

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique*



*Université de Ghardaïa*

N° d'ordre :

N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologie

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

## **MASTER**

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Energie Renouvelable

**Spécialité :** Energie Renouvelable en électrotechnique

**Par :** CHELLAOUA Slimane & HOBBI Abdennour

## **Thème**

**L'intérêt énergétique de la poursuite solaire avec  
deux axes par rapport aux systèmes fixes, location: Ghardaïa**

**Soutenu publiquement le : 21/06/2018**

**Devant le jury :**

<b>BAHRI Ahemd</b>	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>BENYELLOUL Kamel</b>	MRA	URAER Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>AKRMI Fouzi</b>	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>FERKOUS Khaled</b>	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire 2017/2018**

## Remerciements

*Nous tenons à remercier en premier lieu ALLAH, le tout puissant.*

*Je tiens en premier à exprimer ma grande gratitude envers mon encadreur  
Mr. Ferkous Khaled qui m'a apporté son aide et ses vailleureux conseils pour  
l'accomplissement et le suivit de ce travail.*

*Je remercie également le*

*Membre de jury pour avoir examiner ce travail*

*Et je présente mes sincères remerciements à tout le personnel qui m'a aidé à la*

*Réalisation de ce travail.*

## *Dédicas*

*Je dédie ce mémoire :*

*À ma très chère mère qui a été la lumière de ma vie*

*Et Mon père*

*À mes chères sœurs et mon frères*

*À toute ma famille et ma grande famille, pour tous les efforts et*

*les sacrifices qu'ils me présentent.*

*À tous mes amis (youcef, kouider, mohammade, abderrahim, sofein ,  
amine, habiba, khaira, hind , khaled, naser, hicham, ahmade, doha)*

*Sans exception.*

*Pour conclure, je le dédie à :*

*À mon classe 2<sup>e</sup> Mannée master Master Énergies Renouvelables en*

*Électrotechnique*

*Et à tousce qui m'ont aimé et m'ont respecté*

*Simane*

## *Dédicas*

*Je dédie ce mémoire:*

*À ma très chère mère qui a été la lumière de ma vie*

*Et Mon père*

*À mes chères sœurs et mon frères*

*À toute ma famille et ma grande famille, pour tous les efforts et*

*les sacrifices qu'ils me présentent.*

*À tous mes amis*

*(sahsi, ahmed, ammar, abdallah, abdesouahabe, djamale)*

*Sans exception.*

*Pour conclure, je le dédie à:*

*À mon classe 2<sup>ème</sup> année master Master Énergies Renouvelables en*

*Électrotechnique*

*Et à tous ce qui m'ont aimé et m'ont respecté*

*Abdenour*

# Résumé

Le présent travail est consacré à la modélisation du système de poursuite solaire et l'estimation des rayonnements solaires globaux pour différents plans (horizontale, incliné, et poursuite). Il est rédigé en trois chapitres principaux qui se résument dans ce qui suit :

- Au premier chapitre nous avons présenté une vue générale sur le gisement solaire en Algérie et les caractéristiques métrologique du site de Ghardaïa.
- Dans Le deuxième chapitre nous citons les modèles mathématiques du rayonnement solaire reçus par la terre. en suite est consacré à l'exposition et description du système poursuite solaire.
- le troisième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus par la modélisation numérique du système de poursuite solaire.
- Et on termine avec une conclusion regroupant les différents aspects étudiés

**MOTS CLES :** *le Soleil ;Gisement solaire ;Suiveur solaire ;Capderou ; site de Ghardaïa*

## ملخص

نسعى من خلال هذا العمل إلى نمذجة نظام التتبع الشمسي، وتقدير الإشعاعات الشمسية الكلية على مستويات عدة

(أفقي، مائل، تتابعي)، حيث أنه يحتوي على ثلاثة أبواب رئيسية تلخصها فيما يلي :

- في الباب الأول، قدمنا صورة عامة عن مجال الطاقة الشمسية للجزائر وعن الخصائص القياسية لموقع غرداية
- وفي الباب الثاني، قمنا بسرد النماذج الرياضية للإشعاع الشمسي الذي تستقبله الأرض، كما أننا ارتأينا أن يكون هذا الباب فضاء لعرض ووصف نظام التتبع الشمسي.
- وأما الباب الثالث، فهو مخصص لعرض وتأويل النتائج المتحصل عليها بواسطة النمذجة الرقمية لنظام التتبع الشمسي.
- ونكمل دراستنا هذه بخلاصة تجمع مختلف الجوانب التي كنا قد تطرقنا إليها.

## كلمات مفتاحية:

الشمس ;الأطلس الشمسي ; المتتبع الشمسي ;كابديرو; غرداية

# Table des matières

Remerciements .....	i
Résumé .....	iv
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux .....	xi
Liste des abréviations .....	xiv
Introduction générale .....	1
Chapitre 1 : ETAT DE L'ART DE L'ENERGIE SOLAIRE .....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Le soleil .....	4
1.3 La constante solaire .....	4
1.4 Mouvement de la terre .....	4
1.5 Position du soleil par rapport à la terre .....	5
1.5.1 Coordonnées Géographiques .....	5
1.5.2 Les Coordonnées Equatoriales .....	6
1.5.3 Les coordonnées horizontales .....	7
1.6 Les temps .....	8
1.6.1 Le temps universel (TU) .....	8
1.6.2 Le temps local (TL) .....	8
1.6.3 Le temps solaire moyen (TSM) .....	8
1.6.4 Le temps solaire vrai (TSV) .....	8
1.6.5 Equation du temps .....	8
1.6.6 Durée astronomique du jour .....	9
1.7 Energie solaire .....	10
1.7.1 Le rayonnement solaire et le nombre de masse .....	10

1.7.2	Nature du rayonnement solaire .....	11
1.7.3	Atmosphère .....	11
1.8	Rayonnement solaire au sol .....	12
1.8.1	Le rayonnement direct I.....	12
1.8.2	Le rayonnement diffus D .....	12
1.8.3	Le rayonnement réfléchi R .....	12
1.8.4	Le Rayonnement Global G .....	12
1.9	Albédo.....	13
1.10	Mesure du rayonnement solaire .....	14
1.11	Le Rayonnement solaire en Algérie .....	15
1.12	Conclusion.....	16
Chapitre 2 : MODELISATION DU POTENTIEL SOLAIRE ET SYSTEME DE POURSUITE SOLAIRE .....		17
2.1	Introduction.....	17
2.2	Description Des Modèles Semi Empirique.....	17
2.2.1	Modèle de Lacis & Hansen .....	17
2.2.2	Modèle de Davies & Hay .....	19
2.2.3	Modèle de Bird & Hulstrom.....	21
2.2.4	Modèle de Atwater & Ball .....	23
2.2.5	Modèle Circumsolaire .....	24
2.2.6	Modèle Temps-Coulson .....	24
2.2.7	MODELE DE LIU JORDAN .....	25
2.2.8	Méthode de Perrin Brichambaut .....	26
2.2.9	Modèle de Capderou .....	27
2.3	Les Types Des Suiveurs Solaires .....	30
2.4	Type D'orientation .....	32

2.4.1 Orientation 1 Axe .....	32
2.4.2 Orientation 2 Axe .....	33
2.5 Spécification de la région d'étude.....	34
2.6 Conclusion .....	35
Chapitre 3 : PRESENTATION DES RESULTATS.....	36
3.1 Introduction.....	36
3.2 Coordonnées Horizontal .....	37
3.3 Résultats Obtenus Pour La Journée Du 21 Mars .....	39
3.4 Résultats Obtenus Pour La Journée Du 21 Juin.....	43
3.5 Résultats Obtenus Pour La Journée Du 21 Septembre .....	47
3.6 Résultats Obtenus Pour La Journée Du 21 Décembre .....	51
3.7 Validation des Résultats.....	55
3.8 CONCLUSION.....	57
Conclusion générale .....	58
Bibliographies.....	59
Annexes 1 .....	62
Annexe 2.....	64



# Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Le mouvement de la terre autour du soleil .....	4
<b>Figure I.2 :</b> Coordonnées Géographiques .....	5
<b>Figure I.3 :</b> Les Coordonnées Equatoriales .....	6
<b>Figure I.4 :</b> le rayonnement solaire.....	10
<b>Figure I.5 :</b> Couches de l’atmosphère.....	11
<b>Figure 1.6 :</b> les Composants du Rayonnement Solaire.....	12
<b>Figure I.7 :</b> Rayonnement Global .....	13
<b>Figure I.8 :</b> Pyranomètre équipé d’un pare-soleil : mesure de la composante diffuse .....	14
<b>Figure I.9 :</b> Pyrhéliomètre Eppley : mesure de la composante directe .....	14
<b>Figure I.10 :</b> Moyenne annuelle de l’irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu .....	15
<b>Figure II.1 :</b> Types de suiveurs solaires .....	30
<b>Figure II.2 :</b> Exemple et fonctionnement du suiveur passif .....	31
<b>Figure II.3 :</b> Exemple et fonctionnement du suiveur actif.....	31
<b>Figure II.4:</b> Orientation d’une surface (axe vertical) .....	32
<b>Figure II.5 :</b> Orientation 2 axe .....	33
<b>Figure II.6 :</b> Vue satellitaire du site de Ghardaïa .....	34
<b>Figure III.1 :</b> Variation de la hauteur du soleil pendant quatre journées étudiées à Ghardaïa .....	37
<b>Figure III.2 :</b> Variation de l’azimut pendant les quatre journées étudiées à Ghardaïa.....	37
<b>Figure III.2 :</b> Variation de l’angle d’incidence Pour les trois systèmes pendant 21 Mars.....	39
<b>Figure III.4 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 mars pour un plan horizontal .....	39

<b>Figure III.5 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 mars pour un plan incliné à l'angle optimal $\beta=32$ .....	40
<b>Figure III.6 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 mars une poursuit solaire axial .....	40
<b>Figure III.7 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 mars pour une poursuite solaire avec 2 axes.....	41
<b>Figure III.8 :</b> Rayonnement solaire global pour les quatre systèmes le 21 mars .....	41
<b>Figure III.9 :</b> Variation de l'angle d'incidence Pour les trois systèmes pendent 21 Juin .....	43
<b>Figure III.10 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Juin pour un plan horizontal .....	43
<b>Figure III.11 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Juin pour un plan incliné à l'angle optimal $\beta=32$ .....	44
<b>Figure III.12 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Juin une poursuit solaire axial .....	44
<b>Figure III.13 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Juin pour une poursuite solaire avec 2 axes .....	45
<b>Figure III.14 :</b> Rayonnement solaire global pour les quatre systèmes le 21 Juin.....	45
<b>Figure III.15 :</b> Variation de l'angle d'incidence Pour les trois systèmes pendent21 Septembre .....	47
<b>Figure III.16 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Septembre pour un plan horizontal .....	47
<b>Figure III.17 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Septembre pour un plan incliné à l'angle optimal $\beta=32$ .....	48
<b>Figure III.18 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Septembre une poursuit solaire axial .....	48
<b>Figure III.19 :</b> Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Septembre pour une poursuite solaire avec 2 axe.....	49
<b>Figure III.20 :</b> Rayonnement solaire global pour les quatre systèmes le 21 septembre.....	49

<b>Figure III.21</b> : Variation de l'angle d'incidence Pour les trois systèmes pendant 21 Décembre	51
<b>Figure III.22</b> : Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Décembre pour un plan horizontal	51
<b>Figure III.23</b> :Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Décembre pour un plan incliné à l'angle optimal $\beta=32$	52
<b>Figure III.24</b> : Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Décembre une poursuit solaire axial	52
<b>Figure III.25</b> : Rayonnement solaire (global, direct et diffus)le 21 Décembre pour une poursuite solaire avec 2 axes	53
<b>Figure III.26</b> : Rayonnement solaire global pour les quatre systèmes le 21 Décembre	53
<b>Figure III.27</b> : rayonnement solaire global d'après Capderou et les données SKTM Oued nechou 21 mars 2016	55
<b>Figure III.28</b> : rayonnement solaire global d'après Capderou et les données SKTM Oued nechou 21Juin 2016	55
<b>Figure III.29</b> : rayonnement solaire global d'après Capderou et les données SKTM Oued nechou 21septembre 2016	56
<b>Figure III. 30</b> : rayonnement solaire global d'après Capderou et les données SKTM Oued nechou 21décembre 2016	56
<b>Figure1</b> : Les coordonnées horizontales	64
<b>Figure 2</b> : Position du soleil par rapport à une surface inclinée	65

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b> :Les Coordonnées Géographique du site de Ghardaïa .....	34
<b>Tableau III.1</b> : Comparaison des résultats obtenu pour 21 mars .....	42
<b>Tableau III.2</b> : Comparaison des résultats obtenu pour 21 Juin .....	46
<b>Tableau III.3</b> : Comparaison des résultats obtenu pour 21 septembre .....	50
<b>Tableau III.4</b> : Comparaison des résultats obtenu pour 21 Décembre .....	54
<b>Tableau 1</b> : la répartition de cet éclairement énergétique du rayonnement solaire dans divers domaines de longueur d'onde .....	62
<b>Tableau 2</b> : Valeurs du facteur $F_c$ en fonction dela distance zénithale d'après Robinson .....	62
<b>Tableau 3</b> : paramètre décrivant la nature du ciel .....	62
<b>Tableau 4</b> : paramètre décrivant l'état de l'atmosphère .....	63

# Liste des abréviations

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

$\lambda$  : Longitude de l'lieu [ $^\circ$ ]

$Z$  : 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 [ $^\circ$ ]

$\omega_s$  : Angle horaire au lever ou coucher de soleil [ $^\circ$ ]

$\omega_{sr}$  : L'angle horaire au coucher du soleil Pour un plan incliné [ $^\circ$ ]

$\omega_{ss}$  : L'angle horaire au coucher du soleil orienté [ $^\circ$ ]

$D_j$  : La durée astronomique du jour[h]

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

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

$a_s$  : Angle extérieur d'azimut [ $^\circ$ ]

$\theta_z$  : Angle de zénith [°]

$I$  : Éclairement solaire direct [W/m<sup>2</sup>]

$D$  : Éclairement solaire diffus [W/m<sup>2</sup>]

$R$  : Éclairement solaire réfléchi [W/m<sup>2</sup>]

$G$  : Éclairement solaire global [W/m<sup>2</sup>]

$D_r$  : Le rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh[W/m<sup>2</sup>]

$D_a$  : Le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols[W/m<sup>2</sup>]

$D_m$  : Le diffus dû au phénomène de multi réflexion terre atmosphère

$I_{sc}$  : Le constant solaire corrigé [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha_0$  : Le coefficient correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct

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

$m_r$  : La masse d'air optique relative

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

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

$X_W$  : L'épaisseur d'eau condensable corrigée par trajet optique du rayonnement

$U_w$  : L'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu [cm]

$m_a$  : La masse d'air corrigée

$p$  : Pression atmosphérique

$\tau_r$  : Le coefficient de transmission après diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh

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

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

$\tau_0$  : Le coefficient d'absorption par la couche d'ozone

$\tau_w$  : Le coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau

$\tau_g$  : Le coefficient de transmission après absorption par les gaz permanents

$\tau_r$  : Le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire

$m_0$  : La masse d'air d'ozone

$\delta_w$  : Le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau

$R_b$  : Le facteur d'inclinaison  $R_b$  du rayonnement direct

$d_i$  : L'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

$T_L$  : Le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair

$T_0$  : Le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau

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

$T_2$  : Le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption

$\delta_i$  : La composante isotrope qui correspond à un ciel de luminance uniforme.

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

$\delta'_i$  : L'éclairement diffus rétrodiffusé est celui diffusé à nouveau par le ciel vers le sol [ $W/m^2$ ]

## **Introduction générale**

Le soleil est l'origine principale de l'énergie disponible sur terre. Ceci inclut l'énergie thermique directe, l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et même l'énergie générée par les hydrocarbures puisque ces derniers sont la conséquence de la photosynthèse. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher, ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer des grandeurs, telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation hors atmosphère. [1]

Actuellement, la production de l'énergie dans l'industrie est basée, en grande partie, sur une ressource limitée : le pétrole, Les sources du pétrole deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement.

Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [2].

Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important.

La recherche des ressources d'énergie alternatives est devenue donc une question cruciale de nos jours. Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées, non seulement, dans le domaine de la production d'énergie nucléaire, mais également dans le secteur des sources d'énergie illimitées, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation d'énergie solaire. Dans ce dernier cas, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Pour un système énergétique, la variation de 50 % de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur de l'ordre de 50 %; en plus le générateur ne fonctionne plus dans les conditions optimums.

Donc, l'efficacité énergétique de ces systèmes dépend du degré d'utilisation et de la conversion du rayonnement solaire. Il y a deux manières pour maximiser le taux d'énergie



## Chapitre 1 : Etat de l'art de l'énergie solaire

---

utile : en optimisant la conversion et le degré d'absorption, et en augmentant le taux de rayonnement d'incidence en employant les systèmes d'orientation mécanique. Ces systèmes appelés suiveurs solaires ou traqueurs solaires. [2]

Afin de collecter le maximum d'énergie, on utilise des dispositifs dits systèmes de poursuite la position de panneau solaire '*sun tracking systems*'. Le système de poursuite solaire doit être ajusté de sorte qu'il soit toujours visé avec précision face au soleil. Les systèmes de poursuite solaire à un seul axe sont moins coûteux et leur commande est facile à mettre en œuvre, par contre leur efficacité est inférieure à celle des systèmes de poursuite solaire à deux axes. [3]

L'objectif du présent travail est la présentation et l'interprétation des résultats obtenus par la modélisation numérique du système de poursuite solaire.

## **Chapitre 1 : ETAT DE L'ART DE L'ENERGIE SOLAIRE**

### **1.1 Introduction**

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables. Comme la plus part des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale [4].

Dans cette partie nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir :

- Les grandeurs astronomiques.
- Les grandeurs géographiques.
- Le rayonnement solaire hors atmosphère.
- Le rayonnement direct, diffus et global.

## 1.2 Le soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de  $14 \times 10^5$  km de diamètre, sa masse est de l'ordre de  $2 \times 10^{30}$  kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km.

Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à  $4 \times 10^{26}$  w. Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de  $1,7 \times 10^{17}$  W. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère [5] [6].

## 1.3 La constante solaire

La valeur du rayonnement solaire " $I_c$ ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " $I_0$ " appelée constante solaire est de l'ordre de  $1354 \text{ W.m}^{-2}$ . En première approximation, on peut calculer la valeur de " $I_c$ " en fonction du numéro du jour de l'année " $n_j$ " par la relation suivante [7] :

$$I_c = I_0 [1 + 0.033 \times \cos(0.984 \times n_j)] \quad (1.1)$$

## 1.4 Mouvement de la terre

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [5].

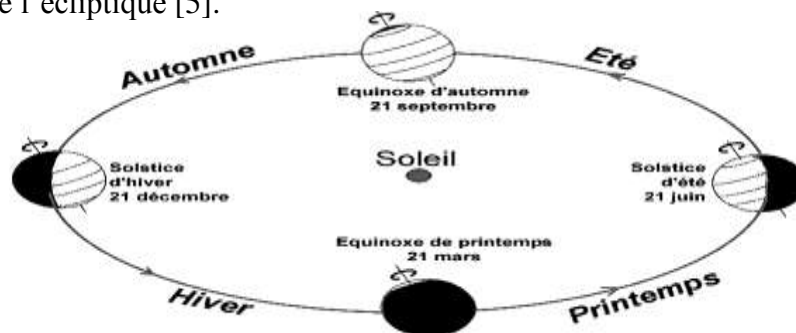


Figure I.1 : Le mouvement de la terre autour du soleil. [8]

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour où la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux dans la Figure (I.1) [5].

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à  $23^{\circ}27'$

### 1.5 Position du soleil par rapport à la terre

Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre [9].

#### 1.5.1 Coordonnées Géographiques

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes illustré dans la Figure (I.2) :

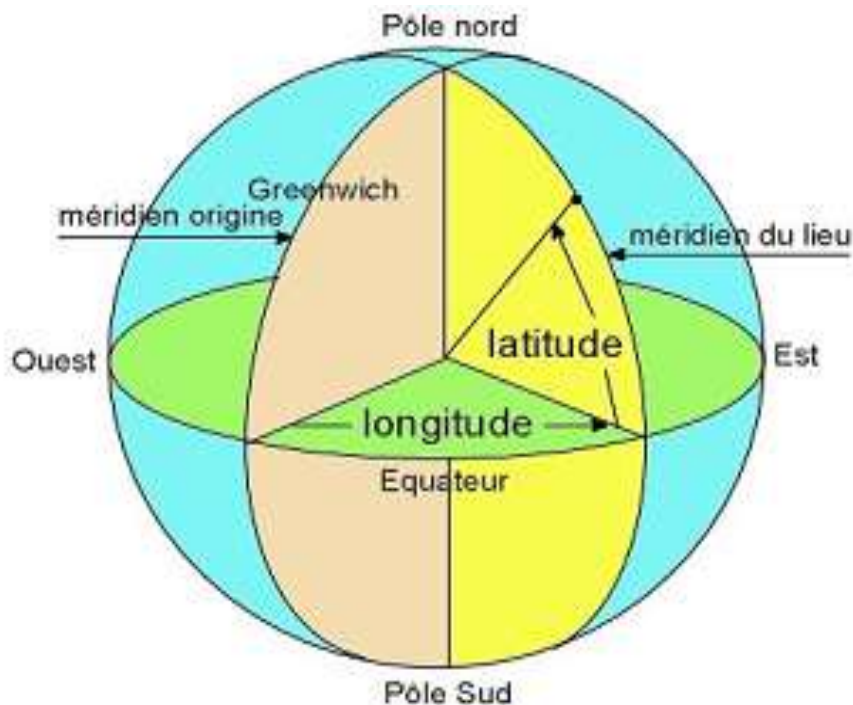


Figure I.2 : Coordonnées Géographiques [10]

a) **La latitude  $\phi$**  : C'est l'angle  $\phi$  que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial.

Si  $\phi > 0$ , le site se trouve dans l'hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud.

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

c) **L'altitude  $z$**  : C'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence.

- **La trajectoire apparente du soleil**

La position du soleil dans la voûte céleste est repérée à tout instant de la journée par deux systèmes de coordonnées.

### 1.5.2 Les Coordonnées Equatoriales

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure de l'observation. La position du soleil est exprimée par deux angles présentée dans la Figure (I.3) :

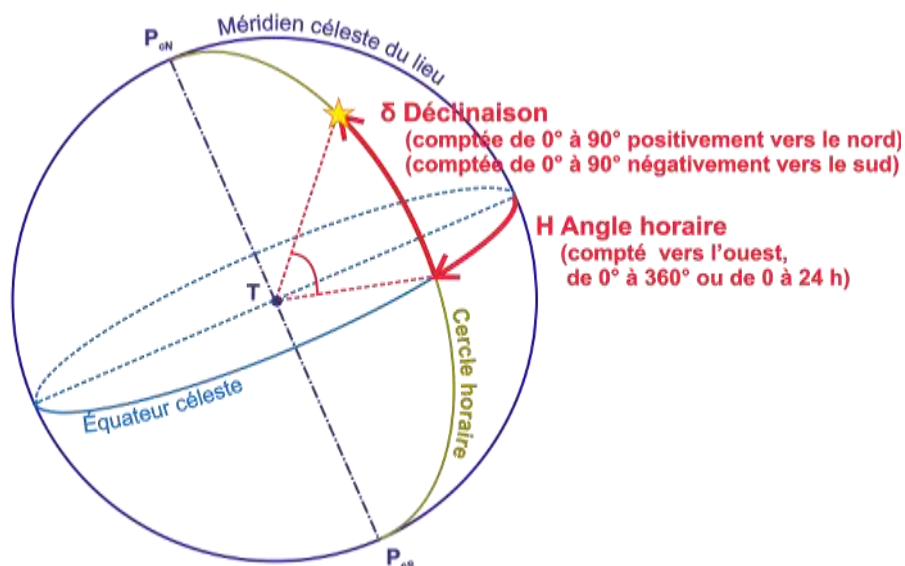


Figure I.3 : Les Coordonnées Equatoriales [11]

### 1.5.2.1 La déclinaison $\delta$

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial Figure (I.3). La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver ( $-23^{\circ},27'$ ) et au solstice d'été ( $+23^{\circ},27'$ ). Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper [9] :

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (n_j + 284) \right] \quad (\text{I.2})$$

### 1.5.2.2 L'angle horaire $\omega$

C'est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui passant par la direction du soleil, correspond au déplacement angulaire du soleil vers l'est ou vers l'ouest du plan méridien local, il définit le vrai temps solaire [12]. L'angle horaire est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (\text{I.3})$$

## 1.5.3 Les coordonnées horizontales

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes :

### 1.5.3.1 L'angle de la hauteur solaire $h$

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal.  $h$  varie de  $0^{\circ}$  à  $90^{\circ}$  vers le zénith et de  $0^{\circ}$  vers  $-90^{\circ}$  vers le nadir. L'angle de la hauteur solaire est donné par [9] :

$$\sin(h) = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (\text{I.4})$$

### 1.5.3.2 Angle d'azimut

C'est l'angle sur le plan horizontal mesuré à partir du sud avec la projection horizontale des rayons directs du soleil. Il est également donné comme angle entre le méridien local et la projection de la ligne de la vue du soleil dans le plan horizontal, défini par l'équation suivante [13] :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (\text{I.5})$$

## **1.6 Les temps**

La terre subite deux types de déplacement : la rotation de la terre autour de l'axe des pôles et sa révolution autour du soleil. Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notion de journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps, puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de 15°. La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai.

### **1.6.1 Le temps universel (TU)**

C'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time) qui est le méridien central du fuseau horaire.

### **1.6.2 Le temps local (TL)**

Pour en déduire le temps légal ou local (TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire.

$$TL = TU + \text{décalage} \quad (\text{I.6})$$

### **1.6.3 Le temps solaire moyen (TSM)**

Il se déduit de l'équation suivante

$$TSM = TU + \frac{\lambda}{15} \quad (\text{I.7})$$

Avec TSM en heure.

### **1.6.4 Le temps solaire vrai (TSV)**

C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil.

$$TSV = TSM + Et \quad (\text{I.8})$$

Où : Et est l'équation du temps.

### **1.6.5 Equation du temps**

Le temps Et varie de -14,5 minutes (du 10 au 15 Février) à +16,5 minutes (du 25 au 30 Octobre) [9]. Une bonne approximation du temps Et est donnée par l'équation suivante :

$$Et = 9.9 \sin[2(0.986n_j + 100)] - 7.7 \sin(0.986n_j - 2) \quad (\text{I.9})$$

### 1.6.6 Durée astronomique du jour

On peut définir la durée astronomique du jour (ou la durée d'ensoleillement) comme étant la période de temps séparant les événements où le soleil est à l'horizon, c'est-à-dire que sa hauteur est nulle [14]. Au lever et au coucher du soleil :  $h = 0$ , à partir de l'équation (I.3) on trouve :

$$\omega_s = \cos^{-1}[-tg(\phi).tg(\delta)] \quad (I.10)$$

Pour un plan incliné d'un angle  $\beta$ , l'angle horaire est :

$$\omega_s = \cos^{-1}[-tg(\phi - \beta).tg(\delta)] \quad (I.11)$$

Pour un plan incliné d'un angle  $\beta$  et orienté par un angle  $\gamma > 0$ , l'angle horaire au coucher du soleil est :

$$\omega_{sr} = \min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{-xy - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right] \right\} \quad (I.12)$$

$$\omega_{ss} = -\min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{-xy + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right] \right\} \quad (I.13)$$

Pour un plan incliné d'un angle  $\beta$  et orienté par un angle  $\gamma < 0$ , l'angle horaire au coucher du soleil est :

$$\omega_{sr} = \min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{-xy + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right] \right\} \quad (I.14)$$

$$\omega_{ss} = -\min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} \left[ \frac{-xy - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right] \right\} \quad (I.15)$$

Avec :  $x = \frac{\cos \phi}{\sin \beta \tan \beta} + \frac{\sin \phi}{\tan \beta}$  et  $y = \tan \delta \left( \frac{\cos \phi}{\sin \beta \tan \beta} - \frac{\cos \phi}{\tan \beta} \right)$

La durée astronomique du jour est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente laquelle dépend de la période de l'année considérée [14]:

$$D_j = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-tg\phi.tg\delta) \quad (I.16)$$

La durée astronomique du jour est maximale le 21 juin (le jour le plus long de l'année) et minimale le 21 décembre (le jour le plus court de l'année).



## 1.7 Energie solaire

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux.

### 1.7.1 Le rayonnement solaire et le nombre de masse

Le rayonnement solaire correspond approximativement à celui d'un corps noir à 3780 K. En traversant les différentes couches de l'atmosphère Figure (I.4), certaines longueurs d'onde sont absorbées par des gaz comme l'ozone (absorption des rayons ultraviolets) ou la vapeur d'eau (absorption des rayons infrarouges). Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, on introduit la notion du nombre de masse d'air  $AM_y$ ,  $y$  étant défini par [15]:

$$y = 1/\sin \theta \quad (I.17)$$

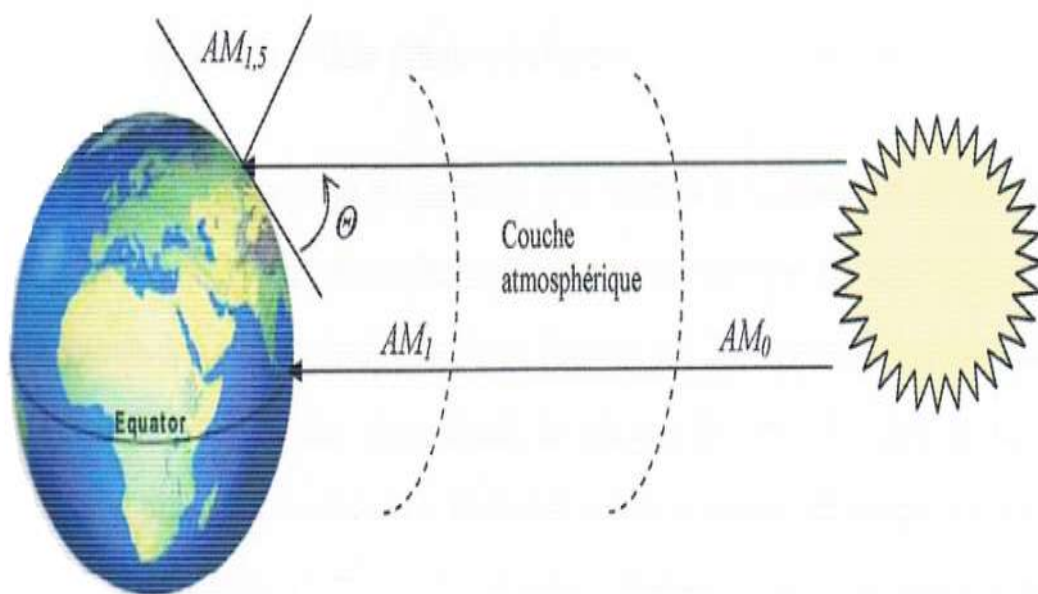


Figure I.4 : le rayonnement solaire [5]

$\theta$  : représente l'élévation du soleil sur l'horizon.

En définit ainsi les conditions  $AM_1$  quand le soleil est au zénith et  $AM_2$  quand le soleil est à  $30^\circ$  au-dessus de l'horizon.

La condition hors atmosphère est représentée par la notion  $AM_0$ .

La condition  $AM_{1,5}$  est satisfaite lorsque le soleil est à  $90^\circ$

### 1.7.2 Nature du rayonnement solaire

#### 1.7.2.1 Composition

L'émission d'ondes électromagnétiques par le Soleil est bien modélisée par un corps noir à 5800 Kelvin, donc par la loi de Planck. Le pic d'émission est dans le jaune ( $\lambda=570$  nm), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1% d'ultraviolets. Arrivé au niveau de la mer, c'est-à-dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire a subi plusieurs « filtrations ». On peut repérer notamment sur le spectre ci-contre les bandes d'absorption de l'ozone (connu pour stopper une bonne partie des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau[16].

#### 1.7.2.2 Nature

L'intensité du rayonnement n'est pas constante et augmente lors des éruptions solaires pendant les maxima du cycle solaire. On distingue trois catégories de rayonnement solaire :

- L'émission du Soleil calme,
- La composante lentement variable, sursauts solaires

### 1.7.3 Atmosphère

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse entourant la Terre solide. L'air sec se compose de 78,08 % d'azote, 20,95 % d'oxygène, 0,93 % d'argon, 0,039 % de dioxyde de carbone et des traces d'autres gaz.

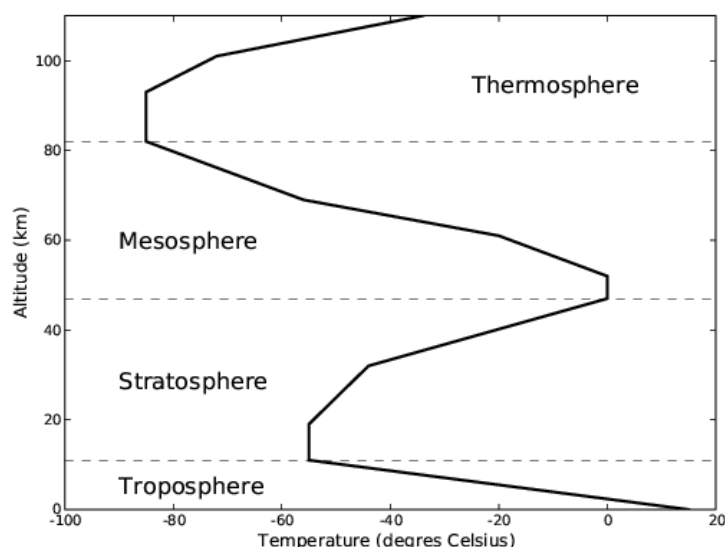


Figure I.5 : Couches de l'atmosphère [17]

## 1.8 Rayonnement solaire au sol

Le rayonnement solaire au sol a trois composantes Figure (1.6) :

### 1.8.1 Le rayonnement direct I

C'est le rayonnement qui arrive directement du disque solaire au niveau du sol sans subir des modifications [17].

### 1.8.2 Le rayonnement diffus D

C'est le rayonnement qui arrive au niveau au sol après avoir subi des collisions avec les constituants atmosphériques On en distingue : Le rayonnement diffus isentropique, circonférence , horizon [17].

### 1.8.3 Le rayonnement réfléchi R

Le rayonnement réfléchi est à prendre en compte seulement dans le cas d'une surface inclinée. Il est directement proportionnel au rayonnement global. Le sol réfléchit une partie de l'éclairement qu'il reçoit en fonction de sa nature (sol cultivé 10 à 25%, neige, 60 à 90 %, sable 30 à 40%)

### 1.8.4 Le Rayonnement Global G

Le rayonnement global est la somme des trois composantes directes, diffus et réfléchi Figure (I.6), donné par la formule :

$$G = I + D + R \quad (I.18)$$

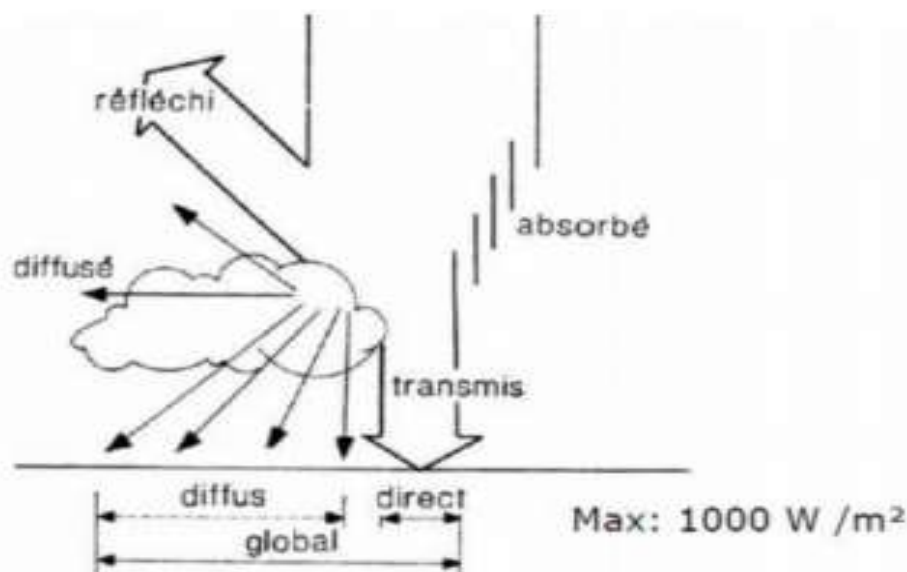


Figure 1.6 : les Composants du Rayonnement Solaire [18]

### 1.8.4.1 Rayonnement Global sur une surface horizontale

Pour un rayonnement incident  $I$  faisant un angle  $h$  avec l'horizontale, le rayonnement Global  $G$  (Voir la l'équation I.18) :

$$G = I \sin h + D \quad (\text{I.19})$$

Le rayonnement diffus peut être estimé par la relation :

$$I = C \times D \quad (\text{I.20})$$

Où  $C$  est un coefficient de diffusion du ciel. Les valeurs de  $C$  sont **Tableau 1**(Annexe 1) et sont fonction de paramètres climatiques [17]

### 1.8.4.2 Le rayonnement Global sur une surface inclinée

Le rayonnement solaire global  $G(\beta)$  sur une surface arbitraire ayant une inclinaison par rapport à l'horizontale et un angle azimutal est la somme des composantes directe  $I(\beta)$  diffuse  $D(\beta)$  et réfléchi par le sol  $R(\beta)$  .du rayonnement solaire.

$$G(\beta) = I(\beta) + D(\beta) + R(\beta) \quad (\text{I.21})$$

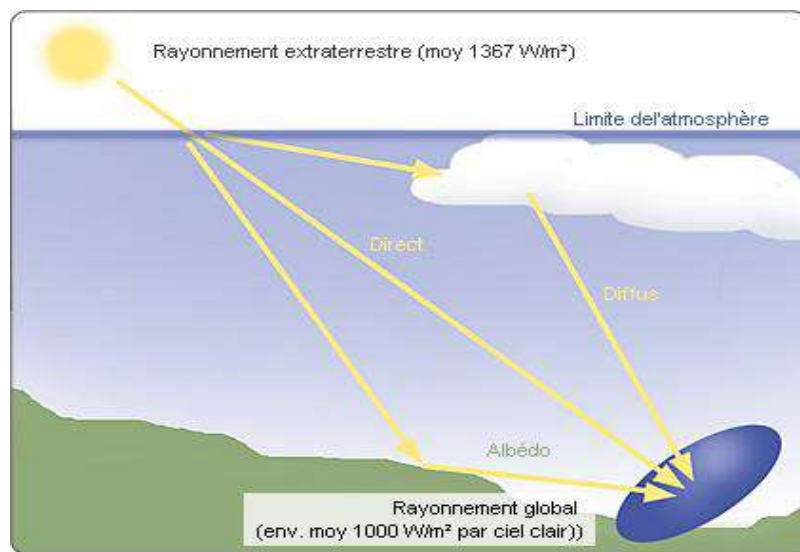


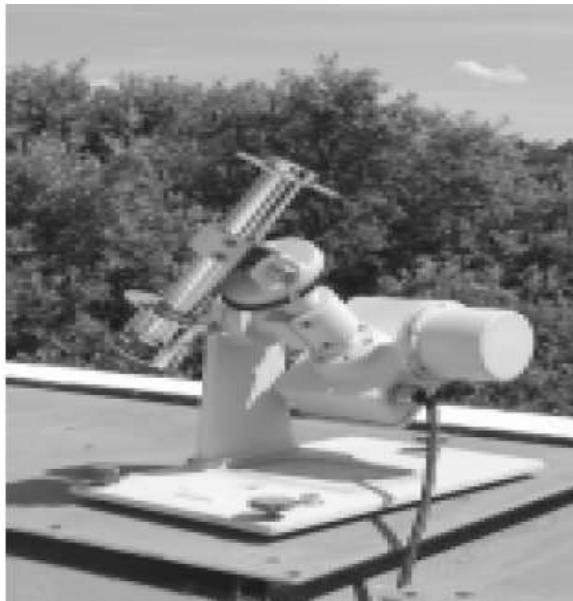
Figure I.7 : Rayonnement Global [17]

## 1.9 Albédo

L'albédo du système Terre Atmosphère est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi vers l'espace. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé. Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont : les nuages, les surfaces de neige et de glace et les aérosols. **Par exemple**, l'albédo de la neige fraîche est de 0,87 ce qui signifie que 87 % de l'énergie solaire est réfléchi par ce type de neige.

### **1.10 Mesure du rayonnement solaire**

De façon générale, la mesure de flux global d'irradiation s'effectue dans les stations météorologiques sur le plan horizontal à l'aide d'un Pyranomètre Figure (I.8) [9], Cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie qui convertit le rayonnement reçu en chaleur puis en électricité. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global : elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série.



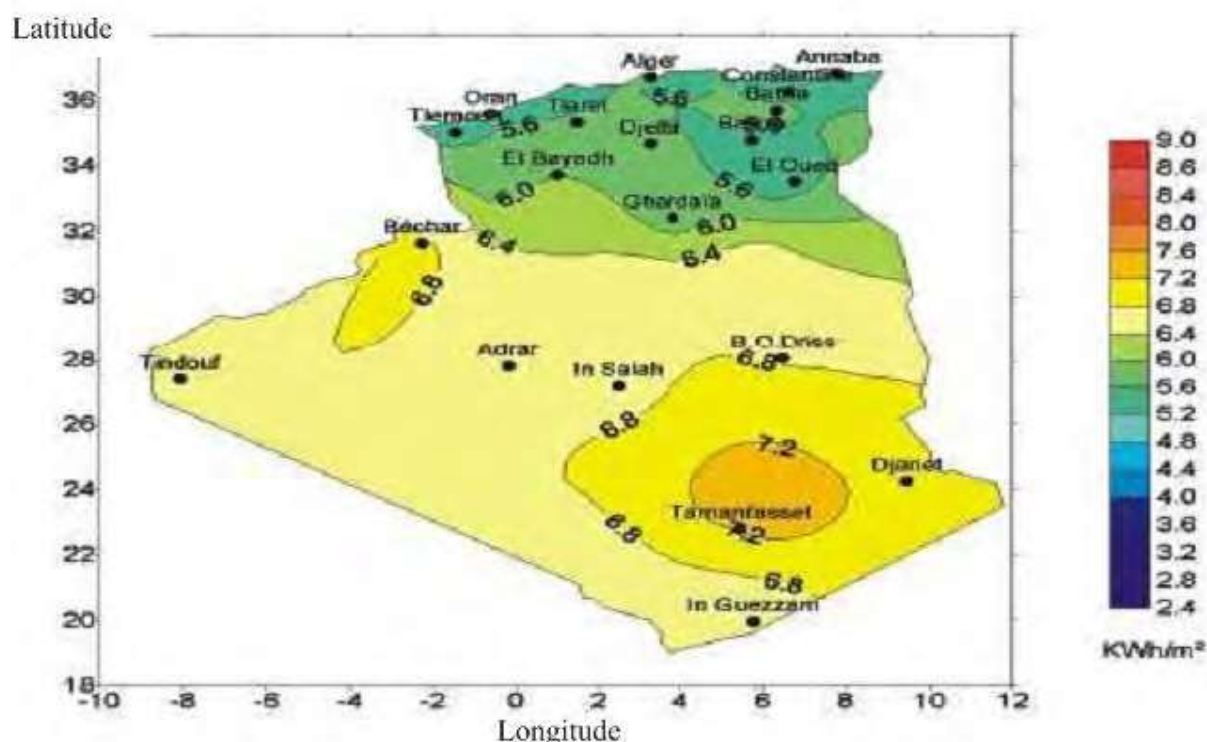
**Figure I.8** : Pyranomètre équipé d'un pare-soleil : mesure de la composante diffuse [9]



**Figure I.9** : Pyrhéliomètre Eppley : mesure de la composante directe [9]

### 1.11 Le Rayonnement solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde : 2200 KWh/m<sup>2</sup>/an. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national Figure(I.10) , soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2263KWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. Ce gisement solaire dépasse les 5000TWh [19].



**Figure I.10 :** Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu [19].

## **1.12 Conclusion**

On a présenté dans ce chapitre un récapitulatif de quelques notions de base relatif au gisement solaire, la connaissance de ces notions fondamentales et particulièrement le rayonnement global au sol va nous servir par la suite dans l'exploitation de l'énergie solaire par un capteur solaire et concentrateurs solaires.

L'énergie solaire est disponible sur toute la surface de notre planète qui reçoit plus de 15000 fois l'énergie que l'humanité consomme. Les mesures solaires sont principalement des mesures au sol du rayonnement direct, diffus et du rayonnement global. D'autres paramètres peuvent également être mesurés et qui sont : les durées d'insolation et le temps horaire. Les mesures solaires sont effectuées par des appareils tels que l'héliographe, le Pyrhéliometre qui mesure le rayon incident et les pyranomètres.

## Chapitre 2 : MODELISATION DU POTENTIEL SOLAIRE ET SYSTEME DE POURSUITE SOLAIRE

### 2.1 Introduction

La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température des cellules. Ces deux variables influençant sur le comportement du système et présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes. A cet effet et en fonction du type de cette charge, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande du convertisseur. Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau photovoltaïque à sa puissance maximale. La méthode de suivi ou "Tracking" connue sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche du maximum de la courbe de puissance du panneau photovoltaïque.

Afin de collecter le maximum de puissance, on utilise aussi des dispositifs dits systèmes de poursuite solaire 'sun tracking systems'. Le système de poursuite solaire doit être ajusté de sorte que la source PV soit toujours visé avec précision face au soleil [3].

### 2.2 Description Des Modèles Semi Empirique

#### 2.2.1 Modèle de Lacis & Hansen

La formule générale proposée par Lacis & Hansen pour le calcul du rayonnement solaire global sur un plan horizontal est donnée par l'équation (II.1) [20] :

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

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

$$I_{sc}(nj) = I_0 \times \left[ 1 + 0.033 \times \cos \left( \frac{360}{365} (nj - 3) \right) \right] \quad (\text{II.2})$$

Avec,  $I_0$  la constante solaire moyenne égale à  $1367 \text{ W.m}^{-2}$  et  $nj$ , le numéro de jour dans l'année ( $nj = 1$  pour le 1er Janvier et  $nj = 365$  pour le 31 Décembre).  $\theta_z$  Est l'angle zénithal,  $\theta_z = (90^\circ - h)$  où  $h$  est la hauteur du soleil



## Chapitre 2 : Modélisation du potentiel solaire et Système de poursuite solaire

Le coefficient  $\alpha_0$  correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone, est calculé par la relation (II.3) :

$$\alpha_0 = \frac{0.021188U_0}{1+0.042U_0+3.2310^{-4}U_0} + \frac{1.082U_0}{(1+138.6U_0)^{0.805}} + \frac{0.0658U_0}{1+(103.6U_0)^3} \quad (\text{II.3})$$

Où,  $U$ , l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement 0 solaire à travers cette couche et définie par :

$$U_0 = l \times m_r \quad (\text{II.4})$$

Où,  $m$  est la masse d'air optique relative donnée l'équation (II.5) :

$$m_r = [\cos\theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (\text{II.5})$$

Et,  $l$  représente l'épaisseur de la couche d'ozone réduite (cm)

$$l = \{235 + [150 + 40 \sin(0.9856(nj - 30)) + 20 \sin(3\lambda)][\sin^2(1.28\phi)]\}/1000 \quad (\text{II.6})$$

let  $\phi$  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 (II.7)

$$\alpha_w = \frac{2.9X_W}{(1+141.5X_W)^{0.635}+5.925X_W} \quad (\text{II.7})$$

$X_W$  Est l'épaisseur d'eau condensable corrigée par trajet optique du rayonnement à travers cette couche, donnée par

$$X_W = m_a \times U_W \quad (\text{II.8})$$

$U_W$  Est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm). Elle est donnée par l'équation (II.9)

$$U_W = \frac{0.493}{T} HR \times \exp\left[26.23 - \frac{5416}{T}\right] \quad (\text{II.9})$$

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

$$m_a = m_r \left(\frac{P}{1013}\right)^{0.75} \times \left(\frac{273}{T}\right)^{0.5} \quad (\text{II.10})$$

$P$  est la pression atmosphérique (mbar).

$$P = P_0 \exp(-0.0001184 \times z) \quad (\text{II.11})$$

$P$  est la pression atmosphérique au niveau de la mer ( $P_0 = 1013$  mb);  $z$ , l'altitude 0 du site (m), par rapport au niveau de la mer;  $T$ , la température ambiante (K) et  $HR$ , l'humidité relative (%). [20]

### 2.2.2 Modèle de Davies & Hay

- **Calcul du rayonnement direct**

La relation proposée par Davies & Hay pour le calcul du rayonnement direct est exprimée par l'équation (II.12) [20]:

$$I = I_{sc} \times [(1 - \alpha_0) \cdot \tau_0 - \alpha_\omega] \tau_a \times \cos\theta_z \quad (\text{II.12})$$

Où,  $\alpha_0$  est le coefficient correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone, calculé par l'équation (II.3); et  $\tau_r$  le coefficient de transmission après diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh, représenté par Davies *et al.* [20] selon l'équation (II.13).

$$\tau_r = 0.972 - 0.08262m_a + 0.00933m_a^2 - 0.00095m_a^3 + 0.000437m_a^4 \quad (\text{II.13})$$

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

$$m_a = \frac{p}{p_0} m_r = \frac{\exp(-0.0001184 \times z)}{\cos(\theta_z) + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}} \quad (\text{II.14})$$

Le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau  $\alpha_\omega$ , est donné par l'équation (II.7).

Le coefficient de transmission après diffusion par les aérosols  $\tau_a$  est proposé par Mächler [20] selon l'équation (II.15).

$$\tau_a = (0.12445\alpha_1 - 0.0162) + (1.003 - 0.125)\exp[-\beta_0 m_a (1.089\alpha_1 + 0.5123)] \quad (\text{II.15})$$

Et  $\beta_0 < 0.5$

Tels que  $\alpha_1$  et  $\beta_0$  sont respectivement le coefficient caractérisant la visibilité du ciel et le coefficient de trouble d'Angstrom. Leur calcul est basé sur la détermination expérimentale de deux coefficients d'atténuation  $k_{a\lambda_1}$  et  $k_{a\lambda_2}$  correspondant aux longueurs d'onde où l'absorption par la vapeur d'eau n'intervient pas ( $\lambda_1 = 380 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 500 \text{ nm}$  respectivement). Les mesures utilisées dans ce travail nous ont été fournies par le NCDC (National Climatique Data Center) à Asheville en Caroline du Nord [20].

Sachant que  $\alpha$  est proche de 0 pour les petites particules, croît avec la taille des particules et atteint 4 pour les grosses particules. Dans notre travail, on prend  $\alpha_1 = 1.3$ .

Le coefficient  $\beta_0$  vaut 0.02 pour un ciel très pur (bleu profond) et 0.2 pour un ciel pollué (bleu laiteux) [20].

- **Calcul du rayonnement diffus**

Le rayonnement diffus sur un plan horizontal est la somme des trois composantes diffuses:  $D_r$ ,  $D_a$  et  $D_m$ .

$$D_r = I_{sc} \tau_0 \tau_a (1 - \tau_r) 0.5 \times \cos \theta_z \quad (\text{II.16})$$

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

$$\tau_0 = 1 - \alpha_0 \quad (\text{II.17})$$

Le coefficient  $\alpha_0$  qui correspond à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone est calculé par l'équation (II.3).

$$D_a = I_{sc} (\tau_0 \tau_r - \alpha_\omega) \times [F_c \times \omega_0 (1 - \tau_a)] \cos \theta_z \quad (\text{II.18})$$

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  $F_c$  qui est le coefficient de dispersion direct de l'atmosphère.

Le **Tableau 2** donne des valeurs de ce facteur en fonction de l'angle zénithal (Annexe 1).

L'expression du rayonnement diffus issu du phénomène de multi réflexion est donnée par l'équation (II.19) :

$$D_m = \frac{(I + D_a + D_r) \times \rho \times \rho'_a}{(1 - \rho \times \rho'_a)} \quad (\text{II.19})$$

Où,  $\rho'_a$  est l'albédo du ciel clair du site considéré, qui est donné par la relation (II.20) :

$$\rho'_a = 0.0685 + 0.17 \omega_0 (1 - \tau'_a) \quad (\text{II.20})$$

$\tau_a$  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/P0).

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

### 2.2.3 Modèle de Bird & Hulstrom

- Calcul du rayonnement direct

L'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal est donné par la relation [20] :

$$I = 0.951 \times I_{sc} \times \tau_r \times \tau_g \times \tau_\omega \times \tau_a \times \cos \theta_z \quad (\text{II.21})$$

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

$$\tau_0 = 1 - 0.1611 \times U_0 \times (1.0 + 139.48 \times U_0)^{-0.3035} \times 0.002715 \times U_0 \times (1 + 0.044 \times U_0 + 0.0003 \times U_0^2)^{-1} \quad (\text{II.22})$$

$U_0$ , est l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et définie par l'équation (II.4) :

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

$$\tau_\omega = 1 - 2.4959 \times U_w \times [(1 + 79.03 \times U_w)^{0.6828} + 6.385 \times U_w]^{-1} \quad (\text{II.23})$$

$U_w$  : L'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm) donnée par l'équation (II.9).

Le coefficient de transmission après absorption par les gaz permanents (CO2 et O2) s'exprime en fonction de la masse d'air corrigée à l'aide de l'équation (II.24) :

$$\tau_g = \exp(-0.0127 \times m_a^{0.26}) \quad (\text{II.24})$$

$m_a$  est la masse d'air corrigée exprimée par l'équation (II.14). Le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire s'exprime par :

$$\tau_r = \exp[-0.0903 \times m_a^{0.85} (1.0 + m_a - m_a^{1.01})] \quad (\text{II.25})$$

Et le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols peut se calculer par :

$$\tau_a = \exp[-k_a^{0.873} \times m_a^{0.9108} \times (1.0 + k_a - k_a^{0.7088})] \quad (\text{II.26})$$

$$k_a = 0.2758 \times k_{a\lambda/\lambda} = 0.38 \mu m + 0.35 \times k_{a\lambda/\lambda} = 0.5 \mu m \quad (\text{II.27})$$

$k_{a\lambda/\lambda} = 0.38 \mu m$  Et  $k_{a\lambda/\lambda} = 0.5 \mu m$  sont deux coefficients d'atténuation déterminés à partir des mesures expérimentales déduites par l'équation (II.28) :

$$k_a(\lambda) = \beta \times \lambda^{-\alpha_1} \quad (\text{II.28})$$

Où,  $\alpha_1$  est le coefficient de distribution granulométrique et  $\beta_0$  le coefficient de trouble atmosphérique établi par Angstrom et déterminés dans la section (2.2). Ces valeurs nous ont permis de calculer  $k_{a\lambda/\lambda} = 0.38 \mu\text{m}$  et  $k_{a\lambda/\lambda} = 0.5 \mu\text{m}$ .

- **Calcul du rayonnement diffus**

Dans ce modèle aussi, le rayonnement diffus sur un plan horizontal est la somme des trois composantes diffuses dues aux divers types de diffusion du rayonnement solaire par la pellicule atmosphérique.

$$D = D_r + D_a + D_m \quad (\text{II.29})$$

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

$$D_r = 0.79 \times I_{sc} \times \cos(\theta_z) \times \tau_0 \times \tau_g \times \tau_w \times \tau_{aa} \times 0.5 \times \frac{(1 - \tau_r)}{(1 - m_a + m_a^{1.02})} \quad (\text{II.30})$$

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

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_0) \times (1 - m_a + m_a^{1.06}) \times (1 - \tau_a) \quad (\text{II.31})$$

Et,  $\omega_0$ , est le coefficient de réflexion unitaire relatif à la diffusion par les aérosols. Dans ce modèle, Bird & Hulstrom recommandent  $\omega_0 = 0.90$ .

Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques Le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols est donnée par:

$$D_a = 0.76 \times I_{sc} \times \cos(\theta_z) \times \tau_0 \times \tau_g \times \tau_w \times \tau_{aa} \times F_c \times \frac{(1 - \tau_{as})}{(1 - m_a + m_a^{1.02})} \quad (\text{II.32})$$

Où  $F_c$ , est le coefficient de dispersion de l'atmosphère.  $F_c = 0.84$  est la valeur recommandée par ce modèle [20].

$\tau_{as}$  est donné par la relation suivante :

$$\tau_{as} = \tau_a / \tau_{aa} \quad (\text{II.33})$$

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

$$D_m = \frac{(I + D_a + D_r) \times \rho \times \rho_a}{(1 - \rho_g \times \rho_a)} \quad (\text{II.34})$$

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

$$\rho'_a = 0.0685 + (1 - F_c) \times (1 - \tau_{as}) \quad (\text{II.35})$$

### 2.2.4 Modèle de Atwater & Ball

- Calcul du rayonnement global

La formule générale proposée par Atwater & Ball pour le calcul du rayonnement solaire global est donnée par l'équation mathématique (II.38) [20] :

$$G = I_{sc} \times \cos \theta_z \times \left[ \frac{(T_M - \alpha_w) \times \tau_a}{(1 - 0.0685 \times \rho)} \right] \quad (\text{II.36})$$

$T_M$  est donnée par la relation suivante :

$$T_M = 1.021 - 0.0824 \times [m_0(949 \times 10^{-10} \times P + 0.051)]^{0.5} \quad (\text{II.37})$$

Et,  $m_0$  est la masse d'air d'ozone donnée par :

$$m_0 = \frac{35}{(1224 \cos^2(\theta_z) + 1)^{0.5}} \quad (\text{II.38})$$

Le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau est donné par l'équation(II.39) :

$$\partial_w = 0.077 \times (U_\omega \times m_0)^{0.3} \quad (\text{II.39})$$

$U_\omega$  est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm) donnée par l'équation (II.9).

Le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols est fourni par L'expression suivante :

$$\tau_a = \exp(-K_a \times m_a) \quad (\text{II.40})$$

$K_a$  est déterminé par l'équation (II.27).

### 2.2.5 Modèle Circumsolaire

Le modèle circumsolaire (1983) suppose que tout le rayonnement provient du disque solaire. C'est un modèle qui suppose que le ciel est sans nuages Il a été démontré que [17] :

$$D(\beta) = Dr_b \quad (\text{II.41})$$

$$I(\beta) = \frac{\sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega}{\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega} \quad (\text{II.42})$$

Où  $r_b$  est le rapport entre le rayonnement direct journalier sur un plan incliné à celui du plan horizontal.

$\phi$  Est la latitude (degrés) et  $\beta$  la pente de la surface à l'horizontale (degré). La déclinaison de la journée  $\delta$  (degré) et l'angle horaire  $\omega$  (degré)

### 2.2.6 Modèle Temps-Coulson

Le modèle de Temps-Coulson (1977) pour un ciel clair prend en considération la correction de au rayonnement diffus horizon et diffus circonférence ; Il peut être estimé [17] :

$$D(\beta) = D \cos^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) \cdot \left( 1 + \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right) \cdot (1 + \cos^2 i) \sin^3 \theta_z \quad (\text{II.43})$$

$i$  : Angle d'incidence

$\theta_z$  : Angle zénithal du soleil

Le terme  $\left( 1 + \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right)$  rend compte de l'effet horizon

Le terme  $(1 + \cos^2 i) \sin^3 \theta_z$  pour l'effet circumsolaire

$D(\beta)$  : Rayonnement diffus sur plan incliné (W/m<sup>2</sup>)

$I(\beta)$  : Rayonnement direct sur plan incliné (W/m<sup>2</sup>)

### 2.2.7 MODELE DE LIU JORDAN

Dans la pratique il est plus convenable d'estimer l'éclairement global sur un plan incliné par la relation de LIU JORDAN généralisée sous la forme [21] :

$$G(\beta) = I_h \cdot R_b + d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II.44})$$

$I_h$ : Correspond au cercle de l'horizon.

Où l'irradiation directe sur un plan incliné est exprimée par la relation [22]:

$$I(\beta) = I_h \times R_b \quad (\text{II.45})$$

Où, le facteur d'inclinaison  $R_b$  du rayonnement direct est :

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (\text{II.46})$$

L'irradiation diffuse sur un plan incliné est :

$$D(\beta) = d_h \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II.47})$$

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

$$R(\beta) = (I_h \cdot d_h) \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \cdot \rho \quad (\text{II.48})$$

Les 02 composantes du rayonnement solaire global sur un plan horizontal, sont estimées par le modèle de PERRINDE BRICHAMBEAUT comme suit :

- **Rayonnement direct :**

$$I = A \cdot \sin h \cdot \exp \left( \frac{-1}{C \cdot \sin(h + 2)} \right) \quad (\text{II.49})$$

- **Rayonnement diffus :**

$$D = B \cdot (\sin h)^{0.4} \quad (\text{II.50})$$

Où A, B et C sont des constantes qui tiennent compte de la nature du ciel, sont données d'après le **Tableau 3** (Annexe 1).



### 2.2.8 Méthode de Perrin Brichambaut

La méthode empirique de Perrin Brichambaut a donné de bons résultats pour l'estimation de l'énergie reçue par un capteur à orientation quelconque.

Pour un ciel clair, les éclairagements du rayonnement direct  $I$  diffus  $D$  et global  $G$  reçus sur un capteur sont donnés par les relations suivantes [23]:

$$D = A. (\sin(\phi))^{0.4} \quad (\text{II.51})$$

$$G = A''(\sin(h))^{B''} \quad (\text{II.52})$$

$$I = \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) D + G \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \cdot \rho \quad (\text{II.53})$$

$$I_b = A. \left( \exp\left(-\frac{1}{B. \sin(\phi + 2)}\right) \right) \cos(\theta) \quad (\text{II.54})$$

Et  $I_b$  : l'éclairement solaire direct sur une surface inclinée.

$A, B, A', A'', B''$  Sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère **Tableau 4** (Annexe 1).

Le ciel couvert est un ciel gris totalement rempli de couches nuageuses continues, plus ou moins denses optiquement, et au travers des quelles il n'est pas possible de distinguer le disque solaire. Dans ces conditions, le rayonnement direct est inexistant et le rayonnement global ne se compose que du rayonnement diffus. Si la couverture nuageuse est homogène, on peut considérer que le rayonnement diffus du ciel est isotrope de même que le rayonnement diffus du sol. Le rayonnement global par un ciel couvert est :

$$G(\beta) = KI_g(1 + 0.3 \sin(\phi)) \quad (\text{II.55})$$

Et  $G(\beta)$  : l'éclairement solaire global sur une surface inclinée

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

$K$  : 0.6 pour un ciel bleu foncé.

$K$  : 0.3 pour un ciel bleu clair.

$K$  : 0.6 pour un ciel bleu laiteux

### 2.2.9 Modèle de Capderou

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs des troubles.

A partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directe et diffuse par ciel clair [24].

- **Eclairement reçu sur un plan horizontal par ciel clair**

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

$$T_L = T_0 + T_1 + T_2 \quad (\text{II.56})$$

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

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\phi) + 0.1(2 + \sin(\phi))A_{he} - 0.2Z - (1.22 + 0.14A_{he})(-\sin(h)) \quad (\text{II.57})$$

$$A_{he} = \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right)(n_j - 121)\right) \quad (\text{II.58})$$

$Z$  : l'altitude de lieu.

$T_1$  : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère ( $O_2$ ,  $CO_2$  et  $O_3$ ) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche :

$$T_1 = 0.89^Z \quad (\text{II.59})$$

$T_2$ : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption (il dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom  $\beta_0$ ,  $T_2$  est donné par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4A_{he})(0.63)^Z \quad (\text{II.60})$$

L'éclairement direct par ciel clair obtenu sur un plan horizontal est donné par:

$$I = I_0 \sin(h) C_{ts} \exp\left[-T_L \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^Z} \sin(h)\right)^{-1}\right] \quad (\text{II.61})$$

L'éclairement diffus incident sur un plan horizontal.

$$D = I_0 C_{ts} \exp((-1 + 1.06 \log(\sin(h))) + a - \sqrt{a^2 + b^2}) \quad (\text{II.62})$$

Avec:  $a = 1.1$

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

$C_{ts}$  : Correction terre soleil

L'éclairement global reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$G = I + D \quad (\text{II.63})$$

• **Eclairement Global Reçu Sur Un Plan Incliné :**

L'éclairement direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné.

$$I = I_n \cos(i) = I_0 C_{ts} \exp\left[-T_L \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89z} \sin(h)\right)^{-1}\right] \cos(i) \quad (\text{II.64})$$

$I_n$  : L'éclairement direct normal.

$i$ : L'angle d'incidence.

➤ L'éclairement diffus du ciel est composé de trois parties :

- La composante directe ou circumsolaire. Elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi-angle au sommet compris entre 3° et 15°. [24].

$$\delta_d = I_0 C_{ts} \exp(-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}) \quad (\text{II.65})$$

Avec :  $a = 3.1 - 0.4b$

$$b = \log(T_L - T_0) - 2.28 - 0.05 \log(\sin(h))$$

- La composante isotrope qui correspond à un ciel de luminance uniforme.

$$\delta_i = D - \delta_d \sin(h) \quad (\text{II.66})$$

$D$  : est le diffus sur un plan horizontal.

- La composante du cercle de l'horizon qui provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6°. Elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques.

$$\delta_h = I_0 C_{ts} \frac{-0.02a}{a^2 + ab + 1.8} \exp(\sin(h)) \quad (\text{II.67})$$

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

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

- Le diffus du ciel est l'éclairement diffus incident en provenance du ciel :

$$d_{ciel} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \frac{1 + \sin(\gamma_1)}{2} + \delta_h \cos(\gamma_1) \quad (\text{II. 68})$$

- L'éclairement diffus du sol est caractérisé par l'albédo du sol qui indique la réflexion de la lumière incidente. Pour un plan quelconque ( $\alpha, \gamma_1$ )

$$d_{ciel} = \delta_d \frac{1 + \sin(\gamma_1)}{2} \quad (\text{II. 69})$$

Avec :  $\delta_d = \rho G$

$G$  : est l'éclairement global horizontal.

$\rho$  : Albédo du sol.

$\gamma_1$  : Hauteur du plan

$\alpha$  : Coefficient d'absorption

- L'éclairement diffus rétrodiffusé est celui diffusé à nouveau par le ciel vers le sol. Selon le raisonnement de Capderou, cette composante a la forme suivante [24] :

$$\delta'_i = 0.9(\rho - 0.2)G \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{(T_L - T_0)}}\right) \quad (\text{II. 70})$$

- L'éclairement diffus incident sur un plan incliné est donné par :

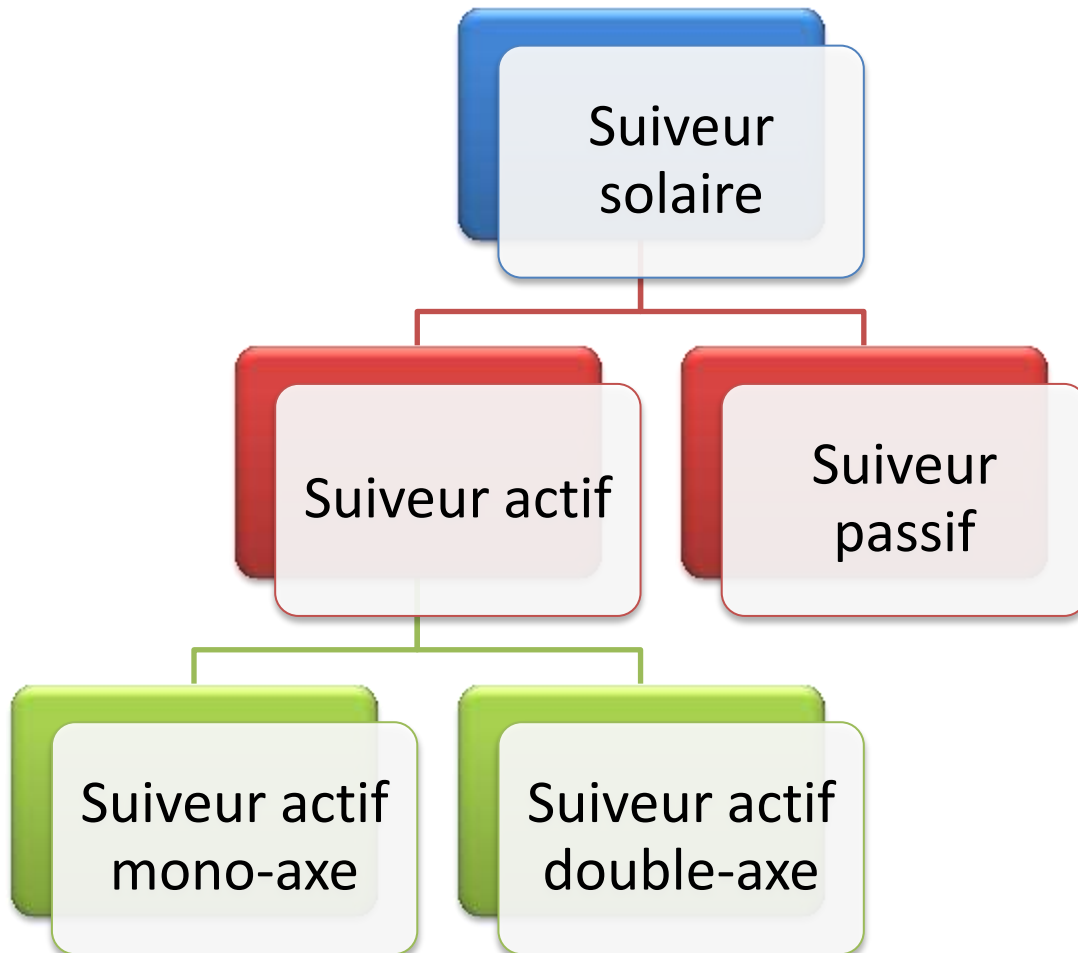
$$D = d_{ciel} + d_{sol} + \delta'_i \frac{1 + \sin(\gamma_1)}{2} \quad (\text{II. 71})$$

D'où l'éclairement global incident, à un instant donné sur un plan ( $\alpha, \gamma_1$ ) est:

$$G = I + D \quad (\text{II. 72})$$

### 2.3 Les Types Des Suiveurs Solaires

On distingue principalement deux grandes familles de suiveurs solaires : les passifs et les actifs qui comportent les suiveurs mono-axe et double axe. Figure (II.1)



**Figure II.1 :** Types de suiveurs solaires

Le premier type des suiveurs passifs Figure (II.2) est constitué dans son architecture de deux tubes en cuivre montés sur les côtés Est et Ouest du panneau PV. Le tube de matière cuivre est rempli de fluides chimiques capable de se vaporiser à basse température. En effet, lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente la température d'un côté du panneau, le composé dans le tube en cuivre se vaporise [25]. La partie gazeuse du composé occupe un plus grand volume interne, et sa partie liquide est décalée vers le côté ombragé. Cette opération de transfert de masse ajuste l'équilibre du panneau PV en le faisant tourner vers la source des rayons solaires. Ce type de suiveur ne consomme aucune énergie pour le repositionnement du panneau.

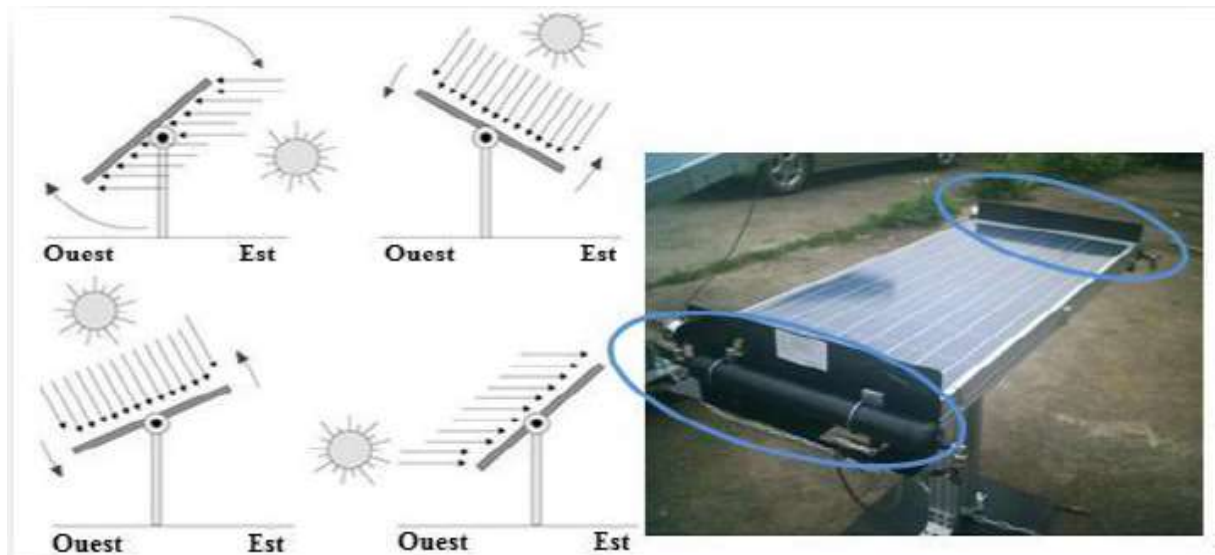


Figure II.2 : Exemple et fonctionnement du suiveur passif [25]

Les suiveurs solaires actifs Figure (II.3) utilisent le principe de la détection de lumière, suivant la trajectoire solaire en cherchant à optimiser au maximum l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface. Il existe deux types dans cette famille : les suiveurs mono-axe et double axe. L'avantage de ces derniers par rapports aux suiveurs passifs c'est qu'ils représentent une meilleure précision de suivi et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les ajuster [25].

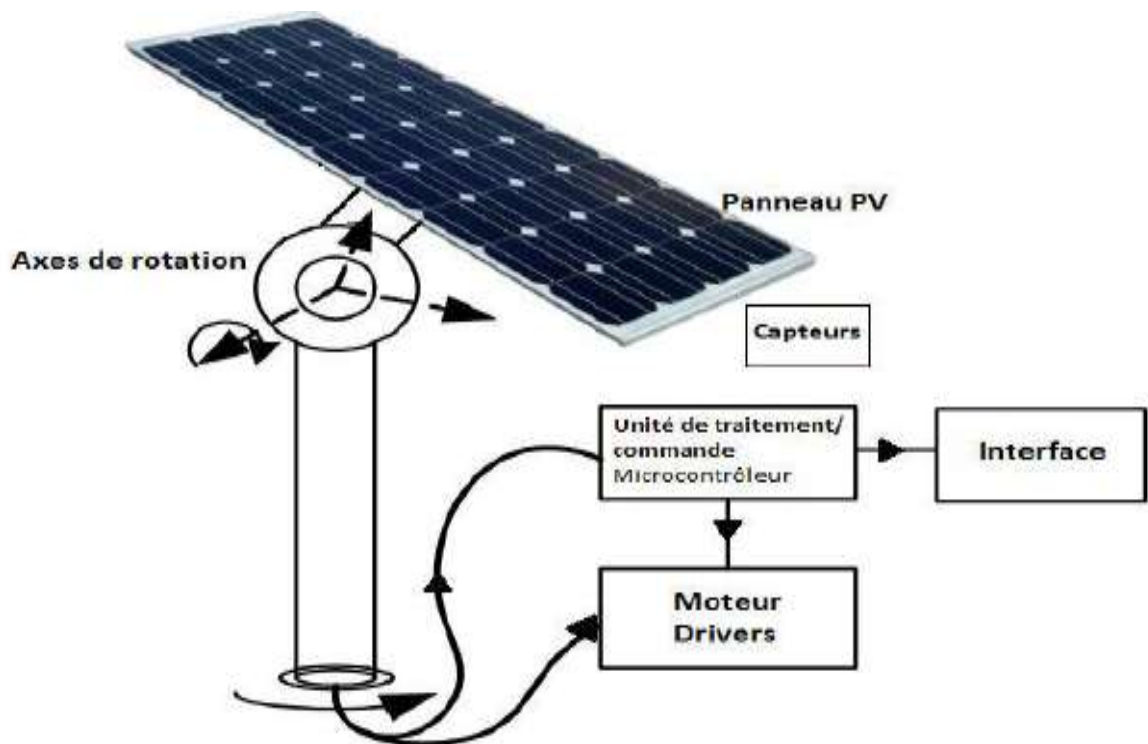


Figure II.3 : Exemple et fonctionnement du suiveur actif [25]

## 2.4 Type D'orientation

le panneau solaire doit suivre le soleil, c'est à dire, il faut que les rayons qu'il reçoit lui soient perpendiculaires. Pour cela, il faut rendre le panneau mobile, il faut donc concevoir un mécanisme qui permettrait au panneau de suivre le soleil suivant sa position dans la journée (de l'est à l'ouest) et sa hauteur dans le ciel qui change avec la déclinaison solaire (angle variant à cause de l'inclinaison de la terre).[3]

### 2.4.1 Orientation 1 Axe

Un moteur assure la rotation d'un arbre sur lequel est fixé le panneau Figure (II.4).

Cela donc permettra au panneau d'aller de l'est à l'ouest.

- **Axe Vertical Et Inclinaison Fixe De La Surface**

Ce mode utilise une surface orientable avec une pente extérieure fixe  $\beta$  et l'angle extérieur d'azimut variable  $a$ , tournant autour d'un axe vertical comme montré sur la figure (II.4) Pour ce cas, le rayonnement solaire est maximum quand  $a = a_s$  [26]

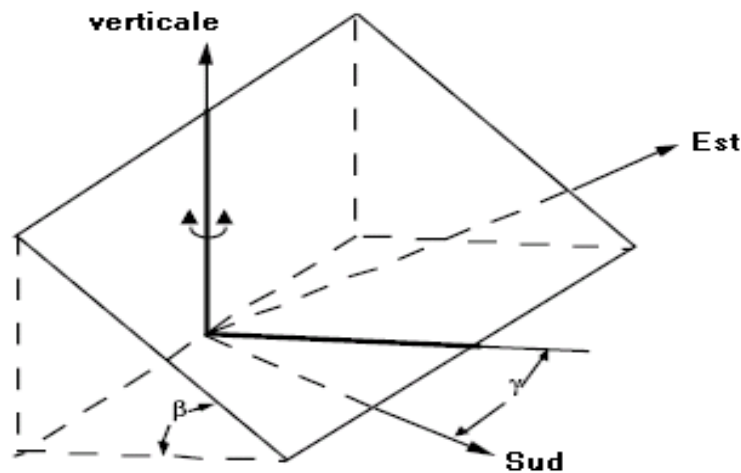


Figure II.4 : Orientation d'une surface (axe vertical)[26]

- **Axe Horizontal, Surface Parallèle A L'axe**

Pour ce deuxième mode, la surface tourne autour d'un axe simple qui est toujours parallèle à la surface. Pour un axe horizontal, l'inclinaison extérieure de la surface est donnée par [26] :

$$\beta = \tan^{-1}(\tan(\theta_z) \cdot \cos(a - a_s)) \quad (\text{II.73})$$

Où l'angle extérieur d'azimut est donné par :

$$a = \gamma' + 90^\circ \quad \text{si} \quad a_s - \gamma' \geq 0 \quad (\text{II.74})$$

$$a = \gamma' - 90^\circ \quad \text{si} \quad a_s - \gamma' < 0 \quad (\text{II.75})$$

Si la surface tournant autour d'un axe simple qui est toujours parallèle à la surface mais n'est pas vertical ou horizontal, l'angle extérieur d'azimut et la pente de la surface change avec le temps.[26]

$$a = \gamma' + \tan^{-1} \left[ \frac{\sin \theta_z \sin(a - a_s)}{\cos \theta' \cos \beta'} \right] \quad (\text{II.76})$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[ \frac{\tan \beta'}{\cos(a - a_s)} \right] \quad (\text{II.77})$$

### 2.4.2 Orientation 2 Axe

Pour une rotation à deux axe il faut utilisée deux moteur Figure (II.5). Le premier assure la rotation est /ouest et le deuxième la position nord /sud

Le collecteur tournant autour de deux axes (bi-axiales), dans ce cas l'ouverture du collecteur sera toujours normale au soleil, par conséquent l'angle d'incidence est zéro tout Lelong de la journée ( $\cos \theta = 1$ ) [26].

Ce ci est défini par :

$$a = a_s \quad (\text{II.78})$$

$$\beta = \theta_z \quad (\text{II.79})$$

Cette rotation est toujours exigée pour des collecteurs qui suivent le déplacement du Soleil à tout moment de la journée. Cela signifie que le collecteur devra être placé sur une monture permettant de suivre le mouvement du soleil [26].



**Figure II.5 : Orientation 2 axe [3]**



## 2.5 Spécification de la région d'étude

- Le site de Ghardaïa

Le site de Ghardaïa est situé au centre de l'Algérie et distant de 600 km d'Alger à 32.82° de latitude Nord ; 3,82° de longitude Est. ; à l'altitude de 450 mètres. ce site est limité du côté nord par la Wilaya de Laghouat (200km) ; à l'est par la Wilaya de Ouargla (200 km) ; au sud-ouest par la Wilaya d'Adrar (800 km); à l'ouest par la Wilaya d'El-Bayadh (350 km) Figure (II.6) [27].



Figure II.6 : Vue satellitaire du site de Ghardaïa [28].

Tableau II.1 : les Coordonnées Géographique du site de Ghardaïa [29].

Coordonnées Géographique		
Latitude	Altitude	Longitude
32,82°	450m	3,82°

## **2.6 Conclusion**

Les modèles statistiques sont élaborés en fonction des données disponibles. La durée d'insolation a été la première donnée exploitée vue la facilité de sa disponibilité.

Beaucoup de modèles pour estimer le rayonnement solaire global, diffus et direct à partir de la durée d'insolation des valeurs moyennes mensuelles des valeurs moyennes journalières ou horaires d'irradiation moyennant plusieurs paramètres climatologiques. Les données satellitaires fournissent des informations sur la couverture nuageuse, le paramètre le plus important pour l'atmosphère.

À l'exception de l'état où le ciel est clair, la composante diffuse est toujours dominante.

La difficulté d'estimation de cette dernière a contribué à l'élaboration de beaucoup de modèles statistiques. Ces modèles considèrent l'isotropie ou l'anisotropie du ciel.

Dans ce qui suit, une évaluation des modèles choisis sera effectuée afin de connaître la principale différence entre eux. L'étude se basera sur des méthodes graphiques et statistiques afin de déterminer les singularités de chaque modèle. [10]

## Chapitre 3 : PRESENTATION DES RESULTATS

### 3.1 Introduction

Le soleil se déplace au cours de la journée et suivant les saisons. Le panneau solaire se trouve généralement en position fixe, ce qui entraîne des pertes énergétiques précieuses. Une installation fixe, orientée, dans le cas idéal, vers le sud délivre une puissance qui croît très lentement tôt le matin et diminue fortement l'après-midi. Une part importante de l'énergie récupérable est ainsi perdue.

Une installation fixe de 1 kW et orientée de façon optimale, produit par jour d'ensoleillement, environ 5 kWh d'électricité solaire. La même installation de 1 kW avec « suiveur » fournit jusqu'à 10 kWh par jour

Après avoir visualisé les différents modèles mathématiques d'estimation solaire et présenté tous les types de suiveurs solaires dans le chapitre précédent, Dans ce chapitre nous avons réalisé un programme de simulation utilisant Matlab basé sur le modèle CAPDEROU 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)
- La journée de l'équinoxe d'automne (21 septembre).

### 3.2 Coordonnées Horizontal

Pour suivre la trajectoire du soleil doit connaître les coordonnées horizontales du soleil à chaque instant de la journée. Les figures ci-dessous montre l'évolution des valeurs de la hauteur du soleil et de son azimut pendant les quatre jours à étudier ;

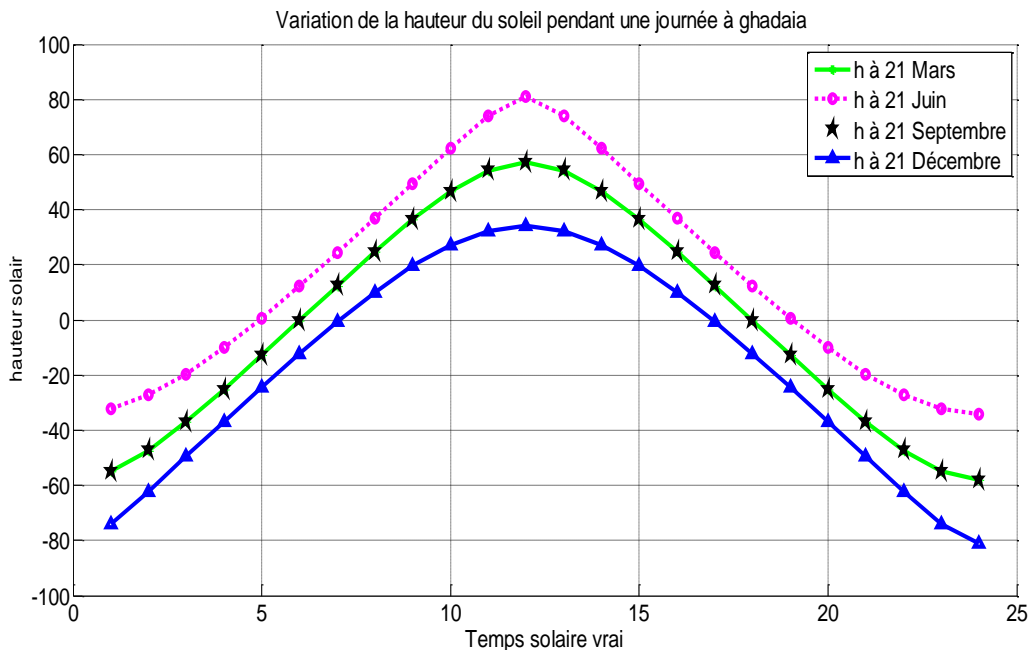


Figure III.1 : Variation de la hauteur du soleil pendant quatre journées étudiera à Ghardaïa

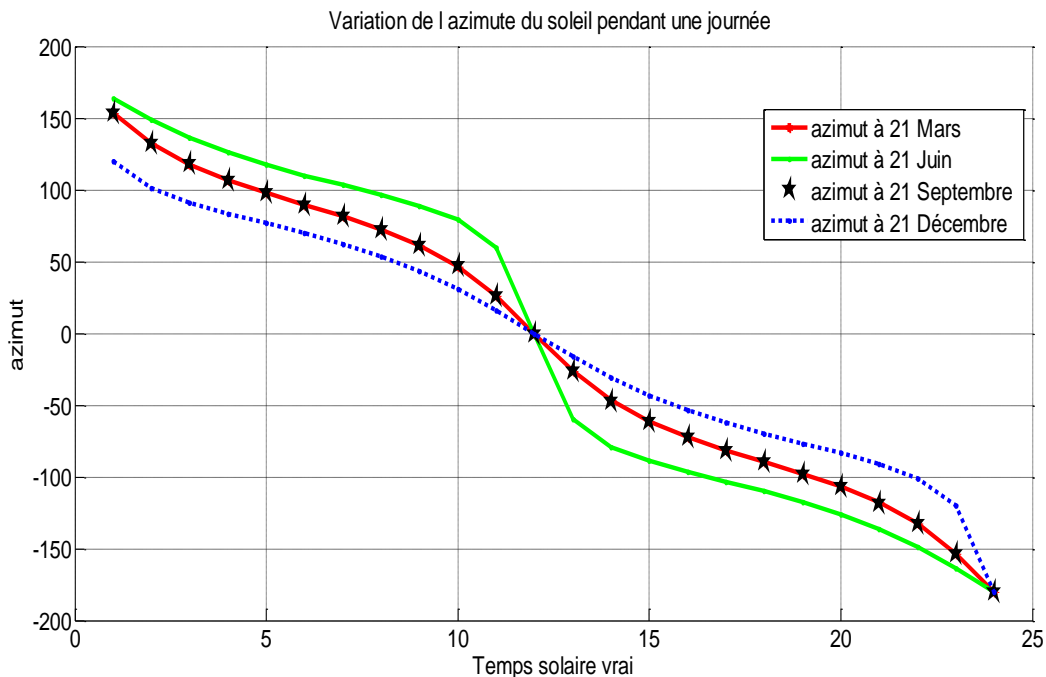


Figure III.2 : Variation de l'azimut pendant les quatre journées étudiera à Ghardaïa

### Chapitre 3 : Présentation des résultats

---

Afin d'obtenir une énergie maximale absorbée par le panneau solaire assez que le rayonnement solaire contenu vertical sur la surface du panneau solaire et peut être exprimée mathématiquement que l'angle d'inclinaison du panneau est la suivante :

$$\beta = 90 - h \quad (\text{III.1})$$

$h$ : Hauteur angulaire du soleil

Exemple :

- Pendant la journée du 21 Mars les rayons solaires arrivent avec un angle de hauteur de  $57.22^\circ$  à 12 heures, l'inclinaison du panneau correspondante est de  $32^\circ$
- Pendant la journée du 21 décembre les rayons solaires arrivent avec un angle de hauteur de  $34.17^\circ$  à 12 heures, l'inclinaison du panneau correspondante est de  $55.83^\circ$
- Pendant la journée du 21 juin les rayons solaires arrivent avec un angle de hauteur de  $82.37^\circ$  à 12 heures, l'inclinaison du panneau correspondante est de  $17.63^\circ$

Pour une orientation optimal il faut que :

$$O = a \quad (\text{III.2})$$

$a$  : Angle d'azimut

$O$  : l'orientation de plan

### 3.3 Résultats Obtenus Pour La Journée Du 21 Mars

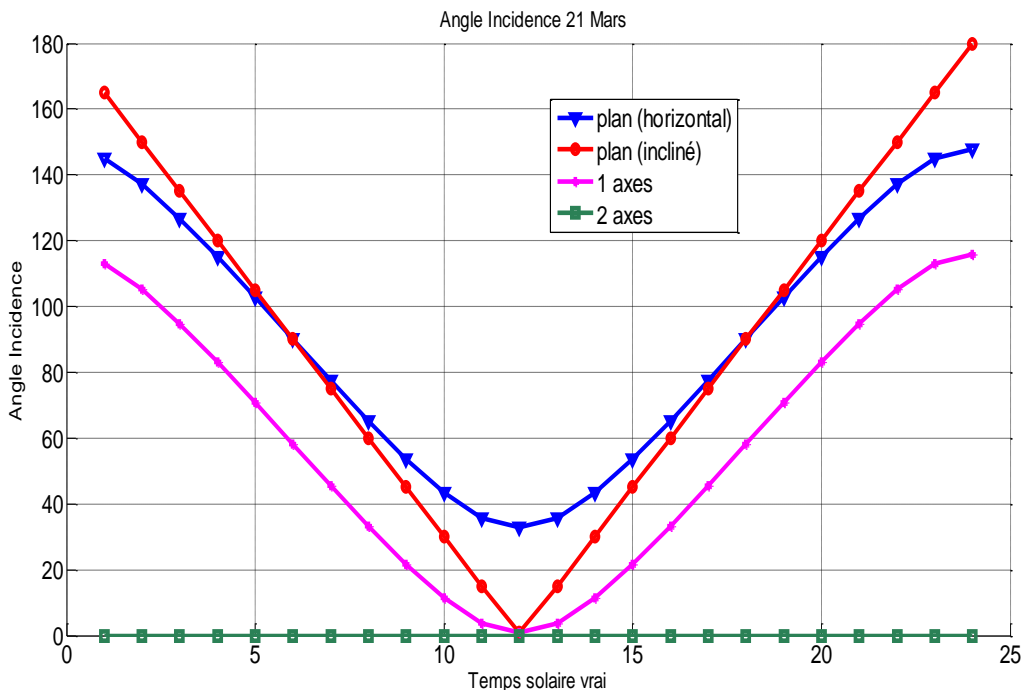


Figure III.3 : Variation de l'angle d'incidence Pour les quatre systèmes pendent 21 Mars

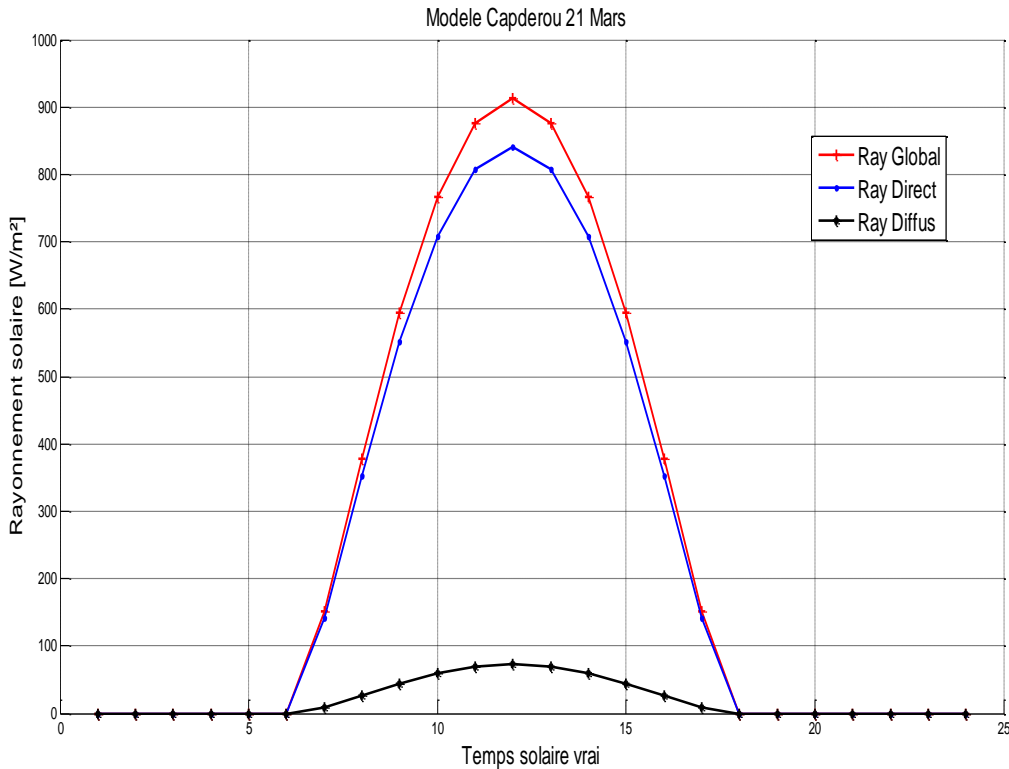


Figure III.4 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 mars pour un plan horizontal

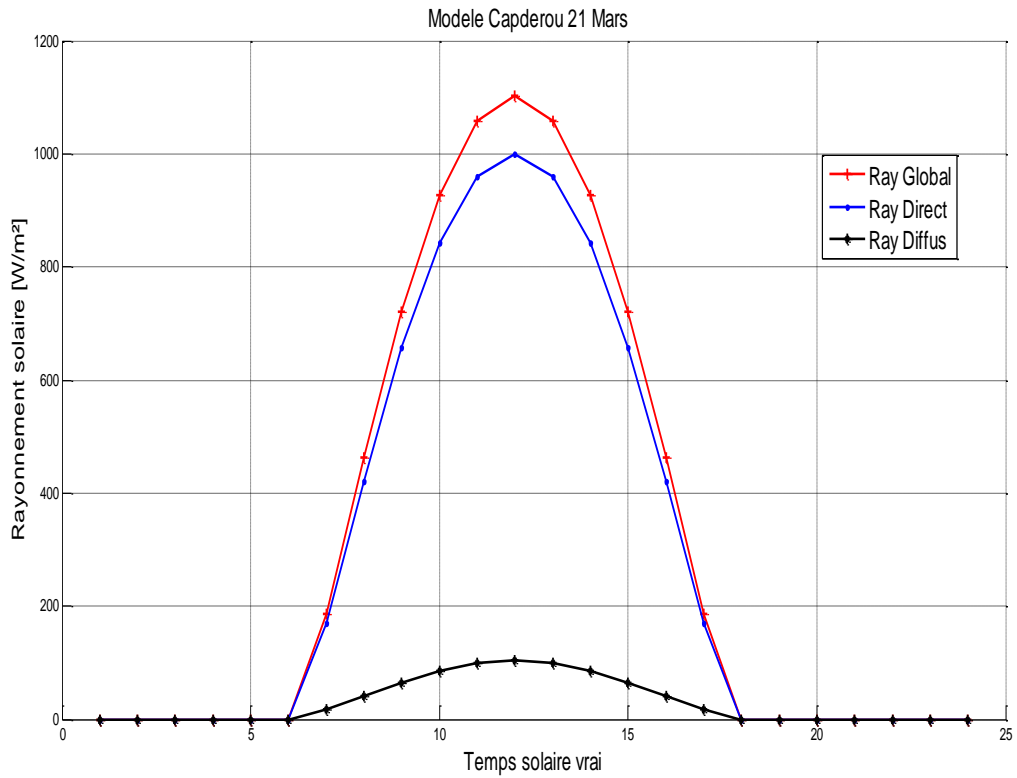


Figure III.5 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 mars pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32$

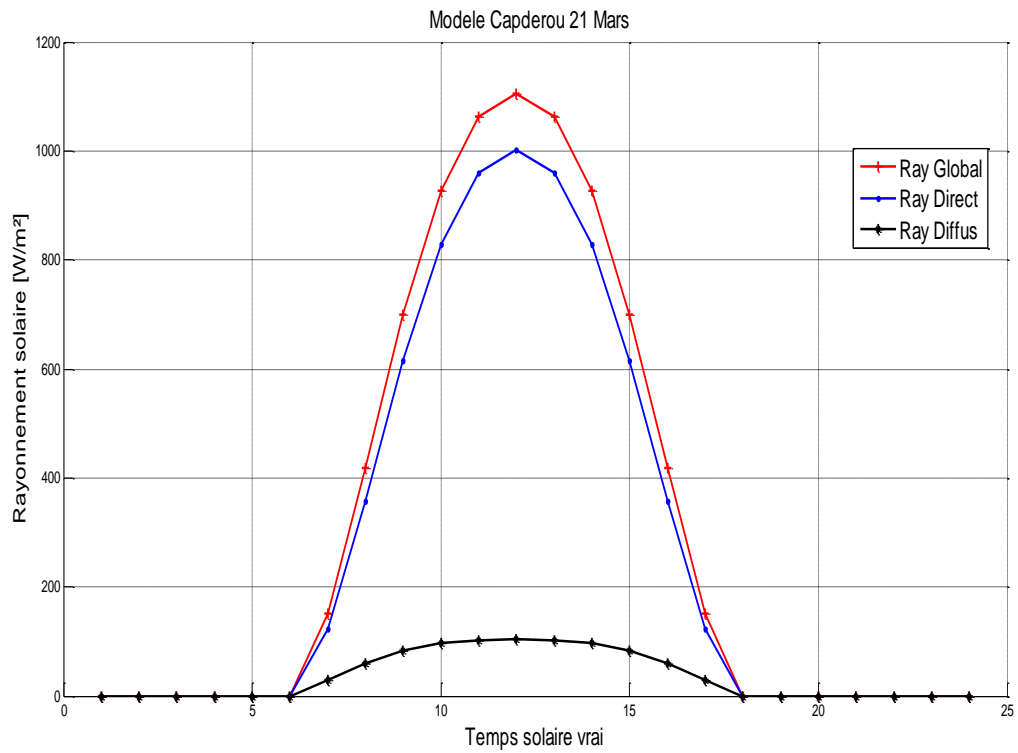


Figure III.6 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 mars une poursuit solaire axial

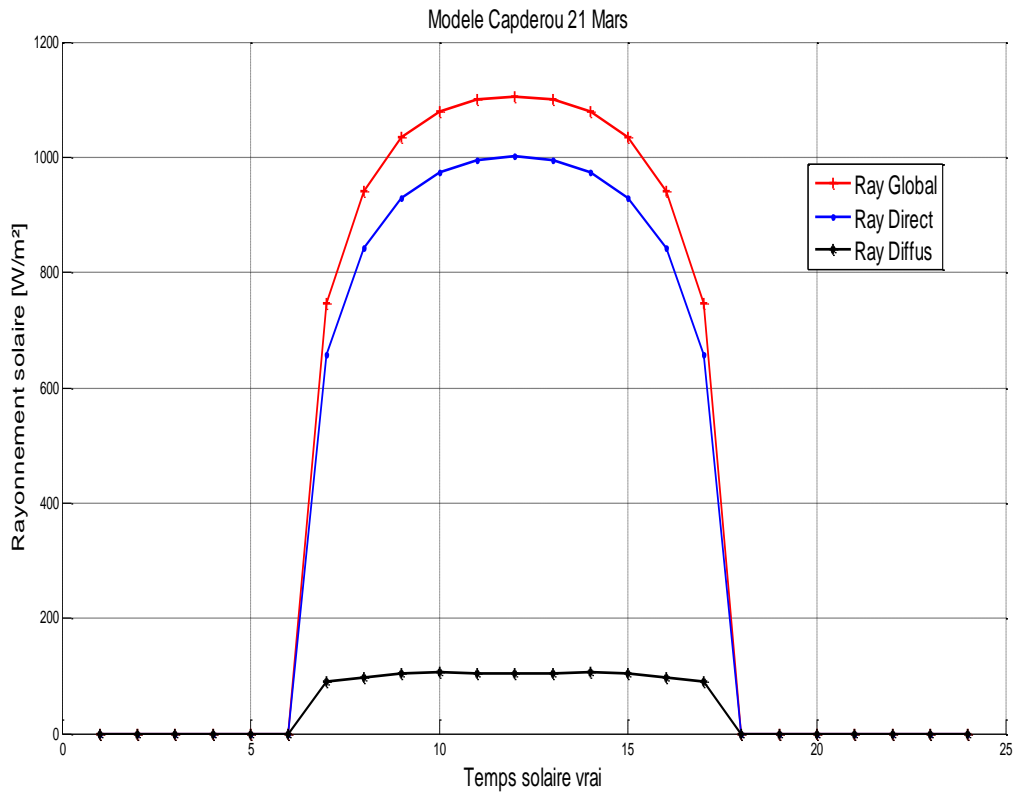


Figure III.7 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 mars pour une poursuite solaire avec 2 axes

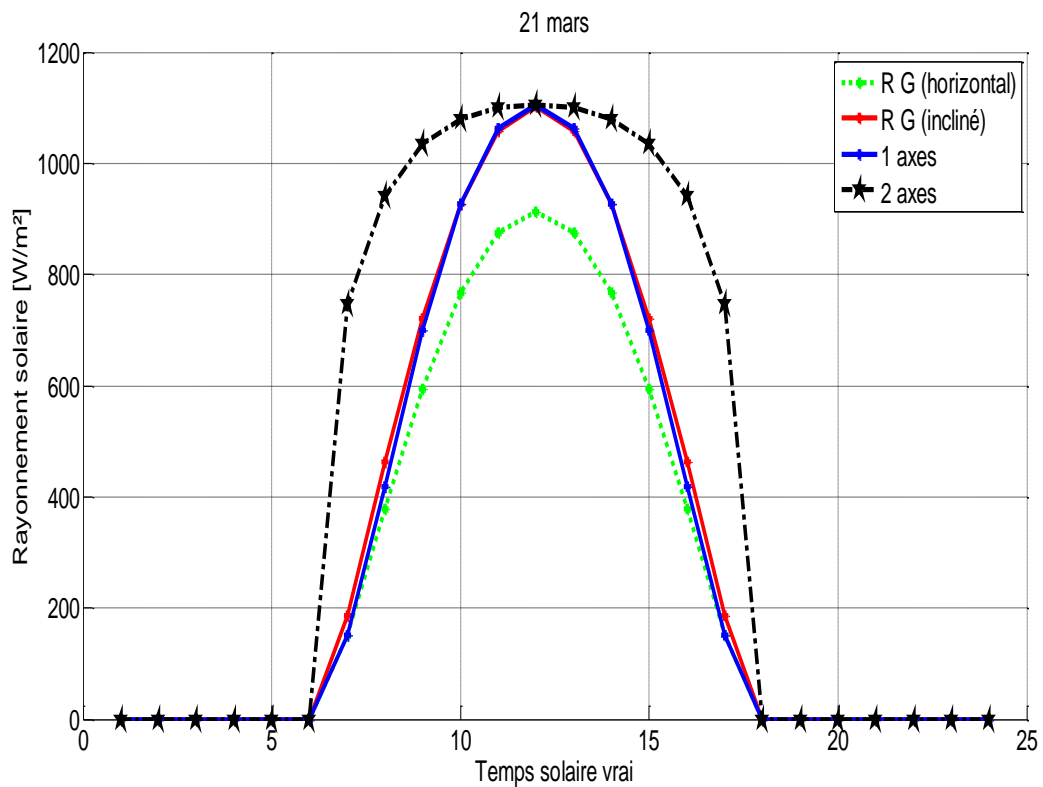


Figure III.8 : Rayonnement solaire global pour les quatre systèmes le 21 mars



### Chapitre 3 : Présentation des résultats

La valeur de l'énergie solaire collectée par l'inclinaison fixe se rapproche de celle du système suiveur à deux axes entre 11h et 14h, lorsque le soleil passe par le zénith, c'est le cas évident pour le système fixe, par contre elle s'éloigne pendant les heures du levé de soleil et les heures de la fin de l'après midi. L'ensoleillement maximum était de  $1100 \text{ W/m}^2$  dernier a été mesuré entre 11h et 14h. Dont les pertes radiative et le pourcentage sont donnés par les relations (III-3, III-4).

**Tableau III.1 :** Comparaison des résultats obtenu pour 21 mars.

Tsv	h	a	$G_0$	$G_i$	$G_p$	P
4	-25,22	106,8	0	0	0	0
5	-12,85	97,82	0	0	0	0
6	-0,216	89,66	0	0	0	0
7	12,4	81,49	150,8	187,5	746	558,5
8	24,74	72,46	378,9	462,3	941,1	478,8
9	36,4	61,46	595,2	721,7	1034	312,3
10	46,68	46,79	767	927,8	1080	152,2
11	54,29	26,32	876,3	1059	1100	41
12	57,22	0	913,7	1104	1105	1
13	54,29	-26,32	876,3	1059	1100	41
14	46,68	-46,79	767	927,8	1080	152,2
15	36,4	-61,46	595,2	721,7	1034	312,3
16	24,74	-72,46	378,2	462,3	941,1	478,8
17	12,4	-81,49	150,8	187,5	746	558,5
18	-0,216	-89,66	0	0	0	0
19	-12,85	-97,82	0	0	0	0
20	-25,22	-106,8	0	0	0	0
SOM			6449,4	7820,6	10907,2	3086,6

Tsv = temps solaire vrai (h)

h = hauteur solaire (°)

a = azimut du soleil (°)

$G_0$  = éclairement, plan horizontal ( $\text{W/m}^2$ )

$G_i$  : éclairement, plan inclinée ( $\text{W/m}^2$ )

$G_p$  = éclairement, system suiveur ( $\text{W/m}^2$ )

P = pertes radiatif

On a calculé les pertes radiatives par la relation suivant :

$$p = G_p - G_i \quad (\text{III.3})$$

Le pourcentage par la relation suivant :

$$\text{le pourcentage} = \frac{p}{G_i} * 100 \quad (\text{III.4})$$

À travers les résultats obtenus dans le tableau précédent, nous notons ce qui suit :

- La période de perte d'énergie est maximum dans les intervalles [8h, 10h], [13h, 17h].
- Dans la période entre [11h, 13h] les pertes d'énergie sont nulles.
- Lorsque nous utilisons le tracker solaire à la place d'un system incliné, nous pouvons gagner  $3086,6 \text{ Wh/m}^2$ .jrs (presque 39.46%)

### 3.4 Résultats Obtenus Pour La Journée Du 21 Juin

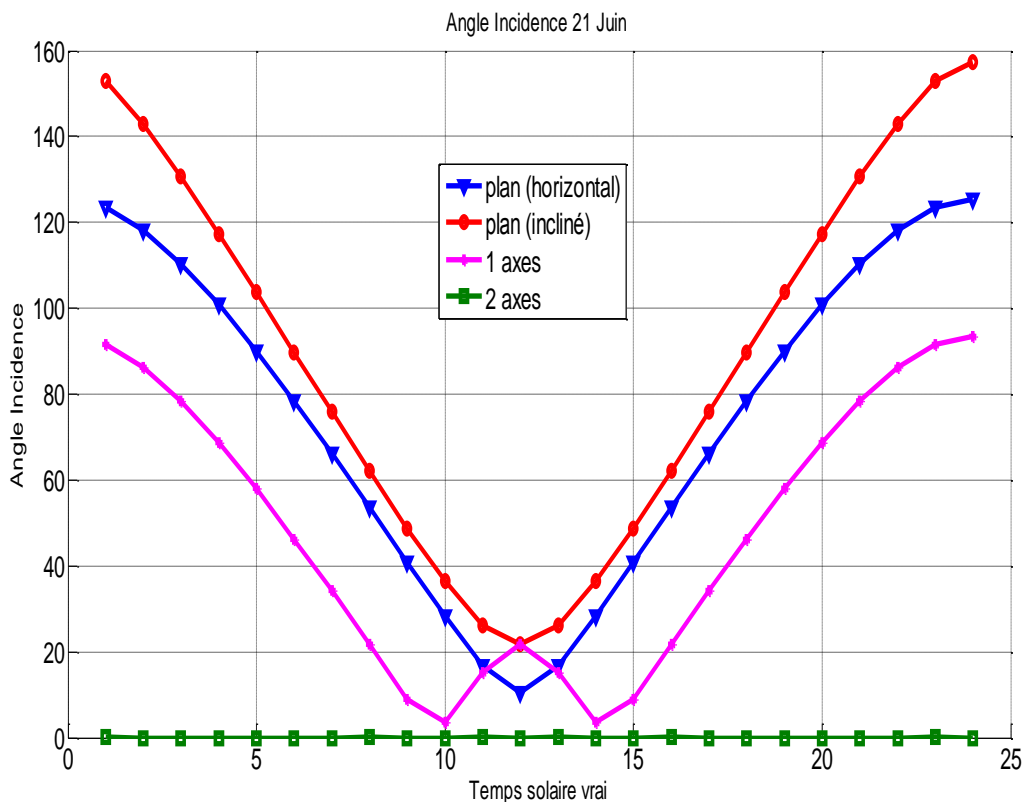


Figure III.9 : Variation de l'angle d'incidence Pour les quatre systèmes pendant 21 Juin

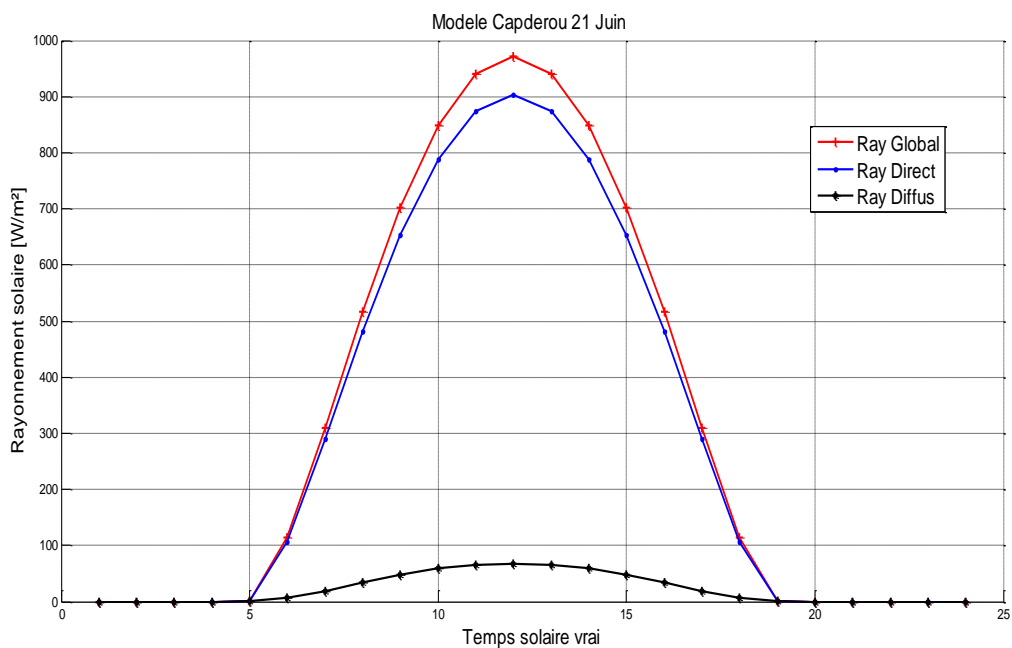


Figure III.10 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 Juin pour un plan horizontal

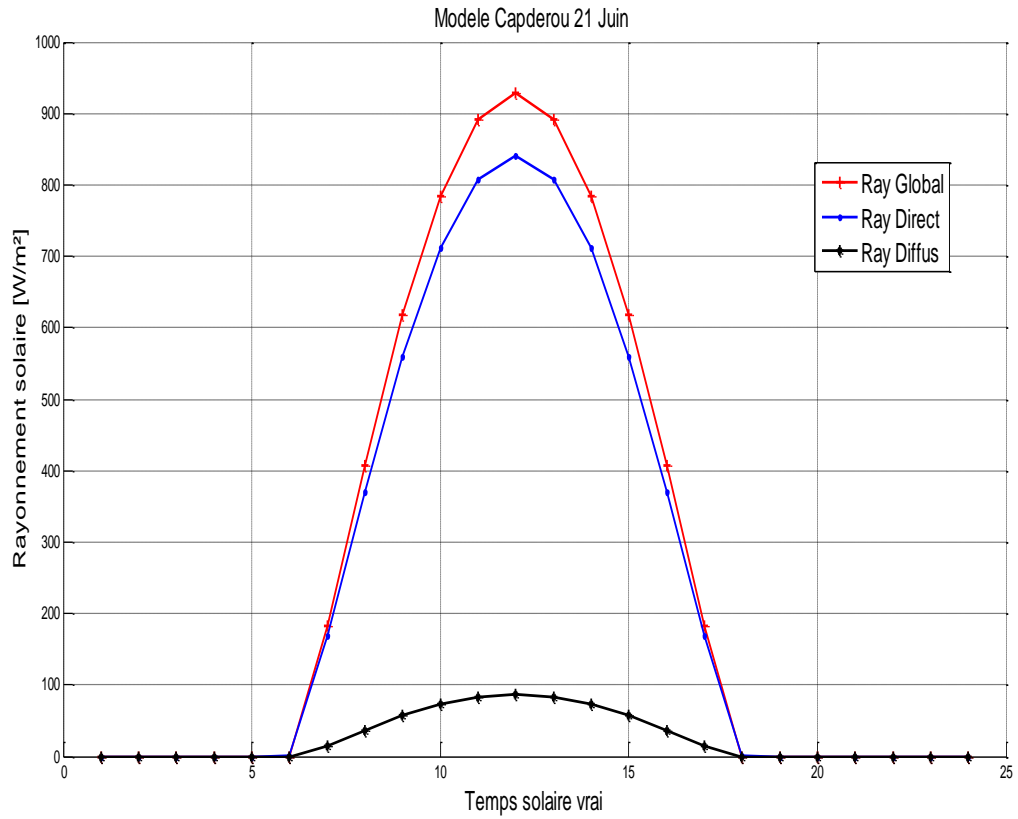


Figure III.11 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 Juin pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32$

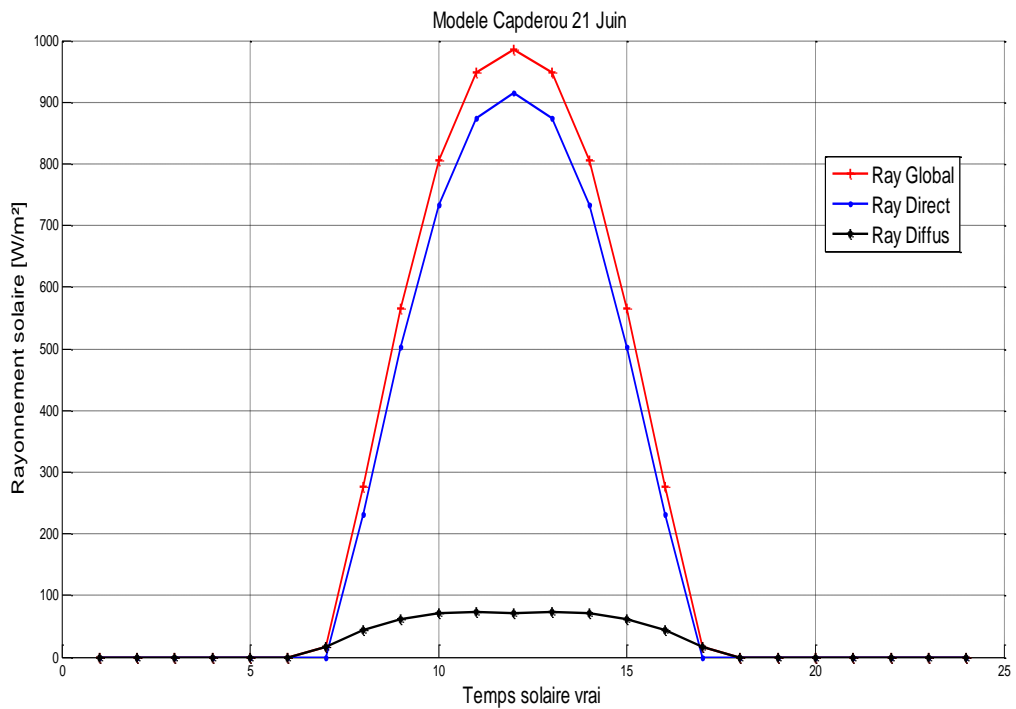


Figure III.12 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 Juin une poursuite solaire axial

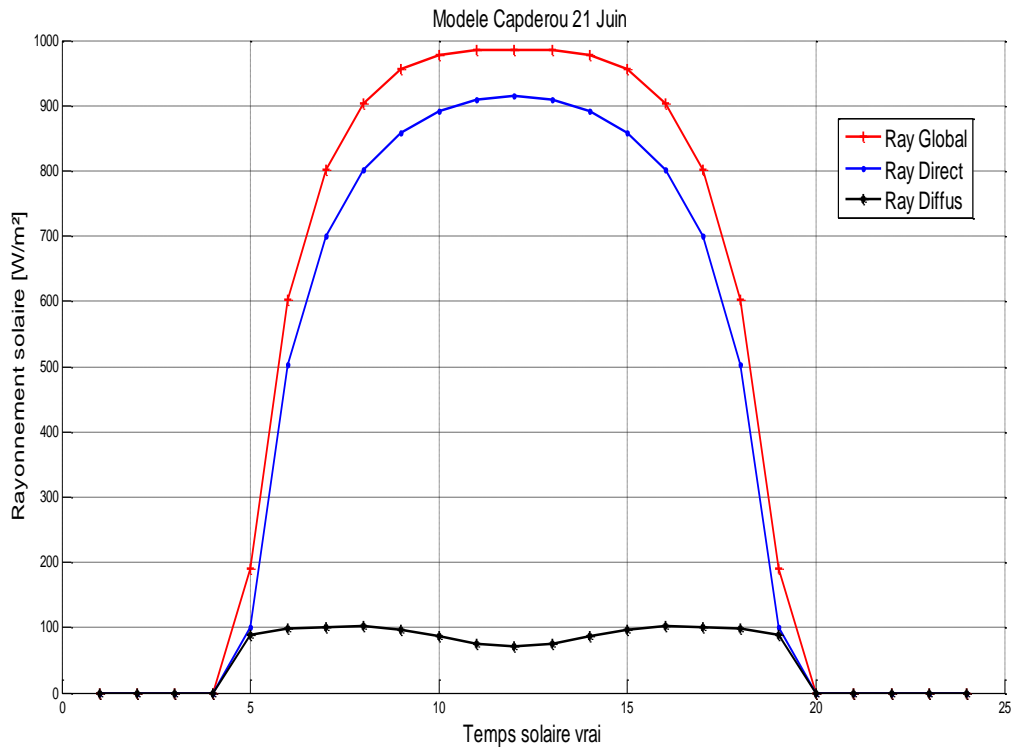


Figure III.13 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 Juin pour une poursuite solaire avec 2 axes

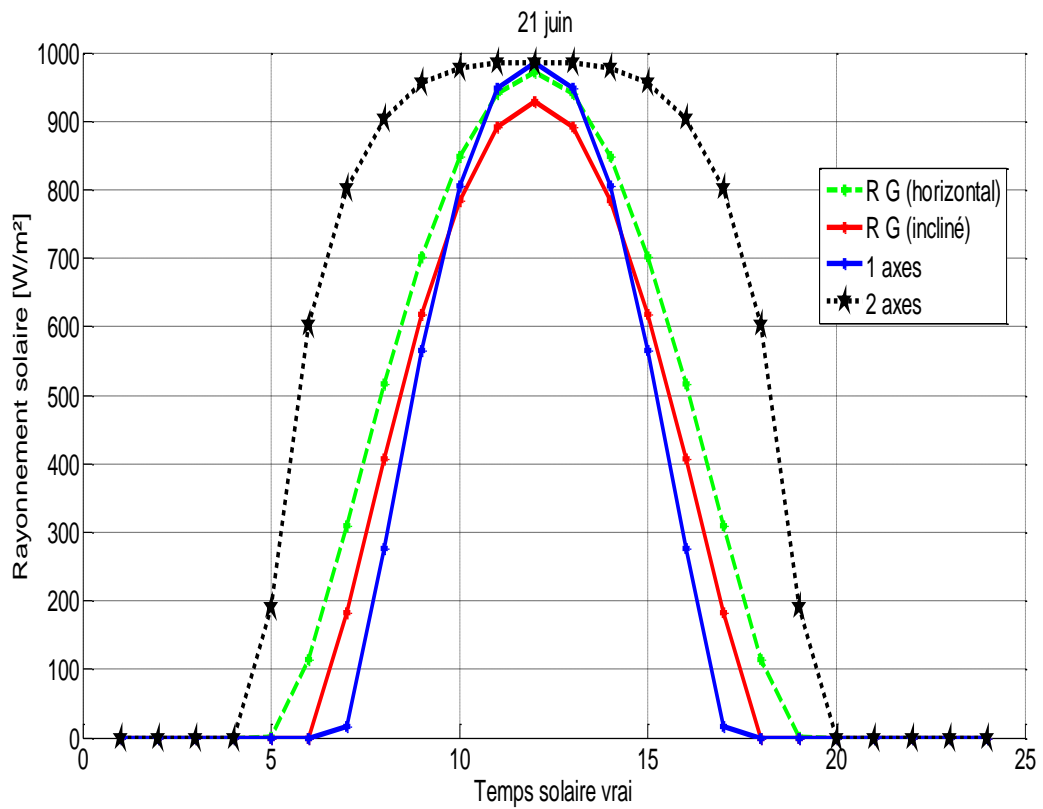


Figure III.14 : Rayonnement solaire global pour les quatre systèmes le 21 Juin

### Chapitre 3 : Présentation des résultats

La valeur de l'énergie solaire collectée par l'inclinaison fixe se rapproche de celle du système suiveur à deux axes entre 11h et 14h, lorsque le soleil passe par le zénith, c'est le cas évident pour le système fixe, par contre elle s'éloigne pendant les heures du levé de soleil et les heures de la fin de l'après midi. L'ensoleillement maximum était de  $985,5 \text{ W/m}^2$  dernier a été mesuré entre 11h et 14h.

**Tableau III.2 : Comparaison des résultats obtenu pour 21 Juin.**

Tsv	H	a	$G_0$	$G_i$	$G_p$	P
4	-10,04	126,2	0	0	0	0
5	0,721	117,6	1,509	0	189,6	189,6
6	12,3	110,1	114,6	0	602,4	602,4
7	24,43	103,3	309,1	182,3	800,8	618,5
8	36,91	96,49	515,8	406,8	903,8	497
9	49,55	89	702,2	617,3	955,9	338,6
10	62,14	78,97	847,7	784,8	978,2	193,4
11	74,04	59,75	939,5	891,6	984,7	93,1
12	81,07	0	970,8	928,2	985,5	57,3
13	74,05	-59,75	939,5	891,5	984,7	93,2
14	62,14	-78,97	847,7	784,8	978,2	193,4
15	49,55	-89	702,2	617,3	955,9	338,6
16	36,91	-96,49	515,8	406,8	903,8	497
17	24,43	-103,3	309,1	182,3	800,8	618,5
18	12,3	-110,1	114,6	0	602,4	602,4
19	0,721	-117,6	1,509	0	189,4	189,4
20	-10,04	-126,2	0	0	0	0
SOM			7831,618	6693,7	11816,1	5122,4

Tsv = temps solaire vrai (h)

h = hauteur solaire ( $^\circ$ )

a = azimut du soleil ( $^\circ$ )

$G_0$  = éclairement, plan horizontal ( $\text{W/m}^2$ )

$G_i$  : éclairement, plan incliné ( $\text{W/m}^2$ )

$G_p$  = éclairement, système suiveur ( $\text{W/m}^2$ )

P = pertes radiatif

À travers les résultats obtenus dans le tableau précédent, nous notons ce qui suit :

- La période de perte d'énergie est maximum dans les intervalles [5h, 10h], [13h, 19h].
- Dans la période entre [11h, 13h] les pertes d'énergie sont nulles.
- Lorsque nous utilisons le tracker solaire à la place d'un système incliné, nous pouvons gagner  $5122,4 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{jrs}$  (presque 76.52%)

### 3.5 Résultats Obtenus Pour La Journée Du 21 Septembre

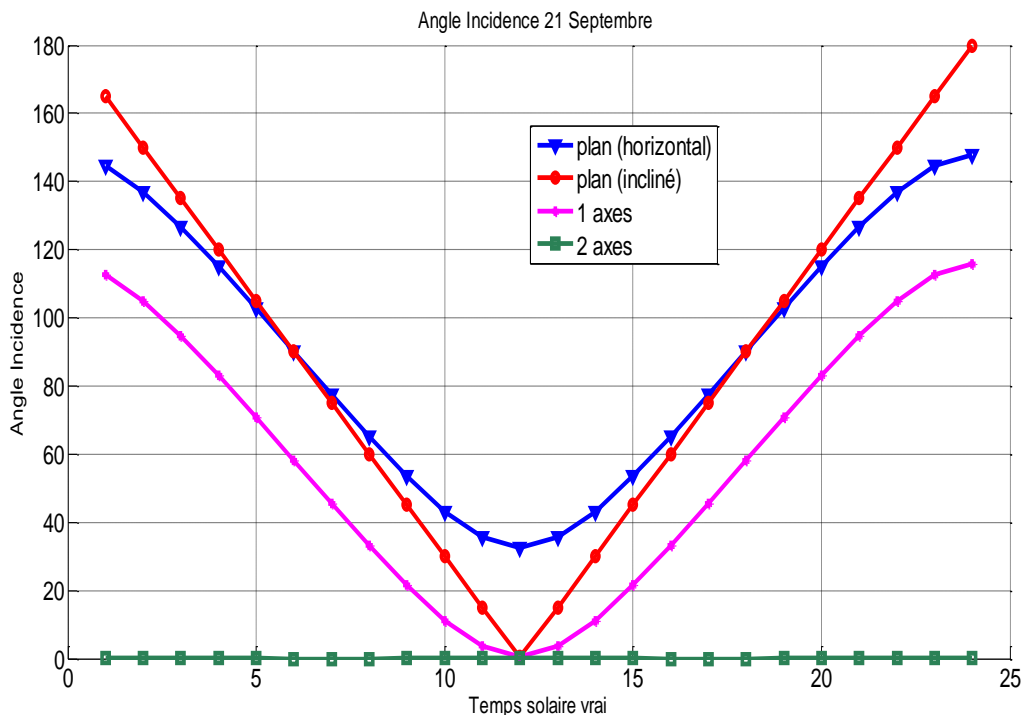


Figure III.15 : Variation de l'angle d'incidence Pour les quatre systèmes pendant 21 septembre

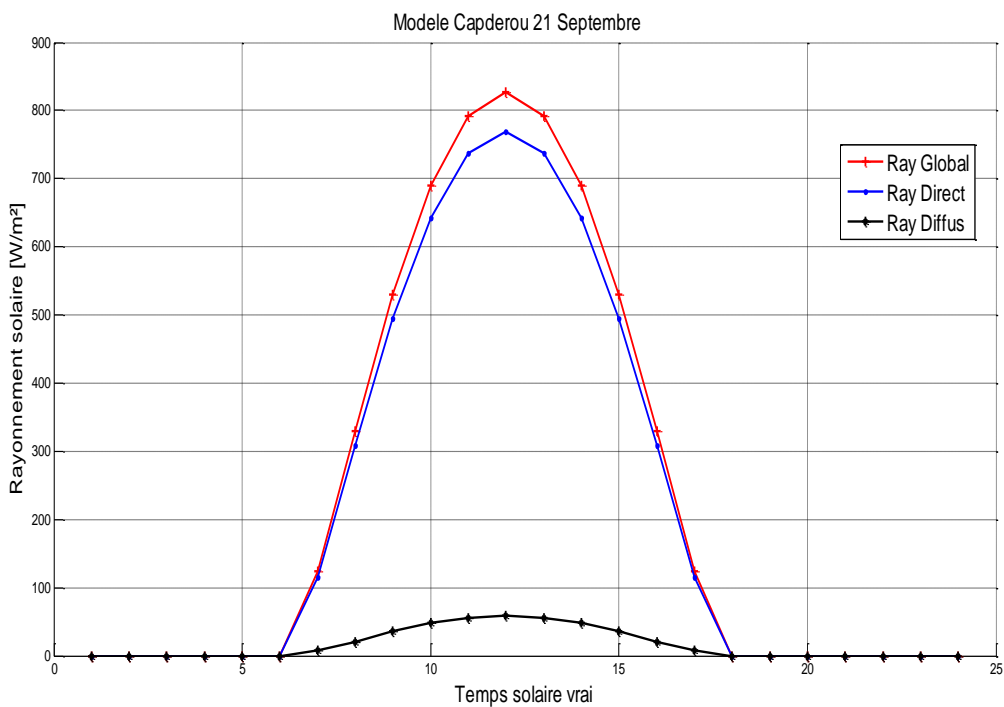


Figure III.16 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 Septembre pour un plan horizontal

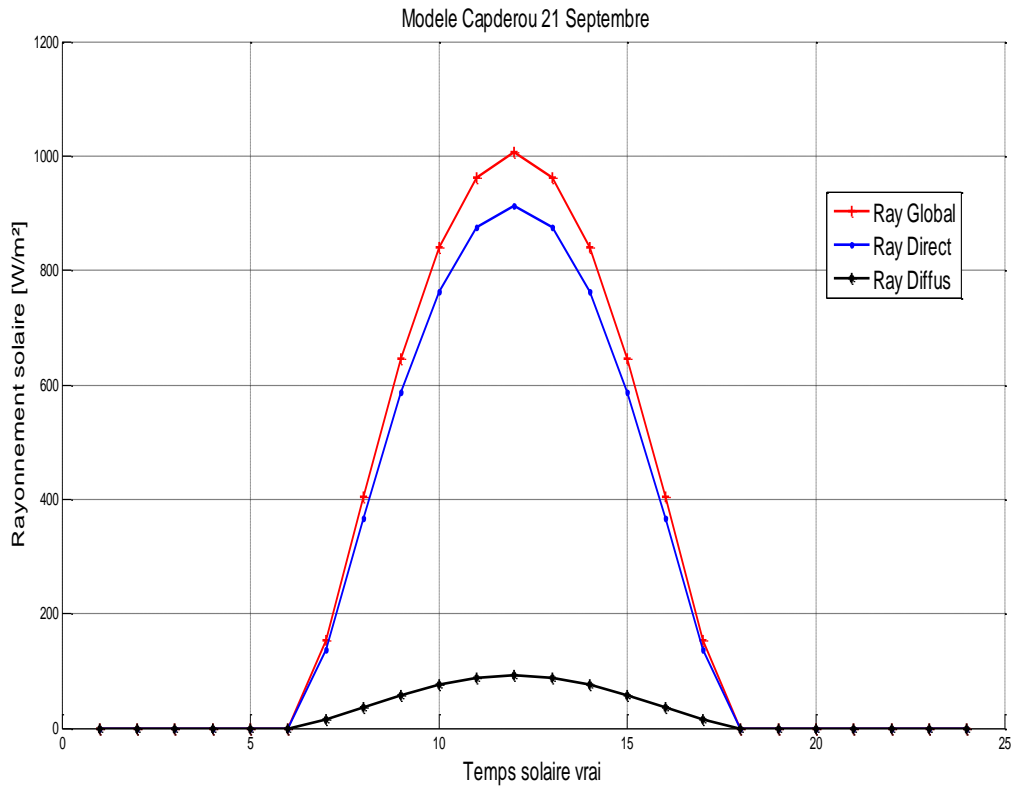


Figure III.17 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 septembre pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32$

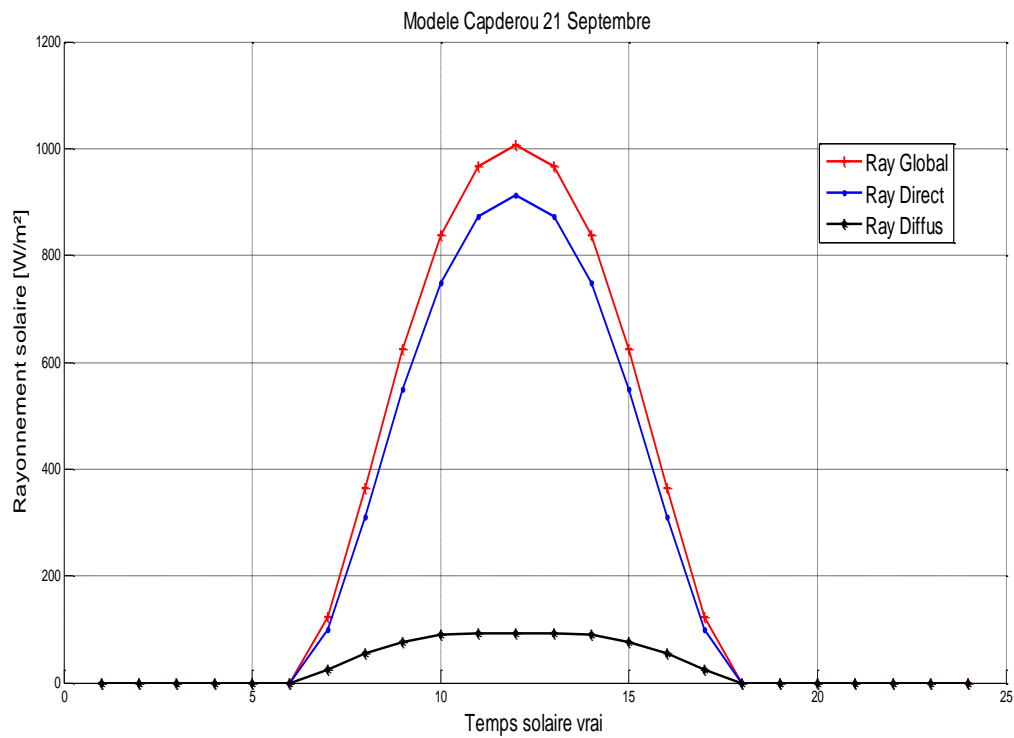


Figure III.18 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 septembre une poursuit solaire axial

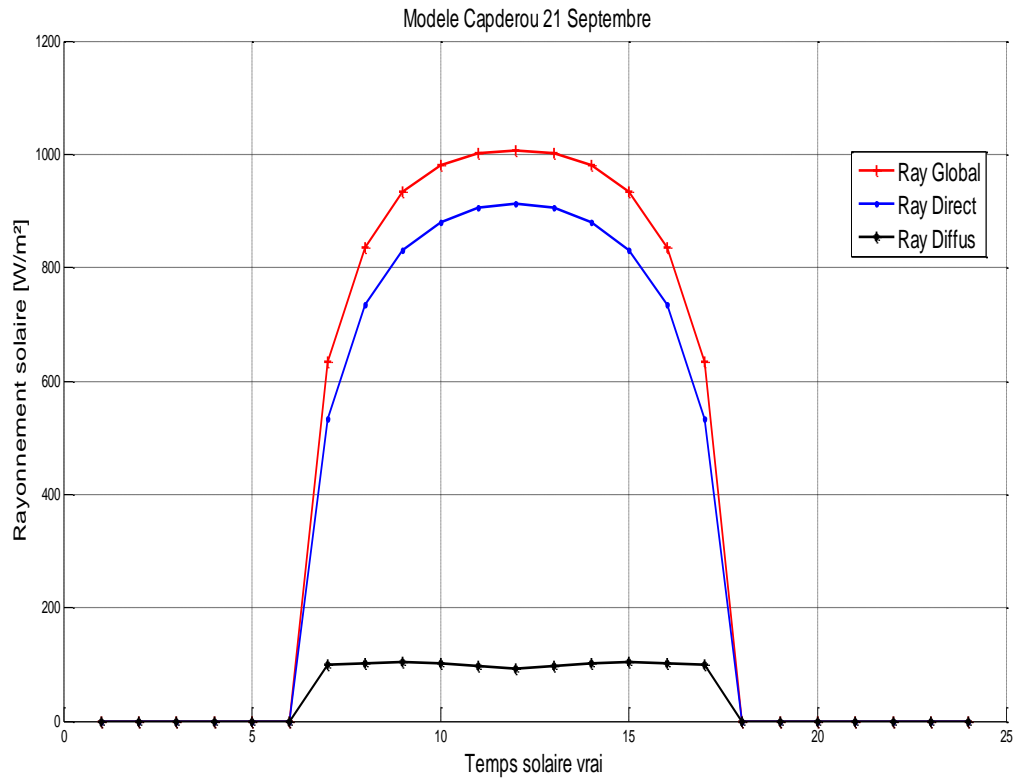


Figure III.19 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 septembre pour une poursuite solaire avec 2 axes

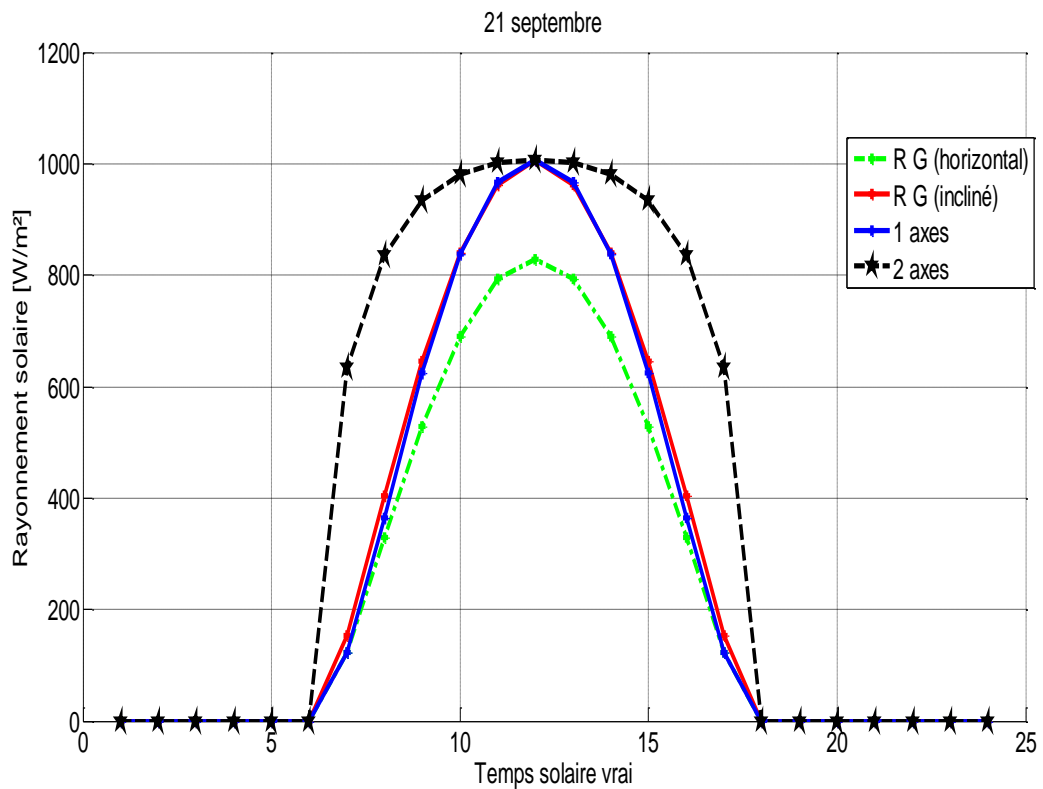


Figure III.20 : Rayonnement solaire global pour les quatre systèmes le 21 septembre



### Chapitre 3 : Présentation des résultats

La valeur de l'énergie solaire collectée par l'inclinaison fixe se rapproche de celle du système suiveur à deux axes entre 11h et 14h, lorsque le soleil passe par le zénith, c'est le cas évident pour le système fixe, par contre elle s'éloigne pendant les heures du levé de soleil et les heures de la fin de l'après midi. L'ensoleillement maximum était de  $1006\text{W/m}^2$  dernier a été mesuré entre 11h et 14h.

**Tableau III.3 :** Comparaison des résultats obtenu pour 21 septembre.

Tsv	h	a	$G_0$	$G_i$	$G_p$	P
4	-25,1	107	0	0	0	0
5	-12,74	97,99	0	0	0	0
6	-0,1081	89,83	0	0	0	0
7	12,51	81,66	123,4	154,1	633,5	479,4
8	24,86	72,64	329,3	403,6	836,2	432,6
9	36,53	61,64	529,4	646,3	934,3	288
10	46,84	46,97	689,8	839,1	981,4	142,3
11	54,47	26,45	792,3	963,1	1001	37,9
12	57,42	0	827,4	1006	1006	0
13	54,47	-26,45	792,3	963,1	1001	37,9
14	46,84	-46,97	689,8	839,1	981,4	142,3
15	36,53	-61,64	529,4	646,3	934,3	288
16	24,86	-72,64	329,3	403,6	836,2	432,6
17	12,51	-81,6	123,4	154,1	633,5	479,4
18	-0,108	-89,83	0	0	0	0
19	-12,74	-97,99	0	0	0	0
20	-25,1	-107	0	0	0	0
SOM			5755,8	7018,4	9778,8	2760,4

Tsv = temps solaire vrai (h)

h = hauteur solaire ( $^{\circ}$ )

a = azimut du soleil ( $^{\circ}$ )

$G_0$  = éclairement, plan horizontal ( $\text{W/m}^2$ )

$G_i$  : éclairement, plan inclinée ( $\text{W/m}^2$ )

$G_p$  = éclairement, system suiveur ( $\text{W/m}^2$ )

P = pertes radiatif

À travers les résultats obtenus dans le tableau précédent, nous notons ce qui suit :

- La période de perte d'énergie est maximum dans les intervalles [7h, 10h], [13h, 17h].
- Dans la période entre [11h, 13h] les pertes d'énergie sont nulles.
- Lorsque nous utilisons le tracker solaire à la place d'un system incliné, nous pouvons gagner  $2760,4\text{Wh/m}^2$ .jrs (presque 39.33%)

### 3.6 Résultats Obtenus Pour La Journée Du 21 Décembre

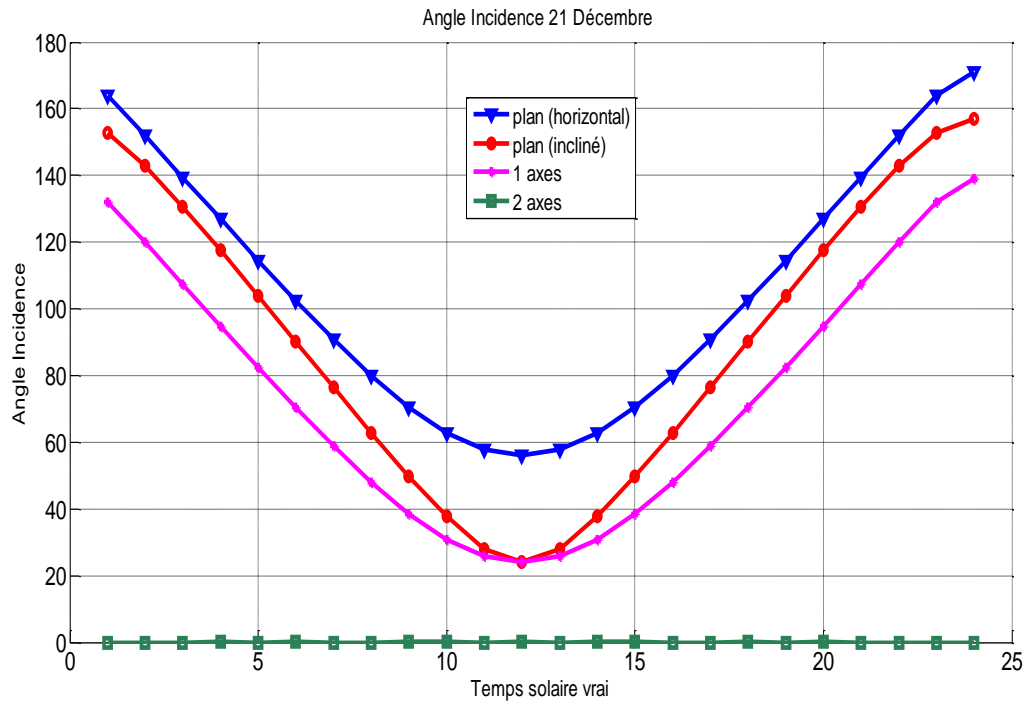


Figure III.21 : Variation de l'angle d'incidence Pour les quatre systèmes pendant 21 Décembre

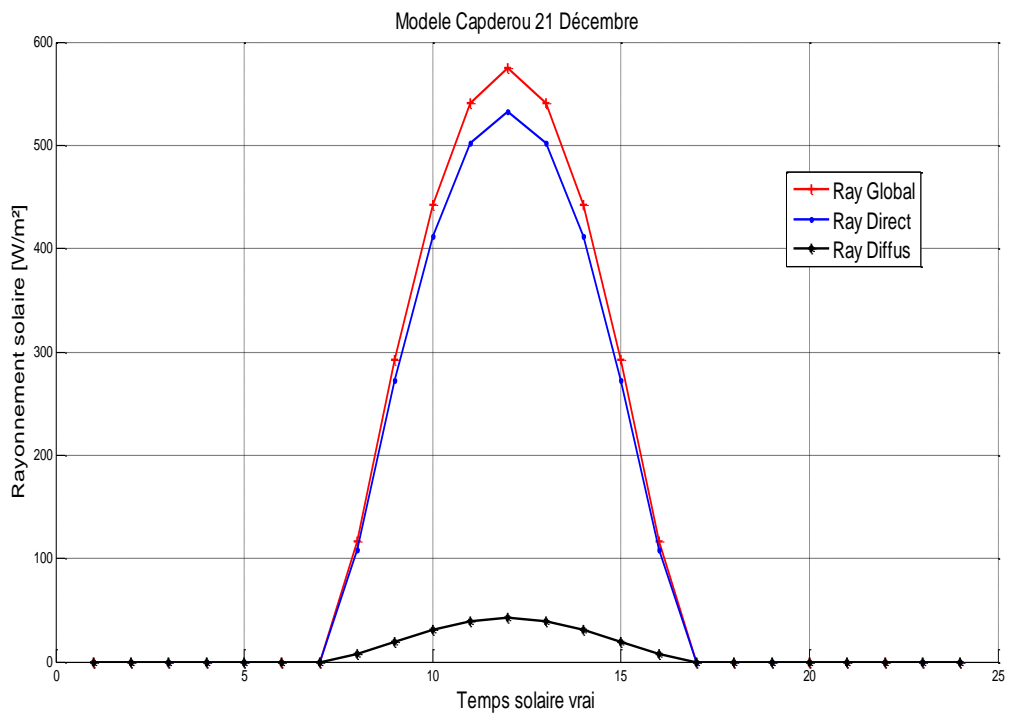
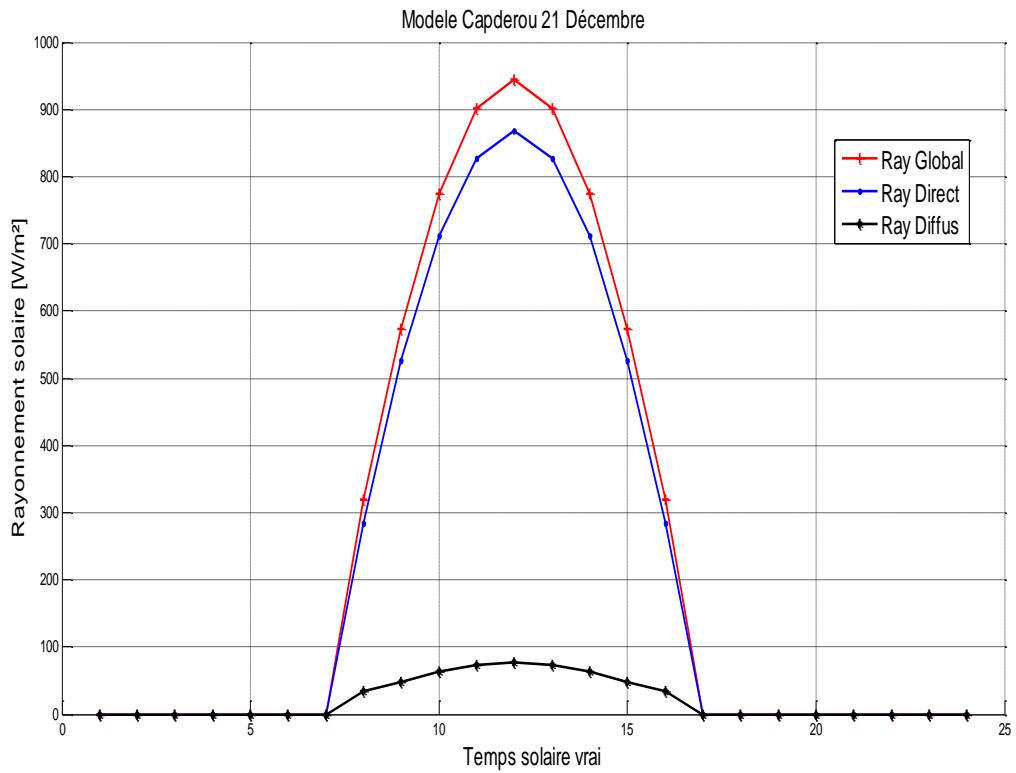
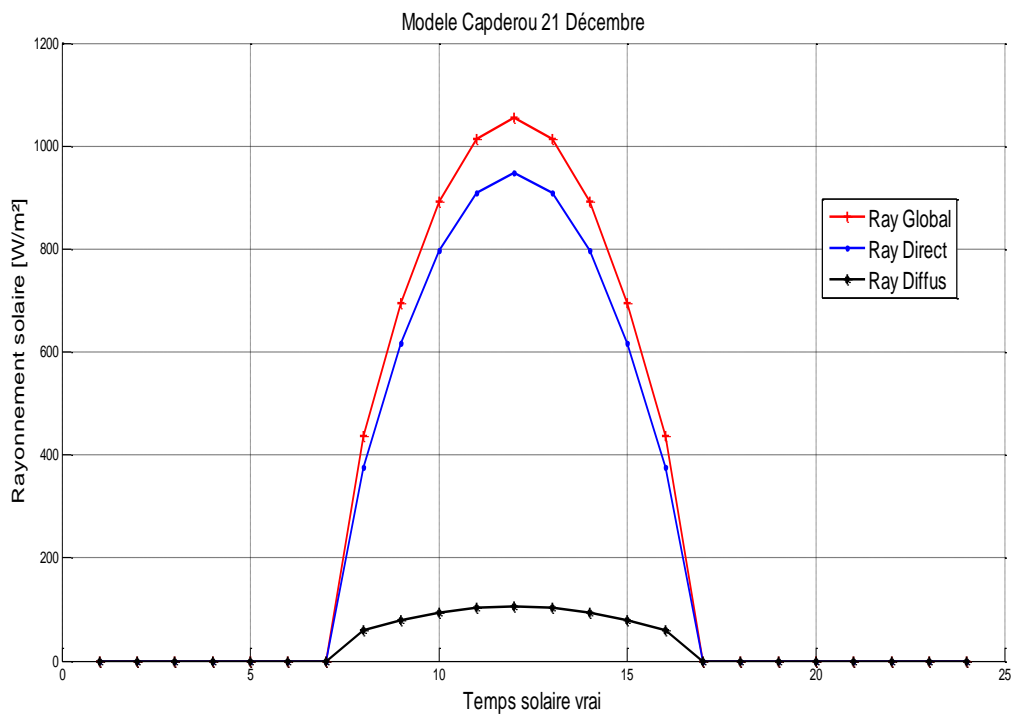


Figure III.22 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 Décembre pour un plan horizontal



**Figure III.23** : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 Décembre pour un plan incliné à l'angle optimal  $\beta=32$



**Figure III.24** : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 Décembre une poursuit solaire axial

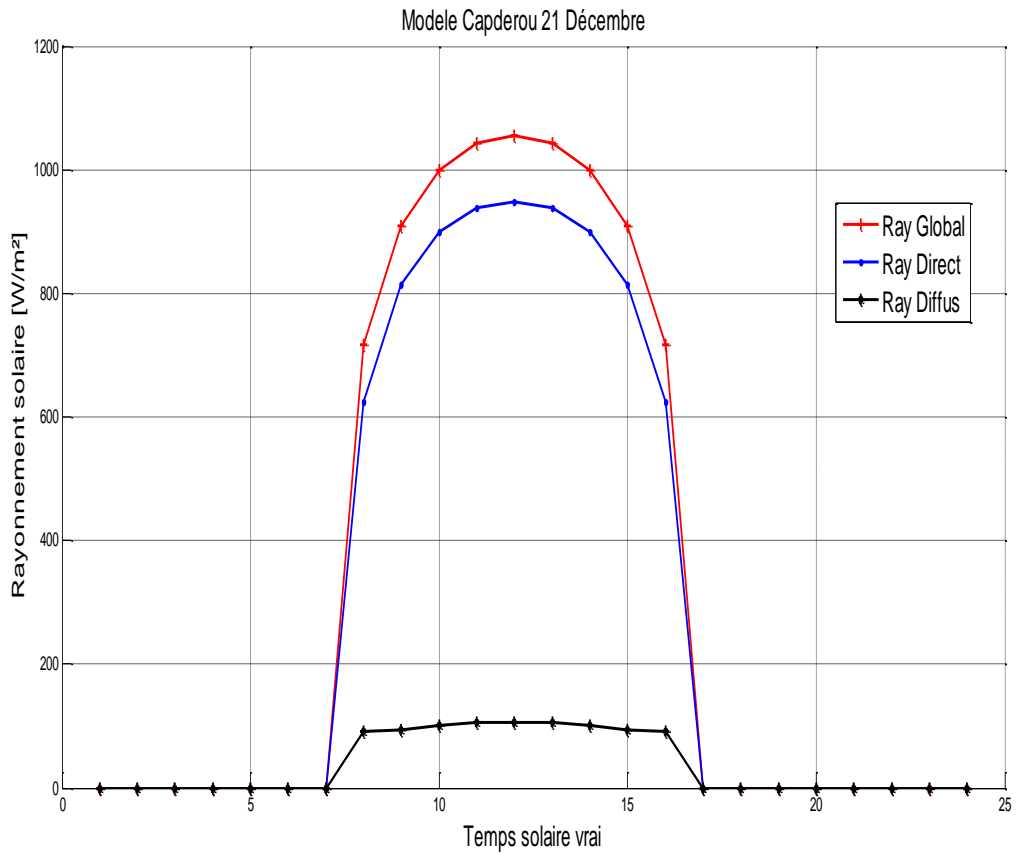


Figure III.25 : Rayonnement solaire (global, direct et diffus) le 21 Décembre pour une poursuite solaire avec 2 axes

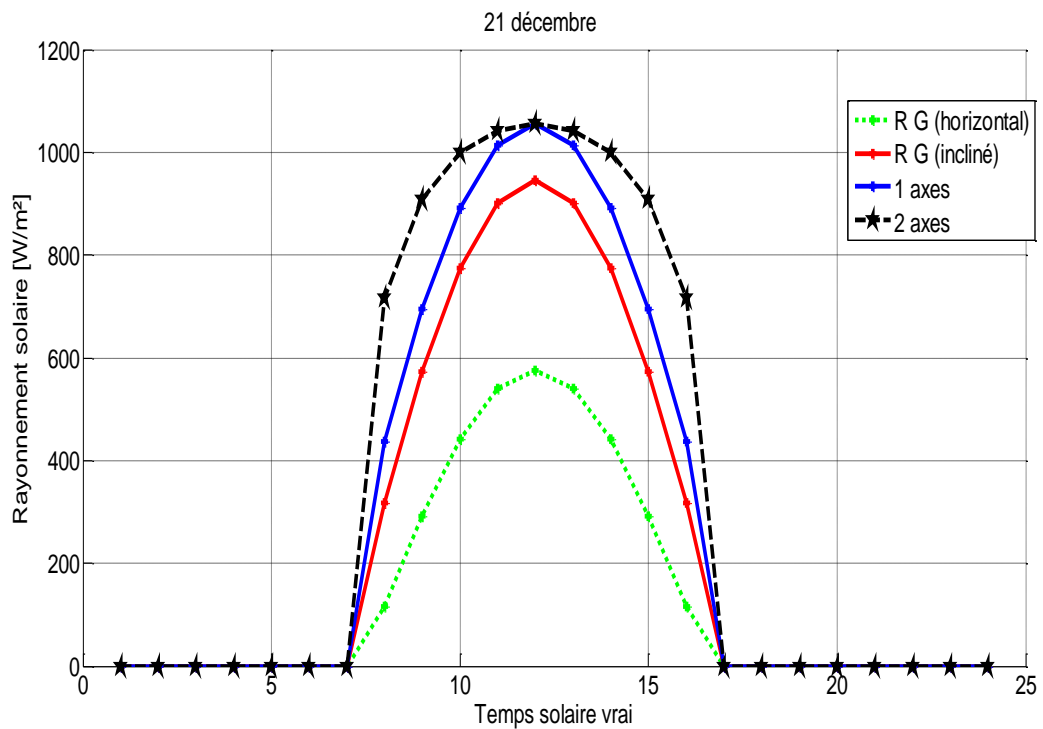


Figure III.26 : Rayonnement solaire global pour les quatre systèmes le 21 Décembre

### Chapitre 3 : Présentation des résultats

La valeur de l'énergie solaire collectée par l'inclinaison fixe se rapproche de celle du système suiveur à deux axes entre 11h et 14h, lorsque le soleil passe par le zénith, c'est le cas évident pour le système fixe, par contre elle s'éloigne pendant les heures du levé de soleil et les heures de la fin de l'après midi. L'ensoleillement maximum était de  $1055 \text{ W/m}^2$  dernier a été mesuré entre 11h et 14h.

**Tableau III.4 :** Comparaison des résultats obtenu pour 21 Décembre.

Tsv	h	a	$G_0$	$G_i$	$G_p$	P
4	-36,91	83,51	0	0	0	0
5	-24,43	76,73	0	0	0	0
6	-12,3	69,88	0	0	0	0
7	-0,7213	62,4	0	0	0	0
8	10,04	53,79	116,6	318,6	715,8	397,2
9	19,56	43,51	292	573,7	909	335,3
10	27,25	31,06	442,5	774,2	1000	225,8
11	32,36	16,33	541,1	901,5	1043	141,5
12	34,17	0	575,2	945,1	1055	109,9
13	32,36	-16,33	541,1	901,5	1043	141,5
14	27,25	-31,06	442,5	774,2	1000	225,8
15	19,56	-43,51	292	573,7	909	335,3
16	10,04	-53,79	116,6	318,6	715,8	397,2
17	-0,7213	-62,4	0	0	0	0
18	-12,3	-69,88	0	0	0	0
19	-24,43	-76,73	0	0	0	0
20	-36,91	-83,51	0	0	0	0
SOM			3359,6	6081,1	8390,6	2309,5

Tsv = temps solaire vrai (h)

h = hauteur solaire ( $^{\circ}$ )

a = azimut du soleil ( $^{\circ}$ )

$G_0$  = éclairement, plan horizontal ( $\text{W/m}^2$ )

$G_i$  : éclairement, plan incliné ( $\text{W/m}^2$ )

$G_p$  = éclairement, système suiveur ( $\text{W/m}^2$ )

P = pertes radiatif

À travers les résultats obtenus dans le tableau précédent, nous notons ce qui suit :

- La période de perte d'énergie est maximum dans les intervalles [8h, 10h], [13h, 16h].
- Dans la période entre [11h, 13h] les pertes d'énergie sont nulles.
- Lorsque nous utilisons le tracker solaire à la place d'un système incliné, nous pouvons gagner  $2309,5 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{jrs}$  (presque 37.97%)

### 3.7 Validation des Résultats

Pour donner une crédibilité à l'étude, nous avons comparé les résultats obtenus avec le modèle CAPDEROU aux résultats réels obtenus à partir de la centrale KAHRABA TAKAT MOUTADJADIDA « SKTM » à Oued Nechou - Ghardaïa. Les résultats sont montrés dans les Figures ci-dessous :

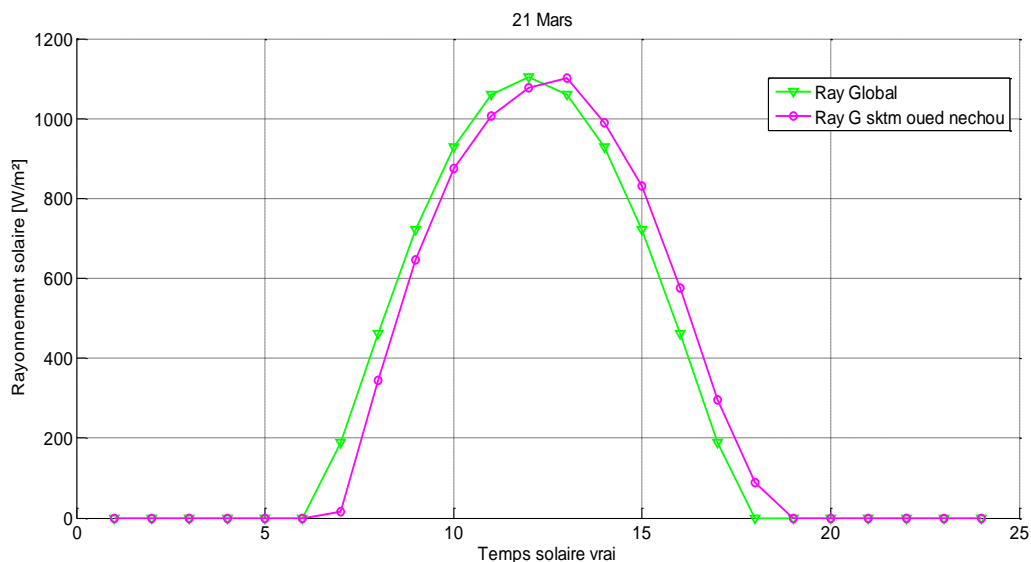


Figure III.27 : rayonnement solaire global d’après Capderou et les données SKTM Oued nechou 21 mars 2016

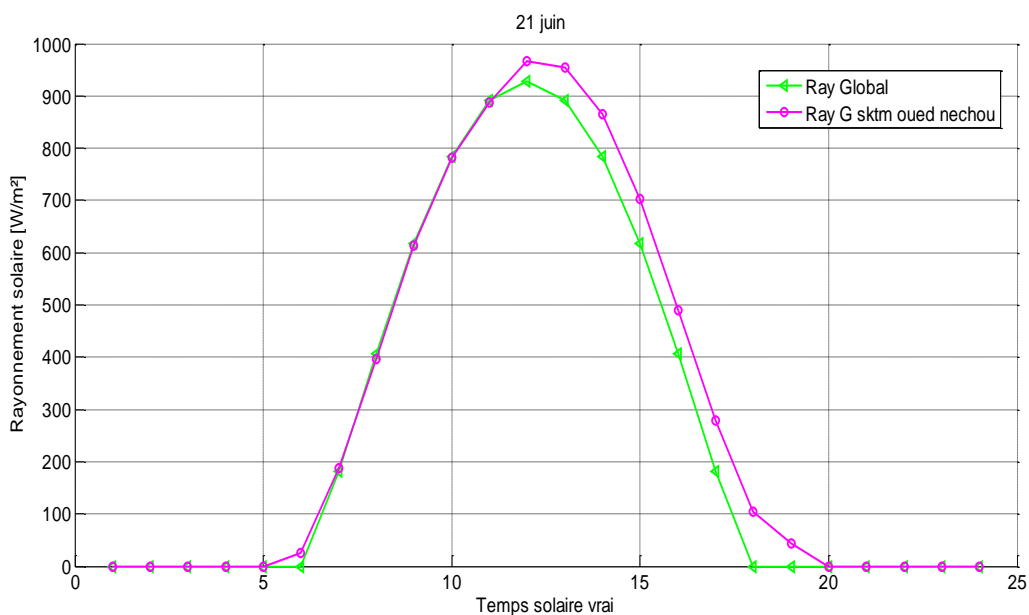


Figure III.28 : rayonnement solaire global d’après Capderou et les données SKTM Oued nechou 21 Juin 2016

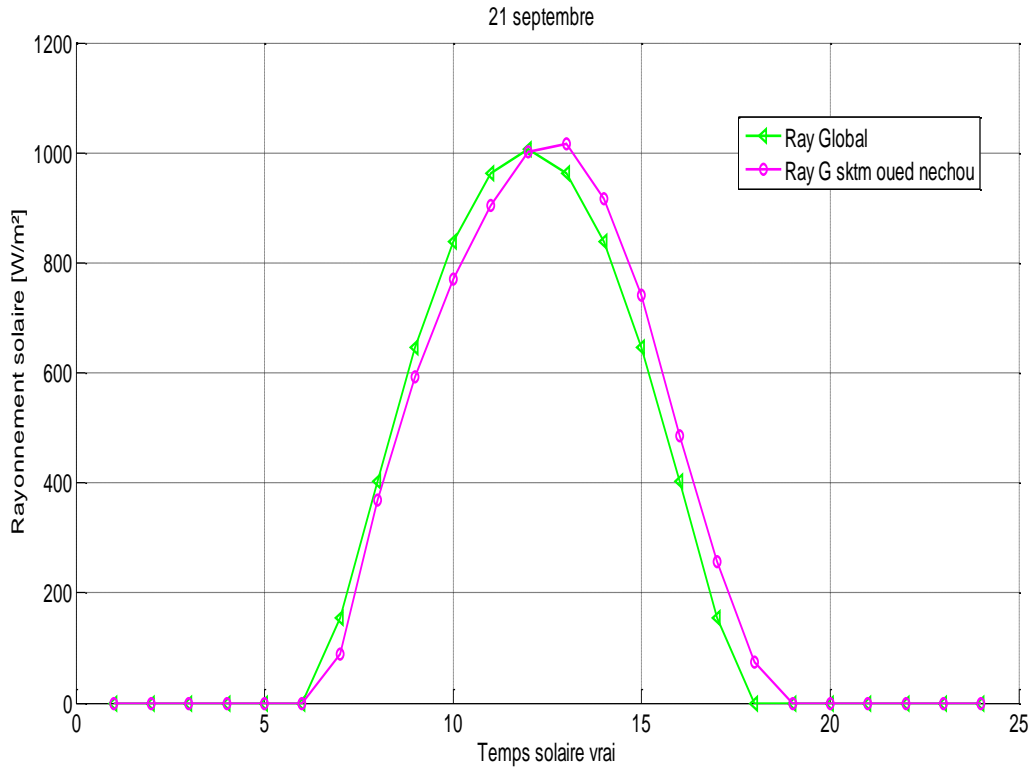


Figure III.29 : rayonnement solaire global d’après Capderou et les données SKTM Oued nechou 21septembre 2016

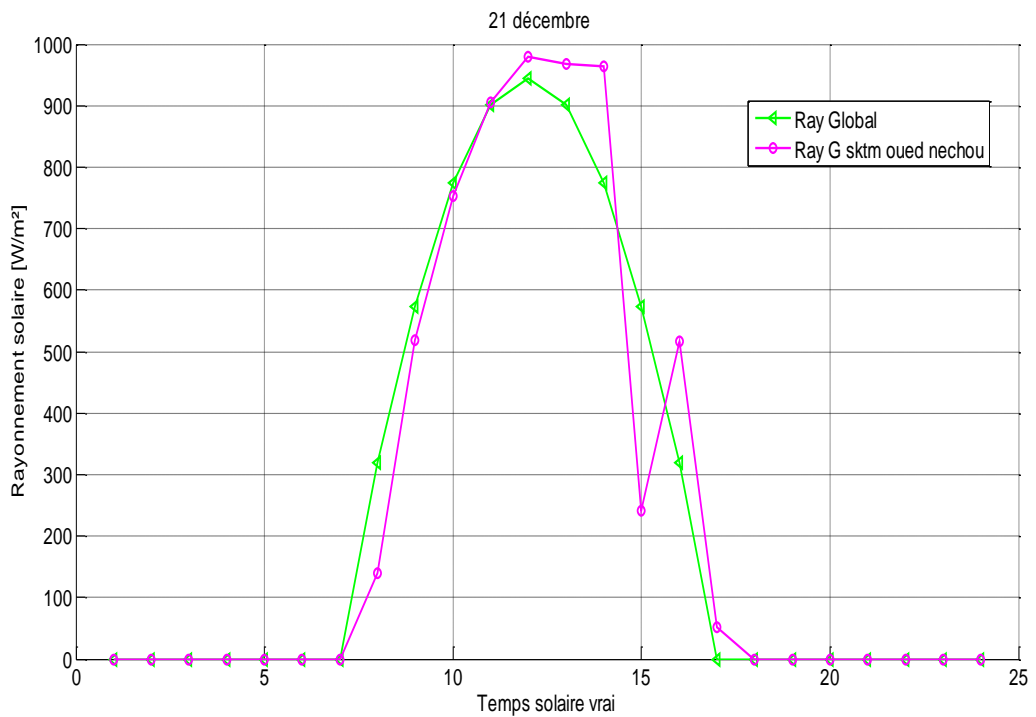


Figure III. 30 : rayonnement solaire global d’après Capderou et les données SKTM Oued nechou 21décembre 2016

### **3.8 CONCLUSION**

D'après les résultats obtenus, l'intérêt de la poursuite n'apparaît que pour un état de ciel complètement clair. Ainsi, l'utilisation d'un tel mécanisme de poursuite permet donc, selon la saison et le site considéré, de récupérer en moyenne 30 % d'énergie supplémentaire par rapportaux systèmes fixes, inclinés suivant un angle optimal et orienté plein sud. Ce qui nous permet également de récupérer en moyenne 40 % d'énergie supplémentaire par rapport à un plan horizontal, particulièrement en période hivernale là où la hauteur du soleil est faible [30].



## Conclusion générale

Le système de positionnement par rapport au soleil peut se faire selon 2 axes, l'azimut et l'inclinaison. L'azimut du soleil correspond à l'angle horizontal entre la direction du Nord et le soleil. Quand le soleil est en plein Est, il a un azimut de  $90^\circ$ , plein Sud il sera de  $180^\circ$ , et plein Ouest de  $270^\circ$ . L'inclinaison correspond à l'angle vertical du panneau par rapport à l'horizon. Ces différents angles varient en fonction de l'heure, de la date (saison) et dépendent de la longitude et de la latitude du système à contrôler. Le positionnement à étudier sera fait sur 2 axes. Le premier axe correspond à l'azimut et le second correspond à l'inclinaison.

L'objectif de ce modeste travail est l'étude du système de poursuite dans les panneaux solaires. Ce Travail est consacré à l'étude et l'optimisation d'un système de poursuit solaire dans le site de Ghardaïa, Il a pour but d'améliorer le rendement et la puissance du panneau solaire. L'exploitation de l'énergie maximale captée permet de tirer le maximum de puissance électrique disponible dans le générateur.

Dans ce travail nous avons fait un algorithme utilise un programme Matlab et présentent quelques résultats obtenue pour analyser les contraintes de l'exploitation d'un système de poursuit solaire.

Enfin l'utilisation d'une poursuite solaire se justifie pour les raisons suivantes :

- Permet d'augmenter la production des panneaux photovoltaïques de 30 à 40% si elle est réalisée sur 2 axes.
- La surface du parc solaire est réduite tout en gardant le même potentiel
- Le temps de retour sur investissement est réduit
- Amortissement du système en 4 ans (en moyenne)

## Bibliographies

- [1] M.R. Yaïche Et S.M.A. Bekkouche ; ‘‘ Conception Et Validation D’un Programme Sous Excel Pour L’estimation Du Rayonnement Solaire Incident En Algérie. Cas D’un Ciel Totallement Clair. Article Page 423 Et 424.
- [2] Mr : Boughoufala Mohamed ; ‘‘ Conception Et Réalisation D’un Système De Suiveur Solaire Pour Des Systèmes Photovoltaïques’’ ; Mémoire De Fin D’étude Pour L’obtention Du Diplôme De Magister En Electronique. Page 9
- [3] Benzahia Ayoub; ‘‘Réalisation d’un prototype d’un système de poursuite solaire’’ ; Mémoire de Fin d’Etudes En vue de l’obtention du diplôme: MASTER
- [4] BENKHELIFA Abdelaziz ; ‘‘ Modélisation et expérimentation d’un capteur solaire plan à eau Influence de l’intensité de l’éclairement solaire et de l’inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur’’ ; Mémoire Présenté pour l’obtention du diplôme de MASTER,
- [5] J.M Chassériau, ‘‘Conversion thermique du rayonnement solaire’’ ; Dunod, 1984.
- [6] R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz, ‘‘ Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier’’, 2ème édition 1980.
- [7] Charles Chauliaguet : L’énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolle 1981P22, 32 et p147-148.
- [8][http://sup.upstlse.fr/uved/Ozone/BasesScientifiques/projet/site/html/CirculationGenerale\\_1.html](http://sup.upstlse.fr/uved/Ozone/BasesScientifiques/projet/site/html/CirculationGenerale_1.html)
- [9] MEZIANI Fariza ; ‘‘ Détermination du gisement solaire par traitement d’images MSG’’ ; Mémoire de Magister
- [10] <http://www.mymercy.info/longitude-et-latitude-d'un-lieu-aded6/>.
- [11] <http://www.meridienne.org/index.php?page=coordonnees-horaires>
- [12] Mr Mihoub Sofiane ; ‘‘Contribution à la modélisation et à l’optimisation des concentrateurs solaires motorisés appliqués aux systèmes thermo solaires’’ ; Doctorat en Sciences ; le 19 septembre 2017 à Tlemcen ; page 34
- [13] Zaghi bilhem, mémoire de magister « Etude et réalisation d’un concentrateur solaire parabolique », Université de Constantine page 28-29-30, Soutenu 2005.

- [14] Docteur Merad née Mesri Mokhtaria & Professeur Cheknane Ali ; ‘‘ Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications’’ 192 pages
- [15] BOUAYED Abderrahmen ; ‘‘COMMANDE A DEUX AXES D’UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE’’ ; Mémoire de Magister
- [16] <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Rayonnement%20solaire/fr-fr/>
- [17] Mme Samira ; Mouhous-Chaouchi ; ‘‘Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné’’ ; Mémoire de Magister 2012
- [18] Soufi Adel, Mémoire de fin d’étude « Modélisation et Control System photovoltaïque par l'espace d'ETA », Université de Ouargla, 2012
- [19] Abbaz Dalila ; ‘‘ Optimisation des paramètres de fonctionnement d’un plancher solaire direct (PSD)’’ ; Thèse de Magister. Université de Constantine 1 ; page 109
- [20] M. Mesri-Merad, I. Rougab, A. Cheknane et N.I. Bachari ; ‘‘Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques’’
- [21] N.HAMANI, «Modélisation du flux solaire incident et de la température de sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident», these de Magister, Biskra-Algerie, (2005).
- [22] A.Moummi, N.Hamani, N.Moummi & Z.Mokhtari, ‘‘Estimation Du Rayonnement Solaire Par Deux Approches Semi Empiriques Dans Le Site De Biskra ‘’.Novembre 2006, Page81-82
- [23] TABET Ismail, ‘‘Étude, Réalisation et simulation d’un capteur solaire’’,19 /01 /2016, page 41-42
- [24] Mr HAMDANI Maamar ; ‘‘Etude et Effet de l’Orientation de deux Pièces d’un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa’’ Magister Spécialité " Énergies Renouvelables "
- [25] BOUZIANE RABEH ,DOKKAR AYOUB ;’’ Conception et Réalisation d’un Suiveur Solaire Bi-axial à Base De capteurs de lumière’’ ; Mémoire MASTER PROFESSIONNEL ; le : 29 / 05 / 2016 ; page 18
- [26] Khoudrane Ismail mémoire de master Professionnel (Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques)UNIVERSITE KASDI MERBAH–OUARGLA : page 36-37-38 Soutenu publiquement le 09/06/2014

[27] Merdaoui Zia ; ‘‘Caractérisation Radiométrique Des Sites De Bouzaréah Et De Ghardaïa  
‘’.Octobre 2007, Page 49

[28] earth.google.com

[29] <http://data.cder.dz:81/#>

[30] M. Koussa1, A. Malek et M. Haddadi , ;’’ Apport énergétique de la poursuite solaire sur  
deux axes par rapport aux systèmes fixes. Application aux capteurs plans

[31] [https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tcplclibspa/html/tcplcspa  
a\\_overview.htm&id=](https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tcplclibspa/html/tcplcspa_overview.htm&id=)

# Annexes 1

**Tableau 1 :** la répartition de cet éclairement énergétique du rayonnement solaire dans divers domaines de longueur d'onde :

Région spectrale	Longueurs d'onde (um)	Eclairement énergétique (W/m <sup>2</sup> )	Pourcentage (%)
Infrarouge	>0.70	695	50.8
Visible	0.40 à 0.70	559	40.9
UV-A	0.32 à 0.40	86	6.3
UV-B	0.28 à 0.32	21	1.5
UV-C	>0.28	6	0.4

**Tableau 2 :** Valeurs du facteur  $F_c$  en fonction de la distance zénithale d'après Robinson [20]

$\theta_z$ (°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	85
$F_c$	0.92	0.92	0.9	0.9	0.9	0.85	0.78	0.68	0.6	0.5

**Tableau 3 :** paramètre décrivant la nature du ciel

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

**Tableau 4 :** paramètre décrivant l'état de l'atmosphère

Etat de l'atmosphériques	A	B	A'	A''	B''
Ciel bleu foncé	1300	6	87	1150	1.15
Ciel bleu clair	1230	4	125	1080	1.22
Ciel bleu laiteux	1200	2.5	187	990	1.25

## Annexe 2

### Position du soleil par rapport à un observateur

L'énergie solaire que reçoit une surface est régie uniquement par des lois astronomiques et géométriques. Ces dernières faisant intervenir la latitude de lieu, la déclinaison solaire, l'heure du jour et enfin l'orientation de la surface réceptrice. La position du soleil dépend du temps solaire, du numéro du jour et de l'année, elle est exprimée par différents angles [13] :

- **Angle de zénith**

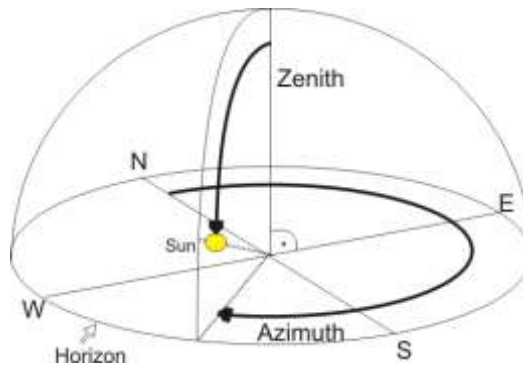
C'est l'angle entre la verticale d'une surface et un rayon du soleil, il est donné par l'équation suivante [31]

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega) \quad (1)$$

$\delta$  : Déclinaison solaire.

$\phi$  : Latitude du lieu.

$\omega$  : Angle horaire.



**Figure1** : Les coordonnées horizontales [31]

- **Angle d'incidence**

C'est l'angle entre le rayon solaire direct et la normale extérieure du la surface du plan, il est donné par l'équation suivante [31] :

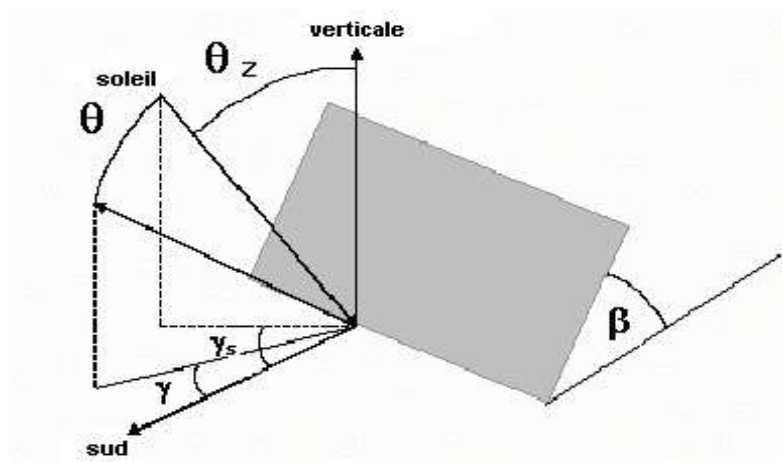
$$i = \cos^{-1}[\cos\theta_z + \sin\theta_z \cdot \sin\beta \cdot \cos(a_s - a)] \quad (2)$$

$\theta_z$  : Angle de zénith

$\beta$  : Inclinaison du surface.

$a$  : Angle d'azimut.

$a_s$  : Angle extérieur d'azimut.



**Figure 2** : Position du soleil par rapport à une surface inclinée [13]