87739	1.26413

c. Tamanrasset :

Pour Tamanrasset, la figure III.4 révèle également une bonne approximation entre  $H_{calc}$  et  $H_{mesure}$ . La concordance est particulièrement forte en début et fin d'année (janvier-février et octobre-décembre). Cependant, un écart notable est discernable durant la période allant de mars à septembre. Plus précisément, on constate que  $H_{calc}$  sous-estime l'irradiation mesurée en mars et avril, puis la surestime de mai à juillet. Un point de divergence important apparaît autour du jour 100 (mi-avril) où  $H_{mesure}$  présente un pic significativement plus élevé que  $H_{calc}$ . Les courbes se rapprochent ensuite vers la fin de l'année.

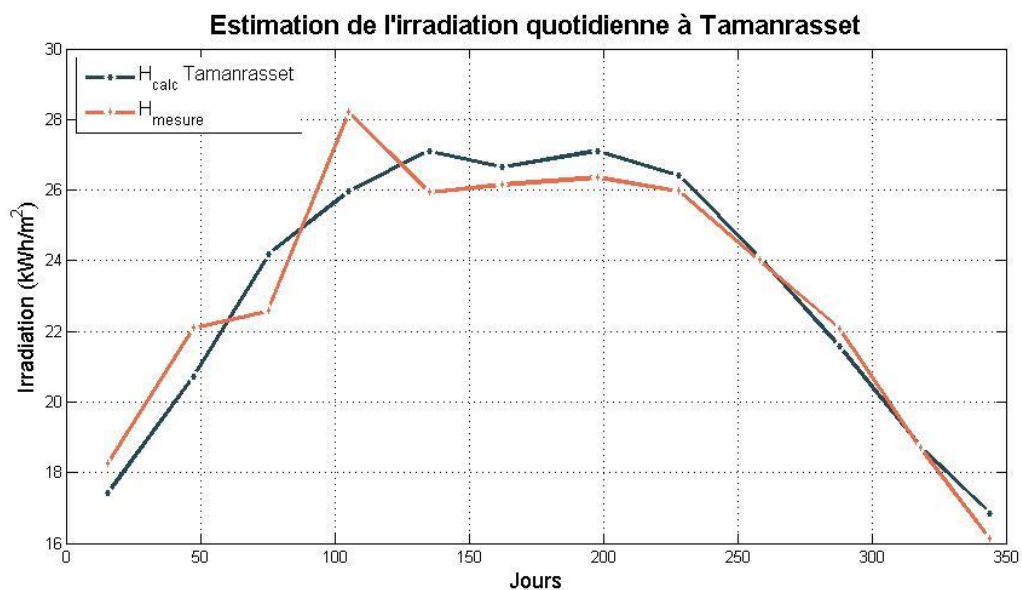


Figure III.4. L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Angström –Prescott.

Tableau III.6. la déclinaison = delta ,  $H_0$ ,  $H$  calculer,  $W(rad)$  pour Tamanrasset.

Mois	Delta	$H_0$	$H$ calculer	$W(rad)$
JAN	-21.2727	25.2178	17.4173	1.4065
FEV	-12.6089	29.6450	20.7315	1.4767
MAR	-2.04197	34.1384	24.1691	1.5558
AVR	9.480770	37.7457	25.9611	1.6409
MAI	18.67362	39.5768	27.1065	1.7132
JUI	23.03792	40.0761	26.6395	1.7503
JUL	21.34557	39.7374	27.1019	1.7356
AOU	13.98931	38.4267	26.4295	1.6756
SEP	3.343031	35.6301	24.0951	1.5953

OCT	-8.21774	31.3511	21.5630	1.5101
NOV	-18.0408	26.7826	18.7298	1.4335
DEC	-22.8406	24.2978	16.8520	1.3929

### III.5 Utilisation du modèle pour les divers sites en utilisant la méthode PSO

#### a. Alger

Les résultats de l'irradiation solaire globale ( $H_{\text{calc}}$  (PSO)) pour Alger montrent une amélioration significative de la concordance avec les valeurs mesurées ( $H_{\text{mesure}}$ ). La courbe  $H_{\text{calc}}$  (PSO) suit de très près la courbe  $H_{\text{mesure}}$  tout au long de l'année. Les écarts observés dans les figures précédentes, notamment durant les mois d'été (mai à août), sont considérablement réduits.

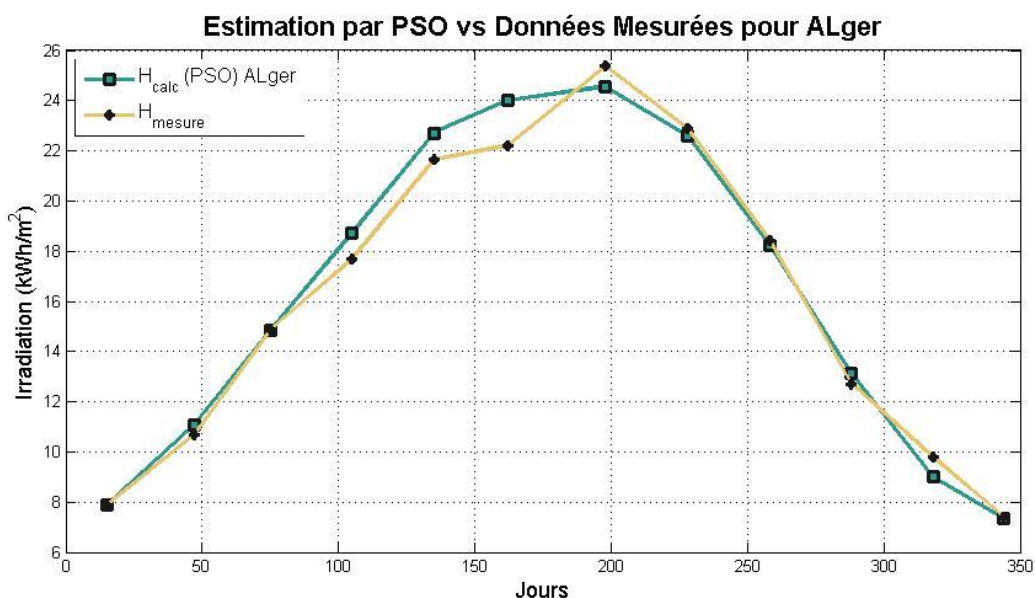


Figure III.5. L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Alger par le modèle de type d'Angström –Prescott(PSO).

Par rapport au modèle initial, l'utilisation de l'algorithme PSO a permis de mieux capturer le comportement de l'irradiation solaire mesurée, en particulier au pic estival. L'estimation  $H_{\text{calc}}$  (PSO) est désormais plus précise et les sous-estimations prononcées de la période estivale ont été largement corrigées. Cela indique que l'optimisation par PSO a ajusté les paramètres du modèle de manière plus efficace pour réduire l'erreur globale.

**Tableau III.7. la déclinaison = delta ,  $H_0$ ,  $H$  calculer,  $W(\text{rad})$  pour Alger(PSO).**

Mois	Delta	$H_0$	$H_{\text{calculer}}$	$W(\text{rad})$
JAN	-21.2727	16.9958	7.88000	1.2762
FEV	-12.6089	22.6201	11.0709	1.4032
MAR	-2.04197	29.1360	14.8699	1.5442
AVR	9.480770	35.4962	18.7047	1.6956
MAI	18.67362	39.8467	22.7131	1.8255
JUI	23.03792	41.6264	23.9994	1.8934
JUL	21.34557	40.7807	24.5668	1.8664
AOU	13.98931	37.3898	22.6056	1.7576
SEP	3.343031	31.8907	18.2547	1.6143
OCT	-8.21774	25.1571	13.1353	1.4629
NOV	-18.0408	18.9973	8.99176	1.3254
DEC	-22.8406	15.9317	7.32477	1.2513

**b. Oran**

La figure III.6 démontre une nette amélioration de la précision de l'estimation  $H_{\text{calc}}$  (PSO) pour Oran. La courbe  $H_{\text{calc}}$  (PSO) adhère étroitement à la courbe  $H_{\text{mesure}}$  sur l'ensemble de l'année. Les divergences estivales, qui étaient plus marquées dans le modèle initial, sont ici minimisées.

En comparaison avec le modèle initial, l'intégration de l'optimisation PSO a grandement amélioré la capacité du modèle à prédire l'irradiation solaire à Oran. Les écarts notables observés entre mai et septembre dans la figure précédente sont maintenant beaucoup moins prononcés. L'algorithme PSO semble avoir réussi à affiner les paramètres du modèle pour une meilleure adaptation aux données réelles.

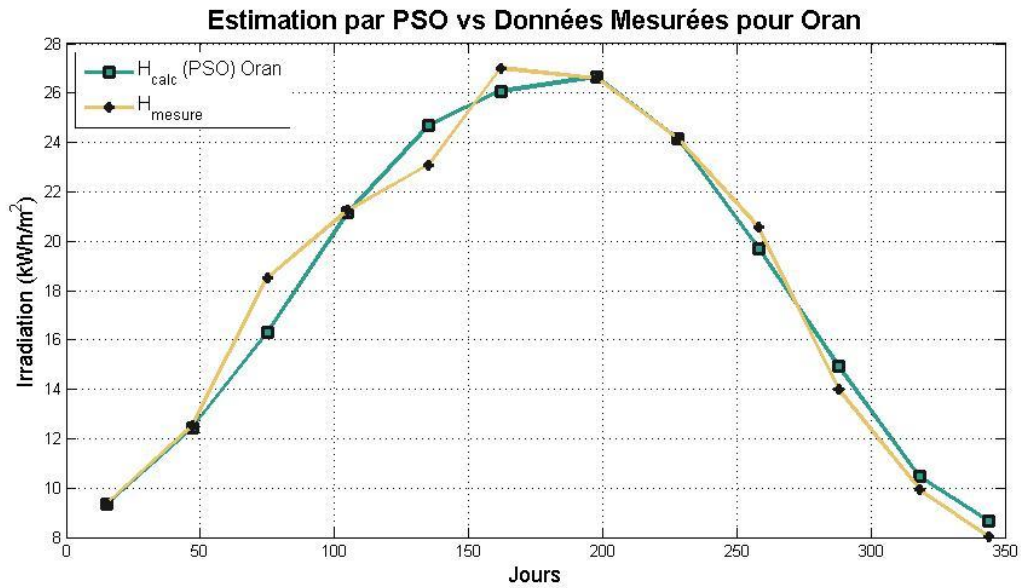


Figure III.6. L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Oran par le modèle de type d'Angström –Prescott(PSO).

Tableau III.8. la déclinaison = delta ,  $H_0$ ,  $H$  calculer,  $W$ (rad) pour Oran(PSO).

Mois	Delta	$H_0$	$H$ calculer	$W$ (rad)
JAN	-21.2727	17.6559	9.36	1.28799
FEV	-12.6089	23.2116	12.438	1.40977
MAR	-2.04197	29.5894	16.332	1.54523
AVR	9.480770	35.7441	21.154	1.69077
MAI	18.67362	39.8960	24.674	1.81545
JUI	23.03792	41.5715	26.072	1.88051
JUL	21.34557	40.7670	26.663	1.85468
AOU	13.98931	37.5426	24.159	1.75031
SEP	3.343031	32.2508	19.695	1.61267
OCT	-8.21774	25.6928	14.931	1.46710
NOV	-18.0408	19.6334	10.456	1.33517
DEC	-22.8406	16.5977	8.6386	1.26413

### c. Tamanrasset

Pour Tamanrasset, la figure III.7 révèle que l'estimation  $H_{calc}$  (PSO) suit plus fidèlement la tendance générale de  $H_{mesure}$ . Cependant, malgré l'application du PSO, des écarts subsistent, notamment autour du pic d'irradiation au printemps (jour 100) et durant l'été. La surestimation

de  $H_{calc}$  (PSO) par rapport à  $H_{mesure}$  est toujours présente sur certaines périodes estivales, bien que possiblement atténuée.

Par rapport à l'estimation initiale, l'algorithme PSO a apporté une amélioration, mais peut-être moins spectaculaire que pour Alger et Oran. Les divergences observées dans le modèle initial, particulièrement le pic de  $H_{mesure}$  autour du jour 100 et les surestimations estivales par  $H_{calc}$ , sont toujours visibles, mais la dynamique générale de la courbe  $H_{calc}$  (PSO) est plus proche de celle de  $H_{mesure}$ . Cela pourrait suggérer que pour Tamanrasset, d'autres facteurs ou un modèle plus complexe seraient nécessaires pour une précision encore accrue, ou que les données de mesure elles-mêmes présentent une variabilité plus importante.

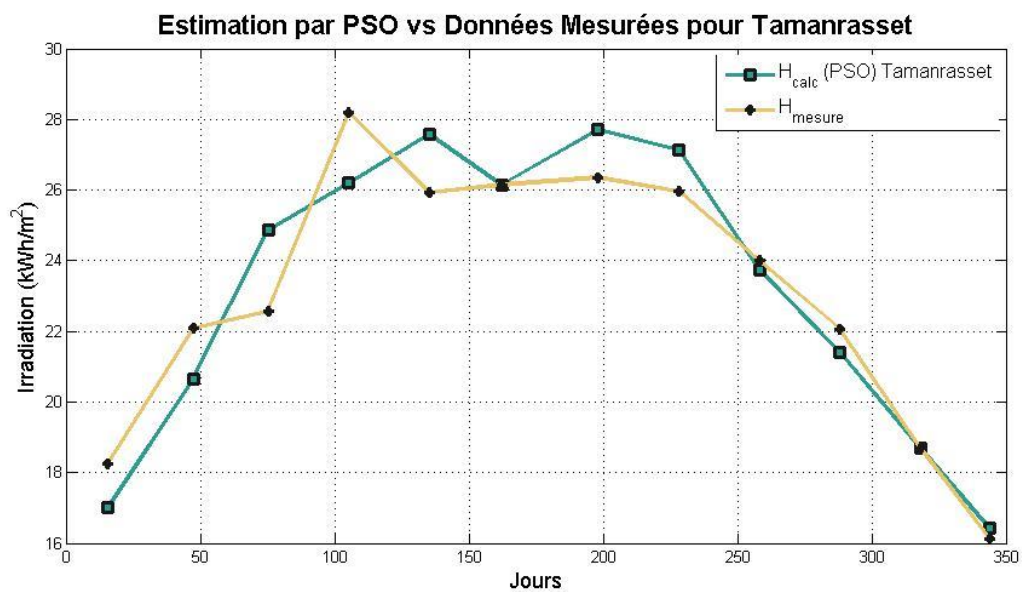


Figure III.7. L'irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset par le modèle de type d'Angström –Prescott(PSO).

Tableau III.9. la déclinaison = delta ,  $H_0$ ,  $H$  calculer,  $W$ (rad) pour Tamanrasset (PSO).

Mois	Delta	$H_0$	$H$ calculer	$W$ (rad)
JAN	-21.2727	25.2178	17.00202	1.4065
FEV	-12.6089	29.6450	20.66555	1.4767
MAR	-2.04197	34.1384	24.86375	1.5558
AVR	9.480770	37.7457	26.19429	1.6409
MAI	18.67362	39.5768	27.59113	1.7132
JUI	23.03792	40.0761	26.14000	1.7503
JUL	21.34557	39.7374	27.71289	1.7356
AOU	13.98931	38.4267	27.15094	1.6756

SEP	3.343031	35.6301	23.72160	1.5953
OCT	-8.21774	31.3511	21.41793	1.5101
NOV	-18.0408	26.7826	18.67999	1.4335
DEC	-22.8406	24.2978	16.41794	1.3929

### III.6 Les paramètre a et b:

Le tableau ci-dessous présente les coefficients du modèle d'Angstrom-Prescott (a et b) avant et après optimisation par l'algorithme d'essaim de particules (PSO), ainsi que les valeurs correspondantes de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour Alger, Oran et Tamanrasset.

*Tableau III.10. les paramètres a et b de modelé, et le RMSE.*

	a	b	a(PSO)	b(PSO)	RMSE	RMSE(PSO)
<b>Alger</b>	<b>0.4381</b>	<b>0.2489</b>	<b>0.34207</b>	<b>0.31396</b>	<b>4.5012</b>	<b>4.3584</b>
<b>Oran</b>	<b>0.4434</b>	<b>0.2998</b>	<b>0.2310</b>	<b>0.4455</b>	<b>5.8951</b>	<b>5.3539</b>
<b>Tamanrasset</b>	<b>0.2883</b>	<b>0.4658</b>	<b>0.71426</b>	<b>0.13825</b>	<b>5.4173</b>	<b>5.3620</b>

#### a. pour Alger

Pour Alger, les paramètres initiaux du modèle de régression étaient estimés à  $a = 0.4381$  et  $b = 0.2489$ . Après l'optimisation par l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization), ces coefficients ont été ajustés à  $a(PSO) = 0.34207$  et  $b(PSO) = 0.31396$ . Cette modification traduit une réduction modérée du coefficient directeur a et une augmentation corrélative de l'ordonnée à l'origine b, ce qui suggère que le modèle optimisé accorde une importance légèrement moindre à la variable explicative tout en rehaussant la base estimée de l'irradiation.

#### b. pour Oran

Dans le cas d'Oran, les coefficients initiaux étaient de  $a = 0.4434$  et  $b = 0.2998$ . Suite à l'optimisation par PSO, ils ont été significativement modifiés pour atteindre  $a(PSO) = 0.2310$  et  $b(PSO) = 0.4455$ . Cette évolution représente une diminution marquée du coefficient a et une hausse notable de b, indiquant que le modèle, après optimisation, devient moins sensible aux variations de la variable explicative et privilégie une élévation du niveau de base de l'irradiation. Ce comportement peut refléter une meilleure adéquation du modèle aux conditions atmosphériques locales, possiblement caractérisées par une moindre variabilité du facteur de clarté.

### **c. pour Tamanrasset**

Concernant Tamanrasset, l'optimisation a entraîné une transformation particulièrement prononcée du modèle. Les coefficients initiaux étaient de  $a = 0.2883$  et  $b = 0.4658$ , et ont évolué après PSO vers  $a(\text{PSO}) = 0.71426$  et  $b(\text{PSO}) = 0.13825$ . Cette évolution indique une augmentation significative du coefficient  $a$  couplée à une réduction substantielle de  $b$ , ce qui révèle que le modèle optimisé attribue un poids beaucoup plus important à la variable explicative. Cette tendance est cohérente avec le profil climatique singulier de Tamanrasset, caractérisé par une forte irradiation solaire directe et une nébulosité faible, où l'indice de clarté devient un facteur prédictif dominant dans la modélisation de l'irradiation globale.

#### **III.6.1 Analyse comparative des valeurs de RMSE :**

L'analyse comparative des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) a clairement démontré l'impact positif de l'intégration de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) sur la précision du modèle d'estimation du rayonnement solaire. Pour les trois scénarios évalués, les valeurs de RMSE obtenues après optimisation par PSO (RMSE(PSO)) sont systématiquement inférieures aux RMSE initiaux (RMSE) : à Alger, la RMSE est passée de 4.5012 à 4.3584 ; à Oran, de 5.8951 à 5.3539 ; et à Tamanrasset, de 5.4173 à 5.3620. Cette réduction des erreurs, bien que variable (allant d'une diminution de 0.0553 à 0.5412), témoigne de la capacité du PSO à ajuster les paramètres du modèle de manière plus fine, minimisant ainsi les écarts entre les prédictions et les observations. En conséquence, l'implémentation de l'algorithme PSO a non seulement amélioré la précision globale du modèle, mais a également renforcé sa robustesse et sa fiabilité pour l'estimation du rayonnement solaire.

### **III.7 Conclusion**

Sur la base des analyses précédentes, ce chapitre a démontré que l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) améliore significativement la performance du modèle d'Angstrom-Prescott pour l'estimation de l'irradiation solaire globale en Algérie. Les ajustements des coefficients  $a$  et  $b$  opérés par le PSO ont conduit à une réduction notable des erreurs pour Alger et Oran, particulièrement durant les périodes de forte irradiation estivale, optimisant ainsi l'adéquation du modèle aux données mesurées. Bien que des divergences persistent pour Tamanrasset, l'intégration du PSO a globalement permis d'obtenir des bonnes performances. Le PSO s'avère être un outil efficace pour affiner les paramètres des modèles empiriques d'irradiation solaire, conduisant à des prédictions plus précises et fiables adaptées aux spécificités climatiques régionales.

---

# **Conclusion générale**

---

### **Conclusion générale**

Le rayonnement solaire, source d'énergie essentielle, joue un rôle clé dans de nombreux domaines tels que l'énergie, l'agriculture et la météorologie. La modélisation précise de ce rayonnement, notamment durant la phase de crépuscule, est cruciale pour optimiser les systèmes énergétiques solaires, améliorer la prévision météorologique et comprendre les conditions environnementales locales.

Ce mémoire a porté sur la modélisation du rayonnement solaire global dans trois villes algériennes : Alger, Oran et Tamanrasset, en utilisant le modèle d'Angstrom-Prescott. Ce dernier s'est révélé fiable pour estimer l'irradiation solaire, à condition d'être calibré localement, comme le montrent les variations des coefficients  $a$  et  $b$  selon les sites. L'indicateur statistique (RMSE) a confirmé la performance du modèle, avec des erreurs relativement faibles.

L'intégration de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) a permis d'affiner ces coefficients et d'améliorer la précision des estimations. Pour Alger, les ajustements ont conduit à un RMSE réduit, même résultat est observé pour les autres villes. Ces résultats valident l'efficacité du PSO, bien que des écarts subsistent pour Tamanrasset, suggérant la nécessité d'une modélisation plus fine adaptée à son climat désertique.

En conclusion, cette étude montre que l'optimisation du modèle d'Angstrom-Prescott par PSO renforce la fiabilité des prévisions d'irradiation solaire. Elle ouvre la voie à des travaux futurs intégrant d'autres paramètres comme la nébulosité ou les aérosols, ou explorant de nouveaux algorithmes d'optimisation pour mieux adapter les modèles aux spécificités locales.

---

# **Références bibliographiques**

---

## Références bibliographiques

- [1] M. Hanène, *Modélisation et simulation du panneau solaire sous différents rayonnements*, Mémoire de Master, Univ. Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2021, p. 7.
- [2] Y. Boudierba, *Problème direct en héliosismologie temps-distance : étude et interprétation théorique*, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15778.04806>
- [3] B. Amani, *Modélisation du rayonnement solaire en fonction du crépuscule en quelques sites algériens*, Mémoire de Master, Univ. Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2023, p. 4.
- [4] M. Faiza, *Conception d'un programme de calcul du rayonnement solaire, cas particulier de la région de Mostaganem*, Mémoire de Magister, Univ. Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2013, p. 15.
- [5] B. Klaes, *Nouvelle méthode d'imagerie 3D et d'analyse quantitative des défauts ponctuels et amas de défauts pour l'étude du vieillissement des matériaux*, 2020.
- [6] B. Brousse, *Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique*, Doctorat, Univ. de Limoges, 2004, p. 35.
- [7] S. Mouhamed, *Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques*, Magister, Univ. Ferhat Abbas, Sétif, 2012, p. 14.
- [8] C.-A. Roulet, *Thermique du bâtiment - Tout le confort avec peu d'énergie*, Polycopié, Section Génie Civil, 4ème année.
- [9] R. Djelloul, *Analyse d'un système de concentration solaire pour la production d'hydrogène (cas de l'Algérie)*, Magister, Univ. Hassiba Benbouali, Chlef, 2012, p. 17.
- [10] M. M. Huaman and M. C. Kelley, "MESOSPHERE | Polar Summer Mesopause," in *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, J. R. Holton, Ed. Academic Press, 2003, pp. 1271–1278. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00221-9>
- [11] T. Khaoula, *Modélisation du rayonnement solaire global pour différentes définitions de la durée du jour*, Mémoire de Master, Univ. Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2023, p. 32.

- [12] E. Motte, *A Mobile Microwave Radiometer for the Study of Middle Atmospheric Water Vapour*, 2008.
- [13] F. Slama and H. Rajeai, “Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique,” 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35145.26721>
- [14] D. Benatiallah, *Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire*, Doctorat en sciences, Univ. Ahmed Draïa, Adrar, 2019, p. 17.
- [15] L. Koechlin and L. Dettwiller, “Correction de la dispersion atmosphérique dans l’imagerie par les grands télescopes et les interféromètres astronomiques,” *C. R. Physique*, vol. 23, pp. 1–20, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5802/crphys.112>
- [16] N. Mouhamed, *Étude comparative des méthodes d’estimation du rayonnement solaire*, Magister, Univ. Ferhat Abbas, Sétif, 2010, p. 21.
- [17] Par SolarGIS © 2013 GeoModel Solar, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33459572>
- [18] N. Benalouache, *L’énergie solaire pour la production d’électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d’échelles*, Thèse de Doctorat, Univ. de Sfax, 2017.
- [19] M. Ziad, *Caractérisation radiométrique des sites de Bouzaréah et de Ghardaïa*, Mémoire de Magister, Univ. Saad Dahleb, Blida, 2007.
- [20] F. Chabane, *Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l’énergie solaire*, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3959.9444>
- [21] S. Benkacali, “Modélisation de l’irradiation solaire globale incidente sur un plan incliné,” *Rev. Energies Renouvelables*, vol. 17, no. 2, pp. 245–252, 2014.
- [22] K. Bouchra and Z. Amina, *Modélisation et analyse du rayonnement solaire sur un plan incliné sur site d’Adrar*, Mémoire de Master, Univ. d’Adrar, 2013.
- [23] H. B. Mohammed, *Modélisation et étude expérimentale d’un capteur solaire non vitré et perforé*, Mémoire de Master, Univ. Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2011.
- [24] A. Caglar, *Daylight Adaptive Structures: DARMIN as a tool for generating dynamic architectural environments*, 2014.

- [25] M. Capderou, *Atlas solaire de l'Algérie*, Office des Publications Universitaires, vol. 1–3, 1988.
- [26] A. Ricaud, *Gisement solaire et transferts énergétiques*, Univ. de Cergy-Pontoise, 2011.
- [27] Y. Sahnoune, *Modélisation du rayonnement solaire sur quelques sites algériens*, Thèse de Magister, Univ. Ferhat Abbas, Sétif, 2007.
- [28] Z. Sen, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*, Springer, 2008.
- [29] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, 1999.
- [30] M. Clerc and J. Kennedy, “The particle swarm: explosion, stability, and convergence in a multi-dimensional complex space,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 1, pp. 58–73, 2002.
- [31] A. Kalyanpur, M.-E. Mercadier, and P. Blanc, “Gisement solaire en France : caractérisation de la ressource énergétique, profil de répartition et volatilité,” *Environnement et Technique*, no. 331, pp. 54–59, 2013.
- [32] J. Kennedy and R.C. Eberhart, *Swarm Intelligence*, San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers, (2001).

## Résumé

Ce mémoire porte sur la modélisation du rayonnement solaire global dans trois villes algériennes : Alger, Oran et Tamanrasset. Le modèle empirique d'Angstrom-Prescott a été utilisé pour estimer l'irradiation solaire à partir des données d'ensoleillement. Pour améliorer la précision du modèle, une optimisation des coefficients a été effectuée à l'aide de l'algorithme par essaim de particules (PSO). Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec les données mesurées. Cette approche permet d'affiner les prévisions d'irradiation solaire et d'optimiser les systèmes solaires pour différentes régions du pays.

## الملخص

يتناول هذا البحث نمذجة الإشعاع الشمسي العالمي في ثلاث مدن جزائرية: الجزائر، وهران، وتمنراست. تم استخدام نموذج أنغستروم-بريسكات لتقدير الإشعاع الشمسي اعتمادًا على بيانات مدة الإشراق. ولتحسين دقة النموذج، تم تعديل معاملات النموذج باستخدام خوارزمية سرب الجسيمات (PSO). أظهرت النتائج توافقًا جيدًا مع القيم المقاسة. تسهم هذه المنهجية في تحسين التنبؤات بالإشعاع الشمسي ودعم تطوير الأنظمة الشمسية في مختلف مناطق البلاد.

## Abstract

This thesis focuses on modeling global solar radiation in three Algerian cities: Algiers, Oran, and Tamanrasset. The Angstrom-Prescott empirical model was employed to estimate solar irradiation using sunshine duration data. To enhance model accuracy, the particle swarm optimization (PSO) algorithm was applied to optimize the model coefficients. The results showed good agreement with measured data. This approach enhances solar radiation prediction and supports better design of solar energy systems across different regions of Algeria.