

# Remerciement



*En premier lieu, nous remercions **Allah** le tout-puissant de nous avoir aidés durant toute notre vie, sans lui ce manuscrit n'aurait pas pu voir le jour.*

*En second lieu, nous tenons à adresser notre grande remerciement à notre promoteur **Hamimid Saber** professeur au Département d'électromécanique pour avoir accepté de nous diriger et guider dans cette étude, pour son soutien inconditionnel, et avec qui on a une relation de confiance. Je tiens également à le remercier pour sa grande disponibilité.*

*Je tiens aussi à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.*

*Nous n'oublions pas les responsables de la bibliothèque qui nous ont beaucoup facilité notre étude.*

*Nous remercions tous les enseignants du département d'électromécanique .*

*Nous adressons nos remerciements à tous nos amis(es) et à toute notre famille, tout particulièrement nos parents pour leurs soutiens et leurs encouragements.*

*Enfin à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, merci.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire :*

*Aux deux êtres les plus chers : mon père et ma mère, qui ont tout fait pour que je réussisse dans ma vie.*

-  *A mes frères et mes sœurs.*
-  *A mes collègues de la promotion.*
-  *A tous mes amis et proches.*

***Hakim & Fateh***

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

### **CHAPITRE I : Généralités et énergies renouvelables**

I.1. Introduction .....	2
I.2. Énergies renouvelables .....	2
I.2.1. Énergie solaire .....	3
I.2.2. Énergie biomasse.....	3
I.2.3.Énergie hydraulique.....	4
I.2.4.Énergie géothermique.....	5
I.2.5.Énergie éolienne .....	6
I.3.Énergie solaire et leurs applications .....	7
I.3.1. Le rayonnement solaire.....	8
I.3.2.Composantes du rayonnement solaire .....	9
I.3.3. Usage de l'énergie solaire [ .....	12
I.3.3.1. Les capteurs solaires thermiques .....	12
I.4. Différents types capteurs solaires .....	12
I.4.1. Les capteurs plans.....	12
I.4.2. Les capteurs non vide .....	15
I.4.3. Les capteurs sous vide .....	15
I.4.4. Les capteurs à concentration.....	16
I.4.4.1 Différents types des réflecteurs.....	17
I.5. Technologie capteurs solaires.....	18
I.5.1. Panneaux solaires bi-verre .....	18
I.5.2. -Panneau solaire bifacial.....	19
I.5.3. Panneau solaire intégrant un micro-onduleur.....	20
I.5.4. Panneau solaire organique .....	20
I.5.5. Panneau solaire tuile en pérovskite.....	21
I.6. Conclusion.....	21

### **CHAPITRE II : GISEMENT SOLAIRE**

II.1. Introduction .....	28
II.2. Distance terre-soleil.....	28
II.3 Translation et rotation de la terre .....	29
II.3.1. Rotation de la terre .....	29

II.3.2.Révolution de la terre .....	29
II.3.3.Course apparente de la terre .....	30
II.4.Sphère céleste .....	31
II.5.Paramètres de position .....	32
II.5.1.Les coordonnées géographiques (terrestres) .....	32
II.5.2.Repérage du soleil .....	33
II.5.3.Les coordonnées horizontales .....	33
II.5.4.Les coordonnées équatoriales .....	36
II.6.Les paramètre du temps.....	38
II.6.1.Temps solaires .....	38
II.6.2. Lever et coucher du soleil .....	41
II.6.3. Durée du jour (dj) (Durée d'insolation) .....	42
II.7. Orientation d'un plan.....	43
II.7.1.Angle d'incidence des rayons solaires .....	43
II.7.2.Coucher et lever de soleil pour une surface inclinée.....	44
II.8. Gisement solaire en Algérie .....	44
II.9. Conclusion.....	46

### **CHAPITRE III : MODÈLES DU RAYONNEMENT SOLAIRE**

II.1.Introduction.....	47
III. 2 . Rayonnement solaire au niveau du sol .....	47
III. 3 . Modèles d'évaluation des composantes du rayonnement solaire reçu au sol.....	47
III. 3 . 1. Rayonnement par ciel clair .....	48
III.3.2.Rayonnement horizontal par ciel quelconque .....	49
III.4.Modèles simplifiés pour la puissance du rayonnement solaire.....	51
III.4.1.Le modèle de Perez .....	51
III.4.2. Modèle de HOTTEL et LIU JORDAN.....	52
III.4.3.Formule de Liu Jordan pour le calcul de l'énergie globale .....	53
III.4.4.Modèle de Foued CHABANE .....	53
III.4.5.Modèle de Lacis & Hansen .....	54
III.4.6.Modèle de Zang et al.....	55
III.4.7.Relation d'A. Sambo .....	55
III.4.8.Modèle de L. Imane .....	55
III.4.9.Modèle de Perrin-Brichambaut .....	56
III.4.10.Modèle de K. Zina .....	56
III.4.11.Modèle D. Bensahal and A. Yousfi .....	56
III.4.12.Modèle de Kaplanis et Kaplani .....	57
III.4.13.Modèle d'Al-Salaymeh .....	57

III.4.14.Modèle de Capderou .....	57
III.4.15.Modèle de R-Sun .....	58
III.5.Conclusion .....	59
<b>CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION</b>	
IV.1.Introduction.....	59
IV.2.Modèle de Hay-Davies .....	59
IV. 2.1 Rayonnement direct .....	59
IV. 2.2 Rayonnement diffus .....	60
IV. 2.3 Rayonnement global .....	61
IV. 2.3.1 Résultats et interprétations .....	62
IV. 2.3.2 Effet de l'Albédo .....	65
IV.3.Analyse des résultats de les Eclairéments du au rayonnement (I, R, D, G).....	67
IV.3.1Développements du rayonnement solaire dans la région (Béchar).....	67
IV .3 2.Développements du rayonnement solaire dans la région de(Bordj Bou Arreridj)..	69
IV .4. Conclusion.....	72
 <b>Conclusion général.....</b>	 74

## Nomenclature:

$\omega$  : Angle horaire ( $^{\circ}$ )

$\delta$  : Déclinaison du soleil

$h$  : Hauteur du soleil

$ET$  : La correction de l'équation des temps ('en minutes).

$L$  : Longitude de lieu (en  $^{\circ}$ ).

$C_1$  : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (en heures). (Égale 1 pour l'Algérie).

$C_1$  : Correspond à l'heure d'été et d'hiver, s'il y a lieu. ( $C_2 = 1$  *heur* en hiver et 2 *heur* en été France)

$\gamma$  : azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

$\beta$  : inclinaison du plan, c'est l'angle entre le plan et sa projection sur le plan horizontal

$\mathbf{n}$  : normal aux rayons directs

$T_{rd}$ : la fonction de transmission diffuse au zénith.

$F_d$ : la fonction de diffusion angulaire.

$z$  : altitude du lieu en ( km).

$\tau_b$  : sont le transmissions pour le direct .

$\tau_d$  : les transmissions pour le diffus.

$\beta$  : angle d'inclinaison

$\rho$  : albédo du sol

$H_c$  : angle horaire du coucher du soleil sur le plan horizontal

$\theta_z$ : est l'angle zénithal,  $z=90^{\circ}-h$  . ( $^{\circ}$ )

$h$  : la hauteur du soleil.

$U_0$  , L'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et défini par

$a_0$  : Le coefficient correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone.

$m_r$  : est la masse d'air optique relative.

$a_w$ : représente le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau.

$X_w$ : est l'épaisseur d'eau condensable corrigée par trajet optique du rayonnement à travers cette couche.

$U_w$ : est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm).

$m_a$  : la masse d'air corrigée.

$P$ : est la pression atmosphérique (mbar).

$P_0$ : est la pression atmosphérique au niveau de la mer ( $P_0= 1013$  mb).

$Z$  : l'altitude du site (m).

$T$  : la température ambiante (K).

$HR$  : l'humidité relative(%).

**$I_h$** : le rayonnement direct reçu par une surface horizontale.

**$D_h$** : le rayonnement diffus provenant du ciel, reçu par une surface horizontale.

**$G_h$** : le rayonnement global reçu par une surface horizontale.

**$T_{air}$** : est la température horaire de l'air ( $C^\circ$ ).

**$T_{min}$  et  $T_{max}$** : sont les températures minimale et maximale de l'air ( $C^\circ$ ).

**$I_0$** : est le solaire constant ( **$I_0=1367 \text{ W/ m}^2$** ).

**$T_L^*$** : Est le facteur de trouble atmosphérique de Linke.

**$d_{ciel}$** : et  **$y$**  sont respectivement le diffus du ciel,

**$d_{sol}$** : le diffus de sol et diffus rétrodiffusé.

**$T_n$** : sont facteur de transmission.

**$F_a$** : la fonction de l'altitude solaire.

**$h_0$** : Hauteur de soleil.

**$\phi_{exp}$** : Est la position du soleil par rapport à une surface inclinée.

**$\tau_a$** : Le coefficient de transmission après diffusion par les aérosols .

**$D_r$** : représente le rayonnement diffus de Rayleigh.

**$\tau_0$** : Le coefficient de transmission après absorption d'ozone.

**$D_a$** : Est le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols.

**$F_c$** : Le coefficient de dispersion directe dans l'atmosphère.

**$D$** : Est le rayonnement diffus issu du phénomène de multi réflexion.

**$\rho_a'$** : L'albédo du ciel clair du site considéré.

**$I$** : Eclaircissements du au rayonnement Direct.

**$D$** : Eclaircissements du au rayonnement Diffus.

**$R$** : Eclaircissements du au rayonnement Réfléchi.

**$G$** : Eclaircissements du au rayonnement Global

**$lat$** : La valeur de la latitude.

**$z$** : La valeur de l'altitude.

**$lon$** : La valeur de la longitude.

**$T(c)$** : La valeur la température.

**$HR (<1)$** : La valeur de l'Humidité .(%)

**$r_j$** : La valeur de l'albédo sol.

## LA LISTE DES FIGURES

### **CHAPITRE I : Présentation de L'ouvrage**

Figure I.1 : schéma d'une centrale solaire .....	3
Figure I.2 : le fonctionnement d'une centrale à biomasse .....	4
Figure I.3 : schéma d'une centrale hydraulique .....	5
Figure I.4 : Schéma descriptif d'une centrale géothermique à vaporisation directe .....	6
Figure I.5 : schéma d'une centrale éolienne .....	6
Figure I.6: principe de fonctionnement d'une éolienne de production d'électricité.....	7
Figure I.7 :Le soleil - Source d'énergie.....	8
Figure I.8 : spectre électromagnétique du rayonnement solaire.....	9
Figure I.9 : Composantes du rayonnement solaire au niveau du sol .....	10
Figure I.10 : usage de l'énergie solaire .....	12
Figure I.11 : capteur plan .....	13
Figure I.12 : Capteur solaire thermique à eau , vue en coupe.les conduits d'eau .....	13
Figure I.13 : Capteur solaire plan à air .....	14
Figure I.14 : Capteur plan non vitré .....	15
Figure I.15 : Capteur sous vide.....	16
Figure I.16 : Capteur à concentration .....	17
Figure I.17: Systèmes à réflecteur parabolique.....	17
Figure I.18 : Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique.....	18
Figure I.19: Systèmes à Centrale à tour.....	18
Figure I.20 : Systèmes à Fours solaires.....	18

### **CHAPITRE II : GISEMENT SOLAIRE**

Figure II.1 : mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil.....	28
Figure II.2 : angle de déclinaison .....	30
Figure II.3 : Le soleil de midi des solstices d'été et d'hiver.....	30
Figure II.4 : Le mouvement apparent du Soleil au cours .....	31
Figure II.5 : sphère céleste .....	31

Figure II.6 : coordonnées géographiques .....	32
Figure II.7 : coordonnées horizontales (azimutales) .....	34
Figure II.8 : évolution de la hauteur maximale du soleil pour diverses latitudes .....	35
Figure II.9: zénith .....	35
Figure II.10: coordonnées équatoriales (horaires).....	36
Figure II.11 : la variation de la déclinaison .....	36
Figure II.12 : Équation du temps <i>ET</i> et déclinaison .....	39
Figure II.13: Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich .....	41
Figure II.14 : angle d'incidence des rayons solaires .....	43
Figure II.15 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire en Algérie .....	45
Figure II.16: Carte du monde de l'enseillent moyen annuel .....	46

### **CHAPITRE III : MODÈLES DU RAYONNEMENT SOLAIRE**

### **CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION**

Figure IV.1.: Courbe représentant l'évolution du rayonnement solaire par jour pour différentes valeurs de l'albédo (région Adrar) .....	68
Figure IV.2.: Courbe représentant l'évolution du rayonnement solaire par jour pour différentes valeurs de l'albédo (région BBA) .....	71

## **LA LISTE DES TABLEAUX**

### **CHAPITRE I : Généralités et énergies renouvelables**

Tableau I.1 : Valeurs de l'albédo pour le rayonnement solaire global ; Albédo = facteur de réflexion par rapport au rayonnement solaire ( $\lambda < 3 \mu\text{m}$ ).....11

### **CHAPITRE II : Pré dimensionnement des éléments résistants**

Tableau II.1 : la durée des saisons..... 29

### **CHAPITRE III : Modèles du rayonnement solaire**

### **CHAPITRE IV : Résultats et interprétation**

Tableau IV.1 : Valeurs du facteur  $F_c$  en fonction de la distance zénithale d'après Robinson...61

## Introduction générale :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Aujourd'hui, l'énergie solaire rime avec écologie. Les technologies permettant de mettre à profit les rayons du soleil pour en faire de l'énergie, ont énormément évolué ces dernières années. Le soleil est une source infinie d'énergie et dont nous pouvons bénéficier en abondance. Et ce, pour très longtemps ! Cette énergie passive est simplement captée par des **panneaux solaires thermiques** ou des **panneaux solaires photovoltaïques**.

Dans ce contexte l'énergie solaire apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive sur la surface de terre dans un jour est dix fois plus que l'énergie consommée [1].

Ainsi, l'objectif du présent travail est de présenter quelques modèles de rayonnement solaire, en étudiant l'effet de l'albédo et l'humidité de l'atmosphère qui permettra au capteurs thermique/photovoltaïque de délivrer sa puissance maximale

Ce travail est constitué de quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est dédié pour des généralités sur les énergies renouvelables, les capteurs solaires et la technologie des capteurs solaires.
- ❖ Le deuxième chapitre est conçu pour la présentation du gisement solaire avec quelques notions et définitions géo-astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire
- ❖ dans un troisième chapitre, on a présenté les modèles d'évaluation des composantes du rayonnement solaire reçu par le sol.
- ❖ Les résultats de modélisation des différentes parties du rayonnement solaire reçus par le sol, en utilisant l'un des modèles cités précédemment, sont présentés dans le quatrième chapitre.

Enfin, une conclusion générale qui met en évidence les principaux résultats de cette étude.

# Chapitre I

*Généralités sur énergies renouvelables*

**I. 1 Introduction:**

L'énergie solaire est produite par le rayonnement du soleil, direct ou diffus à travers l'atmosphère. Le soleil produit ainsi une énergie inépuisable et disponible. Les énergies du vent, de l'eau et même la photosynthèse sont issues du soleil, cependant elles ne font pas partie des énergies solaires. Cette énergie, non polluante, transforme directement la lumière en électricité ou en chaleur, sans approvisionnement de combustible, sans réchauffement de l'atmosphère et sans déchets.

Nous proposons d'exposer, dans une première partie de ce chapitre, les différents types des énergies renouvelables ainsi que les différents outils de captation de ces énergies, en particulier l'énergie solaire. Nous donnerons à la fin de cette partie, les différentes technologies des capteurs solaires thermiques.

**I.2.Énergies renouvelables :**

Il existe de nombreux concepts relatifs aux énergies renouvelables on les a trouvés dans de nombreuses sources. Mais elle peut être définie comme une énergie produite à partir de sources naturelles renouvelables est toujours disponible c'est-à-dire sont des sources qui se renouvellent assez rapidement de telle sorte que l'utilisation actuelle n'ait pas d'impact sur la disponibilité future, dans ce sens on appelle les énergies renouvelables ou énergies vertes toutes énergies qui ne nuit pas à l'environnement ,parce qu' elle fait appel à des éléments qui se recréent naturellement , parmi les énergies renouvelables [2] :

- Énergie solaire
- L'énergie éolienne
- La biomasse
- L'énergie hydraulique
- L'énergie géothermique

### I.2.1.Énergie solaire :

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables et la plus abondante au monde, c'est rayonnement solaire qui peut être utilisé dans plusieurs choses, y compris la production de réactions chimiques, la production de chaleur et la production d'électricité, elle a récemment assisté à une baisse des coûts de production d'une manière qui la qualifie pour concurrencer le pétrole et le gaz [3].

Principe physique de l'énergie solaire :

Le soleil émet des rayonnements principalement dans la partie «visible » du spectre (lumière, entre 400 et 700 nm), plus la longueur d'onde du rayonnement est courte, plus la quantité d'énergie portée par les photons est grande.

Cette énergie peut se transmettre sous forme de chaleur, l'énergie va exciter les atomes composant la matière, qui vont s'agiter et s'échauffer. Exposés aux rayons du soleil, les capteurs vont convertir l'énergie des photons, soit en énergie thermique, soit en énergie électrique.

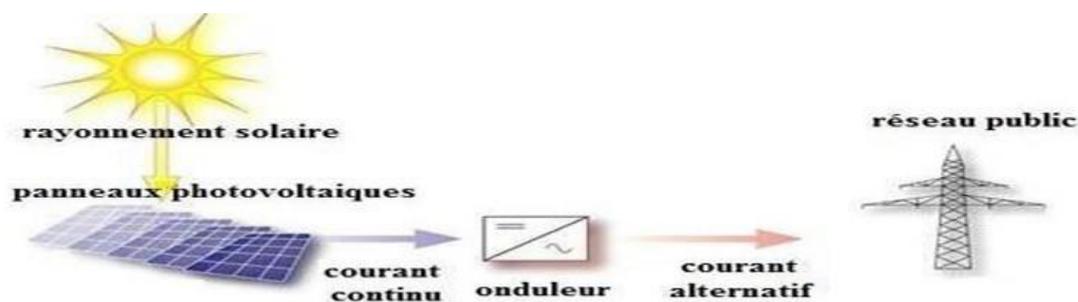


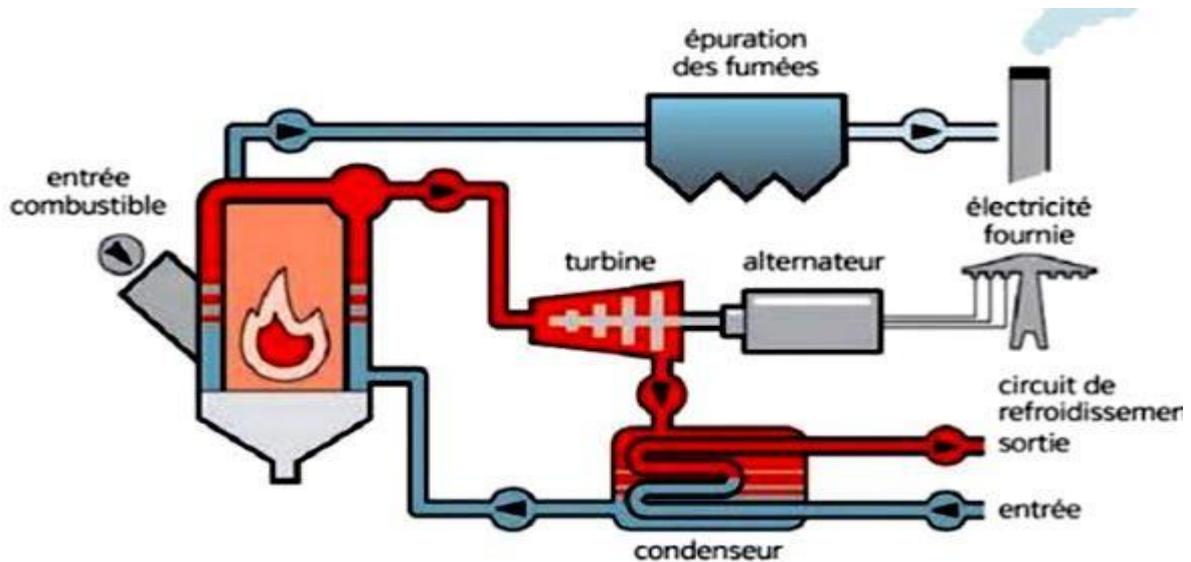
Figure I.1: schéma d'une centrale solaire

### I.2.2.Énergie biomasse :

Le terme biomasse désigne l'ensemble de la matière vivante (matière organique végétale ou issue des êtres vivants, aussi les déchets organiques) ; la biomasse est produite par les organismes vivants principalement par l'activité photosynthétique des plantes mais aussi des animaux, des insectes, des microorganismes. Elle est essentiellement constituée de polymères complexes de carbone, hydrogène, oxygène et azote, de soufre en faible proportion et d'éléments inorganiques [4].

Le principe de la biomasse :

Le principe de l'action de la biomasse est sur un plan de centrale à biomasse, comme le montre la **figure I.2** suivante :



Lit Fluidisé Circulant + biomasse : une centrale électrique dès 2014.

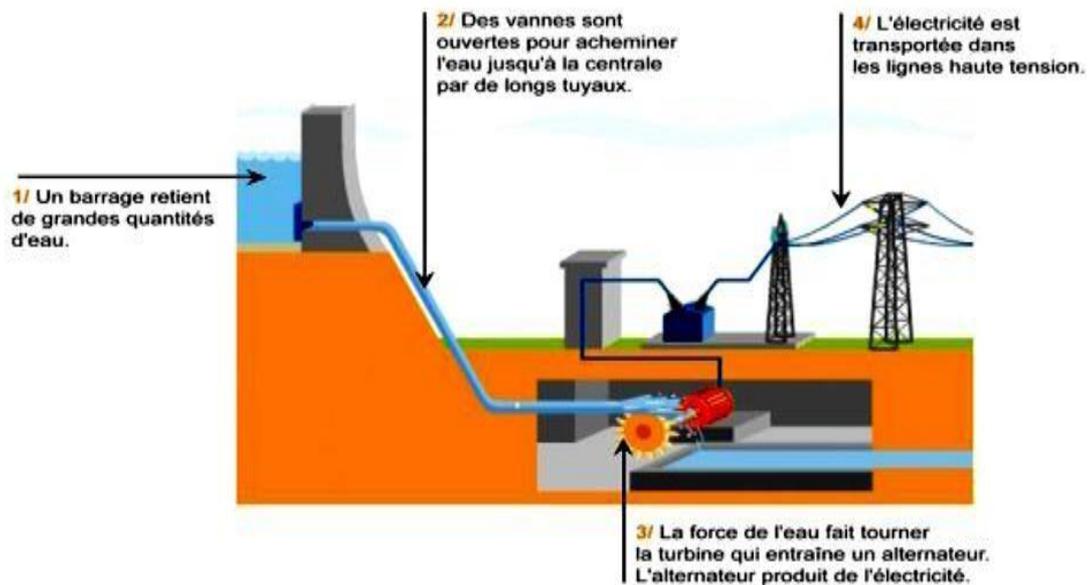
**Figure I.2** : le fonctionnement d'une centrale à biomasse

Tout d'abord, la biomasse est brûlée ce processus produit une température élevée qui transforme l'eau en vapeur, puis l'électricité est produite grâce aux turbines qui fournissent de l'énergie au générateur.

### I.2.3.Énergie hydraulique:

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marin, marée, vagues, L'énergie hydraulique aussi est une manifestation indirecte de l'énergie du Soleil et de la force de gravité de la Lune, comme beaucoup de sources d'énergies renouvelables sur Terre (énergie éolienne, énergie des vagues, la biomasse, etc.) Sous l'action du Soleil et du vent, l'eau s'évapore des océans et forme les nuages qui se déplacent au gré des vents.

Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une hydroélectrique, l'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages [5].



**Figure I.3:** schéma d'une centrale hydraulique.

#### I.2.4.Énergie géothermique :

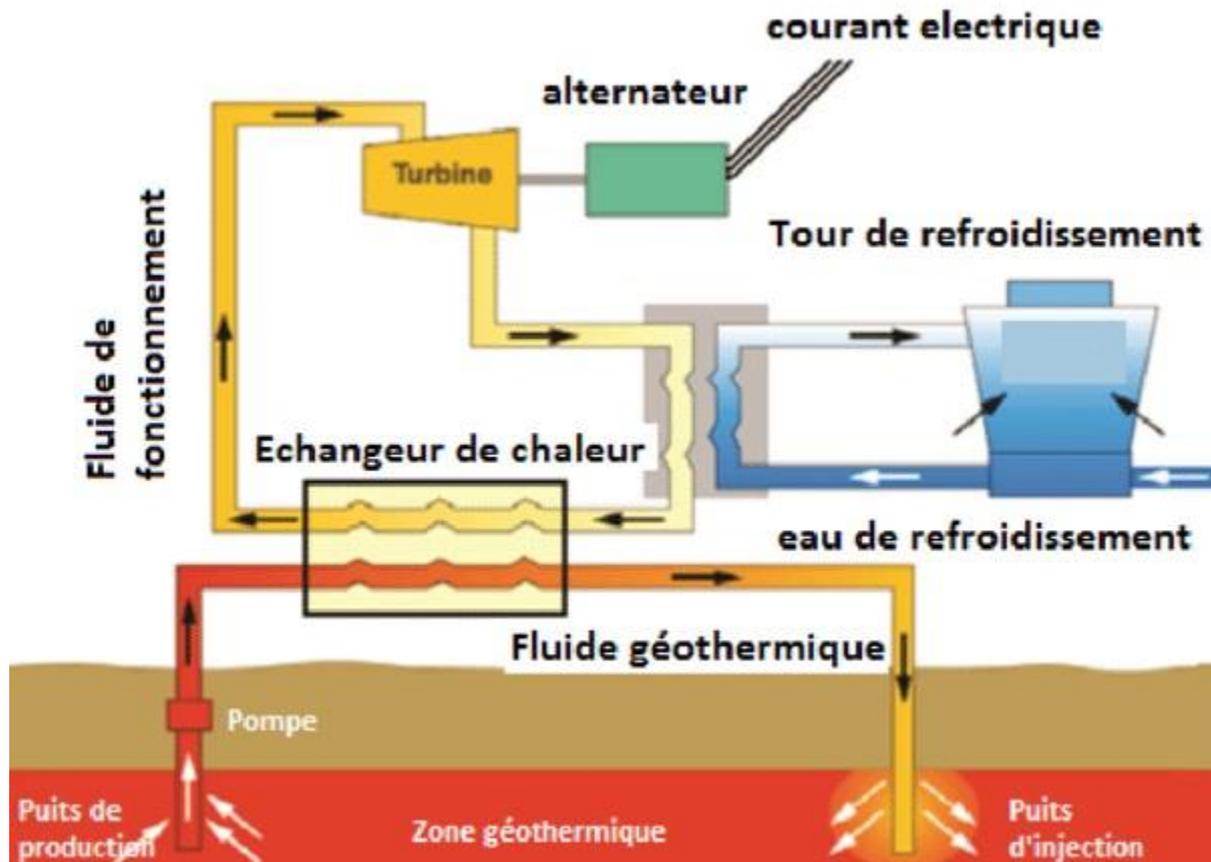
La géothermie c'est une énergie thermique naturelle dépend de la capture de la chaleur de la croûte terrestre pour produire de l'électricité (température entre 90° et 150°), ou de la chaleur (température inférieure à 90°), elle est composé de deux mots grec ("Gê " signifie la terre et "Thermie" signifie la chaleur). Par rapport à d'autres sources d'ER, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (pluie, soleil, vent....) [6].

##### **Principe de fonctionnement:**

Le principe de l'énergie géothermique est basée sur des stations thermiques qui constituent une source de production d'électricité via:

1. Subventionner la chaleur (de la terre) à l'eau qui se transforme en vapeur.
2. Turbine convertit une partie de la vapeur en énergie mécanique.
3. Génère de l'électricité grâce au générateur associé à une turbine

➤ Pour capter l'énergie géothermique on utilise le fluide géothermique contenu dans des réservoirs profonds pour actionner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur qui produit un courant électrique.

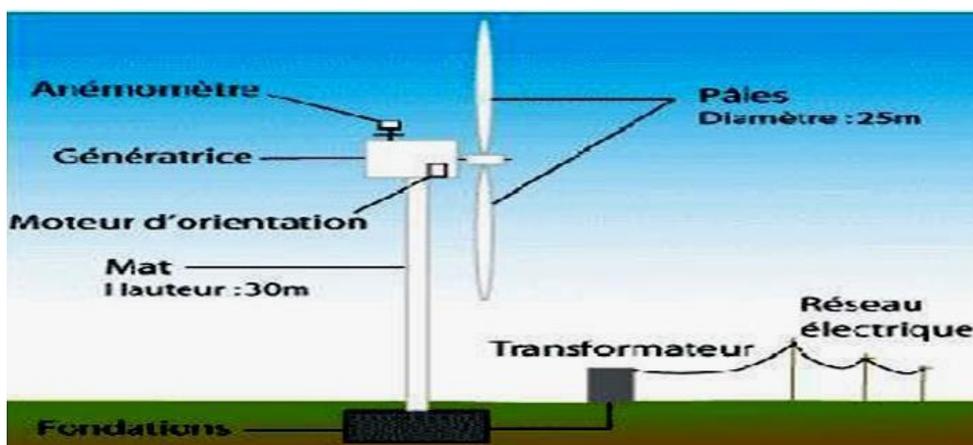


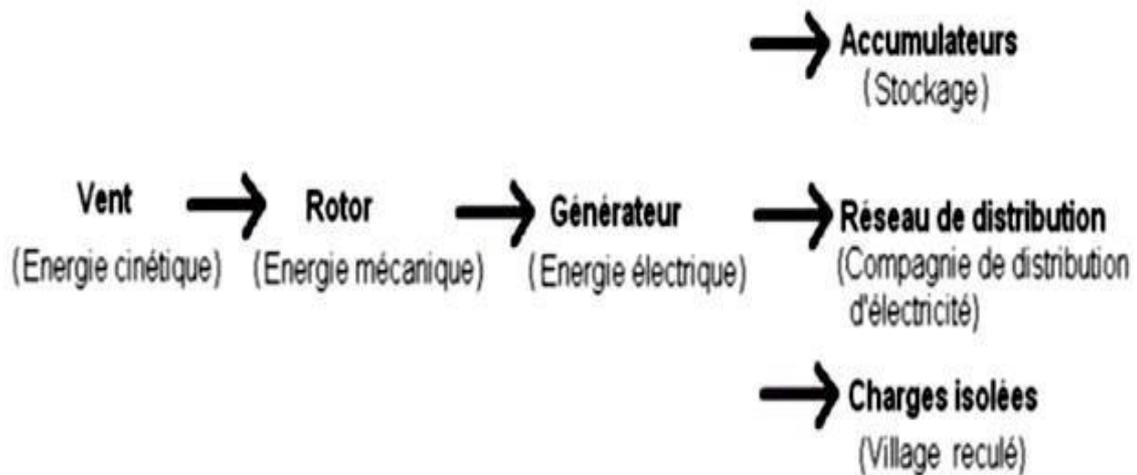
**Figure I.4 :** Schéma descriptif d'une centrale géothermique à vaporisation directe.

### I.2.5.Énergie éolienne :

L'énergie éolienne est l'une des plus importantes et le plus prometteuses des sources d'énergie renouvelable à travers le monde en termes de développement, car elle est non polluante les énergies éoliennes contrairement aux autres sources d'énergie classique; c'est l'énergie générée par le mouvement de l'air par utilisation de turbines qui produit l'électricité. Le principe de fonctionnement:

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne repose sur la transformation de l'énergie cinétique en énergie électrique peut se résumer dans le schéma suivante [7] :



**Figure I.5:** schéma d'une centrale éolienne**Figure I.6 :** principe de fonctionnement d'une éolienne de production d'électricité

### I.3. Énergie solaire et leurs applications :

#### Le soleil :

Le soleil est une étoile constituée de gaz ; 75 % d'hydrogène 23% d'hélium et 2% d'autres constituants de l'univers. Sa masse est de  $1.99 \cdot 10^{30}$  kg et son rayon est de 696000 km .L'intérieur du soleil est le siège de réactions thermonucléaires ; les atomes d'hydrogènes fusionnent pour former l'hélium en libérant une énergie qui est délivré sous forme de radiations dans l'espace. La surface extérieure du soleil nommée photosphère a une température équivalente à 5800 °k mais elle peut atteindre plusieurs millions de degrés au centre de l'étoile ou dans les couches les plus hautes de la couronne solaire. Dans cette couche la matière absorbe le rayonnement en provenance des couches intérieures et le réédite vers l'extérieur [8].

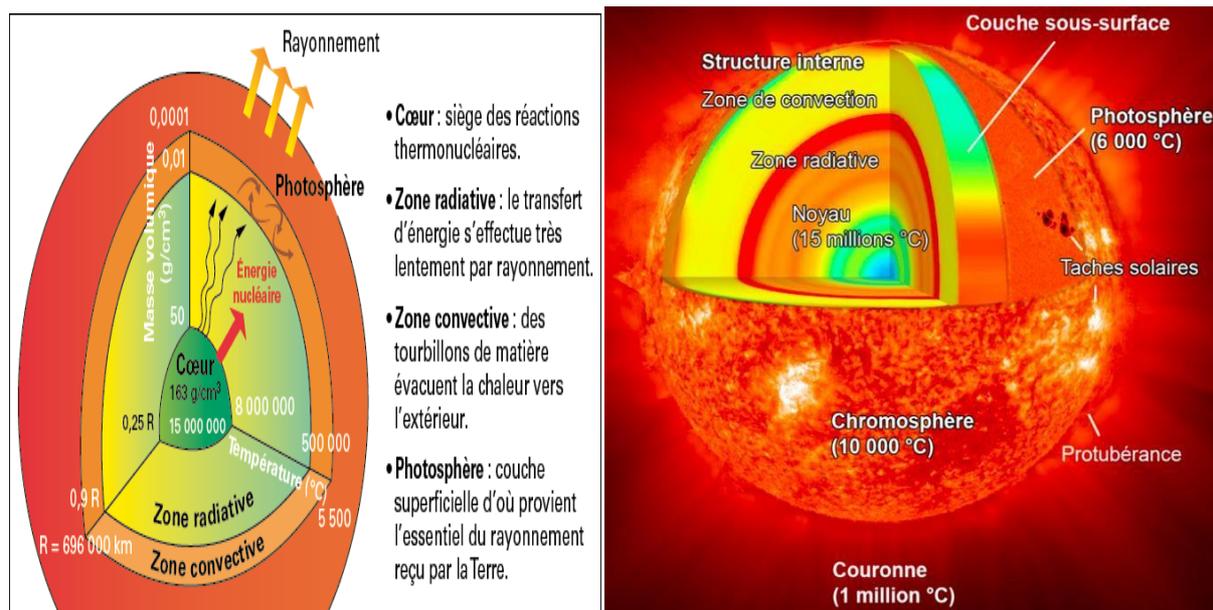


Figure I.7 : Le soleil - Source d'énergie

Lors de la réaction de fusion nucléaire dans le Soleil, il y a émission positons et de rayonnement gamma.



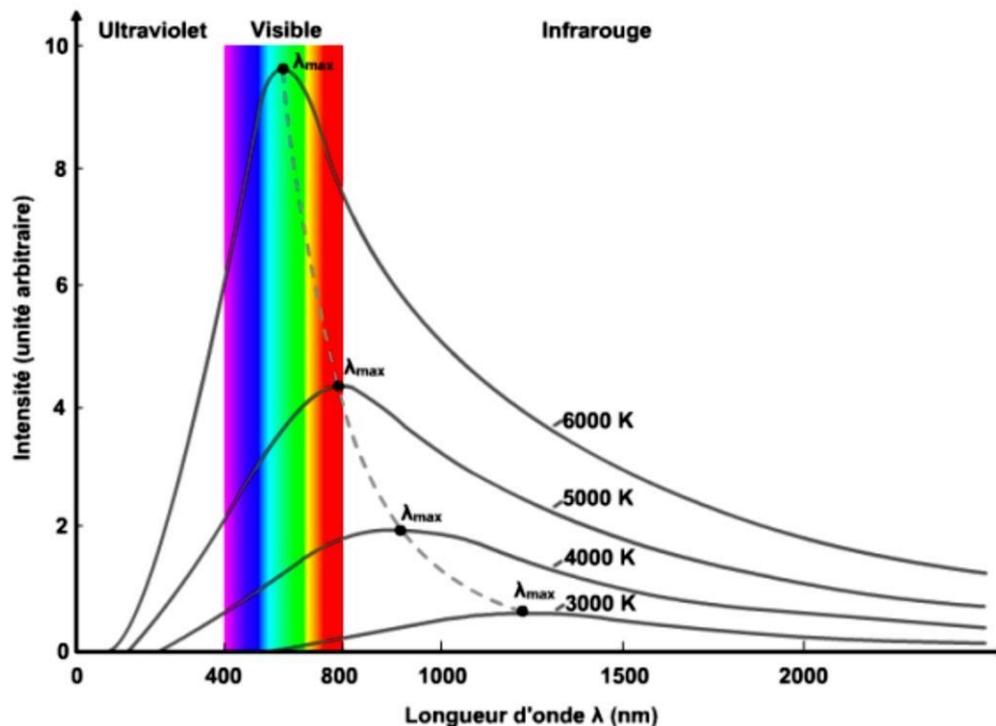
L'énergie E libérée par cette réaction est :

$$E = [4 \times m_H - (m_{He} + 2 \times m_{positon})] \times c^2 \quad (\text{I.2})$$

L'énergie libérée par les réactions de fusion nucléaire s'accompagne donc d'une diminution de la masse du Soleil au cours du temps.

### I.3.1. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 μm environ). L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de 340 W.m<sup>-2</sup>. Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre+atmosphère, environ 100 W.m<sup>-2</sup> sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre [9].

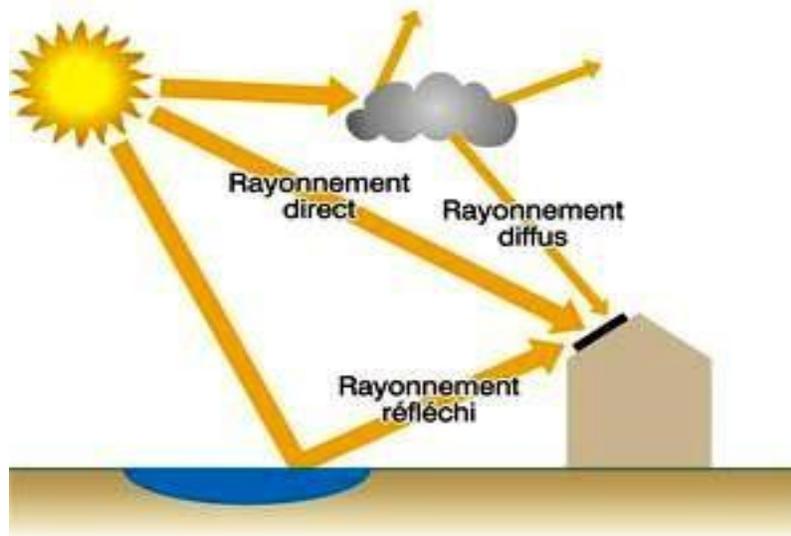


**Figure I.8** : spectre électromagnétique du rayonnement solaire

Cela montre que près du quart de cet éclairement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages ( $65 \text{ W.m}^{-2}$ ), le reste  $15 \text{ W.m}^{-2}$  étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc  $180 \text{ W.m}^{-2}$  qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers ( $120 \text{ W.m}^{-2}$ ) se font directement, le reste ( $60 \text{ W.m}^{-2}$ ) s'effectuant par diffusion vers le bas.

### I.3.2. Composantes du rayonnement solaire :

Le spectre du rayonnement solaire à la surface de la Terre est constitué de différentes composantes. seulement une partie de cette énergie arrive au sol sous différentes formes. Ainsi, on définit [10] :



**Figure I.9** : Composantes du rayonnement solaire au niveau du sol

### **Rayonnement direct**

Le rayonnement direct ou la composante directe du rayonnement solaire est celui incident sur un plan quelconque en provenant d'un angle solide autour du disque solaire. Il parvient en ligne droite et par temps clair.

### **Rayonnement diffus**

C'est la composante du rayonnement solaire incidente sur un plan récepteur après avoir été diffusée par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol. Elle parvient ainsi de toute la voûte céleste

### **Rayonnement réfléchi**

Le rayonnement réfléchi ou l'albédo est le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige). Ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.

### **Rayonnement global**

Le rayonnement global correspond à la somme des composantes du rayonnement solaire définies précédemment.

### **L'albédo :**

En réalité la terre n'est pas un corps noir, une partie du rayonnement solaire incident est réfléchi par l'atmosphère (principalement par les nuages) et par le sol terrestre. Cette quantité est appelée le flux d'albédo. On définit généralement l'albédo comme étant le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une

surface sur l'énergie solaire incidente [11].

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

**Tableau I.1** : Valeurs de l'albédo pour le rayonnement solaire global ; Albédo = facteur de réflexion par rapport au rayonnement solaire ( $\lambda < 3 \mu\text{m}$ ) [12].

### I.3.3. Usage de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et traversant l'atmosphère, qui absorbe une partie de l'énergie, et parvenant à la surface de la Terre. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires [13] [14].

Il existe 3 utilisations de l'énergie solaire :

- la production de chaleur : le « solaire thermique »,
- la production d'électricité : le « solaire photovoltaïque »,
- la production d'un mouvement : le « thermodynamique ».

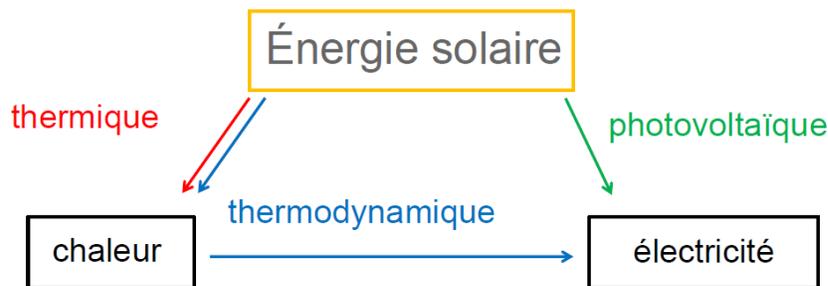


Figure I.10 : usage de l'énergie solaire.

#### I.3.3.1. Les capteurs solaires thermiques:

Un capteur solaire est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur qui sera transmise à un fluide appelé "fluide caloporteur".

### I.4. Différents types capteurs solaires :

Il existe plusieurs types de capteurs solaires thermiques les capteurs non-vitrés, les capteurs plans, les capteurs sous vide, les capteurs à concentration. Ces types diffèrent considérablement en qualité, en rendement, en conception et en coût.

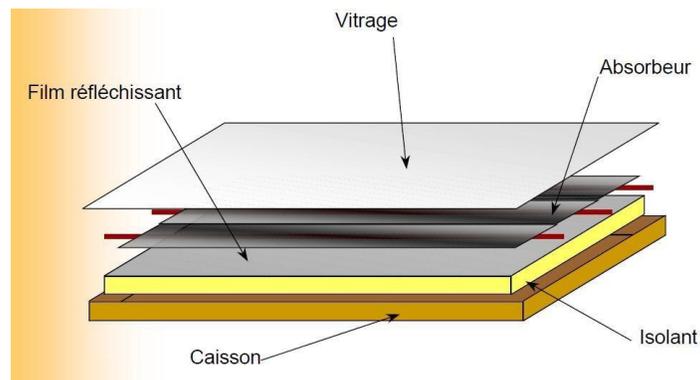
#### I.4.1. Les capteurs plans :

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...). L'énergie solaire (rayonnement) est captée par la surface absorbante du capteur solaire. Un fluide caloporteur absorbe et véhicule une partie de l'énergie captée par l'absorbeur [15] [16].

Un capteur plan vitré est composé :

- d'un caisson,
- d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords,
- D'un film réfléchissant,
- d'un faisceau de tubes cylindriques,
- une surface absorbante placée à l'intérieur du coffre,
- un vitrage fixé sur le caisson

Les tubes sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

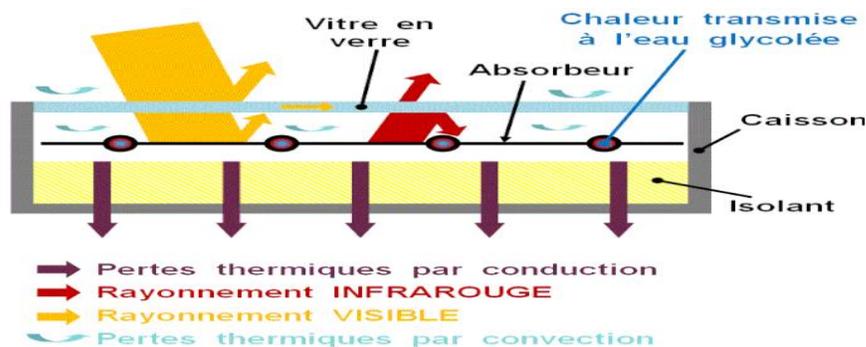


**Figure I.11** : capteur plan

On distingue ainsi :

• **Le capteur solaire à eau :**

Le capteur solaire thermique à eau est constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un conduit permettant à l'eau de collecter l'énergie cédée par l'absorbeur, et d'un isolant représente le principe de fonctionnement d'un tel capteur [17].



**Figure I.12:**Capteur solaire thermique à eau , vue en coupe.les conduits d'eau

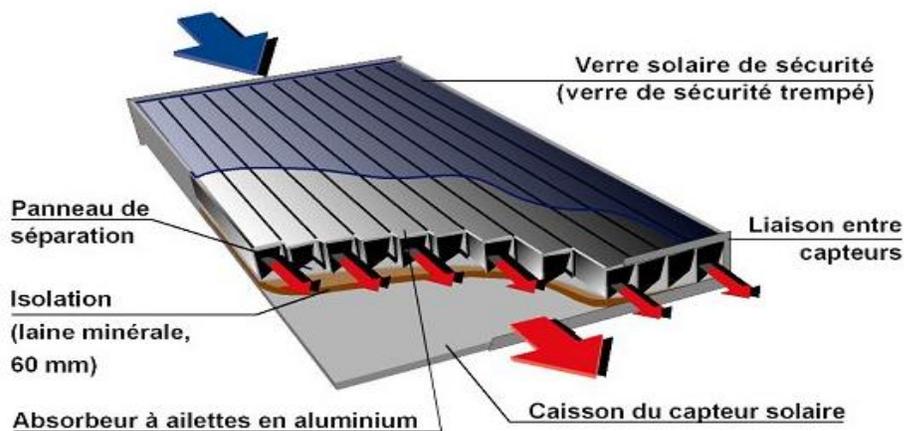
Le principe est le suivant :

le rayonnement solaire, dont le spectre se situe essentiellement dans les longueurs d'onde du visible (courtes longueurs d'onde), passe à travers la couverture Transparente (constituée ici d'un vitrage), et arrive à l'absorbeur, celui-ci s'échauffe, et transmet de l'énergie thermique par convection à l'eau qui circule dans les conduits, et réémet du rayonnement thermique vers l'extérieur (grande longueur d'onde), L'isolant permet de réduire les Pertes thermiques du capteur. On peut distinguer deux types de systèmes :

- Les systèmes à basse pression de circulation très simple, à eau chaude sans pression.
- Les systèmes à haute pression, à eau chaude à haute pression utilisant une pompe.

**\* Le capteur solaire à air :**

Contrairement au capteur à eau où le fluide passe dans les tuyaux, le conduit d'air est en générale formé par l'espace situé entre la couverture et l'absorbeur. De même que pour le capteur à eau, l'écoulement peut être forcé ou naturel. Le coefficient de transfert de chaleur de l'air est approximativement de deux ordres de grandeurs plus faible que celui de l'eau [18].

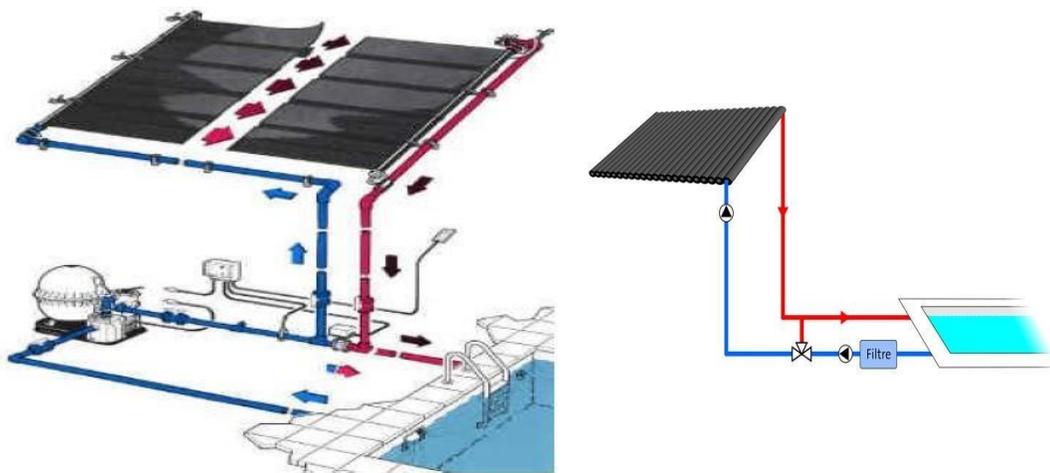
**Figure I.13 :** Capteur solaire plan à air

### I.4.2- Les capteurs non vitrés :

Un capteur solaire non vitré, aussi appelé capteur "moquette", est composé :

- d'un absorbeur (métallique ou synthétique) revêtu d'une peinture sombre et sélective,
- d'un faisceau de tubes cylindriques ou ovalisés, résistants aux rayonnements ultraviolets et aux variations de température.

Les tubes sont parcourus par de l'eau (fluide caloporteur). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes. Ces capteurs solaires ne sont généralement pas isolés. De ce fait, en sortie du capteur, l'eau n'excède pas 20°C. Ces capteurs n'ont pas d'application directe dans la production d'eau chaude sanitaire. Il est néanmoins possible d'utiliser les capteurs non vitrés pour un préchauffage de l'eau, dans les grosses installations. La seule application des capteurs solaires non vitrés est le chauffage de l'eau de la piscine [19]:



**Figure I.14:** capteur plan non vitré.

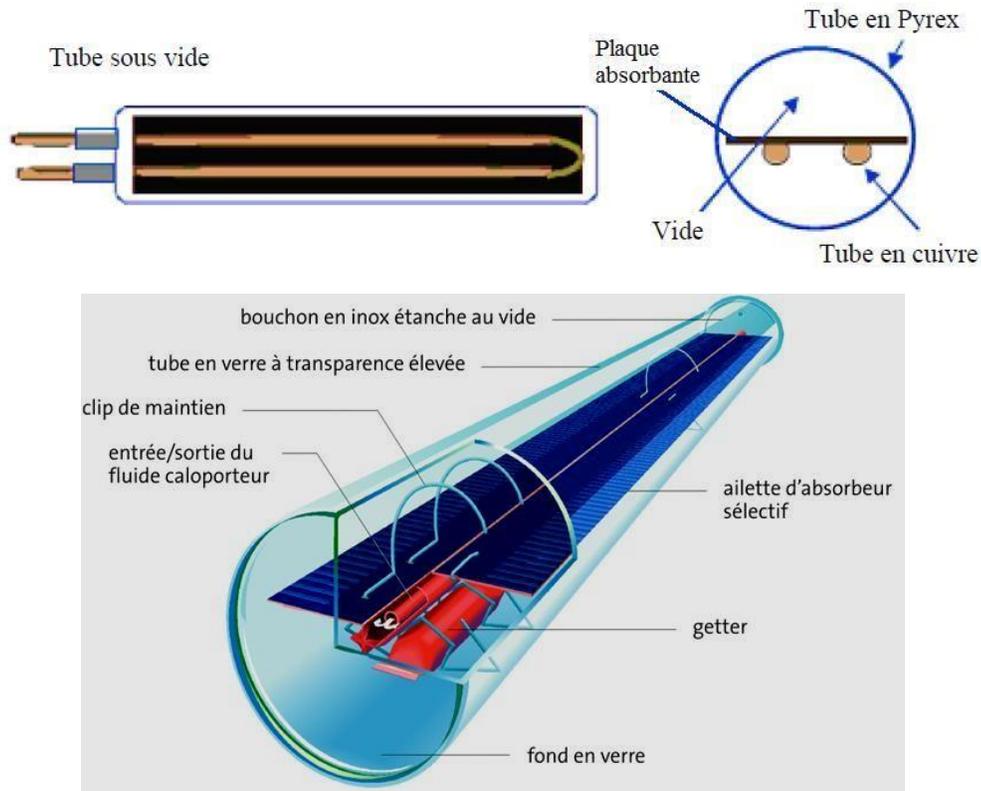
L'eau de la piscine est pompée jusqu'aux capteurs. En circulant dans les faisceaux de tubes, l'eau est chauffée, puis ramenée dans la piscine.

### I.4.3- Les capteurs sous vide :

Un capteur solaire thermique sous vide est composé :

- d'une série de tubes de verre sous vide (il n'y a pas d'air),
- d'un absorbeur à l'intérieur des tubes de verre,
- d'un tube en cuivre à l'intérieur des tube de verre.

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes [20].



**Figure I.15 :** capteur sous vide.

Grâce aux propriétés isolantes du vide, les déperditions de chaleur par convection sont fortement réduites. Ceci permet de chauffer l'eau à une température comprise entre 85°C et 100°C.

Les capteurs solaires thermiques sous vides sont principalement utilisés pour :

- L'alimentation d'un groupe de froid par absorption.
- La production d'eau chaude dans les bâtiments tertiaires (hôpitaux).

#### **I.4.4- Les capteurs à concentration :**

Les capteurs à concentration sont des capteurs solaires muni d'un système optique (réflecteur, lentilles, etc.) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement ayant traversé l'ouverture. Seul le rayonnement direct peut faire l'objet d'une concentration. Les centrales thermiques solaires utilisent des miroirs afin de diriger le rayonnement solaire direct sur un récepteur et de produire ainsi des températures suffisamment élevées pour la production de vapeur. Cette vapeur actionne des turbines générant l'énergie électrique.

Un capteur solaire thermique à concentration est composé [21] :

- d'un châssis,
- d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords,
- d'un système de réflexion de la lumière,
- d'un absorbeur,
- d'un réseau de tubes en cuivre.

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes. En général, les capteurs à concentration sont utilisés pour des applications à haute température.

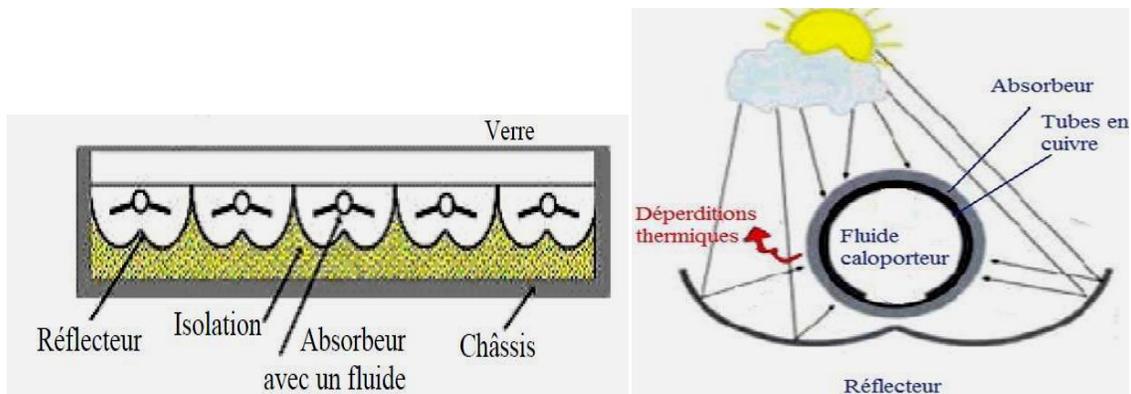


Figure I.16 : capteur à concentration.

#### I.4.4.1. Différents types des réflecteurs:

- A. Systèmes à réflecteur parabolique** Concentration à tout instant des rayons du soleil au foyer [22].

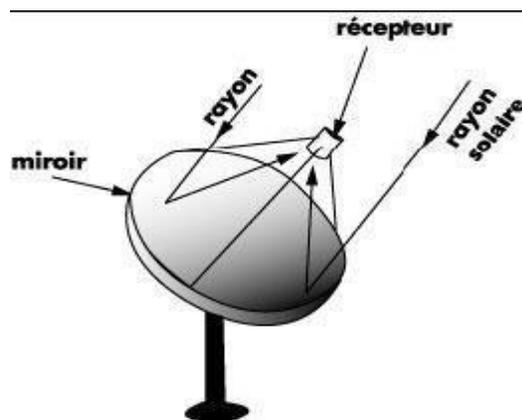
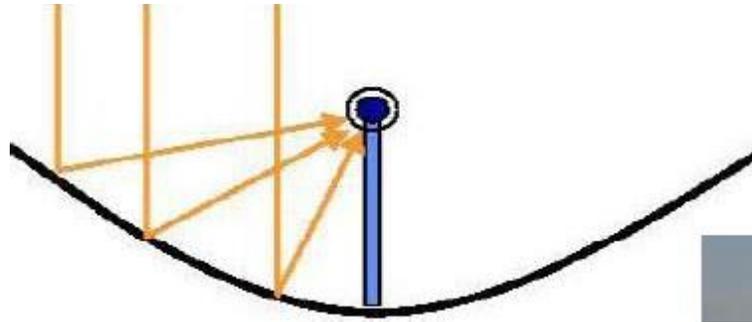


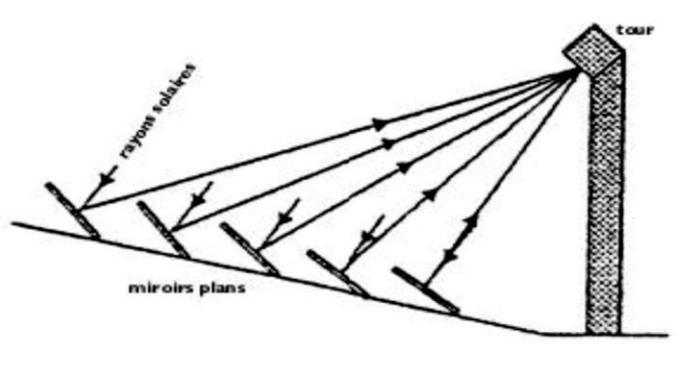
Figure I.17: Systèmes à réflecteur parabolique

- B. Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique** Concentration des rayons solaires sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur.



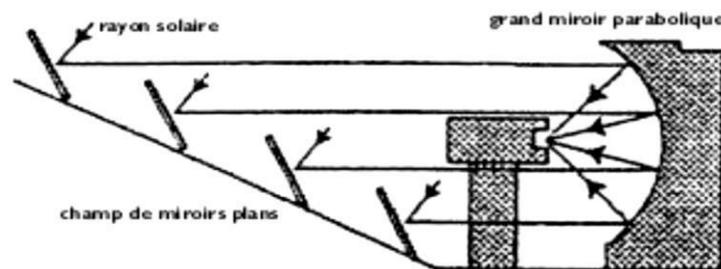
**Figure I.18 :** Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique

**C. Centrale à tour :** Ensemble de miroirs mobiles grâce à un système automatique. \* Réflexion du rayonnement solaire vers une chaudière située au sommet d'une tour.



**Figure I.19:** Systèmes à Centrale à tour

**D. Fours solaires** Champ de miroirs plans mobiles et d'un grand miroir parabolique fixe.



**Figure I.20:** Systèmes à Fours solaires

## I.5. Technologie capteurs solaires (photovoltaïque) :

### I.5.1. Panneaux solaires bi-verre :

La différence entre les panneaux solaires bi-verre et les panneaux solaires photovoltaïques traditionnels se situe dans leur structure : les cellules (monocristallines ou polycristallines) sont encapsulées entre deux plaques de verre mesurant chacune 2 mm d'épaisseur. Voici les principaux avantages et inconvénients des panneaux solaires bi-verre [23] :

- Plus stables dans le temps et Plus résistants aux intempéries.
- Pas plus performants que les panneaux classiques dans des conditions climatiques normales. En effet, les performances sont optimisées uniquement dans certaines conditions extrêmes (sous une température de 85 °C et une humidité relative de 85 % durant 1 000 heures) : la baisse de puissance des panneaux bi-verre est alors de 3 % contre 5 % pour des panneaux classiques
- Un prix plus élevé que pour des panneaux solaires classiques (environ 1 000 € de plus<sup>2</sup>)
- Plus lourds que les panneaux classiques : il convient donc de vérifier leur adaptabilité avec l'architecture de la maison [24].

### I.5.2. Panneau solaire bifacial :

Il s'agit d'une technologie particulièrement en vogue sur le marché des nouveaux panneaux solaires : les **promesses de rendement** sont en effet particulièrement séduisantes.

Ainsi, les panneaux solaires bifaces sont équipés de cellules solaires sur les faces **externe ET interne**

Ceci permet de capter à la fois :

- Le rayonnement solaire **direct**.
- Le rayonnement solaire **réfléchi** grâce à des cellules photovoltaïques posées sur les deux faces du panneau (souvent grâce à la technologie bi-verre) ;

Pour que cela puisse fonctionner, les cellules sont positionnées sur des **panneaux semi-transparents** fixés à une faible distance du support (et non pas en surimposition directe), ce qui permet au rayonnement solaire de se refléter également sur la face interne.

Cette technologie solaire photovoltaïque se base sur le principe de l'**albédo**. Par exemple, les rayons solaires réfléchis par un sol neigeux, sableux ou de couleur claire peuvent être captés par le dos du panneau solaire bifacial [25].

Les panneaux solaires double-face présentent des **avantages et des inconvénients** :

- Un **rendement plus important** qu'avec un panneau (monoface) sur les surfaces de couleur claire (jusqu'à + 15,7 %<sup>1</sup>) ;
- Une solution performante sur les **sols clairs** (zones désertiques, neigeuses ou champs de culture) ;
- Pose possible sur différents supports : poteau, pergola, brise-soleil ;
- **Pas adaptés** à une installation photovoltaïque classique sur toiture ;
- Des **prix plus élevés** que ceux des panneaux (monofaces).

### I.5.3. Panneau solaire intégrant un micro-onduleur :

Ce dispositif est équipé de **micro-onduleurs** situés sur la face arrière dès sa fabrication. Pour les panneaux classiques, ce sont les installateurs qui posent les micro-onduleurs sur les rails et les branchent aux modules [25].

Les **atouts** des panneaux solaires avec micro-onduleurs intégrés ne sont pas négligeables :

- Une **pose plus simple** et plus rapide qu'avec un panneau photovoltaïque classique, ce qui implique un coût de main d'œuvre plus bas ;
- Une **maintenance facilitée** : il est possible de changer uniquement le micro-onduleur ou le module en cas de problème, puisqu'ils ne sont pas soudés l'un à l'autre ;
- **Pas de risque de surchauffe** du panneau photovoltaïque, ce qui garantit un rendement stable et optimal : cela est dû à une bonne ventilation grâce aux modules AC. En effet, au-delà de 25 °C, le rendement baisse en moyenne de 0,5 % pour chaque degré supplémentaire.

### I.5.4. Panneau solaire organique :

Il s'agit d'une véritable petite révolution : des capteurs solaires organiques peuvent être **intégrés** surtout types d'objets.

Pour information, une cellule organique est composée d'une couche dite « **active** », réalisée à partir d'une **molécule organique** (azote, carbone,). Cela permet donc d'obtenir des panneaux solaires plus fins, plus résistants et **plus flexibles** à la fois. Ils peuvent être posés sur des objets variés : carrosserie de voiture, meubles, dômes, papiers peints, etc. Cette technologie permet donc d'ouvrir l'avenir du solaire vers de larges perspectives d'innovation [25] [26].

Les principaux **avantages et inconvénients** des panneaux solaires organiques sont les suivants :

- Une grande **polyvalence** : les cellules organiques peuvent être posés sur du mobilier, mais aussi sur des surfaces vitrées, par exemple ;
- Un **rendement** plus intéressant que les panneaux solaires classiques selon les études récentes du CEA-Liten ;
- Une meilleure **stabilité de rendement** : les films photovoltaïques organiques n'étant pas sensibles à la chaleur, ils garantissent un rendement stable tout au long de l'année ;
- Une **durée de vie** inférieure à celle des panneaux solaires classiques ;
- Des **performances variables** selon les technologies adoptées.

### I.5.5. Panneau solaire tuile en pérovskite :

Voici une technologie qui fait parler d'elle depuis plus de 10 ans sur le marché solaire.

La pérovskite, matériau semi-conducteur créé en 2009, est un **minéral** que l'on trouve dans la nature en faible quantité. Cependant, sa structure peut aisément être **reproduite** par l'humain.

Voici **les atouts et les inconvénients** des cellules en pérovskite :

- Des taux de **rendement** équivalents à ceux des cellules faites en silicium ;
- Des cellules **plus rapides à produire** que celles en silicium. En effet, le silicium doit être pur et dépourvu de défauts pour être exploité. La pérovskite, en revanche, tolère les défauts et peut être exploitée plus facilement ;
- Un **matériau transparent**, souple et léger qui peut être utilisé pour réaliser des vitres de fenêtres solaires ;
- Un **prix inférieur** aux cellules en silicium dû à un coût de production plus bas : le Laboratoire National des Énergies Renouvelables parle d'un **coût de production** 10 fois moins élevé que pour les panneaux classiques.
- Les résultats de rendement ne sont liés qu'à des **dispositifs expérimentaux** de 10 cm sur 10 cm, et n'ont pas été testés en conditions réelles.
- Les cellules en pérovskite sont constituées d'une petite quantité de **plomb**, nocif pour l'environnement et la santé.
- Une plus grande **fragilité** que les cellules en silicium [27].

### I.6. Conclusion:

On a présenté dans ce chapitre un récapitulatif de quelques notions de base relatif aux énergies renouvelables et particulièrement l'énergie solaire qui a une grande importance, Chaque type d'énergie renouvelable a des caractéristiques distinctes et un processus diffère l'un de l'autre. La connaissance de ces notions fondamentales et particulièrement le rayonnement global au sol va nous servir par la suite dans l'exploitation de l'énergie solaire par un capteur solaire et concentrateurs solaires pour la production d'énergie thermique/électrique, ainsi que différents exemples du développement des capteurs solaires à l'ère moderne [28], et la différence de leur installation les uns des autres selon les différents les circonstances et les besoins de leur utilisation.

# **Chapitre II**

## ***GISEMENT SOLAIRE***

### II.1.Introduction :

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Une connaissance précise de la distribution de l'irradiation solaire sur un site géographique particulier est d'une grande importance pour le développement des systèmes photo thermiques ou photovoltaïques [29]. Tout objet observable dans le ciel est forcément repérable dans un système de coordonnées. Comme sur la Terre, l'homme a besoin d'un système de repérage afin de localiser un astre.

Pour tout système de ce type il est nécessaire d'avoir un point d'origine, un point zéro. Ce dernier est arbitraire et l'homme va pouvoir jouer sur cet élément pour définir des systèmes différents de coordonnées.

### II.2.Distance terre-soleil :

L'orbite de la **Terre** est elliptique et la **Terre** passe au plus près du **Soleil** début janvier (à 147 millions de km) et au plus loin début juillet (à 152 millions de km). Le **Soleil** n'apparaît pas plus gros en juin, nous n'en sommes donc pas plus proche [30] [31].

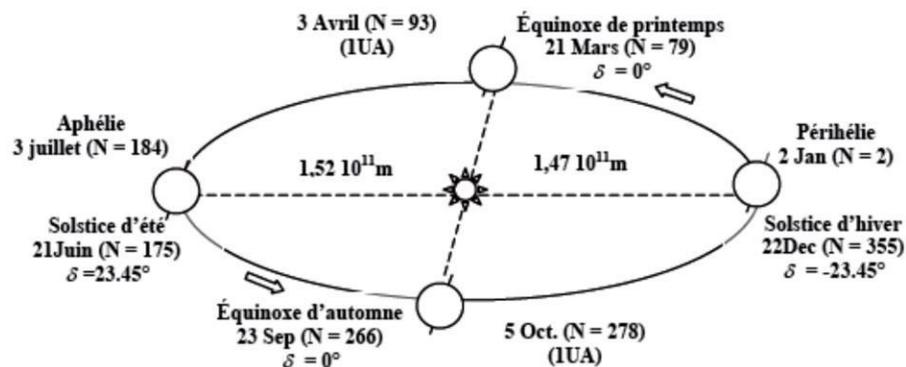


Figure II.1 : mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil.

### II.3.Translation et rotation de la terre :

On peut décomposer les mouvements de la terre en considérant séparément le mouvement par rapport au centre de masse (rotation) et le mouvement de ce centre de masse par rapport à lui-même (translation).

**II.3.1.Rotation de la terre :**

En vingt quatre heures, la terre effectue une rotation complète d’Ouest en Est autour de son axe ;c’est la base de notre système horaire. De cette rotation découle la succession des jours et des nuits [32].

**II.3.2.Révolution de la terre :**

La terre effectue en tour complet autour du soleil en 365,25 jours suivant une orbite elliptique, tandis que la vitesse moyenne de ce mouvement est d’environ 30 km/s. La distance entre les centres de ces deux astres varie d’une valeur minimale au Périhélie ( $1,47 \cdot 10^{11}$  m), aux environs du 2 janvier, à une valeur maximale, à l’Aphélie ( $1,52 \cdot 10^{11}$  m), aux environs du 3 juillet, la valeur moyenne étant appelée unité astronomique (UA). Les mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil sont illustrés dans la **figure II.1**, alors que le **tableau (II.1)** montre la durée des saisons conséquentesà ce mouvement [33] :

Saisons (Hémisphère N.)	Durée moyenne	Du	au
Printemps. . . . .	92 jours 20 heures	21/3	21/6
Eté. . . . .	93 jours 15 heures	21/6	23/9
Automne. . . . .	89 jours 19 heures	23/9	22/12
Hiver . . . . .	89 jours	22/12	21/3

**Tableau II.1** : la durée des saisons [34].

L'axe de la terre fait un angle d'environ 23.45° avec la perpendiculaire au plan de l'écliptique, c'est la déclinaison. C'est aussi l'angle que fait le plan de l'équateur avec le plan de l'écliptique.

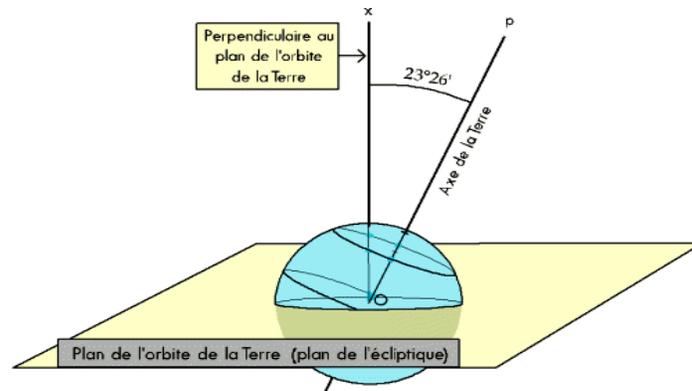


Figure II.2 : angle de déclinaison.

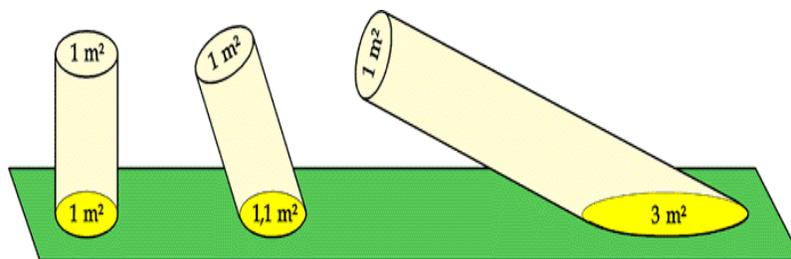


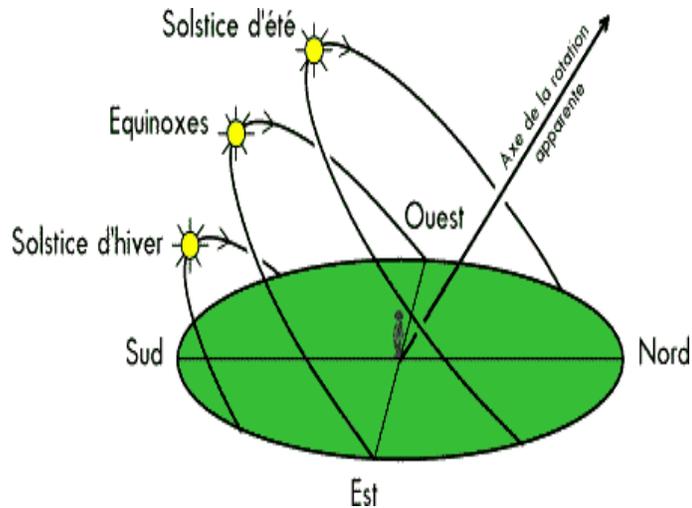
Figure II.3 : Le soleil de midi des solstices d'été et d'hiver

En hiver, le Soleil ne monte qu'à  $20^\circ$  au-dessus de l'horizon. Il éclaire en lumière rasante et chauffe beaucoup moins le sol qu'en été où il monte à  $66^\circ$ .

Un faisceau de lumière de  $1 \text{ m}^2$  de section doit chauffer  $1,1 \text{ m}^2$  s'il éclaire comme le Soleil de midi du solstice d'été ( $66^\circ$  au dessus de l'horizon). Par contre, s'il éclaire en lumière rasante comme le soleil du solstice d'hiver à midi ( $20^\circ$  au dessus de l'horizon), il doit chauffer  $3 \text{ m}^2$  : le sol reçoit donc beaucoup moins d'énergie au  $\text{m}^2$  et il fait plus froid [35].

### II.3.3.Course apparente de la terre :

Au cours de la journée, on voit le Soleil décrire une trajectoire circulaire, plus ou moins haute suivant la date (l'axe de rotation étant toujours le même). La direction du lever et du coucher du Soleil, sa hauteur à midi ainsi que la durée de la journée varient au cours de l'année [36].



**Figure II.4 :** Le mouvement apparent du Soleil au cours de l'année à la latitude de 47° nord (les trajectoires observées dépendent de la latitude du lieu).

**II.4.Sphère céleste :**

La sphère céleste est une sphère imaginaire de rayon indéfini, établie dans les cieux et ayant comme centre l'œil d'un observateur terrestre. La sphère est la base du système de coordonnées employé pour déterminer les positions des astres. Elle est également utilisée pour désigner les intervalles de temps.

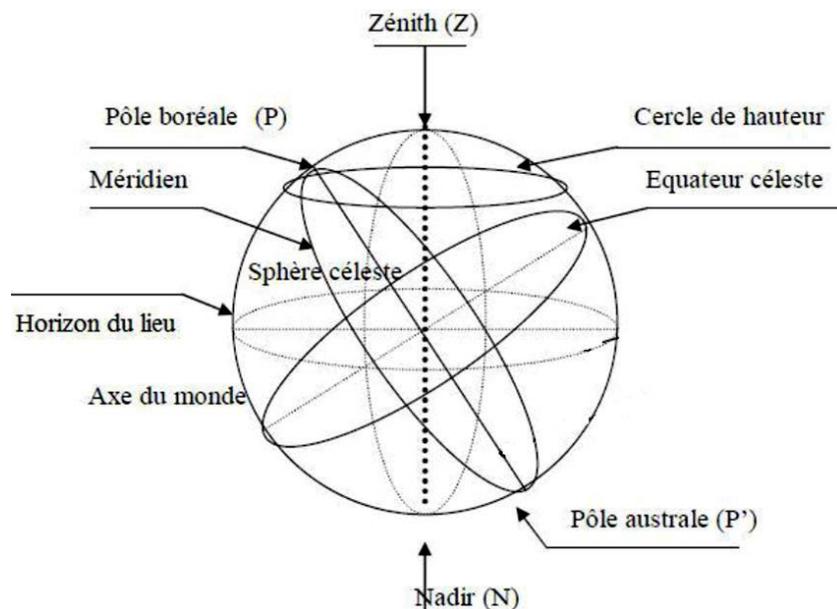


Figure II.5 : sphère céleste.

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

## II.5.Paramètres de position :

### II.5.1.Les coordonnées géographiques (terrestres):

Tout point de la surface de la terre est repéré par ses coordonnées géographiques. Ce système de coordonnées a pour plan principal l'équateur terrestre et la ligne des pôles lui est perpendiculaire. On a choisi comme méridien d'origine le méridien qui passe par l'observatoire de Greenwich [37].

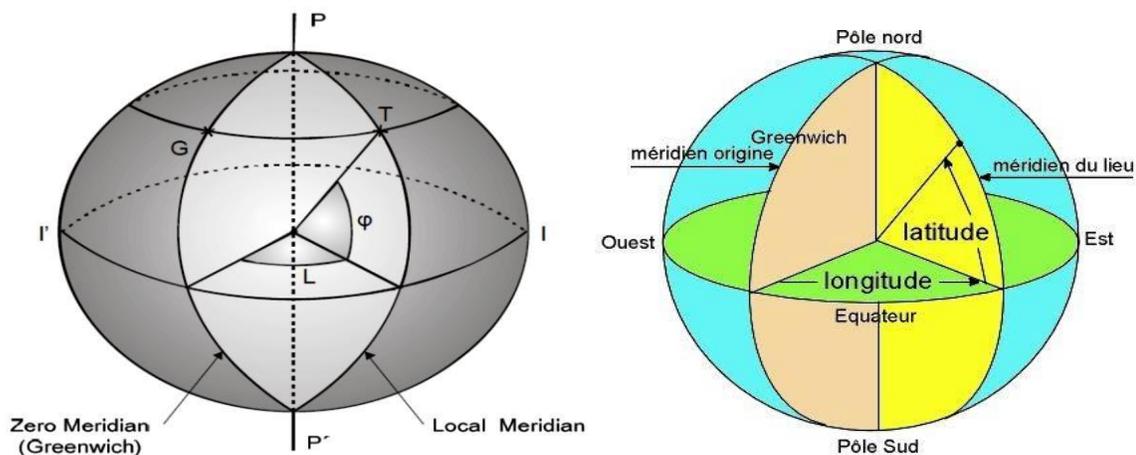


Figure II.6 : coordonnées géographiques

#### a)- Latitude $\varphi$ :

C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré (distance angulaire à l'équateur) ; elle est égale à la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud. Elle varie entre  $+90^\circ$  au pôle Nord et  $-90^\circ$  au pôle Sud.

- $\varphi > 0$  hémisphère nord
- $\varphi < 0$  hémisphère sud

#### b)- Longitude $L$ :

C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest. Elle varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$  de l'ouest à l'est [38] [39].

#### c)- L'altitude $Z$ :

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

#### d)- Le méridien

Grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude, le méridien pris pour origine (0°) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles. Le temps solaire vrai est identique, à un instant donné, pour tous les points d'un même méridien [40].

### II.5.2.Repérage du soleil :

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents.

#### II.5.3.Les coordonnées horizontales (coordonnées azimutales) :

##### - Le repère horizontal-

Le repère horizontal (azimutale) est un repère qui prend comme origine le lieu de situation de l'observateur et comme plan de référence le plan de l'horizon astronomique. Dans ce repère. La position d'un astre (soleil) dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies sur la **figure II.7** à savoir la hauteur du soleil ***h*** et son azimut ***a***. Donc, le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles qui sont [41] [42] :

##### a)- L'azimut (***a***) :

Il correspond à l'angle formé par la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le méridien du lieu (la direction sud). Ou bien, c'est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction sud. Le point d'origine des azimuts a été fixé, en astronomie, au SUD, il est compté positivement vers l'est et négativement vers l'ouest (ou bien : Il se compte de 0° à 360° à partir du sud dans le sens rétrograde). Il est donné par la relation suivante [43] :

$$\sin(\alpha) = \sin(\omega) \cdot \cos(\delta) / \cos(h) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$\alpha$ : Angle horaire

$\omega$ : Déclinaison du soleil

$h$  : Hauteur du soleil

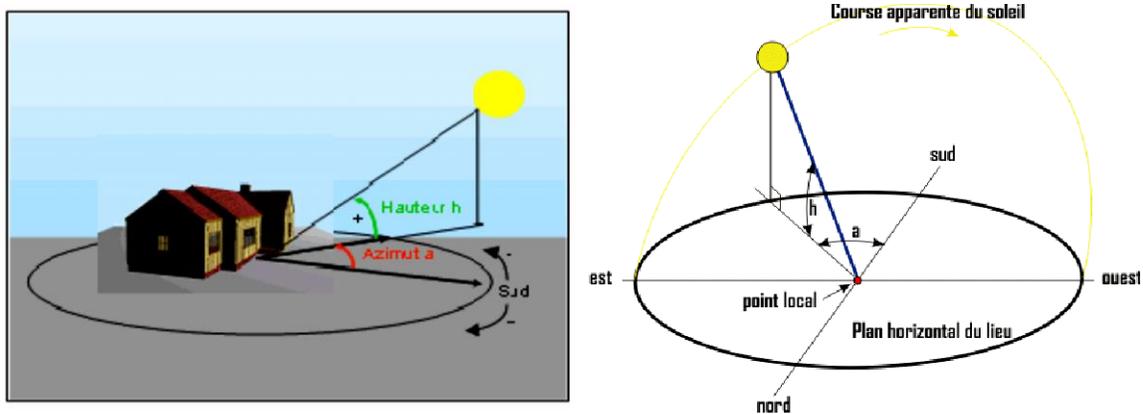


Figure II.7 : coordonnées horizontales (azimutales).

**Petite remarque** : les marins emploient ce type de coordonnées, mais ils ont décidé de fixer l'origine des azimuts au Nord, et ils comptent dans le même sens.

**b)- L'angle de la hauteur solaire (h) :**

Elle correspond à l'angle formé par le vecteur directionnel du soleil et sa projection sur le plan horizontal, **figure II.8**, elle vaut 0° au lever et coucher du soleil et elle prend sa valeur maximale(90°) à midi solaire. Elle est évaluée par la relation suivante [44] [45] :

$$\text{Sin}(h)=\text{sin}(\delta).\text{sin}(\varphi)+\text{cos}(\omega).\text{cos}(\delta).\text{cos}(\varphi) \quad (\text{II.2})$$

La hauteur maximale du soleil correspond à  $\omega = 0$ , obtenu à midi en temps solaire vrai elle est évaluée par la relation suivante :

$$\text{Sin}(h_{\text{max}})= \text{cos}(\varphi-\delta) \quad (\text{II.3})$$

Donc :

$$\text{Cos}(\pi/2 -h_{\text{max}})=\text{cos}(\varphi-\delta) \quad (\text{II.4})$$

D'autre part,  $h$  doit être une fonction croissante de  $\delta$  et une fonction décroissante de  $\varphi$  alors :

$$H_{\text{max}}=90-|\varphi-\delta| \quad (\text{II.5})$$

Elle varie selon la latitude d'un lieu et la déclinaison du soleil (le jour de l'année), (**figure II.7**).

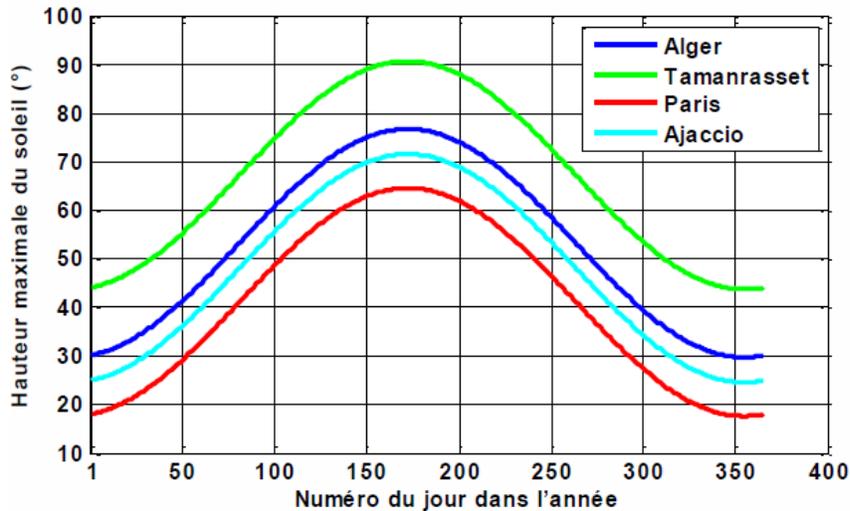


Figure II.8: évolution de la hauteur maximale du soleil pour diverses latitudes

Le point d'origine des hauteurs a été fixé sur l'horizon, puis comptée de 0° à 90° en partant de l'horizon vers le zénith. Donc nous avons 0° à l'horizon, et 90° au dessus de notre tête (au zénith).

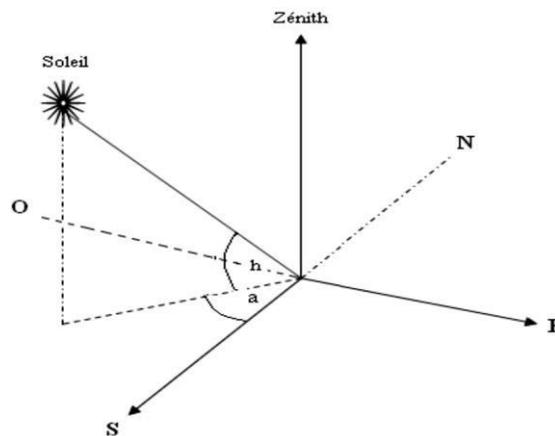


Figure II.9: zénith.

Les deux axes de coordonnées étant ainsi définis, nous pouvons donc maintenant localiser aisément une étoile, grâce à sa coordonnée en azimut et à sa coordonnée en altitude.

La hauteur solaire est positive quand le Soleil est au-dessus de l'horizon, négative quand le Soleil est au-dessous de l'horizon.

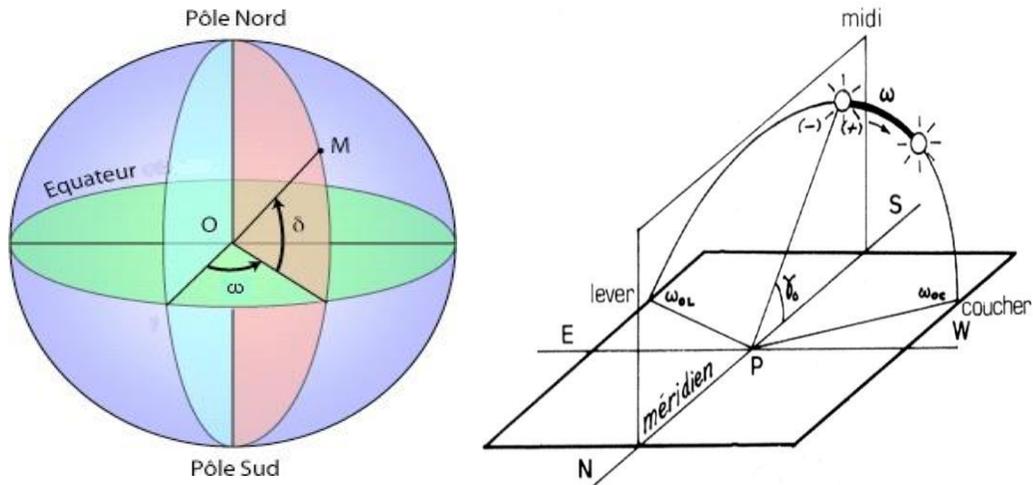
**Le Zénith :**

La distance au Zénith est le complément de l'angle de la hauteur solaire et s'appelle *angle de zenith* ( $\theta_z$ ), qui est donnée par [46] :

$$\theta_z = 90^\circ - h \tag{II.6}$$

**II.5.4. Les coordonnées équatoriales (horaires) : - Le repère équatorial- :**

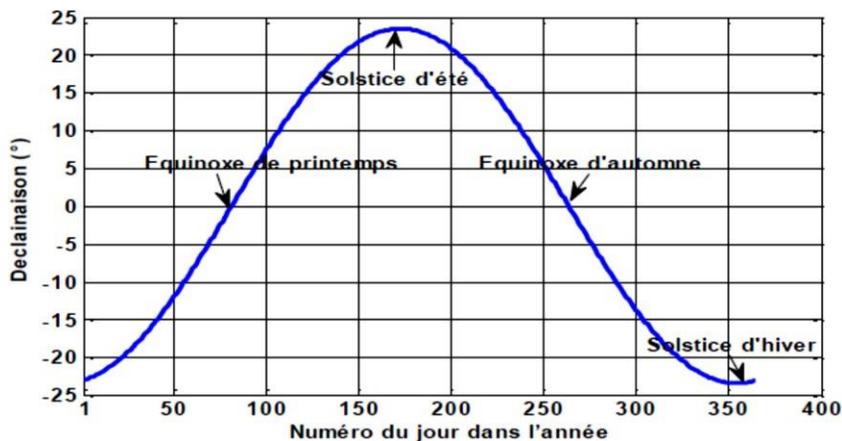
Le repère équatorial est un repère qui prend comme origine le centre de la terre et comme plan de référence le plan de l'équateur, **figure II.10**. Dans ce repère, la position du soleil dans le ciel est déterminée par deux coordonnées, la déclinaison  $\delta$  et l'angle horaire  $m$ .



**Figure II.10 :** coordonnées équatoriales (horaires).

**a)- La déclinaison  $\delta$  :**

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année comme, elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'été ( $+23^{\circ},27'$ ) et au solstice d'hiver ( $-23^{\circ},27'$ ). Elle varie selon une loi périodique (l'équation de Cooper) comme le montre la **figure II.11** [46].



**Figure II.11:** la variation de la déclinaison.

Les déclinaisons sont arbitrairement comptées positivement de l'équateur vers le pôle Nord, et négativement de l'équateur vers le pôle Sud. Le pôle Nord se trouvant à  $+90^\circ$ , l'équateur matérialise l'origine des déclinaisons donc  $0^\circ$ , le pôle Sud, se trouvant lui à  $-90^\circ$  de déclinaison.

Plusieurs chercheurs ont proposé des formules permettant de calculer la déclinaison, l'expression suivante permet de le faire avec précision [47] :

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma) \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (\text{II.6})$$

$\Gamma$ : qui est exprimée en radians, s'appelle l'angle du jour et est donnée par :

$$\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365} \quad (\text{II.7})$$

En exprimant tous les angles en degrés, on trouve l'équation de Cooper qui est donnée par :

$$\delta = 23.45 \sin \left[ 2\pi \left( \frac{284+n}{365} \right) \right] \quad (\text{II.8})$$

Où  $n$  est numéro du jour à partir du 1er janvier.

### b)- L'angle horaire ( $\omega$ ):

C'est l'angle formé par la méridienne origine du lieu considéré passant par le sud et la projection de la direction terre-soleil sur le plan de l'équateur céleste, ou encore, c'est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire dans sa course d'Est en Ouest par rapport au méridien local. Il est nul à midi solaire, négatif le matin et positif en après midi. L'angle horaire est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15(TSV-12) \quad (\text{II.9})$$

Où  $TSV$  est le temps solaire vrai.

C'est aussi l'arc de la trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu, il augmente de  $15^\circ$  par heure :

L'angle horaire s'exprime parfois en heures. Au midi solaire on a s'exprime  $\omega = 0$ . Chaque heure correspond à une variation de  $15^\circ$ , car la terre effectue un tour complet sur elle-même en 24 heures,  $\omega$  sera compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir.

L'angle horaire ( $\omega$ ) mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu (zénith). Cet angle horaire est négatif si le temps solaire est inférieur à 12 h.

A chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de  $15^\circ$ , soit encore 4mn de temps par ( $^\circ$ ) de longitude. A la latitude de  $45^\circ$ , une mn de temps représente environ 20 km, 11 km au cercle polaire et 28 km à l'équateur [47].

## II.6. Les paramètres du temps :

### II.6.1. Temps solaires :

Pour que les formules de  $\sin(h)$  et  $\sin(a)$  soient directement utilisables, il faut relier l'angle horaire  $\omega$  au temps légal.

#### a)- Le temps solaire vrai :

Le temps solaire vrai (TSV) est défini à partir de la rotation de la terre sur elle-même. C'est le temps mis par le soleil entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu (direction Nord-Sud). Il est donc directement lié à l'angle horaire. La terre fait un tour complet en 24H. Il est midi (12H) lorsque le soleil est au zénith. On a donc :

$$TSV = 12 + 24 \left( \frac{\omega}{360} \right) = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{II.10})$$

#### b)- Le temps solaire moyen et la correction de l'équation des temps :

On le définit comme étant le temps qui sépare en moyenne deux passages successifs par le méridien du lieu, une rotation complète de la terre autour d'elle-même prend 24 heures.

La rotation de la terre autour d'elle-même introduit la notion du temps solaire moyen ou TSM. La durée du jour n'est pas uniforme. Elle présente des irrégularités qui bien qu'inférieures au millième de seconde par jour se cumulent au cours de l'année et perturbent l'échelle des temps. Elles sont dues d'une part à l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre sur le plan de l'écliptique, et d'autre part du fait que la terre ayant une orbite elliptique. Sa vitesse de déplacement n'est pas constante. On est donc conduit à définir un temps solaire moyen qui est uniforme et qui est lié au temps solaire vrai par [48] :

$$TSV = TSM + ET \quad (\text{II.11})$$

#### c)- Équation du temps - la correction de l'équation des temps

Le temps solaire vrai et le temps solaire moyen diffèrent. Cette différence est appelée équation du temps  $ET$ , elle varie en fonction du jour.

$ET$  est la correction de l'équation des temps qui corrige le TSV par rapport au TSM. Cette correction varie au cours de l'année de -14.3 mn à +16.4mn, dû à la variation de la vitesse de la terre sur sa trajectoire autour du soleil. Elle peut être calculée par la formule approchée en minute [48] :

$$ET = -10^{-4} [2 \cdot 4797 \cos(\omega'j) + 32265 \cos(2\omega'j) + 903 \cos(3\omega'j) + 73509 \sin(\omega'j) + 93912 \sin(2\omega'j) + 3361 \sin(3\omega'j)] \quad (II.12)$$

Avec :

$j$  : numéro du jour de l'année et  $\omega = 0.984$

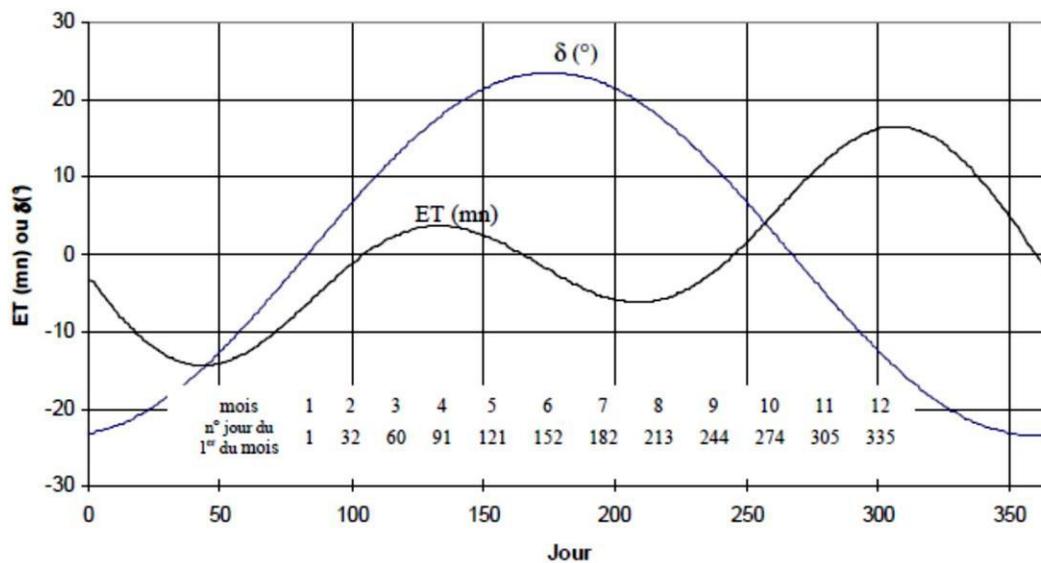


Figure II.12 : Équation du temps  $ET$  et déclinaison  $\delta$  n fonction du jour de l'année.

**d)- Le temps universel et la correction de longitude :**

Le temps universel TU est défini par l'heure du passage du soleil au méridien origine. Donc, c'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich (c'est le TSM à la longitude 0°). Le temps solaire moyen d'un lieu de longitude L (comptée positivement vers l'ouest) est lié au temps universel par :

$$TSM = TU + \frac{L}{15} \quad (II.13)$$

La différence entre le temps solaire moyen et le temps universel est appelée correction de longitude ( $\frac{L}{15}$ ). Deux points de la surface terrestre séparés par 1° de longitude voient passer le soleil à leurs méridiens avec 4mn de différence.

$$TU = TSM - L / 15 \quad (\text{II.14})$$

**e)- Le temps légal (local) :**

Le temps légal (ou local) est le temps officiel de l'État, il diffère par rapport au temps mondial de Greenwich par un décalage exprimé en heures (voir **figure II.13**).

L'heure légale correspond à l'heure que nous lisons aux horloges, elle est donnée par la relation suivante [49] :

$$TL = TU + C_1 + C_2 \quad (\text{II.15})$$

Ou,

$C_1$  : est le décalage horaire par rapport au Greenwich. (Égale 1 pour l'Algérie).

$C_2$  : correspond à l'heure d'été et d'hiver, s'il y a lieu. ( $C_2 = 1$  *heur* en hiver et 2 *heur* en été ; France)

Il est lié au «  $TU$  » par une différence fixe exprimée en un nombre entier d'heures qui dépend de la longitude, et des coutumes de chaque pays.

**f)- Transition du temps légal vers le temps solaire vrai**

Le temps solaire vrai peut s'écrire de la forme suivante :

$$TSV = TL - C_1 - C_2 + \left(\frac{ET + 4L}{60}\right) \quad (\text{II.16})$$

Ou bien :

$$TSV = TL - C_1 - C_2 + \frac{ET}{60} + \frac{L}{15} \quad (\text{II.17})$$

$ET$  : La correction de l'équation des temps (en minutes).

$L$  : Longitude de lieu (en  $^{\circ}$ ).

$C_1$  : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (en heures). (Égale 1 pour l'Algérie).

$C_2$  : Correspond à l'heure d'été et d'hiver, s'il y a lieu. ( $C_2 = 1$  *heur* en hiver et 2 *heur* en été France)

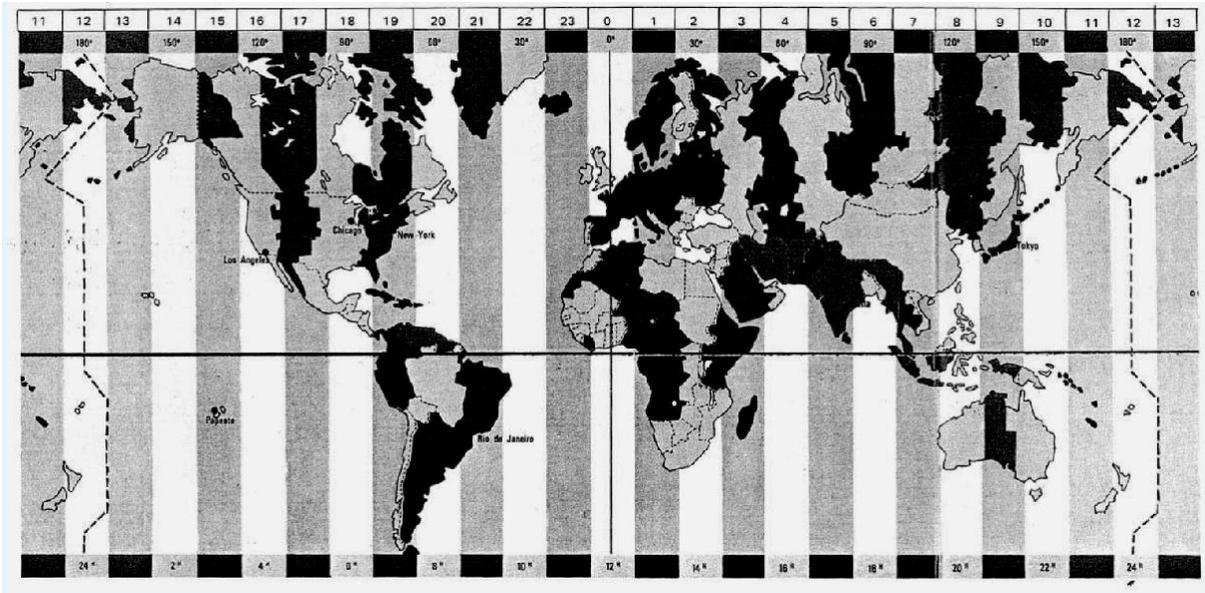


Figure II.13 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

**II.6.2.Lever et coucher du soleil**

L’angle horaire au lever et au coucher du soleil correspond à  $h = 0$  (soleil à l’horizon), on trouve [50] :

$$\text{Sin}(h)=\text{sin}(\delta)\text{sin}(\varphi)+\text{cos}(\omega)\text{cos}(\delta)\text{cos}(\varphi)$$

$$\text{Cos}(\omega_s)=-\text{tan } \varnothing \text{ tan} \delta \tag{II.18}$$

En résolvant l’équation précédente pour des  $\omega_s$ , si  $-1 < -\text{tan} \varnothing \text{ tan} \delta$  on obtient :

$$\omega_s = \pm \arccos(-\text{tan} \varnothing \text{ tan} \delta) \tag{II.19}$$

Un signe positif correspond au coucher du soleil et un signe négatif au lever de soleil.

$$\omega_c = +\arccos(-\text{tan} \varnothing \text{ tan} \delta) \tag{II.20}$$

$$\omega_l = -\arccos(-\text{tan} \varnothing \text{ tan} \delta) \tag{II.21}$$

Si la valeur du cosinus est supérieure à 1 il n’y a pas de lever (et pas de coucher), le Soleil est toujours sous l’horizon; si elle est inférieure à -1 il n’y a pas de coucher (et pas de lever), le Soleil est

toujours au dessus de l'horizon. En outre, dans le cas ou  $(-\tan\phi \tan\delta)=1$  alors le soleil n'est sur l'horizon que durant un instant seulement.

- Dans l'hémisphère nord, si :

$\tan\phi \tan\delta > 1$  : C'est la nuit polaire.

$\tan\phi \tan\delta < -1$  : C'est le jour polaire.

La latitude des cercles polaires qui limitent les régions ou ces phénomènes sont observés est donc :

$$\tan\phi = \pm \tan\delta, \text{ donc: } \phi = \pm \left( \frac{\pi}{2} - \delta \right) = \pm 66^{\circ}23' \quad (II.22)$$

L'angle horaire  $\omega_c$  au coucher du soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc

$\omega_c = -\omega_l = \arccos(-\tan\phi \tan\delta)$  et l'heure solaire vrai du lever et du coucher de soleil est donc [50]:

$$TSV_l = 12 + \frac{\omega_l}{15} = 12 - \frac{\arccos(-\tan\phi \tan\delta)}{15} \quad (II.23)$$

$$TSV_c = 12 + \frac{\omega_c}{15} = 12 + \frac{\arccos(-\tan\phi \tan\delta)}{15} \quad (II.24)$$

### II.6.3. Durée du jour (dj) (Durée d'insolation) :

La durée du jour est donnée par la relation suivante :

$$d_j = TSV_c - TSV_l = \omega_c - \omega_l = \frac{2\omega_c}{15} = \frac{2}{15} \arccos(-\tan\phi \tan\delta) \quad (II.25)$$

Avec :  $TSV = 12 + \frac{\omega}{15}$

$$TSV = 12 + 24 \left( \frac{\omega}{360} \right) = 12 + \frac{\omega}{15}$$

L'heure solaire au lever et coucher du Soleil a donc pour valeur:

$$TSV_l = 12 - \frac{d_j}{2} \quad (II.26)$$

$$TSV_c = 12 + \frac{d_j}{2} \quad (II.27)$$

**II.7.Orientation d'un plan:**

Un plan quelconque est défini par deux angles ( $\beta, \gamma$ ).

$\gamma$ : azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

$\beta$ : inclinaison du plan, c'est l'angle entre le plan et sa projection sur le plan horizontal [51].

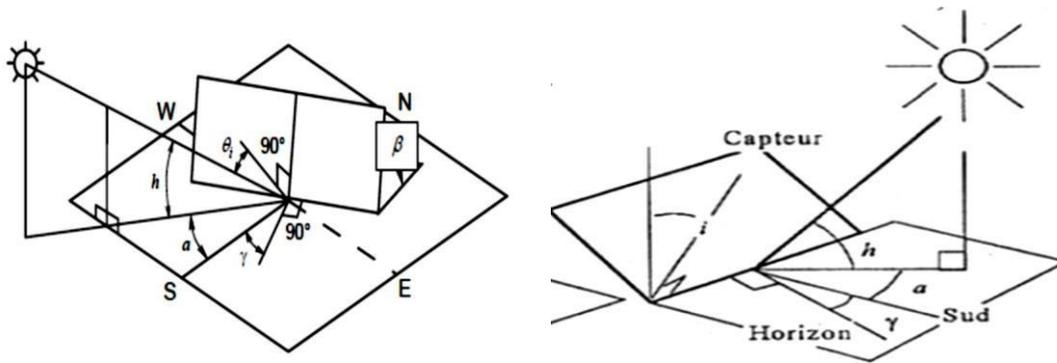


Figure II.14 : angle d'incidence des rayons solaires.

**II.7.1.Angle d'incidence des rayons solaires :**

Il correspond à l'angle formé par la normale du plan avec le vecteur portant la direction du soleil **figure II.13**. Son expression est :  $\cos \theta = n \cdot s$

L'angle d'incidence du faisceau solaire avec un plan d'inclinaison et d'orientation quelconque ( $\beta, \gamma$ ). est l'angle forme par le vecteur directionnel du faisceau solaire et la normale sortante au plan.

En appliquant la règle des cosinus, nous avons [52] :

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \theta_s + \sin \beta \sin \theta_s \cos(\alpha - \gamma) \quad (II.28)$$

Ou bien, on a :

$$\theta_z = 90 - h \text{ et } \cos \theta_z = \cos(90 - h) = \sin h, \sin \theta_z = \sin(90 - h) = \cos h \quad (II.29)$$

$$\text{Donc: } \cos \theta = \cos \beta \sin h + \sin \beta \cos h \cos(\alpha - \gamma) \quad (\text{II.30})$$

En utilisant les coordonnées équatoriales (en introduisant les angles  $\delta, \omega, \varphi$ ) :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \\ & + \cos \delta \cos \omega (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

### II.7.2. Coucher et lever de soleil pour une surface inclinée :

En comparant l'équation ci-dessus :

$$\cos \theta = \sin(\omega - \beta) \sin \delta + \cos(\omega - \beta) \cos \delta \cos \omega \quad (\text{II.32})$$

$\delta \cos \omega$  à l'angle solaire zénithale de l'équation :

$$\cos \theta_s = \sin(h) = \sin(\varphi) \sin \delta + \cos(\varphi) \cos \delta \cos \omega \quad (\text{II.33})$$

, il en résulte qu'un plan orienté vers le sud a une latitude effective de  $(\omega - \beta)$ .

Finalement, l'angle horaire solaire de lever et de coucher du soleil pour une surface inclinée est obtenue en mettant  $\theta = 90^\circ$  dans l'équation (II.29) et en résolvant pour  $\omega$  [52] :

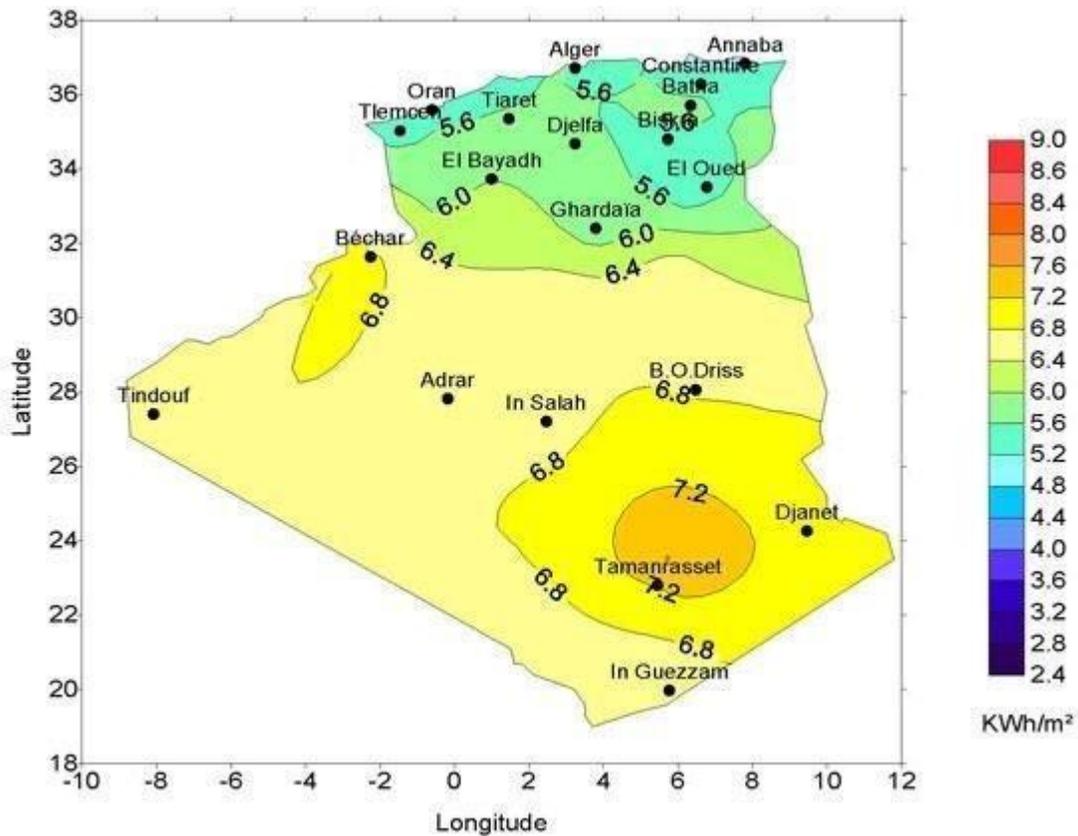
$$\omega_n = \pm \arccos(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta) \quad (\text{II.34})$$

Cependant, puisque le  $\omega_{st}$  ne peut pas avoir des valeurs plus grandes que celle de  $\omega_s$ , l'équation Complète pour le  $\omega_{st}$  est donnée par :

$$\omega_n = \min(\omega_s, \arccos(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta)) \quad (\text{II.35})$$

### II.8. Gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire[53].



**Figure II.15 :** Moyenne annuelle de l’irradiation solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l’Algérie dispose d’un gisement solaire considérable d’une capacité de 169,000TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque, avec plus de 2000 heures annuellement d’ensoleillement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L’énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l’ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kwh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays, ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh [54].

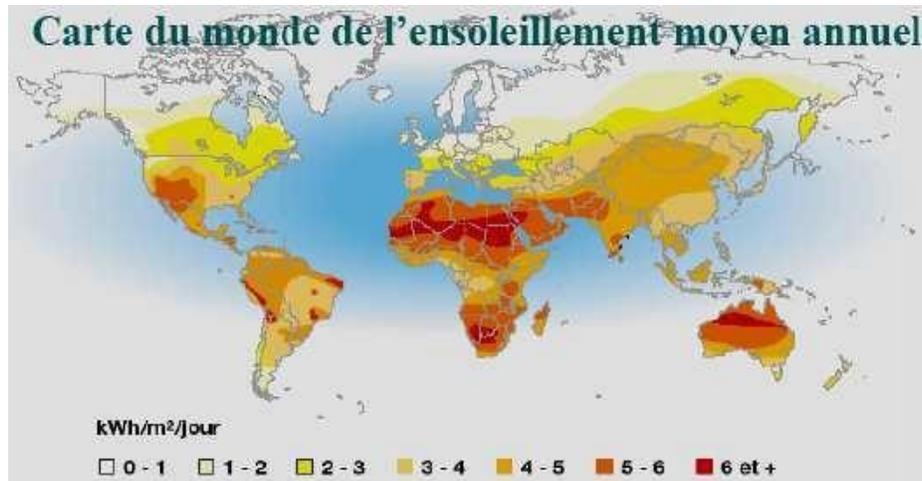


Figure II.16: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

## II.9. Conclusion

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire. Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil. Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et est incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu. Pour que le rayonnement solaire soit perpendiculaire au panneau solaire, et afin d'optimiser tout le système de captation, il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite du soleil.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important encore inexploité. Cette forme d'énergie présente beaucoup d'avantages en conversion thermique pour le chauffage et la production d'électricité principalement. C'est une forme d'énergie disponible, économique, non polluante et nécessite peu d'entretien.

# Chapitre III

*MODÈLES DU RAYONNEMENTSOLAIRE*

**III.1.Introduction:**

Dans ce chapitre, nous découvrirons les différents types de rayonnement solaire et comment le calculer à l'aide de différents modèles.

**III.2 . Rayonnement solaire au niveau du sol :**

Le rayonnement solaire après sa traversée de l'atmosphère est considéré comme la somme de deux composantes Directe et Diffus.

Les formules d'évaluation de ces composantes qui seront présentées dans ce chapitre sont données par **Perrin** [55]. Elles sont appliquées correctement dans les parties du monde sauf pour celles où l'atmosphère est trop chargée de poussière. Pour l'Algérie les vérifications ont montré la validité de ces formules. On a aussi présenté quelques modèles simplifiés pour l'évaluation rapide de la puissance et l'énergie solaire sur un plan horizontal pour un jour clair, Pour l'évaluation de l'énergie sur un plan incliné on présente le modèle de Liu Jordan.

**Notation:****a- Les puissances:**

Le flux du rayonnement est noté par [56] :

**I** : pour Direct

**D** : pour Diffus

**G**: pour Global

$$G = I + D \quad (\text{III.1})$$

Ces grandeurs sont des puissances par unité de surfaces et sont mesurées en w/m<sup>2</sup>.

On les note sous la forme  $a_j^i$

a étant une des trois lettres I, D, G

i et j étant des indices.

i : indice supérieur relatif au type de rayonnement

e : extra-terrestre ou hors – atmosphère

$n_j$ : jour clair (sans nuages)

J : indice inférieur relatif au plan de réception

n : normal aux rayons directs

h : plan horizontal

**III. 3 . Modèles d'évaluation des composantes du rayonnement solaire reçu au sol :**

D'après le modèle de PERRIN DE BRICHAMBAUT qui se base sur l'emploi du facteur de trouble total de Linke, le rayonnement GLOBAL est composé du rayonnement DIRECT et du rayonnement DIFFUS [56] [57].

Le diffus est lui-même décomposé en :

- diffus provenant du ciel
- diffus provenant du sol
- diffus provenant de la rétro diffusion

### III.3.1. Rayonnement par ciel clair:

#### a/ Rayonnement direct horizontal:

L'irradiation (éclairage) directe dans un plan perpendiculaire au soleil est donnée en  $W/m^2$  par une formule proposée par l'ESRA (Europe Solaire Radiation Atlas) (2000):

$$I_1 = I_0 \cdot \exp(-0.8662 \cdot TL \cdot m \delta_R(m)) \quad (III.2)$$

où  $I_0$  est la constante solaire hors atmosphère,  $m$  l'épaisseur d'atmosphère,  $TL$  le trouble de Link pour une épaisseur d'atmosphère égale à 2 et  $\delta_R$  l'épaisseur optique de Rayleigh, donnée par [57]:

$$(6.62960 + 1.75130m - 0.12020m^2 + 0.00650m^3 - 0.00013m^4)^{-1} \text{ si } m \leq 20, \text{ et } (10.4 + 0.718m)^{-1} \text{ si } m > 20$$

#### L'épaisseur d'atmosphère $m$ :

Prenant pour référence unité, l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne réduite à 7,8 km (conditions dites normales), supposant cette couche plane et stratifiée horizontalement, la longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux incliné d'un angle  $h$  par rapport à l'horizontale sera donnée par la formule:

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (III.3)$$

A une pression  $p$  différente de 1013 mbar et à une altitude  $z$  (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre (Kasten and Young (1989))

$$m = \frac{\left(\frac{p}{p_0}\right)}{\sin h + 0.50572(h + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (III.4)$$

Avec:  $(p / p_0) = \exp(-z / 8434.5)$

Par l'épaisseur d'atmosphère traversée  $m$ , la formule tient compte de la pression atmosphérique en mbar et de l'altitude  $z$  en km [58].

**Le trouble de Link :**

Le facteur de trouble de Link TL est relié au coefficient de trouble d'Angström :  $\beta_a$  (qui donne la couleur du ciel) et à la hauteur d'eau condensable  $w$ , par la formule :

$$TL = 1,6 + 16 \beta_a + 0,5 \ln t \quad (\text{III},5)$$

Elle est reliée à la tension de vapeur par la formule empirique de Hahn:

$$w(\text{cm})=0.17 t$$

où  $t$  (mbar) représente la tension de vapeur d'eau au sol.

La composante du rayonnement direct sur une surface horizontale est alors, dans tous les cas :

$$I_{1h} = I_1 \cdot \sin(h) \quad (\text{III},6)$$

**b/Rayonnement diffus horizontal :**

Pour calculer l'irradiation diffuse dans un plan horizontal, la formule suivante est utilisée [59] :

$$D_{1h} = I_0 \cdot T_{rd} \cdot F_d \quad (\text{III},7)$$

Où :  $T_{rd}$  est la fonction de transmission diffuse au zénith

$$T_{rd} = -1.5843 \cdot 10^{-2} + 3.0543 \cdot 10^{-2} \cdot TL + 3.797 \cdot 10^{-4} \cdot TL^2 \quad (\text{III},8)$$

et  $F_d$  la fonction de diffusion angulaire

$$F_d = A_0 + A_1 \sin(h) + A_2 \sin(h)^2 \quad (\text{III},9)$$

avec :

$$A_0 = 2.6463 \cdot 10^{-1} - 6.1581 \cdot 10^{-2} \cdot TL + 3.1408 \cdot 10^{-3} \cdot TL^2$$

$$A_1 = 2.0402 + 1.8945 \cdot 10^{-2} \cdot TL - 1.1161 \cdot 10^{-3} \cdot TL^2$$

$$A_2 = -1.3025 + 3.9231 \cdot 10^{-2} \cdot TL + 8.5079 \cdot 10^{-3} \cdot TL^2$$

$$\text{Et si } (A_0 \cdot T_{rd}) < 2 \cdot 10^{-3}, A_0 = 2 \cdot 10^{-3} / T_{rd}$$

**c /Rayonnement global horizontal :**

$$\text{Il est donné simplement par: } G_{1h} = I_{1h} + D_{1h} \quad (\text{III},10)$$

**III.3.2.Rayonnement horizontal par ciel quelconque :**

L'irradiation du jour moyen ne peut évidemment correspondre à un ciel clair, sauf exceptions, pour un climat désertique, par exemple.

**a/Rayonnement direct horizontal :**

La dispersion des éclairagements et les écarts entre valeurs mesurées et calculées sont très sensiblement réduits si l'on procède à une intégration sur des intervalles de temps de l'ordre de l'heure : on obtient alors des valeurs moyennes qui correspondent, avec une bonne précision, à celles déduites de relevés portant sur plusieurs journées identiques. On prend alors, pour le calcul de la hauteur du Soleil, l'heure correspondant au milieu de l'intervalle de temps considéré, et on suppose que les éclairagements calculés restent inchangés durant tout cet intervalle.

$$I_h = K \cdot I_{1h} \tag{III.11}$$

$$K = \sigma / (1 + c(1 - \sigma)) \tag{III.12}$$

Le rapport K est donc une fonction de la fraction solaire  $\sigma$  et d'un paramètre  $c$  compris entre 0 et 2, déterminé expérimentalement, en fonction du type de nuages et du régime des passages nuageux.

L'étude statistique des variations de K en fonction de  $\sigma$  pour les intervalles horaires de chaque journée, montre que, en France Nord, c varie de 0,3 en hiver à 1 en été, et dans le Sud de 0,5 l'hiver à 1,2 l'été ; en l'absence de connaissance du climat du site, on prendra  $c = 1$  en toutes saisons.

Lorsque l'on possède la mesure  $I_h$   $c$  est déduit directement pour la station météo, et c'est cette valeur qui est ensuite utilisée pour le site étudié [60] :

$$c = \frac{\frac{nbjoursmois \cdot I_0 \cdot \sigma \cdot \sum_{l=0}^{23} [\sin(h_i) \cdot \exp(-0.8662 \cdot \delta_i \cdot m_i \cdot T_L)]}{I_n} - 1}{1 - \sigma} \tag{III.13}$$

**b-Rayonnement diffus horizontal :**

Il est obtenu par différence entre le rayonnement global et le rayonnement direct.

**c-Rayonnement global horizontal :**

$G_h$  est directement donné par le coefficient de clarté :

$$G_h = K_T \cdot I_0 \cdot \sin(h) \tag{III.14}$$

Le rayonnement global horizontal est lui aussi corrigé de l'altitude : on calcule pour cela la variation qui se produit sur le global par ciel clair et on l'applique au global par ciel réel.

Ainsi, le direct et le diffus augmentent tous les deux avec l'altitude, mais la proportion de diffus diminue contrairement à celle du direct qui augmente.

Avertissement : les corrections d'altitude n'ont d'effet qu'au travers du nombre d'air-mass, et du trouble de Link et non de la fraction solaire. Il faut donc être vigilant lorsque la différence d'altitude est telle que la fraction solaire du site étudié risque d'être très différente de celle du site météo (plafond nuageux bas en certaines saisons) [61].

### III.4. Modèles simplifiés pour la puissance du rayonnement solaire :

#### III.4.1. Le modèle de Perez:

Le premier terme de l'addition précédente (diffus hors albédo) doit alors être remplacé par :

$$D^* = D_H [1 - (F_1 + F_2) \sin^2(\theta)] + D_H F_1 a + D_H F_2 \sin(b) \quad (\text{III.15})$$

où  $F_1$  et  $F_2$  sont des coefficients exprimant respectivement le degré d'anisotropie autour du soleil et d'anisotropie à l'horizon et au zénith. Ils s'obtiennent à partir des paramètres de clarté et de brillance du ciel. Ils ont été obtenus à partir de mesures [62].

$$a = \max(0, \cos \theta) \text{ et } b = \max(0.087, \cos Z)$$

Détail du calcul des coefficients  $F_1$  et  $F_2$

Ils sont calculés à partir de l'indice de clarté  $\varepsilon$  et de la brillance du ciel  $\Delta$ .

$$F_1 = F_{11} + F_{12} \Delta + F_{13} Z \quad (\text{III.16})$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22} \Delta + F_{23} Z \quad (\text{III.17})$$

où  $Z$  est l'angle zénithal du soleil, c'est-à-dire  $90 - h$

Les coefficients  $F_{ij}$  dépendent de  $\varepsilon$

Indice de clarté du ciel  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{\frac{D_h + I}{1 + 1.041.Z^3}}{1 + 1.041.Z^3} \quad (III.18)$$

Brillance du ciel  $\Delta$  :

$$\Delta = \frac{D_h.m}{I_0} \quad (III.19)$$

#### III.4.2. Modèle de HOTTEL et LIU JORDAN :

$$G_* = s_* + d_* \quad (III.20)$$

$$I_* = g_{ne} \cdot \sin(h) \cdot r_b \quad (III.21)$$

$$D_* = g_{ne} \cdot \sin(h) \cdot r_d \quad (III.22)$$

$\tau_b$  et  $\tau_d$  sont les transmissions pour le direct et le diffus .

$$r_b = a_0 + a_1 \cdot \exp(-k/\sin(h)) \quad (\text{III.23})$$

$$r_d = 0.2710 - 0.2939 \cdot r_b \quad (\text{III.24})$$

avec :

$$a_0 = 0.4237 - 0.00820 \cdot (6 - z)^2 \quad (\text{III.25})$$

$$a_1 = 0.05055 + 0.00595 \cdot (6.5 - z)^2 \quad (\text{III.26})$$

$$k = 0.2711 + 0.01858 \cdot (2.5 - z)^2 \quad (\text{III.27})$$

$z$  : altitude du lieu en km

Ces formules sont établies pour une atmosphère moyenne de visibilité 23 km et pour des altitudes inférieures à 2.5 km [63].

### III.4.3. Formule de Liu Jordan pour le calcul de l'énergie globale Reçue sur un plan incliné :

L'énergie solaire reçue au sol sur un plan incliné est estimée en fonction de l'énergie reçue sur un plan horizontal par le modèle de Liu Jordan par l'équation suivante [63] :

$$G_{incl} = S_{-} \cdot R_b + D_{-} \cdot (1 + \cos(\beta)) / 2 + G_{-} \cdot (1 - \cos(\beta)) / 2 \quad (\text{III.28})$$

tel que  $R_b$  c'est le facteur d'inclinaison :

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H_s) + H_s \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H_c) + H_c \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)} \quad (\text{III.29})$$

Avec :

$\beta$  : angle d'inclinaison

$\rho$  : albédo du sol

$H_c$  : angle horaire du coucher du soleil sur le plan horizontal

$$H_c = \arccos(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad (\text{III.30})$$

$H_s$  : angle horaire du coucher du soleil sur un plan incliné

$$H_s = \text{Min} [H_c, \arccos(-\tan(\varphi - \beta) \cdot \tan(\delta))] \quad (\text{III.31})$$

### III.4.4. Modèle de Foued CHABANE :

Le modèle établi a la basé sur des régressions non linéaires en fonction la hauteur du soleil et de l'humidité relative écrites en fonction de l'irradiation globale pour plusieurs jours de tests pour un plan incliné (45°) d'orientation sud [64] :

$$G_{proposé} = 696.42 \times \left(\frac{h}{1.124}\right)^{1.124} + 1.751 \times \left(\frac{H_r}{1.124}\right) \times 1.24 \quad (\text{III, 32})$$

**III.4.5.Modèle de Lacis & Hansen:**

La formule générale proposée par Lacis & Hansen pour le calcul du rayonnement solaire global sur un plan horizontal :

$$G = I_{SC} \times \cos \theta_z \times \left[ \frac{0.647 - \rho_s - a_w}{1 - 0.0685\rho} \right] \times 0.33 - a_w \quad (III.33)$$

$I_{SC}$  est la constante solaire extraterrestre calculée par:

$$I_{SC} = I_0 \times \left[ 1 + 0.033 \times \cos \left( \frac{360}{365} (n_j - 3) \right) \right] \quad (III.34)$$

Avec  $I_0$ : La constante solaire moyenne égale à 1367 **W.m<sup>-2</sup>** et  $n_j$  : le numéro de jour dans l'année ( $n_j=1$  pour le 1 Janvier et  $n_j=365$  pour le 31 Décembre).

$\theta_z$ : est l'angle zénithal,  $z=90^\circ - h$  ou  $h$  est la hauteur du soleil.

Le coefficient  $a_0$  correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone, est calculé par la relation :

$$a_0 = (0.02118U_0)/(1 + 0.042U_0 + 3.23 \cdot 10^{-4}U_0^2) + (1.082U_0)/((1 + 138.6U_0)^{0.805}) + (0.0658U_0)/(1 + (103.6U_0)^3) \quad (III.35)$$

Ou,  $U_0$  , L'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et défini par :

$$U_0 = I \times m_r \quad (III.36)$$

Ou,  $m_r$  est la masse d'air optique relative donnée l'équation :

$$m_r = [\cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{1.253}]^{-1} \quad (III.37)$$

Et,  $I$  représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone)

$$I = \{235 + [150 + 40 \sin(0.9856(n_j - 30)) + 20 \sin(3L)] [\sin^2(1.28\varphi)]\} 1000 \quad (III.38)$$

$L$  et  $\varphi$  sent respectivement la longitude et la latitude du lieu.

$a_w$ : représente le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau.

Donnée par l'équation :

$$a_w = \left( 2 \cdot \frac{9X_w}{(1+141.5X_w)^{0.635} + 5.925X_w} \right) \quad (III.39)$$

$X_w$ : est l'épaisseur d'eau condensable corrigée par trajet optique du rayonnement à travers cette couche, donnée par :

$$X_w = m_a \times U_w \quad (\text{III.40})$$

$U_w$ : est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm).elle Elle est donnée par

l'équation:

$$U_w = \frac{0.493}{T} HR \times \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (\text{III.41})$$

Avec,  $m_a$  la masse d'aire corrigée exprimée par:

$$m_a = m_r (/1013)^{0.75} \times (237/T)^{0.5} \quad (\text{III.42})$$

$P$ : est la pression atmosphérique (mbar) .Elle peut être calculée à partir de :

$$P = P_0 \exp(-0.0001184 \times Z) \quad (\text{III.43})$$

$P_0$ : est la pression atmosphérique au niveau de la mer ( $P_0= 1013 \text{ mb}$ );  $Z$ , l'altitude du site (m), par rapport au niveau de la mer; $T$ , la température ambiante (K) et  $HR$ , l'humidité relative(%).

#### III.4.6.Modèle de Zang et al :

Ils ont proposé un modèle sous forme d'une fonction composée des deux fonctions, la fonction cos et la fonction sin de la forme suivante [65] :

$$G = a + b \sin\left(\frac{2\pi n c}{365}\right) + e. \sin\left(\frac{2\pi n f}{365}\right) \quad (\text{III.44})$$

Ou : G et n sent les mêmes paramètres décrites dans les modèles précédant et les constantes a, b, c et f sont des constantes de ce modèle.

#### III.4.7.Relation d'A. Sambo:

Un période de 60 mois de mesure de la durée d'insolation, des températures maximales et minimales, de la température moyenne et de l'humidité spécifique, a été utilisé pour développer 12 différentes corrélations avec lesquelles la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale pourra être calculée pour le site de Kano au nord du Nigeria [66].

Les corrélations obtenues ont été combinées pour obtenir à une forme d'équation type d'Angstrom simplifiée, cette corrélation est donnée comme suit :

$$K_t = 0.62 - 0.294 \frac{DI}{T_m} + 0.178 \left( \frac{DI}{T_m} - H_r - \frac{T_{min}}{T_{max}} \right) + 0.491 \left( \frac{DI}{T_m} \times \frac{T_{min}}{T_{max}} \right) \quad (\text{II.45})$$

#### III.4.8.Modèle de L. Imane:

Le modèle établi est basé sur des régressions non linéaires en fonction l'humidité relative et hauteur du soleil écrite en fonction de l'irradiation global pour plusieurs jours de tests pour un plan horizontal.Le modèle proposé sous la forme :

$$G_{proposé} = A \times \left| \left( \frac{h+H_r}{100} \right) - X_c \right| Y_0 \quad (II.46)$$

#### III.4.9. Modèle de Perrin-Brichambaut :

Le rayonnement global sur un plan horizontal est la somme du rayonnement direct et diffus donnée par [67] :

$$G_h = I_h \cdot \sin(h) + D_h \quad (II.47)$$

$I_h$ : le rayonnement direct reçu par une surface horizontale.

$D_h$ : le rayonnement diffus provenant du ciel, reçu par une surface horizontale.

$G_h$ : le rayonnement global reçu par une surface horizontale.

#### III.4.10. Modèle de K. Zina :

Le modèle établi est basé sur des régressions non linéaires en fonction de la température ambiante et hauteur du soleil écrite en fonction de l'irradiation global pour un plan horizontal:

$$G_{proposé} = A \times \left| \left( h + \left( \frac{T_a}{320} \right) \right) - X_c \right| p \quad (III.48)$$

#### III.4.11. Modèle D. Bensahal and A. Yousfi:

La plupart des modèles dans la littérature font de la température un élément essentiel ; dans ce modèle, la température a été basé sur les données de pression atmosphérique, de rayonnement solaire global et d'humidité relative, et a été donné l'expression suivante [68]: (III.49)

$$T_{air} = T_{min} + \left( 1 - \left( \frac{T_{min}}{T_{max}} \right) \right) \times \exp \left( \left( \frac{I}{I_0} \right) + \left( \frac{P}{P_0} \right) + \left( \frac{1+H_r}{2} \right) \right)$$

Avec :

$T_{air}$ : est la température horaire de l'air ( $C^\circ$ )

$T_{min}$  et  $T_{max}$ : sont les températures minimale est maximale de l'air ( $C^\circ$ )

$I_0$ : est le solaire constant ( $I_0=1367 \text{ W/ m}^2$ ).

$I$ : est le rayonnement solaire global incident sur une surface horizontale à l'emplacement Etudié ( $\text{W/ m}^2$ ).

$p_0$  : est la pression atmosphérique ( $p_0 = 101.235 \text{ K Pa}$ ).

$p$ : est la pression atmosphérique à l'emplacement étudié ( $\text{K Pa}$ ).

$H_r$ : est l'humidité relative (%).

Si  $T_{max} \leq 3C^\circ$

Le rayonnement solaire globale ( $I$ ) peut être déduit de l'équation comme suit:

$$I = I_0 \times \left[ - \left( \frac{p}{p_0} \right) + \left( \frac{1-H_r}{2} \right) \right] + \ln \left( \frac{T_{\max} \times (T_{\text{air}} - T_{\min})}{T_{\max} - T_{\min}} \right) \quad (\text{III.50})$$

**III.4.12.Modèle de Kaplanis et Kaplani:**

Ils ont proposé un modèle sous forme d'une équation sinus de la forme [69] :

$$G = a + b \cdot \cos \left( \frac{2\pi n}{364} \right) \quad (\text{III.51})$$

Avec:

$G$ : les radiations solaires globales journalières.

$n$  : c'est le nombre de jour de l'année.

$a$  et  $b$  sont les constantes de ce modèle.

**III.5.13.Modèle d'Al-Salaymeh:**

Le modèle d'AL-SALAYMEH s'écrit sous forme exponentielle et donnée par la relation suivante [70] :

$$G = a_0 \exp[-0.5 \times ((x - a_1)/a_2)^2] \quad (\text{III.52})$$

$a_0$ : l'amplitude,  $a_1$  le center et  $a_2$  la largeur.

**III.4.14.Modèle de Capderou :**

Le modèle de Capderou utilise la trouble atmosphérique pour calculer les composantes directes et diffuses de l'Irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs de troubles, à partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directes et diffuses par ciel clair.

**a/.Eclairement direct par ciel clair obtenu sur un plan horizontal :**

$$I_b = b C_{t-s} \sin(h) \exp(-T_L^* (0.9 + (9 \cdot \frac{4}{0.89z}) \sin(h)^{-1})) \quad (\text{III.53})$$

$C_{t-s}$  : c'est la correction de distance terre-soleil définie par la relation suivant [71]:

$$s = 1 + 0.003 \cos \left( \left( \frac{360}{365} \right) (j - 2) \right) \quad (\text{III.54})$$

$I_0$  est la constant solaire égal  $1367W/m^2$ .  $H$

est la hauteur de soleil.

$T_L^*$ : Est le facteur de trouble atmosphérique de Linke.

Avec  $j$  est le nombre de jour. L'éclairement diffus incident sur un plan horizontal  $I_d$  est donné par:

$$I_d = I_0 \exp(-1 + 1.06 \log(\sin(h))) + -\sqrt{a^2 + b^2} \quad (\text{III.55})$$

$a=1.1$

$$b = \log(T_{1^*} - T_0) - 2.8 + 1.02(\sin(h))^2 \quad (\text{III.56})$$

$a=1.1$

$$I_G = I_b + I_d \quad (\text{III.57})$$

**b/Eclairement direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné:**

$$I_{bi} = b C_{t-s} \cos(I) \exp(-T_L^* (0.9 + \frac{9.4}{0.89} \sin(h))) \quad (\text{III.58})$$

I Oest l'angle d'incidence.

**c/Eclairement diffus incident sur un plan incliné:**

$$I_{di} = d_{ciel} + d_{sol} + z' \frac{1+\sin(y)}{2} \quad (\text{III.59})$$

Avec:  $d_{ciel}$ ,  $d_{sol}$ , et  $y$  sont respectivement le diffus du ciel, le diffus de sol et diffus rétrodiffusé .

D'où l'éclairement global incident, à un instant donné sur un plan  $(x, y)$  est :

$$I_{GI} = I_{bi} + I_{di}$$

#### III.4.15.Modèle de R-Sun :

**a/. Facteur de trouble de linke :**

Le facteur de trouble atmosphérique de Linke  $T_L$  représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraineraient la même atténuation que l'atmosphère réelle [71].L'avantage du facteur de Linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser.

**b/. Rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel claire:**

$$D_{hc} = I_0 C_{t-g} \times \sin(h_0) \times \exp[-0.8662 T_1 \times m_A \times \delta_R(m_A)] \quad (\text{III.60})$$

Le rayonnement diffus incident sur une surface horizontale par ciel clair est donné par:

$$D_{hc} = I_0 C_{t-s} \times T_n(T_L) \times F_d(h_0) \quad (\text{III.61})$$

$T_n, F_d$  sont facteur de transmission et la fonction de l'altitude solaire .

L'éclairement global sur un plan horizontal est calculé comme:

$$G_{hc} = B_{hc} + D_{hc} \quad (\text{III.62})$$

**c/. Rayonnement direct normal sur un plan incline:**

$$B_{hc} = B_{hc} \times \frac{\sin(\delta_{exp})}{\sin(h_0)} \quad (\text{III.63})$$

$h_0$  : Hauteur de soleil.

$\delta_{exp}$ : Est la position du soleil par rapport à une surface inclinée

Le modèle d'estimation de l'éclairement diffus par ciel clair sur une surface inclinée est représenté par les équations suivantes [71]:

$$D_{Ic} = D_{hc} \cdot D_{hc} \quad (III.64)$$

$$F_B = R + [\sin Q - Q \cdot \cos Q - \sin^2 \left(\frac{Q}{2}\right)] \cdot N \quad (III.65)$$

$$R_I = \frac{1 + \cos(Q)}{2}$$

$$N = 0.00263 - 0.712 - 0.6883 \cdot K_b^2$$

Ou:

$$K_Q = B/G_{0h}$$

$$G_{0h} = I_0 C_{t-s} \cdot \sin(h_0) \quad (III.66)$$

$D_{hc}$ ,  $F_B$ , et  $\beta$  sont respectivement l'éclairement diffus sur un plan horizontal, la fonction du rayonnement diffus du ciel et l'inclinaison du capteur.

### III.5.Conclusion:

L'utilisation de l'énergie solaire est une réalité partout dans le monde, et les travaux menés dans ce chapitre visent, d'une part, à se familiariser avec sous plusieurs formes et modèles, et à estimer et calculer plus avant le rayonnement solaire. Dans le détail, chacun des modèles proposés utilise l'étude de ses propres équations, qui donnent des calculs précis pour différents rayons solaires dans différentes conditions géographiques et climatiques.

# Chapitre IV

*RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION*

**IV.1.Introduction:**

Dans ce chapitre, nous essaierons d'étudier les différentes évolutions du rayonnement solaire dans chacune des régions de (Béchar) et de (Bordj Bou Arreridj), à l'aide du modèle proposée par Davies & Hay pour le calcul de l'intensité du rayonnement solaire direct, diffus, réfléchi et global reçu par le sol, qui permet d'observer l'évolution des différents rayonnements solaires se l'on le degré de réflexion (L'albédo) et la différence de situation géographique ainsi que la variation de l'humidité de l'atmosphère.

**IV.2.Modèle de Hay-Davies :**

Comme le modèle précédent, le modèle proposé par (Davies et Hay) en 1976 permet la détermination des composantes du rayonnement solaire au sol en fonction des différents coefficients de transmission des éléments constituant l'atmosphère a un instant quelconque de la journée [72].

**IV. 2.1 Rayonnement direct :**

La relation de calcul du rayonnement direct proposée par Davies & Hay est représentée par l'équation :

$$I = I_{SC} \times [(1 - \alpha_0) \tau_r - \alpha_\omega] \tau_a \cdot \cos(\theta_z) \tag{IV.1}$$

$\theta_z$  : L'angle zénithal du soleil.

Où  $\alpha_0$ : est le coefficient Correspond à l'absorption par la couche du rayonnement solaire direct.

$r_r$ : le coefficient de transmission après diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh, représenté par (Davies ) et al selon l'équation .

$$\tau_r = 0.972 - 0.08262 m_a + 0.00933 m_a^2 - 0.00095 m_a^3 + 0.000437 m_a^4 \tag{IV.2}$$

$m_a$  : la masse d'air corrigée exprimée par la relation suivante:

$$m_a = \frac{p}{p_0} m_r = \frac{\exp(-0.0001184 \times z)}{\cos(\theta_z) + 0.15 (93.885 - \theta_z)^{-1.253}} \tag{IV.3}$$

Le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau  $\alpha_\omega$  , est

donné par l'équation .

Le coefficient de transmission après diffusion par les aérosols a  $r_a$  est proposé par

Mächler selon l'équation.

$$r_a = (0.12445\alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.125\alpha) \exp[-\beta m_a(1.089\alpha + 0.5123)] \quad (IV.4)$$

et  $\beta < 0.5$

tels que:

$\alpha$  et  $\beta$  sont respectivement le coefficient caractérisant la visibilité du ciel et le coefficient de trouble d'Angstrom. Leur calcul est basé sur la détermination expérimentale de deux coefficients d'atténuation  $k_{a\lambda 1}$  et  $k_{a\lambda 2}$  correspondant aux longueurs d'onde où l'absorption par la vapeur d'eau n'intervient pas ( $\lambda_1 = 380$  nm et  $\lambda_2 = 500$  nm respectivement).

Les mesures utilisées dans ce travail nous ont été fournies par le NCDC (National Climati Data Center) à Asheville en Caroline du Nord.

Sachant que  $\alpha$  est proche de 0 pour les petites particules, croît avec la taille des particules et atteint 4 pour les grosses particules. Dans notre travail, on prend  $\alpha = 1.3$ . Le coefficient  $\beta$  vaut 0.02 pour un ciel très pur (bleu profond) et 0.2 pour un ciel pollué (bleu laiteux).

#### IV. 2.2 Rayonnement diffus :

Sur un plan horizontal, le rayonnement diffus est la somme de trois composantes diffuses :

$D_r$  et  $D_a$  et  $D_m$ .

$D_r$ : représente le rayonnement diffus de Rayleigh.

$$D_r = I_{sc} \tau_0 \tau_a (1 - r_r) 0.5 \cos(\theta_z) \quad (IV.5)$$

$\tau_0$  : Le coefficient de transmission après absorption d'ozone :

$$r_0 = 1 - \alpha_0 \quad (IV.6)$$

$D_a$  : Est le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols .

$$D_a = I_{sc} (r_0 r_r - \alpha_\omega) \times [F_c \times \omega_0 (1 - r_a)] \cos(\theta_z) \quad (IV.7)$$

$F_c$ : Le coefficient de dispersion directe dans l'atmosphère.

$D_m$  : Est le rayonnement diffus issu du phénomène de multi réflexion

$$D_m = \frac{(1 + D_a + D_r) \times \rho \times \rho_a'}{(1 - \rho \times \rho_a')} \quad (IV.8)$$

$\rho_a'$  : L'albédo du ciel clair du site considéré.

$$\rho_a' = 0.0685 + 0.17 \omega_0 (1 - r_a') \quad (IV.9)$$

avec, la contrainte sur  $r_a$  indiquant que le coefficient de transmission du rayonnement

solaire après diffusion par les aérosols devrait être calculé pour une valeur de masse d'air égale à 1.66 (P.P).

Le facteur 0.17 (représente)  $(1 - F_c \text{ pour } \theta_z = 53^\circ)$  et  $(1 - F_c)$ , est le coefficient de rétrodiffusion).

$\theta_z$ (°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	85
$F_c$	0.92	0.92	0.90	0.90	0.90	0.85	0.78	0.68	0.60	0.50

**Tableau IV.1:** Valeurs du facteur  $F_c$  en fonction de la distance zénithale d'après Robinson [73].

### IV. 2.3 Rayonnement global :

Le rayonnement global sur un plan horizontal est calculé par :

$$G=I+D \quad (IV.10)$$

#### IV. 2.3.1 Résultats et interprétations :

Les résultats ont été présentés en termes de profils des éclairagements direct, diffus, réfléchi et global pour différentes latitudes, en étudiant l'effet combiné de l'albédo du sol et l'humidité de l'atmosphère. Un programme écrit en langage MATLAB a été utilisé pour la modélisation et la présentation des résultats de simulation (voir ANNEXE) [74].

#### IV. 2.3.2 Effet de l'Albédo :

L'albédo, qui mesure la capacité d'une surface à réfléchir la lumière solaire, joue un rôle important dans le bilan énergétique de la terre. L'effet de l'albédo sur l'radiation globale, c'est-à-dire la quantité totale de rayonnement solaire atteignant la surface terrestre, est un sujet d'étude essentiel dans le domaine du climat et de l'énergie solaire. En comprenant cet effet, nous pouvons évaluer comment les variations de l'albédo peuvent influencer les conditions climatiques et l'utilisation de l'énergie solaire.

Lorsque la valeur de l'albédo d'une surface change, cela affecte la quantité de rayonnement solaire réfléchi, absorbé ou diffusé. Une surface ayant un albédo élevé reflète davantage de rayonnement solaire, ce qui réduit l'énergie absorbée et contribue à refroidir l'environnement. À l'inverse, une surface ayant un albédo faible absorbe plus de rayonnement solaire, ce qui entraîne une augmentation de la chaleur emmagasinée.

L'effet de l'albédo sur l'irradiation globale est étudié à travers des simulations et des modèles numériques qui permettent de quantifier les variations de l'énergie solaire en fonction des chan-

gements d'albédo. Ces études prennent en compte des facteurs tels que la latitude l'altitude, la couverture nuageuse et les caractéristiques spécifiques de la surface étudiée.

En comprenant comment l'albédo influence l'radiation globale, nous pouvons évaluer l'impact de différents scénarios, tels que des changements de couverture de glace, de végétation ou de revêtements de surface, sur le climat et les conditions environnementales. De plus, cette connaissance est essentielle pour la conception de systèmes solaires, tels que les panneaux solaires, en tenant compte des variations de l'albédo dans la région d'implantation.

En conclusion, l'effet de l'albédo sur l'radiation globale est une notion importante dans l'étude du climat et de l'énergie solaire. Comprendre comment les variations de l'albédo influencent la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface terrestre nous permet de mieux appréhender les changements climatiques et d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire dans différentes applications.

### IV.3. Analyse des résultats de les Eclairéments du au rayonnement (I, R, D, G) :

Nous avons tracé les courbes de l'étude les Eclairéments du au rayonnement (I, R, D, G) (w.m- 2) du l'effet de l'albédo sur l'irradiation globale cours le temps en heur de chaque région (Béchar et Bordj Bou Arreridj) En Algérie pendant le nombre de jours ( $n_j=210$ ).

**I** : Eclairéments du au rayonnement Direct.

**D** : Eclairéments du au rayonnement Diffus.

**R** :Eclairéments du au rayonnement Réfléchi

**G** :Eclairéments du au rayonnement Global

L'analyse des résultats des éclairéments du rayonnement (I, R, D, G) en fonction de l'albédo dans les régions (Béchar) et de (Bordj Bou Arreridj) en Algérie pendant une période de 210 jours permet de comprendre l'effet de l'albédo sur l'irradiation globale. Voici quelques aspects clés à considérer lors de l'analyse des courbes :

- l'irradiation directe (I) : L'éclairément dû au rayonnement direct représente la quantité de rayonnement solaire qui atteint directement la surface sans être diffusée ni réfléchi. Lors de l'analyse des courbes, observez si la valeur de l'éclairément direct reste constante ou si elle présente des variations significatives en fonction de l'albédo. Une variation significative pourrait indiquer une influence indirecte de l'albédo sur le rayonnement direct.
- l'irradiation diffuse (D) : L'éclairément dû au rayonnement diffus représente la quantité de rayonnement solaire qui est dispersée dans l'atmosphère et atteint la surface. Lorsque l'albédo

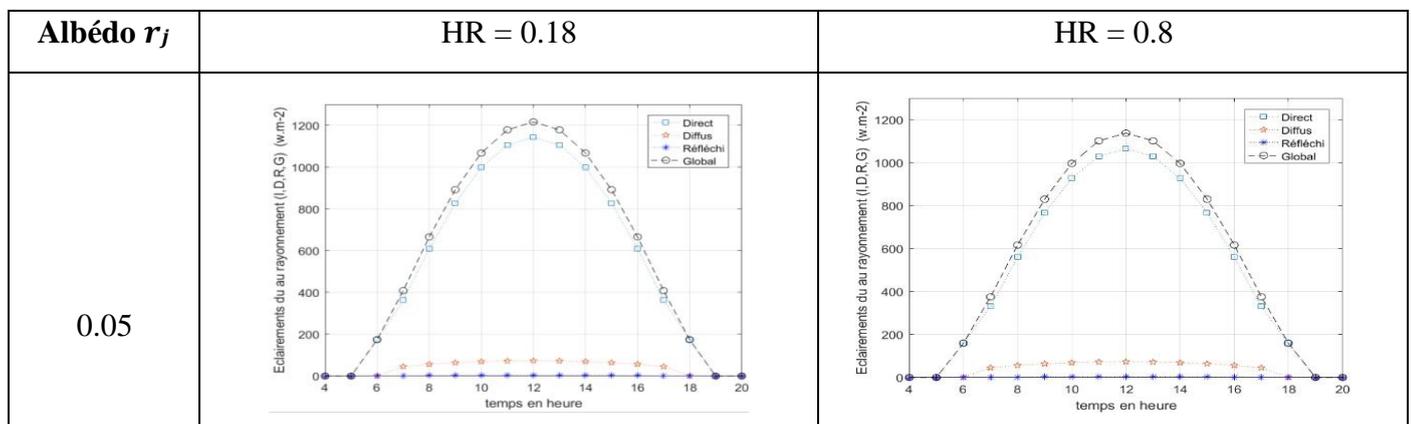
augmente, il est possible d'observer une augmentation de l'éclairement diffus, car une surface plus réfléchissante peut renvoyer davantage de rayonnement diffus vers la surface.

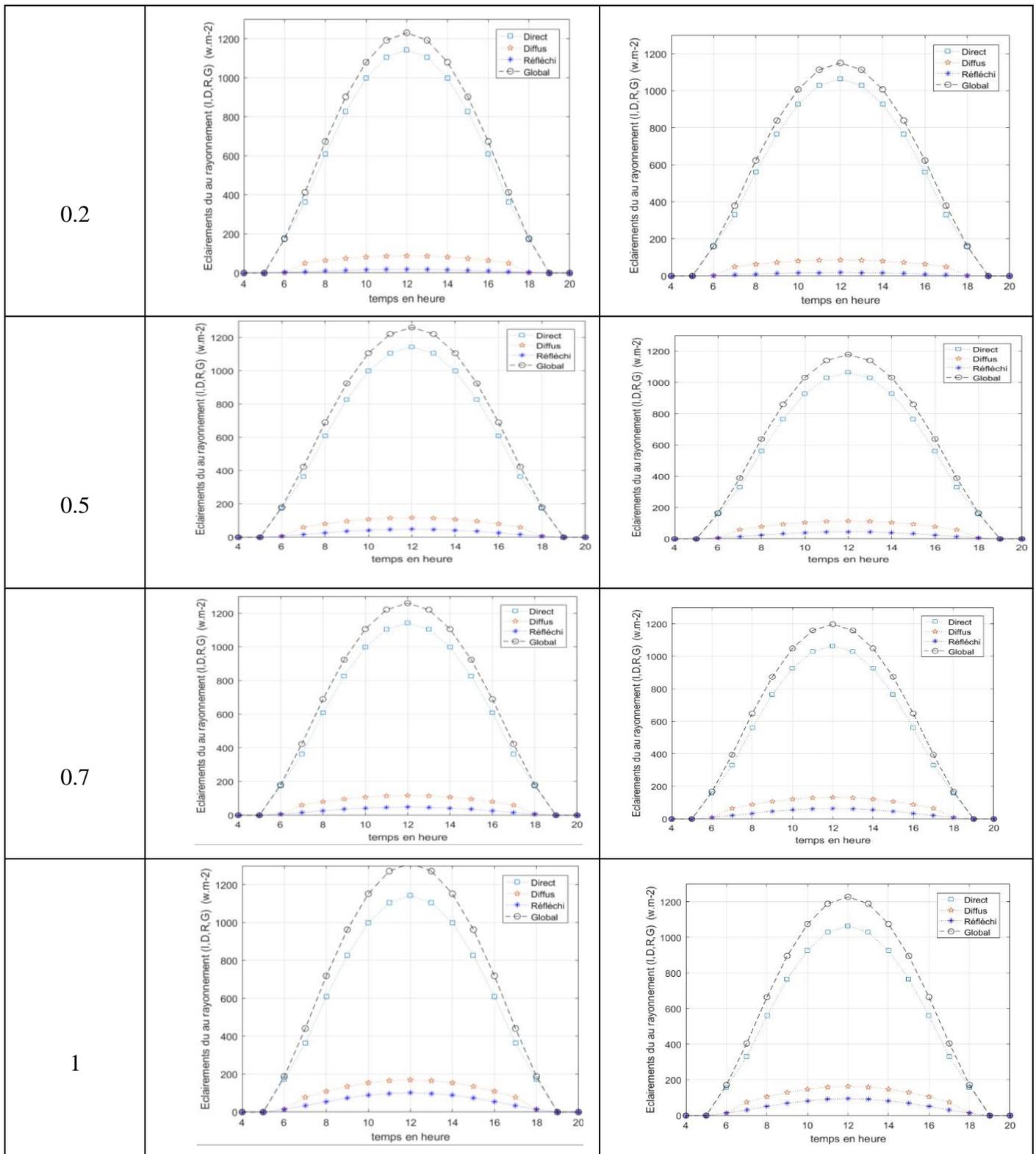
- l'irradiation réfléchie (R) : L'éclairement dû au rayonnement réfléchi représente la quantité de rayonnement solaire qui est réfléchi par la surface terrestre. Lorsque l'albédo augmente, on peut s'attendre à une augmentation de l'éclairement réfléchi, car une surface plus réfléchissante renvoie une plus grande quantité de rayonnement vers l'atmosphère.
- l'irradiation globale (G) : L'éclairement dû au rayonnement global représente la somme de l'éclairement direct, de l'éclairement diffus et de l'éclairement réfléchi. Lors de l'analyse des courbes, observez les variations de l'éclairement global en fonction de l'albédo. Si l'albédo augmente, on peut s'attendre à une augmentation de l'éclairement global, en raison de l'augmentation de l'éclairement diffus et de l'éclairement réfléchi.

L'analyse des courbes nous permettra de comprendre comment l'albédo affecte les différents composants du rayonnement solaire dans les régions étudiées. Nous pourrions déterminer si l'albédo a un impact significatif sur l'radiation globale et comment cela peut varier en fonction du temps et de la région. Nous oubliez pas que ces observations sont basées sur notre étude spécifique et peuvent varier en fonction des conditions locales et des paramètres utilisés dans la modélisation.

**IV.3.1.Développements du rayonnement solaire dans la région (Béchar):**

- Le numéro du jour de l'année  $n_j = 210$
- La valeur de la latitude  $lat = 31.61$
- La valeur de l'altitude  $z = 747$
- La valeur de la longitude  $lon = -2.22$
- La valeur la température en (c)  $T = 35$
- La valeur de l'Humidité ( $<1$ )  $= 0.18$
- La valeur de l'albédo sol  $r_j = [1, 0.7, 0.5, 0.2, 0.05]$





**Figure IV.1.:** Courbe représentant l'évolution du rayonnement solaire par jour pour différentes valeurs de l'albédo (région Béchar).

Après étude des courbes **Figure IV.1.**, nous avons observé l'influence du rayonnement solaire et l'évolution de la valeur du pourcentage d'albédo, ce qui indique que chaque fois que la valeur de l'albédo augmente, le rayonnement diffus augmente et le rayonne-

ment réfléchi augmente également, ce qui entraîne une augmentation du rayonnement global, et chaque fois que la valeur de l'albédo diminue, le rayonnement se propage et le rayonnement réfléchi diminue, ce qui entraîne une diminution du total radiation. Le rayonnement, tout comme le rayonnement direct, sa valeur reste constante dans les deux cas.

Nous avons également remarqué qu'une modification de la valeur HR de l'humidité entraîne une modification de la valeur du rayonnement solaire, car avec une augmentation de la valeur de l'humidité, l'intensité du rayonnement solaire diminue.

Alors on peut expliquer :

Lorsque la valeur d'albédo augmente ou que la valeur d'humidité diminue, c'est-à-dire lorsque la surface devient plus réfléchissante, deux choses se produisent :

Augmentation de la propagation du rayonnement : davantage de rayonnement solaire traverse l'atmosphère et atteint la surface de la Terre. Cela peut être dû à une plus grande réflexion des particules en suspension dans l'air ou des nuages.

Augmentation du rayonnement réfléchi : Plus de rayonnement solaire incident est réfléchi par la surface de la Terre. Cela peut être dû à une augmentation de l'albédo de la surface, qui conduit à une plus grande réflexion du rayonnement solaire.

Ainsi, le rayonnement global augmente, puisqu'il est la somme du rayonnement direct, du rayonnement diffus et du rayonnement réfléchi.

Au contraire, lorsque la valeur d'albédo diminue ou que la valeur d'humidité augmente, les effets sont opposés :

Diminution du rayonnement diffusé : moins de rayonnement solaire se propage dans l'atmosphère et atteint la surface de la Terre.

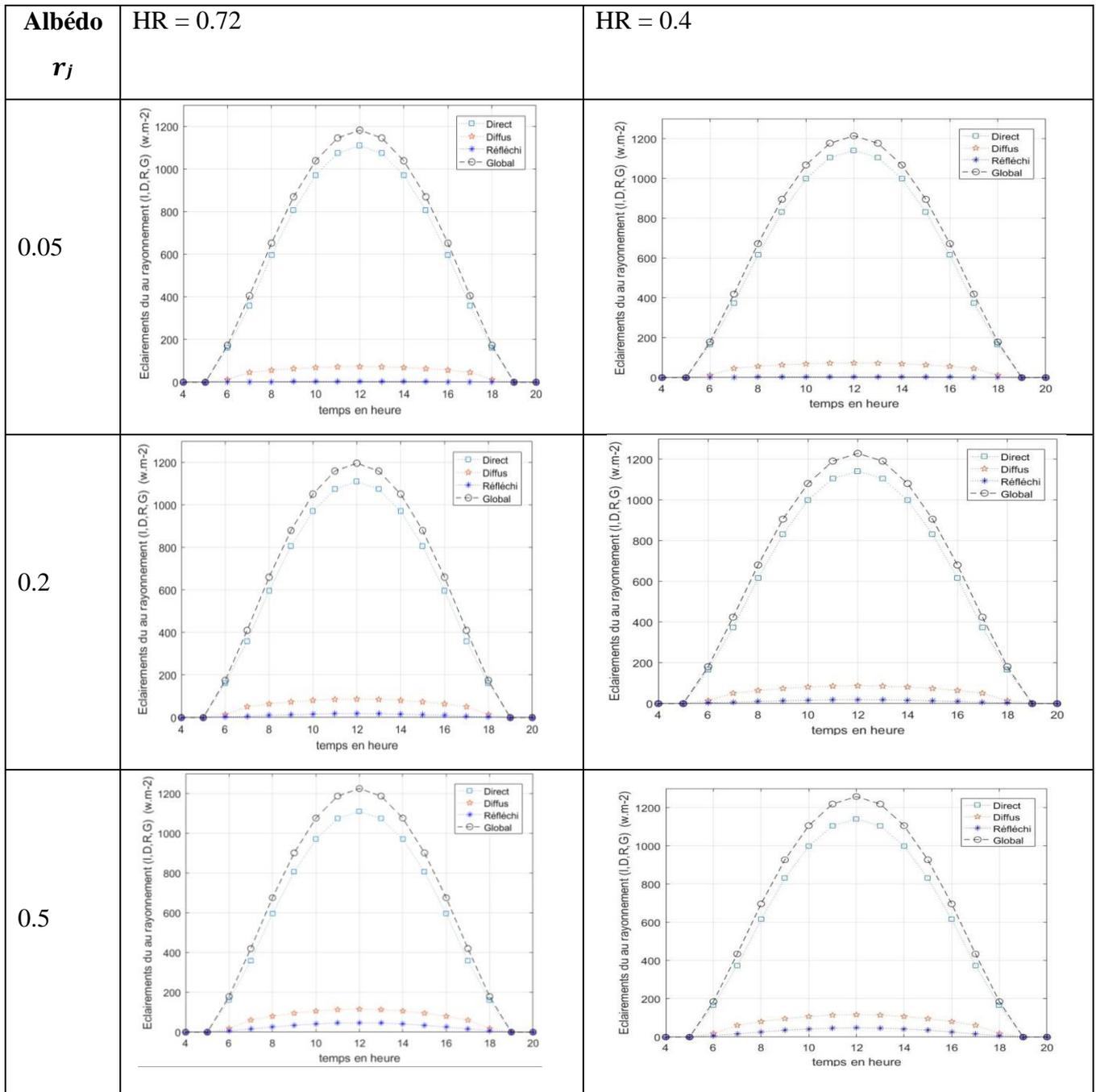
Moins de réflexion du rayonnement : moins de rayonnement solaire est réfléchi par la surface de la Terre, ce qui signifie que plus d'énergie est absorbée et donc le rayonnement total est réduit.

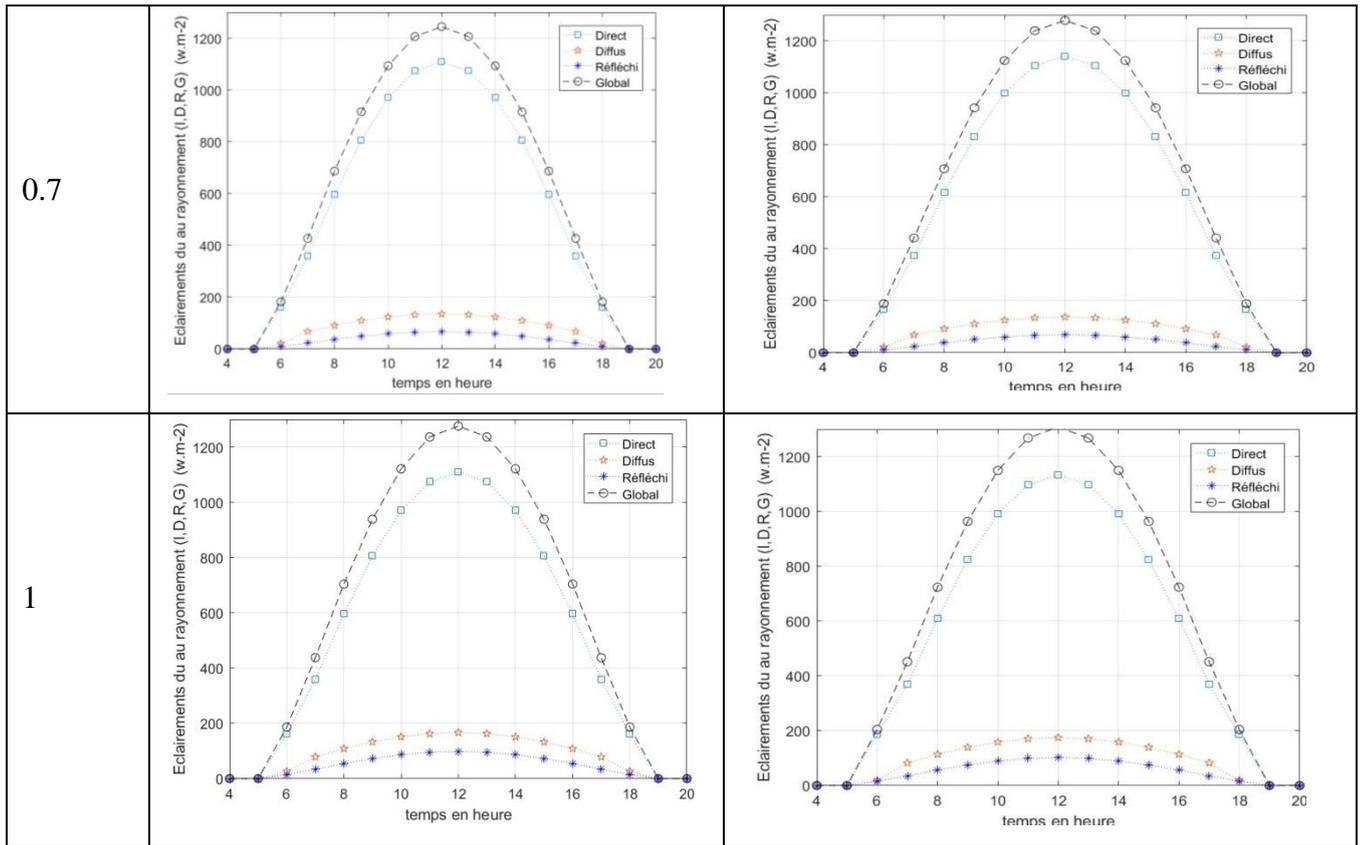
Cependant, nous mentionnons que la valeur du rayonnement direct reste constante dans les deux cas. Cela peut signifier que l'albédo ou l'humidité n'ont pas d'effet significatif sur la composante directe du rayonnement solaire. Le rayonnement direct est le rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre sans être diffusé ni réfléchi, et sa valeur dépend principalement de l'emplacement du soleil et de l'angle d'incidence des rayons solaires.

#### **IV.3.2. Développements du rayonnement solaire dans la région de (Bordj Bou Arreridj) :**

- Le numéro du jour de l'année  $n_j=210$
- La valeur de la latitude  $lat=36$
- La valeur de l'altitude  $z=906$

- La valeur de la longitude  $lon=4$
- La valeur de température (c)  $T=30$
- La valeur de l'Humidité HR ( $<1$ )= $0.72$
- La valeur de l'albédo du sol  $r_j = [1,0.7,0.5, 0.2,0.05]$





**Figure IV.2:** Courbe représentant l'évolution du rayonnement solaire par jour pour différentes valeurs de l'albédo (région BBA).

On remarque sur la **figure IV.2** que l'augmentation de la valeur du degré de réflexion va à son tour augmenter la valeur du rayonnement solaire et que la diminution de la valeur de l'humidité va entraîner une augmentation de la valeur du rayonnement solaire.

Après avoir étudié les courbes des régions (Béchar) et (Burj Bou Arreridj), on constate que le degré de réflexion n'est pas affecté par le changement de localisation géographique. Chaque région reçoit une quantité différente de rayonnement solaire en raison de plusieurs facteurs liés à la géographie et au climat. Voici quelques trucs à prendre en compte:

**Latitude :** La quantité de rayonnement solaire reçue varie avec la latitude. Les zones plus proches de l'équateur reçoivent généralement plus de rayonnement solaire tout au long de l'année parce que les rayons du soleil les frappent plus directement. En revanche, les régions plus éloignées de l'équateur, plus proches des pôles, reçoivent moins de rayonnement solaire en raison de l'angle oblique auquel les rayons du soleil atteignent la surface.

**Altitude :** L'altitude a également un effet sur le rayonnement solaire reçu. Avec l'augmentation de l'altitude, l'air devient plus mince et moins dense, ce qui peut entraîner une augmentation du

rayonnement solaire. Les zones de haute altitude peuvent recevoir un rayonnement solaire plus intense que les zones de basse altitude.

Conditions climatiques : les conditions climatiques, telles que la couverture nuageuse, l'humidité et la présence de particules en suspension dans l'air, peuvent influencer sur la quantité de rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre. Les nuages peuvent, par exemple, bloquer une partie du rayonnement solaire et réduire le rayonnement solaire direct.

Saisons : Les saisons ont un effet sur la quantité de rayonnement solaire reçue. En raison de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre, les régions subissent des changements saisonniers dans la quantité de rayonnement solaire. Pendant l'été, lorsqu'un hémisphère est incliné vers le soleil, les jours sont plus longs et la quantité de rayonnement solaire reçue est généralement plus élevée.

Il est important de noter que ces facteurs interagissent de manière complexe et peuvent varier d'une région à l'autre. Les modèles climatiques et les mesures météorologiques peuvent être utilisés pour estimer la quantité de rayonnement solaire reçue dans une zone donnée. Ces informations sont essentielles pour concevoir des systèmes solaires et évaluer le potentiel énergétique solaire d'une zone donnée.

#### **IV.4.Conclusion :**

Après avoir terminé le programme et extrait les résultats, nous avons remarqué que la valeur de rayonnement change avec chacun d'eux.

L'effet de l'albédo et de l'humidité sur le rayonnement global est significatif. L'albédo d'une surface détermine sa capacité à réfléchir ou à absorber le rayonnement solaire. Lorsque l'albédo augmente, c'est-à-dire lorsque la surface devient plus réfléchissante, plus le rayonnement solaire est réfléchi et moins il est absorbé par la surface. Cela conduit à une augmentation du rayonnement réfléchi et du rayonnement diffus, ce qui entraîne une augmentation du rayonnement global.

En revanche, lorsque l'albédo diminue, c'est-à-dire lorsque la surface devient moins réfléchissante, moins le rayonnement solaire est réfléchi et plus il est absorbé par la surface. Il en résulte une diminution du rayonnement réfléchi et du rayonnement diffus, d'où un rayonnement global plus faible.

Ces différences d'albédo et d'irradiance globales pourraient avoir des implications importantes pour le climat et l'équilibre énergétique de la Terre. Un changement de l'albédo global, qu'il soit

dû à des ajustements naturels ou à des activités humaines, peut affecter le réchauffement ou le refroidissement de la planète.

Nous avons également conclu que l'effet de l'humidité sur le rayonnement solaire est lié à l'emplacement géographique, car le rayonnement solaire augmente avec sa diminution dans certaines régions, et il peut diminuer dans d'autres régions.

Il est essentiel de comprendre ces impacts dans le contexte du changement climatique et de l'utilisation des ressources naturelles. Des études approfondies sur l'albédo et ses effets sur le rayonnement global aident à mieux comprendre les mécanismes climatiques et à développer des stratégies d'adaptation et d'atténuation du changement climatique.

## Conclusion général:

L'utilisation de l'énergie solaire est actuellement une réalité partout dans le monde, c'est pourquoi de nombreux travaux de recherche ont été développés pour estimer le rayonnement solaire sur Terre pour faire des dimensions d'installation solaire et prédire le rayonnement solaire, et cela nécessite de connaître le potentiel de l'énergie solaire pour créer des installations solaires ou pour produire de l'électricité à la meilleure plage pour différents paramètres de rayonnement.

L'étude que nous avons présentée nous permet d'apprendre des concepts importants sur les différentes composantes du rayonnement solaire tombant sur Terre.

Nous avons choisi un modèle mathématique (modèle Hay-Davies) pour estimer le rayonnement solaire à partir de données astronomiques et météorologiques. Nous avons mené une étude comparative du rayonnement solaire entre les sites de Bechar et Bordj Bou Arreridj en changeant la valeur du coefficient de réflexion et inversement avec l'humidité.

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué que la différence de localisation géographique affecte la valeur du rayonnement solaire, et d'autres résultats, nous avons également remarqué que la valeur du rayonnement solaire dans chacune des deux régions est directement proportionnelle à la valeur de la réflexion coefficient et le taux d'humidité.

Il est donc important que l'état du sol soit pris en compte lors de l'installation et de la maintenance des capteurs solaires (photothermiques photovoltaïques). Un entretien régulier pour garder le sol propre et dégagé améliorera la quantité de rayonnement solaire qui atteint les capteurs, améliorant ainsi leur efficacité énergétique.

En conclusion, l'état fondamental joue un rôle fondamental dans la performance des capteurs solaires (photothermiques photovoltaïques), affectant à la fois la quantité de rayonnement solaire reçue et l'albédo. Une bonne gestion des sols peut augmenter la production d'énergie solaire et contribuer à une utilisation plus efficace des ressources renouvelables.

# Bibliographie

- [1] **L. de Schoulepnikoff et Gymnase Auguste Piccard** « Quelle source d'énergie pour les vingt prochaines années? ». Travail de maturité Alexandra Catana, 3M7, 2009.
- [2] **Mekki Mounira**, Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable, thèse de doctorat, Algérie, 2014, page 15.
- [3] **Gasmi Nesrin** ; Les ressources en énergies renouvelables ; Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou 2020-2021.
- [4] **Alain Damien**, Livre, la biomasse Energie, Paris, 2008, page 5, 181, 184
- [5] **Mohamed Nasser**, Supervision de sources de production d'électriques hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés, France, le 05 mai 2011, page 22, 26.
- [6] **Gasmi Nesrin** ; Les ressources en énergies renouvelables ; Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou 2020-2021.
- [7] **Saidou Madougou**, Etude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir.
- [8] **R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz**, « Le rayonnement solaire conversion thermique et applications », Technique et documentation, Paris, 1983.
- [9] **Alonso Corinne** « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [10] **Akassewa Tchapo Singo** « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [11] **V. Daniel**, 2003, Le rayonnement thermique, bilan radiatif et effet de serre » en ligne sur le site ENS-DEGESCO planet-terre : <http://planet-terre.ens-lyon.fr>
- [12] **Heinesch, Bernard**, Estimation de l'effet biophysique Albedo sur l'impact climatique de l'utilisation des cultures intermédiaires, : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée. : 2021-2022.
- [13] **Bernard Thonon**, Question de physique autour de l'énergie solaire, page 8,23
- [14] **F.chabane**, "Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire", thèse de doctorat en sciences en Génie Mécanique 2015.
- [15] **A. Bouras**, « Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire ». Mémoire de magister-Université de Constantine 2007.
- [16] **F. Benyelles, B. Benabadjia, B. Benyoucef, Z. Ziani**, « Comparaison entre un capteur à aérogel de silice et d'autres capteurs plans », 13èmes Journées Internationales de Thermique (2007)
- [17] **F.chabane**, "Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire", thèse de doctorat en sciences en Génie Mécanique 2015.
- [18] **D.Njomo**, Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre, Rev. Gén. Therm (Elsevier). Vol.37, (973-980), 1998.
- [19] **F. Yeyyou**, Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude, mémoire de magister, Ecole Nationale polytechnique, Alger 2009

- [20] Les séchoirs solaires : théorie et pratique ,Michel Dague net.
- [21] **S.Youcef-Ali**, Etude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à convection forcée : Application à la pomme de terre, thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2001.
- [22] **S. Benkaciali, K. Gairra**, Techniques de modélisations de l'irradiation solaire sur un plan incliné, International Journal of Scientific Recherche & Engineering Technologie (IJSET), Vol.3-PP.102-108,(2001).
- [23] **F.chabane**, "Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire", thèse de doctorat en sciences en Génie Mécanique 2015.
- [24] ScienceDirect , Energy Procedia - The Performance of double glass photovoltaic modules under composite test conditions. Nouveau panneau solaire, Otovo (ex In Sun We Trust).
- [25] Etude du fabricant Soltec - Soltec reports higher bifacial module gains with 2P configuration on bifacial trackers  
« Nouveau panneau solaire 2021 : panorama des avancées technologiques ».
- [26] **José Miguel Navarro**, Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [27] **F.chabane**, "Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire", thèse de doctorat en sciences en Génie Mécanique 2015.
- [28] **Ndiaye papa amadou et kawther achari**, production de l'énergie électrique a partir d'un système photovoltaïque, université de 8 mai 1945, Guelma, 2019, Algérie.
- [29] **J, Bernard**. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004)
- [30] **BENBOUZA NAIMA**, Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna ; Mémoire de Magister en Electrotechnique 2008.
- [31] **M. Hamdani**, Etude et Effet de l'orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa mémoire de magistère, université de Tlemcen 2011, Algérie.
- [32] **Alain Ricaud Jan**, Gisement solaire et transferts énergétiques ; Université de CERGY-PONTOISE(2011).
- [33] **BENBOUZA NAIMA**, Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna ; Mémoire de Magister en Electrotechnique 2008.
- [34] Évolution des dates des saisons dans le calendrier grégorien. P. ROCHER, © INSTITUT DE MÉCANIQUE CÉLESTE ET DE CALCUL DES ÉPHÉMÉRIDES – OBSERVATOIRE DE PARIS.
- [35] **Alain Ricaud Jan**, Gisement solaire et transferts énergétiques ; Université de CERGY-PONTOISE(2011).
- [36] **Laznek.I**, "Prédiction de l'irradiation solaire globale sur le plan horizontal avec l'effet de l'humidité relative", Mémoire de master en énergétique. Université Mohamed KHIDER Biskra Juin 2018.
- [37] **Mahdi Khaled**, "Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique", Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine,(2008).
- [38] **Hadj Belkacemi Mohammed**, "Modélisation et étude expérimentation d'un capteur solaire non vitré et perforé" , Mémoire de Magister, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen,(2011).
- [39] **Alain Ricaud Jan**, Gisement solaire et transferts énergétiques ; Université de CERGY-PONTOISE(2011).
- [40] Energie solaire photovoltaïque Semaine 08  
[www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/SEM08/S08P10.HTM](http://www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/SEM08/S08P10.HTM)
- [41] Les coordonnées horizontale. Introduction to solar energie : [http:// www.Newport corporation. Com/Introduction-ac-rayonnement-solaire/ 411919/1036/ catalog.aspx](http://www.Newportcorporation.Com/Introduction-ac-rayonnement-solaire/411919/1036/catalog.aspx).
- [42] **Khadraoui .Z**, "Influence des paramètres climatique sur le rayonnement solaire global selon le plan horizontal", Mémoire de master en énergétique. Université Mohamed KHIDER Biskra Juin 2018.
- [43] **Hadj Belkacemi Mohammed**, "Modélisation et étude expérimentation d'un

- capteur solaire non vitré et perforé" , Mémoire de Magister, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen,(2011).
- [44] **BENBOUZA NAIMA**, Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna ; Mémoire de Magister en Electrotechnique 2008.
- [45] S.M.A. **Bekkouche**, Modélisation du comportement thermique de quelques Dispositifs Solaires, thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2009.
- [46] **Mahdi Khaled**, "Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique", Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine,(2008).
- [47] **BENBOUZA NAIMA**, Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna ; Mémoire de Magister en Electrotechnique 2008.
- [48] S.M.A. **Bekkouche**, Modélisation du comportement thermique de quelques Dispositifs Solaires, thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2009.
- [49] **Khadraoui .Z**, "Influence des paramètres climatique sur le rayonnement solaire global selon le plan horizontal", Mémoire de master en énergétique. Université Mohamed KHIDER Biskra Juin 2018.
- [50] **Mahdi Khaled**, "Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique", Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine,(2008).
- [51] **M. Hamdani**, Etude et Effet de l'orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa mémoire de magistère, université de Tlemcen 2011, Algérie.
- [52] **Khadraoui .Z**, "Influence des paramètres climatique sur le rayonnement solaire global selon le plan horizontal", Mémoire de master en énergétique. Université Mohamed KHIDER Biskra Juin 2018.
- [53] **Michel Capderou** , Atlas solaire de l'Algérie, tome 1,2 ;O.P.U. 1986.
- [54] **Djelloul BENATIALLAH** ; Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie ; UNIVERSITE AFRICANE AHMED DRAIA ADRAR.
- [55] **Akassewa Tchapo Singo** « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [56] **BENBOUZA NAIMA**, Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna ; Mémoire de Magister en Electrotechnique 2008.
- [57] **Khadraoui .Z**, "Influence des paramètres climatique sur le rayonnement solaire global selon le plan horizontal", Mémoire de master en énergétique. Université Mohamed KHIDER Biskra Juin 2018.
- [58] **M. MESRI, I.ROUGAB, A. CHEKANE et N.I.BACHARI**, "Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empirique", Revue des Energies Renouvelables Vol.15 N° 3(2012) 451-463.
- [59] **A.S. Sambo**, "Empirical Models for the correlation of Global solar radiation with Meteorological Data for the Northern Nigeria", Solar Energy, Vol. 3, N°2, pp. 89-93, 1986.M. KOUSSA et al. 92.
- [60] **Khadraoui .Z**, "Influence des paramètres climatique sur le rayonnement solaire global selon le plan horizontal", Mémoire de master en énergétique. Université Mohamed KHIDER Biskra Juin 2018.
- [61] **Al-salaymeh A.** Model for the prediction of global daily solar radiation on horizontal surfaces for Amman city, Emirates. J Eng RES 2006; 11(1):49–56.
- [62] **A. Louche, G. Peri and M.Iqbal**, An analysis of Linke Turbidity Factor, Solar Energy, Vol.37, N°6, PP,393-396, (1986).
- [63] **BENBOUZA NAIMA**, Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna ; Mémoire de Magister en Electrotechnique 2008.
- [64] **F.chabane**, "Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire", thèse de doctorat en sciences en Génie Mécanique 2015.
- [65] **Zang H., X u Q. & Bian H**, Generation of typical solar radiation data for different climates of China. Energy, 38(1) -pp. 236 -248, 2012.

- [66] **A.S. Sambo**, "Empirical Models for the correlation of Global solar radiation with Meteorological Data for the Northern Nigeria", *Solar Energy*, Vol. 3, N°2, pp. 89-93, 1986. M. KOUSSA et al. 92.
- [67] **M. Hamdani**, Etude et Effet de l'orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa mémoire de magistère, université de Tlemcen 2011, Algérie.
- [68] **D. Bensahal and A. Yousfi** "Hourly Air Temperature Modeling Based on Atmospheric Pressure, Global Solar Radiation and Relative Humidity Data" Laboratory of Mechanic, Faculty of Technology, University of LAGHOUAT, Algeria 2018.
- [69] **Kaplanis S, Kaplani E.** A model to predict expected and stochastic hourly global solar radiation  $I(h, n_j)$  values. *REVIEW Energy* .32(8): 1414-25, 2007.
- [70] **Al-salaymeh A.** Model for the prediction of global daily solar radiation on horizontal surfaces for Amman city, Emirates. *J Eng RES* 2006; 11(1):49–56.
- [71] **M. Hamdani**, Etude et Effet de l'orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa mémoire de magistère, université de Tlemcen 2011, Algérie.
- [72] **J. A. Davies, J. E. Hay**, «Calculation of the Solar Radiation Incident on a Horizontal Surface ». Proceedings, First Canadian Solar Radiation Data Workshop. April 17-19, (1978). Canadian Atmospheric Environment Service, (1979).
- [73] **G.D. Robinson**, 'Absorption of Solar Radiation by Atmospheric Aerosol as Revealed by Measurements from the Ground', *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B*, Vol. 12, N°1, pp. 19 – 40, 1962.
- [74] **M.R.Yaiche**, Logiciel de Calcul des paramètres Astronomiques à l'Usage des installations solaires, Congrès International sur les Energies renouvelables et le Développement durable, 'ICRESD-07, Tlemcen, Algérie, 21-24(2007).

## Programmes de calcul (ANNEXE) :

```
clc
clear
closeall
%%calcul de l'eclairment du au rayonnement direct I et diffus D et le
%%modele de davie&hay a une echelle horaire %%%
%%rayonnement global G a l'echelle horaire %%%
%%Introduir les parametres d'entree du modele%%
nj=input(' donner le numero du jour de l annee =');
lat=input(' donner la valeur de la latitude lat= ');
z=input(' donner la valeur de l altitude z= ');
lon=input(' donner la valeur de la longitude lon= ');
T=input(' donner la valeur de la temperature en (c) T= ');
HR=input(' donner la valeur de l humidite (<1)= ');
rj=input(' donner la valeur de l albedo du sol rj= ');
T=T+273;
%constante solaire moyenne
cs=1367;
rd=pi/180;
%correctoin de la variatoin de la distance terre soleil
cts=1+0.034*cos(deg2rad((360/365)*(nj-3)));
%constante solairecorrigee
Csc=cs*cts;
cor=pi/180;
%calcul de la declinaison du soleil
dec=23.45*sin(deg2rad(0.986*(nj+284)));
%coefficients d'extinctoin pour les longueurs d'ondes
%lambda =0.38 um et lambda =0.5 um
ka1=0.087;
ka2=0.069;
alpha=log(ka1/ka2)/log(0.5/0.38);
beta=ka1*(0.38^alpha);
g=0;
for j=1:24
    g=g+1
    tsv(j)=g;
%angle horaire w
w(j)=15*(12-tsv(j));
%la hauteur du soliel h
h(j)=asin(sin(lat*cor)*sin(dec*cor)+cos(dec*cor)*cos(w(j)*cor))/cor;
if h(j)<0
    h(j)=0
end
%ladistancezenithale
tz(j)=90-h(j);
%la mass d'air relative
mr(j)=[cos(cor*tz(j))+0.15*((93.885-tz(j))^(-1.253))]^-1;
%la hauteur d'eau condensable
ps=exp(26.23-(5416/T));
ww=(0.493*HR*ps)/T;
%l'epaisseur d'eau condensable
Uw(j)=ww*mr(j);
%coefficient d'absorptoin de l'eclairment du au rayonnement direct
%par la valeur d'eau
alphav(j)=(2.9*Uw(j))/[(1+141.5*Uw(j))^(0.635)+5.925*Uw(j)];
% la mass d'air corrigee
ma(j)=mr(j)*[exp(-0.0001184*z)];
%coefficient de transmissoinapres diffusion moleculaire de
%rayleigh
Tr(j)= 0.972-0.08262*((ma(j))^1)+0.00933*((ma(j))^2)-0.00095*((ma(j))^3)+0.000437*((ma(j))^4);
if Tr(j)>1
    Tr(j)=0;
end
%coefficient de transmission apres diffusion par les aerosols
Ta(j)=(0.12445*alpha-0.0162)+(1.003-0.125*alpha*exp(-beta*ma(j)*(1.089*alpha+0.5123)));
%epaisseur de la couche d'ozone reduite
L=(235+(150+40*sin(cor*(0.9845*(nj-30))))+20*sin(cor*(3*(lon+20))))*sin(cor*(1.28*lat))^2)/1000;
%epaisseur de la couche d'ozone corrigee
U0(j)=L*mr(j);
```

```

%coefficient d'absorption par la couche d'ozone
alphao(j)=(0.02118*U0(j)/(1+0.42*U0(j)+(U0(j)^2)*(3.23)*10^-
4)+(1.082*U0(j)/((1+138.6*U0(j))^0.805)))+(0.0658*U0(j)/(1+(103.6*U0(j))^3));
%coefficient de transmission apres absorption par couche d'ozone
To(j)=1-alphao(j);
%*****
%%eclairment du au rayonnement direct
%%
%%
I(j)=Csc*abs((To(j)*Tr(j)-alphav(j))*Ta(j)*cos(deg2rad(tz(j))));
%*****
%eclairment du au rayonnement diffus issu de la diffutoin
%rayleigh%Dr
Dr(j)=Csc*cos(deg2rad(tz(j)))*To(j)*Ta(j)*0.5*(1-Tr(j));
%*****
%eclairment de au rayonnement diffus apres diffusion par les
%aerosols Da
%*****
%coefficient de reflexion unitaire relatif a la diffusion par les
%aerosols wo
wo=0.6;
Fc=0.7;
Da(j)=Csc*cos(deg2rad(tz(j)))*abs((To(j)*Tr(j)-alphav(j)))*(Fc*wo*(1-Ta(j)));
%mass d'air=1.966*(p/(po))
mal=1.66*(exp(-0.0001184*z));
ta=(0.12445*alpha-0.0162)+(1.003-0.125*alpha)*exp(-beta*mal*(1.089*alpha+0.5123));
%albedodu ciel clair ra
ra=0.0685+0.17*(1-ta)*wo;
%*****
%%eclairment issu phenomene de multi reflexion terre
%%atmosphere Dm
%*****
Dm(j)=(I(j)+Dr(j)+Da(j))*(rj*ra/(1-(rj*ra)));
%*****
%%eclairment du au rayonnement diffus
%*****
D(j)=Dr(j)+Da(j)+Dm(j);
%*****
%%calcul de l'eclairment du au rayonnement global G
%*****
G(j)=I(j)+D(j);
end
%graphes

```

```

figure(4)
plot(tsv,I,'square',tsv,D,'pentagram',tsv,Dm,'b*',tsv,G,'k--o')
legend('Direct','Diffus','Réfléchi','Global')
xlabel('temps en heure')
ylabel('Eclairments du au rayonnement (I,D,R,G) (w.m-2)')
axis([4 20 0 1300])
grid on.

```

## Résumé

Le soleil fournit à la terre de gigantesques quantités d'énergie qui peuvent être exploitées par voie thermique ou électrique. Pour cela l'exploitation de l'énergie solaire est un grand axe de recherche qui connaît de considérable développement cette dernière décennie. Pour répondre à cette nécessité, nous avons étudié dans ce travail l'effet de l'état du sol sur l'intensité du rayonnement solaire global reçu par un capteur. Pour ce raison, nous avons utilisé un modèle mathématique pour estimer le rayonnement solaire direct, diffus, réfléchi et global. Les résultats sont calculés heure par heure du lever au coucher du soleil.

Les résultats que nous avons obtenus ont permis de préciser l'effet des paramètres climatiques, atmosphériques et géolocalisations, ainsi que l'état du sol sur l'intensité du rayonnement solaire pour deux régions différentes. **Mots clés** : rayonnement solaire; albédo; géolocalisation; modèles rayonnement solaire.

## ملخص

تزود الشمس الأرض بكميات هائلة من الطاقة التي يمكن تسخيرها حراريًا أو كهربائيًا. لهذا ، يعد استغلال الطاقة الشمسية مجالًا رئيسيًا للبحث الذي شهد تطورًا كبيرًا في العقد الماضي. لتلبية هذه الحاجة ، درسنا في هذا العمل تأثير حالة الأرض على شدة الإشعاع الشمسي العالمي الذي يستقبله جهاز استشعار. لهذا السبب ، استخدمنا نموذجًا رياضيًا لتقدير الإشعاع الشمسي المباشر والمنتشر والمنعكس والعالمي.

يتم حساب النتائج ساعة بساعة من شروق الشمس إلى غروبها. أتاحت النتائج التي حصلنا عليها تحديد تأثير العوامل المناخية والجوية وتحديد الموقع الجغرافي ، بالإضافة إلى حالة الأرض على كثافة الإشعاع الشمسي لمنطقتين مختلفتين.

**الكلمات المفتاحية:** إشعاع شمسي ؛ البياض. تحديد الموقع الجغرافي. نماذج الإشعاع الشمسي.

## Abstract

The sun provides the earth with gigantic amounts of energy that can be harnessed thermally or electrically. For this, the exploitation of solar energy is a major area of research that has experienced considerable development in the last decade. To meet this need, we have studied in this work the effect of the state of the ground on the intensity of the global solar radiation received by a sensor. For this reason, we used a mathematical model to estimate direct, diffuse, reflected and global solar radiation. The results are calculated hour by hour from sunrise to sunset.

The results we obtained made it possible to specify the effect of climatic, atmospheric and geolocation parameters, as well as the state of the ground on the intensity of solar radiation for two different regions.

**Keywords:** solar radiation; albedo; geolocation; solar radiation models.