

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'automatique et d'électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologie*

**Filière :** Energies Renouvelables

**Spécialité :** Energies Renouvelables en électrotechnique

N°d'ordre :

N°de série :

**Par :** LAOUAR Mounira & BECHENE Imane

**Thème**

**Estimation du Rayonnement Solaire par Deux Modèles Semi-Empiriques  
(LACIS & HANSEN, DAVIES & HAY) dans le site de Ghardaïa**

**Soutenu publiquement le : 23/06/2019**

**Devant le jury :**

<b>Khelifa Abdelkrim</b>	MRA	URAER. Ghardaia	<b>Président</b>
<b>ZITANI Ibrahim</b>	MAB	UNIV. Ghardaia	<b>Examineur</b>
<b>AISSAOUI Faris</b>	MAB	Univ. Ghardaia	<b>Examineur</b>
<b>FERKOUS Khaled</b>	MAA	Univ. Ghardaia	<b>Encadreur</b>
<b>BOUARAOUR Kamel</b>	MCA	Univ. Ghardaia	<b>CO-Encadreur</b>

**Année universitaire : 2018/2019**

## *Remerciements*

*Tout d'abord nous tenons à remercier Dieu tout puissant, qui nous a donné la force d'accomplir ce Modeste Travail.*

*En suite nous remercions tiens du fond du coeur mon encadreur Mr. Ferqus Khaled qui m'a apporté son aide et ses valeureux conseils pour ses conseils et son aide durant toute la période du travail.*

*Nous remercierons Dr BOUARAOUR Kamel, Maître de Conférences A à l'Université de Ghardaïa. En tant que co-encadreur de notre mémoire, il nous a guidé dans notre travail et nous a aidé à trouver des solutions pour avancer”*

*Nous remercions également les Membres de jury pour avoir examiner ce travail Et nous présentons nos sincères remerciements à tout le personnel de près ou de loin qui ont participé à la réalisation de ce travail.*

*Nous voudrions exprimer nos reconnaissance envers nos amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de nos démarche.*

*Un grand merci à tous*

**Dédicace :**

**Je dédie ce modeste travail à :**

*Tout d'abord je remercie Dieu de m'avoir aidé jusqu'à cette heure pour écrire ces mots* Mes parent

*Ma mère Aicha, qui a oeuvre pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude*

*Mon père Brahim, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi*

*A ma grande mère et A l'esprit de mon grand père*

*Mes sœurs : Nabila ; Nesrine; Fatima;*

*Mes frère : Radwan; Ilyes; Abdelhakime*

*A mon fiancé: Amar*

*A toute ma famille: Laouar*

*A ma proche amie : Sara*

*A mon binôme Imene et toute la famille Becheneb*

*Tous mes amis surtout: Hiba. Fariha, Ahmed, Sahli. ....*

*tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même qu'il soit un mot d'encouragement et de gentillesse.*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*A tous les enseignants de energie Renouvelable*

*Tous mes collègues étudiants de la promotion 2018/2019*

**Mounira.**

**Dédicace :**

**Je dédie ce modeste travail à :**

*Tout d'abord je remercie Dieu de m'avoir aidé jusqu'à cette heure pour écrire ces mots*

*Mes parents :*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit;*

*Mercipour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi*

*Ma mère, qui a oeuvre pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude*

*À mes chers et regrettés grands-parents maternels, grand- À mon mère paternel*

*Mes soeurs: Chima, Djemaa;*

*Mon frère: Mehamed, khaled; zino, Anes*

*A mes tante : samra, rebha, zohra, fatiha...*

*A toute ma famille: Becheneb*

*A ma proche amie : Rjma*

*Tous mes amis surtout: fatima zahra, marwa.....*

*tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même qu'il soit un mot d'encouragement et de gentillesse.*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*A tous les enseignants de énergie Renouvelable*

*Tous mes collègues étudiants de la promotion 2018/2019*

**Imane.**

## ملخص:

في هذه المذكرة , تمت كتابة برنامج باستعمال الماتلاب لمحاكاة النموذجين المقترحين من طرف كل من Davies & Hay و Lacis & Hansen لاجل سماء صافية كلياً. النموذجين يعتمدان على تعيين معاملات الاختراق لمختلف مكونات الغلاف الجوي. حساب هذه المعاملات يتطلب توفر متغيرات مناخية آنية ( درجة حرارة الهواء، نسبة الرطوبة، الضغط الجوي...) و متغيرات جغرافية (خط الطول، دائرة العرض،...). المحاكات تمكننا من تقدير الاشعاع الشمسي الكلي بمختلف زوايا الميل و الاتجاهات في منطقة غرداية. عند مقارنة نتائج النموذجين بالنتائج التجريبية لوحظ توافق ممتاز

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية, تقدير الاشعاع الشمسي، نموذج Lacis & Hansen، نموذج Davies & Hay، الدراسة الاحصائية.

## **Résumé**

Dans ce mémoire, consiste à la simulation numérique en utilisant l'environnement MATLAB deux modèles de rayonnement solaire proposé par "Lacis & Hansen" et "Davies & Hay" pour un ciel totalement clair. Ils sont basés sur la détermination des coefficients de transmission de différents constituants atmosphériques. Ces coefficients nécessitent la disponibilité des paramètres météorologiques actuels tels que (humidité relative, température de l'air et la pression atmosphérique.etc.) et des paramètres géographiques du site considéré (latitude, longitude et l'altitude). La simulation permet d'estimer le rayonnement solaire global incident pour différentes inclinaisons et orientations dans la région de Ghardaia. Des excellents accords ont été observés quand les deux modèles sont validés par les données expérimentales.

**Mots clés** : Energie Solaire ; Estimation du Rayonnement Solaire ; Modèle " Lacis & Hansen" ; Modèle "Davies & Hay" ; Etude Statistique.

## **Abstract**

In this thesis, consists of numerical simulation using the MATLAB environment by "Lacis & Hansen" and "Davies & Hay" for a totally clear sky. They are based on the determination of the transmission coefficients of different atmospheric constituents. These coefficients require the availability of current meteorological parameters such as (relative humidity, air temperature and atmospheric pressure, etc.) and the geographical parameters of the site in question (latitude, longitude and altitude). Global solar radiation incident for different inclinations and orientations in the Ghardaia region excellent agreements were observed when both models were validated by experimental data.

**Keywords:** Solar Energy; Estimate of Solar Radiation; Model "Lacis & Hansen"; Model "Davies & Hay"; Statistic study.

**Table des Matières :**

Remerciements	
Dédicace	
Résumé.....	<b>i</b>
Liste des figures .....	<b>x</b>
Liste des tableaux .....	<b>xiii</b>
Liste des abréviations .....	<b>xi</b>
Introduction générale .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Generalites sur les Energies Renouvelables</b>	
1.1 Introduction .....	<b>3</b>
1.2 Energie et ces utilisations .....	<b>4</b>
1.2.1 Définition de l'énergie .....	<b>4</b>
1.2.1.1 Problèmes concernant L'énergie .....	<b>4</b>
1.2.2 Utilisations de l' énergie .....	<b>4</b>
1.3 Source de énergie non renouvelables .....	<b>4</b>
1.3.1 Energie Fossile .....	<b>4</b>
1.3.1.1 Pétrolier .....	<b>5</b>
1.3.1.2 Charbon .....	<b>5</b>
1.3.1.3 Gaz naturel .....	<b>5</b>
1.3.1.4 Energie nucléaire .....	<b>5</b>
1.4 Energie Renouvelable .....	<b>6</b>
1.4.1 Eoliennes .....	<b>7</b>
1.4.1.1 Eolienne à axe vertical .....	<b>7</b>
1.4.1.2 Eolienne à axe horizontal .....	<b>7</b>
1.4.2 Energie hydraulique .....	<b>8</b>
1.4.3 Biomase .....	<b>8</b>
1.4.4 Géothermie .....	<b>8</b>
1.4.5 Energie solaire .....	<b>9</b>
1.4.5.1 solaire thermique .....	<b>9</b>
1.4.5.2 solaire thermodynamique .....	<b>10</b>
1.4.5.3 solaire Photovoltaïque .....	<b>10</b>
a) modules solaires monocristallins .....	<b>10</b>
b) modules poly-cristallins .....	<b>10</b>



c) modules solaires amorphes .....	10
d) modules couche mince .....	10
<b>Chapitre 2: Notions D'astronomie</b>	
2.1 Introduction .....	13
2.2 soleil .....	13
2.2.1. Description du soleil .....	14
2.2.2. Structure du soleil .....	14
a) Photosphère .....	14
b) Chromosphère .....	14
c) Couronne .....	14
2.3 Mouvement de la terre Autour Du Soleil .....	15
2.4 Paramètres Géographique .....	16
2.4.1 Latitude .....	16
2.4.2 Longitude .....	16
2.4.3 L'altitude .....	16
2.5 Temps solaire .....	17
2.5.1 Temps universel .....	17
2.5.2 Temps solaire moyen .....	17
2.5.3 Temps local (TL) .....	18
2.5.4 Temps solaire vrai (TSV) .....	18
2.5.5 Equation du temps .....	18
2.5.6 Durée astronomique du jour .....	18
2.6 Position Géométrique du Soleil .....	19
2.6.1 Angle Horaire .....	19
2.6.2 Déclinaison Solaire .....	20
2.6.3 Hauteur du Soleil .....	20
2.6.4 Azimut du Soleil .....	21
2.7 Orientation d'un Plan .....	22
2.7.1 Azimut .....	22
2.7.2 Hauteur du Plan .....	23
2.7.3 Inclinaison du Plan (B) Emission du Soleil .....	23
2.7.4 Angle incidence .....	23
2.8 Emission du Soleil .....	23

---

2.8.1 Nature du Rayonnement Solaire .....	23
2.8.2 Propriétés des ondes électromagnétiques .....	24
2.9 Rayonnement Solaire hors atmosphère .....	24
<b>Chapitre 3 : Phénomène d'atténuation du rayonnement solaire</b>	
3.1 Introduction .....	27
3.2 Structure et Composition de l'atmosphère .....	27
3.2.1 Structure de l'atmosphère .....	27
3.2.2. Composition de l'atmosphère .....	28
a) Air sec atmosphérique .....	28
b) Eau .....	28
c) Aérosols .....	28
d) Nuages .....	29
3.3 Notion de la masse d'air .....	29
3.3.1 Définitions .....	29
3.3.2 Calcul de la masse d'air .....	29
3.3.3 Liaison entre la masse d'air et l'atténuation du rayonnement solaire .....	30
3.4 Phénomènes d'atténuation du rayonnement solaire .....	30
3.4.1 L'absorption .....	30
3.4.2 Diffusion .....	31
3.4.3 Réflexion du rayonnement solaire .....	31
3.5 Définition de l'albédo .....	32
3.6 Composantes solaires .....	32
3.6.1 Rayonnement direct I .....	32
3.6.2 Rayonnement diffus D .....	32
3.6.3 Rayonnement Global G .....	32
3.7 Indice de Clarté .....	33
3.8 Fraction de d'isolation .....	33
3.9 Mesure du rayonnement solaire au sol .....	34
3.9.1 Pyrhéliomètre .....	34
3.9.2 Pyranomètre .....	34
3.9.3 Héliographe .....	35
3.10 Conclusion .....	35

**Chapitre 4 : description des modeles semi- empiriques**

4.1 Introduction .....	37
4.2 Classification des modèles radiométriques .....	37
4.2.1 Modèles Spectraux .....	38
4.2.1.1 Modèle de LECKNER .....	38
4.2.2 Modèles météorologiques .....	38
4.2.3 Modèles semi-empiriques .....	38
4.2.3.1 Modèle de Liu et Jordan. ....	38
4.2.3.2 Modèle de CAPDEROU .....	38
4.2.3.3 Modèle de Lacis & Hansen .....	39
4.2.3.4 Modèle de Davies & Hay .....	40
4.3 Situations géographique de GHARDAIA .....	42
4.4 Caractéristiques climatiques .....	43
4.4.1 Température .....	44
4.4.2 Pluviométrie .....	44
4.4.3 Humidité relative .....	44
4.4.4 Vent .....	44
4.5 Conclusion .....	44

**Chapitre 5 : Présentation des résultats**

5.1 Introduction .....	46
5.2 Présentation des résultats de Simulation et discussion .....	47
5.2.1 Comparaison des valeurs estimées .....	55
5.3 Validation avec les données expérimentales .....	57
5.4 Etude Statistique .....	59
5.5 Conclusion .....	61
Conclusion Générale .....	63
Bibliographie .....	65

## Liste des figures

<b>Figure 1.1:</b> Centrales Nucléaires .....	6
<b>Figure 1.2:</b> Eoliennes à axe vertical .....	7
<b>Figure 1.3:</b> Eoliennes à axe horizontal.....	8
<b>Figure 1.4 :</b> Applications de l'énergie solaire.....	9
<b>Figure 1.5 :</b> Centrale Solaire thermodynamique .....	10
<b>Figure 1.6 :</b> Types des cellules photovoltaïque : (a) monocristallin, (b) polycristalin, (c) amorph....	11
<b>Figure 2.1:</b> Soleil .....	13
<b>Figure 2. 2:</b> Structure du soleil.....	15
<b>Figure 2.3 :</b> Mouvement de la terre autour du soleil .....	15
<b>Figure 2.4 :</b> Coordonnées Géographiques.....	17
<b>Figure 2.5 :</b> Angle horaire solaire .....	19
<b>Figure 2.6 :</b> Variation de la Déclinaison Du Soleil.....	20
<b>Figure 2.7 :</b> Variation de la Hauteur du Soleil.....	21
<b>Figure 2.8 :</b> L'azimut et La Hauteur du Soleil .....	21
<b>Figure 2.9 :</b> Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.....	22
<b>Figure 2.10 :</b> Plan horizontal de la terre avec l'azimut du soleil $\alpha$ et son élévation $h$ ... ..	22
<b>Figure 2.11 :</b> Angle d'inclinaison d'un Capteur Solaire. ....	23
<b>Figure 2.12 :</b> Spectre du Rayonnement Solaire.....	24
<b>Figure 2.13 :</b> Variation annuelle de la constante solaire.....	25
<b>Figure 3.1 :</b> Structure de l'atmosphère.....	27
<b>Figure 3.2 :</b> Définition de la masse l'air.....	29
<b>Figure 3.3 :</b> Rayonnement direct, diffus et global.....	33
<b>Figure 3.4 :</b> Pyrhéliomètre.....	34
<b>Figure 3.5 :</b> Pyranomètre.....	34
<b>Figure 3.6 :</b> Héliographe pour la mesure de la durée d'insolation.....	35
<b>Figure 4.1 :</b> Fonction principaux paramètres.....	37
<b>Figure 4.2 :</b> Vue satellitaire du site de Ghardaïa.....	43
<b>Figure 5.1 :</b> Organigramme des modèles de Davies et Hay ; Lacis et Hansen.....	46
<b>Figure 5.2 :</b> Rayonnement solaire de (21 mars.21juin.21décembre pour un plan horizontal) par les modèles Hansen & Lacis.et Davies & Hay.....	47
<b>Figure 5.3 :</b> Angle d'incidence de (21 mars.21juin.21décembre pour un plan horizontal) par les modèles Hansen & Lacis.et Davies & Hay .....	48
<b>Figure 5.4 :</b> Rayonnement solaire de 21 mars pour un plan Vertical à l'angle $\beta=90$ . Par les modèles Hansen & Lacis.et Davies & Hay .....	49
<b>Figure 5.5 :</b> Angle d'incidence de 21 mars pour un plan Vertical à l'angle $\beta=90$ .par les modèles Hansen & Lacis.et Davies & Hay .....	49
<b>Figure 5.6 :</b> Rayonnement solaire de 21 juin pour un plan Vertical à l'angle $\beta=90$ .Par les modèles Hansen & Lacis.et Davies & Hay.....	50
<b>Figure 5.7 :</b> Angle d'incidence de 21 juin pour un plan Vertical à l'angle $\beta=90$ .par les modèles Hansen & Lacis.et Davies & Hay.....	50

**Figure 5.8** : Rayonnement solaire de 21 décembre pour un plan Vertical à l'angle  $\beta=90$  par les modèle Hansen & Lacis.et Davies & Hay.....51

**Figure 5.9** : Angle d'incidence de 21 décembre pour un plan Vertical à l'angle  $\beta=90$  par les modèle Hansen & Lacis.et Davies & Hay.....51

**Figure 5.10**: Rayonnement solaire le 21 Mars pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32$ .par les modèle Hansen & Lacis.et Davies & Hay.....52

**Figure 5.11** : Angle d'incidence le 21 Mars pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32$ .par les modèle Hansen & Lacis.et Davies & Hay.....53

**Figure 5.12** : Rayonnement solaire le 21 Juin pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32$  par les modèle Hansen & Lacis.et Davies & Hay .....53

**Figure 5.13** : Angle incidence le 21 Juin pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32$  par les modèle Hansen & Lacis.et Davies & Hay .....54

**Figure 5.14** : Rayonnement solaire le 21 décembre pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32$  par les modèle Hansen & Lacis.et Davies & Hay .....54

**Figure 5.15** : Angle d'incidence le 21 décembre pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32$  par les modèle Hansen & Lacis.et Davies & Hay .....55

**Figure 5.16** : Comparaison des résultats obtenus par le modèle de avec les résultats obtenus par le modèle de pour le plan horizontal, vertical et incliné orientent Sud pour un jour clair d'hiver .....56

**Figure 5.17** : Comparaison des résultats obtenus par le modèle de avec les résultats obtenus par le modèle de pour le plan horizontal, vertical et incliné orientent Est pour un jour clair d'hiver.....56

**Figure 5.18** : Comparaison des résultats obtenus par le modèle de avec les résultats obtenus par le modèle de pour le plan horizontal, vertical et incliné orientent Ouest pour un jour clair d'hiver .....57

**Figure 5.19** : Validation des résultats pour un jour clair d'hiver.....58

**Figure 5.20** : Validation des résultats pour un jour clair d'été.....58

**Figure 5.21** : Validation des résultats pour un jour clair d'e printemps.....59

## Liste des tableaux

<b>Tableau 2.1</b> : Caractéristiques principales du soleil .....	14
<b>Tableau 3.1</b> : Valeurs typiques de L'albédo du sol.....	32
<b>Tableau 4.1</b> : Valeurs du facteur Fc en fonction de la distance zénithale d'après Robinson.....	42
<b>Tableau 5.1</b> : Tests statistiques pour le rayonnement solaire instantané, Global horizontal.....	61

---

## Liste des abréviations

$I_{sc}$  : La constante solaire moyenne [ $\text{w/m}^2$ ]

$Z$  : Altitude du lieu [km]

$\phi$  : Latitude du lieu [ $^\circ$ ]

$\delta$  : Déclinaison solaire [ $^\circ$ ]

O : l'orientation de plan

$i$  : Angle d'incidence

$\beta$  : L'inclinaison extérieure de la surface [ $^\circ$ ]

$n_j$  : Numéro du jour de l'année

$\omega$  : Angle horaire [ $^\circ$ ]

**TSV** : Temps solaire vrai [h]

**TSM** : Temps solaire moyen [h]

**TU** : Temps universelle [h]

**ET** : Équation du temps [min]

**TL** : Temps légal [h]

$h$  : Hauteur angulaire du soleil [ $^\circ$ ]

$\omega$  : Angle horaire [ $^\circ$ ]

$\omega_c$  : Angle horaire au coucher du soleil [ $^\circ$ ]

$\omega_l$  : Angle horaire au lever du soleil orienté [ $^\circ$ ]

$D_j$  : Durée astronomique du jour [h]

$y$  : Nombre de masse d'air  $A_{m_y}$

$a$  : Angle d'azimut [ $^\circ$ ]

$\theta_z$  : Angle de zénith [ $^\circ$ ]

**I** : Éclairement solaire direct [ $\text{W/m}^2$ ]

**D** : Éclairement solaire diffus [ $\text{W/m}^2$ ]

**R** : Éclairement solaire réfléchi [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

**G** : Éclairement solaire global [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

**D** : Rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

**$I_{sc}$**  : Constant solaire corrigé [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

**$\alpha_0$**  : Coefficient correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct

**$U_0$**  : Epaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement

**$m_r$**  : Masse d'air optique relative

**$l$**  : Représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu [cm]

**$\alpha_w$**  : Coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau

**$X_W$**  : Epaisseur d'eau condensable corrigée par trajet optique du rayonnement

**$U_W$**  : Epaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu [cm]

**$m_a$**  : Masse d'air corrigée

**$p$**  : Pression atmosphérique

**$\tau_r$**  : Coefficient de transmission après diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh

**$\tau_a$**  : Coefficient de transmission après diffusion par les aérosols

**$\rho'_a$**  : Albédo du ciel clair du site considéré

**$\tau_0$**  : Coefficient d'absorption par la couche d'ozone

**$\tau_\omega$**  : Coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau

**$\tau_g$**  : Coefficient de transmission après absorption par les gaz permanents

**$\tau_r$**  : Coefficient de transmission après la diffusion moléculaire

**$m_0$**  : Masse d'air d'ozone

**$\theta_w$**  : Coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau

**$R_b$**  : Facteur d'inclinaison  $R_b$  du rayonnement direct

**$d_i$**  : Irradiation diffuse sur un plan incliné

**$d_{ri}$**  : D'autre part l'irradiation réfléchie sur un plan incliné

**$d_h$**  : Rayonnement diffus pour un plan horizontal



**K** : coefficient qui dépend de l'état du ciel avant d'être recouvert par les nuages

**$T_L$**  : Facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair

**$T_0$**  : 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

**$T_1$**  : Trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère

**$T_2$**  : Trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption

**$\delta_i$**  : Composante isotrope qui correspond à un ciel de luminance uniforme.

**$d_{ciel}$**  : Diffus du ciel est l'éclairement diffus incident en provenance du ciel.

**$\delta'_i$**  : Eclairement diffus rétrodiffusé est celui diffusé à nouveau par le ciel vers le sol  
[W/m<sup>2</sup>]

D.P.S.B : Direction de Planification et du Suivi Budgétaire.

DSA : Directions des Services Agricoles

Km : Kilomètre.

$R^2$  : Coefficient de détermination

RMSE : Erreur quadratique moyenne

MAE : Erreur absolue moyenne

MAPE : Erreur absolue moyenne en pourcentage

rRMSE : Erreur quadratique moyenne normalisée

---

## Introduction générale

L'augmentation de la demande mondiale d'énergie constitue une préoccupation pour tous les politiciens et experts à travers le monde, notamment avec les effets venant de l'utilisation des dérivés du pétrole et la peur venue de la décroissance des réserves mondiales, ce qui a influé sur le développement d'économie des pays. La solution optimale envisagée pour les différents problèmes d'énergie et d'environnement sera l'orientation vers des énergies alternatives à leur tête l'énergie solaire. Cette dernière est considérée comme une source renouvelable, non-polluante et avec un coût minimal. Le grand Maghreb est l'une des régions qui reçoit une grande quantité d'irradiation solaire dépassant 3900 heures/an [1]. Une évaluation par satellite, effectuée par l'agence spatiale allemande (ASA), a montré que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen. Il est de 169.440 TW/an pour le solaire thermique et de 13.9 TW/an pour le photovoltaïque [2]. Afin d'exploiter cette source d'énergie dans les systèmes photo-thermiques et photovoltaïques, l'Algérie a implanté une stratégie de développement durable à moyen terme, en augmentant le pourcentage d'utilisation d'énergie solaire à 6% de an 2015. Une connaissance précise de la distribution de l'irradiation solaire sur un site géographique particulier est d'une grande importance pour le développement des systèmes photo-thermiques, ainsi qu'à l'évaluation de leurs performances. Les meilleures sources de ces renseignements sont les données mesurées à l'aide du Pyranomètre [3]. Le manque des moyens de mesure, la non disponibilité des stations météorologiques dans tous les endroits et l'ampleur des régions étudiées représentent des difficultés qui ont obligé les chercheurs dans les différents pays du monde à penser à mettre au point des modèles [4,5], dont le but est d'estimer la quantité du rayonnement solaire global dans n'importe quel endroit et n'importe quel temps. La ville de Ghardaia (Latitude 32.30°N, Longitude 3.45°E) en Algérie dispose d'un climat très favorable à l'utilisation de l'énergie solaire, cependant la distribution de l'irradiation solaire reste malconnue.

L'objectif de ce travail est l'évaluation du rayonnement solaire globale sur le site de Ghardaia à travers deux modèles semi-empiriques.

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les énergies renouvelables et les énergies fossiles.

Le deuxième chapitre concerne les notions d'astronomie.

Dans le troisième chapitre, nous parlerons des phénomènes d'atténuation du rayonnement solaire, structure et composition de l'atmosphère, composantes solaires et la mesure du rayonnement solaire au sol.

Le quatrième chapitre est consacré à la description des modèles semi-empiriques. Nous présentons premièrement la position géographique de notre site, les modèles spectraux et les modèles météorologiques.

Dans le dernier chapitre en outre nous avons effectué des simulations sous MATLAB de nos modèles et les résultats que nous avons obtenus pour plusieurs cas d'étude sont satisfaisants. Nous pouvons conclure que le système étudié est robuste et performant.

# *Chapitre 1 :*

## *Généralités Sur Les Energies Renouvelables*

## 1.1. Introduction

L'énergie est essentielle à l'homme. Elle représente un enjeu majeur dans les domaines politiques, économiques, scientifiques et environnemental. De tout temps, l'homme a eu besoin de l'énergie pour se nourrir, se mouvoir. Celle-ci existe sous plusieurs formes. Aujourd'hui, la technologie permet d'en produire en grande quantité, en utilisant toutes les ressources possibles (fossiles, eau, vent, soleil...). À l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle, l'énergie reste un enjeu majeur. [53]

Dans ce chapitre, On donne un bref aperçu sur les différentes énergies fossiles et les énergies renouvelables. Les sources d'énergies renouvelables sont fréquentes et variées.

## 1.2. Energie et ces Utilisations

### 1.2.1. Définition de l'énergie

L'énergie est généralement définie comme la capacité d'un système à réaliser un travail. La quantité d'énergie que possède un système représente la quantité de travail qu'il peut réaliser. On peut définir aussi L'énergie comme une grandeur physique qui existe sous différents formes (électrique, mécanique, chimique, alimentaire). L'énergie se transforme d'une forme à l'autre mais toute conversion s'accompagne d'une dégradation de l'énergie 'Principe Carnot'. [54]

#### 1.2.1.1. Problèmes concernant l'énergie

- ▶ Emissions provenant de la production d'énergie à partir de combustibles fossiles
- ▶ Réchauffement climatique
- ▶ Pollution

#### 1.2.2. Utilisations de l'énergie

L'énergie est utilisée pour le transport, pour l'industriel, usage, le résidentiel et le tertiaire, l'agriculture.

## 1.3. Sources de l'énergie non renouvelables

Les énergies non renouvelables sont issues de sources dont les stocks s'épuisent car ils se renouvellent moins vite qu'on les consomme. Aujourd'hui, les sources d'énergie primaire sont les plus utilisées dans le monde. Il s'agit principalement du pétrole, du charbon, du gaz naturel et du nucléaire.

### 1.3.1. Energie fossile

Force produite par différentes ressources primaires comme l'uranium, qui n'émet pas de gaz à effet de serre mais qui produit des déchets radioactifs.

**1.3.1.1. Pétrolier**

Le pétrole, principalement composé d'hydrocarbures, est l'une des plus anciennes énergies fossiles utilisée par l'Homme. Il fournit l'ensemble des carburants liquides tels que l'essence, le fioul, le gasoil ou le kérosène, et entre dans la composition d'une multitude de matériaux communs tels que les plastiques, les cosmétiques, les détergents ou encore les lubrifiants. Cependant, de l'extraction à la consommation, en passant par la transformation et le transport, l'or noir présente certains dangers environnementaux. Par exemple, les risques de marées noires sont très présents, et leurs conséquences écologiques catastrophiques : elles détruisent la faune et la flore, polluent les sols, l'eau et l'air et sont nocives également pour l'homme, qui se baigne et se nourrit d'animaux marins. D'un point de vue socio-économique, partout dans le monde les actions des multinationales pétrolières appauvrissent des régions entières et détruisent leurs écosystèmes. En 2015, il représentait 31,7% de l'énergie primaire consommée dans le monde [47].

**1.3.1.2. Charbon**

Le charbon est la source d'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde. Le charbon s'est formé il y a plus de 280 millions d'années à partir de végétaux engloutis par les eaux lors de bouleversements géologiques importants. Moteur essentiel du développement économique au XIX<sup>ème</sup> siècle, la consommation mondiale de charbon a connu une progression annuelle moyenne de +4.3%. Il existe différents types de charbon (l'antracite, la houille, le lignite, la tourbe) qui n'ont pas tous le même pouvoir énergétique. Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, le charbon était l'énergie fossile dominante ; aujourd'hui il a été supplanté par le pétrole mais reste très présent puisque le charbon représente près de 26% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde.

**1.3.1.3. Gaz naturel**

Il existe différents types de gaz naturel adoptant une dénomination spécifique en fonction des conditions dans les quels ils se forment (gaz conventionnel non associé, gaz associé, gaz biogénique, gaz de charbon ou le désormais tristement célèbre gaz de schiste). Sa combustion génère de l'énergie mais émet aussi une quantité importante de CO<sub>2</sub>. A l'instar du pétrole et du charbon, le gaz naturel est classé dans les énergies non renouvelables en raison de son processus de formation très long.

**1.3.1.3. Energie nucléaire**

Les combustibles fossiles se consomment plus vite que la nature ne les produit. Les gisements connus de ces formes d'énergie sont voués à disparaître plus ou moins rapidement. L'énergie de fission nucléaire est un cas particulier : les gisements exploitables connus seront épuisés dans, suivant les estimations et le développement de la consommation des pays orientaux (notamment en tenant

compte des futures centrales qui seront construites en Chine et en Inde), 50 ans à un siècle, ce qui classe cette énergie dans la catégorie 'non renouvelable'.

Les réacteurs actuellement en fonctionnement sont à 81% des réacteurs à eau légère de 2ème génération, Leur approvisionnement en combustible ne pose aucune difficulté, de même que celui des réacteurs de génération III. Les réserves classiques connues d'uranium représentent en effet 70 années de consommation actuelle et les, réserves probables supplémentaires 100 années de plus, ce qui permettrait d'engager la croissance du parc sera en effet porté à plusieurs millénaires avec les réacteurs de 4ème génération. [50]

L'énergie nucléaire peut être utilisée pour produire de l'électricité.

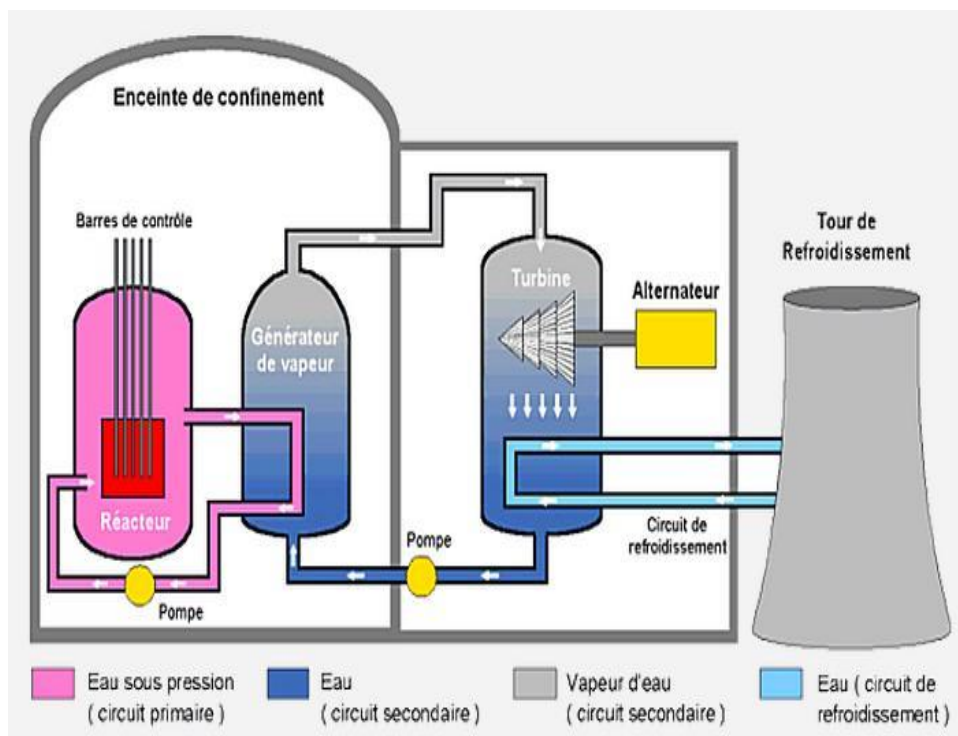


Figure (1.1) : Centrales nucléaires [52]

## 1.4. Energies Renouvelables

Le Soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables : rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie utilisable (directement ou indirectement). Une source d'énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent. Les énergies renouvelables proviennent de 5 grandes sources naturelles qui sont classées en différentes filières :

### 1.4.1. Energie Eolienne

L'éolien, inspiré d'Éole (dieu du vent dans la mythologie grecque), est une énergie renouvelable qui utilise la force du vent pour générer de l'électricité. Les éoliennes sont en quelque sorte le b.a.-ba des énergies renouvelables. Une éolienne est un dispositif formé de pales et de turbines qui fonctionne grâce à l'énergie cinétique du vent transformée en énergie mécanique, elle-même transformée en énergie électrique.[49]. Il existe différents profils d'éolienne. On distingue deux grands types d'éoliennes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

#### 1.4.1.1 Eolienne à axe vertical

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne,

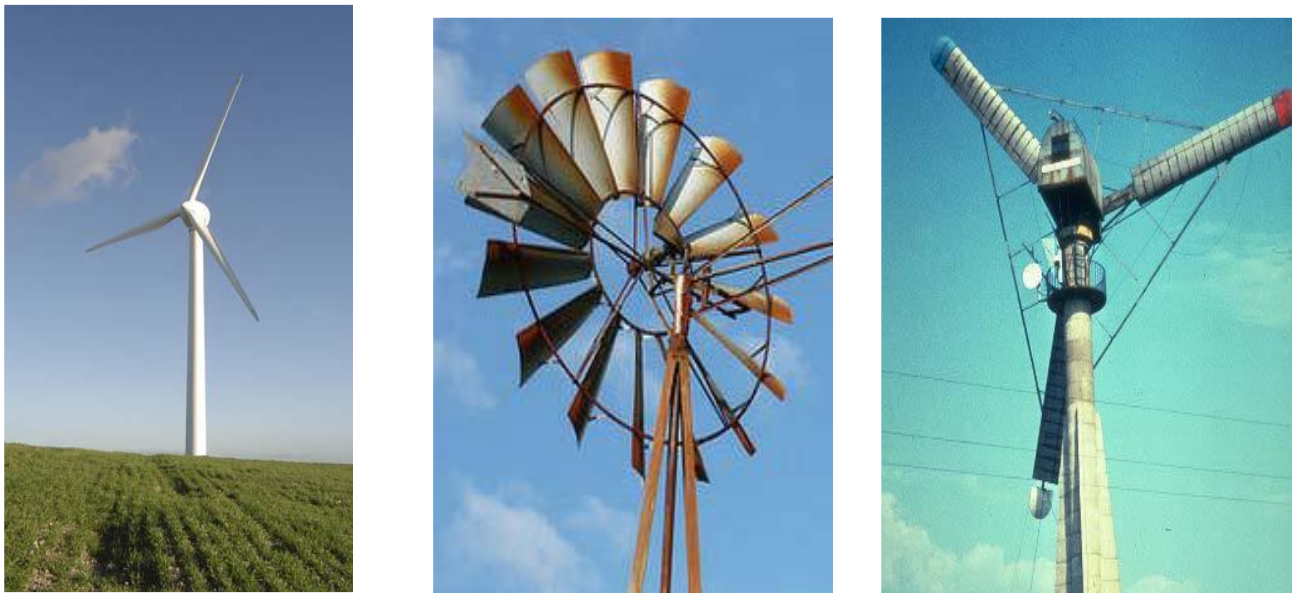


*Figure (1.2) : Eoliennes à axe vertical.*

#### 1.4.1.2 Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.





*Figure (1.3) : Eoliennes à axe horizontal.*

#### **1.4.2. Energie hydraulique**

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique. L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.

#### **1.4.3. Biomasse**

Dans le domaine de l'énergie, la biomasse est la matière organique d'origine végétale (microalgues incluses), animale, bactérienne ou fongique (champignons).

utilisable comme source d'énergie. L'énergie peut être extraite par combustion directe (ex : bois énergie), ou par combustion après un processus de transformation de la matière première, par exemple la méthanisation (biogaz, ou sa version épurée le biométhane) ou d'autres transformations chimiques (dont la pyrolyse, la carbonisation hydrothermale et les méthodes de production de biocarburants ou « agrocarburants »).

#### **1.4.4. Géothermie**

L'énergie géothermique est la chaleur qui se trouve sous la surface de la Terre. L'origine de cette chaleur est double : dans une petite mesure, elle vient du Soleil qui réchauffe la surface de la Terre. Toutefois, c'est principalement le magma, qui se situe au cœur de la planète.

### 1.4.5. Energie solaire

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés (Figure 1. 4): Soit le solaire thermique (passif ou actif), le solaire thermodynamique, le solaire photovoltaïque et l'éclairage Naturel.

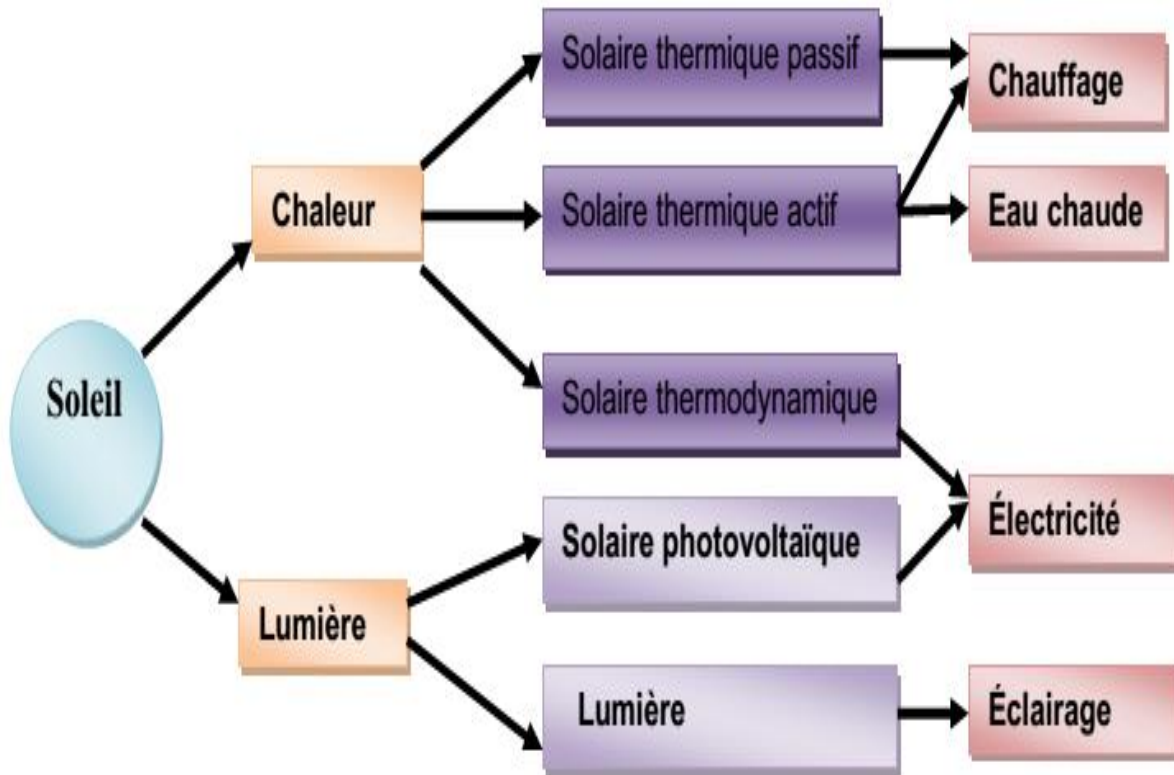


Figure (1.4) : Applications de l'énergie solaire.

#### 1.4.5.1. Solaire thermique

La centrale thermique produit l'énergie électrique à partir de l'énergie calorifique obtenue en brûlant un combustible tel que charbon, gaz ou fuel. Son cycle de fonctionnement comporte trois phases :

- La transformation de l'énergie chimique en énergie de la vapeur dans la chaudière.
- La transformation de l'énergie de la vapeur en énergie mécanique dans la turbine.
- La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique dans l'alternateur. Suivant la forme de l'énergie produite, les centrales thermiques sont classées en 2 catégories :
  - Centrales à turbines à vapeur à condensations.
  - Centrales à turbines à prélèvement dites aussi à turbines contre pression.[51]

### 1.4.5.2. Solaire thermodynamique

Les centrales solaires thermodynamiques (Figure 1.5) concentrent le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à une température beaucoup plus élevée. En fait, l'énergie dégagée par les systèmes solaires thermodynamiques est suffisante pour actionner des turbines à vapeur et produire de l'électricité.



*Figure (1.5) : centrale solaire thermodynamique.*

### 1.4.5.3. Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque se compose généralement de plusieurs panneaux qui forment un générateur photovoltaïque. Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques :

#### *a- Modules solaires monocristallins*

Sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont en forme carré arrondis de couleur uniforme (rendement varie entre 13 à 17%).

#### *b- Cellules poly-cristallines*

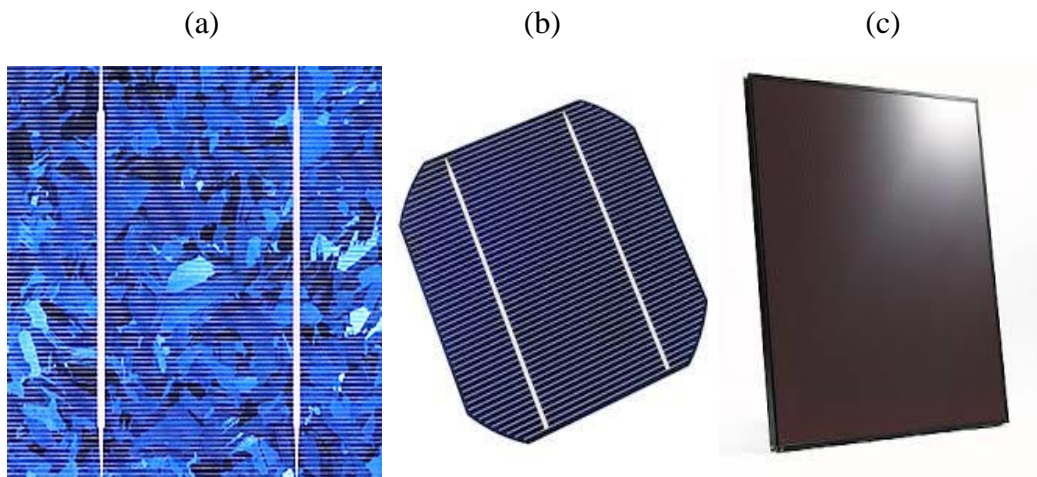
Sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes).

***c- Modules solaires amorphes***

Les modules photovoltaïques au silicium amorphe ont un coût plus bas que les panneaux au silicium monocristallin et polycristallin, mais leur rendement est plus bas (5 à 8%).

***D-Panneaux à couche mince***

Les modules photovoltaïques à couches minces, comme CdTe (tellure de cadmium) permettent le captage de différentes fréquences du spectre lumineux. Ils ont une excellente sensibilité à la faible luminosité et un faible coefficient de sensibilité à la température leur rendement est inférieur à celui des panneaux au silicium monocristallin et poly cristallin.



***Figure (1.6) : Types des cellules photovoltaïques: (a) monocristallin, (b) polycristallin, (c) amorphe***

# *Chapitre 2 :*

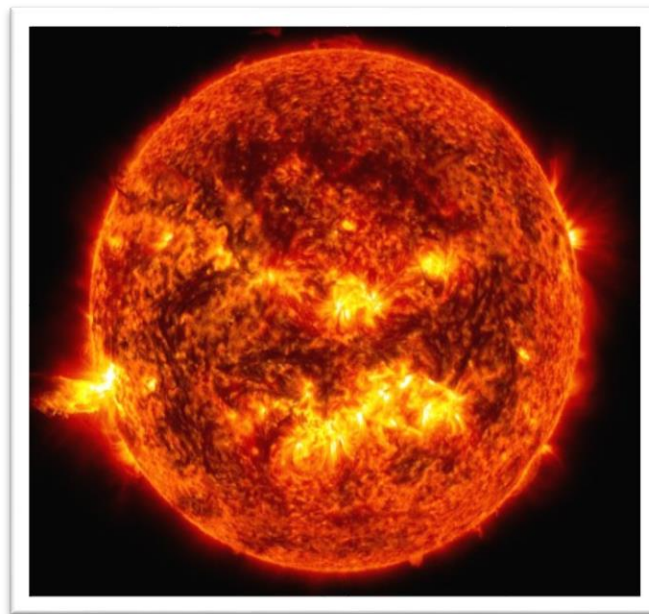
## *Notions d'Astronomie*

## 2.1 Introduction

Le rayonnement solaire est l'énergie rayonnante émise dans l'espace interplanétaire Sol. Ce rayonnement est généré à partir de réactions de fusion thermonucléaire se produisant dans le noyau solaire et de produire un rayonnement électromagnétique à des fréquences différentes ou des longueurs d'onde, qui se propagent alors dans l'espace aux vitesses typiques de ces ondes. Cette propagation vous permet d'apporter de l'énergie solaire avec eux. La connaissance de la trajectoire du soleil et sa position en chaque point du ciel et la distance terre –soleil sont nécessaires quand à la détermination de la quantité du rayonnement extraterrestre et la durée du jour.

## 2.2.Soleil

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de  $2.10^{27}$  tonnes [27]. Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ( $E=mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de 36.1022 KW. La terre étant à une distance de 150.106 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de  $1,8.10^{14}$  KW [27].



*Figure (2.1) : Soleil [22]*

### 2.2.1. Description du soleil

Le soleil est une boule de gaz composée principalement de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium et le 1% restant étant un mélange d'azote et d'autres éléments. Les principales caractéristiques du soleil sont illustrées sur tableau ci-dessous.

*Table (2.1) : Caractéristiques principales du soleil [7-22]*

Masse (kg)	$2 * 10^{30}$
Diamètre (km)	$14 * 10^5 \text{ km}$
masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1410kg/m <sup>3</sup>
Température de surface	5507°C
Volume (km <sup>3</sup> )	$1.41 * 10^{18}$
Puissance rayonnée	$3.83 * 10^{23}$
Vitesse (km/s)	217
Puissance moyenne reçue sur terre (Watt /m <sup>2</sup> )	1370 Watt /m <sup>2</sup>

### 2.2.2. Structure du soleil

La structure du soleil illustrée sur la figure 2 on distingue trois régions particulières :

**a) Photosphère** : est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [36] :

- La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.
- Une épaisseur de 500 km.
- Une pression de 1/100 atm.

**b) Chromosphère** : constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes :

- Une épaisseur 2000 km.
- Une température augmentant de 4200 °C à  $10^4$  °C.

**c) Couronne** : est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont :

- Elle est sans limite précise.
- La température augmente de  $10^6$ °C à  $2.10^6$ °C.

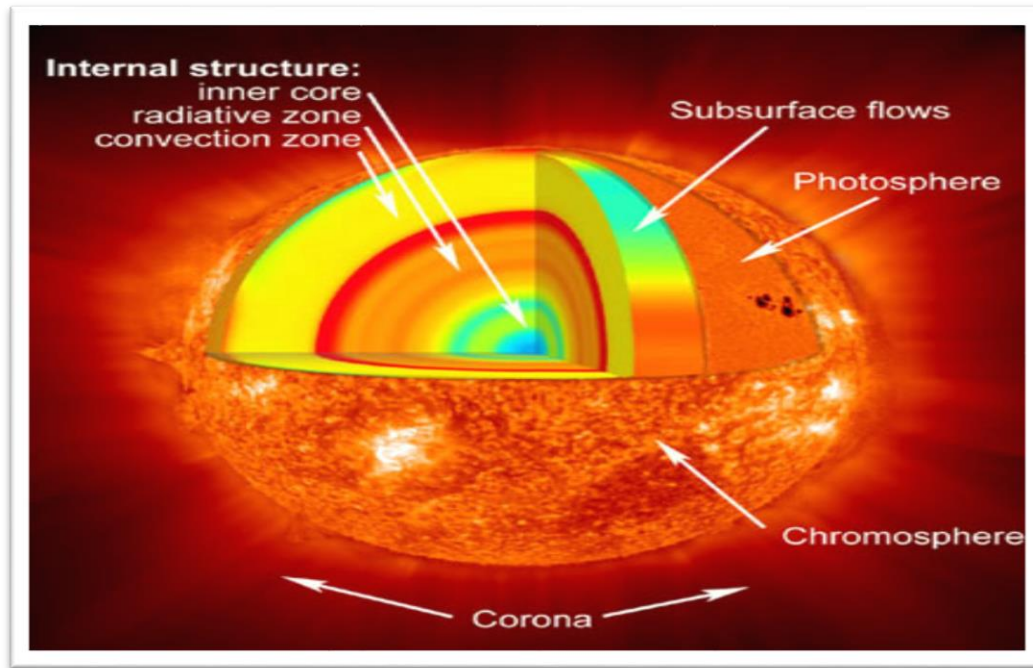


Figure (2.2) : Structure du soleil [23]

### 2.3. Mouvement de la terre autour du soleil

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365, 25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil 147 millions de Km et au solstice d'été (22 juin) qu'elle en est la plus éloignée 152 millions de Km la moyenne étant de 149,5 millions de Km.

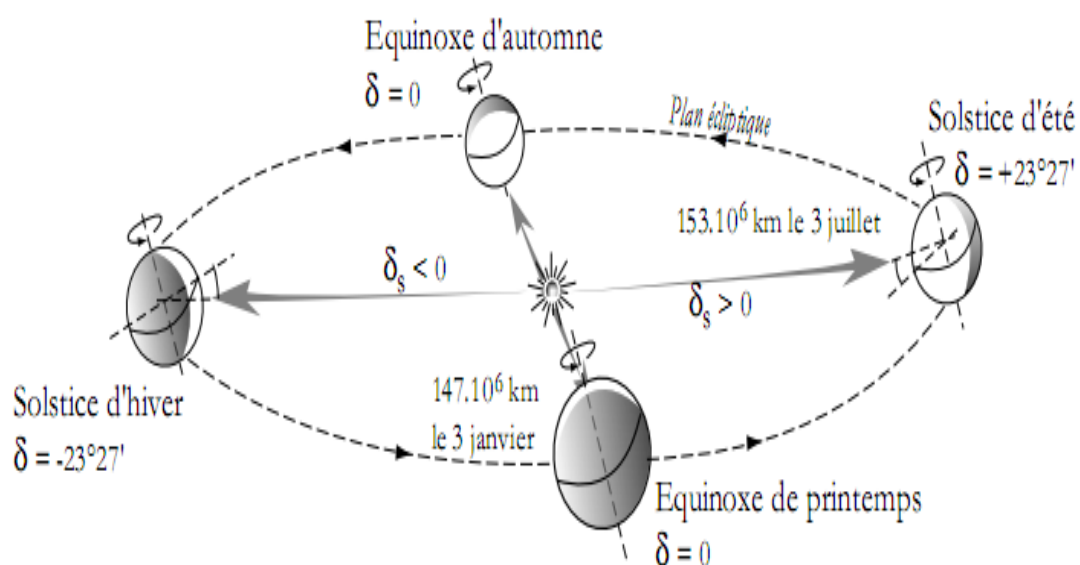


Figure (2.3) : Mouvement de la terre autour du soleil [24]



La terre coupe le plan perpendiculaire au grand axe de son orbite et contenant le soleil aux équinoxes de printemps (21mars) et d'automne (21septembre).Elle tourne sur elle-même avec une période de 24h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace.Il fait un angle  $\delta = 23^{\circ}27'$  (ou  $23,45^{\circ}$  en fraction décimale du degré) avec la normale au plan de l'écliptique.[24].

## 2.4. Paramètres Géographique

### 2.4.1. Latitude

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle Équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur, est indiquée en tant que latitude de  $0^{\circ}$ , le pôle nord par latitude  $+90^{\circ}$  et le pôle sud par la latitude  $-90^{\circ}$ . Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude sera désignée ici par lettre( $\varphi$ ), et Peut ainsi être composé entre  $-90^{\circ}$  et  $+90^{\circ}$  (Pour la ville de Ghardaia la latitude est environ  $32^{\circ}3'N$ ) [13].

### 2.4.2. Longitude

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^{\circ}$ ) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre  $-180^{\circ}$  et  $+180^{\circ}$ , à tout écart de  $1^{\circ}$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest. Pour la ville de Ghardaia, la longitude est de  $3.45 E$  [13].

### 2.4.3. L'altitude

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une Surface de référence théorique (niveau moyen de la mer). Pour la ville de Ghardaia l'altitude est environ  $480 m$  [13].

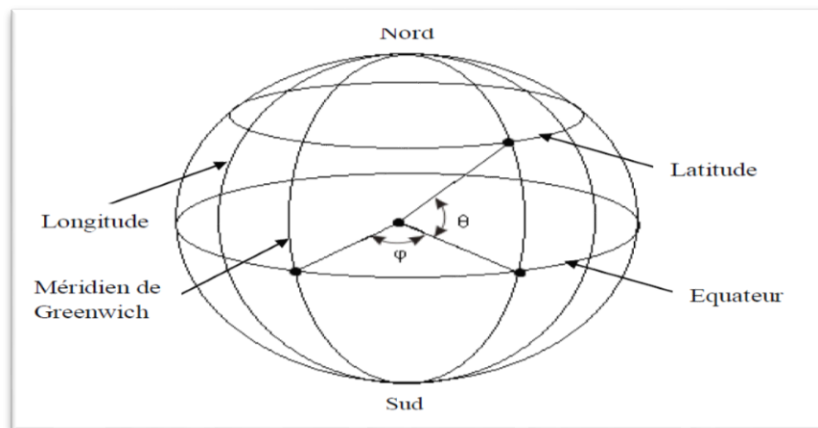


Figure (2.4) : les Coordonnées Géographiques [16]

## 2.5. Temps Solaire

Pour les applications de l'énergie solaire, il faut faire intervenir le temps solaire vrai, qui est calculé en tenant compte de l'écart entre le temps solaire moyen et le temps local.[28]

### 2.5.1. Temps Universel (TU)

Le temps universel TU est défini par l'heure du passage du soleil au méridien origine. Le méridien retenu comme origine et celui de Greenwich et le TSM correspond au temps universel (c'est le TSM à la longitude 0°). La différence entre le temps solaire moyen et le temps universel est appelée correction de longitude, le temps universel est lié au temps solaire moyen (local) [28].

$$TU = TSM + \frac{L}{15} \quad (2.1)$$

Avec :

L : longitude exprimée par degré et heure.

L > 0, pour les villes situées à l'Est de Greenwich ;

L < 0, pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich ;

TU = TSM, pour le méridien de Greenwich

### 2.5.2. Temps Solaire Moyne (TSM)

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

Donné par :

$$TSM = TU \mp \frac{L}{15} \quad (2.2)$$

### 2.5.3. Temps Légal ( $T_L$ )

Le temps légal (ou local) est le temps officiel de l'Etat, il diffère par rapport au temps universel de Greenwich par un décalage  $\Delta H$ .

$$T_L = T_U + \Delta H \quad (2.3)$$

Où :

$\Delta H$  : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie

### 2.5.4. L'équation du Temps (Et)

C'est une équation qui tient compte de la variation de la vitesse de rotation de la terre, elle est donnée par :

$$Et = 9.87 \sin(2\beta_0) - 7.53 \cos(\beta_0) - 1.5 \sin(\beta_0) \quad [\text{min}] \quad (2.4)$$

$$\beta_0 = (N - 81) \cdot 360/365 \quad (\text{Degrés}) \quad (2.5)$$

### 2.5.5. Temps Solaire Vrai (TSV)

Le temps solaire vrai et temps solaire moyenne diffèrent cette différence est appelée équation du temps dans un instant et un lieu donné. [28]

Il est donné sous la forme suivante :

$$TSV = TSM + ET \quad (2.6)$$

### 2.5.6. Durée du Jour ( $D_j$ )

La module  $\omega$  de l'angle horaire au lever du soleil l'obtient en écrivant :  $\sin(h) = 0$ .

On obtient :

$$\cos(\omega_s) = [-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (2.7)$$

L'heure solaire au lever du soleil est donnée :

$$T_s = 12 - \frac{W_L}{15} \quad (2.8)$$

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

donc :  $\omega_c = -\omega_l$ .

$$D_j = TSV_c - TSV_l \quad (2.9)$$

Avec :

$TSV_C$  : Temp solaire vrai au coucher

$TSV_L$  : Temp solaire vrai au lever

La durée de jour est :

$$D_j = 2 \frac{\omega_l}{15} \tag{2.10}$$

## 2.6. Position Géométrique du Soleil

### 2.6.1. Angle Horaire

L'angle horaire  $\omega$  étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV. Pour calculer l'angle horaire [26]. utilise la formule suivante :

$$\omega = 15 (TSV - 12) \text{ en degré} \tag{2.11}$$

Avec :

$\omega > 0 \rightarrow$  avant midi

$\omega < 0 \rightarrow$  après midi

$\omega = 0 \rightarrow$  au midi

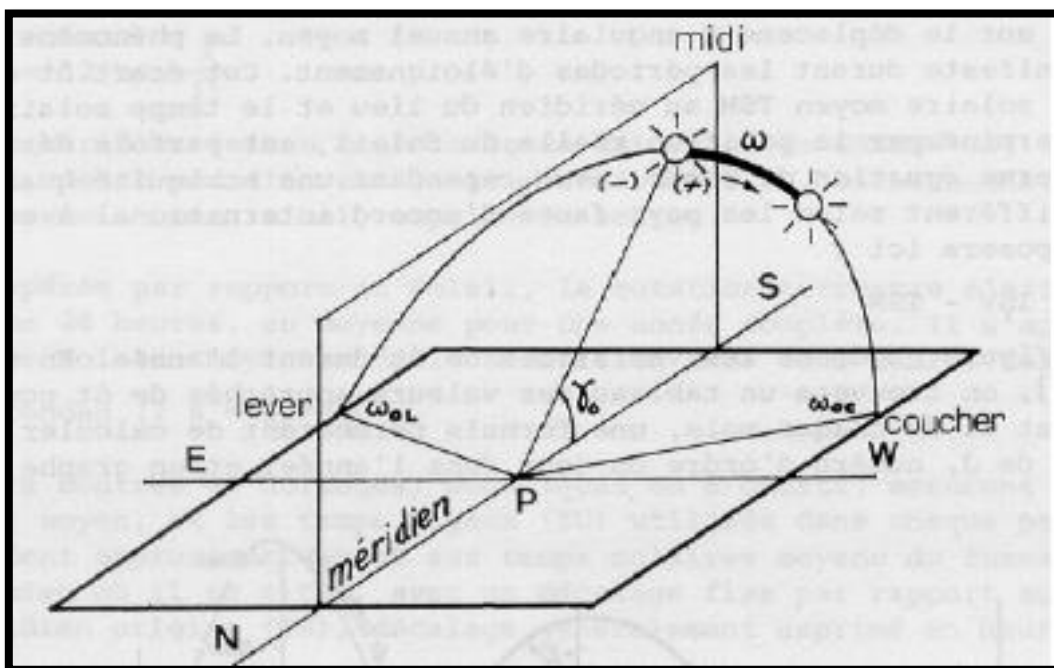


Figure (2.5) : Angle horaire solaire [21]

**2.6.2. Déclinaison Solaire**

La déclinaison du soleil  $\delta$  est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre. La déclinaison varie de  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver à  $+23^{\circ}27'$  au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes [26]. La déclinaison solaire est bien représentée par 3 formules suivantes :

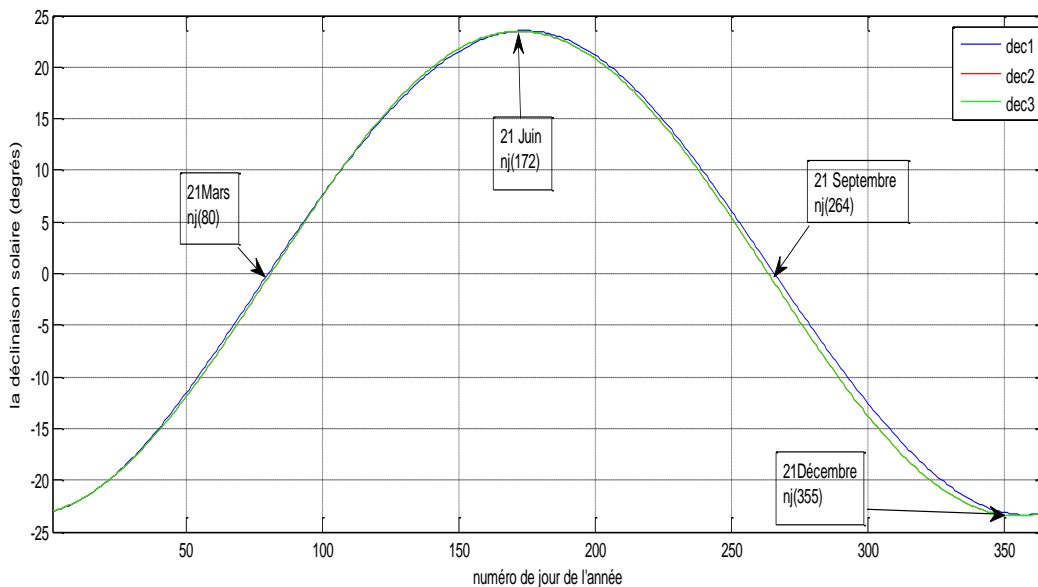
$$\delta = (0.006918 - 0.39912 \cos T + 0.070257 \sin T - 0.006785 \cos 2T + 0.000907 \sin 2T - 0.002697 \cos 3T + 0.00148 \sin 3T) \quad (2.12)$$

Avec:  $\Gamma = (2\pi (Nj-1) / 365) \cdot (180/\pi)$  degré

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365} (Nj - 284)\right] \quad (2.13)$$

$$\delta = \sin^{-1}\left[0.4 \cdot \sin\left[\frac{360}{365} (Nj - 82)\right]\right] \quad (2.14)$$

Avec :  $Nj$ = numéro de jour



**Figure (2. 6) : Variation de la Déclinaison Du Soleil.**

**2.6.3. Hauteur du Soleil**

La hauteur du soleil  $h$  est l'angle que fait, le plan horizontal avec la direction du soleil. la valeur  $h = 0$  correspond au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre  $+90^{\circ}$  et  $-90^{\circ}$  [26].

$$\sin ( h ) = \cos (\varphi) \times \cos (\delta) \times \cos (\omega) + \sin (\varphi) \times \sin (\delta) \quad (2.15)$$

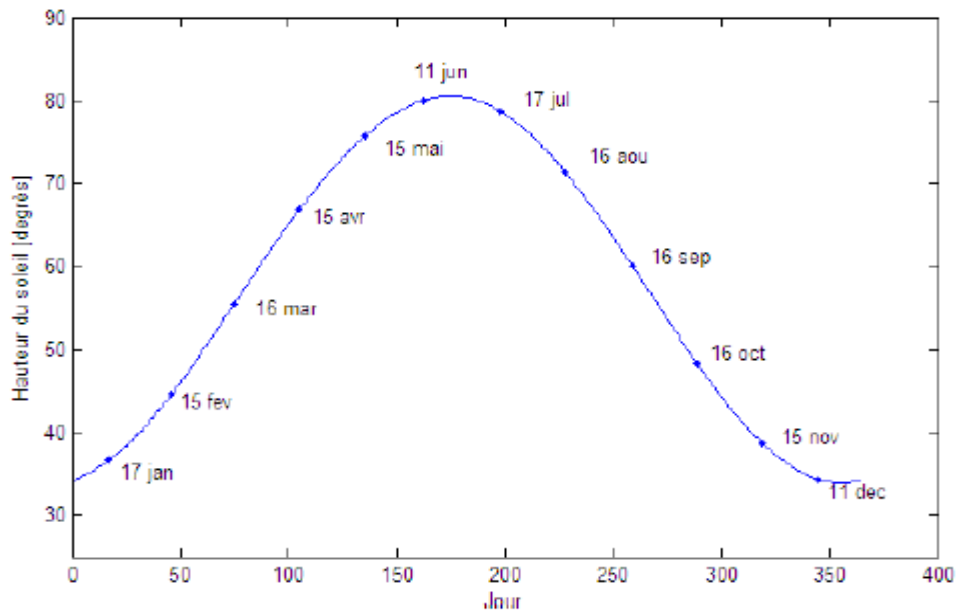


Figure (2.7) : Variation de LaHauteur du Soleil [26].

#### 2.6.4. Azimut Du Soleil

L'azimut du soleil  $a$  est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut est compris entre  $-180 \leq a \leq 180^\circ$

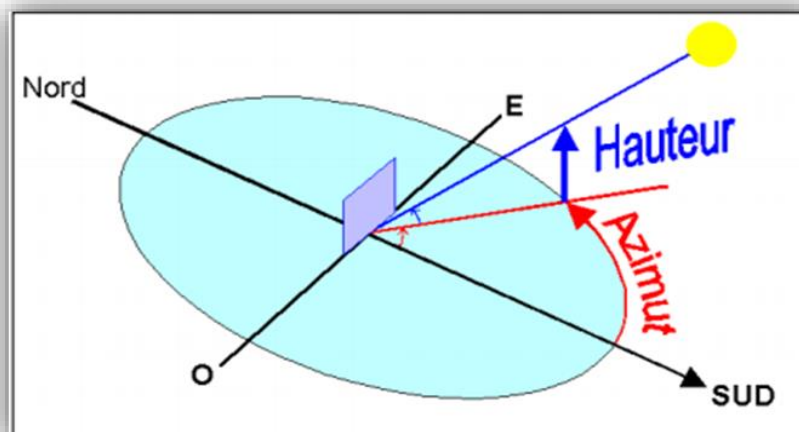


Figure (2.8) : L'azimut et La Hauteur du Soleil [21]

L'azimut du soleil est représenté en fonction de la déclinaison solaire  $\delta$ , latitude du lieu  $\varphi$  et de l'angle horaire  $\omega$  et hauteur du soleil  $h$ . Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule pour calculer L'azimut du soleil :

$$\cos(a) = \frac{\cos(\delta)\cos(\omega)\sin(\varphi) - \sin(\delta)\cos(\varphi)}{\cos(h)} \quad (2.16)$$

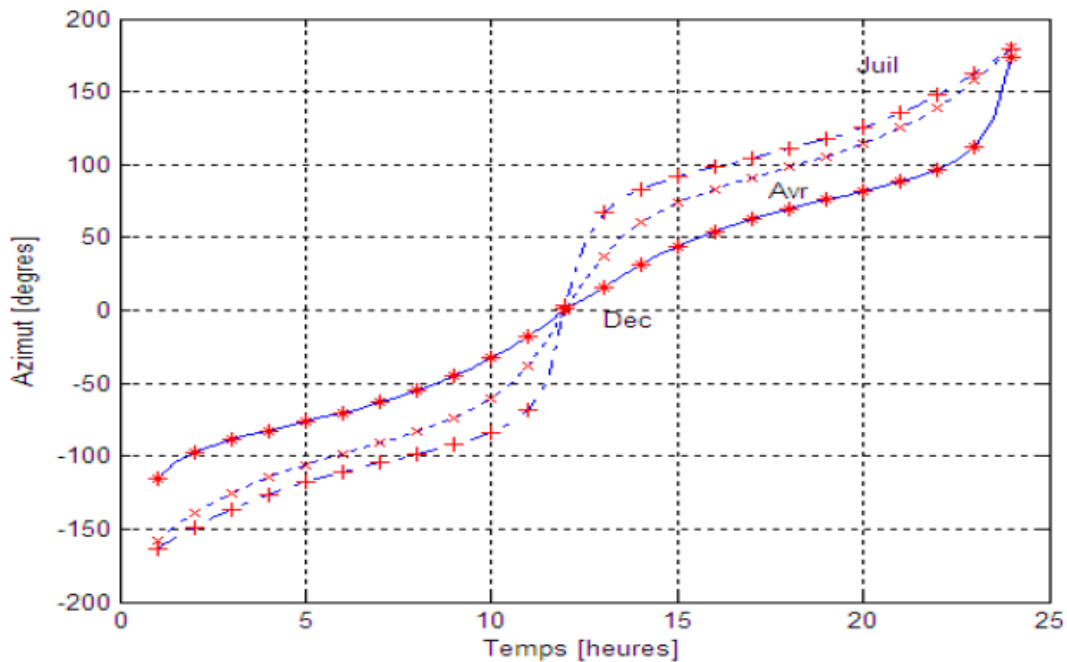


Figure (2.9) : Variation de L'azimut Solaire en Fonction du Temps.

## 2.7. Orientation D'un Plan

Un plan quelconque est défini par trois angles  $\alpha$  (azimut du plan),  $\gamma$  (Hauteur du plan) et  $\beta$  (inclinaison du plan).

### 2.7.1. Azimut du Plan ou Déviation Azimutale (A)

Il est défini par l'angle que fait la projection de la normale du plan sur le plan horizontal et la direction du sud (Figure 2.10). Idéalement, les dispositifs solaires sont orientés plein sud ( $\alpha = 0$ ) pour être exposés au maximum à la lumière solaire. [29]

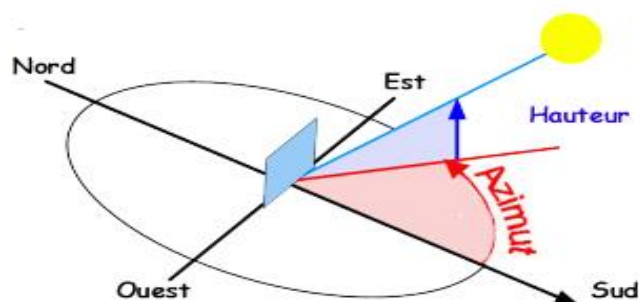


Figure (2.10) : Le plan horizontal de la terre avec l'azimut du soleil  $a$  et son élévation  $h$  [8]

### 2.7.2. Hauteur du Plan

C'est l'angle que fait le normal du plan et sa projection sur le plan horizontale

### 2.7.3. Inclinaison du Plan (B)

Correspond à l'angle que fait le plan du capteur avec l'horizontale (Figure 2. 11).

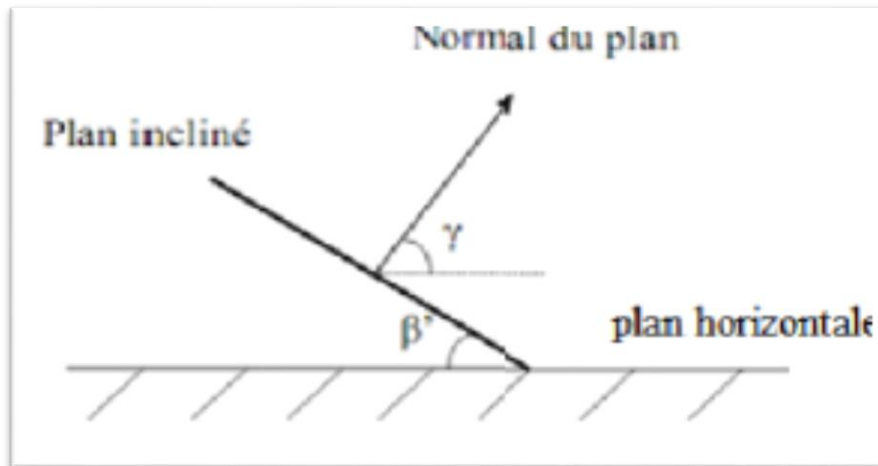


Figure (2.11) : Angle d'inclinaison d'un Capteur Solaire

### 2.7.4. Angle incidence :

C'est l'angle entre le rayon lumineux qui arrive sur le panneau et la perpendiculaire

## 2.8. Emission Du Soleil

### 2.8.1. Nature du Rayonnement Solaire

L'énergie émise par le soleil nous parvient sous forme de rayonnements électromagnétiques qui se propagent 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. La théorie corpusculaire de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence ( $\nu$ ) peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire ( $E$ ) est directement proportionnel à cette fréquence.

$$E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.17)$$

Où

$h$  : est la constante de Planck.

$c$  : la vitesse de la lumière.

$\lambda$ : La longueur d'onde.



De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus énergétiques, la plus grande partie de l'énergie solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche infrarouge. 99,2 % de l'énergie solaire hors atmosphère se trouve entre 200 nm et 4  $\mu\text{m}$ . Au sol, par suite de l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau, le spectre est limité à 2,5  $\mu\text{m}$  environ [28, 16].

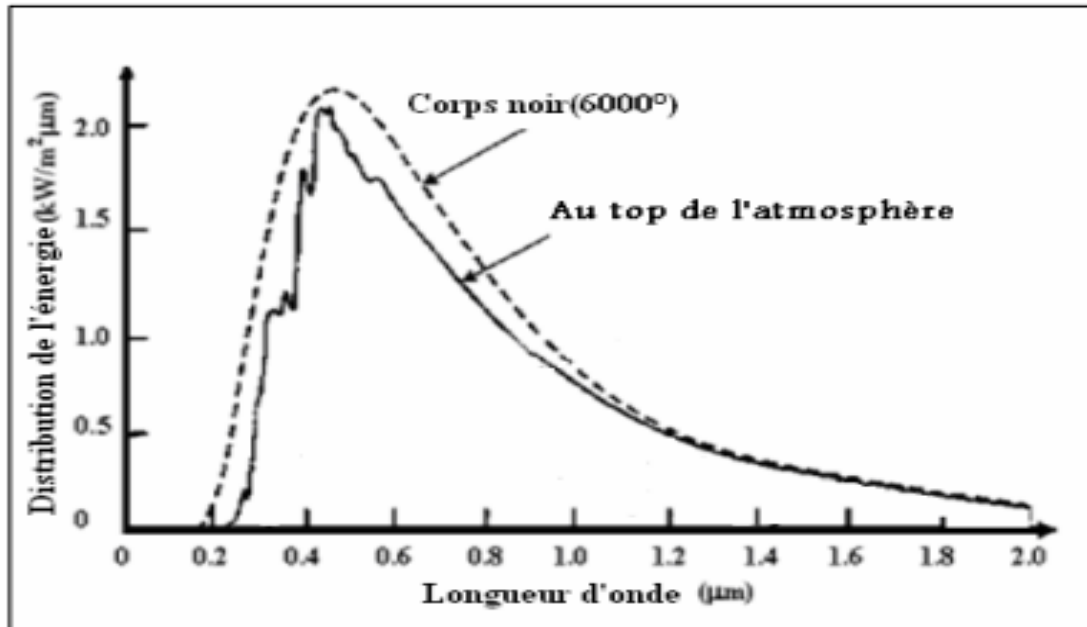


Figure (2.12) : Spectre du Rayonnement Solaire [6]

### 2.8.2. Propriétés des ondes électromagnétiques

Parmi les nombreuses propriétés des ondes électromagnétiques certaines sont fondamentales pour la compréhension des principes de base de l'énergie solaire. Il s'agit de la réflexion, l'absorption et la diffusion.

## 2.9. Rayonnement Solaire hors atmosphère

Le rayonnement solaire hors atmosphère est caractérisé par la constante solaire. Cette dernière est la puissance reçue par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires en dehors de l'atmosphère terrestre. Sa valeur approximative est égale à  $1367 \text{ w/m}^2$  (la valeur adoptée pour notre étude). Suivant les variations de la distance terre soleil ( $\pm 3,4\%$ ), elle varie cependant légèrement au cours de l'année. Elle passe par un maximum en janvier (environ  $1423 \text{ w/m}^2$ ) et un minimum en juin (environ  $1321 \text{ w/m}^2$ ).

Ainsi, le calcul du flux du rayonnement solaire  $I_{sc}$  reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires est assuré par la relation suivante [37]

$$I_{sc} = I_0 \cdot E(j) = I_0 \cdot \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot Nj\right) \right] \quad (2.18)$$

Avec :  $E(Nj) = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot Nj\right)$  correspond à la correction de la constante solaire.

$I_0$  : La valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue ( $1367 \text{ w/m}^2$ )

$Nj$ : Le numéro du jour de l'année ( $j = 1$  pour le 1er janvier), La variation annuelle est représentée par la figure (2-13)

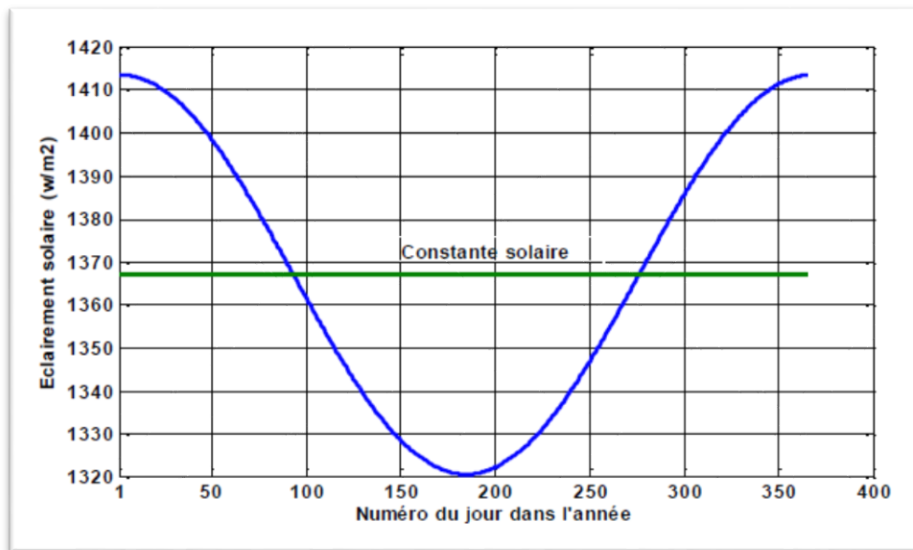


Figure (2-13) : Variation annuelle de la constante solaire [37].

## *Chapitre 3 :*

*Phénomènes d'atténuation du  
rayonnement solaire*

### 3.1. Introduction

L'énergie solaire représentée par la constante solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère  $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ . Cette rayonnement à sa traversée de l'atmosphère, seulement une partie de cette énergie arrive au sol sous différentes formes. Dans cette partie nous allons définir certaines grandeurs à savoir : Irradiation au niveau du sol; Phénomènes d'atténuation du rayonnement solaire; les composantes solaire ; Mesure du rayonnement solaire au sol.

### 3.2. Structure et Composition de L'atmosphère

#### 3.2.1. Structure de L'atmosphère

L'atmosphère se compose essentiellement de Cinq éléments sous couches :

- **la troposphère** qui s'étend jusqu'à 10 à 12 km d'altitude et où la température décroît de  $6.5^\circ\text{C}$  par km, pour atteindre  $-56^\circ\text{C}$  à la base de la couche suivante.
- **la stratosphère** de 12 à 55 km où la température croît de  $-56^\circ\text{C}$  à  $0^\circ\text{C}$  jusqu'à la strato-pause. C'est elle qui contient une mince couche d'ozone.
- **la mésosphère** de 50 à 85 km où la température décroît à nouveau de  $0^\circ\text{C}$  à  $-90^\circ\text{C}$ .
- **l'ionosphère** (confondue avec la thermosphère) et où la température croît régulièrement pour atteindre  $1500^\circ\text{C}$ . C'est elle qui contient les couches réfléchissantes pour les ondes radio (couches d'Heavyside); elle s'étend jusqu'à 700 km d'altitude.
- **l'exosphère** au delà de 700 km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidéral. [38]

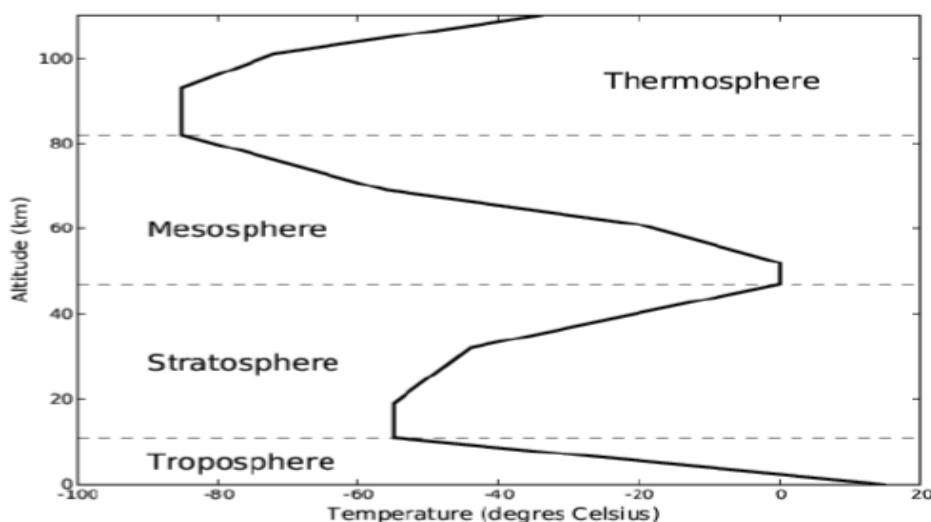


Figure (3.1) : structure de l'atmosphère] 10]

---

### 3.2.2. Composition de l'atmosphère

La composition de l'atmosphère est à peu près la même pour les trois premières couches : 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0.9 % d'argon, 0.03 % de CO<sub>2</sub> et des traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets. L'essentiel des modifications subies par le rayonnement solaire se fait dans la troposphère par diffusion, diffraction, absorption, réfraction par des gaz de température et de densité croissante. La masse gazeuse totale traversée est de 10 tonnes/m<sup>2</sup>, elle équivaut à 7.8 km d'atmosphère ramenée aux conditions de température et de pression dites normales : T=0°C ; p=1013 mbar. Si ces gaz étaient tous ramenés aux conditions normales, on aurait 6.2 km d'azote, 1.7 km d'oxygène, 74 m d'argon, 30 m de vapeur d'eau, 24 m de CO<sub>2</sub>, 14 cm de Néon, 4 cm d'Hélium, quelques mm de Krypton, de méthane de NO et de NO<sub>2</sub> et seulement 5 mm d'ozone.[38]

#### 3.2.2.1. Air sec atmosphérique

Il se compose essentiellement de quatre éléments : l'azote, l'oxygène, l'argon et le dioxyde de carbone, appelés gaz permanents, dont la concentration varie en fonction de la latitude, du vent, ainsi que de la saison. Malgré sa faible concentration, l'ozone est un autre constituant de l'air sec qu'il faut prendre en considération dans les phénomènes d'absorption, en effet la plus parts des radiations ultraviolettes sont absorbées par cet élément, protégeant ainsi la terre de ces radiations à grande énergie.[39]

#### 3.2.2.2. Eau

L'eau présente dans l'atmosphère est principalement localisée dans les 10 kilomètres inférieures de l'atmosphère. Elle provient de l'évaporation de l'eau à la surface de la terre, des océans, des mers principalement, mais aussi de la couverture végétale, sa concentration varie largement géographiquement et temporellement. On trouve l'eau atmosphérique à l'état gazeux mélangé avec l'air (vapeur) mais également sous forme liquide et solide dans les nuages, son influence sur le rayonnement solaire est importante et il convient de déterminer sa teneur dans l'atmosphère [39]

#### 3.2.2.3. Aérosols

Les aérosols sont toutes les particules en suspension dans l'air provenant des activités industrielles et naturelles variées : les polluants, cristaux de sels marins, sable apporté par le vent, les éruptions volcaniques, les poussières de météorites, etc. Les dimensions des aérosols varient de quelques nanomètres à la centaine de micromètres elles sont sensiblement supérieures aux molécules d'air sec et comparables aux longueurs d'ondes du rayonnement lumineux. Ces aérosols sont

repartis dans deux couches l'une troposphérique de 1 à 3 km d'altitude affectée essentiellement par les tempêtes de poussières naturelles et les productions humaines, l'autre stratosphérique de 15km à 25km d'altitude affectée par les éruptions volcaniques et les sources cosmiques. [39]

#### 3.2.2.4. Nuages

Un nuage est un agrégat visible de minuscules gouttelettes d'eau et/ou de cristaux de glace suspendus dans l'atmosphère et peut exister dans une variété de forme et de tailles. Certains nuages sont accompagnés de précipitations : pluie, neige, grêle ou verglas. Tous les nuages sont formés par la suite de l'élévation de l'air. Parfois l'air est forcé de se lever au-dessus des montagnes. Plus habituellement, l'air chaud, étant moins dense, se lèvera au-dessus de l'air froid.[14]

### 3.3. Notion de la masse d'air

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur de l'atmosphère traversée, on introduit la notion de la masse d'air. [40]

#### 3.3.1. Définitions

- La masse d'air étant le trajet optique parcouru par les particules énergétiques solaires lors de la traversée de la couche atmosphérique.
- La masse d'air optique est définie comme l'augmentation relative à la direction du zénith de la longueur du chemin parcouru par les rayons solaires à travers l'atmosphère dans la direction du soleil.[40]

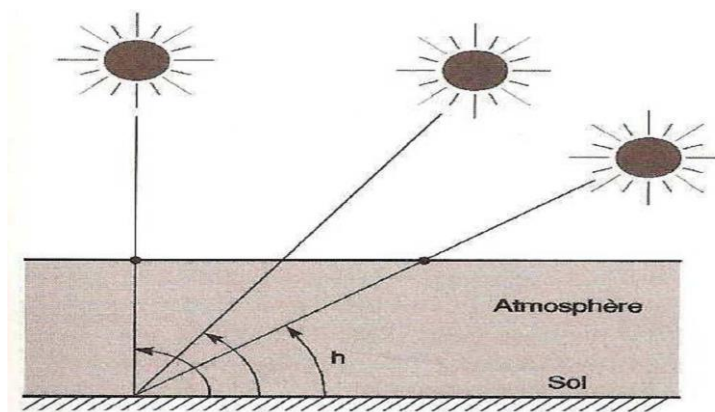


Figure (3-2) : Définition de l'air mass] 31]

#### 3.3.2. Calcul de la masse d'air

De nombreuses formules existent pour déterminer la quantité de la masse d'air, en particulier celle de Kasten et Young [9]

$$m_a = \left( \frac{P(z)}{P_a} \right) \cdot m_r(h) = \frac{1 - 0.1Z}{\sin(h) + 0.50572(h + 6.07995)} \quad (3.1)$$

Une autre formule est proposée pour le calcul de la masse d'air et est donnée par IQBAL :

$$m_a = \left( \frac{P(z)}{P_a} \right) \cdot m_r(h) = \exp(-0,0001184 \cdot Z) \cdot \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0.15(93,885 - \theta_z) - 1.253} \quad (3.2)$$

$m_a$  : est la masse d'air corrigée.

$m_r$  : est la masse d'air relative au niveau de la mer.

$P$  : est la pression atmosphérique moyenne du lieu considéré.

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

$Z$  : est l'altitude du lieu exprimée en km dans l'équation (3.2) et en mètres dans l'équation (3.1)

$h$  : est la hauteur du soleil en degrés.

$$\theta_z = 90^\circ - h \quad (3.3)$$

$\theta_z$  : est l'angle zénithal

### 3.3.3. Liaison entre la masse d'air et l'atténuation du rayonnement solaire

La masse d'air optique relative est directement liée à l'atténuation du rayonnement solaire. Le rayon optique suit en fait un chemin courbé au travers des couches atmosphériques en raison des différents indices optiques. Pour cette raison, la référence au niveau de la mer et l'altitude du site sont pertinentes. La première donne une connaissance sur le chemin optique du rayonnement solaire en fonction de l'élévation du soleil. La différence d'altitude entre le site et le niveau de la mer permet de corriger ainsi le chemin optique en partant des couches atmosphériques inférieures, à l'aide des niveaux de pression (qui modifient les indices optiques et par conséquent la courbure du rayonnement transmis). [40]

## 3.4 Atténuation Du Rayonnement Solaire

L'atmosphère modifie le spectre du rayonnement solaire à travers les processus d'absorption par les différents gaz, la diffusion par les molécules d'air, les aérosols et les nuages.

### 3.4.1 L'absorption

L'absorption par les gaz atmosphériques est dite sélective, car elle n'affecte que des radiations de longueurs bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau ( $H_2O$ ), à l'ozone ( $O_3$ ), à l'oxygène ( $O_2$ ) et au gaz carbonique ( $CO_2$ ). La vapeur d'eau qui est le constituant le plus important

après l'air, présente plusieurs bandes d'absorption situées à des longueurs d'ondes supérieures à 0,65  $\mu\text{m}$ . La bande allant de 2,4 à 2,8  $\mu\text{m}$  est la plus large. De plus, à ce niveau, l'absorption est la plus forte. L'absorption propre à la vapeur d'eau est d'environ 10% [11-18]. L'ozone est le principal absorbant dans l'ultraviolet. Il est caractérisé par une forte bande d'absorption à des longueurs d'ondes inférieures à 0,3  $\mu\text{m}$  et une faible absorption entre 0,45 et 0,7  $\mu\text{m}$ . L'oxygène a deux bandes étroites de faible atténuation dans le visible à 0,69 et 0,76  $\mu\text{m}$ . Le gaz carbonique absorbe le rayonnement dans cinq bandes se trouvant respectivement à 1,46, 1,60, 2,04, 2,75 et 4,27  $\mu\text{m}$

### 3.4.2 Diffusion

La diffusion est une redistribution du rayonnement solaire qui interagit avec les molécules gazeuses, les gouttelettes et les aérosols dans toutes les directions sans changement de longueur d'onde. Selon la taille des particules diffusantes par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, on distingue deux types de diffusion : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie. La diffusion de Rayleigh affecte surtout les molécules d'air pur et sec comme l'azote et l'oxygène. C'est une diffusion sélective causée par les particules dont le diamètre est très inférieur à la longueur d'onde incidente. En moyenne, en prenant en compte la course du soleil et les différentes longueurs d'onde, environ 13% de rayonnement solaire incident subissent la diffusion de Rayleigh. [17] Le coefficient d'extinction caractérisant ce type de diffusion est donné par la relation suivante:

$$K_r(\lambda) = 0.008735 \lambda^{-4} \quad (3.4)$$

La diffusion de Mie désigne la diffusion par les particules dont la taille est de même ordre de grandeur que les longueurs d'onde, comme pour la vapeur d'eau et les aérosols. Le coefficient d'extinction s'écrit [12] :

$$K_a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (3.5)$$

Où  $\alpha$  est lié à la taille des particules et varie entre 0 (pour les grosses particules) et 4 (pour les petites particules). La valeur moyenne pour les aérosols étant  $\alpha = 1,3$  Et  $\beta$ , le coefficient de trouble atmosphérique établi par Angström. Il représente la quantité d'aérosols présente dans l'atmosphère. Il vaut 0.02 pour un ciel très pur (bleu profond) et 0.2 pour un ciel pollué. [16]

### 3.4.3 Réflexion du rayonnement solaire

Lors d'un changement de milieu de propagation, une partie de l'onde électromagnétique repart vers le milieu d'origine, c'est la réflexion. Donc un corps qui reçoit une quantité de REM peut en réfléchir une partie. [40]

Lorsqu'il s'agit d'énergie solaire réfléchi par une portion d'espace terrestre, on parle d'albédo.



### 3.5. Albédo

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

$$\text{Alb} = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie recue}}$$

*Table (3.1): Valeurs typiques de L'albédo du sol [23]*

Nature du sol	Valeurs	Valeurs moyennes
Sable sec	0.1 à 0.4	0.25
Déserts	0.2 à 0.4	0.3
Prairies et herbages	0.2 à 0.3	0.25
Forêt	0.1 à 0.2	0.15
Neige fraîche	0.7 à 0.8	0.75
Neige ancienne	0.5 à 0.7	0.6
Habitat très dense	0.1 à 0.2	0.15

### 3.6 Composantes solaires

Le rayonnement solaire est caractérisé par les composantes suivantes :

#### 3.6.1. Direct (I):

Le rayonnement solaire direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages. Il est mesuré à l'aide d'un pyréliomètre constamment dirigé vers le soleil [15]

#### 3.6.2 Diffus (D)

C'est la composante du rayonnement solaire incidente sur un plan récepteur après avoir été diffusée par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol et subissant le phénomène de multi-réflexions. Elle parvient ainsi de toute la voûte céleste. [13]

Il est mesuré à l'aide d'un Pyranomètre .

#### 3.6.3 Global (G)

Le rayonnement global correspond à la somme des deux composantes du rayonnement solaire définies précédemment à savoir la composante directe et diffuse [19].

$$G = I + D \quad (3.6)$$

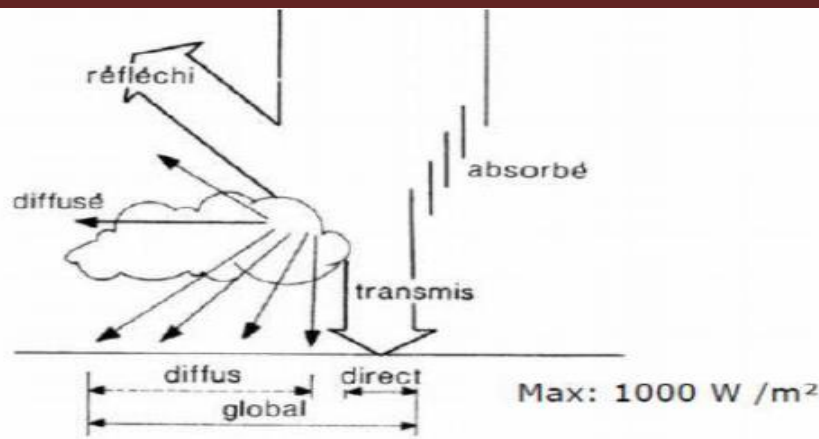


Figure (3-3): Rayonnement direct, diffus et global [20]

### 3.7. Indice de Clarté

Le rapport entre le rayonnement au sol ( $H$ ) et le rayonnement extraterrestre ( $H_0$ ) est appelé indice de clarté. Les valeurs de ce dernier varient selon les endroits et les saisons. Il est défini par :

$$K_t = H/H_0 \quad (3.7)$$

La donnée  $H$  est la valeur mesurée de l'irradiation globale (journalière) sur une surface horizontale. Cette donnée est généralement disponible et peut être mesurée par un pyranomètre. Cependant,  $H_0$  peut être calculée par la formule ci-après :

$$H_0 = \frac{1440}{\pi} \cdot I_0 \left[ 1 + 0.034 \cos\left(\frac{2\pi NJ}{365}\right) \right] \cdot [\cos(\phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\phi) \times \sin(\delta)] \quad (3.8)$$

Où, est la constante solaire égale à  $8.2 \text{ GJ/m}^2 \cdot \text{mn}$ ,  $NJ$  : le numéro du jour dans l'année à partir du 1<sup>er</sup> Janvier,  $\delta$  : la déclinaison solaire,  $\omega$  : l'angle horaire au coucher du soleil. [41]

### 3.8. Fraction de d'isolation

On dit qu'il y a insolation lorsque le disque solaire est bien visible sur le fond diffus du ciel, la durée d'insolation d'une journée est la durée pendant laquelle l'éclairement énergétique du rayonnement solaire direct dépasse un seuil fixé par convention à  $120 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$ . En l'absence de nuage la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour ; les durées d'insolation mensuelle et annuelle sont un simple cumul des durées d'insolation des diverses journées.

L'instrument de mesure de la durée d'insolation s'appelle l'héliographe. Soit ( $S$ ) la durée d'insolation mesurée et ( $S_0$ ) la durée du jour (le temps entre l'heure du coucher et l'heure du lever du soleil.), on définit la fraction d'insolation ( $\sigma$ ) comme suit [16].

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (3.9)$$

Avec :

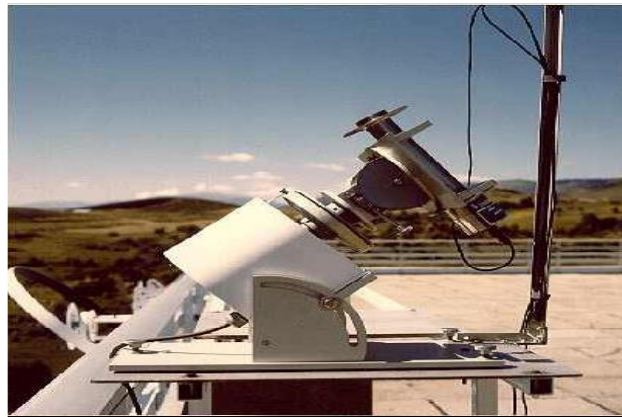
$$S_0 = \frac{1}{2} \cos^{-1}(-\tan(L) \cdot \tan(\delta)) \quad (3.10)$$

### 3.9 Mesure du rayonnement solaire au sol

La mesure du rayonnement solaire est assurée par des appareils spécifiques :

#### 3.9.1 Pyrhéliomètre

Est un instrument destiné à la mesure de l'intensité du rayonnement solaire direct. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi. Ainsi cet instrument ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil.[15]



*Figure(3.4) :Pyrhéliomètre[42]*

#### 3.9.2 Pyranomètre

Est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie.[15]



*Figure (3.5):Pyranomètr [43]*

### 3.9.3 Héliographe

C'est un appareil simple constitué d'une sphère de verre focalisant les rayons du soleil sur une bande de papier graduée en heures. Ce papier spécial est brûlé lorsque le soleil brille et lorsque l'éclairement du rayonnement direct est supérieur à  $120 \text{ w/m}^2$  [30]. Lorsque le soleil atteint une hauteur apparente de 3 à 5 degrés au dessus de l'horizon.



*Figure (3.6) : Héliographe pour la mesure de la durée d'insolation [11]*

### 3.10 Conclusion

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se compose du rayonnement direct provenant directement du soleil et du rayonnement diffus, la somme du direct et du diffus donne le rayonnement global. Ces composantes peuvent être mesurés directement par différents instruments de mesure ou bien elles peuvent être estimées par des modèles analytiques qui sont établis après plusieurs mesures expérimentales. On a présenté dans ce chapitre un récapitulatif de quelques notions de base relatif au rayonnement solaire hors atmosphère . Le rayonnement solaire provenant du soleil en pénétrant dans l'atmosphère subit des atténuations par absorption et diffusion. Le rayonnement solaire est influencé par deux principaux paramètres, en premier lieu on trouve les constituants de l'atmosphère, et en second c'est le mouvement de la terre .

# *Chapitre 4 :*

*Description Des Modèles (Lacis  
& Hansen et Davies & Hay)*

## 4.1. Introduction

La connaissance du potentiel énergétique solaire en un site donné est un paramètre important pour les concepteurs des systèmes de l'énergie solaire. C'est dans cette perspective que s'inscrit notre travail, par l'étude et la simulation de quelques modèles de calcul du rayonnement solaire. Dans ce chapitre, nous allons décrire des modèles d'estimation du rayonnement solaire : le modèle de Lacis & Hansen, le modèle de Davies & Hay, le modèle de Bird & Hulstrom et celui d'Atwater & Ball, dont des travaux sont présentés dans la littérature.

## 4.2. Classification des modèles radiométriques

Les modèles radiométriques sont des modèles pour calculer les différentes composantes du rayonnement solaire spécialement dans les sites où il n'existe pas de stations radiométriques.

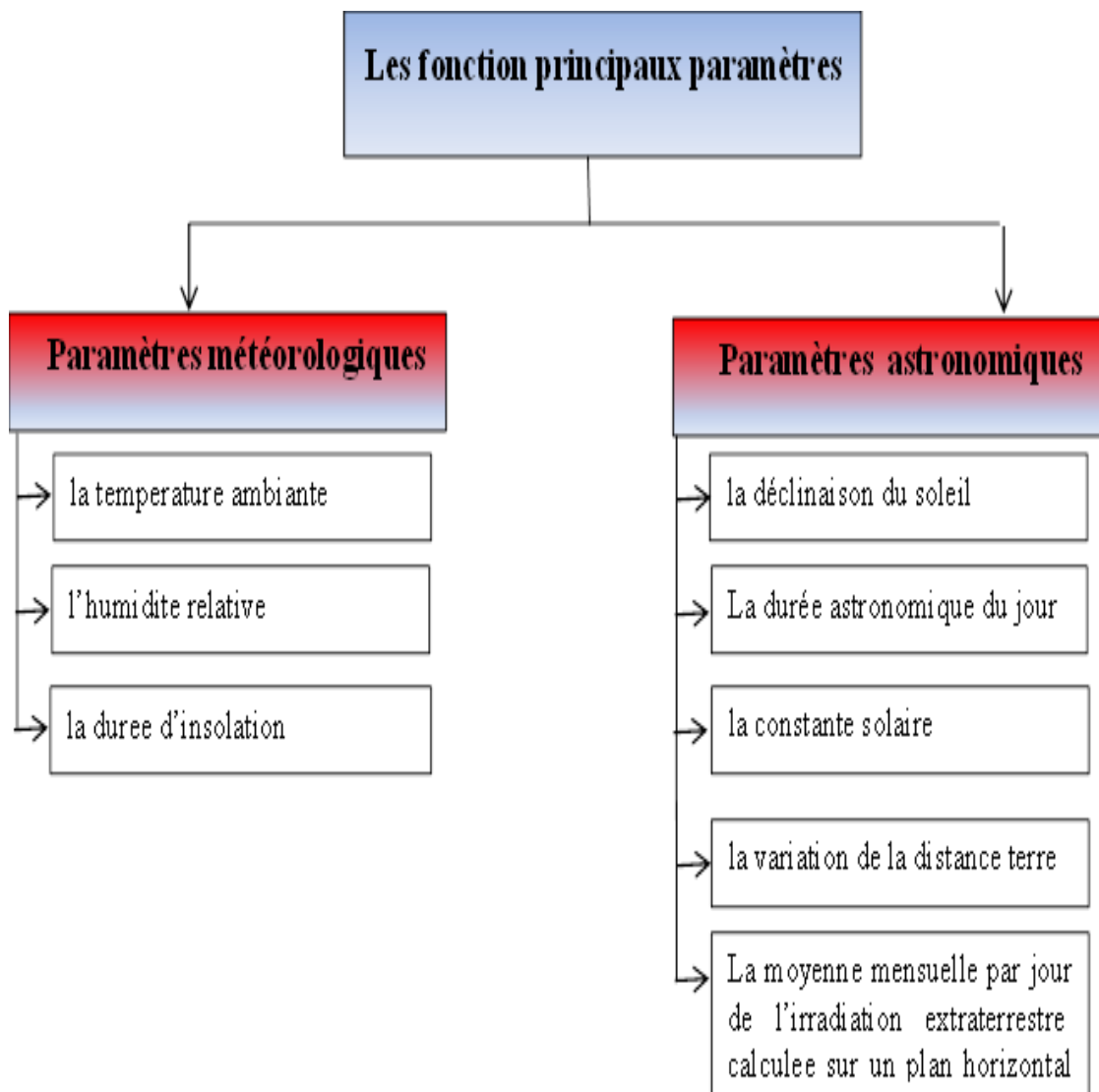


Figure (4.1) : Fonction principaux paramètres

### 4.2.1. Modèles Spectraux

#### 4.2.1.1. Modèle de LECKNER

Établi par Bo-Leckner en 1978 [25], ce modèle donne une description du comportement physique de l'atmosphère telle que l'absorption et la diffusion de ses constituants. Les propriétés d'atténuation de l'atmosphère sont présentées sous une forme de coefficients de transmission permettant de calculer le rayonnement spectral direct, diffus et global au niveau du sol.

### 4.2.2 Modèles Météorologiques

Les modèles météorologiques utilisent des relations linéaires permettant de transformer les données mesurées au sol (l'insolation, la température,...) en flux global d'irradiation solaire. Ces modèles ont l'avantage d'être appliqués à n'importe quel état du ciel (ciel quelconque).

### 4.2.3. Modèles semi-empiriques

Les modèles semi empiriques utilisent des relations mathématiques en fonction de la masse d'air pour calculer les effets des constituants de l'atmosphère sur l'atténuation du rayonnement direct et la génération du rayonnement diffus les modèles sont :

#### 4.2.3.1. Modèle de Liu et Jordan

Ce modèle suppose que le rayonnement diffus du ciel est isotrope, La relation de Liu & Jordan généralisée pour le calcul de l'éclairement global sur un plan incliné d'un angle ( $\beta$ ) et donnée dans la référence [44].

#### 4.2.3.2. Modèle de CAPDEROU

Le modèle de Capderou utilise le 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 irradiances directes et diffusées par ciel clair. La connaissance de facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement directe 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  $T_L^*$  par ciel clair [45] est utilisé.

### 4.2.3.3. Modèle de Lacis & Hansen

#### a) Calcul du rayonnement solaire global

La formule générale proposée par Lacis & Hansen pour le calcul du rayonnement solaire global sur un plan horizontal est donnée par l'équation (4.01): [46]

$$G = I_{sc} \times \cos \theta_z \left[ \frac{(0.647 - \rho_s' - \alpha_0)}{(1 - 0.0685\rho)} + 0.353 - \alpha_w \right] \quad (4.01)$$

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

$$I_{sc}(n_j) = I_0 \times \left[ 1 + 0.033 \times \cos \left( \frac{360}{365} \cdot (n_j - 3) \right) \right] \quad (4.02)$$

avec  $I_0$ , la constante solaire moyenne égale à  $1367 \text{ W.m}^{-2}$  et  $n_j$ , le numéro de jour.

Dans l'année ( $n_j = 1$  pour le 1er Janvier et  $n_j = 365$  pour le 31 Décembre).  $\theta_z$  est l'angle zénithal,  $\theta_z = 90^\circ - h$ . où  $h$  est la hauteur du soleil. Le coefficient  $\alpha_0$  correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone, est calculé par la relation (4.03) :

$$\alpha_0 = \frac{0.02118 U_0}{1 + 0.042 U_0 + 3.2310^{-4} U_0^2} + \frac{1.082 U_0}{(1 + 138.6 U_0^{0.805})} + \frac{0.0658 U_0^0}{1 + (103.6 U_0)^3} \quad (4.03)$$

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

$$U_0 = I \times m_r \quad (4.04)$$

où,  $m_r$  est la masse d'air optique relative donnée l'équation (4.05) :

$$m_r = [\cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (4.05)$$

Et,  $I$  représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone réduite (cm)). [46]

$$I = \{235 + [150 + 40 \sin(0.9856(n_j - 30)) + 20 \sin(3L)] [\sin^2(1.28\varphi)]\} / 1000 \quad (4.06)$$

$L$  et  $\varphi$  sont respectivement la longitude et la latitude du lieu.  $\alpha_w$ , représente le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau, est donné par l'équation (4.07):

$$\alpha_w = \frac{2.9 X_w}{(1 + 141.5 X_w)^{0.653} + 5.925 X_w} \quad (4.07)$$



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

$$X_w = m_a \times U_w \quad (4.08)$$

$U_w$  est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm). Elle est donnée par l'équation (4.09) :

$$U_w = \frac{0.493}{T} HR \times \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (4.09)$$

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

$$m_a = m_r \left(\frac{P}{1013}\right)^{0.75} \times \left(\frac{273}{T}\right)^{0.15} \quad (4.10)$$

$P$  est la pression atmosphérique (mbar).

$$P = P_0 \cdot \exp(-0.0001184 \times z) \quad (4.11)$$

$P_0$  est la pression atmosphérique au niveau de la mer ( $P_0 = 1013$  mb) ;  $z$ , l'altitude du site (m), par rapport au niveau de la mer ;  $T$ , la température ambiante (K) et  $HR$ , l'humidité relative (%). [46]

#### 4.2.3.4. Modèle de Davies & Hay

Ce modèle propose des relations empiriques permettant d'estimer les différents coefficients de transmission du rayonnement solaire (Transmittance d'ozone, Vapeur d'eau, d'aérosol et de mélanges gazeux), pour déduire les différentes masses atmosphériques et les composantes du rayonnement solaire. [24]

##### a) Calcul du rayonnement direct

La relation proposée par Davies & Hay pour le calcul du rayonnement direct est exprimée par l'équation (4.12) : [46]

$$I = I_{sc} \times [(1 - \alpha_0) \cdot \tau_r - \alpha_w] \tau_a \times \cos \theta_z \quad (4.12)$$

Où,  $\alpha_0$  est le coefficient correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone, calculé par l'équation (4.03) ; et  $\tau_r$  le coefficient de transmission après diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh, représenté par Davies *et al.* selon l'équation (4.13) :

$$\tau_r = 0.972 - 0.08262m_a + 0.00933m_a^2 - 0.00095m_a^3 + 0.000437m_a^4 \quad (4.13)$$

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

$$m_a = \frac{P}{P_0} m_r = \frac{\exp(-0.0001184 \times z)}{\cos(\theta_z) + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}} \quad (4.14)$$

Le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau  $\alpha_w$ , est donné par l'équation (4.07).

Le coefficient de transmission après diffusion par les aérosols  $\tau_a$  est proposé par Mächler selon l'équation (4.15).

$$\tau_a = (0.12445\alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.125\alpha) \exp[-\beta m_a (1.089\alpha + 0.5123)] \quad (4.15)$$

et  $\beta < 0.5$  tels que :

$\alpha$  et  $\beta$  sont respectivement le coefficient caractérisant la visibilité du ciel et le coefficient de trouble d'Angstrom. Leur calcul est basé sur la détermination expérimentale de deux coefficients d'atténuation  $k_{\lambda 1}$  et  $k_{\lambda 2}$  correspondant aux longueurs d'onde où l'absorption par la vapeur d'eau n'intervient pas ( $\lambda_1 = 380$  nm et  $\lambda_2 = 500$  nm respectivement). Les mesures utilisées dans ce travail ont été fournies par le NCDC (National Climatic Data Center) à Asheville en Caroline du Nord. Sachant que  $\alpha$  est proche de 0 pour les petites particules, croît avec la taille des particules et atteint 4 pour les grosses particules. Dans notre travail. [46]

On prend  $\alpha = 1.3$ . Le coefficient  $\beta$  vaut 0.02 pour un ciel très pur (bleu profond) et 0.2 pour un ciel pollué (bleu laiteux)

### b) Calcul du rayonnement diffus

Le rayonnement diffus sur un plan horizontal est la somme des trois composantes diffuses :

$$D_r = I_{sc} \tau_0 \tau_a (1 - \tau_r) 0.5 \times \cos \theta_z \quad (4.16)$$

Représente le rayonnement diffus après la diffusion de Rayleigh, dont  $\tau_0$  est le coefficient de transmission après absorption par l'ozone

$$\tau_0 = 1 - \alpha_0 \quad (4.17)$$

Le coefficient  $\alpha_0$  qui correspond à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone est calculé par l'équation (4.03).

$$D_a = I_{sc} (\tau_0 \tau_r - \alpha \omega) \times [F_c \times \omega_0 (1 - \tau_a)] \cos \theta_z \quad (4.18)$$

Est le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols.

Avec,

$\omega_0$ , qui est l'albédo de dispersion de l'atmosphère. En pratique, la détermination de ce coefficient est quasi-impossible. En effet, il dépend de la nature, de la forme, et des propriétés optiques des particules en suspension. On attribue généralement une valeur à  $\omega_0$  indépendante de la longueur

d'onde. Pour les régions urbaines/industrielles,  $\omega_0$  vaut 0.6, et pour les régions rurales/agricoles, il vaut 0.9, et  $F_c$  qui est le coefficient de dispersion direct de l'atmosphère. Le Tableau 1 donne des valeurs de ce facteur en fonction de l'angle zénithal. [46]

L'expression du rayonnement diffus issu du phénomène de multi réflexion est donnée par l'équation (4.19) :

$$D_m = \frac{(I + D_a + D_r) \times \rho \times \rho'_a}{(1 - \rho \times \rho'_a)} \quad (4.19)$$

où,  $\rho'_a$  est l'albédo du ciel clair du site considéré, qui est donné par la relation (4.20):

$$\rho'_a = 0.0685 + 0.17 \omega_a \times (1 - \tau'_a) \quad (4.20)$$

Avec, la contrainte sur  $\tau_a$  indiquant que le coefficient de transmission du rayonnement solaire après diffusion par les aérosols devrait être calculé pour une valeur de masse d'air égale à 1.66 ( $P/P_0$ ). [46]

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

*Table (4.1) : Valeurs du facteur  $F_c$  en fonction de la distance zénithale d'après Robinson*

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

### c) Calcul du rayonnement global

Le rayonnement global sur un plan horizontal est calculé par :

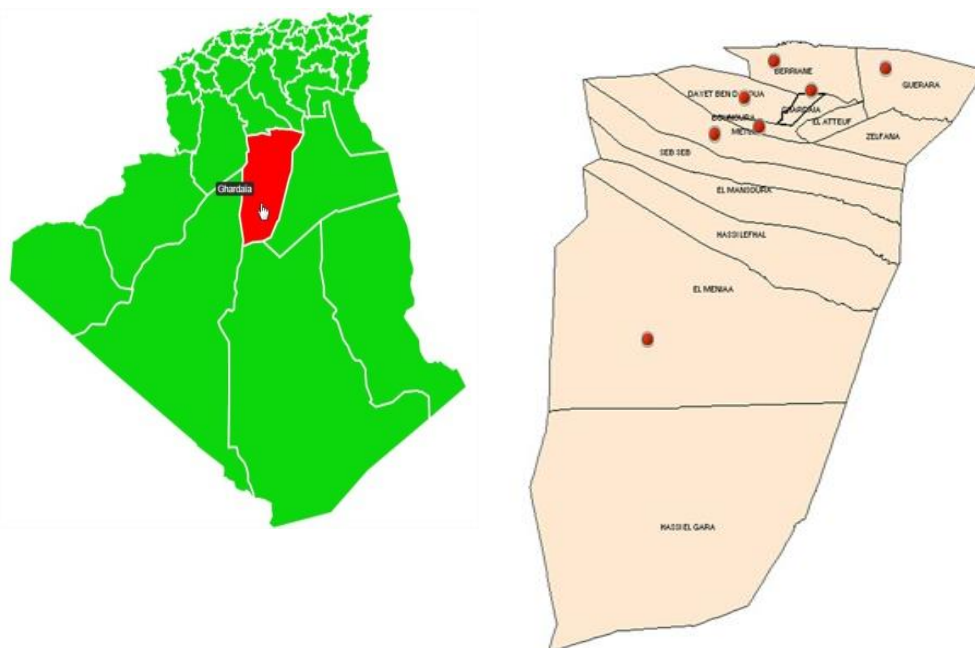
$$G = I + D \quad (4.21)$$

## 4.3. Situation géographique de Ghardaïa

La Wilaya de Ghardaïa se situe au centre de la partie Nord de Sahara. Elle est issue du découpage administratif du territoire de 1984. Elle est composée des anciennes daïra de Ghardaïa, Metlili et El-Ménéa [35]. Ses coordonnées géographiques selon le système longitude latitude WGS 84 sont :

- Altitude : 480m.
  - Latitude : 32°30' Nord.
  - Longitude : 3° 45' Est.
  - Albédo : 0.2
- La Wilaya de Ghardaïa est limitée :

- Au Nord par la Wilaya de Laghouat (200 Km) ;
- Au Nord Est par la Wilaya de Djelfa (300 Km) ;
- A l'Est par la Wilaya d'Ouargla (190 Km) ;
- Au Sud par la Wilaya de Tamanrasset (1370 Km) ;
- Au Sud- Ouest par la Wilaya d'Adrar (800 Km) ;
- A l'Ouest par la Wilaya d'El-Bayad (350 Km) ;



*Figure (4.2) : carte de site de Ghardaïa*

La Wilaya couvre une superficie de 84660,12 km<sup>2</sup> (DPSB). La wilaya est répartie sur 13 communes, la plus grande est celle d'El-Goléa avec une superficie 2.392.068 ha et la plus petite est la commune de Ghardaïa avec une superficie de 30.647 ha montrent l'importance des superficies des parcours en fonction de la superficie totale de chaque commune (D.S.A.GHARDAÏA, 2010).

#### **4.4. Caractéristiques climatiques**

Les caractères du climat saharien sont dus tout d'abord à la situation en latitude, au niveau tropique, ce qui entraîne de fortes températures, et au régime des vents qui se traduit par des courants chauds et secs [32]. Les données climatologiques disponibles au niveau de la station de Ghardaïa permettent de donner un aperçu général des conditions climatiques de la région étudiée.

#### 4.4.1 Températures

La température est considérée comme étant le facteur le plus important. Elle agit sur la répartition géographique des animaux et des plantes ainsi que sur la durée de leurs cycles biologiques. Elle conditionne de ce fait les différentes activités de la totalité des espèces et des communautés vivant dans la biosphère [33].

#### 4.4.2. Pluviométrie

Elle est caractérisée par leur faible 11,32 mm quantité et les pluies torrentielles sont rares [33]. Un maximum au mois septembre et minimum en moins de Juillet avec 1,42 mm, la moyenne annuelle est de 5,78 mm.

#### 4.4.3. Humidité relative

Pendant l'Eté, elle chute jusqu'à 20,35% au mois de Juillet, alors qu'en Hiver elles'élève etatteint un maximum de 48,62% au mois de Janvier.

#### 4.4.4. Vents

Le vent est le facteur principal de la topographie désertique. Il influe sur les moyennes de température et d'humidité, ainsi que la valeur d'évaporation [34].. La vitesse de vents la plus élevée est enregistrée en Avril 14,17 m/s tandis que la plus faible est celle du mois d'Aout 10,54 m/s. La vitesse moyenne annuelle du vent est de 12,06 m/s.

### 4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des modèles d'estimation du rayonnement solaire basés sur les mesures au sol. Pour le calcul des différentes composantes du rayonnement solaire direct et diffus et le global. Ils utilisent des équations mathématiques pas trop lourdes pour l'étude de gisement solaire et l'estimation de l'énergie solaire incidente.

# *Chapitre 5 :*

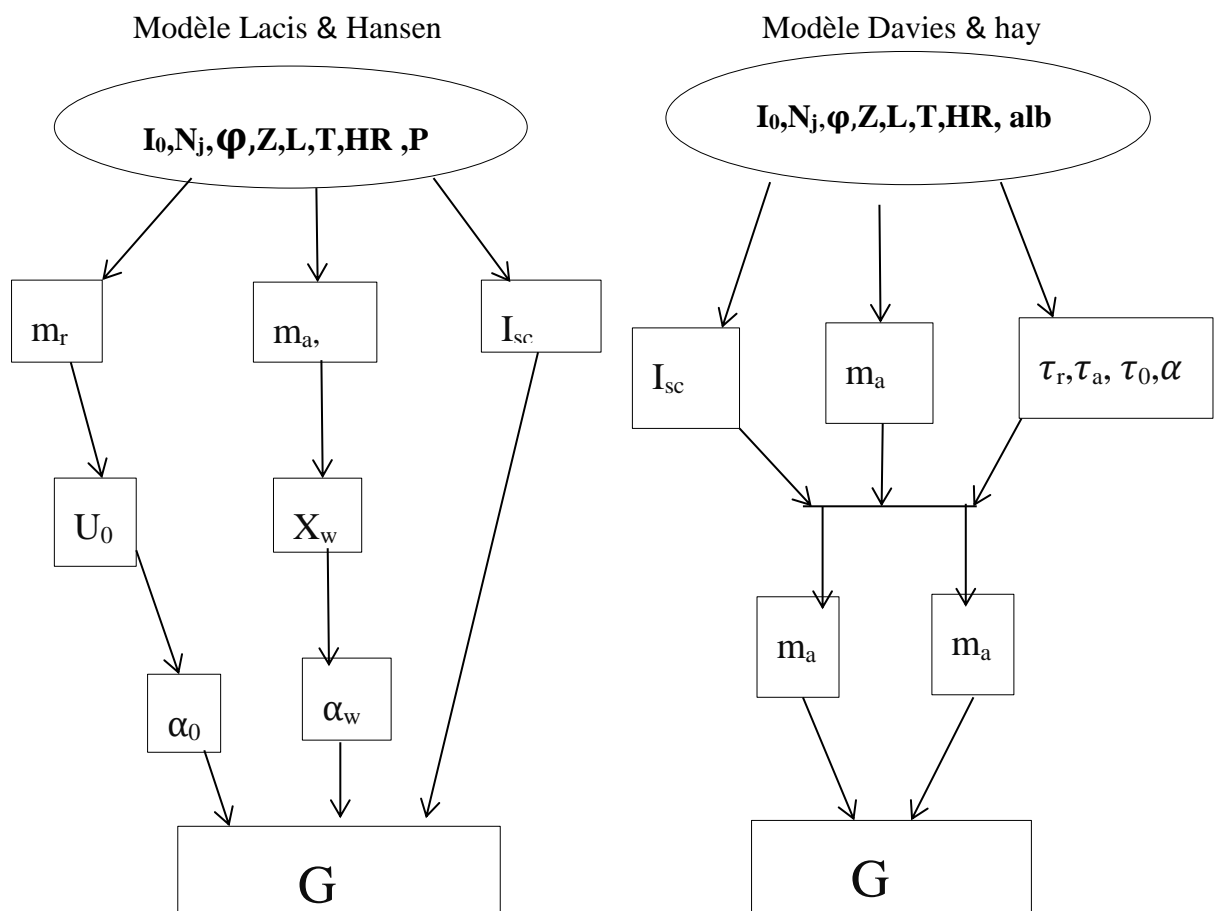
## *Présentation des Resultats*

**5.1. Introduction**

L'objectif de ce travail est de comparer les valeurs du rayonnement solaire mesurées avec celles qui sont prévues par les deux modèles semi-empiriques, à savoir ; le modèle LACIS & HANSEN et le modèle DAVIES & HAY, une statistique est menée afin de déterminer la validité des deux modèles. Ils sont basés sur la détermination des coefficients de transmission des différents constituants atmosphériques. L'estimation du rayonnement solaire est faite pour le site de Ghardaia. Dans ce chapitre nous avons réalisé un programme de simulation en utilisant Matlab, basé sur le modèle LACIS & HANSEN et le modèle DAVIES & HAY et présenté les résultats de la simulation numérique du système de poursuite solaire durant :

- ✚ La journée du solstice d'hiver (21 décembre).
- ✚ La journée du solstice d'été (21 juin).
- ✚ La journée de l'équinoxe de printemps (21 mars).

Organigramme pour les deux modèles :



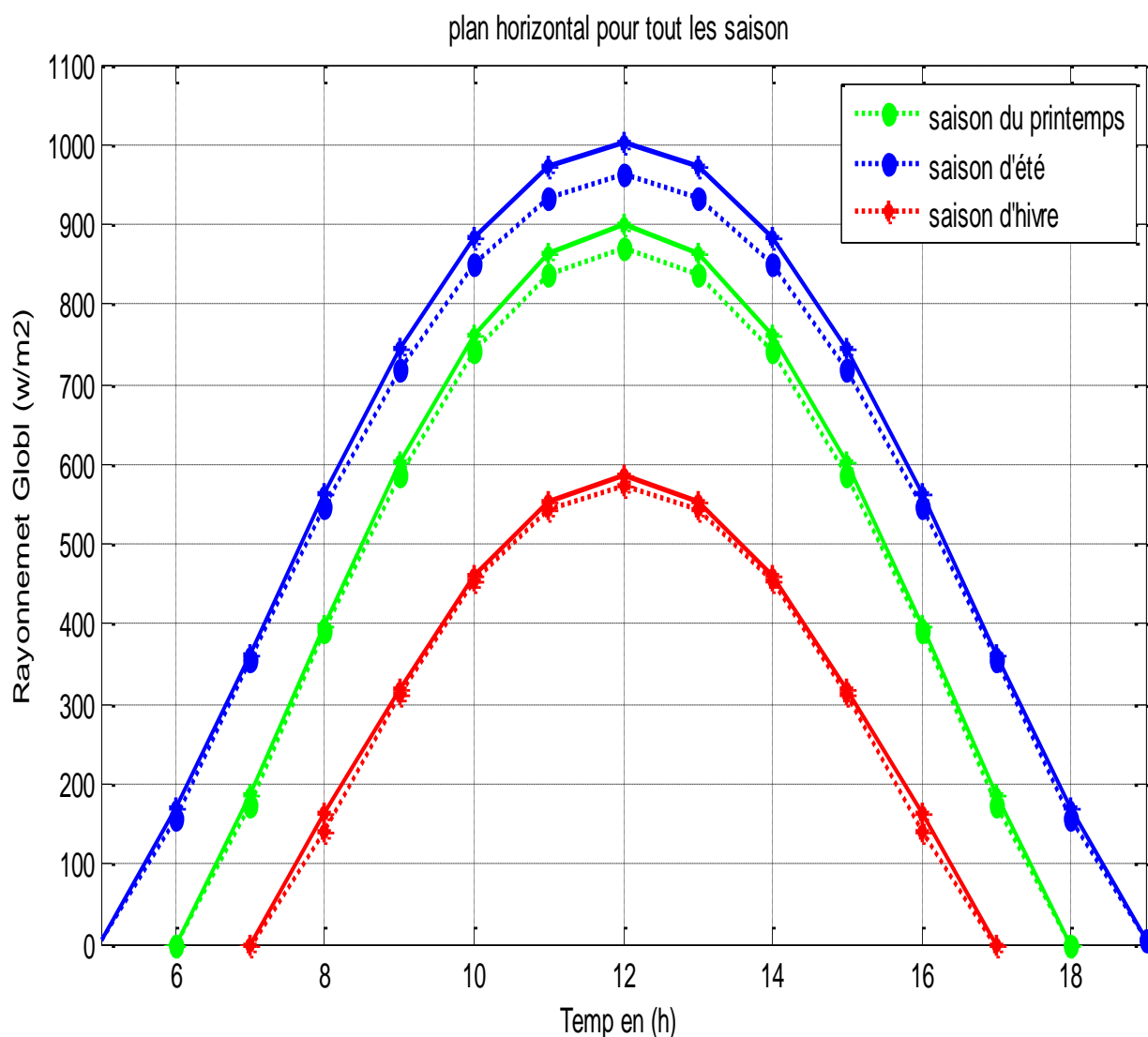
Figure(5.1) : Organigramme des modèles (davies et hay ; lacis et hansen)

## 5.2. Présentation des Résultats de Simulation et discussion

*Remarque : dans toutes les figures on utilise (.....) pour le modèle de LACIS & HANSEN et (—) pour le modèle de DAVIES & HAY*

### ➤ Pour un Plan horizontal

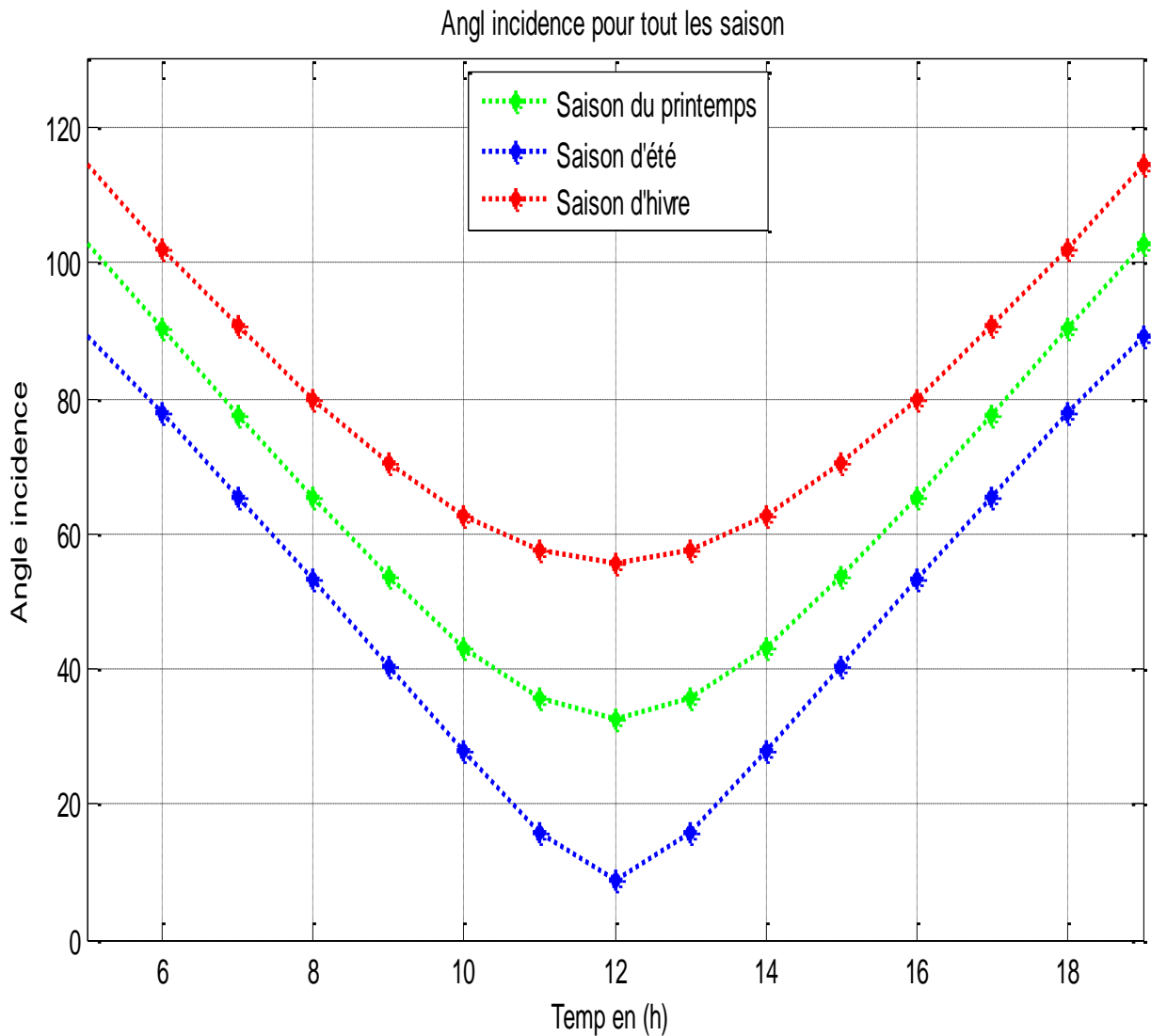
Les variations de l'éclairement global incident sur un plan horizontal, pour un lieu de latitude 32.2° en fonction du temps pour différentes saisons, modélisé par les deux modèles **LACIS & HANSEN**, **DAVIES & HAY** sont représentées sur la figure (5.2)



*Figure (5-2) : Variations de l'éclairement global incident sur un plan horizontal pour trois saisons*



La figure (5.3) suivante illustre la variation de l'angle d'incidence pour différents jours types de l'année (hiver, été et printemps)



*Figure (5.3) : Variation de l'Angle d'incidence pour un plan horizontal*

Pour un plan horizontal on remarque en première vue que les courbes qui présentent la variation de l'angle d'incidence et les courbes qui présentent la variation de l'éclairement ayant une allure inverse pour les deux modèles

➤ Pour un plan vertical

Les figures ci-après (Figure 5.4 - 5.5...5-9), illustrent l'évolution du rayonnement global et d'angle d'incidence pour un plan vertical suivant différents orientations  $\alpha$ . Les courbes ont été dressées sur la même figure, les résultats de trois périodes différentes de l'année sont représentés.

✚ Saison du d'hiver 21/12 ( $\beta, \alpha$ ) = (90°, 0°); ( $\beta, \alpha$ )=(90°, 90°); ( $\beta, \alpha$ )=(90°,-90°)

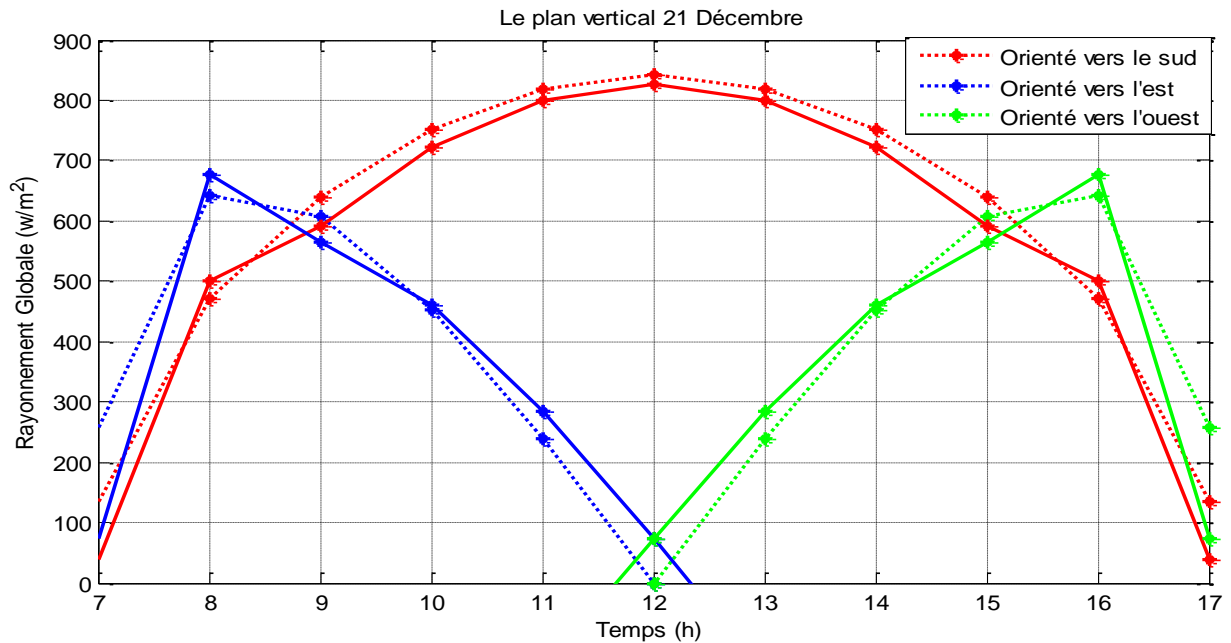


Figure (5.4) : Rayonnement solaire au cours de 21 décembre pour un plan Vertical vertical suivant différents orientations

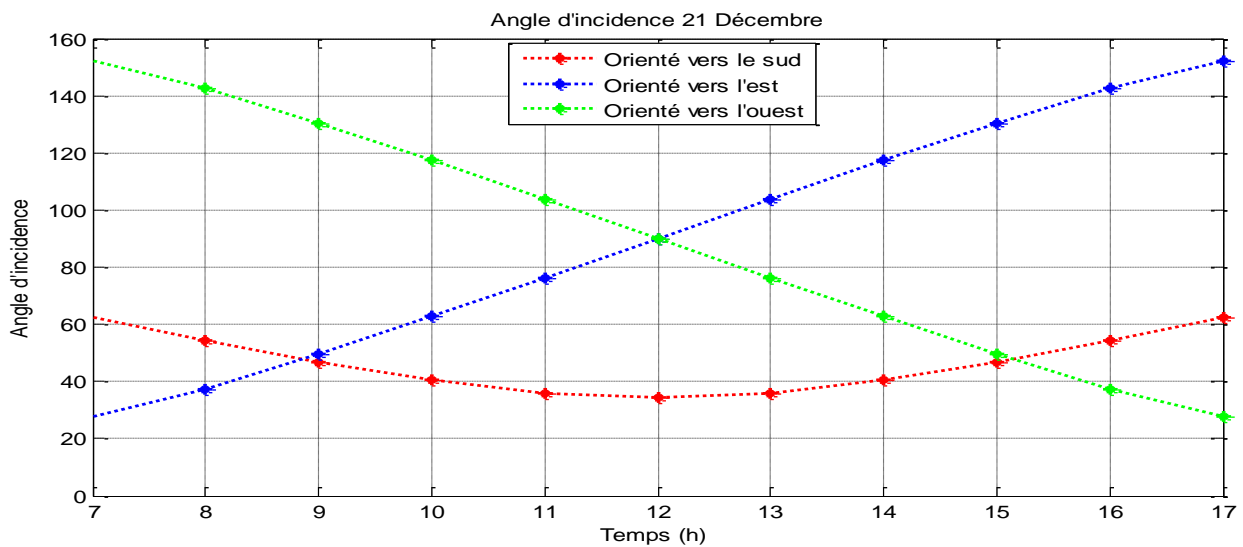


Figure (5.5) : Variation de l'Angle d'incidence du 21 décembre pour un plan Vertical vertical suivant différent orientations

☀ Saison d'été 21/06  $(\beta, \alpha) = (90^\circ, 0^\circ); (\beta, \alpha) = (90^\circ, 90^\circ); (\beta, \alpha) = (90^\circ, -90^\circ)$ :

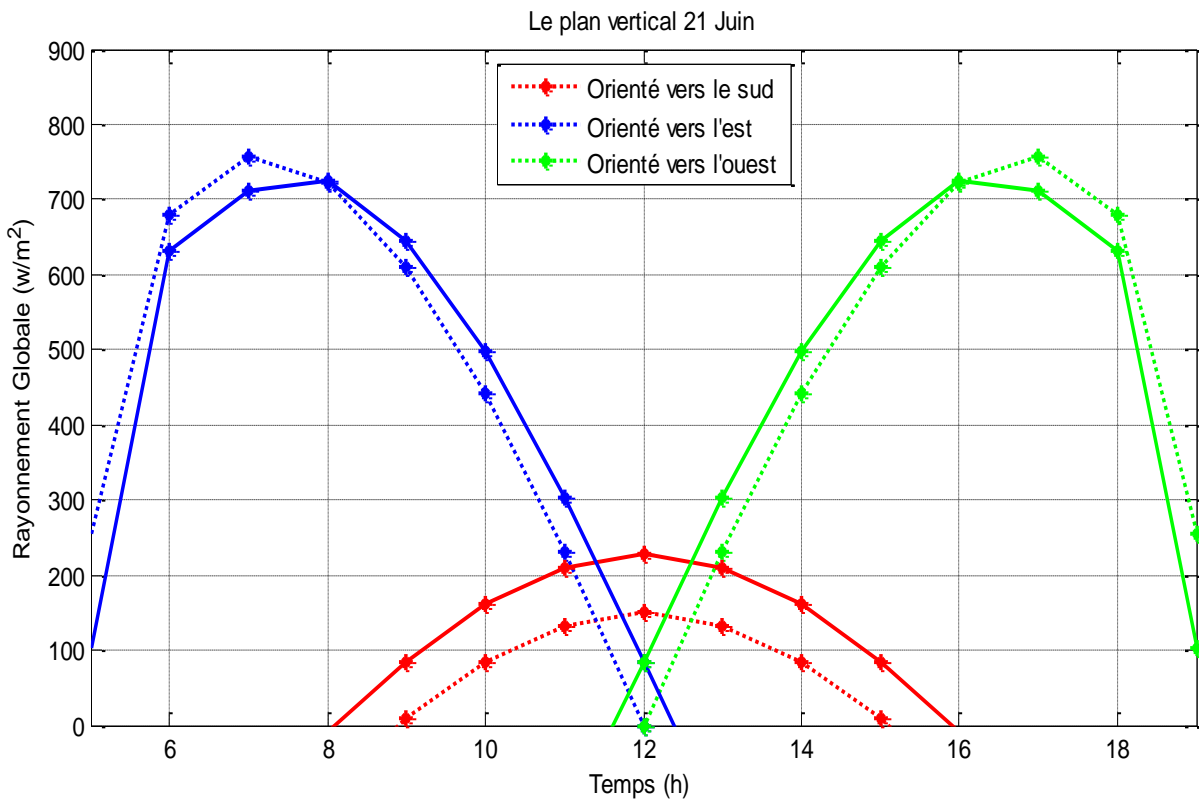


Figure (5.6) : Eclairage solaire du 21 Juin pour un plan Incliné suivant différentes orientations

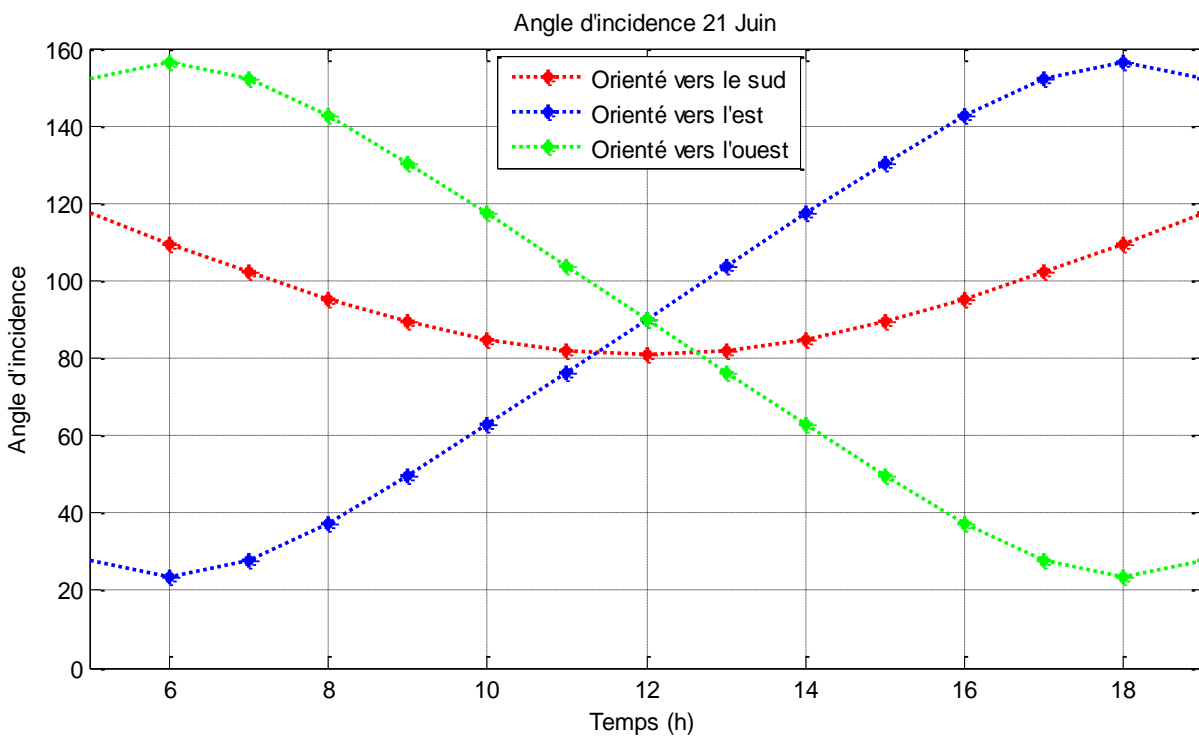


Figure (5.7) : Angle d'incidence du 21 Juin pour un plan Incliné suivant différentes orientations

Saison du Printemps 21/03  $(\beta, \alpha) = (90^\circ, 0^\circ); (\beta, \alpha) = (90^\circ, 90^\circ); (\beta, \alpha) = (90^\circ, -90^\circ)$ :

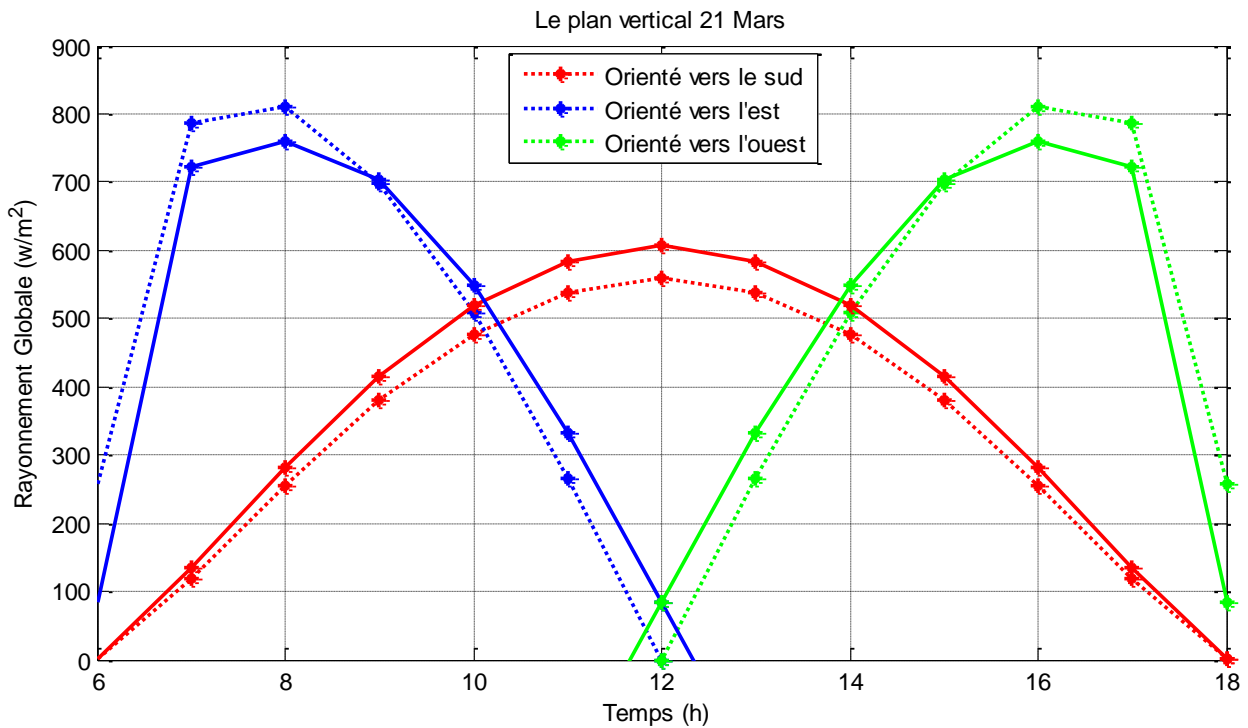


Figure (5.8) : Rayonnement solaire de 21 mars pour un plan Vertical suivant différents orientations

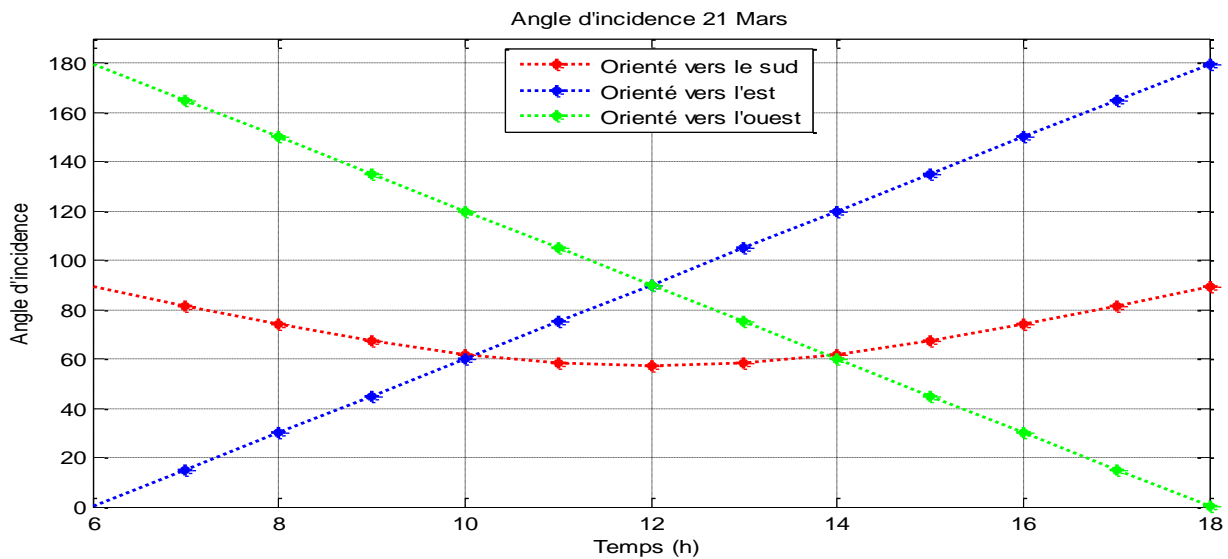


Figure (5.9) : Angle d'incidence de 21 mars pour un plan Vertical suivant différents orientations

En changeant les orientations des plans, on remarque que l'allure des courbes est toujours identique avec un maximum à midi pour un plan tenu à la verticale en hiver et un pic au matin puis un déclin l'après-midi pour un plan orienté Est, ce qui est évident, puisque le plan reçoit les rayons uniquement le matin et se voit 'tourner le dos' au soleil progressivement l'après-midi. En été, le soleil n'est plus bas à l'horizon et la hauteur du soleil augmente, ce qui influe sur la captation d'un plan

incliné à la verticale, (le soleil serait positionné au-dessus du capteur). En ce qui est des valeurs, on gagnerait en puissances par rapport à la période hivernale, avec des valeurs plus élevées pour le modèle DAVIES & HAY.

### ➤ Pour un Plan incliné

Les figures ci-après (Figure 5.10 - 5.11...5-15), illustrent l'évolution du rayonnement global et d'angle d'incidence pour un plan incliné suivant différentes orientations  $\alpha$ . Les courbes ont été dressées sur le même graphique, les résultats de trois périodes différentes de l'année sont représentés.

✚ Saison du d'hiver 21/12 ( $\beta, \alpha$ ) = ( $32^\circ, 0^\circ$ ); ( $\beta, \alpha$ )=( $32^\circ, 90^\circ$ ); ( $\beta, \alpha$ )=( $32^\circ, -90^\circ$ )

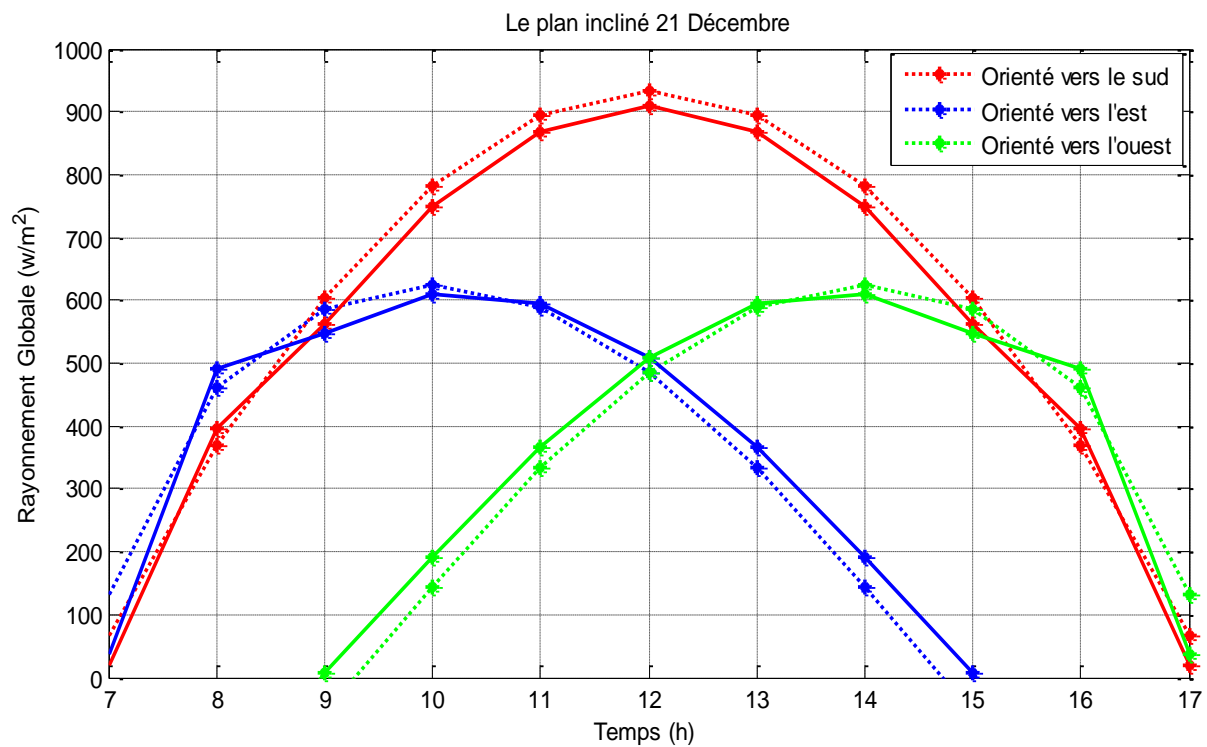


Figure (5.10) : Rayonnement solaire le 21 décembre pour un plan incliné suivant différentes orientations

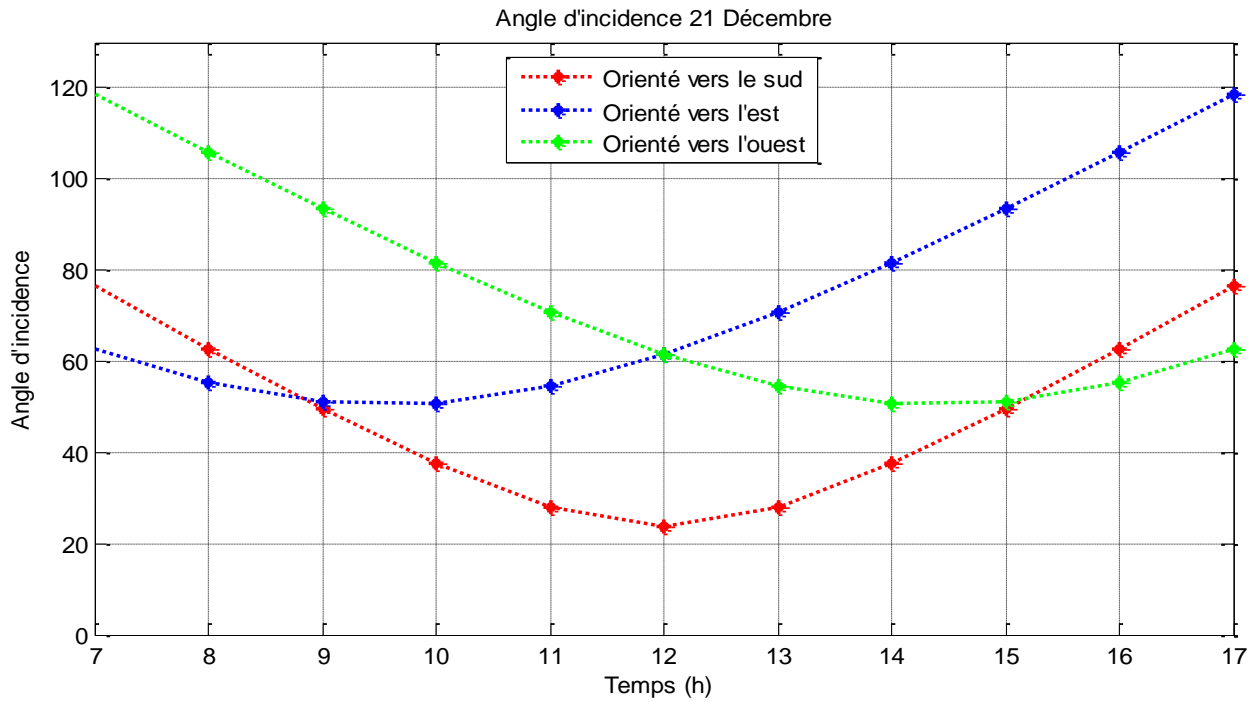


Figure (5.11) : Angle incidence le 21 décembre pour un plan incliné suivant différent orientations.

☀ Saison du d'été 21/06  $(\beta, \alpha) = (32^\circ, 0^\circ)$ ;  $(\beta, \alpha) = (32^\circ, 90^\circ)$ ;  $(\beta, \alpha) = (32^\circ, -90^\circ)$

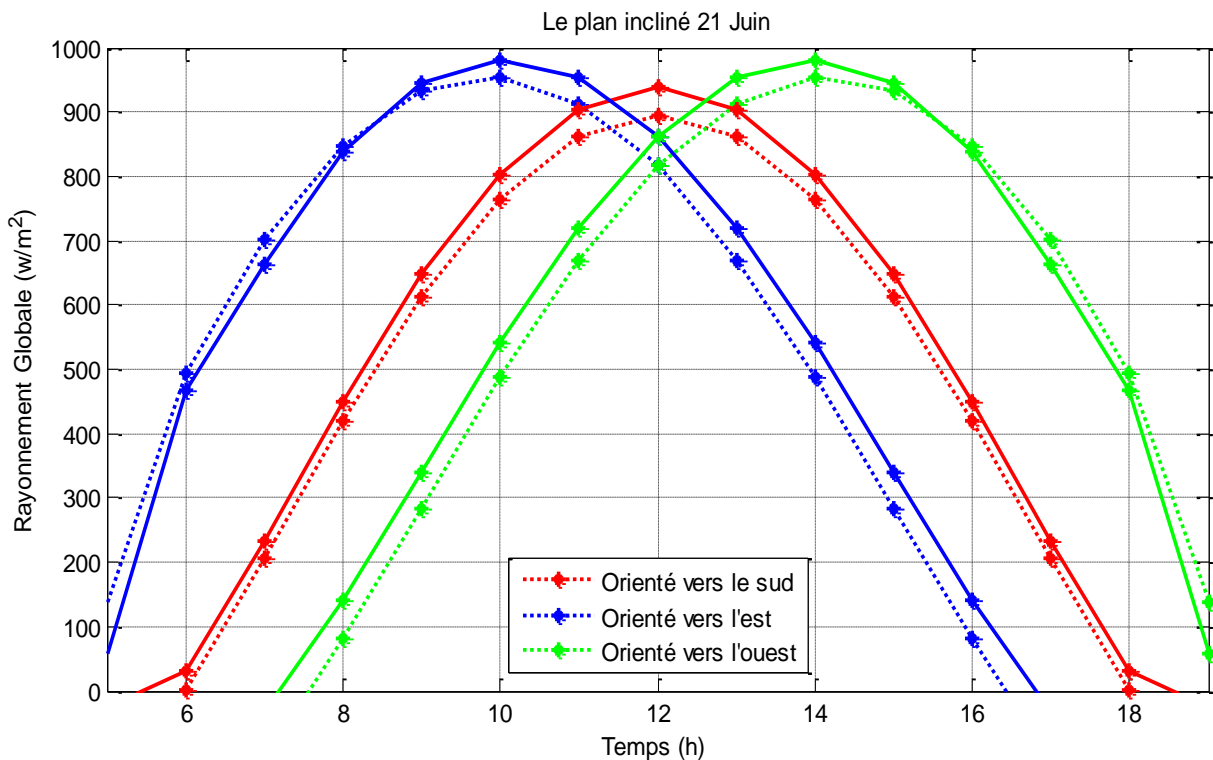


Figure (5.12) : Rayonnement solaire le 21 juin pour un plan incliné suivant différents orientations

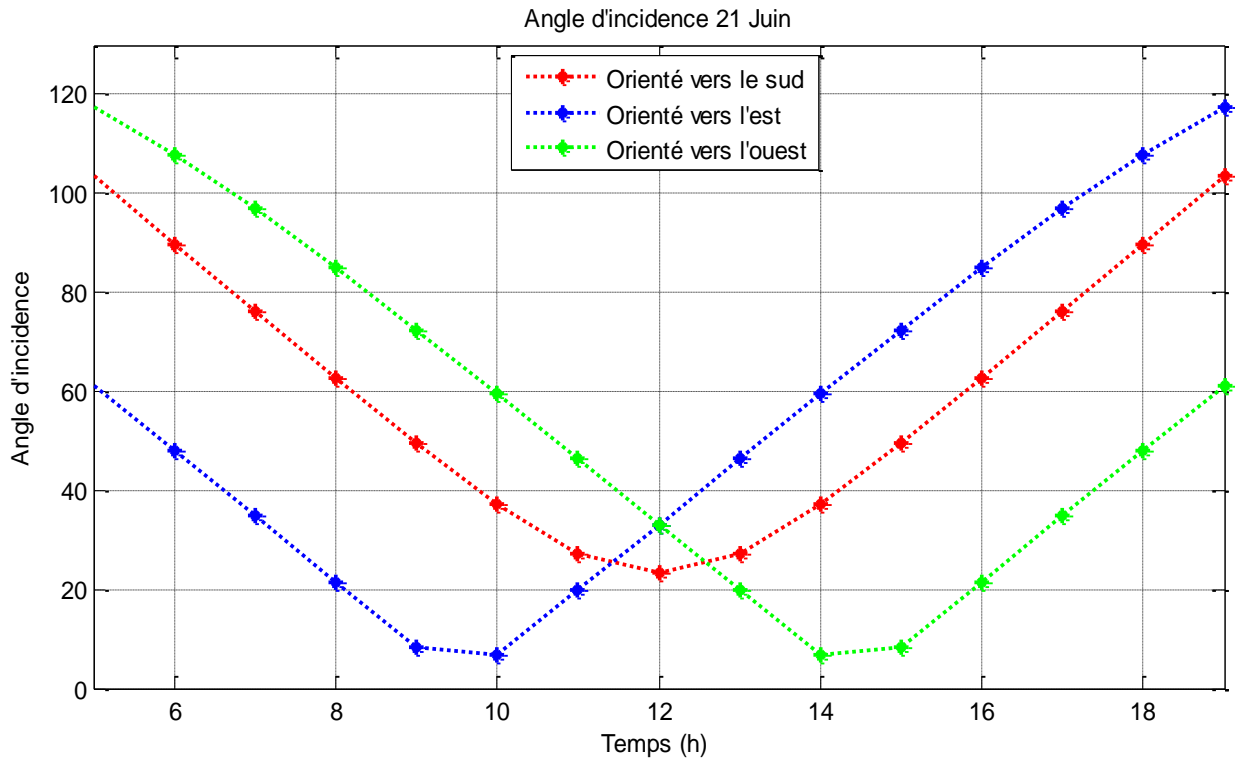


Figure (5.13) : Angle d'incidence le 21 juin pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32^\circ$  suivant différents orientations

☀ Saison du Printemps 21/03  $(\beta, \alpha) = (90^\circ, 0^\circ); (\beta, \alpha)=(90^\circ, 90^\circ); (\beta, \alpha)=(90^\circ,-90^\circ)$

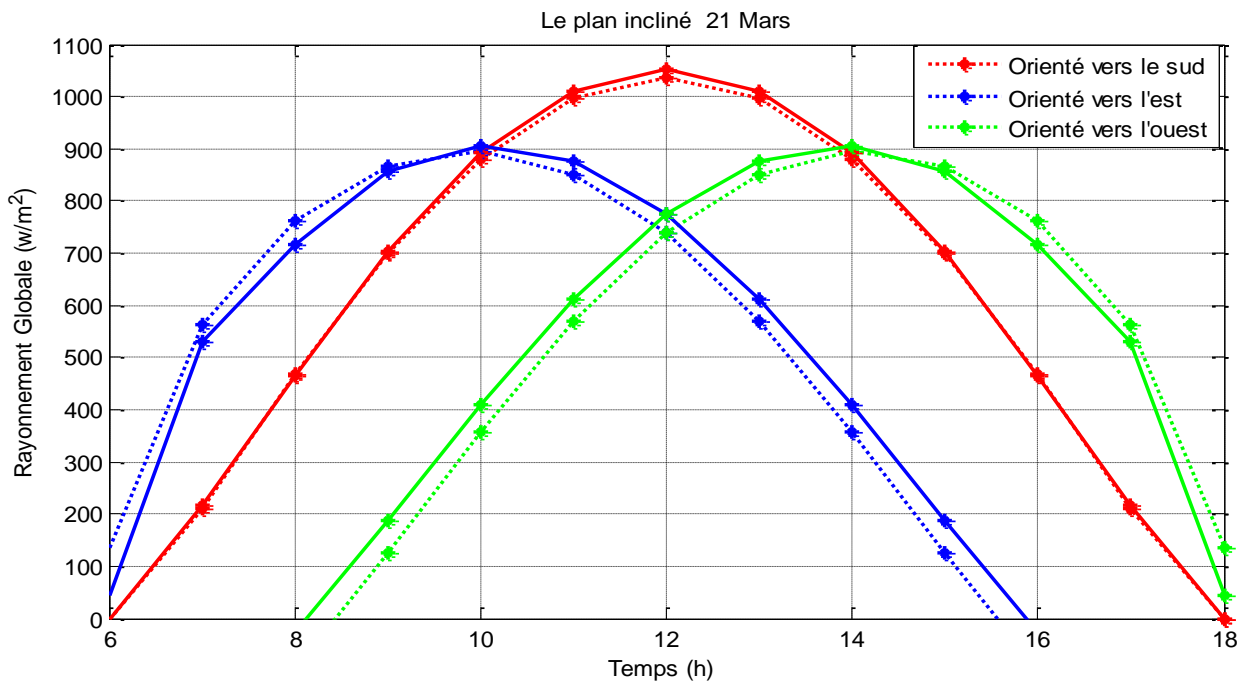
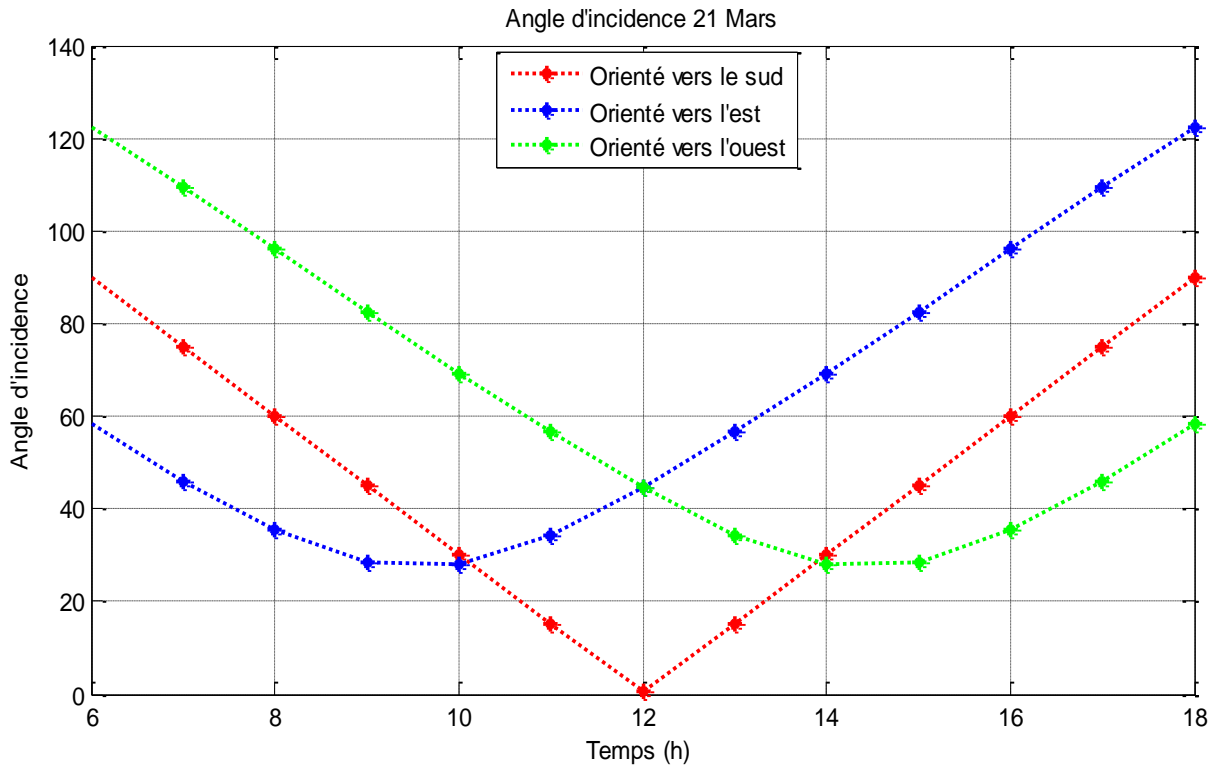


Figure (5.14) : Rayonnement solaire de 21 Mars pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32^\circ$  suivant différents orientations



*Figure (5.15) : Angle incidence de 21 décembre pour un plan Vertical à l'angle  $\beta=32^\circ$  suivant différentes orientations*

Pour une période hivernale on remarque en première vue que les courbes ont une même allure pour les deux modèles avec des valeurs plus élevées pour le modèle DAVIES & HAY notamment pour le rayonnement global incliné. Concernant la saison estivale (Figure 5.12), le modèle LACIS & HANSEN a tendance à produire des valeurs plus élevées que le modèle DAVIES & HAY. Pour la saison du printemps (Figure 5.14), les deux modèles se rapprochent avec un léger dépassement du modèle DAVIES & HAY.

### 5.3 Comparaison des Valeurs Estimées

La Figure 5.16 illustre, sur un même graphe ; l'évaluation de l'éclairement global pour un plan horizontal, vertical et incliné par les deux modèles pour la saison hivernale (jour 21 Dec). La Figure 5.16, est une représentation du rayonnement globale pour un plan vertical orienté et incliné avec même orientation comparé au rayonnement horizontal pour les deux modèles également durant la saison éternale. La Figure 5.18, est une représentation du rayonnement globale pour un plan vertical orienté Est et incliné avec même orientation comparé au rayonnement horizontal pour les deux modèles durant la saison éternale.



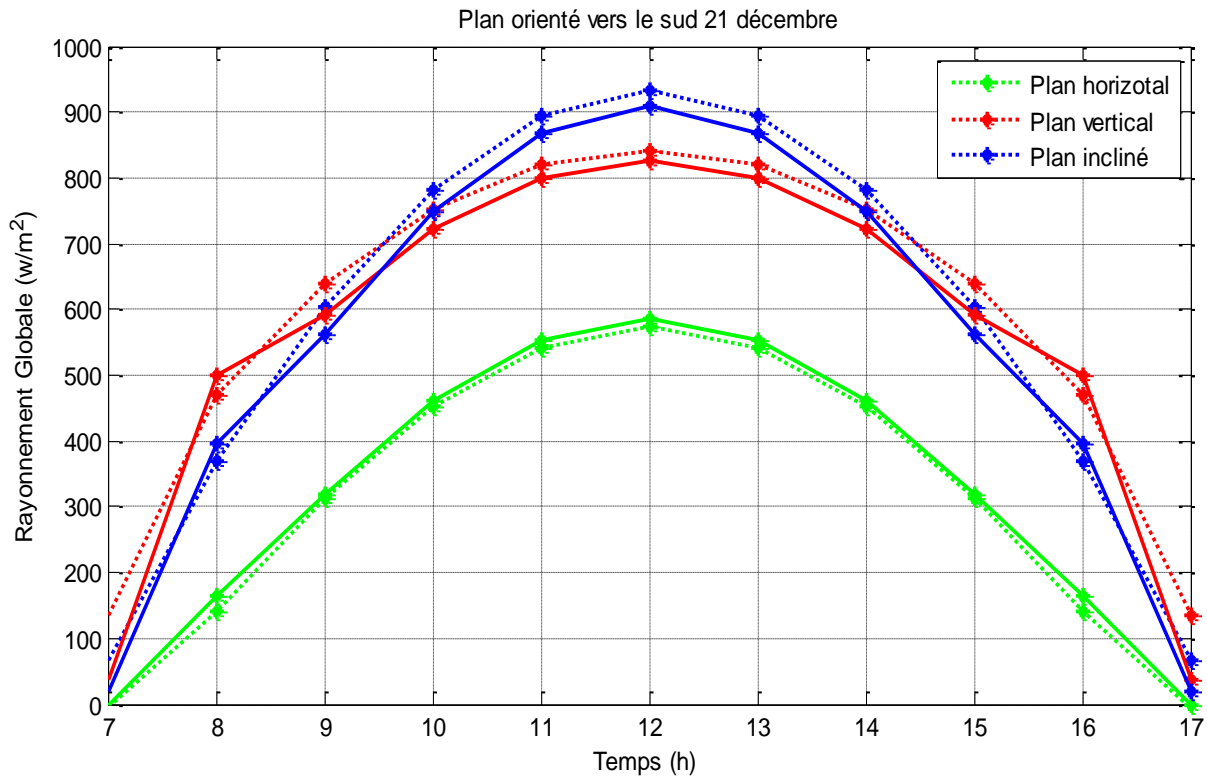


Figure (5.16) : Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles pour les trois plans inclinés, orienté Sud pour un jour clair d'hiver

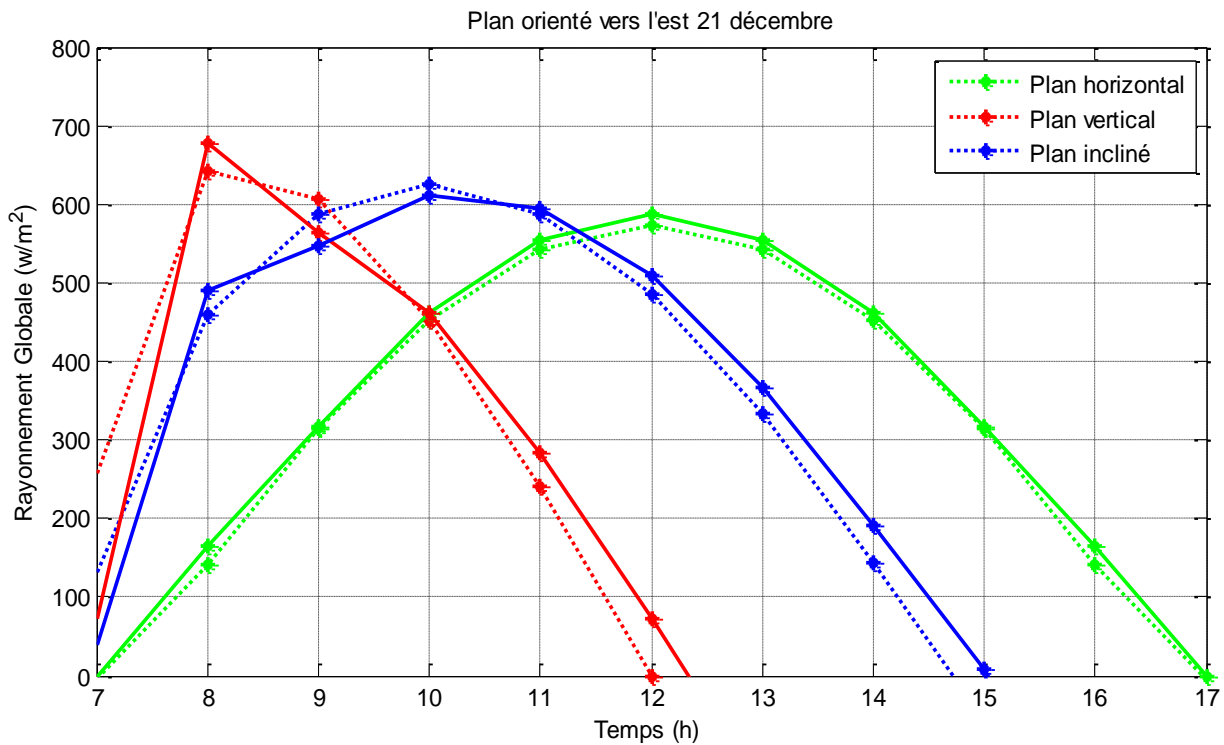
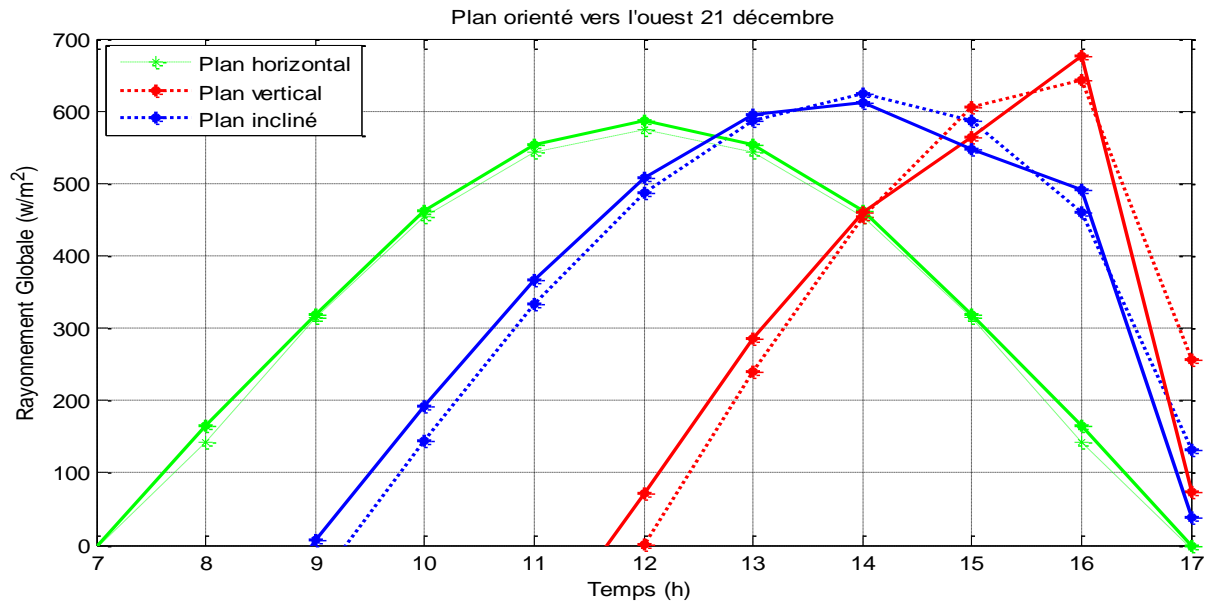


Figure (5.17) : Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles pour les trois plans inclinés orienté Est pour un jour clair d'hiver



**Figure (5.18) :** Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles pour les trois plans inclinés orientent Ouest pour un jour clair d'hiver

La superposition des courbes des deux modèles sur un même graphique permet de voir la même allure des courbes. Par ailleurs, pour les deux modèles sur ou sous-estime les trois orientations possibles du plan, Sud, Est et Ouest les résultats obtenus indiquent que les deux modèles donnent des valeurs rapprochées.

### 5.3 Validation des résultats avec les données expérimentales

Dans le but d'évaluer les estimations réalisées par les deux modèles pour le rayonnement solaire par ciel clair, un ensemble de simulations a été exécutées, couvrant des situations de différentes périodes de l'année, afin d'avoir une grande représentativité des résultats. Pour obtenir une validation du rayonnement solaire, nous allons confronter quelques valeurs de rayonnement solaire délivrées par les deux modèles avec les valeurs mesurées sur le site de Ghardaïa. Afin de sélectionner les journées claires, une inspection visuelle a été menée sur une longue série de données durant une année, les jours mi-clairs ou à ciel couvert ont été rejetés. Deux dates sont retenues pour être présentées, une période hivernale du 21 Décembre pour le jour le plus court de l'année et une autre estivale correspondante au 21 Juin pour le jour le plus long de l'année et 21 mars pour une saison printanière. On présentera sur les figures suivantes (Figure 5.19 - 5.20 - 5.21), des graphes comparatifs relatifs aux résultats du rayonnement solaire, pour une journée hivernale et estivale, les courbes d'une même composante sont dressées sur un même graphique.

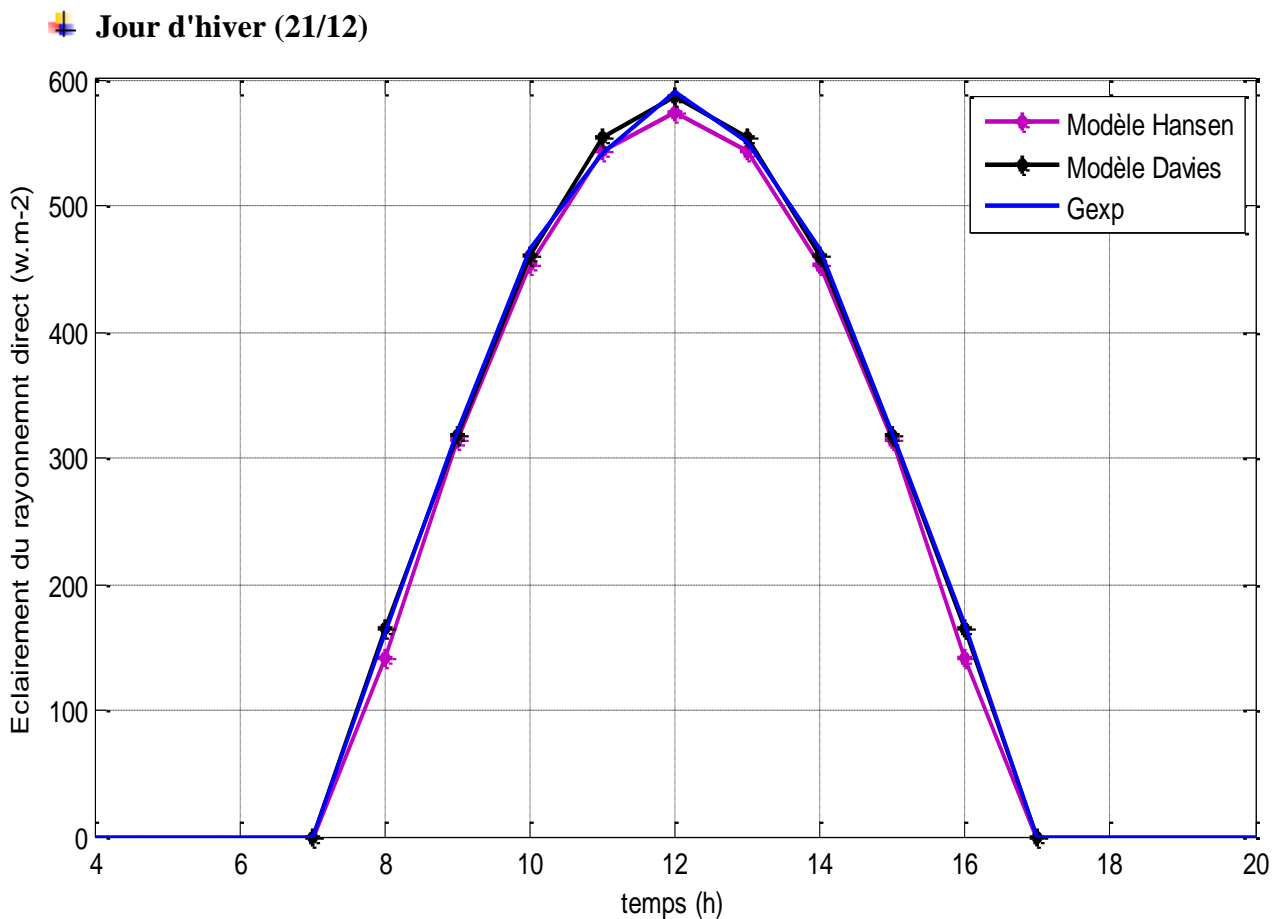


Figure (5.19) : Validation des résultats pour un jour clair d'hiver

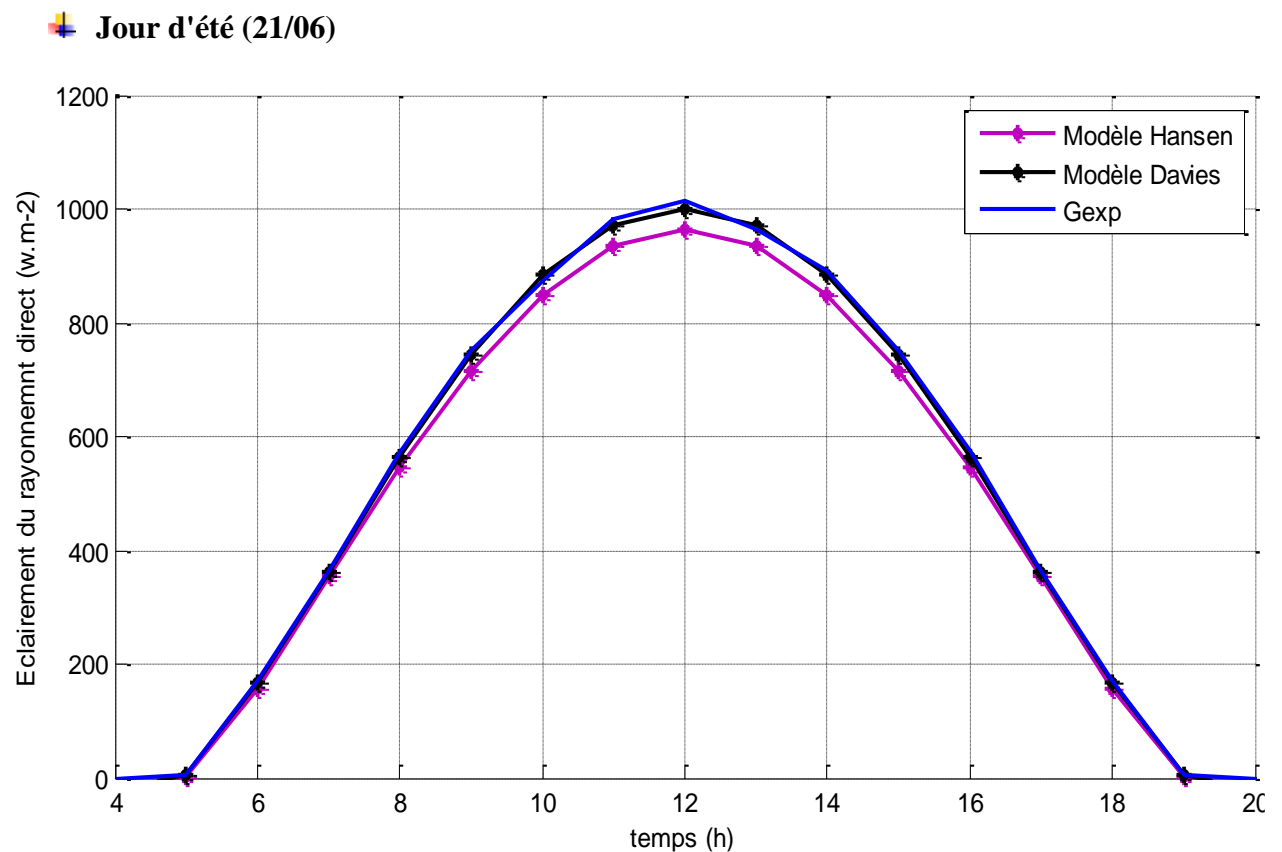
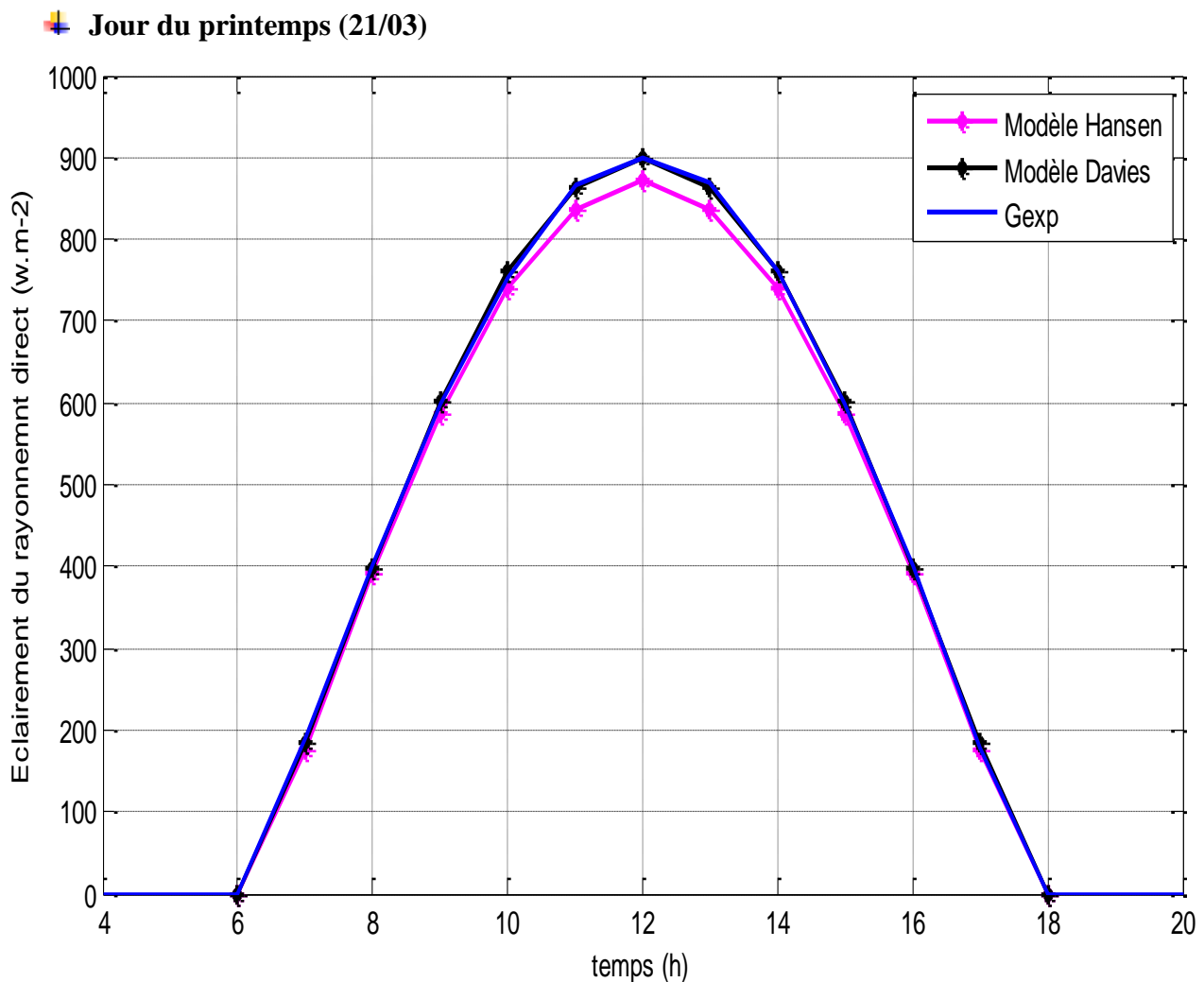


Figure (5.20) : Validation des résultats pour un jour clair d'été



*Figure (5.21) : Validation des résultats pour un jour clair du Printemps*

D'après les figures ci-dessus à première vue, nous pouvons constater que, les résultats obtenus (plus précisément en période hivernale) indiquent la présence d'un écart minimal au lever et au coucher et qui devient important au milieu de journée. On remarquera que les deux modèles sous estiment le rayonnement global, néanmoins, le modèle DAVIES & HAY se rapproche plus de l'expérimentale.

## 5.4 Etude Statistique

Soit une grandeur ( $G$ ) dont les valeurs mesurées sont ( $G_{exp}$ ) ; et les valeurs estimées par un modèle mathématique donné sont ( $G_{sim}$ ). Pour évaluer la précision des modèles proposés pour l'estimation du rayonnement solaire global par les deux modèles, des mesures statistiques ont été utilisées :

$$r^2 = \frac{(\sum_{i=1}^N (G_{\text{EXP}} - \bar{G}_{\text{EXP}}) (G_{\text{SIM}} - \bar{G}_{\text{SIM}}))^2}{\sum_{i=1}^N (G_{\text{EXP}} - \bar{G}_{\text{EXP}})^2 \sum_{i=1}^N (G_{\text{SIM}} - \bar{G}_{\text{SIM}})^2}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (G_{\text{EXP}} - G_{\text{SIM}})^2}{N}}$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(G_{\text{SIM}} - G_{\text{EXP}})|$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{G_{\text{SIM}} - G_{\text{EXP}}}{G_{\text{EXP}}} \right|$$

$$\text{rRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_{\text{EXP}} - G_{\text{SIM}})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_{\text{EXP}})^2}}$$

Avec :

$G_{\text{EXP}}$  et  $G_{\text{SIM}}$ , respectivement sont les valeurs expérimentales et simulées

$\bar{G}_{\text{EXP}}$  est la valeur expérimentale moyenne,

$\bar{G}_{\text{SIM}}$  est la valeur simulée moyenne

$N$  : nombre total des données.

- **R<sup>2</sup> (Coefficient de détermination)** : La corrélation quantifie la correspondance temporelle des variations des champs simulés et celles mesurés. Il nous donne le comportement des simulations par rapport aux mesures, plus la corrélation est élevée, plus les variations des simulations sont bien placées. Des meilleures simulations ont comme coefficient de corrélation proche de 1
- **MAE (Erreur absolue moyenne)** est une mesure de la différence entre les valeurs prédites et observées.
- **MSE (L'erreur absolue moyenne en pourcentage, Mean Absolute Percentage Error)** : moyenne des écarts en valeur absolue par rapport aux valeurs observées. C'est donc un pourcentage et par conséquent un indicateur pratique de comparaison.
- **RMSE (Erreur quadratique moyenne)** est une mesure fréquemment utilisée des différences entre les valeurs de simulation par un modèle et les valeurs expérimentales.
- **rRMSE (Erreur quadratique moyenne normalisée)** qui est un indicateur qui mesure l'amplitude de l'erreur. Elle renseigne sur l'erreur moyenne commise en valeur absolue entre les valeurs mesurées et celles estimées par le modèle, plus cette erreur est faible plus les valeurs simulées par le modèle sont proches des valeurs mesurées.

La performance du modèle selon rRMSE est définie comme suite :

- **Excellent** pour  $rRMSE < 10\%$
- **Bon** pour  $10\% < rRMSE < 20\%$
- **Faible** pour  $20\% < rRMSE < 30\%$
- **Pauvre** pour  $rRMSE > 30\%$

*Table (5.1) : Tests statistiques pour le rayonnement solaire instantane, Global horizontal*

		<b>R<sup>2</sup></b>	<b>MAE</b>	<b>MSE</b>	<b>RMSE</b>	<b>Rrmse</b>
LAICES & HANSEN	- 21/03	- 0.984	- 12.69	- 217.18	- 14.73	- 3.8%
	- 21/06	- 0.909	- 25.03	- 857.17	- 29.27	- 5.4%
	- 21/12	- 0.983	- 12.15	- 200.77	- 14.16	- 3.6%
DAVIES & HAY	- 21/03	- <b>0.994</b>	- <b>3.68</b>	- <b>21.40</b>	- <b>4.62</b>	- <b>1%</b>
	- 21/06	- 0.993	- 6.06	- 50.38	- 7.09	- 1.2%
	- 21/12	- 0.991	- 4.59	- 30.02	- 5.47	- 1.3%

## 5.5. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons expose nos resultats obtenus par programmation Matlab des deux modeles laices & Hansen et Davies & Hay pour l'estimation du rayonnement solaire incident sur plan vertical et horizontal et incline. En finune analyse statistique est faite en employant l'écart relatif moyen algébrique, absolu et quadratique.L'évaluation des modeles choisis sur une base graphique et statistique montre que les meilleurs resultats sont donnees par le modele de Davies et Hay.

# *Conclusión General*

## Conclusion générale

A travers cette étude, nous avons essayé de faire une analyse sur deux modèles "Atlas Solaire de l'Algérie" une a été faites le but de l'estimation du rayonnement solaire. Une validation des modèles (Lacis & Hansen, Davies & Hay) est acceptable vu la marge d'erreur est faible. Les résultats obtenus approuvent le choix des modèles, vus l'approche des résultats simulée et les résultats expérimentaux. Dans le cas d'un logement le toit reçoit plus de rayonnement que les autres, les murs Est et Ouest en reçoivent moins. Donc il sera important de bien choisir l'orientation de la pose d'un logement ou d'un immeuble. Quel que soit le système à installer mur d'un immeuble ou concentrateur parabolique, pour avoir un bon résultat est issu d'une bonne orientation de ceux-ci. L'Algérie est l'un des pays à fort rayonnement solaire, donc il est assez important que les études soit dans le sens d'augmenter le rendement et de varier les systèmes d'exploitation de cette source d'énergie pour arriver à des résultats rentables économiquement.



# *BIBLIOGRAPHIE*

---

## Bibliographie

- [1] M. Chegaar, A. Chibani, Global solar estimation in Algeria, *Energy Conversion & Management*, Vol. 42, pp. 967-973, 2001.
- [2] Site internet:[www.enerzine.com/1/235+algerie-le-nouvel-eldorado-solaire-energie+.html](http://www.enerzine.com/1/235+algerie-le-nouvel-eldorado-solaire-energie+.html)
- [3] A. Lester, D R. Myers, A method for improving global pyranometer measurements by modeling responsivity functions, *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 322-331, 2006.
- [4] J. Almorox, M. Benito, C. Hontoria, Estimation of monthly Angström – Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain, *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 931-936, 2005.
- [5] C. Ertekin, O. Yaldiz, Comparison of some existing models for estimating global solar radiation for Antalya (Turkey), *Energy Conversion & Management*, Vol. 41, pp. 311-330, 2000.
- [6] [https://www.researchgate.net/figure/Spectre-du-rayonnement-solaire-6\\_fig1\\_311509207](https://www.researchgate.net/figure/Spectre-du-rayonnement-solaire-6_fig1_311509207)
- [7] Jean-Pierre Rivet, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur ([rivet@obs-nice.fr](mailto:rivet@obs-nice.fr)), 2005.
- [8] <http://outilssolaires.com/glossaire/geometrie-solaire/azimut-solaire+a162.html>
- [9] F. Kasten, A new table and approximate formula for optical relative mass, *Arch Meteorol. Geophys. Bioclim. B* 14, 206-223, 1966
- [10] <https://www.azimuthproject.org/azimuth/show/Blog+-+the+color+of+night>
- [11] A. Mefti, 'Contribution à la détermination du gisement solaire par traitement de données solaires au sol et d'images météosat', Thèse de Doctorat d'Etat en Physique, Spécialité, Conversion Thermodynamique, Université USTHB, 2007.
- [12] A. Angstrom, 'the parameters of atmospheric turbidity', *Tellus XVI*, 1, 64-75, 1964.
- [13] BOUDEN Abdelmalek "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque", mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [14] TOURTA Sabah, 'étude de l'effet des aerosols sur l'estimation du coefficient de reflectance bidirectionnelle à l'aide de mesures satellitaires', Thèse de Magister. Université Mentouri, 2007
- [15] IFFOUZAR Koussaila et HANIFI Idir "Etude et réalisation d'un mécanisme de poursuiveur solaire pour un concentrateur cylindro-parabolique avec carte de commande". mémoire master Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2013
- [16] SEN Zekai. *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*, Springer 2008.

- [17] A.B. OUMBE NDEFFOTSING, 'Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire incident au sol', Thèse de Doctorat en Energétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009.
- [18] M.Boulifa, 'Estimation du rayonnement solaire par traitement d'images satellitaires : Utilisation de l'équation du transfert radiatif', Mémoire de Magister, 2005.
- [19] R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz. "Le rayonnement solaire conversion thermique et applications" ; Technique et documentation, Paris, 1983.
- [20] SOUFI Adel, Mémoire de fin d'étude « Modélisation et Control System photovoltaïque par l'espace d'ETA », mémoire de master, Université de Ouargla, 2012
- [21] ZERGUINE Bilal, 'Modelisation d'un systeme de production électrique par la cellule photovoltaïque' Mémoire de Magister. Université Badjimokhtar Annaba, 2010
- [22] SAADI Souad, "Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan", Mémoire de Magister. UMC, Université Mentouri de Constantine. 2010
- [23] OUMBE Armel, (2009) "Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire au sol", PhD thesis, MINES Paris Tech, 2009.
- [24] BAISSI Mohamed Tahar " Etude théorique et expérimentale des paramètres de fonctionnement d'un capteur solaire plan ", mémoire de Magiste, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [25] B.Leckner, 'The spectral distribution of solar radiation at the earth's surfaces, Element of model', Solar energy, 20, 143-150, 1978.
- [26] F. Yettou<sup>1\*</sup>, A. Gama<sup>1</sup>, A. Malek<sup>2</sup>, B. Azoui<sup>3</sup> et C. Larbès<sup>4</sup> "Etude et conception d'un logiciel de calcul de l'éclairement solaire en Algérie destiné aux systèmes à concentration solaires" Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) 27 – 46.
- [27] C. Fröhlich. World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112, 1978
- [28] P. Bessemoulin, J. Oliviéri. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. Lamétéorologie 8e série n° 31 (2000), 42-59.
- [29] BAROUD Hinde et DJEKAOUA Habiba "Estimation de l'ensoleillement par deux modèles semi-empiriques dans la région de Ghardaïa" Thème 'Mémoire de Master 2018. Université Ghardaïa.
- [30] Mechale capderou. atlas solaire d'Algérie tome 1.2. OPU, 1986.

- [31] P. C. Jain (Italy).Solar Energy, 1990 « A model for diffus and globalirradiation on horizontal surface »)
- [32] P .Ozenda,, Flore de Sahara (3 édition mise à jour et augmentée) Paris, Editions duCNRS. 662 pages. Cartes.”. 1991
- [33] A.CHEHMA, Le Sahara en Algérie, situation et défis. Séminaire L’effet duChangement Climatique sur l’élevage et la gestion durable des parcours dans les zones arides et semi-arides du Maghreb. Du 21 au 24 Novembre. Université KASDI MERBAH -Ouargla- Algérie, 8p. 2011
- [34] D.P.S.B., Annuaire statistique de la wilaya de Ghardaïa. Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires. Ed (vol.2). 132p. 2011
- [35]D.P.S.B., (2014), Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires, Edition 2015-D.S.A., (2010), Direction des Services Agricoles de la Wilaya de Ghardaïa, rapport d’activité annuelle.
- [36] Vauge, P. d. B "Le gisement solaire, Technique et Documentation", Paris. (1982).
- [37] BRAHIMI Aghilas "Etude de performances d’un capteur solaire plan à eau"Mémoire de Master. Universite de Lorraine,2016
- [38] Gisement solaire et transferts énergétiques Master Energies Renouvelables Université de cergy-pontoise © Alain Ricaud Jan 2011.
- [39] HAI Abdelhakim et HAMMADOU Souhil "Etude de corrélation entre l’irradiation solaire et factures météorologiques"memoire de master . Universite Abderahmane mira-bejaïa. 2013
- [40] Docteur Merad née Mesri Mokhtaria .& Professeur Cheknane Ali\* "Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications"Doctorant en Energies Renouvelables, Université Amar Telidji Laghouat.
- [41] M. Dankassoua <sup>1</sup>, S. Madougou <sup>1</sup>, A. Aboubacar <sup>2</sup> et A. Foulani<sup>1</sup> " Etude du rayonnement solaire global à Niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l’année 2013 (mai à octobre) " Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°1 (2017) 131 - 146
- [42] <https://www.promes.cnrs.fr/index.php?page=pyrheliometre>
- [43] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyranom%C3%A8tre>
- [44] BOUCHOUICHA Kada,"Intitulé modelisation multispectrale des images satellitaire- Application : Quantification du bilan d’énergie Sol-AtmosphèreThèse de Doctorat" Universite Oran. 2017

- [45] M.R. Yaïche<sup>1</sup> et S.M.A. Bekkouche<sup>2</sup> " 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.
- [46] M. Mesri-Merad, 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.
- [47] BENCHEMSA Issam " L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique" mémoire de master. Université Aadj Mokhtar Annaba. 2017
- [48] B. Tchanche" Analyse du système énergétique du Sénégal" Revue des Energies Renouvelables Vol. 21 N°1 (2018) 73 – 88.
- [49] <https://positivr.fr/definition/energie-eolienne/>
- [50] CHABANI zeyneb ; "La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030", Mémoire de magister ; Université M'Hamed Bougara-Boumerdes ; 2014.
- [51] O'Connor M, Gallopin G-C., Funtowicz S., Ravetz J, « La science pour le XXI<sup>e</sup> siècle : du contrat social aux fondements scientifiques », revue internationale des sciences sociales, N°168, juin 2001.
- [52] <https://ess1elt2hi.skyrock.com/705716310-Les-centrales-thermiquenucleaires.html>
- [53] livret –l energie.Conception et réalisation : Spécifique - Photo de couverture : © PhotoDisc – Illustrations : YUVANOE 2002.
- [54] SALMI Djamel Kamel -RABHI Fateh " Modélisation de la consommation d'électricité basse tension en Algérie (1980-2014)" mémoire de master. Université Abderrahmane Mira – Bejaia. 2017