

**Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila**

**Institut des Sciences et de la Technologie**

**Département de Génie Mécanique et Électromécanique**



N° Ref:.....

**Projet de fin d'étude préparé en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**En Génie Mécanique**

**Spécialité : ÉNERGÉTIQUE**

**Estimation du rayonnement solaire incident sur un plan incliné  
par le modèle de Liu-Jordan: région d'Adrar**

**Réalisé par :**

- **BENKARETTE Dounya**
- **ZOUAGHI Chaima**

**Soutenu devant le jury :**

**M. LITOCHE Bilal**

**Président**

**M. METATLA Nouredine**

**Examineur**

**M. BOUBEGHAL Abdelouahab**

**Encadreur**

**Année universitaire : 2021/2022**

الله أكبر

# Remerciements

*Nous remercions tout d'abord Allah qui nous a aidés achever ce mémoire.*

*Nous remercions notre encadreur Mr BOUBEGHAL ABDELOUAHAB,  
Docteur à l'université de AbdelHafid Boussouf - Mila, pour ses  
encouragements, et sa présence totale et ses suggestions avisés qui nous ont  
conduits à terminer ce travail.*

*Aux membres du jury, vous nous faites un grand honneur en acceptant de  
juger ce modeste travail, nous vous en remercions et vous témoignons notre  
profonde et respectueuse gratitude.*

*Nous remercions nos amis, nos collègues de l'institut des sciences et  
technologie ainsi que l'ensemble des enseignants et responsables.*

*Enfin nous remercions nos parents pour nous avoir appris à toujours aller au  
bout de nos rêves, ainsi que nos frères et sœurs.*

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Les deux personnes les plus chères à mon cœur, mon père et ma mère, qui m'ont apporté soutien et confort tout au long de mes études.*

*A mes frères « Younnes, M. Amine et Abdessamie »*

*Et mes sœurs « Chahra et Salsabil »*

*A tout ma famille*

*A mes meilleures amies*

*A ma binôme « Zouaghi Chaima » et sa famille*

*A Mon encadreur Mr A. BOUBEGHAL qui m'a apporté soutien et courage, orientations pratiques ainsi conseils durant toutes mes années d'études.*

*Aux enseignants de Génie Mécanique*

*A tous ceux que j'aime et je respecte.*

**BENKARETTE DOUNYA**

## Dédicaces

الحمد لله الذي حباننا بالعلم و زيننا بالحلم و اكرمنا بالتقوى.

اهدي ثمرة هذا العمل المتواضع

الى ابي الغالي الذرع الواقي و الكنز الباقي

و الى امي الغالية اطلال الله عمرها، يا من سمرتي على تربيتي و تعلمي و تعبتك من اجل راحتي

انتما المصباح الذي ينير طريقتي مهما قلت فلن اوفيكما حقكما

الى من هو عزوتي و به تكتمل فرحتي " أسامة" الى انطلاقة الماضي و عون الحاضر و سند

المستقبل،

الى اخي، الى اخواتي منال و مروة و الى زهرتي عدن و الى كل عائلتي كبيرها و صغيرها

الغالي شهاب الذي لم يتركني يوما

و الى كل من كان لهم اثر على حياتي و الى كل من احبهم قلبي و نسيهم قلبي.

ZOUAQHI CHAIMA

# Résumé

La connaissance de gisement solaire est une tâche très importante pour la conception et le dimensionnement des systèmes solaires dans différents domaines tel que la production de l'électricité, chaleur...etc. En outre, les mesures du rayonnement solaire sont limitées à quelques zones notamment dans l'Algérie. Ainsi, on a recours à des approches théoriques pour évaluer le gisement solaire sur un lieu donné.

Le but de la présente de ce travail est la détermination du gisement solaire à travers l'étude, et la simulation des différents composants du rayonnement solaire. Pour ce faire, nous avons adopté et choisi une approche théorique qui est valable pour le ciel clair. Pour l'estimation des irradiations incidentes sur un plan incliné, nous avons utilisé le modèle de Liu-Jordan. Dans ce contexte, un programme de calcul de rayonnement en Fortran a été conçu et développé. Nous avons étudié l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale du plan récepteur et déterminé par conséquent l'angle optimal pour avoir un rayonnement maximal. La comparaison entre les valeur des rayonnement incidentes sur les différents plan prévu par la simulation du modèle et les mesures effectuées montre que la simulation est une bonne approximation de la réalité. Le modèle étudié nous donne plus d'informations sur le rayonnement solaire au cours d'une année ainsi que des renseignements sur le gisement solaire de la région d'Adrar.

**Mots clés :** Rayonnement solaire, Modèle de Liu-Jordan, Simulation.

# Abstract

The knowledge of solar deposit on the ground is a very important task for the design and sizing of solar systems in different fields such as the production of electricity, heat, etc. In addition, solar radiation measurements are limited to only a few areas in Algeria. Thus, theoretical approaches are used to assess the solar field at a given location.

The purpose of this work is the determination of the solar deposit through the study, and the simulation of the different fluxes of solar radiation. To do this, we have adopted and chosen a theoretical approach which is valid for a completely clear sky. For the estimation of incident irradiances on an inclined plane, we used the Liu Jordan model. In this context, a radiation calculation program under Origine for the Adrar site was designed and developed. The comparison between the values of the incident radiation on the different planes provided by the simulation of the model and the measurements carried out shows that the simulation is a good approximation of reality, despite some climatic disturbances (cloud).

**Keywords:** Solar radiation, Liu & Jordan model, Calculation software.

# ملخص

إن معرفة المجال الشمسي مهمة بالغة الأهمية لتصميم أنظمة الطاقة الشمسية وتحديد حجمها في مجالات مختلفة مثل إنتاج الكهرباء والحرارة وما إلى ذلك. بالإضافة إلى ذلك ، تقتصر قياسات الإشعاع الشمسي على مناطق قليلة ، لا سيما في الجزائر. وبالتالي ، يتم استخدام الأساليب النظرية لتقييم المجال الشمسي في موقع معين. الغرض من هذا العمل هو تحديد الترسبات الشمسية من خلال الدراسة، ومحاكاة المكونات المختلفة للإشعاع الشمسي. للقيام بذلك، اعتمدنا واخترنا نهجاً نظرياً يصلح لجميع حالات السماء. لتقدير إشعاعات الحادث على مستوى مائل، استخدمنا في هذا السياق نموذج ليو جوردن، تم تصميم وتطوير برنامج حساب الإشعاع في فورتران. لقد درسنا تأثير زاوية الميل بالنسبة لأفقي مستوى الاستقبال ، وبالتالي حددنا الزاوية المثلى للحصول على أقصى قدر من الإشعاع. توضح المقارنة بين قيم الإشعاع الساقط على المستويات المختلفة التي توفرها محاكاة النموذج والقياسات التي تم إجراؤها أن المحاكاة هي تقريب جيد للواقع. يعطينا النموذج المدروس مزيداً من المعلومات حول الإشعاع الشمسي خلال العام بالإضافة إلى معلومات عن المجال الشمسي لمنطقة أدرار.

**الكلمات المفتاحية :** الإشعاع الشمسي، نموذج Liu-Jordan ، المحاكاة.



# Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
A	Coefficients du ciel	
$A_i$	Coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble TL* corrigé	
$a_s$	Azimut	(°)
$A_{he}$	Variation saisonnière	(°)
B	Coefficients du ciel	
C	Coefficients du ciel	
$C_{ts}$	Correction de distance terre-soleil	
$C_s$	Constante de Stéphane-Boltzmann	(W.m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> )
$D_o$	Distance moyenne terre-soleil	
$D_i$	Rayonnement diffuse sur plan incliné	(W/m <sup>2</sup> )
$D_h$	Rayonnement diffus sur un plan horizontal	(W/m <sup>2</sup> )
$D_{re}$	Rayonnement réfléchi	(W/m <sup>2</sup> )
$d_{ciel}$	Rayonnement diffus de la part du ciel	(W/m <sup>2</sup> )
$d_{\text{rétrodiffusé}}$	Diffus rétrodiffusé	(W/m <sup>2</sup> )
$D_r$	Rayonnement diffus de Rayleigh	(W/m <sup>2</sup> )
$D_a$	Rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols	(W/m <sup>2</sup> )
$D_m$	Rayonnement diffus issu du phénomène de multi réflexion	(W/m <sup>2</sup> )
$E_T$	Equation du temps	(minute)

---



---

$F_d$	Fonction de l'altitude solaire	
$F_c$	Coefficient de dispersion directe dans l'atmosphère	
$G_i$	Rayonnement globale sur plan incliné	(W/m <sup>2</sup> )
$gne$	Rayonnement hors atmosphère	(W/m <sup>2</sup> )
$h$	Hauteur du soleil	(m)
$h$	horizontal	
HR	Humidité relative	
$i$	incliné	
$I_0$	Constante solaire	(W/m <sup>2</sup> )
$I_i$	Rayonnement directe sur plan incliné	(W/m <sup>2</sup> )
$I_h$	Rayonnement direct sur un plan horizontal	(W/m <sup>2</sup> )
$L$	Longitude	(°)
$m_a$	Masse d'air	(Kg)
$m_r$	Masse d'air optique relative	(kg)
$n_j$	Numéro des jours	
$P$	Pression atmosphérique	(mbar)
$R_s$	Rayon du soleil	(cm)
$SS$	Durée effective d'ensoleillement	(Heures)
$SS_0$	Durée maximale d'ensoleillement	(Heures)
$T_L^*$	Facteur de trouble atmosphérique de linke	
$T$	Température de surface du soleil	(Kelvin)

---



---

$T_0$	Facteur de trouble auxiliaire qui correspond à l'absorption par la vapeur d'eau	
$T_1$	Facteur de trouble auxiliaire qui correspond à la diffusion moléculaire due à la couleur bleue du ciel	
$T_2$	Facteur de trouble auxiliaire qui correspond à la diffusion par les Aérosols	
$T_n(T_L^*)$	Facteur de transmission	
$T_{SV}$	Temps Solaire Vrai	(heures)
$T_{SM}$	Temps solaire moyen	(heures)
$T_U$	Temps Universel	(heures)
$T_L$	Temps légal	(heures)
$U_0$	Epaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche	
$U_w$	Epaisseur de l'eau condensable	(cm)
$X_w$	Epaisseur d'eau condensable corrigée par le trajet du faisceau de rayonnement à travers cette couche	(cm)
$Z$	Altitude	(°)
$\Delta H$	Différence de temps entre le méridien de Greenwich et l'état considéré	(heures)
$\Delta T$	Différence de température entre ces deux surfaces	(k)
$\alpha_0$	Coefficient correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct la couche d'ozone	

---



---

$\alpha_w$	Coefficient d'absorption du rayonnement direct de la vapeur d'eau	
$\beta$	Inclinaison du plan	(°)
$\delta$	Déclinaison	(°)
$\delta_d$	Composante directe	
$\delta_i$	Composante isotrope	
$\delta_h$	Correspond au cercle de l'horizon	
$\delta_R$	Epaisseur optique de Rayleigh respectivement	(cm)
$\delta_{exp}$	Position du soleil par rapport à une surface inclinée	
$\gamma$	Hauteur du la normal au plan	(°)
$\varphi$	Latitude	(°)
$\theta_z$	Angle zénithal du soleil	(°)
$\rho$	Albédo du sol	
$\rho'$	Albédo terrestre	
$\rho'_a$	Albédo du ciel clair du site considéré	
$\sigma$	Taux d'ensoleillement	
$\tau_0$	Coefficient de transmission après absorption d'ozone	
$\tau_g$	Coefficient de transmission après absorption par les gaz permanents (co2 et o2)	
$\tau_w$	Coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau	

---

---

$\tau_r$	Coefficient de transmission après diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh	
$\omega$	Angle horaire	(°)
$\omega_0$	Coefficient de réflexion unidirectionnel lié à la diffusion des aérosols	

---

---

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure (I.1)</b>	Structure du Soleil
<b>Figure (I.1)</b>	Mouvement de la terre autour du soleil
<b>Figure (I.3)</b>	Longitudes et latitudes sur le globe
<b>Figure (I.4)</b>	Coordonnées horaires
<b>Figure (I.5)</b>	Coordonnées horizontales
<b>Figure (I.6)</b>	Composition du rayonnement
<b>Figure (I.7)</b>	Différents composants du rayonnement solaire
<b>Figure (I.8)</b>	Pyréliomètre
<b>Figure (I.90)</b>	Pyranomètre
<b>Figure (I.10)</b>	Pyrradiomètre
<b>Figure (I.11)</b>	Héliographe
<b>Figure (I.12)</b>	Carte de la durée d'ensoleillement moyen annuel en Heure (1983-2012)

## Chapitre III

<b>Figure III.1</b>	Organigramme calculant le rayonnement solaire
<b>Figure III.2</b>	Rayonnement global pour le 13 Janvier.
<b>Figure III.3</b>	Rayonnement global pour le 10 Février.
<b>Figure III.4</b>	Rayonnement global pour le 31 Mars.
<b>Figure III.5</b>	Rayonnement global pour le 30 Avril.
<b>Figure III.6</b>	Rayonnement reçu global pour le 21 Juin.
<b>Figure III.7</b>	Rayonnement reçu global pour le 21 Octobre.
<b>Figure III.8</b>	Evolution temporelle des composants du rayonnement solaire reçu sur un plan incliné ( $\beta=27^\circ$ ) pour des journées types (21 Décembre et 21 Juin).
<b>Figure III.9</b>	Variation de rayonnement global en fonction du temps et d'inclinaison du plan récepteur pour les journées types.

**Figure III.10** Evaluation de l'intensité du rayonnement global à différents ciels pour une surface inclinée.

**Figure III.11** Evaluation de l'intensité du rayonnement global à différents ciels pour une surface horizontale.

# Liste des tableaux

- Tableau (I.1)** Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.
- Tableau (II.1)** Valeurs des coefficients A, B et C.
- Tableau (III.1)** Valeurs maximales de rayonnement solaire global La valeur maximal du rayonnement global pour différents journées choisi
- Tableau(III.2)** Valeur maximale des différents composants du rayonnement solaire pour le 21 Décembre et le 21 Juin
- Tableau (III.3)** Valeur maximale du rayonnement global pour différents inclinaisons.



# Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
ملخص.....	VI
Nomenclature.....	VII
Liste des figures .....	XI
Liste des tableaux .....	XIII
Introduction Générale.....	1

## Chapitre I : Gisement Solaire

I.1. Introduction.....	3
I.2. Astronomie du Soleil .....	3
I.2.1. Le Soleil .....	3
I.2.2. La Structure de Soleil.....	3
I.2.2.1. Les couches internes .....	3
I.2.2.2. Couronne .....	4
I.2.2.3. Photosphère .....	4
I.2.2.4. Chromosphère.....	5
I.3. Mouvement de la terre autour du soleil .....	5
I.4. Les coordonnées célestes .....	6
I.4.1. Coordonnées géographiques .....	6
I.4.1.1. La longitude (L).....	6
I.4.1.2. La latitude $\varphi$ .....	6
I.4.1.3. L'altitude (Z) .....	7
I.4.2. Les coordonnées horaires .....	7
I.4.2.1. La déclinaison $\delta$ .....	7

---

---

I.4.2.2. L'angle horaire $\omega$ .....	8
I.4.3. Les coordonnées horizontales .....	8
I.4.3.1. L'azimut ( $a_s$ ) .....	8
I.4.3.2. La hauteur (h) .....	9
I.5. Energie solaire .....	9
I.6. Rayonnement solaire.....	10
I.6.1. Nature et composition .....	10
I.6.2. Emission du rayonnement solaire .....	10
I.7. Constante solaire .....	10
I.8. Rayonnement solaire au sol .....	11
I.8.1. Le rayonnement direct (I).....	12
I.8.2. Le rayonnement diffus (D).....	12
I.8.3. Le rayonnement global (G) .....	12
I.9. Durée et taux d'ensoleillement .....	13
I.9.1. Durée d'ensoleillement .....	13
I.9.2. Taux d'ensoleillement .....	13
I.10. Paramètre de temps .....	13
I.10.1. Temps universel ( $T_u$ ).....	13
I.10.2. Temps Solaire Moyen ( $T_{SM}$ ) .....	13
I.10.3. Le temps solaire vrai ( $T_{SV}$ ).....	13
I.10.4. Le temps légal ( $T_L$ ).....	14
I.11. Lever et coucher du soleil .....	14
I.12. Mesure du rayonnement solaire .....	14
I.12.1. Les pyrhéliomètres .....	15
I.12.2. Les pyranomètres .....	15
I.12.3. Les pyrromètres .....	16
I.12.4. Les héliographes.....	17

I.13. Le gisement solaire en Algérie.....	17
I.14. conclusion .....	18
Références bibliographiques .....	19

## **Chapitre II: Modèles théoriques de l'estimation du rayonnement solaire**

II.1. Introduction .....	22
II.2. Modèles mathématiques pour l'estimation du rayonnement solaire .....	23
II.2.1. Modèle de de PERRIN DE BRICHAMBAUT .....	23
II.2.1.1. Le facteur de trouble de Linke .....	23
II.2.1.2. Rayonnement reçue sur un plan horizontal .....	24
II.2.1.3. Rayonnement reçue sur un plan incliné .....	25
II.2.2. Modèle de CAPDEROU .....	26
II.2.2.1. Le facteur de trouble de Linke .....	26
II.2.2.2. Rayonnement reçu sur un plan horizontal.....	27
II.2.2.3. Rayonnement global reçu sur un plan incliné .....	28
II.2.3. Modèle R. Sun .....	30
II.2.3.1. Rayonnement global reçu sur un plan horizontal.....	30
II.2.3.2. Rayonnement global reçu sur un plan incliné .....	31
II.2.4. Modèle de Hay-Davies .....	31
II.2.4.1. Rayonnement global reçu sur un plan horizontal.....	32
II.2.5. Modèle de BIRD et HULSTROM .....	34
II.2.5.1. Rayonnement global reçu sur un plan horizontal.....	34
II.2.6. Modèle de LIU & JORDAN .....	36
II.2.6.1. Rayonnement reçu sur un plan horizontal.....	36
II.2.6.2. Rayonnement global reçu sur un plan incliné .....	37
Références bibliographiques .....	38

## **Chapitre III: Modélisation de rayonnement solaire par le modèle de Liu Jordan**

III.1. Introduction .....	41
---------------------------	----

---

---

III.2. Organigramme de l'estimation du rayonnement solaire .....	42
III.3. Résultats et interprétation.....	43
III.3.1. validation de modèle .....	43
III.3.2. Le Rayonnement solaire au cours d'une année .....	46
III.3.3. L'influence de la variation de l'angle d'inclinaison.....	47
III.3.4 Effet de la nature du ciel.....	48
III.4. conclusion.....	49
Référence bibliographie .....	50
Conclusion générale.....	51

# Introduction générale

---

---

# Introduction Générale

Selon des études faites par certains instituts de recherche, la consommation en énergie des pays en voie de développement va connaître une augmentation très importante, surtout après la mondialisation du commerce et des échanges entre les états. En plus, la crise qui secoue actuellement le secteur de l'énergie dans le monde et la tension que connaissent les énergies fossiles ont rendu incontournable le développement des énergies alternatives et renouvelables. En Algérie, Les ressources pétrolières et gazières sont appelées à s'épuiser, même si, actuellement, elles représentent une véritable aubaine. Mais à long terme, l'Algérie devra faire appel à des sources d'énergies renouvelables et particulièrement solaires.

Le rayonnement global reçu dans différents sites de notre pays est l'un des plus élevés du monde. En plus les régions du sud bénéficient des qualités exceptionnelles pour valoriser l'énergie solaire sous les formes les plus variées. D'un autre côté, l'implantation d'un système solaire pour satisfaire à un besoin bien déterminé (applications) en un site donné ne doit se faire qu'après avoir estimé la productivité du système en fonction du gisement solaire local disponible réellement.

Le gisement solaire est le plus grand potentiel énergétique dont nous disposons sur terre, à très long terme (plusieurs millions d'années). L'idée d'exploiter cette énergie et sa conversion thermique et/ou thermodynamique, ne date pas d'aujourd'hui. Les applications sont multiples, notamment dans les domaines de la thermoélectricité, de la thermomécanique ou encore de la thermochimie et du thermo-solaire (séchage, chauffage, dessalement etc.). Afin d'exploiter au mieux cette ressource énergétique et pour un bon dimensionnement de dispositifs et/ou installations solaires, il est nécessaire de connaître le rayonnement solaire disponible à un endroit spécifique, à chaque instant de la journée et de l'année.

L'irradiation solaire à des variations temporelles et spatiales. Pour recueillir ces informations, un réseau de stations de surveillance solaires équipées de pyranomètres et de systèmes d'acquisition de données, dans des endroits donnés est utilisé. Cependant, le nombre de ces stations dans le réseau national est généralement insuffisant. Il est par conséquent, nécessaire d'estimer le rayonnement solaire en utilisant des modèles mathématique approchés.

Au cours des années, beaucoup de modèles ont été proposés pour prévoir la valeur du rayonnement solaire en utilisant plusieurs paramètres. De nombreuses études et travaux de plusieurs modèles empiriques ont été développés afin d'évaluer la répartition du rayonnement

se sont fixés comme objectif cette estimation de l'éclairement solaire, et divers modèles empiriques ont été développés dans diverse sortes de condition météorologique et géographique.

L'objectif de notre travail est consacré à la simulation et l'estimation du rayonnement solaire par le modèle théorique de LIU JORDAN, puis une comparaison avec des résultats expérimentaux sur le site d'Adrar.

Notre travail se divise en trois chapitres.

- Dans le premier chapitre, nous étudierons brièvement le soleil, son énergie et son rayonnement reçus au niveau de la terre. Nous définirons quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude, les différents phénomènes physiques de ce rayonnement, la structure de l'atmosphère et ces effets sur le rayonnement solaire. Ainsi, les différentes composantes du rayonnement solaire. Enfin, le gisement solaire en Algérie.
- Le chapitre suivant, nous avons montré les différents modèles mathématiques pour estimer l'éclairement solaire incident sur le plan horizontal et incliné.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons et commenterons les différents résultats obtenus pour la station de mesure du rayonnement dans l'unité de recherche des énergies renouvelables en milieu saharien d'Adrar(URER\_SM) et en utilisant le modèle empirique de LIU JORDAN pour modéliser le rayonnement solaire a station.

**Chapitre I**  
**Gisement solaire**



---

---

# CHAPITRE I : Gisement Solaire

## I.1. Introduction

La ressource de base la plus importante pour tous les potentiels énergétiques renouvelables est l'énergie solaire, c'est le rayonnement émis dans toutes les directions par le soleil, et que la terre reçoit à raison d'une puissance moyenne de  $1,4 \text{ kW/m}^2$  [1], pour une surface perpendiculaire à la direction terre-soleil. Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion, suivant les conditions météorologiques et la latitude du lieu au niveau du sol.

Afin d'exploiter au mieux cette ressource énergétique et pour un bon dimensionnement des installations solaires, il est nécessaire de connaître la quantité de l'énergie solaire disponible à un endroit spécifique à chaque instant de la journée et de l'année.

Pour cette raison, on a jugé nécessaire de présenter dans ce chapitre une notion générale sur les coordonnées célestes ainsi que le rayonnement solaire.

## I.2. Astronomie du Soleil

### I.2.1. Le Soleil

Le soleil est une étoile autour de laquelle gravite la terre. Elle est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité.

Il est résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce type de nuage est extrêmement chaud et gazeux. Il est composé de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments. Son énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium, en libérant  $4109 \text{ kg/s}$  d'énergie de masse selon la célèbre équation d'Einstein  $E = mc^2$  [2].

### I.2.2. La Structure de Soleil

Le Soleil, peut être découpé en plusieurs couches concentriques. On distingue quatre zones particulières : Les couches internes, la photosphère, la chromosphère et la couronne [3].

### **I.2.2.1. Les couches internes**

#### **➤ Le Noyau**

Il représente 50 % de la masse du Soleil. C'est la région où ont lieu les réactions nucléaires. Elle s'étend du centre à environ 0,25 rayon solaire (environ 210000km). Le noyau c'est un gaz de densité 150 fois supérieure à la densité de l'eau, sa température est de 16 millions °C au centre, elle diminue quand on s'éloigne du centre. Lorsqu'elle atteint 7 millions de degrés, la chaleur devient insuffisante pour entretenir les réactions de fusion.

#### **➤ Zone Radiative**

Cette région est le lieu des réactions de fusion nucléaire. Est une matière (le gaz) est relativement opaque, aussi le rayonnement est-il constamment absorbé pour être réémis dans une direction aléatoire. Ces " rebonds " permanents font que l'énergie met environ 1 million d'années à traverser cette zone. Ce gaz est de même densité que l'eau, sa température est de 2,5 millions °C, elle diminue quand on s'éloigne du centre.

#### **➤ Zone Convective**

La couche la plus externe de l'intérieur solaire, occupant 0,30 rayon solaire, est appelée zone convective, la matière très opaque provoquée une accumulation de l'énergie provenant de la zone radiative créant des courants de convection, la matière chaude montant vers la surface, la matière froide retombant. Sa température est de 2 millions °C. Le rayonnement ne met ici que deux mois à traverser la zone convective.

### **I.2.2.2. Couronne**

Est la couche externe de l'atmosphère du soleil. C'est une couche aux flammes rougeoyantes, elle n'a pas de limites, elle s'étend sur plusieurs millions de kilomètres dans l'espace, est généralement noyée dans l'atmosphère solaire et se mélange au milieu interplanétaire, ne peut être vu que durant l'éclipse totale du soleil. Sa température atteint 10 millions de degrés.

### **I.2.2.3. Photosphère**

C'est la surface visible du soleil, il est la région la plus profonde de l'atmosphère solaire. Son nom signifie sphère de lumière et c'est une fine couche épaisse seulement de 300 km qui émet l'énergie sous forme de rayonnement solaire et infrarouges. Sa surface présente une structure granulée. Ces granules ont des dimensions comprises entre 1000 à 2000 km et une durée de vie de l'ordre d'une dizaine de minutes. Sa température se met à remonter vers

l'extérieur du soleil, pour avoisiner en moyenne  $5800^{\circ}$ .

#### I.2.2.4. Chromosphère

La chromosphère est la partie basse de l'atmosphère solaire, elle contribue très peu au rayonnement du Soleil. C'est une couche très hétérogène d'une épaisseur moyenne de 2000 à 3000 km. Sa température est de plusieurs milliers de degrés et croît vers l'extérieur pour atteindre  $20000^{\circ}\text{C}$ . Elle est visible de courts instants lors des éclipses totales [3].

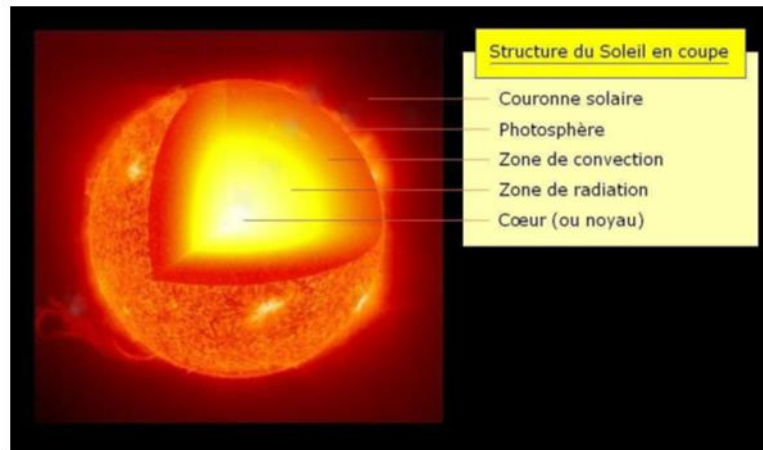


Figure I.2: Structure du Soleil [4].

### I.3. Mouvement de la terre autour du soleil

La terre décrit autour du soleil une trajectoire quasi circulaire, appelée plan de l'écliptique, avec une distance moyenne de 149.6 millions de km, et sur une période de 365,25 jours [5].

La terre tourne sur elle-même avec une période de 24h, son axe de rotation (axe des pôles) est incliné par rapport au plan de l'écliptique de  $23^{\circ} 27'$  ( $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver,  $+23^{\circ}27'$  au solstice d'été) et nulle aux équinoxes.

Au solstice d'hiver (21décembre) la terre est la plus proche du soleil, et au solstice d'été (22juin) elle en est la plus éloignée [6].

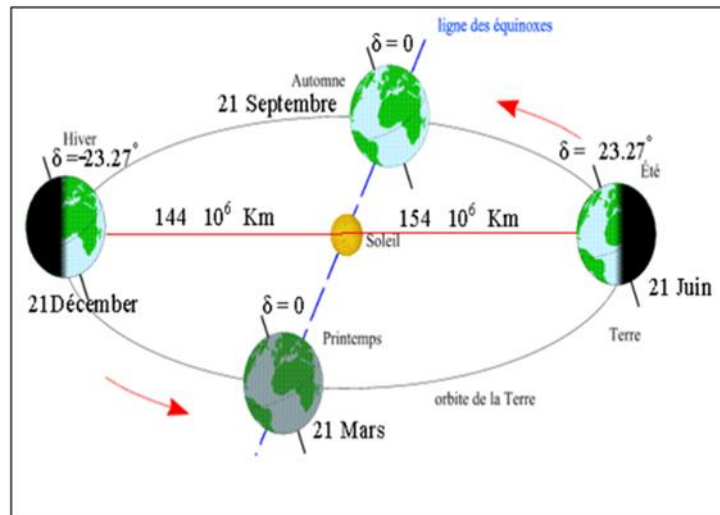


Figure I.3: Mouvement de la terre autour du soleil [7].

## I.4. Les coordonnées célestes

La connaissance de la position du soleil permet d'estimer l'énergie captée par le rayonnement solaire et d'optimiser les systèmes de captation.

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par des systèmes de coordonnées différents :

### I.4.1. Coordonnées géographiques

La Terre est séparée par l'équateur en deux demi sphères, l'hémisphère Nord pour celle située du côté du pôle Nord, et l'hémisphère Sud pour celle qui est située du côté du pôle Sud. D'autre part, elle est partagée d'Ouest en Est, par le méridien d'origine qui passe par Greenwich (près de Londres en Angleterre) [8].

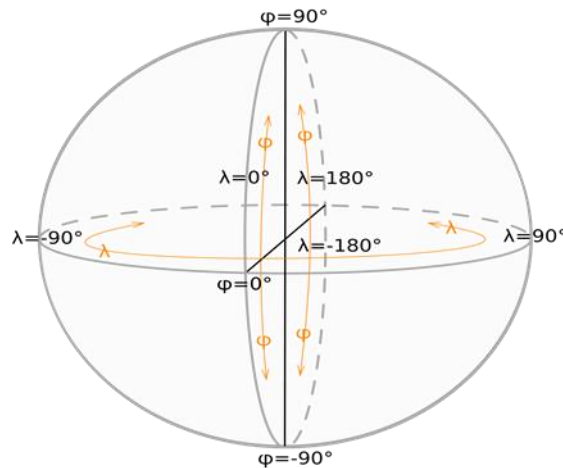
#### I.4.1.1. La longitude (L)

La valeur (L) représente l'angle formé entre la méridienne origine et le méridien du site considéré. La longitude (L) est comprise entre -180 (vers l'ouest) et +180 (vers l'est), et puisque la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°) on déduit que chaque heure représente 15° d'écart de longitude [5].

#### I.4.1.2. La latitude ( $\varphi$ )

La latitude ( $\varphi$ ) représente l'angle fait par la verticale du lieu (site) avec le plan équatorial. Elle permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Ainsi si le site est situé dans l'hémisphère nord la valeur  $\varphi > 0$ , et lorsque le site est dans l'hémisphère sud  $\varphi < 0$ . (Elle varie de 0° à +90° vers le Nord et de 0° à -90° vers le

Sud) [9].



**Figure I.4:** Longitudes et latitudes sur le globe [10].

### I.4.1.3. L'altitude (Z)

L'altitude exprime un écart entre un point donné et un niveau moyen, le plus souvent le niveau de la mer (ou niveau 0). Les sommets sont associés à une altitude, calculée par divers moyens indirects (géodésie, triangulation) [8].

## I.4.2. Les coordonnées horaires

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la Terre à l'aide de deux angles : la déclinaison  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$  [8].

### I.4.2.1. La déclinaison ( $\delta$ )

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année, La déclinaison varie de  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver à  $+23^{\circ}27'$  au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. Elle s'obtient à partir de la formule suivante [11].

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + nj) \right] \quad (1)$$

Où :  $\delta$  est exprimé en degrés :

$$\sin(\delta) = 0.4 \sin \left[ \frac{360}{365} (nj - 80) \right] \quad (2)$$

$nj$  : le numéro du jour dans l'année compte à partir du 1<sup>er</sup> Janvier.

L'angle d'inclinaison varie au cours des saisons :

- Equinoxe de printemps : 21 mars,  $\delta = 0$
- Solstice d'été : 21 juin,  $\delta = + 23^{\circ} 27'$

- Equinoxe d'automne : 23 septembre,  $\delta = 0$
- Solstice d'hiver : 21 décembre,  $\delta = - 23^{\circ} 27'$

#### I.4.2.2. L'angle horaire ( $\omega$ )

L'angle horaire du soleil qu'on note ( $\omega$ ) est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course de l'est à ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de  $15^{\circ}$  par heure (un tour de  $360^{\circ}$  en 24 heures) [11].

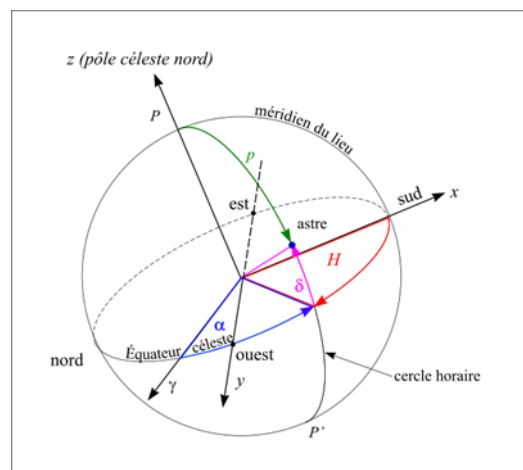
Elle est donnée par la relation suivante:

$$\omega = (T_{SV} - 12)15^{\circ} \quad (3)$$

L'angle horaire (varie de  $- 180^{\circ}$  à  $+ 180^{\circ}$ )

Où :  $T_{SV}$  est le Temps Solaire Vrai.

- Si  $\omega = 0$ , à midi
- Si  $\omega < 0$ , la matinée.
- Si  $\omega > 0$ , l'après-midi.



**Figure I.5:** les coordonnées horaires [12].

### I.4.3. Les coordonnées horizontales

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur du soleil 'h' et l'azimut 'a<sub>s</sub>' [8].

#### I.4.3.1. L'azimut ( $a_s$ )

L'azimut ( $a_s$ ) est l'angle entre la direction sud et la projection sur le plan horizontal

local de la droite reliant la terre au soleil. L'azimut est relié à l'angle horaire, à la hauteur angulaire et à la déclinaison à chaque instant de la journée, il se compte de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  à partir du Sud dans le sens rétrograde. Selon la relation suivante [13].

$$\sin(a_s) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (4)$$

Il est nul à midi  $T_{SV}$  et maximal au lever et au coucher du soleil.

#### I.4.3.2. La hauteur (h)

La hauteur solaire (h) est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par le point d'observation (Figure 6). Ou l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante [13] :

$$\sin(h) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (5)$$

On appelle quelquefois distance zénithale le complément de l'angle h :  $z + h = 90^\circ$

h : varie entre  $(-90^\circ)$  et  $(+90^\circ)$ , on prend pour :

- $h > 0$  ; le jour.
- $h < 0$  ; la nuit.
- $h = 0$  au lever et au coucher du soleil.

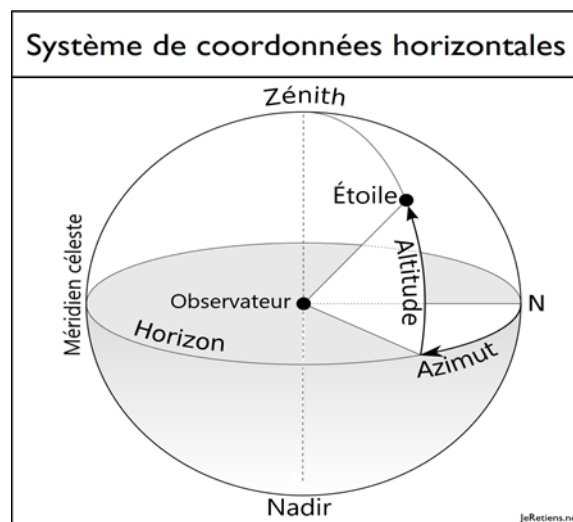


Figure I.6: Les coordonnées horizontales [14].

## I.5. Energie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie du rayonnement solaire qui apporte

l'énergie thermique et la lumière parvenant sur la surface de la terre, après filtrage par l'atmosphère terrestre. L'énergie solaire est disponible en tout point du globe terrestre alors que les autres énergies conventionnelles sont concentrées en certaines sources (gisements pétroliers, centrales électriques). L'énergie solaire ne nécessite pas d'être transportée vers les centres d'utilisation, cette dispersion est un avantage mais elle est contrariée par le fait que la puissance incidente par unité de surface est faible. Les réserves terrestres en combustibles fossiles et nucléaires ne représentent même pas 20 % de l'énergie envoyée par le soleil en une année. Cette énergie, d'origine nucléaire extra-terrestre résultant des réactions chimiques, équivaut à  $3,47 \cdot 10^{24}$  (KWh), le soleil est inépuisable à l'échelle humaine bien que sa masse diminue de 5 millions de tonnes par seconde [15].

## I.6 Rayonnement solaire

### I.6.1. Nature et composition

L'énergie émise par le soleil nous parvient sous forme de rayonnements électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière et dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Cependant, toute la gamme des rayonnements électromagnétiques se compose essentiellement de rayon ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. Voir aussi la constitution de cette lumière qui provient du soleil sous forme d'onde électromagnétique dont 98 % d'énergie est comprise entre  $\lambda' = 0.25 \mu\text{m}$  et  $\lambda' = 4 \mu\text{m}$ , le reste représente 1% au-dessus et 1% au-dessous de cet intervalle (Figure I.7) [16].

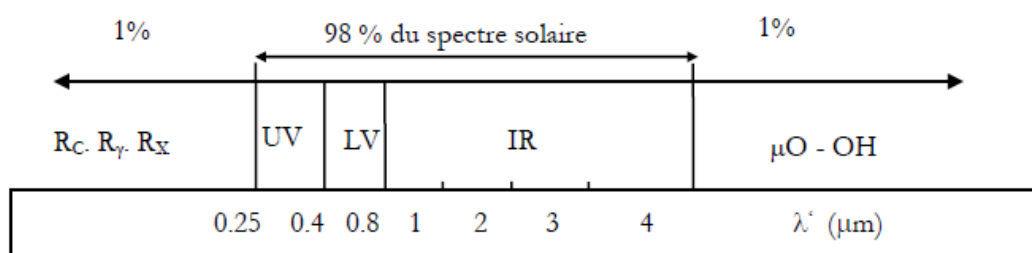


Figure I.7: Composition du rayonnement [17].

### I.6.2. Emission du rayonnement solaire

Il est intéressant de remarquer que sur le plan d'émission du rayonnement, le soleil se comporte de façon similaire à un corps noir, à une température qui avoisine 6.000 K. La terre et son atmosphère jouent un rôle de transformateurs de l'énergie solaire, qu'elles reçoivent



principalement sous forme de rayonnement de courtes longueurs d'ondes et qu'elles réémettent vers l'espace essentiellement sous forme de rayonnement infrarouge [2,18].

## I.7. Constante solaire

La valeur moyenne du flux solaire reçu par un plan perpendiculaire d'un mètre carré de surface et placé à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre est appelée constante solaire, notée  $I_0$ . La valeur moyenne annuelle est  $I_0=1353 \text{ W/m}^2$ , confirmée par les travaux de « Thekaekara ; Duncan et al [20], qui ont proposés la valeur de  $1367 \text{ W/m}^2$ . Cette valeur est en fonction de la distance Terre - Soleil, qui varie sensiblement au cours de l'année [20].

La constante solaire est calculée selon la loi de Stefan-Boltzmann et la distance moyenne Soleil-Terre est de  $150.10^6 \text{ km}$  [18] :

$$I_0 = C_s \left( \frac{R_s}{D_0} \right)^2 T^4 \quad (6)$$

$C_s$ : Constante de Stéphane-Boltzmann  $5.67. 10^{-8} \text{ (W. m}^2.\text{K}^{-4})$ .

$R_s$  : Rayon du soleil.

$D_0$  : Distance moyenne terre-soleil.

$T$  : Température de surface du soleil en degrés kelvin.

La correction de la distance terre-soleil  $C_s$  peut être évaluée par la relation suivante :

$$C_{ts} = 1 + 0.033 \cos(0.984 \times nj) \quad (7)$$

Où  $nj$  est le numéro du jour de l'année de 1 à 365.

La constante solaire corrigée est alors:

$$I_c = I_0 C_{ts} \quad (8)$$

## I.8. Rayonnement solaire au sol

Le rayonnement solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. Ce qui ne permet que la réception au sol des composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus. La partie réfléchié (l'albédo) par le sol du rayonnement solaire global comme représentés dans la figure suivante [21].



**Figure I.8:** Les différents composants du rayonnement solaire [22].

Il y a plusieurs composants, principalement :

### **I.8.1. Le rayonnement direct (I)**

On appelle rayonnement solaire direct celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion. Il se diffère de façon notable du rayonnement atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en particulier du fait de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère [23].

### **I.8.2. Le rayonnement diffus (D)**

Est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année [23].

### **I.8.3. Le rayonnement global (G)**

C'est la somme des rayonnements direct et diffus [17].

Le rayonnement est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension dans l'atmosphère, c'est donc le rayonnement total mais excepté sa composante directe. Il est défini aussi comme le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste [23].

## I.9. Durée et taux d'ensoleillement

### I.9.1. Durée d'ensoleillement

L'ensoleillement est le temps pendant lequel un lieu est exposé au soleil. C'est l'intervalle de temps entre le lever et la coucher de soleil. L'éclairement normal direct atteint le sol sans diminution est  $120 \text{ W/m}^2$ .

### I.9.2. Taux d'ensoleillement

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement  $SS_0$ .

On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement [24]

$$\sigma = SS/SS_0 \quad (9)$$

$SS$  : La durée effective d'ensoleillement.

$SS_0$  : La durée maximale d'ensoleillement.

## I.10. Paramètre de temps

### I.10.1. Temps universel ( $T_U$ )

Le Temps Universel ( $T_U$ ) est défini par le temps de passage du soleil au méridien d'origine ou encore appelé GMT (Greenwich Meridian Time) [25].

### I.10.2. Temps Solaire Moyen ( $T_{SM}$ )

La rotation de la terre autour des pôles, introduit la notion de « Temps Solaire Moyen ( $T_{SM}$ ) ». La journée solaire moyenne est le temps qui sépare en moyenne, deux passages successifs du Soleil au méridien d'un lieu. Par définition, la journée solaire moyenne a une durée d'un jour = 24h 00mn 00s [26].

Le Temps Solaire Moyen ( $T_{SM}$ ) est défini par la différence entre le Temps Universel et la Correction de Longitude, qui est donnée par [25] :

$$T_{SM} = T_U + \frac{L}{15} \quad (10)$$

$L$  : La longitude en degrés ((+) à l'Est et (-) à l'Ouest).

$T_U$  : en heures.

### I.10.3. Le temps solaire vrai ( $T_{SV}$ )

C'est le temps mis par le soleil entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu (Direction Nord-Sud). Le temps solaire vrai et le temps solaire moyen diffèrent. Cette

différence est appelée équation du temps, elle varie en fonction du jour [27]:

$$T_{SV} = T_{SM} + E_T \quad (11)$$

Où  $E_T$  est l'équation du temps. Temps  $E_T$  de -14,5 minutes (du 10 au 15 février) à +16,5 minutes (du 25 au 30 octobre). Donne une bonne approximation du temps  $E_T$  par l'équation suivante :

$$E_T = 9.9 \sin[2(0.986 nj + 100)] - 7.7 \sin(0.986 nj - 2) \quad (12)$$

Où:  $E_T$  est exprimé en minutes et  $n$  est le numéro du jour dans l'année à partir du 1<sup>er</sup> Janvier [28].

#### I.10.4. Le temps légal ( $T_L$ )

Le temps légal (TL) est le temps officiel de l'Etat, il diffère par rapport au temps mondial de Greenwich par un décalage exprimé en heures.

$$T_L = T_U + \Delta H \quad (13)$$

$\Delta H$  est la différence de temps entre le méridien de Greenwich et l'état considéré, ( $\Delta H=1$  heure d'Algérie) [23].

#### I.11. Lever et coucher du soleil

On s'intéresse ici à deux instants particuliers de la journée, le « lever » et le « coucher » du soleil donné par [29]:

$$TSV_{(lever)} = 12 - \frac{\omega_s}{15} \quad (14)$$

$$\text{Et} \quad TSV_{(coucher)} = 12 + \frac{\omega_s}{15} \quad (16)$$

L'angle solaire au lever ( $-\omega_s$ ) et au coucher ( $\omega_s$ ) est donné par l'équation suivante:

$$\cos \omega_s = -\tan \delta \cdot \tan L \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \omega_{sl} = \arccos(-\tan \delta \cdot \tan L) \\ \omega_{sc} = -\arccos(-\tan \delta \cdot \tan L) \end{cases} \quad (20)$$

#### I.12. Mesure du rayonnement solaire

La plupart du temps, il est quasiment impossible de calculer l'intensité du rayonnement solaire parvenant au sol, en utilisant les formules relatives à l'absorption et à la diffusion par l'atmosphère. Les données météorologiques très complètes qui sont nécessaires, font en effet

le plus souvent défaut. Il faut donc, soit l'estimer à partir de mesures antérieures effectuées sur le lieu même, ou dans des environnements comparables ou encore à partir de données météorologiques plus sommaires.

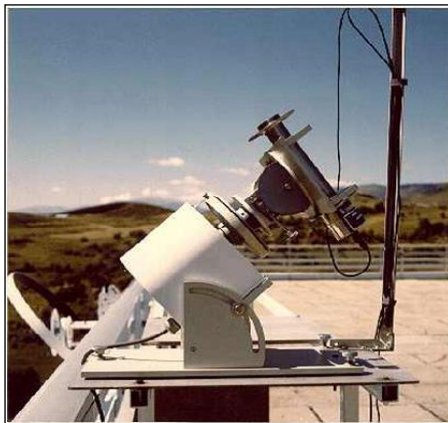
Les rayonnements au voisinage du sol peuvent être divisés en deux catégories :

- Les rayonnements de courte longueur d'onde ( $0.2 \mu\text{m}$  à  $0.4 \mu\text{m}$ ), d'origine solaire.
- Les rayonnements de grande longueur d'onde ( $4 \mu\text{m}$  à  $80 \mu\text{m}$ ), émis par des sources terrestres (sol, atmosphère), dont la température est proche de la température ambiante.

Pour mesurer ces divers rayonnements, plusieurs types d'appareils sont utilisés [30]:

### I.12.1. Les pyréliomètres

Ils mesurent le rayonnement solaire direct (c'est-à-dire le rayonnement d'une petite partie du ciel contenant tout le soleil) en incidence normale ; on les appelle aussi actionomètres. Ces appareils (Figure I.9), sont constitués d'un tube muni de diaphragmes et pointé vers le soleil. Au fond de ce tube, se trouve un récepteur thermique non sélectif qui absorbe le rayonnement et le transforme en chaleur. Cette dernière sert à élever la température d'un solide ou d'un fluide. L'élévation de température résultante est mesurée.



**Figure I.9:** Le pyréliomètre [31].

### I.12.2. Les pyranomètres

Parfois appelés solarimètres (Figure I.10), ils mesurent le rayonnement solaire global provenant d'un demi-espace (angle solide  $2\pi$ ). Ils utilisent pour la plupart la différence de température qui apparaît entre une surface noire qui absorbe tout le rayonnement solaire visible et une surface blanche qui le réfléchit. La différence de température est mesurée par un thermocouple.

Les pyranomètres sont généralement placés en position horizontale, de sorte qu'ils couvrent l'ensemble du ciel. Le récepteur est protégé du vent et des intempéries par une ou deux coupelles hémisphériques transparentes.



**Figure I.10:** Le pyranomètre [32].

### I.12.3. Les pyrromètres

Les pyrromètres (Figure I.11) mesurent le rayonnement total (de grande comme de courte longueur d'onde), provenant d'un angle solide  $2\pi$ . Ces appareils sont destinés à mesurer le rayonnement total, dans la bande  $0.2 \mu\text{m} - 100\mu\text{m}$ , arrivant sur une surface plane à partir d'un angle solide  $2\pi$ . Leur surface sensible est noire et a une émissivité élevée. Si on connaît la température et l'émissivité de la surface, on peut en déduire le rayonnement total.

Les pyrromètres différentiels possèdent deux surfaces sensibles, l'une dirigée vers le sol et l'autre vers le ciel. La différence de température entre ces deux surfaces  $\Delta T$  est généralement très faible. Par ailleurs, elles ont la même émissivité. Leur rayonnement propre s'élimine, par conséquent,  $\Delta T$  est proportionnelle à la différence entre le rayonnement provenant du ciel et celui provenant du sol.



**Figure I.11:** Le pyrromètre [33].

#### I.12.4. Les héliographes

Les héliographes mesurent la durée d'insolation, c'est-à-dire la période pendant laquelle le rayonnement direct est supérieur à une valeur donnée (105 W/m<sup>2</sup> par exemple) (on utilise parfois d'autres définitions de la durée d'insolation, à savoir la période pendant laquelle on voit le disque solaire ou encore celle pendant laquelle on voit des ombres).

L'héliographe Campbell-Stockes (Figure I.12) est le plus utilisé. Il est constitué d'une boule de verre qui concentre le rayonnement solaire sur une bande en carton. Il s'ensuit un brunissement ou une brûlure selon l'intensité du rayonnement.



Figure I.12: L'héliographe [34].

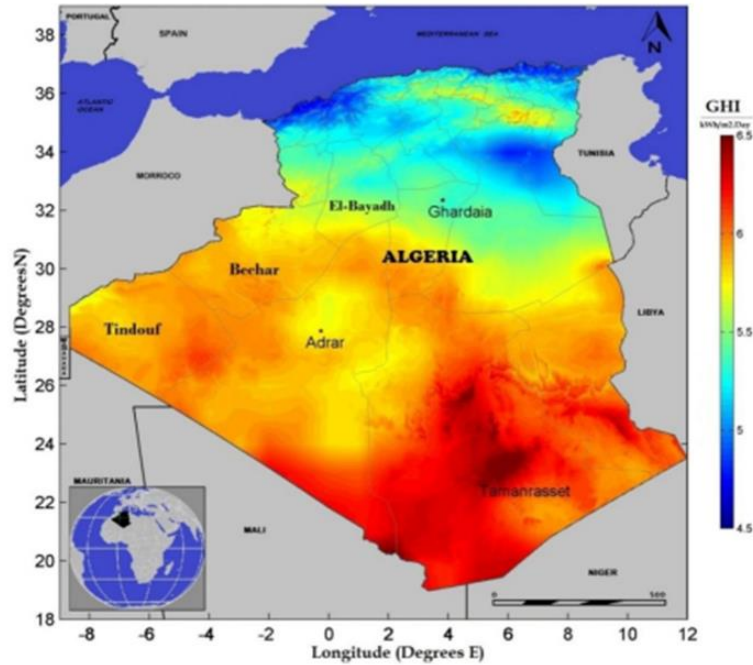
#### I.13. Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est une collection de données qui décrit l'évolution du rayonnement solaire disponible sur une certaine période. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système d'énergie solaire et pour effectuer le dimensionnement le plus précis possible en fonction de la demande à satisfaire [26].

De par sa situation géographique l'Algérie dispose d'un des gisements solaires énorme comme le montre sur la figure (I.13). La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau (I.1) sur la base de l'ensoleillement annuel. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national soit près de 1700KWh/m/an au Nord et 2263 kWh/m/an au Sud du pays.

A la suite d'une évaluation satellitaire, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu que

l'Algérie avait le potentiel solaire le plus élevé du bassin méditerranéen, avec 169.000 TW h/an pour le solaire thermique et 13,9 TW h/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien équivaut à dix grands gisements de gaz naturel découverts à Hessi Ramel.



**Figure I.13:** Carte de la durée d’enseillent moyen annuel en Heure (1983-2012) [23].

**Tableau I.1:** Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [35]

Régions	Région côtières	Hautes plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d’enseillement (h /an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kw /m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

### I.14. conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le gisement solaire, son rayonnement reçu au niveau de la terre, et ça position pour une quantité d’irradiation incident sur une surface considérée, on a définie quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude et on l’a fini avec le potentiel solaire en Algérie.

L’Algérie un pays très vaste d’un climat très diversifié, ayant deux grandes zones géographique distinctes, le Nord méditerranéen et le Sud saharien, peut devenir un bon concurrent dans cette course de recours aux énergies renouvelables.



**Références bibliographiques**

---

---

## Références bibliographiques

- [1] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, « Le rayonnement solaire, conversion thermique et application », Technique et Documentation, Paris, (1979).
- [2] P. Bessemoulin et J. Olivieri, « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », La Météorologie, vol. 8. no. 31. p. 42. 2000. Doi : 10.4267/2042/36135.
- [3] M. Zemouri, H. Zeghlache et De Herde , André , «Caractérisation et optimisation de la lumière naturelle en milieu urbain », Université Ferhat Abbas –Sétif : Institut d’architecture et des sciences de la terre , Algérie : s.n. p. 386, Thèse de doctorat : Architecture.
- [4] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Soleil-page-4.html>.
- [5] Angstrom. « Solar and terrestrial radiation ». Q J R Met Soc (1924).
- [6] J.A. Duffie, and J.W. Beckman, « Solar Engineering of Thermal Processes, 2ed », (1991).
- [7] J.M Chassériaux, « conversion thermique du rayonnement solaire », Dunod, (1984).
- [8] M. Iqbal, « An Introduction to Solar Radiation », Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Canada, (1983).
- [9] C.P. de Brichaumbot, C. Vauge, « Le gisement solaire », Ed. Tech. & Doc, Paris, (1982).
- [10] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es\\_g%C3%A9ographiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es_g%C3%A9ographiques).
- [11] Nia Mohamed, « Etude comparative des méthodes d’estimation du Rayonnement solaire », mémoire Magister, Université de SETIF, (2010).
- [12] [https://media4.obspm.fr/public/ressources\\_lu/pages\\_defrepere/repere-equatorial-local.html](https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_defrepere/repere-equatorial-local.html).
- [13] S.A. Kalogirou, «Solar Energy Engineering Processes and Systems », 2nd Edition, Elsevier. Boston-Massachusetts (USA). 819 p. (2014).
- [14] <https://jeretiens.net/altitude-azimut-zenith-nadir-comprendre-le-systeme-de-coordonnees-horizontales/>.
- [15] B. Bouchekima, « Recherche des conditions optimales pour le dessalement des eaux saumâtres à l’aide du distillateur à film capillaire », Thèse de doctorat d’état USTHB, Alger (2001).

- [16] R. Bernard, G. Menguy and M. Schwartz, « Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications », Technique et documentation, 2eme édition. 1980 (2015).
- [17] Bougrine Mohamed, « Etude et Simulation du Gisement Solaire à la ville de Laghouat », Mémoire de fin d'étude, Université de Laghouat, (2010).
- [18] Zekai ,Sen, «Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques», Springer (2008).
- [19] M. P. Thekaekara, R. Kruger, et C. H. Duncan, « Solar Irradiance Measurements from a Research Aircraft », Appl. Opt. 8, 1713-1732 (1969).
- [20] K. Skeiker, « Energy Conversion et Management », 47, 331 (2006).
- [21] C. Delorme, « le rayonnement solaire utilisable », Université d'Avignon publication France.
- [22] [les différents composants du rayonnement solaire - Bing images](#).
- [23] Mr N. Bailek, « Étude et Modélisation du Flux Solaire globale sur surface inclinée dans la région de Touat », Thèse de Doctorat, SIDI BEL ABBES.
- [24] OURS BLANC DES CARPATHES, « Introduction à C++ Builder », Isima (1988-1999), [http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/intro\\_cpp\\_builder.pdf](http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/intro_cpp_builder.pdf), (consulté le 2012 à 15h54).20/012.
- [25] J. BERNARD, « Energie solaire : Calculs et optimisation », Edition ellipses, (2004).
- [26] M. Capdérrou, « Atlas Solaire de l'Algérie », Tome 1, Vol 1et 2, Modèles.
- [27] M. née Mesri Mokhtaria, A. Cheknane, « Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications », Université Amar Telidji – Laghouat.
- [28] I, TABET, « Etude, Réalisation et simulation d'un capteur Solaire », thèse de doctorat, Université de CONSTANTINE.
- [39] A.A SFEIR, G. GUARRACINO, « ingénieur des systèmes solaires, application à l'habitat, technique et documentation », Edition Paris, (1981).
- [30] A.Ricaud, « Le gisement solaire », Cythelia Edition ZEN, France, (2009).
- [31] <https://dspace.univ-adrar.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/4464/1/Performance%20des%20Modules.pdf>.
- [32] <https://educalingo.com/fr/dic-fr/pyranometre>.
- [33] <https://www.blet-climat.fr/bilan-radiatif/pyrradiometre-thies.html>.

[34] <https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/801111>.

[35] A. Mefti, M.Y. bouroubi, H. Mimouni, « Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables », N°2, p 12, décembre, (2002).

**Chapitre II :**  
**Modèles théoriques de l'estimation du**  
**rayonnement solaire**

## Chapitre II : Modèles théoriques de l'estimation du rayonnement solaire

### II.1. Introduction

Le rayonnement solaire étant mesuré sur un nombre limité de sites à travers le monde, les données relatives à cette énergie ne sont pas toujours disponibles. L'utilisation de modèles de simulation est pratiquement le seul moyen de palier à ce problème [1]. Pour générer des données d'irradiations solaires, il est nécessaire de combiner différents types de modèles. On peut classer les principaux modèles utilisés pour décrire le gisement solaire en trois classes essentielles : les modèles empiriques, les modèles analytiques et les modèles stochastiques.

Si l'irradiation hors atmosphère est décrite par des expressions analytiques précises, l'irradiation reçue au sol est dépendante des nuages et d'autres paramètres atmosphériques. Ceci lui confère un caractère aléatoire, d'où la nécessité d'utiliser des modèles plus complexes. A cet effet, la littérature propose différentes approches et méthodes d'estimation du gisement solaire à une échelle locale ou régionale tenant compte de la nature des mesures effectuées. Les études réalisées (expérimentales et théoriques) portent généralement sur sa distribution spatiale et temporelle, sa variation durant l'année, le mois, la journée et l'heure. Les études les plus courantes concernent la modélisation du rayonnement solaire à différentes échelles de temps et par différentes approches. Les méthodes physiques ou analytiques sont des modèles théoriques plus complexes. Ils sont élaborés à partir de la connaissance exacte des phénomènes physiques et permettent de calculer la transmission du rayonnement solaire à travers les différentes couches de l'atmosphère le plus exactement possible. Une description précise des constituants de l'atmosphère est nécessaire pour aboutir à ces modèles.

Dave et al [2] décomposent l'atmosphère en couches horizontales et étudient successivement les phénomènes d'absorption et de diffusion auxquels est soumis le rayonnement solaire. D'autres modèles donnent le rayonnement solaire en fonction de paramètres atmosphériques et astronomiques. Citons quelques exemples de ces modèles:

En 1960, Liu et Jordan [3] ont effectué des moyennes mensuelles et après avoir constaté que statistiquement, le rayonnement journalier est symétrique par rapport au midi solaire, ils ont présenté les résultats de leur travaux sous forme d'abaques que différents auteurs ont prouvé leur validité dans de nombreux pays comme les Etats-Unis, le Canada, l'Australie et l'Inde.

En 1975, Perrin de Brichambaut [5] a présenté un modèle en fonction de l'auteur solaire et le facteur de trouble atmosphérique pour estimation la moyenne quotidienne de l'irradiation reçue sur un plan horizontale par ciel clair. Le facteur de trouble de Linke est défini comme le nombre d'atmosphère pure et sèche (sans aérosols, ni vapeur d'eau, ni nuages).

En 1987, Capderou [4] a proposé un modèle qui utilise le facteur de trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffusé 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 des troubles, à partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradianations directes et diffusées par ciel clair.

## II.2. Modèles mathématiques pour l'estimation du rayonnement solaire

Les modèles présentés ci-dessous sont des modèles basés sur paramètres géométriques et atmosphériques comme : l'angle horaire de soleil, hauteur de soleil, déclinaison solaire, facteur de trouble atmosphérique de Linke....etc.

### II.2.1. Modèle de DE PERRIN DE BRICHAMBAUT

Théoriquement, le rayonnement solaire peut être estimé à l'aide d'un modèle qui utilise le facteur de difficulté total de Linke (T). La définition d'un facteur de difficulté implique plusieurs hypothèses qui nécessitent la connaissance de nombreux paramètres climatiques.

#### II.2.1.1. Le facteur de trouble de Linke

Le nombre d'atmosphères pures et sèches (sans aérosols, vapeur d'eau ou nuages) (par ciel clair) a été décomposé en trois facteurs de difficulté supplémentaires [6]:

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (1)$$

Avec

$T_0$ ,  $T_1$  et  $T_2$  est donné par l'expression suivante :

$T_0$  : correspond à l'absorption de vapeur d'eau.

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1(2 + \sin(\varphi))A_{he} - 0.2 Z - (1.22 + 0.14 A_{he})(1 - \sin(h)) \quad (2)$$

Avec

$A_{he}$  : Variation saisonnière

$$A_{he} = \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right)(nj - 121)\right) \quad (3)$$

Z : l'altitude du lieu.

nj : le numéro du jour dans l'année.

$\varphi$  : la latitude du lieu.

h : la hauteur du soleil.

$T_1$  : Correspond à la diffusion moléculaire, à l'origine du bleu foncé du ciel.

$$T_1 = 0.89^Z \quad (4)$$

$T_2$  : Correspond à la diffusion (et une légère absorption) par les aérosols, rendant le ciel plus ou moins blanchâtre.

$$T_2 = (0.9 + 0.4 A_{he})(0.63)^Z \quad (5)$$

### II.2.1.2. Rayonnement reçue sur un plan horizontal

#### II.2.1.2.1. Rayonnement direct

Rayonnement solaire direct pour ciel clair obtenu sur un plan horizontal est donné par la formule suivante [6] :

On a:  $\cos(i) = \sin(h)$

$$I_h = gne \sin(h) \exp \left[ \frac{T}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^Z} \sin(h)} \right] \quad (6)$$

Avec  $gne$  désigne le rayonnement hors atmosphère exprimé par la relation :

$$gne = \left[ 1 + 0.0334 \cos \left[ \frac{360}{365} (nj - 2) \right] \right] \times 1353 \quad (7)$$

#### II.2.1.2.2. Rayonnement diffus

Rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal est donné par la formule suivante [6]:

$$D_h = gne \exp \left[ -1 + 1.06 \log \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + b^2} \right] \quad (8)$$

Avec  $b = \log T - 2.5 + 1.02(1 - \sin(h))^2$

$$a = 1.1$$

#### II.2.1.2.3. Rayonnement global

$$G_h = I_h + D_h \quad (9)$$



### II.2.1.3. Rayonnement reçue sur un plan incliné

#### II.2.1.3.1. Rayonnement direct

Pour tout plan de réception donné, la puissance du rayonnement direct incident s'exprime par [6,7]:

$$I_i = gne \cos(i) \exp \left[ \frac{T}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^Z} \sin(h)} \right] \quad (10)$$

$\cos(i)$  Est l'angle d'incidence sur le plan incliné est donné par :

$$\cos(i) = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\varphi - \beta) + \sin(\delta) \sin(\varphi - \beta) \quad (11)$$

$\delta$  : La déclinaison du soleil.

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + nj) \right] \quad (12)$$

$\beta$ : Inclinaison du plan.

$\omega$  : L'angle horaire.

$$\omega = (T_{SV} - 12)15^\circ \quad (13)$$

#### II.2.1.3.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus (D) est composé de trois parties [7]:

$$D_i = d_{ciel} + d_{sol} + d_{rétrodiffluse} \quad (14)$$

Rayonnement diffus de la part du ciel ( $d_{ciel}$ )

$$d_{ciel} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} + \delta_h \cos(\gamma) \quad (15)$$

$\delta_d$  : La composante directe s'exprime par :

$$\delta_d = gne \exp[-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}] \quad (16)$$

Avec :  $a = 3.1 - 0.4b$

$$b = \log \tau' - 2.28 - 0.5 \log \sin(h)$$

Où  $\tau' = T_1 + T_2$

$\delta_i$  : La composante isotrope correspondant à un ciel de luminosité uniforme est donnée par :

$$\delta_i = D_h - \delta_d \sin(h) \quad (17)$$

$D_h$  : Le rayonnement diffus sur un plan horizontal.

$\delta_h$  : correspond au cercle de l'horizon, donnée par :

$$\delta_h = gne \frac{-0.02 a}{a^2+a b+1.8} \exp \sin(h) \quad (18)$$

Où les facteurs  $a$  et  $b$  sont donnés par les termes :

$$a = \log T' - 3.1 \log(\sin(h))$$

$$b = \exp[0.2 + 1.75 \log(\sin(h))]$$

Rayonnement diffus du sol ( $d_{sol}$ ), représenté par la relation :

$$d_{sol} = \delta_a \frac{1+\sin(\gamma)}{2} \quad (19)$$

$\gamma$  : Hauteur de la normale au plan .

$$\gamma = 90 - \beta \quad (20)$$

La composante  $\delta_a$  représente par :

$$\delta_a = \rho(I_h + d_h) \quad (21)$$

$\rho$  : L'albédo du sol.

Rayonnement diffus rétrodiffuse ( $d_{rétrodiffuse}$ ) est donnée comme suit :

$$d_{rétrodiffuse} = \delta_r \frac{1+\sin(\gamma)}{2} \quad (22)$$

Utilise le terme  $\delta_r$  donné par :

$$\delta_r = 0.9(\rho - 0.2)(I_h + d_h) \exp\left(\frac{-4}{\sqrt{T^4}}\right) \quad (23)$$

### II.2.1.3.3. Rayonnement global

$$G_i = I_i + D_i \quad (24)$$

## II.2.2. Modèle de CAPDEROU

Le modèle de Capderou [4] utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffuse 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 des troubles.

A partir de ces facteurs, on peut exprimer les rayonnements directe et diffuse par ciel clair.

### II.2.2.1. Le facteur de trouble de Linke

La connaissance du facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les

irradiations par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement direct traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par:

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (25)$$

$T_0$  : est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante [4,8 à 13]:

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1(2 + \sin(\varphi))A_{he} - 0.2 Z - (1.22 + 0.14 A_{he})(1 - \sin(h)) \quad (26)$$

$T_1$  : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère ( $O_2$ ,  $CO_2$  et  $CO_3$ ) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche:

$$T_1 = 0.89^Z \quad (27)$$

$T_2$  : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption (il dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom $\beta$ ,  $T_2$  est donné par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4 A_{he})(0.63)^Z \quad (28)$$

## II.2.2.2. Rayonnement reçu sur un plan horizontal

### II.2.2.2.1. Rayonnement direct

Le rayonnement directe par ciel clair obtenue sur un plan horizontal est donnée par:

$$I_h = I_0 \sin(h) C_{ts} \exp \left[ -T_L^* \left( 0.9 + \frac{9.4}{0.89^Z} \sin(h) \right)^{-1} \right] \quad (29)$$

$I_0$  : Représente la constante solaire qui est par définition le flux énergétique reçu par une surface unité.

Dans notre cas, la valeur retenue pour la constante solaire est de  $1367 \text{ W/m}^2$ .

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

$C_{ts}$ : C'est la correction de distance terre-soleil définie par la relation suivant :

$$C_{ts} = 1 + 0.033 \cos(0.984 \times nj) \quad (30)$$

### II.2.2.2.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus sur un plan horizontal est donné par l'expression suivante:

$$D_h = I_0 C_{ts} \exp\left((-1 + 1.06 \log(\sin(h))) + a - \sqrt{a^2 + b^2}\right) \quad (31)$$

Où :  $a = 1.1$

$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.8 + 1.02 (1 - \sin(h))^2$$

### II.2.2.2.3. Rayonnement global

Le rayonnement global reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$G_h = I_h + D_h \quad (32)$$

### II.2.2.3. Rayonnement global reçu sur un plan incliné

#### II.2.2.3.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné [14]:

$$I_i = I_0 C_{ts} \cos(i) \exp\left(-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89Z} \sin(h)\right)\right) \quad (33)$$

#### II.2.2.3.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus incident sur un plan incliné est donné par [15] :

$$D_i = d_{ciel} + d_{sol} + d_{rétrodifusé} \frac{1+\sin(\gamma)}{2} \quad (34)$$

Avec

$d_{ciel}$  : Le diffus du ciel.

$d_{sol}$  : Le diffus de sol.

$d_{rétrodifusé}$  : Le diffus rétrodiffusé [15].

Le diffus du ciel  $d_{ciel}$  est l'éclairement diffus incident en provenance du ciel et donnée par la relation suivante :

$$d_{ciel} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \frac{1+\sin(\gamma)}{2} + \delta_h \cos(\gamma) \quad (35)$$

$\delta_d$  Est la composante directe ou circumsolaire. Elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi angle au sommet compris entre 3° et 15°. Elle peut être considérée aussi qu'elle provient directement du soleil [4, 16].

$$\delta_d = I_0 C_{ts} \exp(-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}) \quad (36)$$

Avec :  $a = 3.1 - 0.4b$

$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.28 - 0.5 \log(\sin(h))$$

$\delta_i$  Est la composante isotrope qui correspond à un ciel de luminance uniforme.

$$\delta_i = D_h - \delta_d \sin(h) \quad (37)$$

$D_h$  Est le rayonnement diffus sur un plan horizontal.

$\delta_h$  Est la composante du cercle de l'horizon qui provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6°. Elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques.

$$\delta_h = I_0 C_{ts} \frac{-0.02a}{a^2 + ab + 1.8} \exp(\sin(h)) \quad (38)$$

Avec  $a = \log(T_L^- - T_0) - 3.1 - \log(\sin(h))$

$$b = \exp(0.2 + 1.75 \log(\sin(h)))$$

$d_{sol}$  : L'éclairement diffus du sol est caractérisé par l'albédo du sol qui indique la réflexion de la lumière incidente. Pour un plan quelconque( $\alpha, \gamma$ ).

$$d_{sol} = \delta_d + \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} \quad (39)$$

Avec  $\delta_d = \rho G_h \quad (40)$

$G_h$  : est le rayonnement global horizontal.

$d_{rétrodifusé}$  : Le diffus rétrodiffusé est celui diffusé à nouveau par le ciel vers le sol. Selon le raisonnement de Capderou, cette composante a la forme suivante [15]:

$$d_{rétrodifusé} = 0.9(\rho - 0.2) G_h \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L^* - T_0}}\right) \quad (41)$$

### II.2.2.3.2. Rayonnement globale

Le rayonnement global reçu sur un plan incliné est donné par :

$$G_i = I_i + D_i \quad (42)$$

## II.2.3. Modèle R. Sun

### II.2.3.1. Rayonnement global reçu sur un plan horizontal

#### II.2.3.1.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair est donné par [17,18]:

$$I_h = I_0 C_{ts} \exp[-0.8662 T_L^* m_a \delta_R(m_a)] \quad (43)$$

$m_A$  : masse d'air

$\delta_R$  : L'épaisseur optique de Rayleigh respectivement.

#### II.2.3.1.2. Rayonnement diffus

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

$$D_h = I_0 T_n(T_L^*) F_d(\varphi) \quad (44)$$

$\varphi$  : Latitude de soleil.

L'estimation du facteur de transmission  $T_n(T_L^*)$  permet d'obtenir une diffusion théoriquement claire sur une surface horizontale. L'expression suivante se présente sous la forme d'une fonction polynomiale du second ordre [19,20] :

$$T_n(T_L^*) = -0.051843 + 0.030543 T_L + 0.0003797 T_L^2 \quad (45)$$

$F_d$  : La fonction de l'altitude solaire, elle est donnée par l'expression:

$$F_d(h_0) = A_1 + A_2 \sin(h_0) + \sin^2(h_0) \quad (56)$$

$A_i$  : sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble  $T_L^*$  corrigé. Définis par les expressions suivantes [17,18]:

$$A'_1 = 0.26463 - 0.061581 T_L + 0.0031408 T_L^2 \quad (57)$$

$$A_1 = 0.0022 / T_n(T_L) \quad \text{Si } A'_1 T_n(T_L) > 0.0022 \quad (58)$$

$$A_1 = A'_1 \quad \text{si } A'_1 T_n(T_L) \geq 0.0022 \quad (59)$$

$$A_2 = 2.04020 + 0.018945 T_L - 0.011161 T_L^2 \quad (60)$$

$$A_3 = -1.3025 + 0.039231 T_L - 0.0085079 T_L^2 \quad (61)$$

#### II.2.3.1.3. Rayonnement global

Le rayonnement global sur un plan horizontal est calculé comme suit :

$$G_h = I_h + D_h \quad (62)$$

### II.2.3.2. Rayonnement global reçu sur un plan incliné

#### II.2.3.2.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct normal sur un plan incliné  $I$  est obtenu en utilisant la relation suivante:

$$I_i = \frac{I_h \sin(\delta_{exp})}{\sin(h)} \quad (63)$$

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

#### II.2.3.2.2. Rayonnement diffus

Le modèle d'estimation de l'éclairement diffus  $D_{ic}$  par ciel clair sur une surface inclinée est représenté par les équations suivantes [21]:

$$D_i = D_h F_B \quad (64)$$

$$F_B = R_i + \left( \sin(\beta) - \beta \cos(\beta) - \pi \sin^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right) N \quad (65)$$

$$R_i = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (66)$$

$$N = 0.00363 - 0.712 K_b - 0.6883 K_b^2 \quad (67)$$

Où

$$K_b = \frac{I_h}{G_{oh}} \quad (68)$$

$$G_{oh} = G_o \sin(h) \quad (69)$$

#### II.2.3.2.3 Rayonnement globale

Le rayonnement global sur un plan incliné est donné par la relation suivante :

$$G_i = I_i + D_i \quad (70)$$

### II.2.4. Modèle de Hay-Davies

Comme le modèle précédent, le modèle proposé par Davies et Hay [22] en 1976 permet la détermination des composantes du rayonnement solaire au sol en fonction des différents coefficients de transmission des éléments constituant l'atmosphère à un instant quelconque de la journée. Il nécessite les mêmes paramètres d'entrée utilisés dans le modèle de Bird & Hulstrom.

## II.2.4.1. Rayonnement global reçu sur un plan horizontal

### II.2.4.1.1. Rayonnement direct

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

$$I_h = I_0 [(1 - \alpha_0)\tau_r - \alpha_w]\tau_a \cos(\theta_z) \quad (71)$$

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

Où  $\alpha_0$  est le coefficient correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct la couche d'ozone, calculée par :

$$\alpha_0 = \frac{0.02118 U_0}{1+0.042 U_0+3.2310^{-4} U_0^2} + \frac{1.082 U_0}{(1+138.6 U_0)^{0.805}} + \frac{0.0658 U_0}{1+(103.6 U_0)^3} \quad (72)$$

$U_0$  : l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et définie par:

$$U_0 = 1 - m_r \quad (73)$$

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

$$m_r = [\cos(\theta_z) + 0.15(39.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (74)$$

Et, l représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone réduite (cm) NTP) [23, 24].

$\tau_r$ : le coefficient de transmission après diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh, représenté par Davies et al [22.25].

$$\tau_r = 0.972 - 0.08262 m_a + 0.00933 m_a^2 - 0.00095 m_a^3 + 0.000437 m_a^4 \quad (75)$$

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

$$m_a = \frac{P}{P_0} m_r = \frac{\exp(-0.0001184 \times Z)}{\cos(\theta_z) + 0.15(39.885 - \theta_z)^{-1.253}} \quad (76)$$

P : la pression atmosphérique (mbar).

$$P = P_0 \times \exp(-0.0001184 \times Z) \quad (75)$$

$P_0$  : la pression atmosphérique au niveau de la mer.

$\alpha_w$  : Le coefficient d'absorption du rayonnement direct de la vapeur d'eau, est donné par :

$$\alpha_w = \frac{2.9 X_w}{(1+141.5 X_w)^{0.635} + 5.925 X_w} \quad (76)$$



$X_w$  : L'épaisseur d'eau condensable corrigée par le trajet du faisceau de rayonnement à travers cette couche, par :

$$X_w = m_a U_w \quad (71)$$

$U_w$  : L'épaisseur (cm) de l'eau condensable perpendiculairement à celle-ci. Elle a été donnée par l'équation :

$$U_w = \frac{0.493}{T} HR \times \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (72)$$

HR : humidité relative.

$\tau_a$  : Le coefficient de transmission après diffusion par aérosol est donné par Mächler [26] selon l'équation :

$$\tau_a = (0.12445\alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.125\alpha) \exp[-\beta m_a(1.089\alpha + 0.5123)] \quad (73)$$

Tels que

$\alpha$  Et  $\beta$  sont les coefficients représentant la visibilité du ciel et Coefficient de brume en Angströms.

#### II.2.4.1.2. Rayonnement diffus

Sur un plan horizontal, le rayonnement diffus est la somme de trois composantes diffuses :  $D_r$ ,  $D_a$  et  $D_m$ .

$$D_h = D_r + D_a + D_m \quad (74)$$

$D_r$  Il représente le rayonnement diffus de Rayleigh.

$$D_r = I_0 \tau_0 \tau_a (1 - \tau_r) 0.5 \cos(\theta_z) \quad (75)$$

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

$$\tau_0 = 1 - a_0 \quad (77)$$

$D_a$  Est le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols [27].

$$D_a = I_0 (\tau_0 \tau_r - \alpha_w) [F_c w_0 (1 - \tau_a)] \cos(\theta_z) \quad (78)$$

$F_c$  : Le coefficient de dispersion directe dans l'atmosphère [28].

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

$$D_m = \frac{(1 + D_a + D_r) \rho \rho'_a}{(1 - \rho \rho'_a)} \quad (79)$$

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

$$\rho'_a = 0.0685 + 0.17 \omega_0 (1 - \tau'_a) \quad (80)$$

### II.2.4.1.3. Rayonnement global

Le rayonnement global sur un plan horizontal est calculé par:

$$G_h = I_h + D_h \quad (81)$$

## II.2.5 .Modèle de BIRD et HULSTROM

En 1981, Bird et Hulstrom [29] ont développé un modèle mathématique qui permet de calculer le rayonnement solaire incident sur le sol. Ce modèle tient compte des effets de diffusion et d'absorption que subit le rayonnement solaire lors de sa traversée de l'atmosphère. Il est basé sur la détermination des coefficients de transmission des différents constituants atmosphériques. Ces coefficients nécessitent la disponibilité des paramètres météorologiques courants (l'humidité relative, la température ambiante, la pression atmosphérique,...) et des paramètres géographiques (latitude, longitude et altitude).

### II.2.5.1. Rayonnement global reçu sur un plan horizontal

#### II.2.5.1.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct sur un plan horizontal est donné par la relation [30] :

$$I_h = 0.9751 I_c \tau_r \tau_g \tau_0 \tau_\omega \tau_a \cos(\theta_z) \quad (82)$$

Avec

$\tau_g$  Est le coefficient de transmission après absorption par les gaz permanents ( $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$ )

$$\tau_g = \exp(-0.0127 \times m_a^{0.26}) \quad (83)$$

$\tau_r$  Est le coefficient de transmission après diffusion moléculaire ou Rayleigh, peut aussi s'exprimer en fonction de la qualité de l'air ma par [22]:

$$\tau_r = \exp[-0.0903 \times m_a^{0.84} (1 + m_a + m_a^{1.01})] \quad (84)$$

Où, le coefficient d'absorption par la couche d'ozone  $\tau_0$  est donné par:

$$\tau_0 = 1 - 0.1611 U_0 (1 + 139.48 U_0)^{-0.3035} \quad (85)$$

$\tau_\omega$  : Le coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau est donné par :

$$\tau_\omega = 1 - 2.4959 U_\omega [(1 + 79.03 U_\omega)^{0.6828} + 6.385 U_\omega]^{-1} \quad (86)$$

$\tau_a$  : Le coefficient de transmission après diffusion des aérosols peut être calculé selon l'équation ci-dessous [24]:

$$\tau_a = \exp[-l_a^{0.873} \times m_a^{0.9108} \times (1 + k_a - k_a^{0.7088})] \quad (87)$$

Où,

$$k_a = 0.2758 \times k_{a1} + 0.25k_{a2} \quad (88)$$

### II .2 .5.1.2. Rayonnement diffus

Modèles Bird et Hulstrom en ajoutant les trois composantes diffuses sont dues à différents types de diffusion du rayonnement solaire par le film atmosphérique [29].

$$D_h = D_a + D_r + D_m \quad (89)$$

$D_r$  : Le rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh est donné par :

$$D_r = 0.79 I_0 \cos(\theta_z) \tau_0 \tau_g \tau_w \tau_{aa} 0.5 \frac{1-\tau_r}{1-m_a+m_a^{1.02}} \quad (90)$$

Où,  $\tau_{aa}$  est donnée par l'expression suivante :

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_0)(1 - m_a + m_a^{1.06})(1 - \tau_a) \quad (91)$$

$\omega_0$  est le coefficient de réflexion unidirectionnel lié à la diffusion des aérosols [25].

( $\omega_0=0,90$ ) est recommandé par Bird et Hulstrom

$D_a$  Est le rayonnement diffus après la diffusion de l'aérosol :

$$D_a = 0.79 I_0 \cos(\theta_z) \tau_0 \tau_g \tau_w \tau_{aa} F_c \frac{1-\tau_{as}}{1-m_a m_a^{1.02}} \quad (92)$$

Où  $F_c$  est le coefficient de dispersion atmosphérique, ( $F_c = 0,84$ ) est la valeur recommandée par le modèle,  $\tau_{as}$  est donné par la relation suivante :

$$\tau_{as} = \frac{\tau_a}{\tau_{as}} \quad (93)$$

Le diffus dû au phénomène de multi réflexion terre atmosphère est donné par :

$$D_m = \frac{(I+D_a+D_r)\rho\rho'_a}{1-\rho_g\rho'_a} \quad (94)$$

$\rho$  Est l'albédo terrestre, et  $\rho'_a$  est l'albédo du ciel clair donné par :

$$\rho'_a = 0.0685 + (1 - F_c)(1 - \tau_{as}) \quad (95)$$

### II.2.5.1.3. Rayonnement global

La somme des deux composantes solaire directe et diffuse constitue le rayonnement global sur un plan horizontal, qui est :

$$G_h = I_h + D_h \quad (96)$$

## II.2.6. Modèle DE LIU & JORDAN

En 1960, Liu et Jordan [3] ont proposé un modèle empirique simple qui permet d'estimer les composantes du rayonnement solaire sur un plan incliné ne nécessitant que quelques paramètres géo astronomiques tels que le numéro de jour de l'année, la hauteur du soleil et la latitude du lieu.

### II.2.6.1. Rayonnement reçu sur un plan horizontal

#### II.2.6.1.1. Rayonnement direct

La relation du rayonnement direct sur une surface horizontale [31,32] :

$$I_h = A \sin(h) \cdot \exp\left(\frac{-1}{C \cdot \sin(h+2)}\right) \quad (98)$$

Avec :

$$\sin(h) = [ \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) ] + [ \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) ] \quad (99)$$

h : La hauteur du soleil

#### II.2.6.1.2. Rayonnement diffus

La relation du rayonnement diffus sur une surface horizontale :

$$D_h = B \cdot (\sin h)^{0.4} \quad (100)$$

Où A, B et C sont des constantes qui tiennent compte de la nature du ciel, sont données d'après le tableau suivant :

**Tableau (II.1) :** Valeurs des coefficients A, B et C [31,32].

Nature du ciel	A	B	C
Ciel très clair	1300	87	6
Ciel moyen	1230	125	4
Ciel pollué	1200	187	5

### II.2.6.1.3. Rayonnement global

Le rayonnement global reçue sur un plan horizontal est donnée par :

$$G_h = I_h + D_h \quad (101)$$

### II.2.6.2. Rayonnement global reçu sur un plan incliné

La relation de Liu & Jordan généralisée est donnée sous la forme suivante [33] :

$$G_i = I_h R_b + D_h \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \rho (I_h + D_h) \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (102)$$

#### II.2.6.2.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct sur un plan incliné est exprimé par la relation suivante:

$$I_i = I_h R_b \quad (103)$$

Où, le facteur d'inclinaison  $R_b$  du rayonnement direct est donné par l'expression [31, 32] :

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta)} \quad (104)$$

Avec

$\delta$  : La déclinaison du soleil

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (105)$$

$\varphi$  : Latitude.

$\beta$ : Inclinaison du plan.

$\omega$  : L'angle horaire.

$$\omega = (T_{SV} - 12) 15^\circ \quad (106)$$

#### II.2.6.2.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus sur un plan incline est :

$$D_i = D_h \cdot \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (107)$$

#### II.2.6.2.3. Rayonnement réfléchi

D'autre part, l'irradiation réfléchi sur un plan incliné est estimée par l'expression:

$$D_{re} = \rho \cdot (I_h + D_h) \cdot \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (108)$$

$\rho$  : Albédo du sol.

**Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] M.R. Yaïche et S.M.A. Bekkouche, « Conception et Validation d'un Programme Sous Excel pour l'Estimation du Rayonnement Solaire Direct en Algérie », Cas d'un Ciel Clair', Revue Internationale d'Héliotechnique, N°39, pp. 50 – 55, (2009).
- [2] J. V. Dave, « Extensive Datasets of the Diffuse Radiation in Realistic Atmospheric Models with Aerosols and Common Absorbing Gases», Solar Energy. Vol. 21: 'PP• 361-369; (1978).
- [3] B. Liu, RC. Jordan, « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation », Sol Energy, vol. 4, pp. 1–19, (1960).
- [4] M. Capderou, « Atlas Solaire de l'Algérie », Tome1, vol1 et 2 : Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, (1987).
- [5] C. Perrin de Brichambaut et C. Vauge, « Le Gisement Solaire – Evaluation de la Ressource Energétique », Edition Lavoisier, Tec & Doc, Paris, (1982).
- [6] A.SFEIR, G.GUARRACINO, « ingénieur des systèmes solaires, application à l'habitat, techniques et documentation », Edition Paris, (1981).
- [7] D. Saheb-Koussa, M. Koussa et M. Belhamel, « Reconstitution du Rayonnement Solaire par Ciel Clair », Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°2 pp 91 – 97, (2006).
- [8] F. Linke, « Transmissions,Koeffizient and Trübungsfaktor, Beiträge Zur Physik Der Atmosphäre», Vol. 10, pp. 91 - 103, (1922).
- [9] R. Dogniaux, « L'influence de L'estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur L'évaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair, Application aux Données Radiométriques de l'IRM à Uccle », Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N°20, (1984).
- [10] J. Remund, L.Wald, M.Lefevre, T. Ranchin et J. Page, in press, « Worldwide Linke Turbidity Information,Proceedings of The ISES Solar World Congress 2003», Goeteborg, Swed en, 16-19 June (2003).
- [11] A. Louche, G. Peri et M. Iqbal, «An analysis of Linke Turbidity Factor », Solar Energy, Vol, 37, N°6, p, 393 - 396, (1986).

- [12] L. Diabaté, J. Remund, L. Wald, « Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa», *Solar Energy*, 75, 2003, 111-119.
- [13] F. Yettou , A. Malek , M. Haddadi, et A. Gama, «Etude Comparative De Deux Modèles De Calcul du Rayonnement Solaire Par Ciel Clair en Algérie », *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°2 (2009) 331 - 346.
- [14] S. Benkaciali, K. Gairaa, «Techniques de modélisations de l'irradiation solaire sur un plan incliné», *International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET)*, Vol.3-pp.102-108, (2015).
- [15] S.M.A. Bekkouche , « Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires», Thèse de Doctorat en Physique Electronique, Université de Tlemcen, (2009).
- [16] Y. El Mghouchi, « New model to estimate and evaluate the solar radiation», *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol N°3, 2014, pp.225–234.
- [17] E .R. Bird, R.L.Hulstrom, « A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insulation on Horizontal Surfaces», *Seri Tr -642-761* February (1981).
- [18] J .Hofierka, M .Suri, «The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications», *Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference (2002) - Trento, Italy, 11-13 September (2002)*.
- [19] A. Ricaud, «Gisement Solaire», *Cythelia Sarl*, Septembre (2009).
- [20] E .Torlaschi, « Phénomènes Radiatifs dans L'atmosphère Terrestre», *cours de Physique de L'atmosphère*, (2003).
- [21] A. Bensaha, F. Benkouider, S.M.A. Bekkouche, « Estimation du rayonnement solaire en ciel clair par des modèles empiriques: Application au site de Ghardaïa (Algérie) », *1st International Seminar On The Apport Of The Simulation In Technological Innovation, Ghardaïa (Algeria), Nov., 29-30,( 2016)*.
- [22] 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)*.
- [23] M. Koussa, A. Malek et M. Haddadi, «Validation de Quelques Modèles de Reconstitution des Eclaircissements dus au Rayonnement Solaire Direct, Diffus et Global par Ciel Clair», *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 9 N°4 pp. 307 – 332 (2006).



- [24] T.K. Van Heuklon, «Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models», Solar Energy, Vol. 22, N°1, pp. 63 – 68, (1979).
- [25] D. Saheb-Koussa, M. Koussa et M. Belhamel, «Reconstitution du Rayonnement Solaire par Ciel Clair», Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°2 pp 91 – 97,(2006).
- [26] M. Mächler, «Parameterization of Solar Irradiation under Clear Skies», M.A.Sc Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, (1983).
- [27] M. Iqbal, « An Introduction to Solar Radiation», Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Canada, (1983).
- [28] 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).
- [29] R.E. Bird and R.L Hulstrom, «A Simplified Clear Sky Model for a Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surface», Golden Colorado, (1981).
- [30] M. Mesri, I. Rougab, A. Cheknane et N.I. Bachari, « Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques », Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 451 – 463.
- [31] W. Saadaoui, «Modèle dynamique de prédiction des paramètres climatiques», Faculté des sciences de Sfax, (2006).
- [32] N.Moummi, A.Moummi, S.Benlahmidi, «Contribution à la réalisation d'un logiciel de simulation des performances des systèmes», Université de Biskra, ICRE (2007).
- [33] M.R. Yaiache et S.M.A. Bekkouche, « Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire incident en Algérie. Cas d'un ciel totalement clair », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°3 (2008) 423 – 436.

**Chapitre III :  
Modélisation de rayonnement  
solaire par le modèle de Liu Jordan**

## **Chapitre III : Modélisation de rayonnement solaire par le modèle de Liu Jordan**

### **III.1. Introduction**

En Algérie, le rayonnement solaire n'est pas mesuré par toutes les stations hydrométéorologiques alors que d'autres paramètres météorologiques (comme la durée d'ensoleillement, la température, l'humidité et les précipitations) sont enregistrés de manière plus complète et détaillée. Cela rend plus difficile un logiciel de simulation de rayonnement solaire fiable; La recherche sur le rayonnement solaire est devenue plus importante ces dernières années. Ainsi, plusieurs modèles ont été proposés dans des travaux antérieurs [1-2]. Ces modèles varient de simples relations empiriques à des codes informatiques plus complexes et sophistiqués. L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'irradiation solaire globale avec le modèle de Lui Gordan, qui traite de certains paramètres radiatifs et d'autres coordonnées géographiques telles que la latitude, la longitude et l'altitude pour le site à l'étude, pour estimer l'irradiation solaire globale quotidienne sur une surface inclinée.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats et graphes comparatifs comme le rayonnement global avec les données expérimentales de différents mois mesurées par la station de mesure du rayonnement dans l'unité de recherche des énergies renouvelables en milieu saharien d'Adrar (URER\_SM). Dans notre étude, on utilise le modèle de Liu-Jordan pour estimer le rayonnement solaire.

### III.2. Organigramme de l'estimation du rayonnement solaire

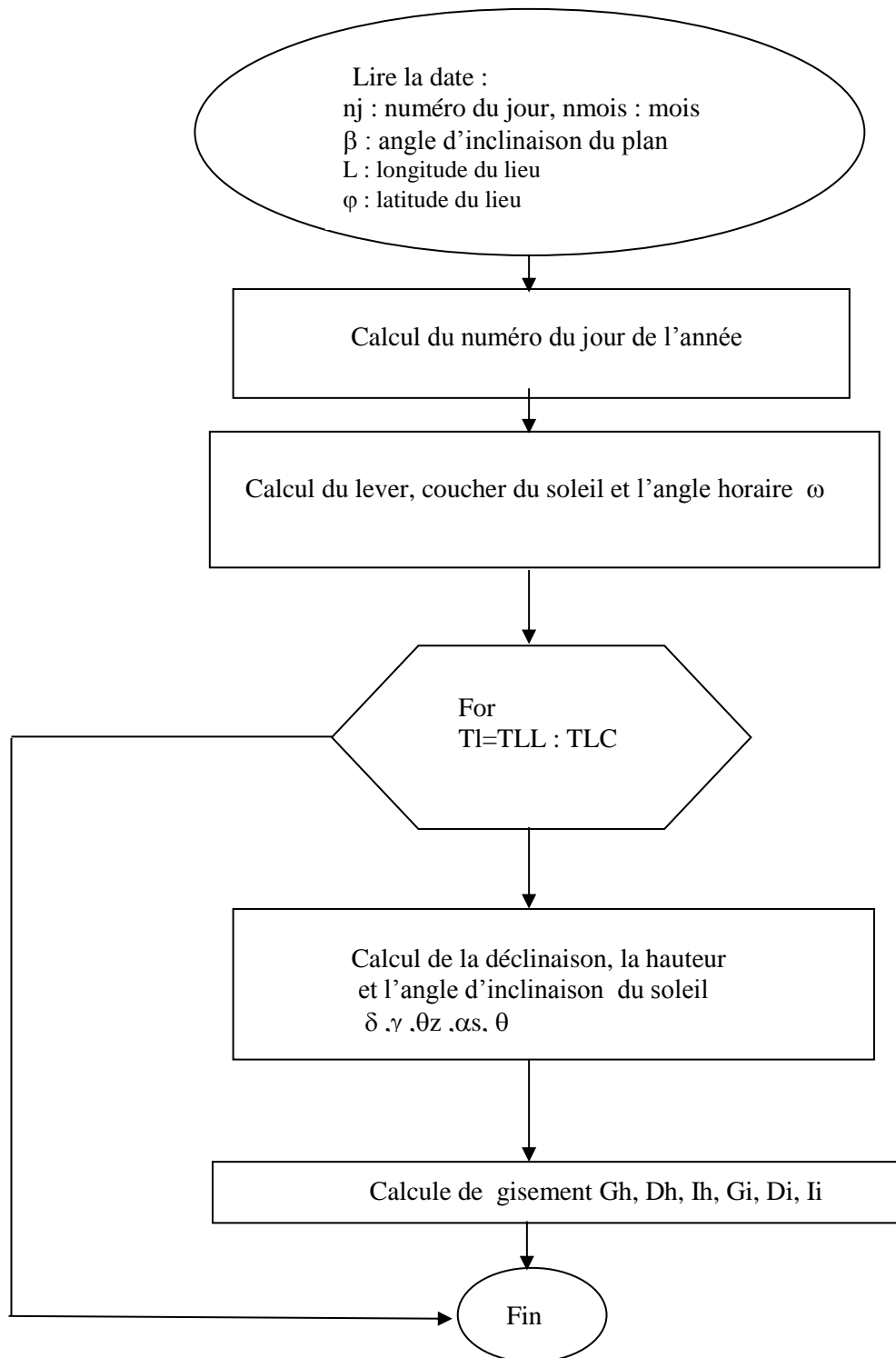


Figure III.1 : Organigramme calculant le rayonnement solaire

### III.3. Résultats et interprétation

#### III.3.1. validation de modèle

Pour obtenir une validation du rayonnement solaire global incident sur une surface horizontale et sur une surface inclinée ( $\beta = 27^\circ$ ), nous allons confronter des valeurs du rayonnement global calculées par simulation à partir de modèle semi empirique de Liu-Jordan avec celles mesurées par la station météorologique d'URER-MS dans le site d'Adrar (Latitude =  $27^\circ 88'$ , Longitude =  $-0,28^\circ$ ).

L'évolution temporelle du rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale et sur un plan incliné de  $27^\circ$  pour les journées types choisies au cours d'une année, est illustrée par les figures (III 2, 3, 4, 5, 6,7). Nous avons remarqué que l'allure des courbes en forme de cloche, avec des valeurs maximales enregistrées dans le tableau (III.1), et ce pour les journées choisies.

**Tableau III.1** : La valeur maximal du rayonnement global pour différents journées choisi

Ray maximal	13 Janvier	10 Février	31 Mars	30 Avril	21 Juin	21 Octobre
Plan horizontal	737	840	1061	1137	1164	888
Plan incliné	1016	1089	1181	1165	1117	1119

L'analyse des courbes de ces figures permet de noter les observations suivantes :

- Dans la période hivernale et printanière (Janvier, Février, Mars et Avril), les valeurs du rayonnement global calculées est en bon accord avec les valeurs mesurées du lever au coucher du soleil. Ceci confirme la validité de nos résultats numériques. En plus nous avons remarqué, dans la journée d'Avril. La présence des perturbations dans les courbes du rayonnement solaire mesuré est due probablement au changement d'état du ciel (passage des nuages).
- Dans la période estivale et d'automne, nous avons remarqué un écart entre les résultats expérimentaux et théoriques d'environ  $175 \text{ w/m}^2$ , pendant le lever du soleil jusqu'au midi.

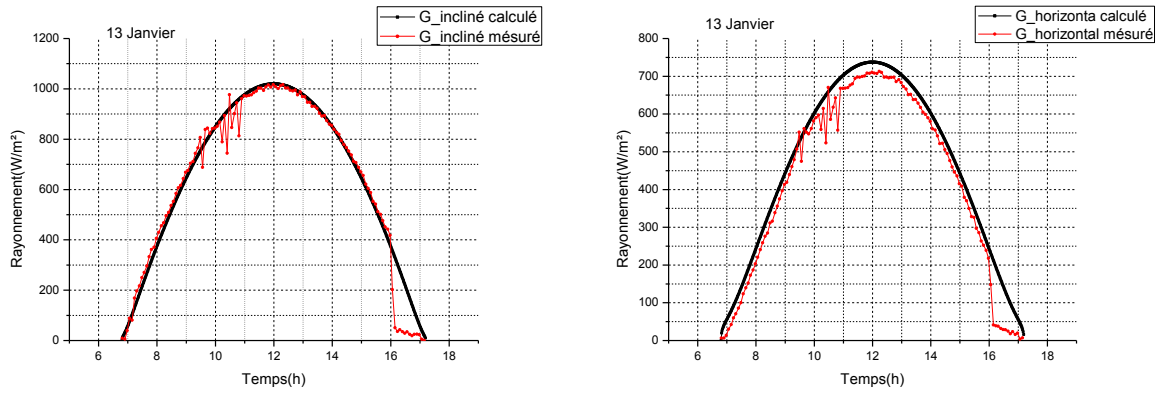


Figure III.2 : Rayonnement solaire reçu global pour le 13 Janvier.

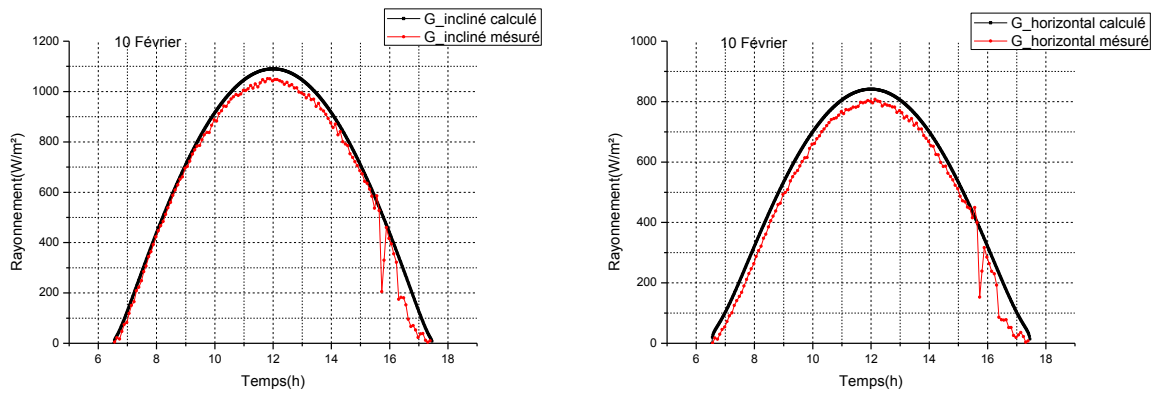


Figure III.3 : Rayonnement global pour le 10 Février.

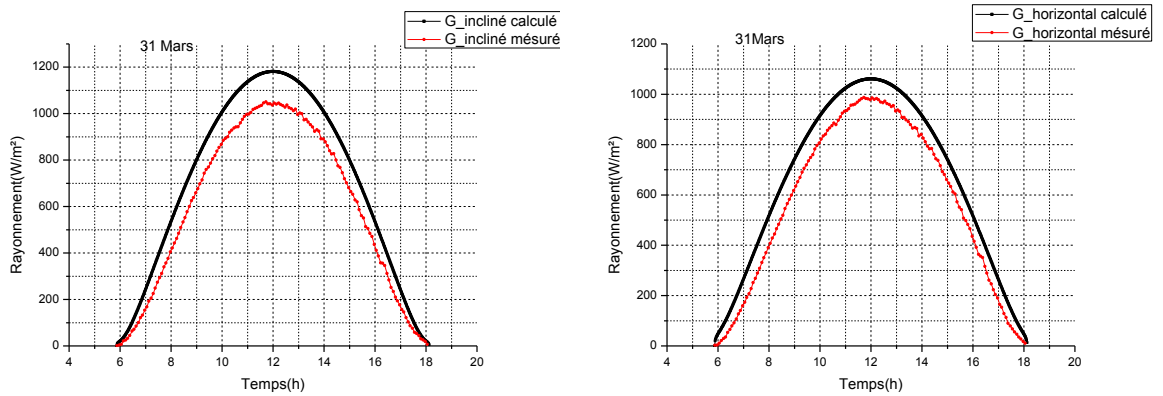


Figure III.4 : Rayonnement global pour le 31 Mars.

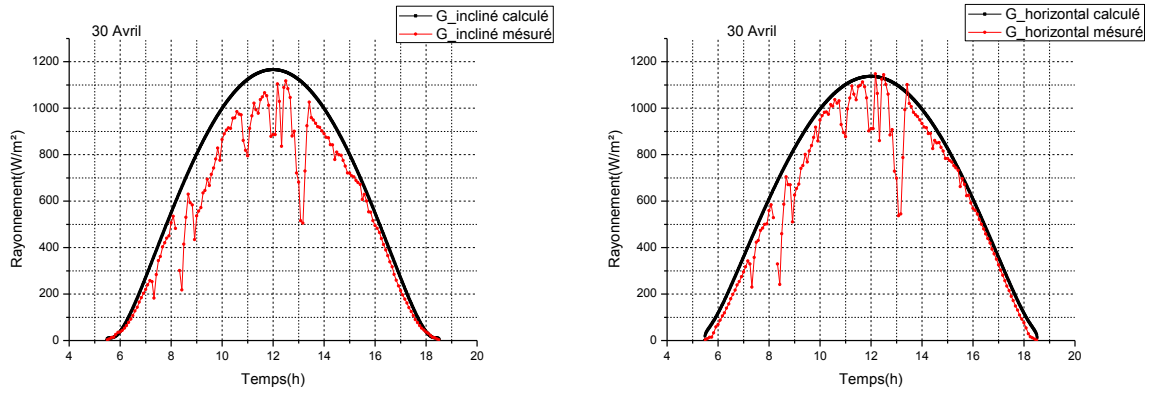


Figure III.5 : Rayonnement global pour le 30 Avril.

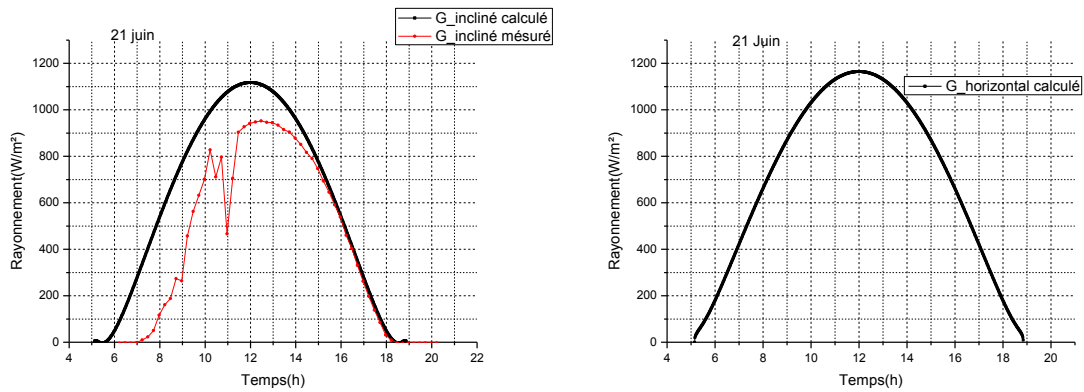


Figure III.6 : Rayonnement global pour le 21 Juin.

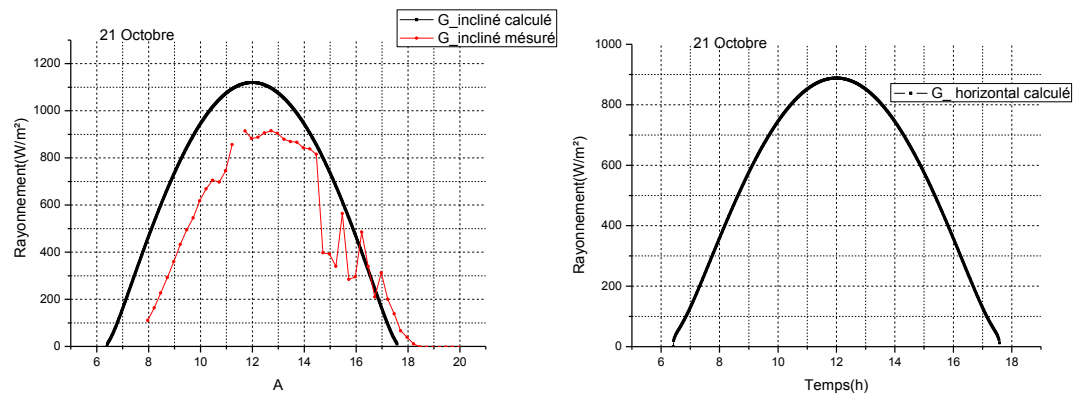


Figure III.7 : Rayonnement global pour le 21 Octobre.

### III.3.2. Le Rayonnement solaire au cours d'une année

La figure (III.8 : a, b) représente l'évolution temporelle des différents composants du rayonnement solaire incidents sur un plan incliné ( $\beta=27^\circ$ ) pour les deux journées types, le 21 Décembre (solstice d'hiver) et le 21 Juin (solstice d'été)

A partir de ces courbes tracées, nous constatons en premier lieu que les différents composants du rayonnement solaire varient au cours de la journée. Il est faible au voisinage du lever et du coucher du soleil et il atteint le maximum au milieu de la journée.

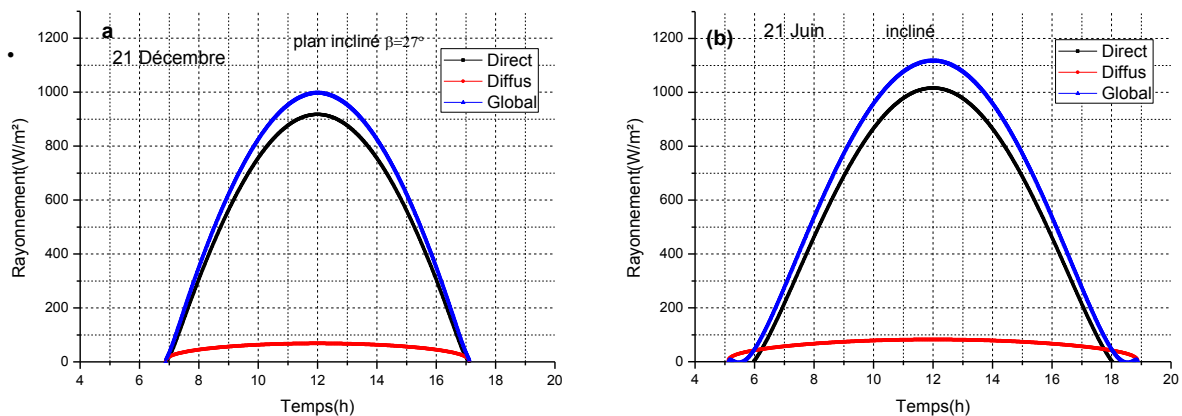
Les valeurs maximales des différents composants du rayonnement solaire sont enregistrées sur le tableau (III.2).

Il est évident que, pour le ciel clair, le composant du rayonnement direct est le plus intense que le composant diffus et alors, c'est le plus dominant dans la structure du rayonnement global.

En plus, Nous avons remarqué que l'éclairement solaire et la durée d'ensollement sont les plus importants dans la période estivale que dans la période hivernale.

**Tableau III.2 :** La valeur maximal des différents composants du rayonnement solaire pour le 21 Décembre et le 21 Juin

Ray max ( $W/m^2$ )	Le 21 Décembre	Le 21 Juin
Diffus	67	82
Direct	916	1015
global	996	1117



**Figure III.8 :** Evolution temporelle des composants du rayonnement solaire reçu sur un plan incliné ( $\beta=27^\circ$ ) pour des journées types (21 Décembre et 21 Juin).



### III.3.3. L'influence de la variation de l'angle d'inclinaison

L'effet de l'angle d'inclinaison du plan récepteur est mis en évidence par les courbes de la figure (III.9 : a, b, c, d). Nous allons se limiter uniquement à quatre plans différents à savoir le plan horizontal, le plan vertical, le plan incliné à latitude du lieu, et un plan incliné quelconque.

Il est évident d'après ces figures qu'en hiver, en printemps et en automne, le plan incliné est en général beaucoup mieux que le plan horizontal. En effet, le rayonnement solaire sur un plan horizontal est le plus faible, tandis que, il est plus intense sur un plan incliné.

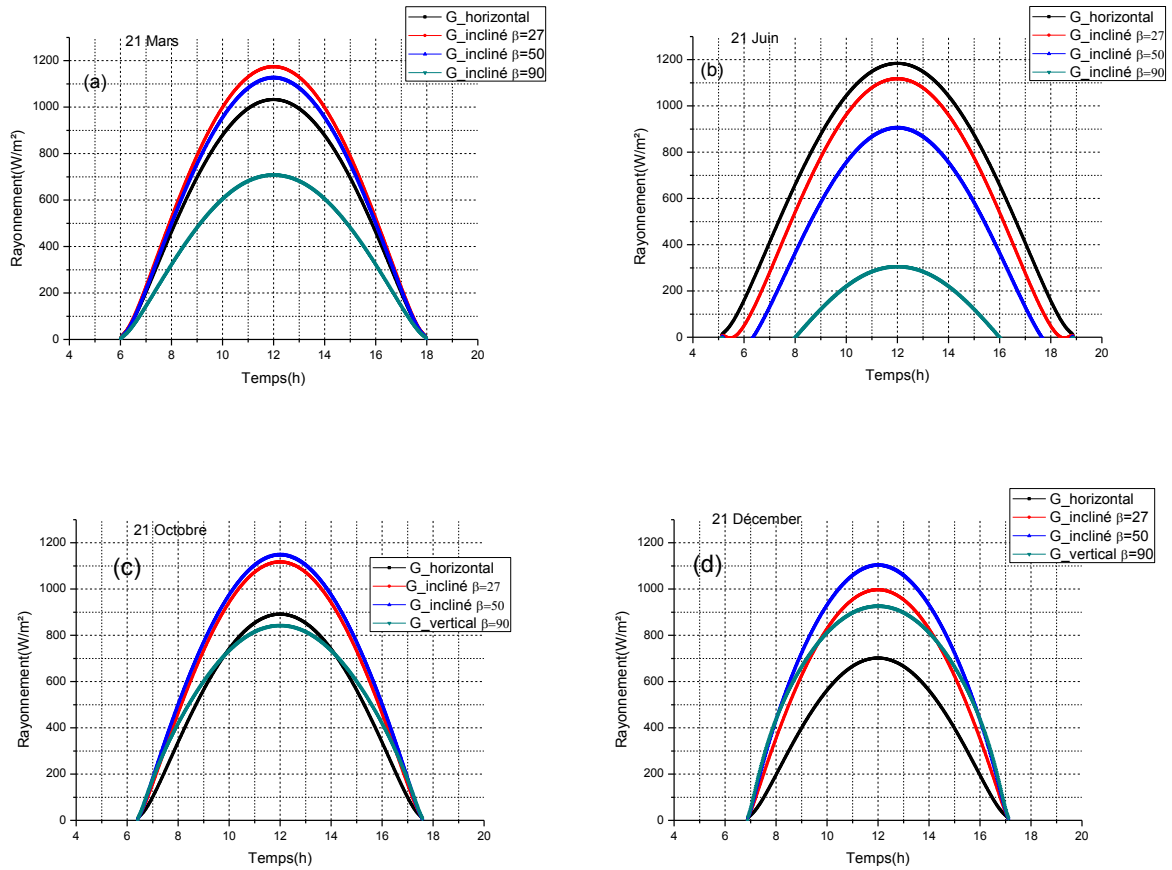
En revanche, en été, le rayonnement solaire est plus important sur un plan horizontal que sur un plan incliné et il se fait plus faible en valeur et en durée à la fois sur le plan vertical. Cela s'interprète par le fait que la déclinaison du soleil est positive en été et négative en hiver, ce qui fait que, les rayons solaires sont, en hiver, à peine perpendiculaires sur un plan incliné alors que ce n'est pas le cas pour le plan horizontal sur lequel les rayons sont presque rasants. Autrement qu'en hiver, les rayons solaires ont tendance, en été, à être quasi perpendiculaires sur un plan horizontal par suite de la déclinaison du soleil.

Toutefois, un plan incliné à la latitude de lieu est plus avantageux dans la mesure où ce plan permet d'avoir la possibilité de recevoir le maximum du rayonnement solaire durant toute l'année.

Enfin, il est bien entendu que pour qu'un plan reçoive le maximum du rayonnement solaire, il faut qu'il change d'inclinaison selon la saison. D'autre part, le recours à un système de poursuite solaire, ce n'est pas à écarter et serait la meilleure solution s'il le faut. Quoi qu'il en soit, c'est le coût qui en décide.

**Tableau III.3** : La valeur maximal du rayonnement global pour différents inclinaisons

Mois	Mars	Juin	Octobre	Décembre
Inclinaison $\beta$ (°)	27	0	27-50	50
Ray-max (W/m <sup>2</sup> )	1174	1183	1148	1103



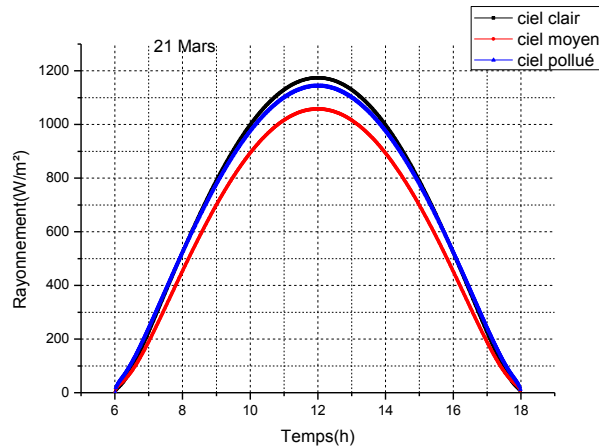
**Figure III.9 :** Variation de rayonnement global en fonction du temps et d'inclinaison du plan récepteur pour les journées types.

### III.3.4. Effet de la nature du ciel

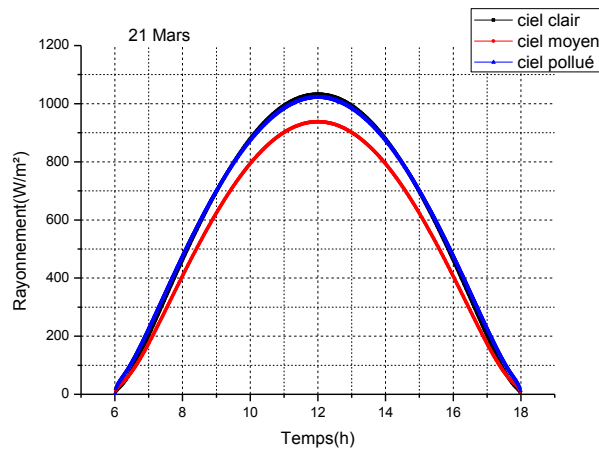
Les figures suivantes représentent la variation des rayonnements globaux sur un plan horizontal et incliné, à l'équinoxe de printemps (21 Mars).

Nous remarquons, dans les trois cas, que les rayonnements atteignent leurs maximums à midi solaire, le flux global est plus important sur une surface inclinée que sur un plan horizontal.

On remarque que le rayonnement global à l'état du ciel clair est plus proche de l'état du ciel pollué pour le plan incliné, par contre sur le plan horizontal est identique.



**Figure III.10:** Evaluation de l'intensité du rayonnement global à différents ciels pour une surface inclinée.



**Figure III.11:** Evaluation de l'intensité du rayonnement global à différents ciels pour une surface horizontale.

### III.4. conclusion

Le modèle numérique de Liu & Jordan a été choisi pour la détermination des irradiances solaires reçu sur un plan incliné et un plan horizontal. Nous procéderons à ce choix, parce que ce modèle est évalué le rayonnement solaire pour un ciel clair. Aussi des nombreuses études menées par de nombreux chercheurs soulignent et attestent que ce modèle donne généralement de bons résultats.

Le présent travail nous a permis de confronter des valeurs mesurées et celles estimées par le modèle choisi.

**Références bibliographiques**

## Reference bibliographies

- [1] R.K. Swartman, O. Ogunlade, « Solar radiation estimates from common parameters Array », *Solar Energy*, December 11-3 1967, pp.170–172.
- [6] K.K. Gopinathau, « Solar sky radiation estimation techniques », *Solar Energy*, July 49-1, 1992, pp. 9-11.
- [7] A. Angstrom, « Solar and terrestrial radiation », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, April 50-210, 1924, pp. 121-125.
- [8] A.A. Trabea, M.A MosalamShaltout, « Correlation of global solar radiation with meteorological parameters over Egypt », *Renewable Energy* October, 21-2, 2000, pp. 297-308.
- [16] C. Stanciu, D. Stanciu, « Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World-A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models », *Energy Convers Manage*, May 81, 2014, pp. 133-143.

**Conclusion générale**

---

---

## Conclusion générale

L'utilisation de l'énergie solaire est actuellement une réalité partout dans le monde, pour cela de nombreux travaux de recherche ont été développés sur l'estimation du rayonnement solaire sur Terre pour faire les dimensions de l'installation solaire et la prédiction du rayonnement solaire, et cela nécessite la connaissance du potentiel de l'énergie solaire pour créer des installations solaires ou pour produire de l'électricité à la meilleure échelle pour différents paramètres de rayonnement.

L'Algérie est parmi les pays qui ont un grand nombre d'heure d'insolation. C'est un pays de soleil par excellence. Le nombre des heures d'insolation s'élève à presque 3300h/an. Le climat est très favorable pour l'exploitation de l'énergie solaire dans différents domaines, mais la distribution de l'irradiation solaire n'est pas bien connue et les stations de mesure sont rares et se trouvent uniquement à quelque région.

L'étude que nous avons présentée nous permet d'apprendre des notions importantes sur l'astronomie du soleil, les coordonnées célestes et les différents composants du rayonnement solaire incident sur le sol.

Nous avons choisi un modèle mathématique (le modèle de Liu-Jordan) pour estimer le rayonnement solaire à partir de données astronomiques et météorologiques. Nous avons fait une étude comparative entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées au cours d'une année sur le site d'Adrar.

A partir des résultats obtenus, nous constatons que pour le site d'Adrar, le modèle d'estimation de Liu-Jordan donne une bonne concordance avec les valeurs mesurées pour les journées d'hiver et de printemps. Par contre, pour les journées d'été et d'automne la plupart des valeurs calculées à midi par ce modèle sont supérieures aux valeurs mesurées sur ce site. Par conséquent, le modèle proposé est recommandé pour l'évaluation du rayonnement solaire dans un milieu saharien, notamment dans la période d'hiver et de printemps.

D'autre part, nous avons étudié, pour chaque saison, l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale du plan récepteur et de déterminer par conséquent l'angle optimal pour avoir un rayonnement maximal.

Le plan incliné à la latitude de lieu est plus avantageux dans la mesure où ce plan permet d'avoir la possibilité de recevoir le maximum du rayonnement solaire durant toute l'année et même quand celui-ci se ferait plus faible tel qu'en hiver.

La région d'Adrar a un climat désertique chaud, sec et ensoleillé presque toute l'année. Cet aspect favorise fortement les applications solaires thermiques.