



*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 Technologie*

**Filière :** *Energies Renouvelables*

**Spécialité :** *Energies Renouvelables en Electrotechnique*

**Par : BAROUD Hinde et DJEKAOUA Habiba**

**Thème**

**Estimation de l'ensoleillement par deux modèles  
semi-empiriques dans la région de Ghardaïa**

**Soutenu publiquement le : 24/06/2018**

**Devant le jury :**

<b>BENYELLOUL Kamel</b>	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>GAMA Amor</b>	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>FERKOUS Khaled</b>	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>BOUARAOUR Kamel</b>	Maître de Conférences A	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
<b>YETTOU Fatiha</b>	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	<b>Co-encadreur</b>

**Année Universitaire : 2017 / 2018**

# REMERCIEMENTS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Au nom de dieu le clément le miséricordieux

Tout d'abord, on remercie le Dieu, notre créateur de nous avoir donné les forces, la volonté et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.

"De nos jours, toutes les études pour la réalisation de travaux se concrétisent grâce à une parfaite collaboration, un travail coopératif assure une bonne circulation de l'information et aussi un suivi sérieux et permanent de l'étude en question"

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

"Nous voudrions tout d'abord adresser toute nos gratitude à Dr YETTOU Fatiha, Maitre de Recherche A à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, pour sa patience, sa disponibilité et surtout son aide et ses judicieux conseils, qui ont contribués à alimenter notre réflexion"

"Nous remercierons également le Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa), Dr DJAFER Djelloul ; qui nous a permet de réaliser ce travail au sein de l'URAER ainsi que pour son bon accueil"

"On tiens à remercier Dr GAMA Amor, Dr DJELLOULI Abdelkader et Dr FERKOUS Khaled, pour l'aide qu'il ont fournis et les connaissances qu'il ont su nous transmettre. Nous les remercierons également pour leur disponibilité et la qualité de leur conseils"

"Nous tenons à saisir cette occasion pour adresser nos profonds remerciements aux responsables et aux personnels de l'Université Ghardaïa et surtout à Mr Mohammed pour les efforts déployés pour nous aider"

"Un grand merci à nos mères et nos pères, pour leur amour, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel, à la fois moral et économique, qui nous ont permis de réaliser les études que nous voulons et par conséquent ce mémoire"

"Nous voudrions exprimer nos reconnaissance envers nos amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de nos démarche. Un grand merci à tous"



## *DEDICACES*

*A la mémoire de mon cher frère **Farouk "Mohammed"** que j'aimerais pour toujours et que Dieu l'accueille dans son vaste paradis ; tu me manques, je ne t'oublierai jamais.*

*A mon très chère père **Djelloul** que j'aimerais beaucoup, qui m'a soutenu pendant de longues années d'études et de vie et qui a été toujours derrière mon succès, c'est toi papa mon espoir et ma vie, je souhaite que Dieu te protège.*

*A ma très chère maman **Khadidja** que j'aimerais beaucoup, qui m'a soutenu pendant de longues années d'études et de vie et qui a été toujours derrière mon succès, c'est toi maman mon espoir et ma vie, je souhaite que Dieu te protège.*

*A mon frère **Younes** et à sa femme, ma sœur **Nawal** et sa mère **Fatna** , Aux fils de mes chers frères **Mohammad** et **Yasmin**, à ma chère sœur **Meriem** et à ses merveilleuses filles **Rehab** et **Inas**, je les remercie pour leur soutien.*

*Un énorme remerciement à mes très chers sœurs **Imen** et **Siham**.*

*Et A toutes la familles : **Baroud** et **Guerbatí***

*A mon binôme **Habiba** et toute la famille **Djekaoua***

*Et bien sûr à tous mes chères amis.*

*A tous les étudiants de master 2 énergies renouvelables*

*Et tous ceux qui ont contribué de près ou de Loin à ma Formation, je les remercie.*



*Hinde*



# DEDICACES

Je dédie ce modeste Travail à :

A Mes très chers parents **Zohra** et **Ahmad** , Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de L'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure Une bonne santé et longue vie.

A ceux que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de

Ce projet :

A Mes sœurs : **Khadidja**, **Choumissa**, **Houria**, **Safia**, **Rokia** et mon frère **Abdelkader** et mes petits nièces et neveux

A tous mes grandes familles : **DJEKAOUA** et **SALAG**

Surtout ma grande mère **Mebarka**.

A mon binôme **Hinde** et toute la famille **baroud**.

A mes chères amis **Djalila** , **Sabiha** , **Nawal** ; **Mariam** , **Khera** , **Fatiha** , **Zidane** , **Yazide**, **Sliman** , **Masoud** , **Slimen**, **Abdelwahab** et **Saleh**

ET A tous les membres du club "d'activités scientifique et technologique"

Et tous ceux qui ont contribué de près ou de Loin à ma Formation, je vous dis merci.



**Habiba**

## RESUME

L'évaluation à long terme des performances des systèmes de conversion de l'énergie solaire s'établit par l'intermédiaire de programmes de simulation numérique, qui nécessitent la connaissance des paramètres météorologiques et radiométriques, tels que la température ambiante, la vitesse de vent et l'éclairement solaire. L'utilisation des modèles d'estimation du rayonnement solaire reste pratiquement l'un des seuls moyens pour pallier au problème des données radiométriques à cause de la rareté des stations radiométriques sur le territoire national. Dans ce contexte, ce mémoire porte sur l'estimation du rayonnement solaire global par ciel clair au niveau du sol par deux modèles semi-empiriques (Modèle de Capderou et Modèle de Kasten) à partir de programmes Matlab développés à cet effet.

L'application de ces deux modèles permet d'estimer les composantes directes et diffuse du rayonnement solaire incident sur un plan horizontal ou incliné avec différentes orientations. Par ailleurs, une validation des résultats obtenus par comparaison des valeurs calculées avec les valeurs radiométriques mesurées sur le site de Ghardaïa montre un bon accord entre les données estimées et les données expérimentales. Les deux modèles sont évalués sur une base graphique et statistique et les résultats de l'étude statistique sont très encourageants et prometteurs.

**Mots clés :** Energie solaire, Estimation du rayonnement solaire, Modèle Capderou, Modèle Kasten, Etude statistique.

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Conversion de l'énergie cinétique du vent	14
Figure I.2	Les éoliennes à axe vertical	16
Figure I.3	Les éoliennes à axe horizontal	17
Figure I.4	Principe général des technologies solaires thermodynamiques	24
Figure I.5	Cellule, panneau et champ photovoltaïque	25
Figure I.6	Principe d'une cellule photovoltaïque	26
Figure I.7	Cellules en silicium monocristallin	27
Figure I.8	Silicium poly cristallin	28
Figure I.9	Silicium amorphe	28
Figure II.1	Image de l'étoile soleil du système solaire	32
Figure II.2	Structure de l'étoile soleil	33
Figure II.3	Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil	34
Figure II.4	Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude (L)	35
Figure II.5	La sphère céleste	36
Figure II.6	Les coordonnées terrestre	37
Figure II.7	Variation de l'équation du temps en fonction du jour	39
Figure II.8	Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour	41
Figure II.9	Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil)	42
Figure II.10	Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour	43
Figure II.11	Variation de l'azimut solaire en fonction du temps	44
Figure II.12	Angle d'inclinaison d'un capteur solaire	45
Figure II.13	Les angles caractérisant un capteur plan incliné	45
Figure II.14	Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil	46
Figure II.15	Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air	47
Figure II.16	Analyse spectrale du rayonnement solaire	48
Figure II.17	Les trois composantes du rayonnement solaire incident sur un plan incliné	50
Figure II.18	Pyrhéliomètre pour la mesure de l'éclairement direct	51
Figure II.19	Pyranomètre pour la mesure du rayonnement direct et diffus	52
Figure II.20	Héliographe pour la mesure de l'insolation	53
Figure II.21	Rayonnement solaire hors atmosphère	56
Figure II.22	Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire	58
Figure II.23	Position du soleil relative aux surfaces inclinées	64
Figure II.24	Définition des angles pour un plan incliné	64
Figure III.1	Station radiométrique de l'URAER (Ghardaïa).	68

---

Figure III.2	Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle Capderou).	71
Figure III.3	Variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan incliné de 32° (Modèle Capderou).	72
Figure III.4	Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle Kasten).	72
Figure III.5	Variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan incliné de 32° (Modèle Kasten).	73
Figure III.6	Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Décembre.	75
Figure III.7	Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Juin.	75
Figure III.8	Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Mars.	76
Figure III.9	Eclairement incident sur un plan vertical Sud et un plan vertical Est pour un jour type du mois de Décembre.	77
Figure III.10	Eclairement incident sur un plan vertical Sud et un plan vertical Est pour un jour type du mois de Juin.	77
Figure III.11	Eclairement incident sur un plan vertical Sud et un plan vertical Est pour un jour type du mois de Mars.	78
Figure III.12	Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.	79
Figure III.13	Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement direct normal et global incliné pour un jour clair d'hiver.	80
Figure III.14	Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.	80
Figure III.15	Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement direct normal et global incliné pour un jour clair d'été.	81
Figure III.16	Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement global horizontal et global incliné pour un jour clair du printemps.	82
Figure III.17	Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement direct normal et direct horizontal pour un jour clair du printemps.	83

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Emissions de CO <sub>2</sub> en tonne par MWh produit (Université de Louvain, AIE, 2005)	7
Tableau II.1	Caractéristiques principales du soleil	32
Tableau II.2	Valeurs d'albédo selon différents types de sol	49
Tableau II.3	Répartition spectrale du rayonnement thermique	53
Tableau II.4	Paramètres pour le calcul du facteur du trouble	62
Tableau III.1	Valeurs du facteur TL calculées suivant le modèle Capderou.	74
Tableau III.2	Tests statistiques pour le rayonnement solaire instantané, Global horizontal (IG <sub>h</sub> ), Direct horizontal (IB <sub>h</sub> ), Global incliné à la latitude (IG <sub>i</sub> ), et le rayonnement Direct normal (IN).	86

NOMENCLATURE

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>	<b>Unité</b>
$\lambda$	Longitude du lieu	Degrés
$\varphi$	Latitude du lieu	Degrés
TSV	Temps solaire vrai	Heure
TSM	Temps solaire moyen	Heure
t	Temps local	Heure
ET	Equation de temps	Heure
$N'$	Angle journalier	Degrés
N	Numéro du jour	[-]
TU	Temps universel	Heure
DE	Décalage horaire	Heure
L	Point de latitude	Degrés
TL	Temps légal	Heure
$C_1$	Décalage horaire par rapport au Greenwich	Heure
$C_2$	l'heure d'été et d'hiver	Heure
$\omega_l$	Angle horaire du lever du soleil	Degrés
$\omega_c$	Angle horaire du coucher du soleil	Degrés
$(TSV)_l$	L'heure solaire au lever du Soleil= $h_l$	Heure
$(TSV)_c$	l'heure solaire au coucher du Soleil= $h_c$	Heure
$\delta$	Déclinaison solaire	Degrés
$d_j$	Durée du jour	Heure
$\omega$	Angle horaire	Degrés
ID	Rayonnement diffus	W/m <sup>2</sup>
IB	Rayonnement direct	W/m <sup>2</sup>
IG	Rayonnement global	W/m <sup>2</sup>
$\gamma_s$	Hauteur du soleil	Degrés
$\chi_s$	Azimut du soleil	Degrés
$\theta_z$	Angle zénithal	Degrés
$\beta$	Inclinaison du plan	Degrés
$\alpha$	L'orientation du plan	Degrés
$m_A$	Masse d'air	[-]
Alt	Altitude du lieu	Km
$\delta_R$	Epaisseur totale optique de Rayleigh	[-]
$T_L$	Facteur de trouble total de Linke	[-]
$T_0$	Trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau	[-]

## NOMENCLATURE

$T_1$	Trouble du à la diffusion moléculaire	[-]
$T_2$	Trouble relatif à la diffusion par les aérosols	[-]
$A_{he}$	Alternance hiver été	[-]
$G_0$	Eclairement solaire extraterrestre	W/m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Correction de distance terre soleil	[-]
$I_0$	Constante solaire	W/m <sup>2</sup>
$IB_h$	Eclairement direct incident sur un plan horizontal par Capderou	W/m <sup>2</sup>
$T'_L$	Facteur de trouble diffusif	[-]
$\alpha_z$	l'Azimut de la normal du plan	W/m <sup>2</sup>
$IG_h$	Eclairement global incident sur un plan horizontal par Capderou	W/m <sup>2</sup>
$IN$	Eclairement direct normal incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$\delta^h$	Composante du cercle de l'horizon donnée par Capderou	[-]
$\delta^a$	Composante due à l'albédo donnée par Capderou	[-]
$\rho$	Albédo du sol	[-]
$\delta^d$	Composante directe donnée par Capderou	[-]
$\delta^i$	Composante isotrope du ciel donnée par Capderou	[-]
$\delta^{i'}$	Composante due à la rétrodiffusion donnée par Capderou	[-]
$ID_i^a$	Composante du diffus isotrope du sol donnée par Capderou	W/m <sup>2</sup>
$ID_i^i$	Composante du diffus isotrope du ciel donnée par Capderou	W/m <sup>2</sup>
$ID_h$	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$ID_i^d$	Composante diffus directionnel donnée par Capderou	W/m <sup>2</sup>
$ID_i^h$	Composante du diffus du cercle de l'horizon donnée par Capderou	W/m <sup>2</sup>
$ID_i^{ciel}$	Composante du diffus du ciel donnée par Capderou	W/m <sup>2</sup>
$ID_i$	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque par Capderou	W/m <sup>2</sup>
$IG_i$	Eclairement global incident sur un plan quelconque par Capderou	W/m <sup>2</sup>
$IB_i$	Eclairement direct incident sur un plan quelconque par Capderou	W/m <sup>2</sup>
$\gamma$	Hauteur de la normal du plan	Degrés
$\delta_{(k)}$	Déclinaison solaire donnée par kasten	Degrés
$\omega_{(k)}$	Angle horaire donné par kasten	Degrés
$\gamma_{s(k)}$	Hauteur angulaire du soleil donnée par kasten	Degrés
$m_{A(k)}$	Masse atmosphérique donnée par kasten	[-]
$T_{L(k)}$	Facteur du trouble de Linke donné par kasten	[-]
$\beta_A$	Coefficient d'angstrom	[-]
$w_V$	Hauteur d'eau condensable	cm
$IG_{h(k)}$	Rayonnement global sur plan horizontal par kasten	W/m <sup>2</sup>
$IB_{h(k)}$	Rayonnement direct sur plan horizontal par kasten	W/m <sup>2</sup>
$ID_{h(k)}$	Rayonnement diffus sur plan horizontal par kasten	W/m <sup>2</sup>

## NOMENCLATURE

---

$IN_{(k)}$	Rayonnement solaire direct normal donné par kasten	W/m <sup>2</sup>
$I_o(k)$	Constante solaire donné par kasten	W/m <sup>2</sup>
$G_{O(k)}$	Quantité de puissance totale envoyée par le soleil donné par kasten	W/m <sup>2</sup>
$\delta_{(k)}^{inc}$	L'angle d'incidence par donné kasten	[-]
$\chi_{s(k)}$	Azimut du solaire par donné kasten	Degrés
$ID_{i(k)}$	Eclairement diffus incident sur un plan incliné par kasten	W/m <sup>2</sup>
$IB_{i(k)}$	Eclairement direct incident sur un plan quelconque par kasten	W/m <sup>2</sup>
Y	Grandeur	W/m <sup>2</sup>
$Y_{mes}$	Valeurs mesurées de la grandeur Y	W/m <sup>2</sup>
$Y_{est}$	Valeurs estimées de la grandeur Y	W/m <sup>2</sup>
$N_d$	Nombre total de valeurs	[-]
$R^2$	Coefficient de corrélation	[-]
MAE	L'erreur moyenne absolue	[%]
MBE	L'erreur moyenne	W/m <sup>2</sup>
RMSE	L'Erreur moyenne quadratique	W/m <sup>2</sup>

---



---

 TABLE DES MATIERES

RESUME

NOMENCLATURE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

01

 CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES  
 RENOUEVELABLES

<b>I.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>03</b>
<b>I.2.</b>	<b>L'énergie et ces utilisations</b>	<b>03</b>
I.2.1.	La définition de l'énergie	03
I.2.2.	Les utilisations de l'énergie	04
I.2.2.1.	L'industrie	04
I.2.2.2.	Le transport	04
I.2.2.3.	Le résidentiel, le tertiaire et l'agriculture	05
<b>I.3.</b>	<b>Le réchauffement climatique</b>	<b>05</b>
I.3.1.	L'effet de serre	06
I.3.2.	Les sources de gaz à effet de serre	06
I.3.2.1.	Le dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	06
I.3.2.2.	Le méthane (CH <sub>4</sub> )	07
I.3.2.3.	Le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N <sub>2</sub> O)	07
I.3.2.4.	L'ozone	08
I.3.2.5.	Les Hydro Fluoro Carbones (HFC)	08
<b>I.4.</b>	<b>Les sources de l'énergie non renouvelables</b>	<b>08</b>
I.4.1.	Les énergies fossiles	08
I.4.1.1.	Le pétrole	08
I.4.1.2.	Le gaz naturel	09
I.4.1.3.	Le charbon	09
I.4.1.4.	Les inconvénients des énergies fossiles	09
I.4.1.5.	L'énergie nucléaire	10
<b>I.5.</b>	<b>Les sources des énergies renouvelables</b>	<b>11</b>
I.5.1.	Définition des énergies renouvelables	11
I.5.2.	Historique des énergies renouvelables	12
I.5.3.	Les avantages les énergies renouvelables	13
I.5.3.1.	Sur le plan environnemental	13
I.5.3.2.	Sur le plan social	13
I.5.3.3.	Sur le plan économique	14
<b>I.6.</b>	<b>Les différents types d'énergies renouvelables</b>	<b>14</b>
I.6.1.	L'énergie éolienne	14
I.6.1.1.	Définition de l'énergie éolienne	14
I.6.1.2.	Historique de l'éolien	15
I.6.1.3.	Les types des éoliennes	16

I.6.1.4.	Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	16
I.6.2.	L'énergie géothermique	18
I.6.2.1.	Les types de l'énergie géothermique	18
I.6.2.2.	Les avantages et inconvénients de l'énergie géothermique	18
I.6.3.	La biomasse	19
I.6.3.1.	Les constituants de la biomasse	19
I.6.3.2.	Les avantages et les inconvénients de la biomasse	20
I.6.4.	L'énergie hydraulique	20
I.6.4.1.	Les constituants de l'énergie hydraulique	21
I.6.4.2.	Le coût de l'énergie hydraulique	22
I.6.4.3.	Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique	22
I.6.5.	L'énergie solaire	23
I.6.5.1.	L'énergie solaire thermique	23
a.	Éléments constituant la chaîne de conversion	24
b.	L'électricité solaire thermodynamique	24
I.6.5.2.	L'énergie solaire photovoltaïque	25
a.	Quelques définitions	25
b.	Principe d'une cellule photovoltaïque	26
c.	Les types d'installations photovoltaïques et leurs applications	26
d.	Les différents types de générateurs photovoltaïques	27
I.6.5.3.	Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire	29
<b>I.7.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>29</b>

## CHAPITRE II : MODELES SEMI-EMPIRIQUES POUR L'ESTIMATION DE L'ENSOLEILEMENT SOLAIRE

<b>II.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>31</b>
<b>II.2.</b>	<b>Aspects géométrique du rayonnement solaire</b>	<b>31</b>
II.2.1.	Le soleil	31
II.2.1.1.	La description du soleil	32
II.2.1.2.	Le mouvement de la terre autour du soleil	34
II.2.1.3.	Le mouvement apparent du soleil	34
II.2.1.4.	La sphère céleste	35
II.2.1.5.	Les coordonnées géographiques d'un site	36
II.2.2.	Les temps solaires	37
II.2.2.1.	Le temps solaire vrai (TSV)	37
II.2.2.2.	Le temps solaire moyen (TSM)	38
II.2.2.3.	L'équation du temps (ET)	38
II.2.2.4.	Le temps universel (TU)	39
II.2.2.5.	Temps légal (TL)	39
II.2.2.6.	Le lever et coucher du soleil ( $h_1, h_c$ )	40
II.2.2.7.	La durée du jour ( $d_j$ )	40
II.2.3.	Les coordonnées du soleil par rapport à un observateur	40
II.2.3.1.	Le repère équatorial	40
a.	La déclinaison du soleil ( $\delta$ )	40
b.	L'angle horaire ( $\omega$ )	41
II.2.3.2.	Le repère horizontal	42
a.	La hauteur du soleil ( $\gamma_s$ )	42

---

b.	L'azimut du soleil ( $\chi_s$ )	43
II.2.3.3.	L'orientation d'un plan	44
a.	L'inclinaison du plan ( $\beta$ )	44
b.	L'azimut du plan ou déviation azimutale ( $\alpha$ )	45
II.2.4.	Paramètres de l'atmosphère	46
II.2.4.1.	Masse atmosphérique	46
II.2.4.2.	Épaisseur optique de l'atmosphère	46
II.2.4.3.	Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère	48
II.2.5.	Rayonnement solaire reçu au niveau du sol	49
II.2.5.1.	La composante directe	49
II.2.5.2.	La composante diffuse	49
II.2.5.3.	L'albédo du sol (le rayonnement réfléchi)	49
II.2.5.4.	Le rayonnement global	50
II.2.6.	Mesure du rayonnement solaire	50
II.2.6.1.	Mesure du rayonnement direct (le Pyrhéliomètre)	51
II.2.6.2.	Mesure du rayonnement diffus et global (le Pyranomètre)	51
II.2.6.3.	Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe)	52
<b>II.3.</b>	<b>Aspects énergétiques du rayonnement solaire</b>	<b>53</b>
<b>II.4.</b>	<b>Modélisation du rayonnement solaire par le modèle de CAPDEROU</b>	<b>54</b>
II.4.1.	Facteur de trouble de Linke	54
II.4.1.1.	Absorption par la vapeur d'eau	54
II.4.1.2.	Absorption par les gaz et diffusion de Rayleigh	54
II.4.1.3.	Diffusion par les aérosols	55
II.4.2.	Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal par ciel clair	55
II.4.2.1.	Constante solaire	55
II.4.2.2.	Eclairement hors atmosphère	55
II.4.2.3.	Eclairement global incident sur un plan horizontal	56
II.4.2.4.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	56
II.4.2.5.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	56
II.4.3.	Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque par ciel clair	57
II.4.3.1.	Angle d'incidence	57
II.4.3.2.	Eclairement incident sur un plan quelconque	58
II.4.3.4.	Eclairement direct incident sur le plan quelconque	58
II.4.3.5.	Eclairement diffus incident sur le plan quelconque	58
a.	Le rayonnement diffus de la part du sol	59
b.	Le rayonnement diffus de la part du ciel	59
II.4.3.6.	Calcul du rayonnement global	61
<b>II.5.</b>	<b>Modélisation du rayonnement solaire par le modèle de Kasten</b>	<b>61</b>
II.5.1.	Paramètres géométriques et atmosphérique	61
II.5.2.	Eclairement incident sur un plan horizontal	63
II.5.3.	Eclairement incident sur un plan quelconque	64
<b>II.6.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>66</b>

---

**CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION**

<b>III.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>67</b>
<b>III.2.</b>	<b>Présentation</b>	<b>67</b>
III.2.1.	Site de Ghardaïa	67
III.2.1.1.	Données utilisés	68
III.2.2.	Programmation par Matlab des deux modèles	68
III.2.2.1.	Etapes du programme et grandeurs d'entrées utilisées	69
III.2.2.2.	Facteur de trouble de Linke	70
<b>III.3.</b>	<b>Résultats obtenus</b>	<b>71</b>
III.3.1.	Estimation du rayonnement solaire par les deux modèles	71
III.3.1.1.	Influence du facteur $T_L$ sur le rayonnement solaire	71
III.3.1.2.	Calcul du facteur $T_L$ par les deux modèles	73
III.3.2.	Application des modèles au site de Ghardaïa	74
III.3.2.1.	Incidence sur un plan horizontal et incliné à la latitude	74
III.3.2.2.	Incidence sur un plan vertical Sud et vertical Est	76
III.3.3.	Confrontation des résultats des modèles avec les valeurs mesurées	78
III.3.4.	Comparaison des valeurs estimées aux valeurs mesurées	82
<b>III.4.</b>	<b>Validation et discussion des résultats</b>	<b>84</b>
III.4.1.	Évaluation statistique des modèles (Méthodologie)	84
III.4.2.	Interprétation des résultats	86
<b>III.5.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>87</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		<b>88</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>		

## INTRODUCTION GENERALE

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique résultant d'une croissance exceptionnelle des besoins énergétiques de l'humanité. Le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une augmentation importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'utilisation de sources d'énergies fossiles. D'autres facteurs comme les émissions de CO<sub>2</sub> et le caractère limité de nos réserves fossiles n'ont pas été pris en compte, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser d'autres sources d'énergies, tout en tenant compte des notions économiques et environnementales [1].

Comme alternative à ces préoccupations, le développement et l'implémentation des énergies renouvelables est incontournable, des ressources énergétiques illimitées et abondamment disponibles existent et doivent être exploitées. Certaines, comme l'énergie éolienne ou hydraulique connaissent déjà un développement technique et commercial important. D'autres, comme l'énergie solaire et thermoélectrique, sont techniquement disponibles mais leur compétitivité économique n'est pas encore atteinte pour diverses considérations. Actuellement, il existe une volonté mondiale pour remédier à tous ces problèmes par le recours aux énergies renouvelables à grande échelle.

A l'heure de la prise de conscience massive des effets du réchauffement climatique, il est primordial de considérer l'énergie solaire comme l'une des alternatives possibles aux combustibles fossiles [1]. Cette source d'énergie ; qui est l'objectif de notre travail, se caractérise par une absence de pollution et une disponibilité exceptionnelle. D'autre part, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie présentent beaucoup d'avantages. Cette source d'énergie est utilisée de manières différentes, par exemple ; dans les systèmes thermiques pour la production d'eau chaude, ou dans les systèmes photovoltaïques pour la production d'électricité, il apparaît dès lors que l'énergie solaire peut apporter de réelles solutions.

Notre région, en particulier le Sud Algérien est caractérisée par un potentiel énergétique important, qui favorise le développement et l'utilisation de l'énergie solaire. Les besoins et la possibilité d'exploitation de cette source d'énergie sont directement liés aux conditions climatiques. L'aspect aléatoire et discontinu de l'énergie solaire ainsi que le déphasage de sa

disponibilité, dans le temps, par rapport aux besoins d'une exploitation énergétique, montre l'importance et la nécessité de connaître le gisement solaire avant de procéder au dimensionnement et à l'installation d'un quelconque système de captation solaire. La meilleure approche pour connaître le gisement solaire sur un site donné est de disposer d'une bonne série de mesures du rayonnement au sol. Donc il est nécessaire de connaître les méthodes de collecte, de traitement et d'analyser des données de ce rayonnement, afin d'évaluer correctement le potentiel d'énergie solaire de la région.

Bien qu'il existe un réseau de stations de mesure radiométrique, leur nombre reste très limité en Algérie, en raison de l'étendu de notre pays, où on dispose seulement de sept stations qui assurent la mesure des composantes globale et diffuse du rayonnement solaire. Le nombre de ces stations est donc très insuffisant, de même les coûts d'investissement et de maintenance de ces stations de mesures étant élevés. Pour ces raisons, le recours à des modèles empiriques est nécessaire dans cette phase. De nombreuses études et travaux de recherches se sont fixés comme objectif cette estimation du rayonnement solaire, et divers modèles empiriques ont été développés dans diverse sortes de condition météorologique et géographique [2, 3, 4].

Le but de ce travail est de faire une étude comparative entre deux modèles semi-empiriques d'estimation des composantes du rayonnement solaire au sol pour en tirer à la fin le meilleur model d'estimation.

Ce document qui décrit notre travail est réparti en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des notions générales sur l'énergie et ces utilisations, applications, les sources de l'énergie renouvelables et leurs différents types et plus particulièrement l'énergie solaire. Dans le second chapitre une modélisation de l'éclairement solaire par le modèle de Capderou et Kasten est présentée, les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes de l'éclairement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné sont programmées avec Matlab 2016b [5] et leurs variations sont illustrées sous formes graphiques. Les formules des paramètres géométriques et atmosphériques nécessaires ont été également programmées et représentées. Le dernier chapitre est dédié à la validation des résultats obtenus à partir des données de mesure du rayonnement solaire au sol. Une confrontation des valeurs estimées par les deux modèles à celle mesurées au niveau du site de Ghardaïa par le baie d'une étude statistique de calcul d'erreur est élaborée. Finalement une conclusion générale contenant les interprétations et les perspectives envisagées terminera ce mémoire.

---

**CHAPITRE I**

**Généralités sur les énergies  
renouvelables**

## **I.1. Introduction**

L'énergie est essentielle pour améliorer la qualité de la vie et ouvrir des perspectives dans les pays développés et en développement, c'est pourquoi nos pays et l'humanité tout entière doivent relever le défi qui consiste à garantir un approvisionnement énergétique suffisant, fiable et respectueux de l'environnement à un prix reflétant les paramètres fondamentaux du marché. L'économie et la société consomment de l'énergie sous différentes formes, dont l'intensité et la qualité dépendent de l'usage des différents vecteurs énergétiques primaires ou secondaires, l'énergie est donc un facteur essentiel du développement de l'activité humaine, et sa disponibilité revêt un caractère stratégique [6].

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois. Le solaire, l'hydraulique, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont les différentes formes des énergies renouvelables.

Dans ce premier chapitre, nous consacrons notre étude à l'énergie et ses ressources, elle sera divisée en deux parties : Le premier partie précise l'importance de l'énergie dans notre vie avec une présentation de ces différentes sources et le deuxième partie sera consacré qu'aux énergies renouvelables, dérivée d'un approvisionnement naturellement et continuellement renouvelé, nous montrons ces différentes sources et ces techniques de conversion.

## **I.2. L'énergie et ces utilisations**

### **I.2.1. La définition de l'énergie**

L'énergie est le moteur de tous les phénomènes naturels : la croissance des plantes, le vent, les courants des rivières, les vagues, la chute d'objets... En physique, on la définit comme la capacité d'un système à produire un travail. Elle se présente sous de multiples facettes (thermique, cinétique, électrique...), et l'une de ses propriétés majeures est de pouvoir être convertie d'une forme en une autre [7].

### **I.2.2. Les utilisations de l'énergie**

#### **I.2.2.1. L'industrie**

Les usages de l'énergie dans l'industrie comprennent :

- Les usages thermiques à basse (jusqu'à 100° C) et moyenne température (de 100 à 300°C) : chauffage des locaux, séchage des produits, vapeur pour les industries papetière, alimentaire, textile.
- Les usages thermiques à haute température (au-dessus de 300°C) : fusion des métaux, fabrication du verre, du ciment.
- Les usages mécaniques ou force motrice fixe ou mobile : broyage des minerais, usinage des pièces métalliques, transport des produits (à l'intérieur des usines).
- Les usages spécifiques de l'électricité : électrolyse, froid... Les différentes branches de l'industrie ont des consommations d'énergie très différentes par rapport à la quantité des produits ou à la valeur ajoutée de l'entreprise. Les industries Grosses Consommatrices d'Energie (IGCE) absorbent environ 70% de la consommation totale du secteur: sidérurgie, métaux non ferreux, matériaux de construction, verre, chimie, papier-carton [8].

#### **I.2.2.2. Le transport**

Les usages de l'énergie dans ce secteur sont de la force motrice mobile. Sur les 1.7 milliards de tep consommés dans le monde par ce secteur, 98% sont des produits pétroliers : essence et gasoil pour les véhicules routiers, certains navires et locomotives, le kérosène pour les avions à réaction, le fuel pour la plupart des navires. Les usages hors du pétrole sont quelques locomotives à vapeur alimentées au charbon (ou même au bois), les locomotives électrifiées, les métros, tramways, trolleybus, quelques véhicules routiers alimentés au gaz naturel ou à l'alcool. Les transports routiers de marchandises et de personnes ont des consommations par tonne.km ou par passager.km beaucoup plus élevées que les transports ferroviaires (ou fluviaux pour les marchandises). Dans les transports urbains, la voiture individuelle consomme trois à quatre fois plus d'énergie par passager que le bus ou le métro pour un trajet identique. Pour des niveaux de vie comparables, la part des divers modes de transport est donc un facteur explicatif important de la consommation d'énergie d'un pays et des nuisances qui lui sont attachée.

### **I.2.2.3. Le résidentiel, le tertiaire et l'agriculture**

Au niveau mondial, ce secteur est le premier consommateur d'énergies commerciales et il absorbe également la quasi-totalité du milliard de tep d'énergies traditionnelles (seules ressources des populations les plus pauvres) [8].

Le résidentiel correspond à l'ensemble de l'habitat individuel ou collectif. Le tertiaire regroupe les activités de service : écoles, bureaux, commerces, hôtels...L'agriculture comprend la consommation d'énergie des engins agricoles et des bâtiments d'élevage (il est parfois difficile de distinguer les consommations liées à l'agriculture et celles du milieu rural en général). La part de l'agriculture dans la consommation de l'ensemble de ce secteur est faible. La répartition des usages énergétiques dans le résidentiel et tertiaire peut être estimée à 80% d'usages thermiques (chauffage, eau chaude, cuisson) et 20% d'usages spécifiques de l'électricité (éclairage, électroménager, audiovisuel).

Les besoins thermiques peuvent être satisfaits soit par la biomasse (sous forme traditionnelle ou sous forme moderne comme les chaudières à bois alimentant des réseaux de chaleur) soit par les combustibles fossiles (fuel, gaz, charbon).

### **I.3. Le réchauffement climatique**

Le réchauffement climatique fait partie des défis environnementaux, sociaux et économiques les plus importants que l'humanité doit affronter. L'effet de serre est un phénomène naturel important pour la survie de la planète. Il permet d'avoir une température moyenne sur terre de 15° C contre -18°C si cet effet n'existait pas.

Cependant les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre ont augmenté depuis l'époque préindustrielle en raison des activités humaines, principalement la combustion des combustibles fossiles et les changements d'affectation des terres et de la couverture terrestre. Des mesures d'adaptation aux changements climatiques doivent être adoptées pour promouvoir la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique et diminuer les incidences des changements climatiques et des extrêmes climatiques sur la diversité biologique [9].

Au cours de ces dernières décennies, différents symptômes du changement climatique ont déjà été observés [10] :

- Le recul généralisé des glaciers dans le monde ;
- La montée régulière du niveau des mers ;
- La multiplication des épisodes de canicule et de sécheresse ;
- Les cyclones et pluies torrentielles ;
- La perte très marquée de biodiversité dans le monde.

### **I.3.1. L'effet de serre**

On compare souvent l'effet de serre à une voiture aux fenêtres fermées au beau milieu d'une après-midi d'été ensoleillée. Les fenêtres laissent passer le rayonnement solaire, mais le verre reste quasiment opaque au rayonnement émis par l'intérieur de la voiture. La chaleur reste donc piégée. Par analogie, les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère jouent le même rôle que le verre : ils laissent passer la lumière visible mais restent plutôt opaques aux infrarouges. S'ils existent en trop grandes quantités, la terre se réchauffe progressivement. Tout est donc une question de degré. Car sans la présence de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la température moyenne de la terre serait de  $-19^{\circ}\text{C}$ . A l'inverse, la surface de Vénus dont l'atmosphère est riche en  $\text{CO}_2$  atteint  $460^{\circ}\text{C}$ , ce qui grillerait tout ce qui existe sur terre [6].

### **I.3.2. Les sources de gaz à effet de serre**

#### **I.3.2.1. Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ )**

Le  $\text{CO}_2$  provient principalement des émissions dues à la combustion des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) qui représentent 87% de l'énergie utilisée dans le monde et émettent 8.4 Gt de carbone par an. Il est également issu de certains procédés industriels, la déforestation (pour plus de 15% soit 1.5 Gt de carbone par an) et l'agriculture intensive.

Les secteurs les plus émetteurs sont l'industrie, la production énergétique et les transports. La consommation des ménages (cuisson, chauffage, électricité) contribue aussi significativement aux émissions de  $\text{CO}_2$ . Ainsi, nos sociétés brûlent aujourd'hui le charbon qui s'est accumulé au Carbonifère, il y a plus de 300 millions d'années [11].

## CHAPITRE I : Généralités sur les Energies Renouvelables

Table I.1: Emissions de CO<sub>2</sub> en tonne par MWh produit (*Université de Louvain, AIE, 2005*)

Emissions indirectes de CO <sub>2</sub> (analyse de cycle de vie) (tCO <sub>2</sub> /MWh)	Solaire	0.1
	Eolien	0.008
	Nucléaire	0.05
Emissions de CO <sub>2</sub> dues à la combustion d'énergie (tCO <sub>2</sub> /MWh)	Charbon (Taux d'efficacité thermique de 40%)	0.87
	Gaz (Taux d'efficacité thermique de 55%)	0.36

Ces faibles taux d'émissions par unité d'électricité produite présentés sur le tableau I.1 font des énergies renouvelables un outil de choix pour limiter les émissions de GES dans l'atmosphère du fait de la combustion d'énergie. Selon le dernier rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC), leur développement est un élément essentiel à l'atténuation du changement climatique.

### I.3.2.2. Le méthane (CH<sub>4</sub>)

Ce gaz est à 60% émis par l'élevage intensif des bovins, les déjections animales, les cultures (comme le riz), la fermentation des déchets organiques, les feux de forêts, l'utilisation du bois pour le chauffage et la cuisson, l'inondation de vallées lors de la mise en eau des barrages (avec la décomposition de la biomasse noyée) et lors du transport et de l'exploitation du gaz et du pétrole. Le méthane contribue à hauteur de 18.5 % au forçage radiatif direct induit par les gaz à effet de serre [11].

### I.3.2.3. Le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O)

Ses sources d'émission sont à la fois naturelles (océans, sols) et anthropiques : agriculture intensive (engrais, déjections), combustion de la biomasse, procédés industriels chimiques et aérosols notamment. 1/3 des émissions sont liées aux activités humaines. Le protoxyde d'azote contribue à hauteur de 6.2 % au forçage radiatif direct induit par les gaz à effet de serre.

### **I.3.2.4. L'ozone**

Ce gaz résulte de réactions chimiques de divers polluants primaires comme les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le CO et les Composés Organiques Volatils Non-Méthaniques (COVNM) sous l'effet du rayonnement solaire. La production d'ozone est fortement liée au trafic automobile dans des conditions de températures supérieures à 25°C. L'ozone troposphérique représenterait 17 à 20% de l'effet de serre additionnel.

### **I.3.2.5. Les Hydro Fluoro Carbones (HFC)**

Les HFC sont des gaz qui ne contiennent pas d'atomes de chlore ou de brome connus pour leur atteinte grave à la couche d'ozone. Ils se substituent donc aux CFC qui furent utilisés massivement dans les systèmes de réfrigération, de conditionnement d'air et comme gaz propulseur dans les aérosols.

## **I.4. Les sources de l'énergie non renouvelables**

Une énergie non-renouvelable est une source d'énergie qui n'est pas inépuisable (pour l'homme), et qui ne se renouvelle pas ou qui se renouvelle mais pas en quantité suffisante. Les énergies non-renouvelables peuvent être divisées en deux catégories : les énergies fossiles et l'énergie nucléaire [6].

### **I.4.1. Les énergies fossiles**

L'énergie fossile se renouvelle très lentement et est très consommée. Elle est composée principalement de pétrole, gaz naturel et le charbon.

#### **I.4.1.1. Le pétrole**

Le pétrole est la première source d'énergie mondiale. Formé à partir du plancton qui s'est déposé au fond des mers, le pétrole fournit près de la moitié de la demande totale en énergie primaire. Pourtant, jusqu'au début des années 1950, le pétrole n'occupait qu'une place limitée dans le paysage énergétique mondial (sauf aux Etats-Unis). Produit facile à manipuler, transporter ou stocker, le pétrole va rapidement supplanter le charbon. Les années 60 marquent

véritablement le début de l'ère du pétrole du fait de la croissance continue des besoins énergétiques, de la découverte d'importants gisements, notamment au Proche-Orient, et de coûts de production très faibles. Après les chocs pétroliers des années 70, la demande connaît une forte baisse, mais un contre-choc, en 1983, provoque une réduction de moitié des prix du pétrole et la demande repart à la hausse (+ 2.4% de 1986 à 1989). Aujourd'hui, le pétrole représente près de 39% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde [6].

### ➤ **Le pétrole de schiste :**

Le pétrole de schiste, ou huile de schiste, correspond à un hydrocarbure dérivé des schistes bitumeux, définis comme des roches sédimentaire à grain fin qui renferme des substances organiques en quantité suffisante pour faire l'objet d'une valorisation énergétique. Ces substances organiques sont appelées kérogènes. Là où le gaz de schiste correspond à un gaz non-conventionnel, le pétrole de schiste correspond à un type de pétrole non conventionnel (non renfermé à haute densité dans une cavité comme dans les gisements traditionnels) [6].

### **I.4.1.2. Le gaz naturel**

Le constituant principal des gisements de gaz naturel est le méthane. Le méthane est un hydrocarbure composé d'un atome de carbone et de quatre atomes d'hydrogène. Pour être utilisable, le gaz naturel peut nécessiter un adoucissement (retrait de la majeure partie des composants acides, gaz carbonique et sulfure d'hydrogène essentiellement) et un dégasolinage (retrait des fractions lourdes du gaz). Il doit dans tous les cas être déshydraté. Toutes ces opérations visent à éliminer les impuretés présentes avec le gaz en sortie de puits.

### **I.4.1.3. Le charbon**

Le charbon est la source d'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde. Le charbon s'est formé il y a plus de 280 millions d'années à partir de végétaux engloutis par les eaux lors de bouleversements géologiques importants. Moteur essentiel du développement économique au XIXème siècle, le charbon a marqué la première révolution

industrielle. Ainsi, entre 1800 et 1900, la consommation mondiale de charbon a connu une progression annuelle moyenne de +4.3%.

Il existe différents types de charbon (l'antracite, la houille, le lignite, la tourbe) qui n'ont pas tous le même pouvoir énergétique. Au début du XXème siècle, le charbon était l'énergie fossile dominante ; aujourd'hui il a été supplanté par le pétrole mais reste très présent puisque le charbon représente près de 26% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde.

#### **I.4.1.4. Les inconvénients des énergies fossiles**

Voilà une question qu'il est judicieux de se poser afin de bien appréhender la question de l'intérêt éventuel des énergies renouvelables. Nous pouvons ainsi discerner quatre problèmes majeurs découlant directement de l'utilisation des énergies fossiles :

- L'épuisement des réserves :
- Les conflits autour de ces réserves :
- Les fluctuations des cours des combustibles fossiles en bourse :
- La combustion des combustibles fossiles contribue à l'effet de serre.

#### **I.4.1.5. L'énergie nucléaire**

Les combustibles fossiles se consomment plus vite que la nature ne les produit. Les gisements connus de ces formes d'énergie sont voués à disparaître plus ou moins rapidement. L'énergie de fission nucléaire est un cas particulier : les gisements exploitables connus seront épuisés dans, suivant les estimations et le développement de la consommation des pays orientaux (notamment en tenant compte des futures centrales qui seront construites en Chine et en Inde), 50 ans à un siècle, ce qui classe cette énergie dans la catégorie 'non renouvelable'.

Les réacteurs actuellement en fonctionnement sont à 81% des réacteurs à eau légère de 2<sup>ème</sup> génération, Leur approvisionnement en combustible ne pose aucune difficulté, de même que celui des réacteurs de génération III. Les réserves classiques connues d'uranium représentent en effet 70 années de consommation actuelle et les, réserves probables supplémentaires, 100 années de plus, ce qui permettrait d'engager la croissance du parc électronucléaire mondial avec le même type de réacteurs. Le niveau des réserves d'uranium

sera en effet porté à plusieurs millénaires avec les réacteurs de 4<sup>ème</sup> Génération, appelés à prendre, vers 2040 [6].

### ➤ **Le côté négatif du nucléaire :**

- Les déchets radioactifs provenant de centrales nucléaires sont très néfastes pour la santé des hommes, des animaux, des plantes, des eaux et de l'air.
- Des risques d'accidents à conséquences graves sur l'humanité et la planète, comme celui de la centrale nucléaire Tchernobyl (URSS, 1986), les conséquences de cet accident continuent, après vingt ans, de faire des malheureux et des victimes.
- Les rayonnements nucléaires, produit lors de l'explosion de la bombe atomique Hiroshima ; continuent à faire, également, des victimes après plus de soixante années du déroulement de l'incident (1945).
- L'armement nucléaire présente une menace sérieuse sur l'avenir de cette forme d'énergie en raison de l'absence d'une démocratie et d'une sécurité à l'échelle mondiale et des relations internationales de justice et de confiance

## **I.5. Les sources des énergies renouvelables**

Les sources d'énergies renouvelables sont disponibles en quantité illimitée, leur exploitation est un moyen de répondre aux besoins en énergie tout en préservant l'environnement.

### **I.5.1. Définition des énergies renouvelables**

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain [12]. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans

cette définition. Les énergies renouvelables sont également plus 'propres' (moins d'émissions de CO<sub>2</sub>, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles.

Les principales énergies renouvelables sont :

- L'énergie hydraulique ;
- L'énergie solaire ;
- L'énergie éolienne ;
- La géothermie ;
- L'énergie de biomasse ;

### **I.5.2. Historique des énergies renouvelables**

Si le terme 'énergie renouvelable' est relativement récent (apparition en 1970), la totalité des énergies qu'existe depuis quasiment l'origine de la terre et leur utilisation par l'homme remonte à plusieurs centaines voire à plusieurs milliers d'années. La biomasse fut utilisée notamment pour se chauffer, et développer l'industrie des métaux. L'énergie thermique solaire fut mobilisée pour sécher les aliments, les céréales ou le foin. Les sources géothermales furent à l'origine de nombreuses implantations humaines. L'énergie éolienne fut utilisée par les civilisations égyptienne et minoenne pour propulsion des navires ; l'énergie hydraulique fut utilisée en perse et dans l'empire romain il y a plus de deux millénaires L'Europe du moyen âge redécouvrit les techniques et les utilisa à grande échelle (moulins à vent, moulins à marée, moulins hydrauliques) pour moudre les céréales, pomper de l'eau, entrainer des martinets ou fabriquer du papier par exemple. Et avec le progrès des machines thermiques, les puissances croissantes demandées par les concentrations industrielles et les impératifs de productivités allaient rendre obsolètes ces générateurs mécaniques à faible puissance.

Les réflexions engagées dans les pays développés quelque année avant le premier choc pétrolier firent toutefois prendre conscience à l'opinion que l'accroissement exponentiel de la consommation d'énergie fossile risquait d'engendrer, dans l'échelle de temps d'une vie humaine, les pénuries d'approvisionnement et conduire à des situations environnementales irréversibles du fait de la saturation des mécanismes de restaurations des équilibres naturelles. C'est dans tel contexte que l'étude et le développement de convertisseurs susceptibles de capter le potentiel des énergies provenant directement ou indirectement de l'énergie solaire et géothermique furent lancés ou réactivés. On leur donna pour l'occasion le nom énergies renouvelables et on les présenta

comme étant une alternative à la domination hégémonique des sources fossiles dans le bilan énergétique mondial [13].

### **I.5.3. Les avantages les énergies renouvelables**

#### **I.5.3.1. Sur le plan environnemental**

Les énergies renouvelables :

- Contribuent à la réduction des émissions des gaz à effet de serre ;
- Réduisent la pollution de l'air, de l'eau, du sol et de la biosphère (pas d'émission de gaz de combustion, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>,... ) ;
- Ne nécessitent pas d'extraction ni de transport de combustibles et limitent ainsi les risques d'accident (marées noires, explosions ... ) ;
- Ne génèrent pas de déchets dangereux ;
- Préservent les stocks de ressources naturelles et énergétiques.

Cependant elles peuvent avoir des impacts environnementaux locaux spécifiques à chaque installation (occupation du sol, paysage, bruit, modification de l'écosystème). Dans la plupart des cas cependant, une évaluation des incidences environnementales locales permet de mettre en œuvre des solutions adaptées aux particularités locales.

#### **I.5.3.2. Sur le plan social**

Les installations utilisant les énergies renouvelables induisent généralement la création d'emplois durables et difficilement délocalisables. Leur caractère diffus et décentralisé permet par ailleurs aux populations locales de maîtriser la production d'énergie nécessaire à leurs besoins, tout en permettant une réorientation de l'activité économique. Ainsi par exemple, la production de biomasse-énergie constitue une possibilité de diversification assurant par là des revenus complémentaires pour les secteurs agricole et sylvicole [14].

Localement, l'implication de la population dans les énergies renouvelables est également une excellente entrée en matière d'éducation à une utilisation rationnelle de l'énergie. En outre, au

niveau international, l'autonomie énergétique des régions réduit les tensions géopolitiques, limite ainsi les risques de conflit et permet la solidarité entre les peuples.

### I.5.3.3. Sur le plan économique

Les énergies renouvelables permettent de mieux stabiliser les prix de l'énergie, en rendant le marché de l'énergie nettement moins sensible aux fluctuations des combustibles fossiles, et diminuent la dépendance énergétique. Par ailleurs, elles contribuent à l'activité économique locale via les entreprises actives dans le secteur (fabricants, installateurs, équipementiers, ou encore entreprises chargées de l'exploitation, l'entretien ou la maintenance des installations).

## I.6. Les différents types d'énergies renouvelables

### I.6.1. L'énergie éolienne

#### I.6.1.1. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Voir Fig I.1).

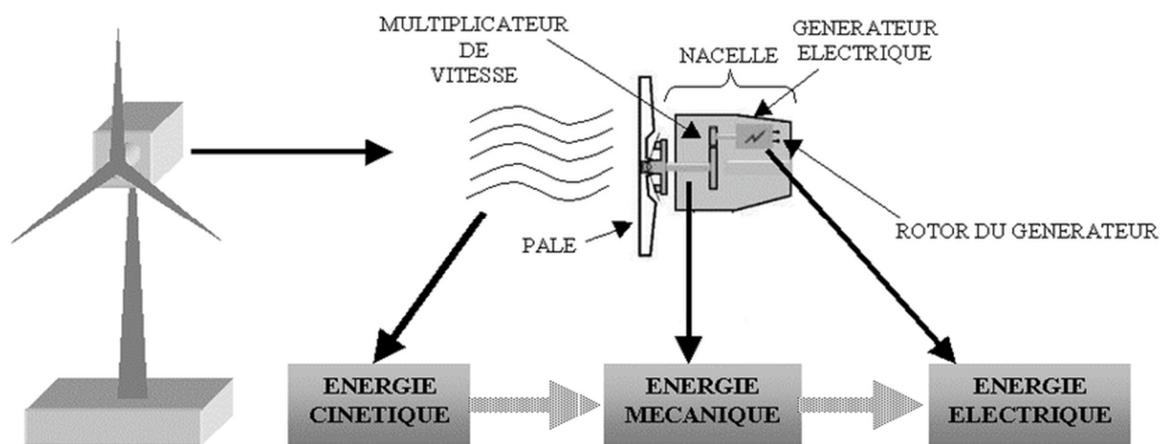


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie 'renouvelable' non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).

Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [15].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière.

### **I.6.1.2. Historique de l'éolien**

L'énergie éolienne est probablement une des plus anciennes sources d'énergie. Cette énergie propre et renouvelable existe depuis toujours, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Mais jusqu'à présent son exploitation reste difficile. L'utilisation de l'énergie éolienne a commencé en 1700 avant J.-C environ [16, 17]. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Âge. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de 'moulins', ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV<sup>e</sup> siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie.

Seulement en Hollande et au Danemark, vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. .

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être 'redécouverte' et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux États-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnaient dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [17].

### I.6.1.3. Les types des éoliennes

Le capteur éolien encore appelé voile de l'aérogénérateur, assure la conversion de la puissance aérodynamique du vent (masse d'air / vitesse) en une autre mécanique (couple / vitesse angulaire). Les différents types de voiles qui existent de nos jours sur les sites éoliens sont : les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical.

#### a. Les éoliennes à axe vertical

Ne nécessitent pas de dispositif d'orientation mais sont complexes et assez peu répandues. La figure I.2 représente quelques exemples des éoliennes à axe verticale [18].



Figure I.2 : Les éoliennes à axe vertical.

### b. Les éoliennes à axe horizontal

Fonctionnant face au vent et nécessitant donc un système de guidage (Voir Fig I.3). Ces dernières sont quelque exemples vieux et quelques exemples des plus développées.



Figure I.3 : Les éoliennes à axe horizontal.

#### I.6.1.4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

##### ➤ Les avantages :

- Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la relative simplicité des technologies mises en œuvre.
- Le prix de revient d'une éolienne va probablement diminuer dans les années à venir suite aux économies d'échelle qui pourront être réalisées sur leur fabrication.
- Techniquement, les éoliennes sont rentables dans les régions bien ventées.
- La période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.

##### ➤ Les inconvénients :

- Énergie renouvelable toujours dépendante du vent. En utilisation isolée, il faut donc prévoir un système de batterie de stockage de l'électricité pour les journées sans vent.
- La très grande variabilité (direction, vitesse, jour/nuit, saison) de cette énergie.
- Les éoliennes sont parfois critiquées pour leur impact sur l'environnement.

### I.6.2. L'énergie géothermique

Est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol, soit pour la production d'électricité ou bien pour la production de chaleur.

Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraines qui peuvent atteindre 350 C° dans les zones les plus favorables, cette eau chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs, la vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique.

#### I.6.2.1. Les types de l'énergie géothermique

- ❖ **La géothermie très basse énergie** : Profondeur inférieure à 100 m de température moins de 30°C, elle assure le chauffage.
- ❖ **La géothermie basse énergie** : Entre 1500 et 2500 mètres de profondeur de température entre 30°C et 90°C, trop faible pour produire de l'électricité mais idéal pour produire de la chaleur.
- ❖ **La géothermie moyenne énergie** : Gisements d'eau chaude ou de vapeur humide compris entre 90 et 150°C utilisé pour la production d'électricité.
- ❖ **La géothermie haute température** : 1500 à 3000 mètres de profondeur, exploite des fluides atteignant des températures supérieures à 150°C, pour produire de l'électricité 'zones de volcanisme ou de tectonique active'.
- ❖ **La géothermie profonde assistée** : la chaleur des roches chaudes fissurées situées entre 3 et 5 kilomètres elle est utilisée pour la production d'électricité.

#### I.6.2.2. Les avantages et inconvénients de l'énergie géothermique

##### ➤ **Les avantages :**

- La géothermie n'est pas dépendante des conditions atmosphériques.
- Le système tire gratuitement du sol près des deux tiers des besoins en chauffage d'une maison ce qui permet de réduire l'utilisation d'énergies fossiles.
- Le coût d'entretien des systèmes géothermiques est généralement moins élevé que les systèmes de chauffage classique.

- La durée de vie prévue de la thermopompe d'un système géothermique est d'environ 18 à 20 ans, à peu près la même que celle d'un appareil de chauffage classique, et 50 à 75 pour la boucle souterraine. Même si la thermopompe doit être remplacée au bout de 20 ans, la boucle souterraine pourra servir beaucoup plus longtemps.
- Tant que la quantité d'énergie captée n'est pas supérieure à la chaleur provenant du centre de la terre, la ressource est inépuisable.
- Cette énergie ne produit aucun déchet.

### ➤ **Les inconvénients :**

- Les systèmes géothermiques utilisent une source d'énergie renouvelable, mais doivent faire appel à une source électrique pour fonctionner qui elle n'est pas toujours renouvelable.
- L'achat d'un tel système demande un investissement initial assez important. Il est souvent le double d'une installation utilisant une énergie classique.

### **I.6.3. La biomasse**

Réunit le bois, la paille, les rafles de maïs, le biogaz et les biocarburants. Le bois énergie représente 14 % de la consommation énergétique mondiale, issu des déchets de la forêt ou des industries du bois, il est brûlé pour produire de la chaleur.

Le biogaz est issu de la fermentation des déchets organiques, sa combustion produit de la chaleur, mais également de l'électricité par cogénération. Les biocarburants proviennent de plantes cultivées (tournesol, betterave, colza...).

- ❖ **Le biodiesel** : provient de Biomasse oléagineuse, huiles végétales, huiles usagées d'origine végétale ou animale.
- ❖ **Le bioéthanol** : provient de Betteraves, déchets de meunerie, petit-lait, plantes contenant de l'amidon ou de la cellulose.

#### **I.6.3.1. Les constituants de la biomasse**

On distingue trois constituants principaux, auxquels correspondent des procédés de valorisation spécifiques [19].

- ❖ **La biomasse lignocellulosique** : Constituée par le bois, les résidus verts, la paille, la bagasse de canne à sucre et le fourrage. La valorisation se fait plutôt par des procédés par voie sèche, dits conversions thermo-chimiques.
- ❖ **La biomasse à glucide** : Riche en substance glucidique facilement hydrolysable : les céréales, les betteraves sucrières et les cannes à sucre. La valorisation se fait plutôt par fermentation ou par distillation dits conversions biologiques.
- ❖ **La biomasse oléagineuse** : Riche en lipides : Colza, Palmier à huile, etc. Elle peut être utilisée comme carburant. Il y a deux familles de biocarburants : les esters d'huiles végétales (colza) et l'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'Ethyl Tertio Butyl Ether.

### **I.6.3.2. Les avantages et les inconvénients de la biomasse**

#### ➤ **Les avantages :**

- Large disponibilité de la ressource sur la terre, sauf dans les régions les plus arides où le bois est rare.
- Faibles émissions polluantes et pas de contribution à l'effet de serre.
- Le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.

#### ➤ **Les inconvénients :**

- C'est une source d'énergie peu dense. Pour se chauffer durant un hiver, il faudra un grand volume de bois, ce qui nécessitera beaucoup de transport, de manutention et un vaste espace de stockage.
- L'exploitation des bois et forêts doit s'accompagner d'une nouvelle plantation. Dans le cas contraire, on dégrade l'écosystème et on détériore la ressource.

### **I.6.4. L'énergie hydraulique**

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. De nos jours l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages et sert principalement à la production d'électricité.

### **I.6.4.1. Les types de l'énergie hydraulique**

#### **a. L'énergie des vagues**

En lançant un pavé dans une mare, non seulement l'eau reçoit l'énergie de ce choc à l'endroit de l'impact, mais aussi une onde va se créer, qui propage le choc et donc l'énergie du choc, à une certaine distance du point d'impact. De la même manière, le vent qui frappe la surface de la mer crée une onde, une vague qui propage à longue distance la vague, donc l'énergie ainsi reçue. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, l'énergie des vagues est variable dans le temps, et notamment selon les saisons (comme le vent qui la crée). On estime que, sur l'atlantique, l'énergie disponible est cinq fois plus forte en hiver qu'en été.

#### **b. L'énergie marémotrice**

On cherche à capter l'énergie potentielle due à la différence de hauteur entre un niveau haut et un niveau bas comme sur les fleuves, il faut donc installer un barrage pour créer cette différence de hauteur on barre l'estuaire ou la baie, créant ainsi un bassin dont le niveau est différent de celui de la mer le barrage est muni de 'pertuis'. Lorsque la marée monte, les pertuis sont ouverts, l'eau envahit le bassin et le niveau de l'eau monte dans le bassin. Dès que la mer redescend, on ferme les pertuis et le niveau du bassin se trouve donc perché par rapport au niveau de la mer. Dès que la différence de hauteur entre le niveau du bassin et le niveau de la mer est suffisante, on peut 'libérer' l'eau du bassin en la dirigeant vers des turbines qui, en tournant, génèrent de l'électricité [20].

#### **c. L'énergie hydrolienne**

Utilisent les courants sous-marins, les hydroliennes cherchent à capter l'énergie de mouvement 'cinétique' des courants de marée. Certes cette énergie est beaucoup plus faible que l'énergie potentielle, mais les hydroliennes ne font pas barrage et laissent donc passer pêcheurs, plaisancier et faune marine. Le principe consiste à faire entraîner au fond de la mer des hélices ou des turbines par les courants marins, les sites les plus intéressants, où les courants sont les plus rapides, sont les embouchures de rivières, les zones côtières, ...

### **d. L'énergie maréthermique**

Utilise la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes dans les océans.

### **e. L'énergie osmotique**

La diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer.

### **I.6.4.2. Le coût de l'énergie hydraulique**

Le coût de l'énergie hydroélectrique est évidemment très variable, en fonction de la topographie (il y a de bons sites de barrages qui, à peu de frais, retiennent beaucoup d'eau), de l'hydroélectricité de la distance entre le site du barrage et les lieux de consommation (le site de barrage n'a aucune raison d'être proche des lieux de consommation).

De toute manière, l'énergie hydraulique (comme c'est le cas pour beaucoup d'énergies renouvelables) est coûteuse en investissement et assez peu en fonctionnement et en maintenance.

Inversement, ce gros investissement hydraulique a souvent la chance de pouvoir être amorti sur une très longue durée de vie. Une fois l'investissement initial amorti sur une période de quinze à trente ans, le coût de l'électricité produite sera faible, correspondant aux dépenses d'exploitation et d'entretien et maintenance, qui reste réduites, même dans le cas d'une très longue utilisation. La grande hydraulique est donc une énergie très rentable, dans beaucoup de sites. La petite hydraulique peut aussi être rentable, puisque son coût total (amortissement compris) varie de 2 à 5 centimes d'euro/kWh [6].

### **I.6.4.3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique**

#### **➤ Les avantages :**

- Tant que le cours d'eau n'est pas à sec, l'énergie est disponible. C'est donc une source d'énergie assez disponible (sauf en cas de sécheresse persistante).

#### **➤ Les inconvénients :**

- Les plus gros barrages peuvent noyer des surfaces très importantes, pouvant comprendre des zones.

- Les barrages peuvent s'ensaver car ils réduisent l'écoulement de l'eau mais aussi de tous les éléments charriés par les cours d'eau.
- Le lâché d'eau (et plus exceptionnellement la rupture d'un barrage) peuvent provoquer des dégâts considérables en aval du barrage.

### **I.6.5. L'énergie solaire**

Le soleil bien que distant de 150 millions de kilomètres de notre planète est assurément notre plus grande source d'énergie les réactions nucléaires qui ont lieu dans le soleil entretiennent et renouvellent en permanence cette source d'énergie.

Bien sur l'énergie reçue est variable selon les moments. Les nuits, les passages nuageux sont autant de moments où l'énergie solaire est inexistante, ou moindre. En moyenne, la puissance reçue annuellement à la surface du globe peut aller de 85 à 290 W/m<sup>2</sup>. Elle varie donc de 01 à 03 entre les régions les moins ensoleillées et les plus ensoleillées. Cet écart est important mais pas considérable : aucune région du globe n'est dépourvue d'énergie solaire.

L'énergie solaire peut, ou bien être convertie en chaleur, ou bien convertie en électricité. L'exploitation de cette énergie peut se faire de manière thermique, thermodynamique ou photovoltaïque.

#### **I.6.5.1. L'énergie solaire thermique**

Les photons excitent des atomes en leur transmettant une part de leur énergie. Face à ce gain d'énergie, les atomes s'agitent et s'échauffent. Cette chaleur va servir à augmenter la température d'un fluide caloporteur qui pourra être utilisé pour :

- Le chauffage d'un bâtiment,
- La production d'eau chaude.

Pour favoriser le recours au solaire thermique, les chercheurs développent les technologies selon 3 axes [21].

- Augmentation des performances en développant des traitements de surface pour les capteurs.
- Réduction des coûts à travers le développement des installations urbaines plutôt que seulement domestiques (mutualisation d'équipements)
- Intégration de nouvelles fonctions.

### a. Éléments constituant la chaîne de conversion

- ❖ **Les capteurs:** Plusieurs types de capteurs existent (plans, sans vitrage, à tubes sous vide). Leur utilisation dépendra de la quantité de chaleur qu'on souhaite produire, le type d'installation qu'ils doivent intégrer (centrales, maisons...), et la région dans laquelle on se trouve.
- ❖ **Le fluide caloporteur :** Ce fluide va circuler dans les capteurs et récupérer l'énergie thermique collectée. Généralement, l'eau ou un fluide antigel sont utilisés. Dans certaines applications, l'air peut également être employé en tant que fluide caloporteur. Le fluide circule ensuite dans un réseau, acheminant la chaleur pour pouvoir l'utiliser ou la stocker.

### b. L'électricité solaire thermodynamique

La chaleur produite va être convertie en énergie mécanique pour produire de l'électricité, la température beaucoup plus élevée que dans les systèmes thermiques - entre 100 et 1500 °C, contre 20 à 100°C pour le thermique.

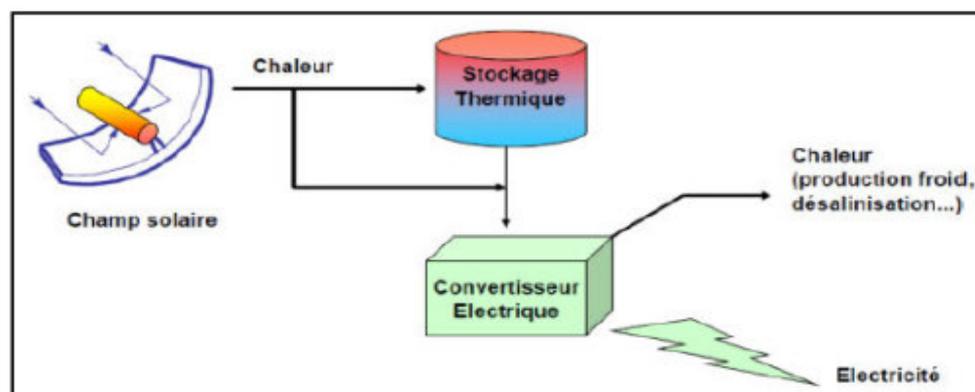


Figure I.4 : Principe général des technologies solaires thermodynamiques.

Selon la Figure 1.4, la production d'électricité via la technologie solaire thermodynamique peut se découper en trois étapes :

1 - Concentration du rayonnement sur l'entrée du récepteur et absorption sur les parois du récepteur : transformation de l'énergie en chaleur.

2 - Transport et éventuellement stockage de cette chaleur.

3 - Transfert à un cycle thermodynamique associé à un alternateur : production d'électricité.

### I.6.5.2. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque.

#### a. Quelques définitions

- ❖ La cellule photovoltaïque est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.
- ❖ Un panneau photovoltaïque est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques. Parfois, les panneaux sont aussi appelés modules photovoltaïques.
- ❖ Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un champ photovoltaïque. (Voir Fig I.5)

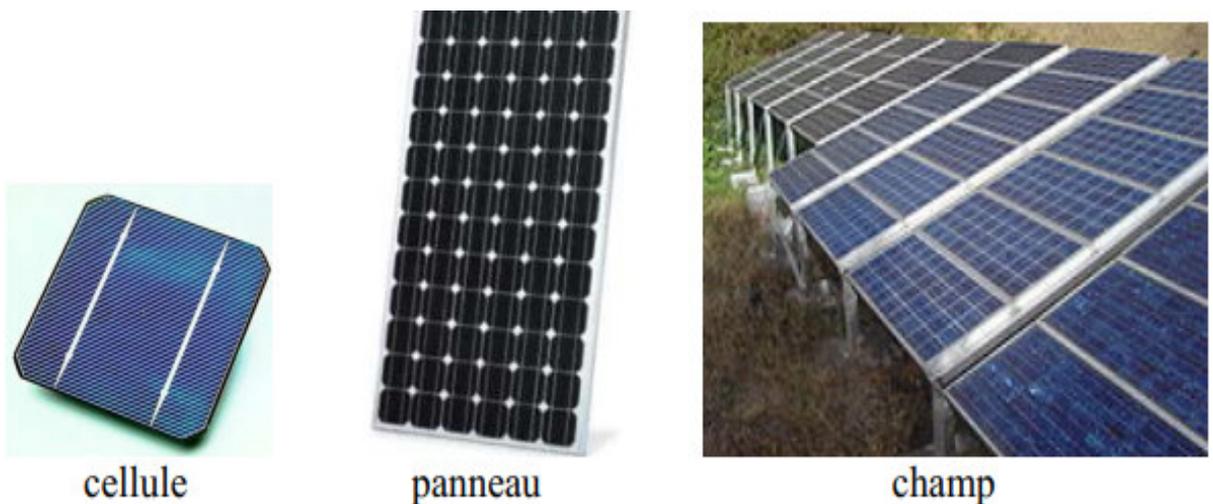


Figure I.5 : Cellule, panneau et champ photovoltaïque.

### b. Principe d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -). Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique. la figure (Voir Fig I.6) illustre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

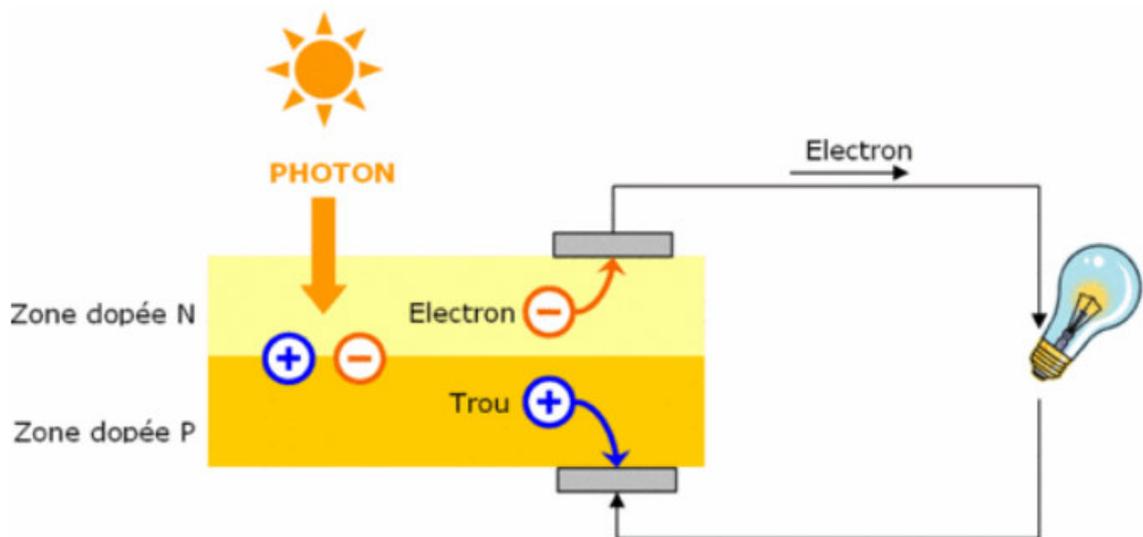


Figure I.6 : Principe d'une cellule photovoltaïque.

### c. Les types d'installations photovoltaïques et leurs applications

Selon les besoins, peuvent se décliner sous plusieurs formes :

- Pour une production locale d'électricité telle que : les installations résidentielles, bâtiments industriels et commerciaux.
- Pour une production centralisée telle que les centrales solaires.

### ➤ Les Enjeux :

- Diminution des coûts des matériaux, notamment du silicium purifié.
- Simplification des procédés de fabrication : l'augmentation de la cadence (cristallisation), la réduction du taux de casse (sciage), du nombre d'étapes et diminution des pertes de matière au cours de la fabrication.
- Augmentation du rendement de conversion des cellules.

### d. Les différents types de générateurs photovoltaïques

❖ **Silicium monocristallin** : Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques. Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de barreau. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, leurs durée de vie est de 20 à 30 ans.

### ➤ Les avantages :

- Bon rendement, de 12% à 18%
- Bon ratio  $Wc/m^2$  (environ 150  $Wc/m^2$ ) ce qui permet un gain de place si nécessaire.
- Nombre de fabricants élevé.

### ➤ Les inconvénients :

- Coût élevé.
- Rendement faible sous un faible éclairement.



Figure I.7 : Cellules en silicium monocristallin.

❖ **Silicium poly cristallin (multi cristallin)** : Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

### ➤ Les avantages :

- Cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module.
- Moins cher qu'une cellule monocristalline.

### ➤ Les inconvénients :

- Moins bon rendement qu'un cellule monocristalline : 11 à 15%.
- Ratio  $Wc/m^2$  moins bon que pour le monocristallin (environ  $100 WC/m^2$ ).
- Rendement faible sous un faible éclairement.
- Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Durée de vie : 20 à 30 ans.

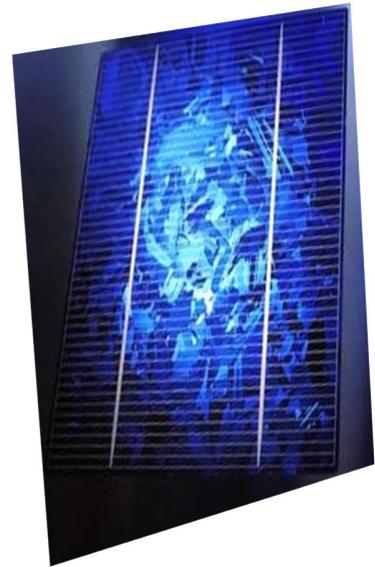


Figure I.8 : Silicium poly cristallin.

### ❖ Silicium amorphe:

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites 'solaires'.

### ➤ Les avantages :

- Fonctionne avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert).
- Un peu moins chère que les autres technologies.
- Intégration sur supports souples ou rigides.

### ➤ Les inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil, de 6% à 8%.
- Nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio  $WC/m^2$  plus faible, environ  $60 Wc/m^2$ ).
- Performances qui diminuent avec le temps (environ 7%).



Figure I.9 : Silicium amorphe.

### I.6.5.3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire

#### ➤ Les avantages :

- Énergie disponible partout à la surface de notre planète.
- Les panneaux photovoltaïques s'intègrent particulièrement bien aux toitures.
- Les capteurs solaires thermiques peuvent être intégrés aux toitures ou aux façades.

#### ➤ Les inconvénients :

- Énergie renouvelable qui demande une technologie très avancée pour la stockage.
- Panneaux photovoltaïques encore très chers.
- Le niveau de production maximal dépend de la surface de capteur exposée au soleil.
- Énergie renouvelable toujours dépendante de la saison et du lieu où l'on se trouve.

### I.7. Conclusion

Nous avons vu à travers ce chapitre que l'énergie est le plus souvent utilisée à partir de ces ressources, pour évoquer leur consommation, leur développement, ainsi que leur épuisement. De par l'importance de ces ressources dans l'industrie ou les transports, la dépendance énergétique et le coût de l'énergie sont des problématiques importantes dans de nombreux pays. Le réchauffement climatique a conduit à un débat international sur la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre dont le secteur énergétique est fortement producteur.

Ainsi, les énergies fossiles représentent la source principale des gaz à effet de serre et disparaîtront dans les années futures. Le nucléaire pose d'autres problèmes à cause de ses déchets radioactifs et sa dangerosité, il est donc indispensable d'utiliser de nouvelles énergies dès aujourd'hui comme les énergies renouvelables. Nous entamons dans ce chapitre une étude détaillée sur les énergies renouvelables, une étude qui va nous permettre de bien comprendre les types de ses énergies ainsi que ces processus de conversion.

Le développement des énergies renouvelables ne répond pas seulement à un enjeu environnemental, mais correspond à un besoin de diversification de nos sources d'énergies. Cependant, si leurs atouts économiques et écologiques sont indéniables, leur puissance énergétique ne permettra pas de les substituer complètement aux énergies fossiles, compte-tenu de nos modes de consommations actuels. Même en exploitant toutes les sources d'énergie

## CHAPITRE I : Généralités sur les Energies Renouvelables

---

possibles, le passage aux énergies renouvelables implique des transformations majeures dans les modes de production, de transports ...etc. Nous pensons que seul un mode d'organisation nouveau, fondé sur l'efficacité énergétique semble réaliste dès lors que les énergies fossiles s'épuiseront ou que les changements climatiques l'imposeront.

Le rayonnement solaire (éclairage solaire) est l'élément de base dans la conversion d'énergie rayonnée en énergie thermique ou photovoltaïque, la mesure de ce paramètre se fait avec des éléments très développés et précis, les plus connus sont le pyranomètre et pyréliomètre que nous allons présenter dans le prochain chapitre, une étude détaillée sur la modélisation du rayonnement solaire fera l'objet du second chapitre.

---

**CHAPITRE II**

**Modèles Semi-empiriques pour  
l'Estimation de l'Ensoleillement  
Solaire**

### II.1. Introduction

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques, surtout dans une optique de développement des marchés et des technologies. Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné [22]. Dans ce présent chapitre, on commence par une brève description du solaire, nous définissons ensuite quelques données nécessaires pour notre étude notamment les paramètres de position, les caractéristiques de l'atmosphère et les temps solaires. En suite une description détaillée du rayonnement solaire, sa mesure directe et sa modélisation par deux modèles à savoir : le modèle de Capderou, et le modèle de Kasten.

Toutes les équations présentées dans ce deuxième chapitre; pour l'estimation des composantes directes et diffuse de l'éclairement solaire sur un plan horizontal et incliné, ont été programmées sous environnement Matlab. Les graphes illustrés sont issus de la programmation par Matlab des deux modèles (Kasten et Capderou), le modèle Capderou [23], qui sert de référence aux concepteurs de systèmes énergétiques solaires, reste le plus utilisé en Algérie et le modèle de Kasten a été choisi parmi d'autres (d'après la littérature).

### II.2. Aspects géométrique du rayonnement solaire

#### II.2.1. Le soleil

Le soleil exerce sur notre planète une action vitale, véritable source de vie, bien qu'il soit le centre du système qui porte son nom (système solaire auquel la terre appartient), le soleil n'est qu'une étoile (Fig II.1) parmi tant d'autres dans notre galaxie [24]. Le soleil est à l'origine de toute source d'énergie sur terre. Ceci étant vrai autant pour les énergies non renouvelables d'origine fossile, comme les hydrocarbures qui sont le résultat de la photosynthèse ; que pour les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire, l'énergie géothermique, la biomasse...etc. [25, 26].

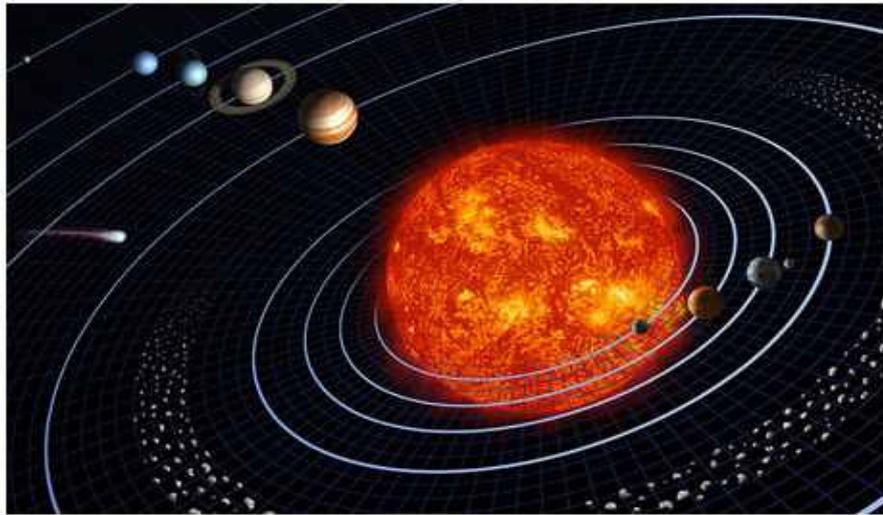


Figure II.1 : Image de l'étoile soleil du système solaire.

### II.2.1.1. La description du soleil

Comparable à une immense boule de gaz très chaude, le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique qui se compose principalement de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments chimiques, Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil. Les principales caractéristiques du soleil sont illustrées sur le tableau ci-dessous :

Tableau II.1: Caractéristiques principales du soleil.

Caractéristique	Valeur
Masse	$1.989 \times 10^3$ kg
Masse volumique moyenne	$1410 \text{ kg/m}^3$
Diamètre	$13.92 \times 10^5$ km
Distance du centre de la voie lactée	$2.5 \times 10^{47}$ km
Vitesse	217 km/s
Température superficielle	5770 k
Puissance rayonnée	$3.83 \times 10^{23}$ kW

## CHAPITRE II : Modèles Semi-empiriques pour l'Estimation de l'Ensoleillement Solaire

Sur la structure du soleil illustrée sur la figure (II.2), on distingue trois régions particulières [25,27, 28] :

- ❖ **L'intérieur du soleil** : cette région est divisée en trois zones ; le noyau, la zone radiative et la zone convective. Elle représente 40% de la masse du soleil et elle s'étend sur une épaisseur de 25104 km. Sa température atteint plusieurs millions de degrés et la pression un milliard d'atmosphère.
- ❖ **La photosphère** : C'est une couche opaque d'environ 300 km d'épaisseur. Sa température est de l'ordre de quelques millions de degrés, décroissante très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500°C.
- ❖ **La chromosphère et la couronne solaire** : C'est une région à faible densité où la matière est très diluée, elle représente l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible est très élevée (environ un million de degrés).

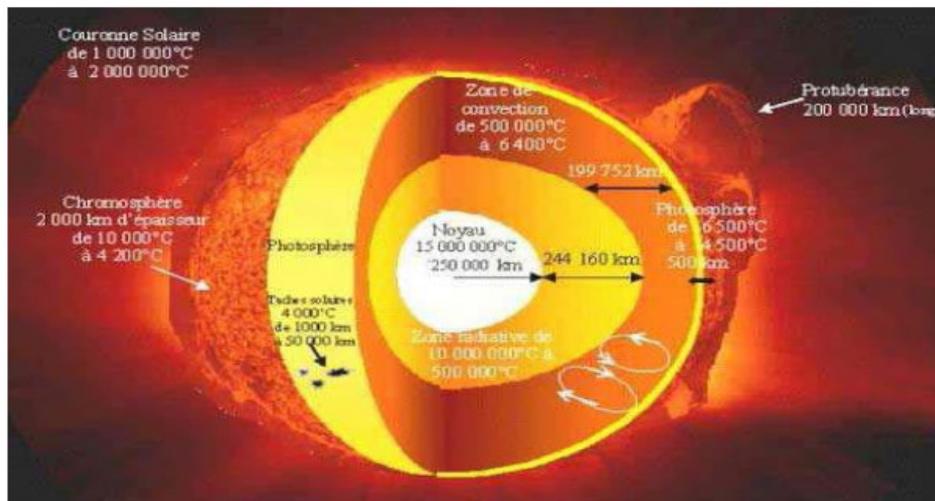


Figure II.2 : Structure de l'étoile soleil.

### II.2.1.2. Le mouvement de la terre autour du soleil

La terre décrit une ellipse dans son mouvement autour du soleil (Fig II.3). La révolution complète d'effectue en une période de 365.25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. L'axe des pôles et l'écliptique font entre eux un angle appelé déclinaison, il est égal à  $23^{\circ}27'$ .

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 21 juin la distance terre-soleil est de 152 millions de km, c'est le jour ou 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 équinoxes d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux.

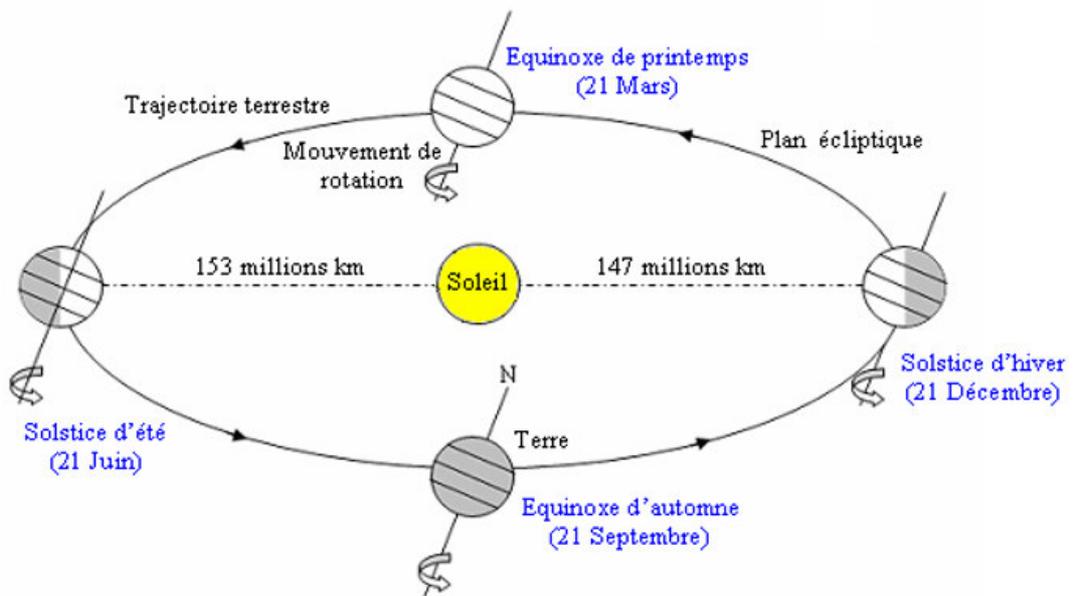


Figure II.3 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.

### II.2.1.3. Le mouvement apparent du soleil

Le mouvement que parait faire le Soleil en une journée vu par un observateur situé sur terre est appelé 'Le mouvement apparent du Soleil'. En dehors des régions polaires, de l'Equateur et des tropiques :

## CHAPITRE II : Modèles Semi-empiriques pour l'Estimation de l'Ensoleillement Solaire

- Le matin ; le Soleil est à l'Est, bas sur l'horizon, c'est le 'lever du Soleil'.
- A midi ; le Soleil est positionné au Sud ou au Nord, et il est au plus haut de son trajet apparent.
- Le soir ; le Soleil apparait à l'Ouest, bas sur l'horizon, c'est le 'coucher du Soleil'.

Le mouvement apparent du Soleil observé par un homme fixe en un point de latitude ( $L$ ) au Nord de l'Equateur est schématisé sur la figure (II.4). L'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu au midi solaire est égal à  $(L-d)$ . La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12 entre le 21 mars et le 21 septembre.

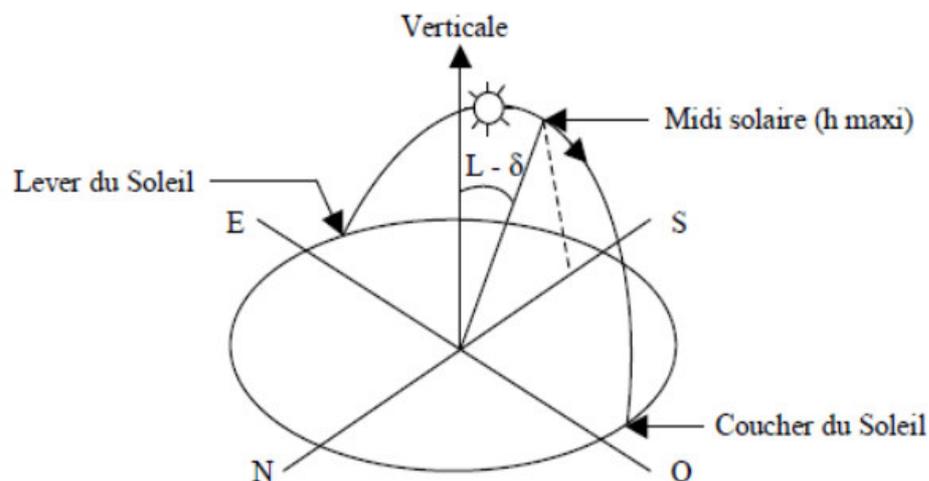


Figure II.4 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude ( $L$ ).

### II.2.1.4. La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère fictive d'un diamètre immense, qui a pour rayon la distance (terre-soleil). On admet que tous les objets visibles dans le ciel se situent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figure (II.5).

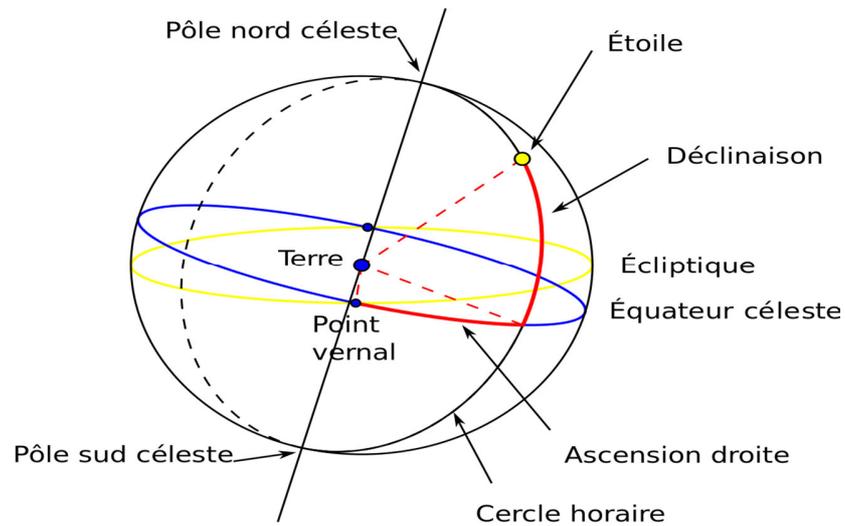


Figure II.5 : La sphère céleste.

La direction des objets peut être évaluée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes, qu'on fera l'objet de définir dans ce qui suit.

### II.2.1.5. Les coordonnées géographiques d'un site

Tout point de la surface terrestre est repérée par ses coordonnées géographiques : La longitude, la latitude, ainsi que par son altitude (voir fig II.6).

#### ➤ Longitude :

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^\circ$ ) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre  $-180^\circ$  et  $180^\circ$ . A tout écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'Ouest [29].

➤ **La latitude :**

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée en tant que latitude de  $0^\circ$ , le pôle Nord par la latitude  $+90^\circ$  et le pôle Sud par la latitude  $-90^\circ$ . Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) tous les lieux de l'hémisphère sud, elle peut ainsi être comprise entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$  [29].

➤ **L'altitude :**

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer) [29].

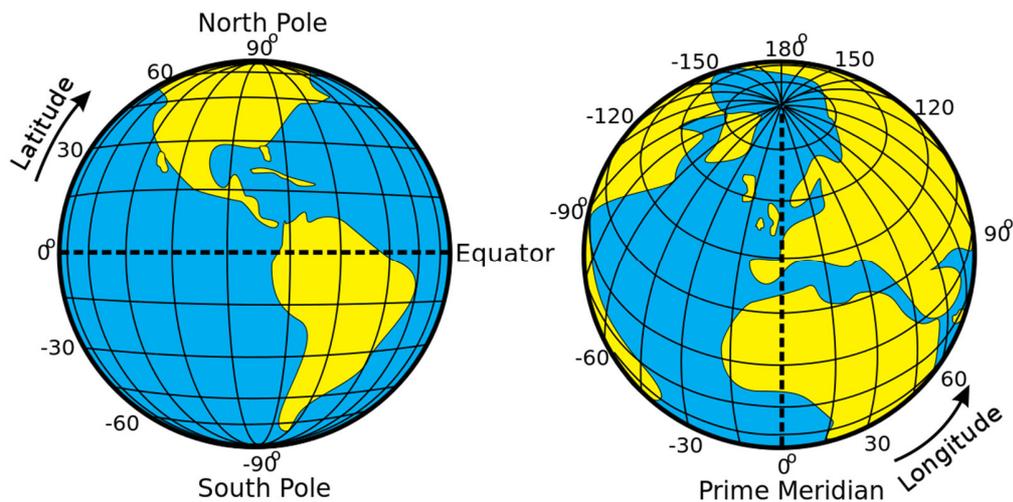


Figure II.6 : Les coordonnées terrestres.

## II.2.2. Les temps solaires

### II.2.2.1. Le temps solaire vrai (TSV)

En astronomie on appelle temps solaire vrai TSV en un lieu et à un instant donné, l'angle horaire du soleil en ce lieu et à cet instant. C'est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la terre et son mouvement de translation. Son introduction est naturelle, car il est lié à

l'alternance des jours et de nuits. La variation de la durée du jour solaire vrai (intervalle séparant deux midi consécutifs) est comprise entre : 23h 59m 39s et 24h 00m 30s.

### II.2.2.2. Le temps solaire moyen (TSM)

La rotation de la terre autour de l'axe des pôles introduit la notion de temps solaire moyen TSM. La journée solaire moyenne est le temps qui sépare, en moyenne, deux passages successifs du soleil au méridien d'un lieu, la journée solaire moyenne a une durée de : 1 jour = 24h 00m 00s.

### II.2.2.3. L'équation du temps (ET)

La vitesse de la terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année, la somme des l'inégalités du temps solaire vrai TSV porte le nom de équation de temps ET avec:  $ET = TSV - TSM$ . L'écart entre TSV et TSM varie selon la date, mais est nul en moyen. L'équation du temps est donnée en fonction du jour de l'année N avec une bonne précision par la formule suivante [23] :

$$ET = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot N') - 7.53 \cdot \cos(N') - 1.5 \cdot \sin(N') \quad (2.01)$$

$$\text{Avec : } N' = \frac{360}{365} \cdot (N - 81) \quad (2.02)$$

L'équation du temps peut atteindre 16 minutes (fin Octobre, début Novembre), la variation de l'équation du temps en fonction du jour de l'année est donnée sur la figure (II.7) :

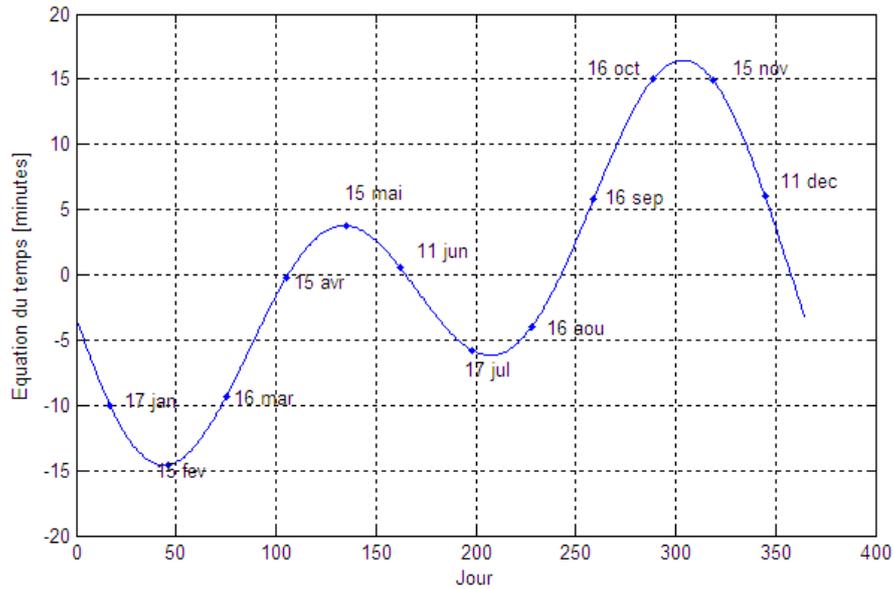


Fig. II.7: Variation de l'équation du temps en fonction du jour.

#### II.2.2.4. Le temps universel (TU)

Le temps universel est égal au temps solaire moyen du méridien origine (méridien de Greenwich). Il est exprimé ainsi [25] :

$$TU = TSM + \frac{L}{15} \quad (2.03)$$

Avec : L la longitude exprimée en degré et les temps en heure.

#### II.2.2.5. Temps légal (TL)

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

$$TL = TU + C_1 + C_2 \quad (2.04)$$

Ou :  $C_1$  est le décalage horaire par rapport au Greenwich,  $C_2$  correspond à l'heure d'été et d'hiver, s'il y a lieu.

### II.2.2.6. Le lever et coucher du soleil ( $h_l$ , $h_c$ )

L'angle horaire au lever et au coucher du soleil correspond à  $h = 0$ , elle peut être représenté par la formule (2.05) suivante :

$$\omega_l = \cos^{-1}[-\tan \delta \cdot \tan \varphi] \quad (2.05)$$

L'heure solaire au lever du Soleil est bien représentée par l'expression suivante :

$$(TSV)_l = h_l = 12 - \frac{\omega_l}{15} \quad (2.06)$$

L'angle horaire  $\omega_c$  au coucher du soleil est l'opposé de l'angle horaire au lever du soleil, on a donc  $\omega_c = -\omega_l$ , l'heure solaire au coucher du Soleil a donc pour valeur :

$$(TSV)_c = h_c = 12 - \frac{\omega_c}{15} = 12 + \frac{\omega_l}{15} \quad (2.07)$$

### II.2.2.7. La durée du jour ( $d_j$ )

La durée du jour est donnée par la relation suivante [30]:

$$d_j = (TSV)_c - (TSV)_l = 12 \cdot \frac{\omega_l}{15} \quad (2.08)$$

## II.2.3. Les coordonnées du soleil par rapport à un observateur

Pour déterminer les coordonnées du soleil par rapport à un observateur situé sur la surface de la terre on définit deux repères, le repère équatorial et le repère horizontal

### II.2.3.1. Le repère équatorial

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

#### a. La déclinaison du soleil ( $\delta$ )

La déclinaison du soleil  $\delta$  est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre [31], la déclinaison varie de  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver à  $+23^{\circ}27'$  au solstice d'été et

elle est nulle aux équinoxes [32]. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante utilisé par Capderou dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (ASA) :

$$\sin(\delta) = 0.398 \cdot \sin\left[\frac{360}{365} \cdot (N - 82) + 2 \cdot \sin\left\{\frac{360}{365} \cdot (N - 2)\right\}\right] \quad (2.09)$$

N est le jour Julian variant de 1 du premier Janvier à 365 (366) au 31 Décembre. La variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année est décrite sur la figure (II.08) :

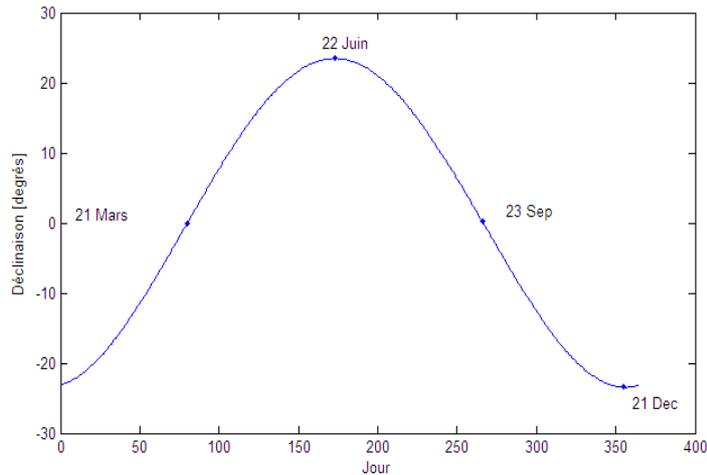


Fig. II.8: Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.

### b. L'angle horaire ( $\omega$ )

L'angle horaire  $\omega$  étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV [33], l'angle horaire s'exprime parfois en heures. Au midi solaire on a  $\omega = 0$ , ensuite chaque heure correspond à une variation de  $15^\circ$ , car la terre effectue un tour complet sur elle-même en 24h.  $\omega$  sera compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir [32]. L'angle horaire est donné par l'équation suivante :

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (2.10)$$

Pour calculer l'angle horaire, Capderou; dans l'ASA, a utilisé la formule suivante :

$$\omega = 15 \cdot (\text{TSV} - 12) \quad (2.11)$$

Le temps solaire vrai TSV est donné par l'équation (2.12), avec  $DE_{est}$  le décalage horaire, il est égale à 1 pour l'Algérie.

$$TSV = t - DE + (ET + 4 \cdot Long) / 60 \quad (2.12)$$

### II.2.3.2. Le repère horizontal

Dans les applications à énergies solaires, la connaissance des paramètres géométriques de la trajectoire du soleil est importante ; vu à partir d'un point fixe de la terre (Figure II.9), la position du soleil est déterminée en fonction de deux angles donnés en radian : l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu (hauteur angulaire  $\gamma_s$ ) et l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil (azimut  $\chi_s$ ) [34]. Le complément de  $\gamma_s$  ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelée angle zénithal  $\theta_z$ .

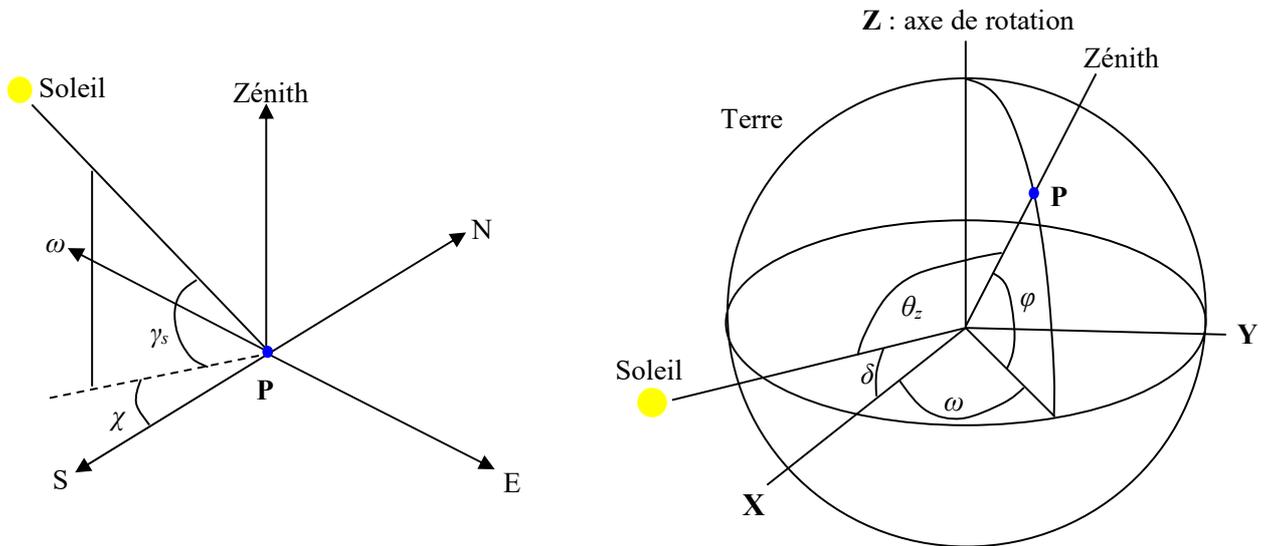


Fig. II.9: Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil).

#### a. La hauteur du soleil ( $\gamma_s$ )

La hauteur du soleil  $\gamma_s$  est l'angle que fait, le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur  $\gamma_s=0$  correspond au lever et au coucher du soleil, quand  $\gamma_s<0$  c'est la nuit et quand  $\gamma_s>0$  c'est le jour sur terre, la hauteur du soleil varie entre  $+90^\circ$  (zénith) et  $-90^\circ$  (nadir). La hauteur du soleil est bien représentée par une formule bien connue, qui avait été également adoptée par Capderou:

$$\sin(\gamma_s) = [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)] + [\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)] \quad (2.13)$$

La figure (II. 10) représente la variation de la hauteur  $\gamma_s$  à midi sur le site de Ghardaïa durant une année.

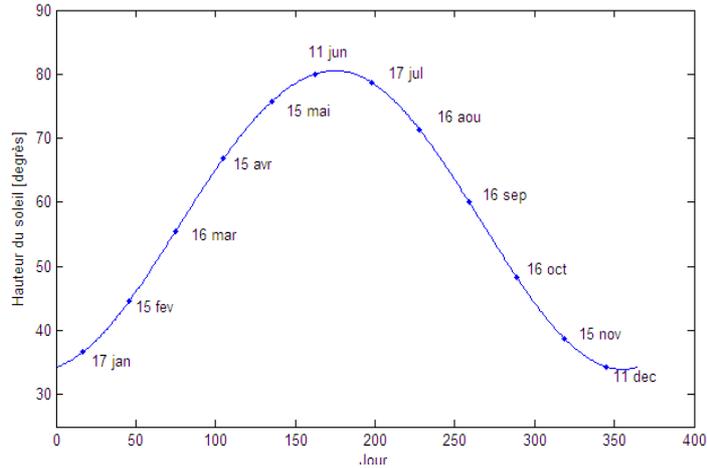


Fig II.10: Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.

### b. L'azimut du soleil ( $\chi_s$ )

L'azimut du soleil  $\chi_s$  est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut est compté positivement vers l'Ouest  $\chi_s > 0$  et négativement vers l'Est  $\chi_s < 0$ , à midi  $\chi_s = 0$ . L'azimut est compris entre  $-180 \leq \chi_s \leq 180^\circ$  [32]. L'azimut du soleil est représenté en fonction de la déclinaison solaire  $\delta$ , latitude du lieu  $\varphi$ , et de l'angle horaire  $\omega$  de la manière suivante :

$$\cos(\chi_s) = \frac{[\cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi)] - [\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi)]}{\cos(\gamma_s)} \quad (2.14)$$

La variation de l'azimut du soleil en fonction du temps pour les mois d'Avril, Juillet et Décembre sur le site de Ghardaïa est représentée sur la figure (II.11).

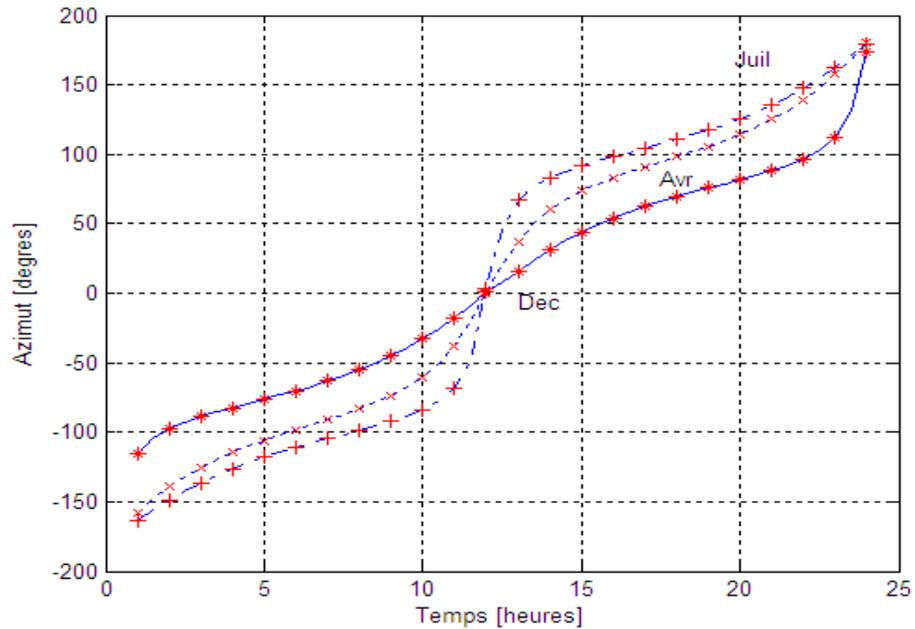


Fig II.11: Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.

### II.2.3.3. L'orientation d'un plan

Dans les applications solaires, le positionnement de la surface des dispositifs solaires (capteur plan par exemple) est essentiel. Deux angles sont importants à la définition d'un plan quelconque [27, 35] :

#### a. L'inclinaison du plan ( $\beta$ )

Correspond à l'angle que fait le plan du capteur avec l'horizontale (Fig II.12). Le calcul de l'angle d'inclinaison se fait en déduisant la déclinaison du soleil de la latitude géographique du lieu de l'emplacement du capteur. En général, il correspond à la latitude de l'emplacement plus ou moins 10 à 15°. Il est recommandé d'employer un angle d'inclinaison plus élevé à la latitude de 10 à 15 degrés durant les mois d'hiver lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel (position hivernale). Par contre, en été (position estivale), lorsque la trajectoire du soleil est plus haute dans le ciel, il faut employer un angle d'inclinaison moins élevé à la latitude de moins 10 à 15 degrés. Pour un captage annuel, l'angle d'inclinaison du capteur est fixé à la latitude de lieu.

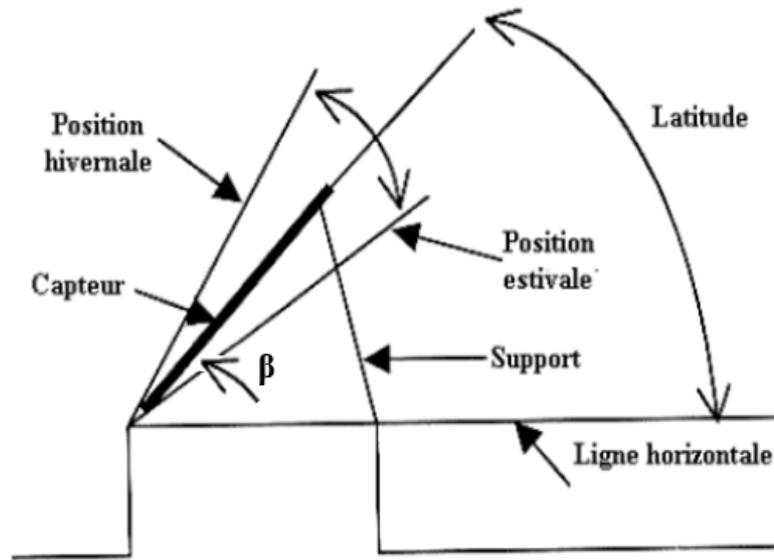


Fig II.12 : Angle d'inclinaison d'un capteur solaire.

**b. L'azimut du plan ou déviation azimutale ( $\alpha$ )**

Il est défini par l'angle que fait la projection de la normale du plan sur le plan horizontal et la direction du sud (Fig II.13). Idéalement, les dispositifs solaires sont orientés plein sud ( $\alpha = 0$ ) pour être exposés au maximum à la lumière solaire.

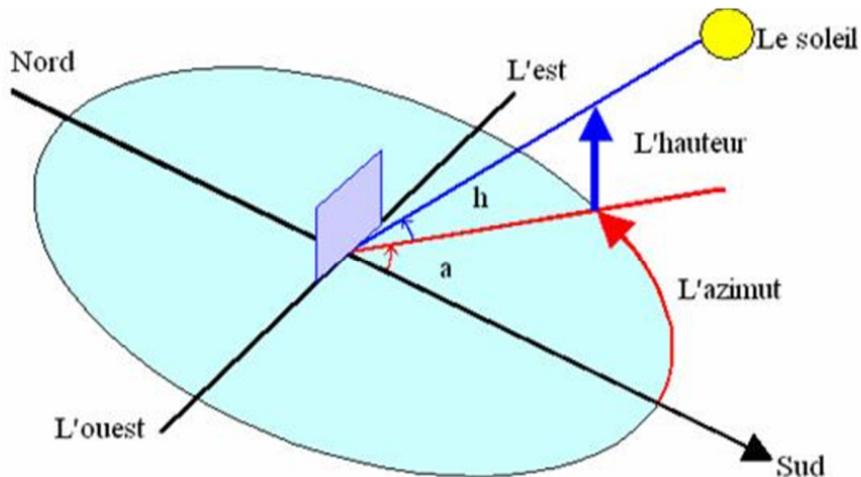


Fig. II -13 : Les angles caractérisant un capteur plan incliné.

## II.2.4. Paramètres de l'atmosphère

### II.2.4.1. Masse atmosphérique

On appelle masse d'air  $m_A$  la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer [34]. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. La masse atmosphérique relative est donnée par la relation, très simple :

$$m_A = 1 / \text{Sin}(\gamma_s) \quad (2.15)$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante (Fig II.14):

$$m_A = \frac{1}{\text{Sin}(\gamma_s) + [9.40 \cdot 10^{-4} \cdot \{\text{Sin}(\gamma_s) + 0.0678\}^{-1.253}]} \quad (2.16)$$

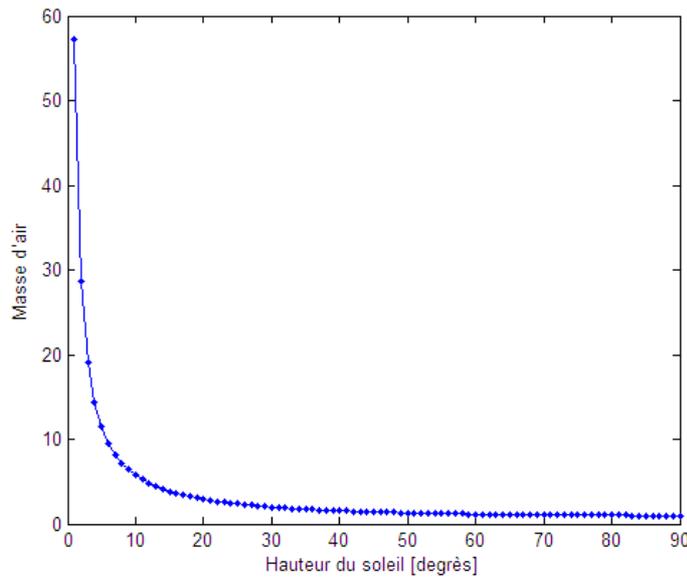


Fig II.14: Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil.

### II.2.4.2. Epaisseur optique de l'atmosphère

En 1922, Linke [36] définit l'épaisseur optique de Rayleigh  $\delta_R$  comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols. Kasten, en 1980 [37] utilisa les données spectrales publiées par Feussner et Dubois en 1930 [38] et proposa la formule (2.17) pour  $\delta_R$ , connue sous le nom de formule pyréliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte.

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \cdot m_A) \quad (2.17)$$

Dans cette formule utilisé depuis fort longtemps, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que : CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et le CO n'est prise en compte. Capderou dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, 'ASA', utilisa la formule pyréliométrique de Kasten pour calculer le rayonnement direct incident sur un plan par ciel clair (Fig II.15):. En 1986, Louche [39] ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4<sup>ième</sup> ordre pour la masse d'air.

$$(\delta_R)^{-1} = 6.5567 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (2.18)$$

Louche démontra que la formule (2.18) conduit à des valeurs grandes par rapport à ceux données par la formule d'origine de Kasten et plus particulièrement pour les petites valeurs de la masse d'air. Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour  $\delta_R$ .

$$(\delta_R)^{-1} = 6.6296 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (2.19)$$

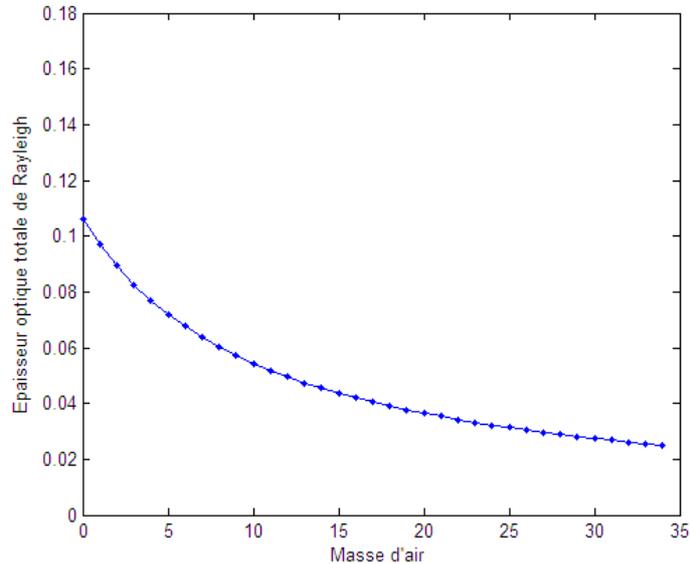


Fig II.15: Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.

### II.2.4.3. Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère

L'énergie solaire est atténuée par différents composants atmosphériques comme les molécules d'air, les aérosols, les gaz, les gouttelettes d'eau nuageuses ou les cristaux de glace en suspension dans l'atmosphère. Les molécules d'air diffusent le rayonnement (diffusion de Rayleigh), et absorbent une partie de ce rayonnement, alors que les particules d'aérosols diffusent principalement le rayonnement solaire à travers l'atmosphère.

Les propriétés de diffusion et d'absorption dépendent des compositions chimiques de l'atmosphère, des propriétés physiques des particules solides en suspension dans l'atmosphère et de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. La vapeur d'eau, l'ozone, le dioxyde de carbone et l'oxygène sont les importants gaz absorbants du rayonnement solaire. L'absorption de l'ozone se produit dans les domaines du visible et de l'ultraviolet du spectre solaire, alors que la grande partie de la bande d'absorption de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone se produit dans les domaines spectraux du proche infrarouge et rouge. Par ailleurs, l'oxygène se caractérise par de petites bandes d'absorption dans le spectre visible. On retrouve l'influence de ces composants atmosphériques sur la distribution spectrale du rayonnement solaire direct et diffus, comme on peut le constater sur la figure (II.16).

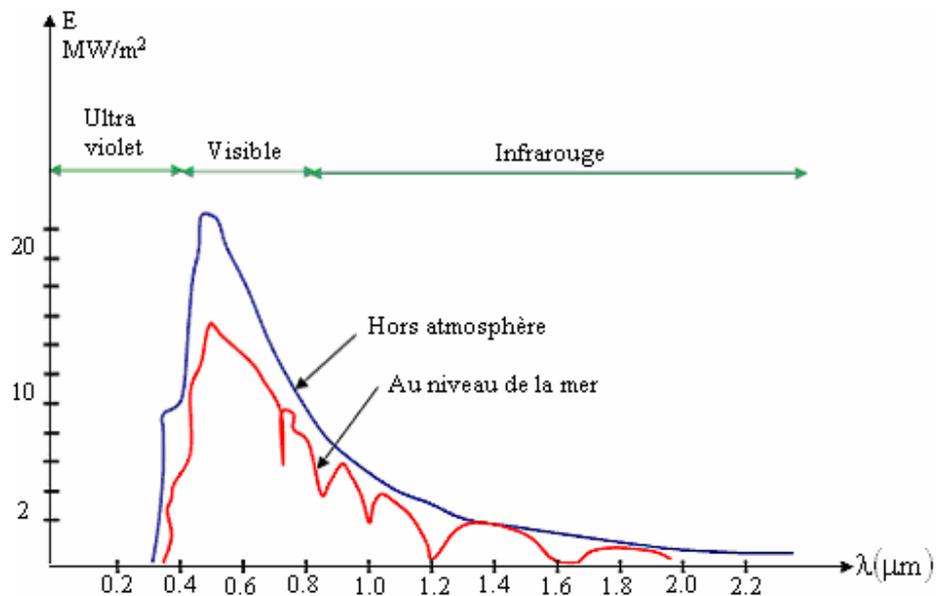


Fig II.16: Analyse spectrale du rayonnement solaire.

### II.2.5. Rayonnement solaire reçu au niveau du sol

L'énergie solaire représentée par la constante solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère subit une altération à sa traversée de l'atmosphère, seulement une partie de cette énergie arrive au sol sous différentes formes. Ainsi, on définit :

#### II.2.5.1. La composante directe

C'est la fraction du rayonnement solaire qui arrive directement au sol (IB), dont le trajet est 'linéaire' (avec une légère déviation) et unique à un instant donné [40].

#### II.2.5.2. La composante diffuse

Le rayonnement diffus (ID) est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Ainsi, par ciel clair, il constitue 20% de l'énergie globale. Par ciel couvert, il correspond à la totalité de l'énergie reçue au sol [29].

#### II.2.5.3. L'albédo du sol (le rayonnement réfléchi)

Le rayonnement solaire réfléchi est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol  $\rho$ , et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige). Une simple formule représentant l'albédo du sol peut être défini comme suit :

$$\text{Albédo } (\rho) = \frac{\text{Energie réfléchie}}{\text{Energie reçue}} \quad (2.20)$$

Sur le tableau II.2 on donne quelques valeurs de l'albédo suivant la surface du sol :

Tableau II.2 Valeurs d'albédo selon différents types de sol.

Surfaces du sol	Albédo
Surface d'eau	0.01 à 0.1
Forêt	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1 à 0.3

Sol nul	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5 à 0.7
Neige fraiche	0.8 à 0.95

#### II.2.5.4. Le rayonnement global

- ❖ Sur une surface horizontale ( $IG_h$ ) : C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus [40].
- ❖ Sur une surface inclinée ( $IG_i$ ) : Rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements : direct, diffus et réfléchi (voir fig II.17).

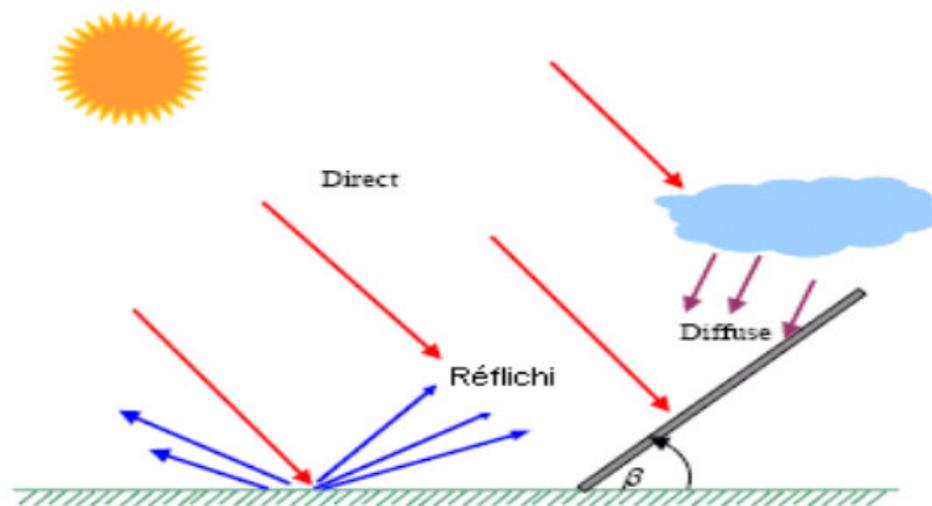


Fig II.17: Les trois composantes du rayonnement solaire incident sur un plan incliné.

#### II.2.6. Mesure du rayonnement solaire

Les instruments de mesure du rayonnement solaire peuvent être classés en trois catégories [41] :

- L'héliographe : Est un instrument enregistrant la durée pendant laquelle le rayonnement solaire est d'une intensité suffisante pour produire des ombres distinctes.

- Le pyranomètre : Est un radiomètre pour la mesure du rayonnement dans un plan, le rayonnement incident étant issu de l'ensemble de l'hémisphère situé au-dessus de l'instrument.
- Le pyréliomètre : Est un radiomètre muni d'un collimateur, pour la mesure du rayonnement solaire direct sous incidence normale.

### II.2.6.1. Mesure du rayonnement direct (le Pyréliomètre)

Mesure de l'éclairement énergétique direct (Fig II.18) : Rayonnement solaire provenant de l'angle solide limité au disque solaire parvenant sur une surface unité perpendiculaire à l'axe de cet angle solide. L'élément sensible (thermopile) du pyréliomètre est constitué de thermocouples montés en série, exposés au rayonnement solaire et dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction. Il délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident. La géométrie de l'appareil limite le rayonnement incident au rayonnement solaire direct et au rayonnement provenant du ciel circumsolaire.

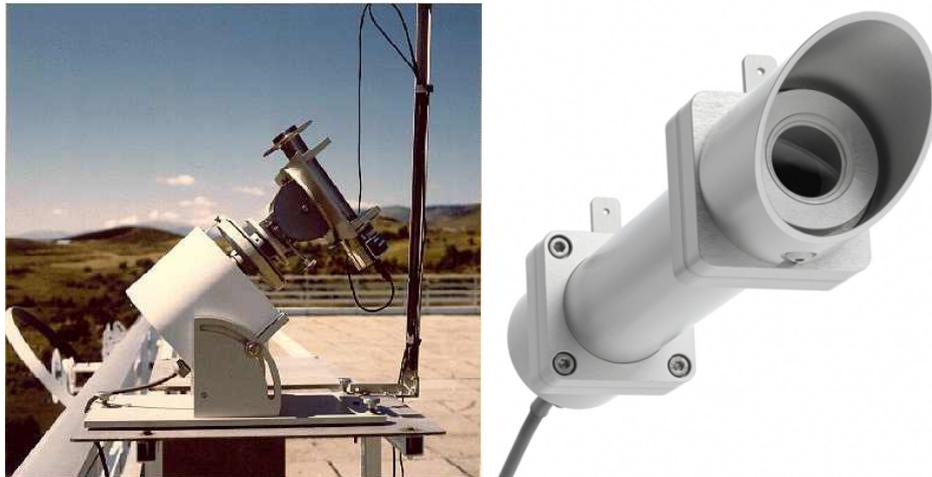


Fig II.18: Pyréliomètre pour la mesure de l'éclairement direct normal.

### II.2.6.2. Mesure du rayonnement diffus et global (le Pyranomètre)

Les mesures effectuées par un pyranomètre (Fig II.19) sont :

- ❖ La mesure de l'éclairement énergétique global ;
- ❖ La mesure de l'éclairement énergétique diffus par adjonction d'un dispositif d'occultation du disque solaire.

L'élément sensible (thermopile) du pyranomètre est une série de thermocouples exposés au rayonnement solaire, dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction et qui délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident. Un pare-soleil constitué par une bande circulaire centrée sur la thermopile et parallèle au plan équatorial, occulte le pyranomètre du rayonnement solaire direct pour permettre la mesure du rayonnement solaire diffus.



Fig II.19: Pyranomètre pour la mesure du rayonnement global et diffus.

### II.2.6.3. Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe)

L'insolation est définie comme l'intervalle de temps durant lequel le disque solaire a été visible ou durant lequel on a pu observer des ombres portées sur le sol. Elle est également définie comme la durée pendant laquelle le rayonnement direct est demeuré supérieur à une valeur internationalement admise :  $120 \text{ W/m}^2$ .

Mesure effectuée par un Héliographe (Fig II.20) : enregistrement de l'insolation en centième d'heure, la durée d'insolation est mesurée à l'aide d'héliographes en dixièmes d'heures. On distingue les héliographes classiques et automatiques.



Fig II.20: Héliographe pour la mesure de l'insolation.

### II.3. Aspects énergétiques du rayonnement solaire

Les réactions thermonucléaires engendrées au cœur du soleil produisant des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se répandant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de 3108 m/s et englobant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Quoique, 99.9 % de l'énergie se situe entre 0.2 et 8  $\mu\text{m}$  [42].

On pourra admettre avec une estimation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir avec une température de 5762 k dite température apparente du soleil, ce qui ne correspond pas à la réalité physique [30]. La distribution de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est récapitulée dans le tableau (II.3) suivant :

Tableau II.3 : Répartition spectrale du rayonnement thermique [43].

Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	87	656	623

## II.4. Modélisation du rayonnement solaire par le modèle de CAPDEROU

### II.4.1. Facteur de trouble de Linke

Le rayonnement solaire est atténué en traversant l'atmosphère terrestre par la diffusion des aérosols, les nuages et l'absorption par les différents composants atmosphériques, tel que : l'ozone, la vapeur d'eau, l'oxygène...etc., il est connu qu'en jour clair les aérosols sont la principale cause de l'extinction de l'irradiation solaire. Ces dernières années la plupart des scientifiques et chercheurs ont prouvés que les activités humaines jouent un rôle très important dans l'augmentation des aérosols [44, 45]. La quantité des aérosols dans l'atmosphère peut être représentée par les coefficients de troubles, la détermination de troubles atmosphérique à une grande importance dans la modélisation du rayonnement solaire utilisé dans le dimensionnement des systèmes énergétiques solaire. En effet la plupart des modèles de rayonnement solaire font appel à la détermination de ces facteurs tels que le facteur de Linke ( $T_L$ ) [36].

En 1987 Capderou [23] ; dans l'Atlas Solaire (ASA.), proposa un modèle pour calculer le facteur de Linke en Algérie par ciel clair. Le coefficient de trouble atmosphérique total  $T_L$  a été décomposé en trois facteurs de trouble auxiliaires : le trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau  $T_0$ , le trouble du à la diffusion moléculaire de Rayleigh  $T_1$  et le trouble relatif à la diffusion par les aérosols  $T_2$ .

#### II.4.1.1. Absorption par la vapeur d'eau

Le trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau  $T_0$  donnée par la formule suivante :

$$T_0 = \{2.4 - 0.9 \cdot \sin(\varphi)\} + 0.1 \cdot \{2 + \sin(\varphi)\} - (0.2 \cdot Alt) - [(1.22 + 0.14 \cdot A_{he}) \cdot \{1 - \sin(\gamma_s)\}] \quad (2.21)$$

Avec :  $A_{he}$  est l'alternance hiver été donnée par :

$$A_{he} = \sin\left[\frac{360}{365} \cdot (N - 121)\right] \quad (2.22)$$

#### II.4.1.2. Absorption par les gaz et diffusion de Rayleigh

Le trouble du à la diffusion moléculaire de Rayleigh  $T_1$ , donnée par la formule suivante :

$$T_1 = (0.89)^{Alt} \quad (2.23)$$

Alt est l'altitude en km.

### II.4.1.3. Diffusion par les aérosols

Le trouble relatif à la diffusion par les aérosols  $T_2$ , donnée par la formule suivante :

$$T_2 = [0.9 + (0.4 \cdot A_{he})] \cdot (0.63)^{Alt} \quad (2.24)$$

## II.4.2. Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal par ciel clair

### II.4.2.1. Constante solaire

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère, sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée 'la constante solaire'. La constante solaire a été estimée à  $I_0=1367$  W/m<sup>2</sup> par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse), essentiellement d'après des résultats de mesures faites entre 1969 et 1980 [46].

### II.4.2.2. Eclairement hors atmosphère

En dehors de l'atmosphère le rayonnement solaire est d'intensité  $I_0=1367$  W/m<sup>2</sup>. Une surface exposée au soleil ne peut recevoir cette valeur d'intensité que si elle est placée perpendiculairement à la direction du rayonnement, n'importe quel écartement à cette orientation conduit à une réduction du rayonnement incident. Dans le cas d'un plan horizontal situé en dehors de l'atmosphère, le rayonnement est décrit comme : rayonnement solaire extraterrestre horizontal (Fig. II.21).

Le rayonnement solaire extraterrestre  $G_0$  ; fonction de la constante solaire et de la correction de distance entre la terre et le soleil, est donné par l'équation (II.25) [47].

$$G_0 = I_0 \cdot \varepsilon \quad (2.25)$$

$\varepsilon$  : est la correction de distance terre soleil est donnée par M. Capderou par l'équation (II.26) :

$$\varepsilon = 1 + 0.034 \cdot \cos\left[\frac{360}{365} \cdot (N - 2)\right] \quad (2.26)$$

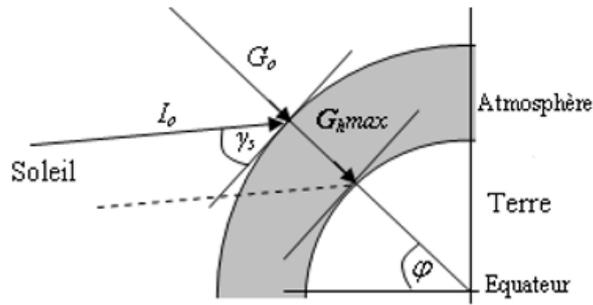


Fig II.21: Rayonnement solaire hors atmosphère.

### II.4.2.3. Eclairage global incident sur un plan horizontal

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (ASA) [23], Capderou; donna un modèle mathématique pour calculer le rayonnement incident direct et diffus incident sur un plan horizontal, il reste le modèle le plus utilisé en Algérie. Selon ce modèle le rayonnement global modélisé par Capderou est la somme du rayonnement direct et diffus.

### II.4.2.4. Eclairage direct incident sur un plan horizontal

Pour le rayonnement direct, Capderou utilisa la formule (II.16) pour la masse d'air  $m_A$  et la formule (II.17) pour l'épaisseur totale de l'atmosphère  $\delta_R$  et donna l'équation (II.27) qui permet de calculer le rayonnement direct incident sur un plan horizontal  $IB_h$  fonction de la hauteur du soleil  $\gamma_s$  et du facteur de trouble total de Linke  $T_L$  :

$$IB_h = G_o \cdot \sin(\gamma_s) \cdot \exp\left(-T_L \cdot \left\{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^{Alt}} \cdot \sin(\gamma_s)\right\}\right) \quad (2.27)$$

### II.4.2.5. Eclairage diffus incident sur un plan horizontal

Pour calculer le rayonnement diffus  $ID_h$ , Capderou utilisa le facteur de trouble diffusif  $T'_L$  et donna ; en 1987, une l'équation (II.28) fonction de la hauteur du soleil  $\gamma_s$  :

$$ID_h = G_o \cdot \exp\left[-1 + 1.06 \cdot \log\{\sin(\gamma_s)\} + a - \sqrt{b^2 + a^2}\right] \quad (2.28)$$

$$\text{Avec : } a = 1.1 \quad (2.29)$$

$$b = \log(T_L') - 2.80 + 1.02 \cdot [1 - \sin(\gamma_s)]^2 \quad (2.30)$$

### II.4.3. Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque par ciel clair

#### II.4.3.1. Angle d'incidence

L'angle d'incidence  $\delta^{\text{inc}}$  est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré, elle est définie par l'inclinaison du plan  $\beta$  et l'Azimut de la normal du plan  $\alpha$  (orientation du plan),  $\alpha$  est compté dans le sens rétrograde ( $\alpha < 0$  vers l'Est,  $\alpha > 0$  vers l'Ouest)

M. Capderou utilise la hauteur de la normal du plan  $\gamma$  pour calculer  $\cos(\delta^{\text{inc}})$  de l'angle d'incidence,  $\gamma$  est positive pour les plans tournés vers le haut et négative pour les plans tournés vers le bas, donc c'est les angles  $\alpha$  et  $\gamma$  qui déterminent la position du plan. L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donné par Capderou par les formules suivantes (p.68) :

$$\cos(\delta^{\text{inc}}) = [a' \cdot \sin(\omega)] + [b' \cdot \cos(\omega)] + c' \quad (2.31)$$

$$\text{Avec : } a' = \cos(\delta) \cdot [\sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma)] \quad (2.32)$$

$$b' = \cos(\delta) \cdot [\{\cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\varphi)\} + \{\sin(\gamma) \cdot \cos(\varphi)\}] \quad (2.33)$$

$$c' = \sin(\delta) \cdot [\{-\cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\varphi)\} + \{\sin(\gamma) \cdot \sin(\varphi)\}] \quad (2.34)$$

$$\text{Où : } \beta = 90 - \gamma \quad (2.35)$$

Les variations de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire pour une déclinaison de  $20^\circ$  à un lieu de latitude  $30^\circ$ , pour différentes valeurs de hauteur du plan  $\gamma$  sont représentées sur la figure (2.22) :

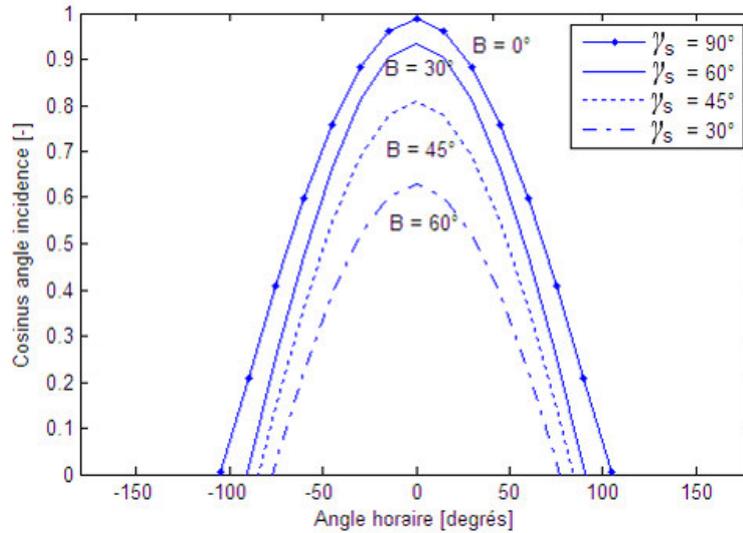


Fig II.22: Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.

#### II.4.3.2. Eclairage incident sur un plan quelconque

Pour un plan quelconque ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), l'éclairage global est estimé par la détermination de l'éclairage direct et diffus de la manière suivante :

#### II.4.3.4. Eclairage direct incident sur le plan quelconque

Capderou utilisa l'angle d'incidence donnée par l'équation (2.31) pour calculer l'éclairage direct à l'aide de l'équation suivante :

$$IB_i = IN \cdot \text{Cos}(\delta^{\text{inc}}) \quad (2.36)$$

Avec :

$$IN = G_o \cdot \exp\left(-T_L / \left\{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^{\text{Alt}}} \cdot \text{Sin}(\gamma_s)\right\}\right) \quad (2.37)$$

#### II.4.3.5. Eclairage diffus incident sur le plan quelconque

L'éclairage diffus est lui-même décomposé en deux parties : l'éclairage diffus provenant du ciel et l'éclairage diffus provenant du sol :

**a. Le rayonnement diffus de la part du sol**

La composante du diffus isotrope du sol est donnée par l'équation (2.38) en fonction de  $\delta^a$  qui est la composante due à l'albédo :

$$ID_i^a = \delta^a \cdot \left[ \frac{1 - \text{Sin}(\chi_s)}{2} \right] \quad (2.38)$$

Avec :  $\delta^a = \rho \cdot IB_h$  (2.39)

**b. Le rayonnement diffus de la part du ciel**

Pour un plan  $(\alpha, \beta)$ , l'éclairement diffus incident en provenance du ciel est décomposé en trois parties : le diffus isotrope du ciel, le diffus directionnel et le diffus du cercle de l'horizon.

➤ **Le diffus isotrope du ciel**

Le diffus isotrope du ciel est donné par la formule suivante :

$$ID_i^i = (\delta^i + \delta^{i'}) \cdot \left[ \frac{1 + \text{Sin}(\chi_s)}{2} \right] \quad (2.40)$$

Avec :  $\delta^i = ID_h - [\delta^d \cdot \text{Sin}(\gamma_s)]$  (2.41)

$\delta^d$  est la composante isotrope, elle correspond à un ciel de luminance uniforme.

Puisque le diffus du sol est rétrodiffusé, c'est-à-dire qu'une partie est diffusée à nouveau par le ciel vers le sol, Capderou a ajouté une composante  $\delta^{i'}$  :

Avec :  $\delta^{i'} = [0.9 \cdot (\rho_g - 0.2)] \cdot IB_h \cdot \exp\left(-4 / \sqrt{T_L}\right)$  (2.42)

➤ **Le diffus directionnel**

Le diffus directionnel est donné en fonction de  $\delta^d$  par la formule suivante :

$$ID_i^d = \delta_d \cdot \text{Cos}(\delta^{inc}) \quad (2.43)$$

$\delta^d$  est la composante directe ou circumsolaire, elle provient du voisinage du soleil, dans un cône de demi angle. La formule donnant la composante du diffus directionnel est représentée par l'équation suivante :

$$\delta^d = G_o \cdot \exp\left\{-2.48 - \text{Sin}(\gamma_s)\right\} + \left\{a_1 - \sqrt{4 \cdot b_1^2 + a_1^2}\right\} \quad (2.44)$$

$$\text{Avec : } b_1 = \log(T_L') - 2.28 - 0.5 \cdot \log[\text{Sin}(\gamma_s)] \quad (2.45)$$

$$a_1 = 3.1 - 0.4 \cdot b_1 \quad (2.46)$$

### ➤ Le diffus du cercle de l'horizon

Le diffus du cercle de l'horizon est donné par la formule suivante :

$$ID_i^h = \delta^h \cdot \text{Cos}(\chi_s) \quad (2.47)$$

$\delta^h$ : composante du cercle de l'horizon, elle provient du cercle de l'horizon d'une hauteur de  $6^\circ$ , elle semble associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques.

La formule donnant la composante  $\delta^h$  est représentée par l'équation suivante :

$$\delta^h = G_o \cdot \frac{-0.02 \cdot a_2}{a_2^2 + a_2 \cdot b_2 + 1.8} \cdot [\exp\{\text{Sin}(\gamma_s)\}] \quad (2.48)$$

$$\text{Avec : } b_2 = \exp[0.2 + 1.75 \cdot \log\{\text{Sin}(\gamma_s)\}] \quad (2.49)$$

$$a_2 = \log(T_L') - 3.1 - \log\{\text{Sin}(\gamma_s)\} \quad (2.50)$$

Donc le diffus du ciel est exprimé d'une manière générale par l'équation suivante :

$$ID_i^{\text{ciel}} = \left[ (\delta^i + \delta^{i'}) \cdot \frac{1 + \text{Sin}(\chi_s)}{2} \right] + [\delta^d \cdot \text{Cos}(\delta^{\text{inc}})] + [\delta^h \cdot \text{Cos}(\chi_s)] \quad (2.51)$$

Finalement, l'éclairement diffus total s'écrit sous la forme de quatre composantes :

$$ID_i = ID_i^i + ID_i^d + ID_i^h + ID_i^a \quad (2.52)$$

### II.4.3.6. Calcul du rayonnement global

M. Capderou dans l'ASA [23], comme déjà présenté ; proposa un modèle pour calculer le rayonnement solaire incident sur un plan quelconque ( $\alpha, \beta$ ), le rayonnement global  $IG_i$  est la somme des deux composantes directe  $IB_i$  et diffuse  $ID_i$ .

## II.5. Modélisation du rayonnement solaire par le modèle de Kasten

### II.5.1. Paramètres géométriques et atmosphérique

Dans cette partie nous présentons les équations nécessaires pour la modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal et incliné utilisées par le modèle de Kasten [25] :

#### ➤ La déclinaison solaire

La déclinaison  $\delta_{(k)}$  solaire est définie, suivant le modèle de Kasten ; par la formule :

$$\delta_{(k)} = 23.45 \cdot \sin\left[\frac{360}{365} \cdot (N - 81)\right] \quad (2.53)$$

#### ➤ L'angle horaire

$\omega_{(k)}$  est l'angle horaire, il est calculé avec l'équation suivante :

$$\omega_{(k)} = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (2.54)$$

#### ➤ La hauteur du soleil

$\gamma_{s(k)}$  est la hauteur angulaire du soleil, il est donne par l'équation suivante :

$$\sin(\gamma_{s(k)}) = [\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta_{(k)})] + [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta_{(k)}) \cdot \cos(\omega_{(k)})] \quad (2.55)$$

#### ➤ L'azimut du soleil

$\chi_{s(k)}$  est l'azimut angulaire du soleil, il est donne par l'équation suivante :

$$\cos(\chi_{s(k)}) = \frac{[\sin(\gamma_{s(k)}) \cdot \sin(\varphi)] - \sin(\delta_{(k)})}{[\cos(\gamma_{s(k)}) \cdot \cos(\delta_{(k)})]} \quad (2.56)$$

➤ **Masse atmosphérique**

Le trajet optique atmosphérique  $m_{A(k)}$ , est définie à partir de l'unité d'épaisseur atmosphérique prise verticalement au niveau de la mer, qui est fonction de l'altitude du lieu Alt (Km) et la hauteur du soleil  $\gamma_{s(k)}$ , est calculé par l'équation suivante :

$$m_{A(k)} = \frac{1 - 0.1 \cdot \text{Alt}}{\text{Sin}(\gamma_{s(k)}) + 0.15 \cdot (\gamma_{s(k)} + 3.885)^{-1.253}} \quad (2.57)$$

Pour des hauteurs de soleil faibles (inférieures à 10 ou 15°), le deuxième terme du dénominateur peut être considéré comme nul et la formule précédente s'écrit de la manière suivante :

$$m_{A(k)} = \frac{1 - 0.1 \cdot \text{Alt}}{\text{Sin}(\gamma_{s(k)})} \quad (2.58)$$

➤ **Le facteur du trouble de Linke**

Le facteur du trouble atmosphérique  $T_{L(k)}$  est calculé par l'équation suivante :

$$T_{L(k)} = 2.5 + 16 \cdot \beta_A + 0.5 \cdot \ln(w_v) \quad (2.59)$$

Où  $\beta_A$  est le coefficient d'angstrom et  $w_v$  est la hauteur d'eau condensable. Les valeurs de ces deux paramètres, qui tiennent compte de la nature du ciel.

Tableau II.4 : Paramètres pour le calcul du facteur du trouble.

Etat du ciel	$\beta_A$ [-]	$w_v$ (cm)
Ciel pur	0.05	1
Ciel moyen	0.1	2
Ciel dégradé	0.2	5

## II.5.2. Eclairage incident sur un plan horizontal

### ➤ Le rayonnement global sur plan horizontal

Le rayonnement global  $IG_{h(k)}$  que reçoit une surface horizontale est la somme de deux composantes qui sont le rayonnement direct  $IB_{h(k)}$  et le rayonnement diffus  $ID_{h(k)}$ , il est donné par l'équation suivante :

$$IG_{h(k)} = (1270 - 56 \cdot T_{L(k)}) \cdot \left\{ \sqrt{\text{Sin}(\gamma_{s(k)})} \right\}^{kk} \quad (2.60)$$

$$\text{Avec: } kk = (T_L + 36) / 33 \quad (2.61)$$

### ➤ Le rayonnement direct sur plan horizontal

Les composantes, directe  $IB_{h(k)}$  et diffuse  $ID_{h(k)}$  peuvent être également calculées séparément à l'aide des équations suivantes :

$$IB_{h(k)} = IN_{(k)} \cdot \text{Sin}(\gamma_{s(k)}) \quad (2.62)$$

$IN_{(k)}$  est le rayonnement solaire reçu sur terre qui est une fonction du rayonnement solaire hors atmosphère qui est égale à la constante solaire  $I_{o(k)}$  multipliée par un facteur correctif qui tient compte de l'ellipticité de la trajectoire de la terre autour du soleil.

$$IN_{(k)} = G_{O(k)} \cdot \exp\left(-m_{A(k)} \cdot T_{L(k)} / 0.9 + m_{A(k)} + 9.4\right) \quad (2.63)$$

$G_{O(k)}$  : est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire, elle est donnée par :

$$G_{O(k)} = I_{O(k)} \cdot (1 - \text{Sin}(\delta_{(k)}) / 11.7) \quad (2.64)$$

$I_{o(k)} = 1353 \text{ W/m}^2$  : est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue.

### ➤ Le rayonnement diffus sur plan horizontal

Le rayonnement diffus est calculé à partir de l'équation suivante :

$$ID_{h(k)} = \frac{G_{O(k)}}{25} \cdot \sqrt{\sin(\gamma_{s(k)})} \cdot [T_L - 0.5 - \sqrt{\sin(\gamma_{s(k)})}] \quad (2.65)$$

### II.5.3. Eclaircissement incident sur un plan quelconque

Un plan incliné est caractérisé par son inclinaison  $\beta$  (par rapport à l'horizontale) et son orientation  $\alpha$  (ou déviation par rapport à azimut  $\chi_{s(k)}$ , le Sud) comme illustré sur les figures 1 et 2, qui représentent, respectivement, La position du soleil relative aux surface incliné et les angles intervenant dans le calcul de l'éclairciment incident sur un plan incliné :

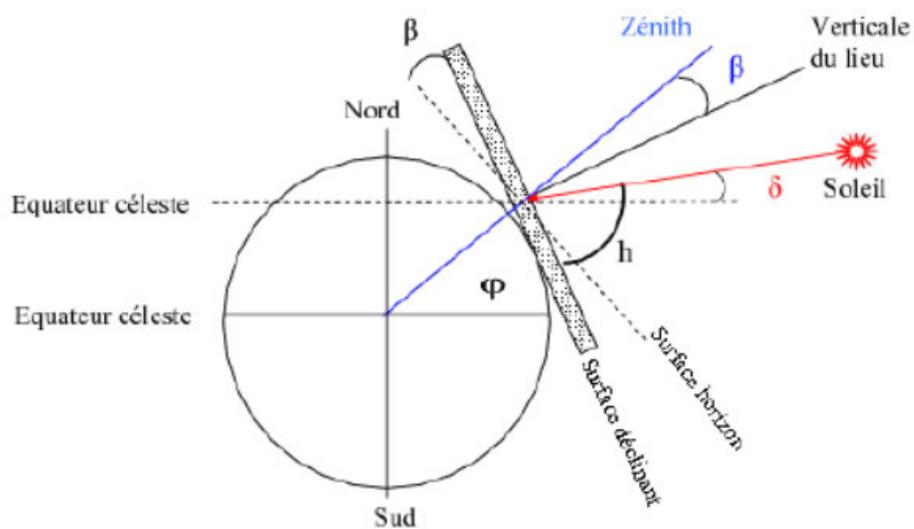


Fig II.23: Position du soleil relative aux surfaces inclinées.

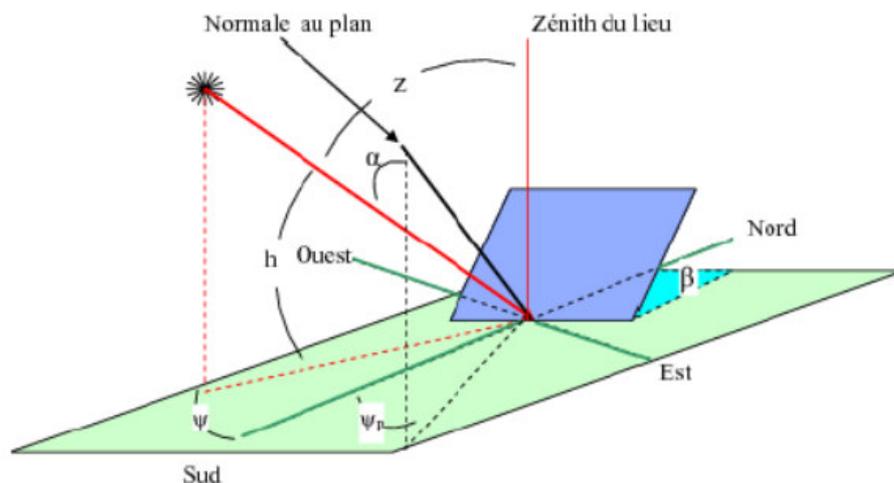


Fig II.24: Définition des angles pour un plan incliné.

➤ **L'angle d'incidence**

L'angle d'incidence  $\delta_{(k)}^{inc}$  est l'angle formé entre la normale du plan et les rayons du soleil. On parle souvent d'incidence normale lorsque  $\delta_{(k)}^{inc} = 0$ , c'est-à-dire les rayons sont perpendiculaires au capteur. L'angle d'incidence, utilisé par le modèle de Kasten ; s'écrit, en fonction de la position du soleil ( $\gamma_{s(k)}, \chi_{s(k)}$ ) comme suit :

$$\text{Cos}(\delta_{(k)}^{inc}) = \text{Sin}[(\beta) \cdot \text{Cos}(\gamma_{s(k)}) \cdot \text{Cos}(\chi_{s(k)} - \alpha)] + [\text{Cos}(\beta) \cdot \text{Sin}(\gamma_{s(k)})] \quad (2.66)$$

➤ **Le rayonnement global sur plan incliné**

Pour un plan d'inclinaison  $\beta$  et d'orientation  $\alpha$ , les formules des rayonnements, direct  $IB_{i(k)}$  et diffus  $ID_{i(k)}$  prennent les formes suivantes :

➤ **Le rayonnement direct sur plan incliné**

$$IB_{i(k)} = IN_{(k)} \cdot \text{Cos}(\delta_{(k)}^{inc}) \quad (2.67)$$

$\delta_{(k)}^{inc}$  est l'angle d'incidence des rayons solaires comme illustré précédemment.

➤ **Le rayonnement diffus sur plan incliné**

$$ID_{i(k)} = \left( \frac{1 + \text{Cos}(\beta)}{2} \right) \cdot ID_{h(k)} \text{ x } \left( \frac{1 - \text{Cos}(\beta)}{2} \right) \cdot \rho \cdot G_{O(k)} \quad (2.68)$$

Où  $\rho$  est l'albédo du lieu considéré.

Le flux diffus reçu par la surface du capteur, comprend deux composantes : une émise par la voûte céleste qui atteint le capteur (premier terme de l'équation précédente), et l'autre en provenance du sol que reçoit le capteur (deuxième terme).

### II.6. Conclusion

Le rayonnement solaire est l'élément de base dans la conversion d'énergie rayonnée en énergie thermique, la mesure de ce paramètre se fait avec des éléments très développés et précis, les plus connus sont le pyranomètre et pyrhéliomètre que nous avons présentés dans ce chapitre.

Dans ce deuxième chapitre une modélisation du rayonnement solaire par le modèle Capderou et Kasten est présentée et réalisée, les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes du rayonnement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné sont programmées avec Matlab et leur variation est illustrée sous formes graphiques. Les deux modèles utilisent des équations propres pour déterminer les paramètres géométriques (déclinaison solaire, angle horaire, hauteur du soleil, azimuth et angle d'incidence) et les paramètres atmosphériques (masse, épaisseur optique de l'atmosphère et facteur de trouble) nécessaires pour le calcul du rayonnement solaire pour chaque modèle, ces équations ont été également programmées et représentées graphiquement.

Dans le prochain chapitre une confrontation des valeurs de l'éclairement solaires mesurées et des valeurs estimées par les deux modèles sera élaborée dans un but de validations des programmes.

---

## **CHAPITRE III**

# **Résultats et discussion**

### III.1. Introduction

L'objectif de ce travail est de comparer les valeurs du rayonnement solaire mesurées avec celles qui sont prévues par les deux modèles semi-empirique, à savoir ; le modèle Capderou et le modèle Kasten, une statistique est menée afin de déterminer la validité des deux modèles. Dans ce dernier chapitre une application des deux modèles déjà présentés dans le chapitre précédant pour l'estimation du rayonnement solaire est faite pour le site de Ghardaïa, où nous avons pu reconstituer l'évolution du rayonnement solaire instantané et journalier, par la suite une présentation des résultats obtenus est donnée et on finira par faire une comparaison entre ces résultats.

### III.2. Présentation

#### III.2.1. Site de Ghardaïa

Le site de Ghardaïa est situé au centre de l'Algérie et distant de 600 km d'Alger à 32.39° de latitude Nord, de 3.78° de longitude Est, et à l'altitude de 463 mètres au niveau de la mer. Présentant un climat désertique, le site de Ghardaïa est limité du côté Nord par la Wilaya de Laghouat (200 km), à l'Est par la Wilaya de Ourgla (200 km), au Sud-Ouest par la Wilaya d'Adrar (800 km), à l'Ouest par la Wilaya d'El-Bayad (350 km). Le site est devenu une nouvelle structure scientifique, qui a été mise en place en 2002 par le ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, il s'agit de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER), affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) situé à Bouzaréah, Alger.

La caractérisation de sites se fait à travers l'analyse des paramètres météorologiques et radiométriques, tel que : la précipitation, la température ambiante, l'humidité relative, le vent. En ce qui concerne le site de Ghardaïa, la pluviométrie est du type saharien avec une moyenne annuelle de 67.37 mm. Le nombre de jours de pluie par an en moyen est de 20 à 30 jours, les vitesses moyennes annuelles du vent sont de 3.1 à 4.4 m/s mesurées à 10m du sol. Les températures moyennes maximales mensuelles varient de 14.9 °C en Janvier à 43.2 °C en Juillet, les températures moyennes minimales mensuelles varient de 3.4 °C en Janvier à 29.5 °C en

Juillet. Les températures moyennes mensuelles varient de 9 °C en Janvier à 36.5 °C en Juillet avec une moyenne annuelle de 22.6 °C.

### III.2.1.1. Données utilisées

Actuellement ; en Algérie, la mesure des données de l'éclairement solaire est effectuée d'une manière instantanée, constante et sur certains sites seulement de l'Algérie. Nous avons choisi le site de Ghardaïa pour cette étude, le choix du site s'est porté sur la disponibilité des données radiométriques recherchées. En effet, les données de l'éclairement solaire (global, diffus, global incliné et direct normal) utilisées provient de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, 'URAER'. Le rayonnement solaire global est mesuré avec un pyranomètre CMP21 de Kipp & Zonen, tandis que rayonnement solaire direct normal est mesuré avec un pyrhéliomètre CHP1 de Kipp & Zonen (Fig III.1). Les données sont enregistrées par pas de 1 minute et stockées sur disque d'un micro-ordinateur.



Figure III.1 : Station radiométrique de l'URAER (Ghardaïa).

### III.2.2. Programmation par Matlab des deux modèles

Le programme de calcul numérique MATLAB est choisi dans notre travail. MATLAB est l'abréviation en anglais de (MATrix LABoratory), il est produit par MathWorks. L'intérêt de MATLAB tient à sa simplicité d'utilisation et à sa richesse fonctionnelle. On peut l'utiliser soit en mode en ligne de commande soit en mode programmation. Pour notre cas, nous avons choisi le mode 'programmation', puisque il permet de répondre à notre requête, qui est la reconstitution des

composantes du rayonnement solaire pour n'importe quelle inclinaison et orientation du plan récepteur, également le rayonnement instantané pour tous les sites de l'Algérie (Lat, Lon) à n'importe quel jour de l'année peut être modélisé. Dans ce mode 'programmation' les commandes sont écrites dans un fichier, le fichier doit être sauvegardé avec une extension '.m', pour exécuter ce fichier il suffit de taper son nom dans la fenêtre de commande.

### III.2.2.1. Etapes du programme et grandeurs d'entrées utilisées

Un programme informatique utilisant le langage Matlab été élaboré pour calculer le rayonnement solaire global. Le programme a besoin de certains données d'entrées, tels que les données géographiques du lieu considéré (Lat, Lon, Alt), le nombre de jours, le temps ; qui lui permettrons de calculer la position du soleil en coordonnées équatoriales (déclinaison du soleil  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$ ), le programme calculera ensuite la position du soleil en coordonnées horizontales ( la hauteur du soleil  $\gamma_s$  et l'azimut solaire  $\chi_s$ ). Le programme déterminera également le facteur de trouble atmosphérique de Linke  $T_L$  à partir des formules appropriées, la masse d'air optique  $m_A$  et l'épaisseur optique de Rayleigh  $\delta_R$ .

Arrivé à ce stade, le programme réalisé doit calculer le rayonnements global extraterrestre  $G_o$  par le baie de la constance solaire  $I_o$ , la composante du rayonnement direct  $IB_h$  est ensuite calculée. Elle n'est autre que le rayonnement direct normal  $IN$  (calculé au préalable) multiplié par sinus de la hauteur angulaire du soleil  $\gamma_s$ . Le rayonnement global incident sur un plan horizontal  $IG_h$  est calculé par la sommation des deux composantes directe  $IB_h$  et diffuse  $ID_h$ .

Pour une inclinaison du plan d'un angle et d'une orientation ( $\beta, \alpha$ ) donnés par l'utilisateur, le programme procèdera d'abord au calcul de cosinus de l'angle d'incidence  $\delta^{inc}$  des rayons solaires sur le plan, qui sera utilisé pour calculer le rayonnement direct  $IB_i$  sur le plan considéré. En fin le rayonnement global  $IG_i$  est égal au rayonnement  $IB_i$  plus  $ID_i$ , qui le rayonnement diffus sur le plan. Finalement, le programme dessinera les courbes des rayonnements obtenues durant une journée du lever au coucher du soleil pour le jour  $N$  choisi.

### III.2.2.2. Facteur de trouble atmosphérique de Linke

L'éclairement solaire est atténué en traversant l'atmosphère terrestre par la diffusion des aérosols, les nuages et l'absorption par les différents composants atmosphériques, il est connu qu'en jour clair les aérosols sont la principale cause de l'extinction de l'irradiation solaire. La quantité des aérosols dans l'atmosphère peut être représentée par les coefficients de troubles. En 1922, Linke a regroupé ces diverses extinctions dans un seul coefficient appelé trouble de Linke ou trouble atmosphérique  $T_L$  [36]. La détermination des troubles atmosphériques à une grande importance dans la modélisation de l'éclairement solaire utilisé dans le dimensionnement et l'évaluation des performances des systèmes énergétiques solaires. Une détermination du facteur de trouble de Linke à partir de l'éclairement direct est possible à partir du rayonnement direct par exemple, par contre la détermination de l'éclairement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant de l'éclairement [3].

Beaucoup de travaux ont été effectués ces dernières décennies pour déterminer expérimentalement le facteur de trouble de Linke [48, 49]. En l'absence de mesures, la valeur de référence relative à un ciel clair pur et sec vaut 2, elle atteint 6 dans le cas d'un ciel pollué (présence d'aérosols) et humide (teneur en vapeur d'eau élevée) [50]. Actuellement, des tables relatives aux valeurs du facteur de Linke  $T_L$  sont disponibles sur le Web. Le plus connu est le site (<http://www.soda-is.com>) qui propose des valeurs mensuelles moyennes de ce facteur à partir de la base de données SoDa, avec une erreur quadratique moyenne d'estimation de ce facteur de l'ordre 0.7. La méthode utilisée pour élaborer cette base de données est détaillé sur le site Web HelioClim. Dans notre cas, on utilisera des formules propres à chaque un des modèles, plus ou moins dépendant des paramètres climatiques ; pour la détermination de ce facteur.

### III.3. Résultats obtenus

Dans cette partie de travail nous représentons les principaux résultats obtenus par l'application des deux modèles sur le site de Ghardaïa.

#### III.3.1. Estimation du rayonnement solaire par les deux modèles

##### III.3.1.1. Influence du facteur $T_L$ sur le rayonnement solaire

Les variations au niveau de la mer du rayonnement direct et diffus en fonction du temps (hauteur du soleil) pour la ville de Ghardaïa (latitude est  $32.39^\circ$ ) pour un jour type du printemps et pour différentes valeurs du facteur de trouble, modélisé par Capderou ; sont représentées sur la figure (III.2).

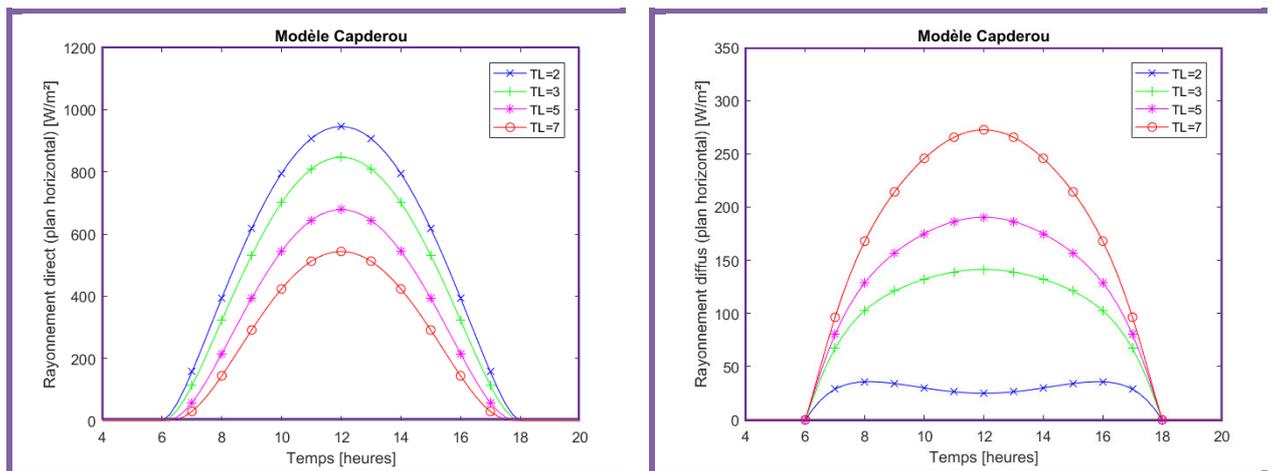


Figure III.2 : Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle Capderou).

Les variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan ( $\alpha, \beta$ ) égales à  $(0, 32^\circ)$ , pour un lieu de latitude  $32^\circ$  ( $N = 80$ ) en fonction du temps pour différentes valeurs du facteur de trouble, modélisé par Capderou ; sont représentées sur la figure (III.3).

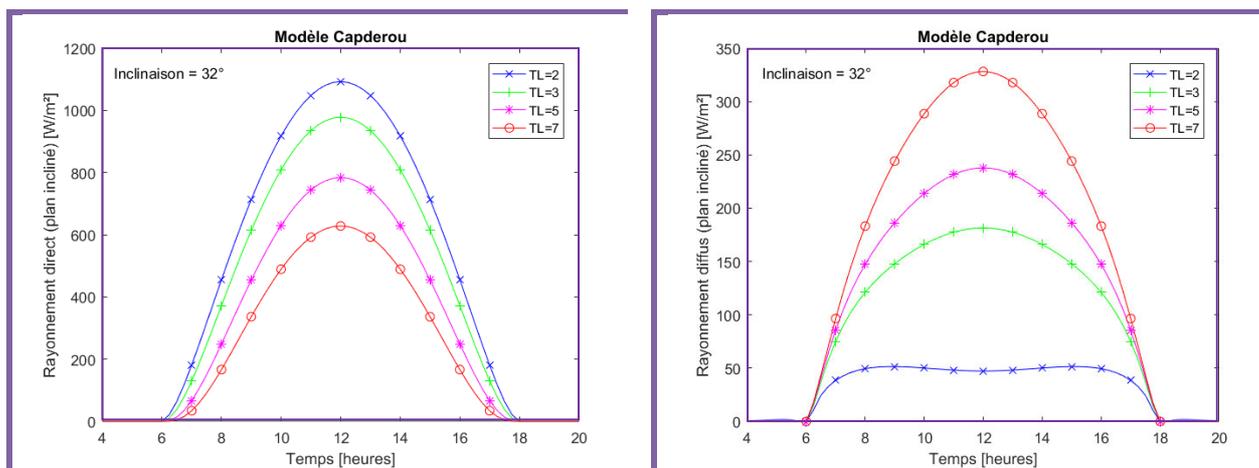


Figure III.3 : Variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan incliné de 32° (Modèle Capderou).

Les variations au niveau de la mer du rayonnement direct et diffus en fonction du temps (hauteur du soleil) pour la ville de Ghardaïa (latitude est 32.39°) pour un jour type du printemps et pour différentes valeurs du facteur de trouble, modélisé par Kasten ; sont représentées sur la figure (III.4).

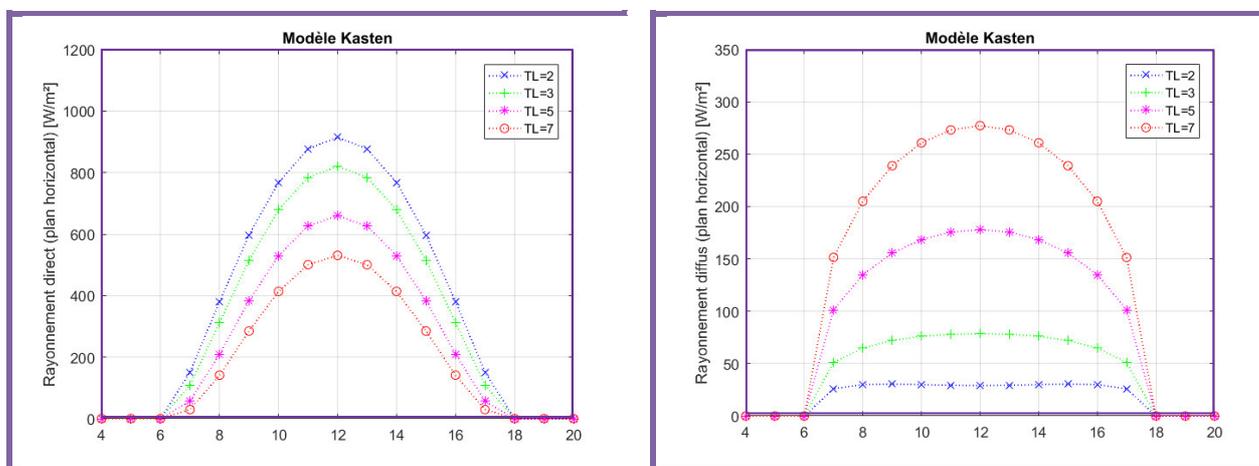


Figure III.4 : Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle Kasten).

Les variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan ( $\alpha, \beta$ ) égales à (0, 32°), pour un lieu de latitude 32° (N =80) en fonction du temps pour différentes valeurs du facteur de trouble, modélisé par Kasten ; sont représentées sur la figure (III.5).

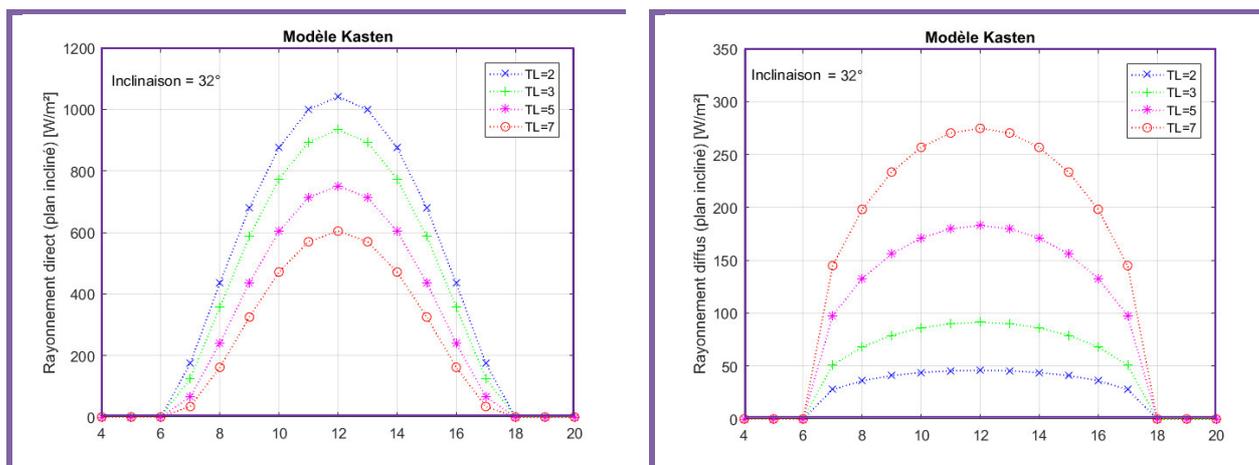


Figure III.5 : Variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan incliné de 32° (Modèle Kasten).

Sur les figures (III.2, III.3, III.4, III.5) on remarquera d'une manière générale que pour les deux modèles (Capderou et Kasten), l'évolution du rayonnement direct horizontal et incliné est grandement influencé par le facteur de trouble de Linke. En effet, les variations de ces composantes sont inversement proportionnelle à ce facteur, une légère augmentation de ce dernier engendrera une diminution considérable de ces composantes, par exemple une augmentation de 1 du facteur  $T_L$  diminuera le rayonnement  $IB_h$  d'environ 100 à 120  $W/m^2$ , ce qui est une diminution importante dans la quantité du rayonnement direct (ces valeurs peuvent être considérées comme égales au rayonnement diffus). Pour les composantes du rayonnement diffus horizontale et inclinée, c'est le cas inverse, autrement dit les variations du rayonnement diffus sont proportionnelles au facteur de trouble (une augmentation de 20 à 25  $W/m^2$  est constatée), ceci qui est semblable au cas du phénomène de l'effet de serre.

### III.3.1.2. Calcul du facteur $T_L$ par les deux modèles

Le tableau III.1 montre les variations des valeurs journalière maximales (à midi) du facteur de trouble de linke calculées, suivant les équations 2.21-2.24, par notre programme Matlab utilisées par le modèle Capderou. On pourrait constater que des valeurs relativement élevées de ce facteur sont enregistrées au cours de la saison estivale surtout au mois de Juillet et d'Août ( $T_L=4$ ). Ces valeurs élevées peuvent être expliquées par la forte diffusion par les aérosols dans l'atmosphère durant ces deux mois. Des valeurs élevées également sont constatées à partir du

mois d'Avril jusqu'au mois de Juin à cause du phénomène fréquent des vents de sable sur ce site durant cette période de l'année. Pour le modèle Kasten, la valeur du facteur  $T_L$ , dépendant des paramètres climatiques tel que: le coefficient d'Angstrom  $\beta_A$  et de la hauteur d'eau condensable  $w_v$ ; est considérée comme constante pour un type de ciel donné (suivant l'équation 2.59), elle est de l'ordre 3.3 pour un ciel clair pur, ce qui représenterait un peu près l'équivalent de la moyenne annuelle du modèle Capderou ( $T_{L(moy)}=3.26$ ). Il est à noter que le facteur  $T_L$  pour le modèle Capderou dépend aussi de l'altitude (Alt) du site considéré, qui est un paramètre qui influence le rayonnement solaire.

Tableau III.1 : Valeurs du facteur  $T_L$  calculées suivant le modèle Capderou.

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
$T_L$ (cap)	2.5	2.6	2.9	3.2	3.6	3.8	4.0	4.0	3.7	3.3	2.9	2.6

### III.3.2. Application des modèles au site de Ghardaïa

Les résultats de la programmation Matlab des deux modèles Capderou et Kasten pour l'estimation du rayonnement solaire, sur le site de Ghardaïa sont présentés comme suit :

#### III.3.2.1. Incidence sur un plan horizontal et incliné à la latitude

Les figures suivantes illustrent les variations des composantes : directe et diffuse horizontale, du rayonnement global horizontal et incliné à la latitude du lieu et du rayonnement direct normal pour différents jours types de l'année (hiver, été et printemps).

- Saison d'hiver : Plan horizontal  $(\alpha, \beta) = (0, 0)$  et plan incliné  $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

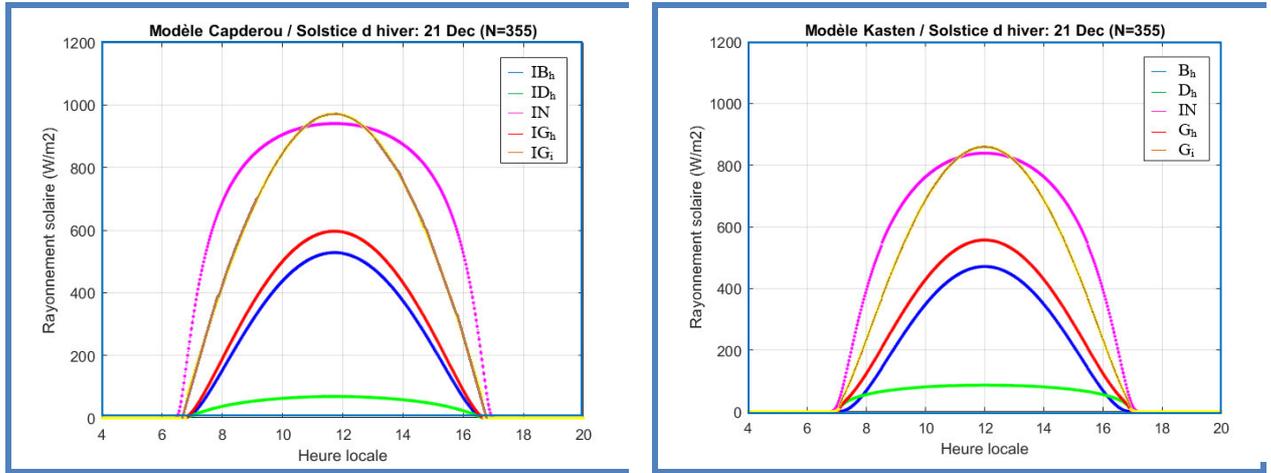


Figure III.6 : Eclairage incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude ( $32^\circ$ ) pour un jour type du mois de Décembre.

- Saison d'été : Plan horizontal  $(\alpha, \beta) = (0, 0)$  et plan incliné  $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

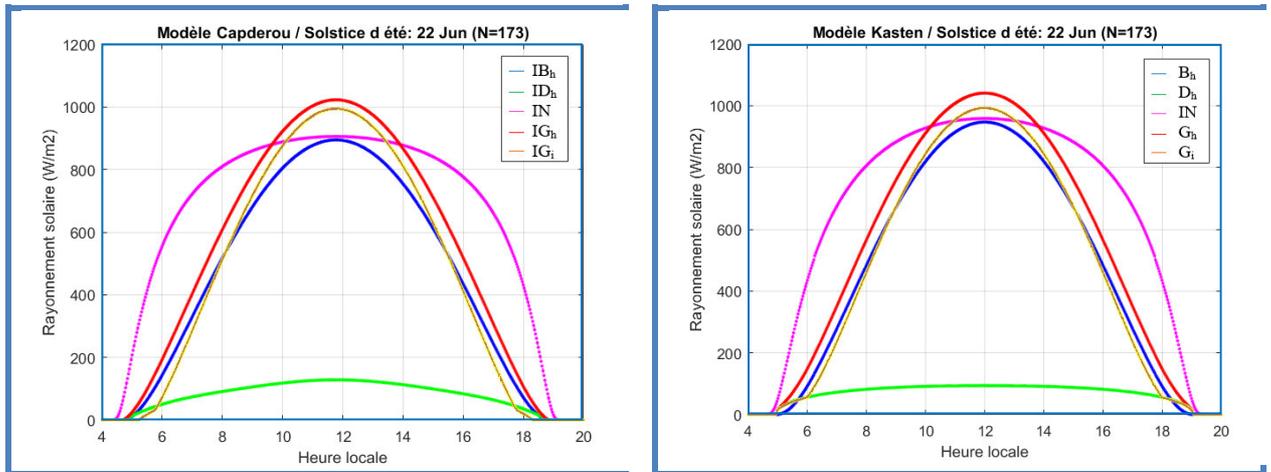


Figure III.7 : Eclairage incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude ( $32^\circ$ ) pour un jour type du mois de Juin.

- Saison du printemps : Plan horizontal  $(\alpha, \beta) = (0, 0)$  et plan incliné  $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

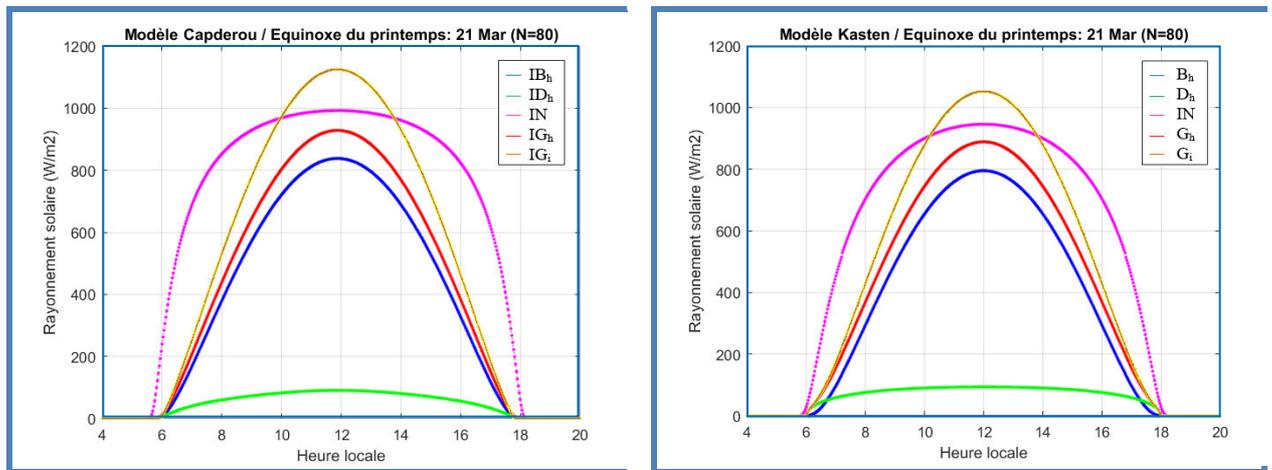


Figure III.8 : Eclairage incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude ( $32^\circ$ ) pour un jour type du mois de Mars.

Pour une période hivernale et sur la figure III.6 on remarque à première vue que les courbes ont une même allure pour les deux modèles avec des valeurs plus élevées pour le modèle Capderou notamment pour le rayonnement direct normal et global incliné. Concernant la saison estivale (Figure III.7), le modèle Kasten a tendance à produire des valeurs plus élevées que le modèle Capderou. Pour la saison du printemps (Figure III.8), les deux modèles se rapprochent avec un léger dépassement du modèle Capderou.

### III.3.2.2. Incidence sur un plan vertical Sud et vertical Est

Les figures ci-après (Figure III.9 - III.11), illustrent l'évolution des composantes directe et diffuse horizontale, du rayonnement global horizontal et du rayonnement global incliné suivant différents angles  $\alpha, \beta$ . Les courbes ont été dressées sur le même graphique, les résultats de trois périodes différentes de l'année sont représentés.

- Saison d'hiver : Plan vertical Sud :  $(\alpha, \beta) = (0, 90^\circ)$  et vertical Est :  $(\alpha, \beta) = (-90^\circ, 90^\circ)$

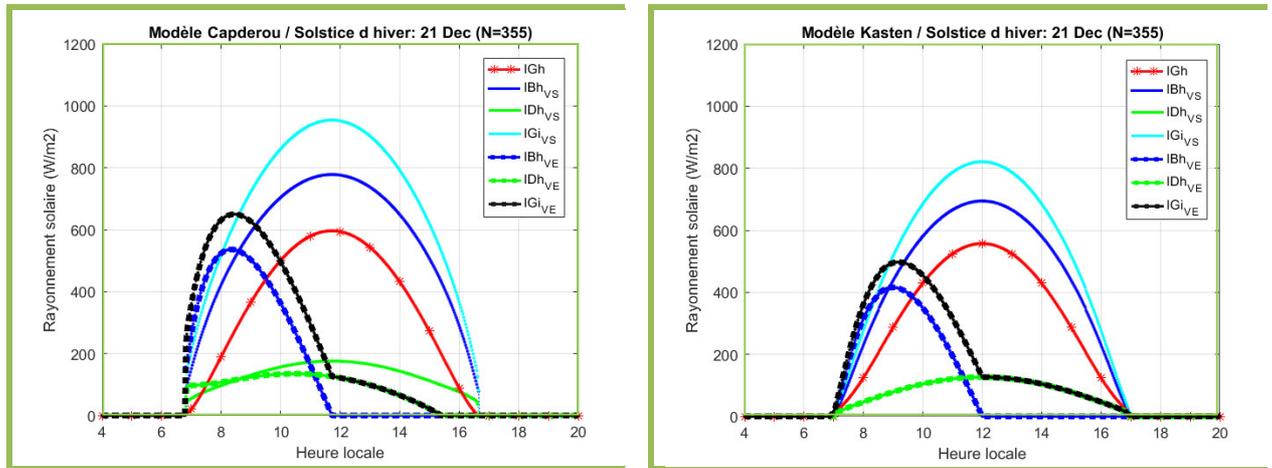


Figure III.9 : Eclairage incident sur un plan vertical Sud et un plan vertical Est pour un jour type du mois de Décembre.

- Saison d'été : Plan vertical Sud :  $(\alpha, \beta) = (0, 90^\circ)$  et vertical Est :  $(\alpha, \beta) = (-90^\circ, 90^\circ)$

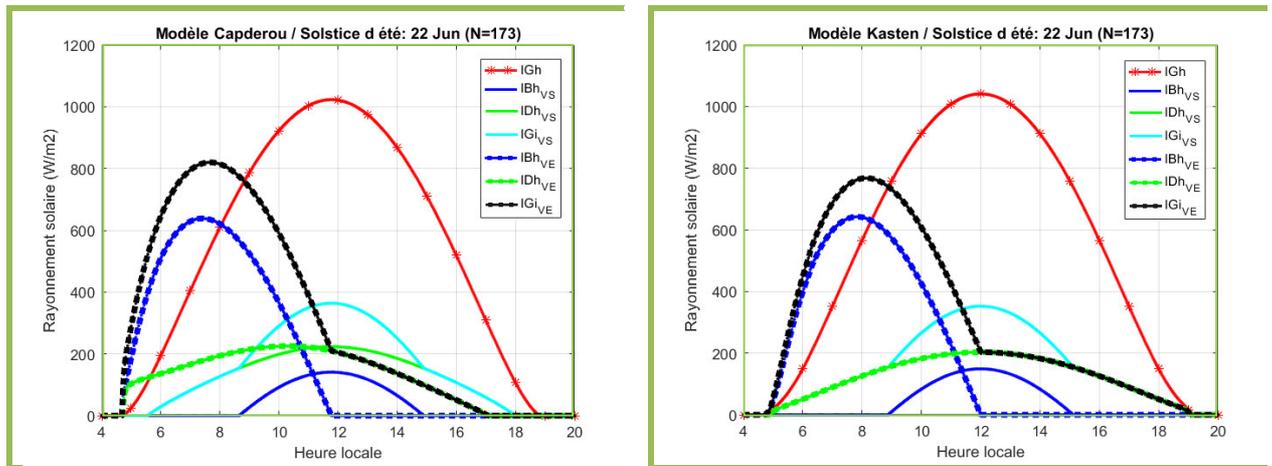


Figure III.10 : Eclairage incident sur un plan vertical Sud et un plan vertical Est pour un jour type du mois de Juin.

- Saison du printemps : Plan vertical Sud :  $(\alpha, \beta) = (0, 90^\circ)$  et vertical Est :  $(\alpha, \beta) = (-90^\circ, 90^\circ)$

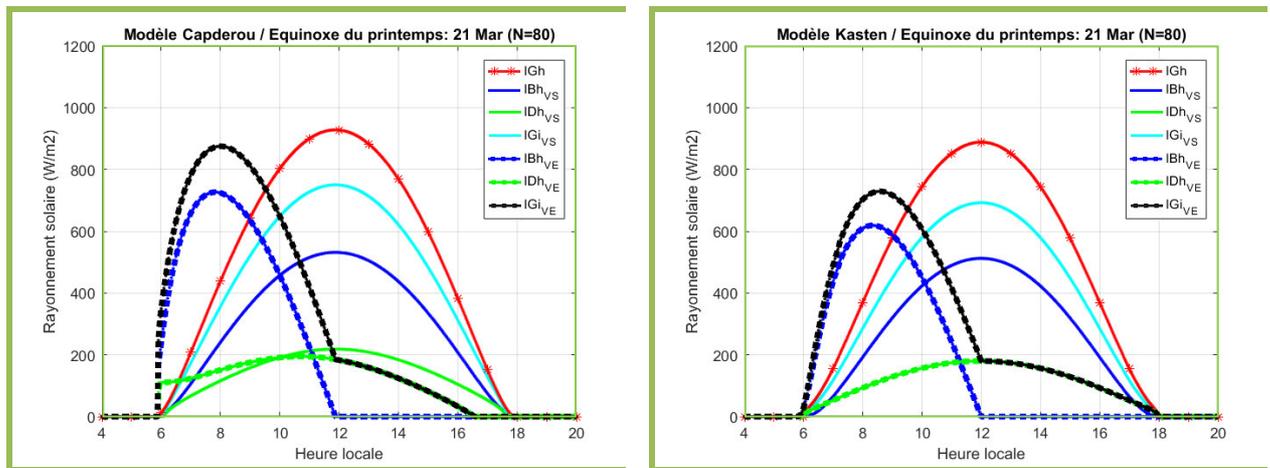


Figure III.11 : Eclairage incident sur un plan vertical Sud et un plan vertical Est pour un jour type du mois de Mars.

En changeant les inclinaisons et les orientations des plans, on remarque que l'allure des courbes est toujours identique avec un maximum à midi pour un plan tenu à la verticale en hiver et un pic au matin puis un déclin l'après-midi pour un plan orienté Est, ce qui est évident, puisque le plan reçoit les rayons uniquement le matin et se voit 'tourner le dos' au soleil progressivement l'après-midi. En été, le soleil n'est plus bas à l'horizon et la hauteur du soleil augmente, ce qui influe sur la captation d'un plan incliné à la verticale, (le soleil serait positionné au-dessus du capteur). En ce qui est des valeurs, on gagnerait en puissances par rapport à la période hivernale, avec des valeurs plus élevées pour le modèle Capderou. A ce stade, difficile à conclure qui est qui des modèles se rapproche le mieux des puissances réelles, une comparaison avec des données expérimentales s'avère nécessaire.

### III.3.3. Confrontation des résultats des modèles avec les valeurs mesurées

Dans le but d'évaluer les estimations réalisées par les deux modèles pour le rayonnement solaire par ciel clair, un ensemble de simulations a été exécutées, couvrant des situations des différentes périodes de l'année, afin d'avoir une grande représentativité des résultats. Pour obtenir une validation du rayonnement solaire, nous allons confronter quelques valeurs du

rayonnement solaire délivrées par les deux modèles avec les valeurs mesurées sur le site de Ghardaïa.

Afin de sélectionner les journées claires, une inspection visuelle a été menée sur une longue série de données durant une année, les jours mi-clairs ou à ciel couvert ont été rejetés. Deux dates sont retenues pour être présentées, une période hivernale du 11 Décembre pour le jour le plus court de l'année et une autre estivale correspondante au 30 Juin pour le jour le plus long de l'année.

On présentera sur les figures suivantes (Figure III.12 - III.15), des graphes comparatifs relatifs aux résultats du rayonnement solaire, pour une journée hivernale et estivale, les courbes d'une même composante sont dressées sur un même graphique.

- Jour d'hiver avec  $(\alpha, \beta) = (0, 0)$  : Global horizontal ( $IG_h$ ) et Direct horizontal ( $IB_h$ )

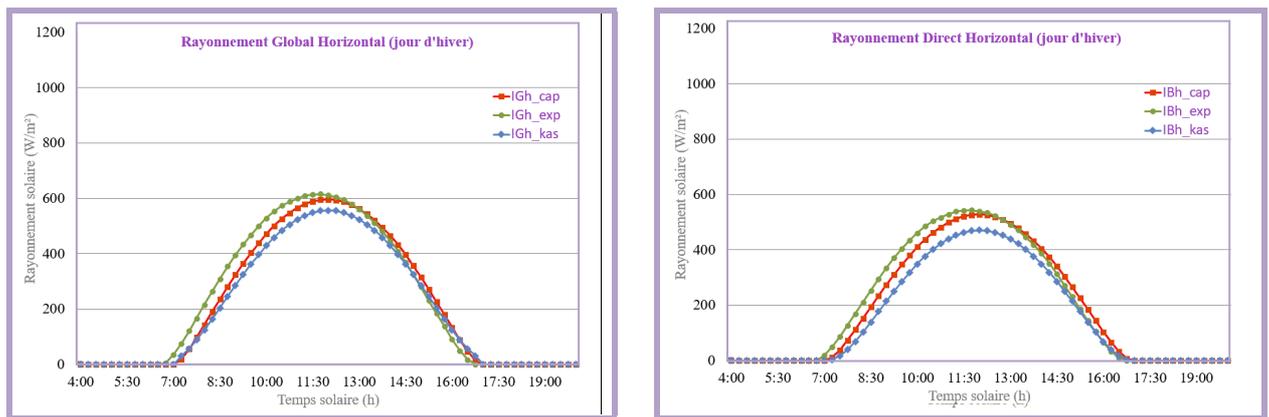


Figure III.12 : Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.

- Jour d'hiver : Direct normal (IN) avec poursuite 2 axes et Global incliné (IG<sub>i</sub>),  $(\alpha, \beta) = (0, 32^\circ)$

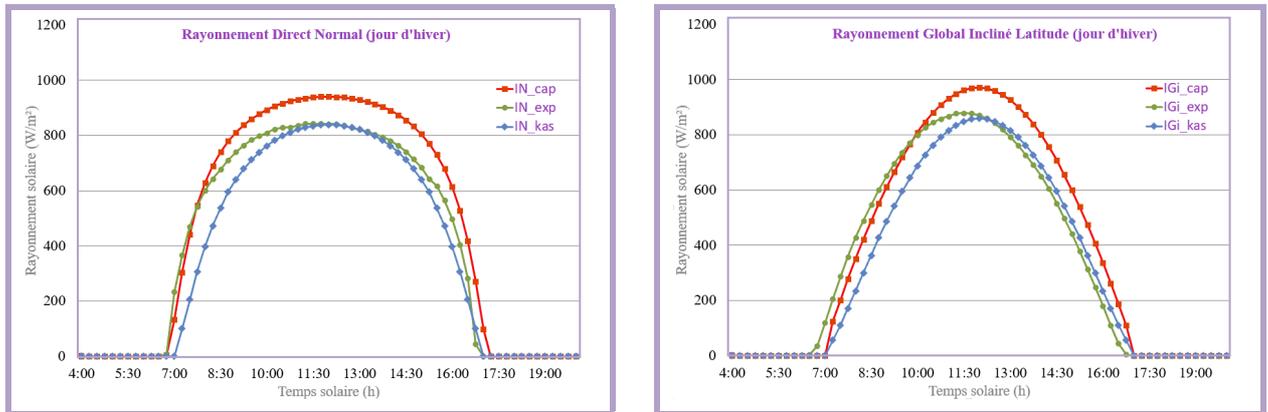


Figure III.13 : Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement direct normal et global incliné pour un jour clair d'hiver.

D'après les figures ci-dessus, nous remarquons en premier lieu que le rayonnement solaire varie au cours de la journée. Il est faible au voisinage du lever et du coucher du soleil et il atteint le maximum au milieu de la journée puisque le ciel garde le même état pendant une journée (ciel clair). A première vue, nous pouvons constater que, les résultats obtenus (plus précisément en période hivernale) indiquent la présence d'un écart minimal au lever et au coucher et qui devient important au milieu de journée.

- Jour d'été avec  $(\alpha, \beta) = (0, 0)$  : Global horizontal (IG<sub>h</sub>) et Direct horizontal (IB<sub>h</sub>)

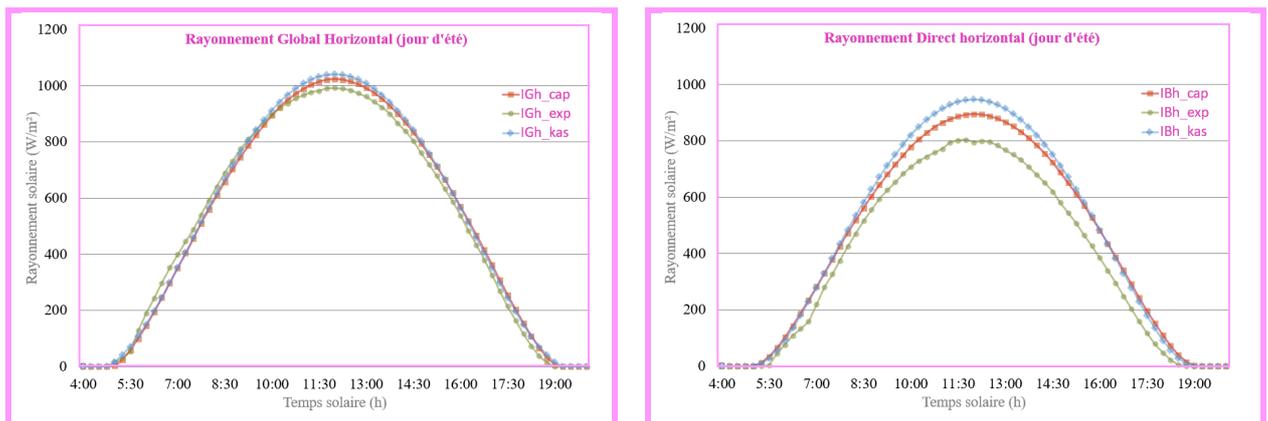


Figure III.14 : Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.

- Jour d'été : Direct normal (IN) avec poursuite 2 axes et Global incliné (IG<sub>i</sub>), ( $\alpha, \beta$ ) = (0, 32°)

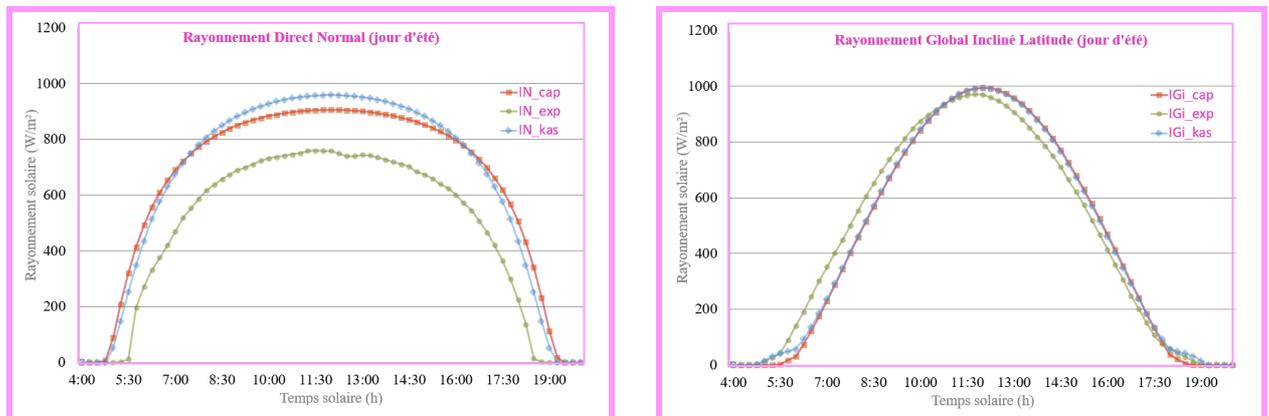


Figure III.15 : Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement direct normal et global incliné pour un jour clair d'été.

Pour une période hivernale (Figure III.12), on remarquera que les deux modèles sous-estime la composante directe horizontale et le rayonnement global, néanmoins, le modèle Capderou se rapproche plus de l'expérimentale. Par ailleurs, sur la figure (III.13), le modèle Kasten présente une légère sous-estimation du rayonnement global incliné par contre le modèle Capderou s'écarte de l'expérimental et surestime l'éclairement dans les deux cas avec un écart important qui peut atteindre les 100 W/m<sup>2</sup>. En période estivale (Figures III.14), les deux modèles surestiment le rayonnement solaire avec des puissances plus intense pour le modèle Kasten, le modèle Capderou présente un très bon rapprochement de valeurs mesurées. Pour le rayonnement direct normal représenté sur la figure (III.15), les deux modèles ont tendance à surestimer ce paramètre, ce qui est le même cas figure pour le rayonnement global incliné avec une ampleur moindre, du point de vue puissance.

Le traitement des graphes des figures III.12 - III.15 montre que d'une manière générale, on peut dire que le modèle de Capderou donne une bonne estimation du rayonnement solaire pour la période hivernale par rapport à la période estivale.

### III.3.4. Comparaison des valeurs estimées aux valeurs mesurées

La Figure III.16, illustre, sur un même graphe ; l'évaluation de l'éclairement global horizontal et incliné mesuré et estimé par les deux modèles pour la saison printanière (jour 19 mars). La Figure III.17, est une représentation du rayonnement direct normal comparé au rayonnement horizontal pour les deux modèles également durant la saison printanière.

- Jour du printemps : Global horizontal ( $IG_h$ ),  $(\alpha, \beta) = (0, 0)$  et Global incliné ( $IG_i$ ),  $(\alpha, \beta) = (0, 32^\circ)$

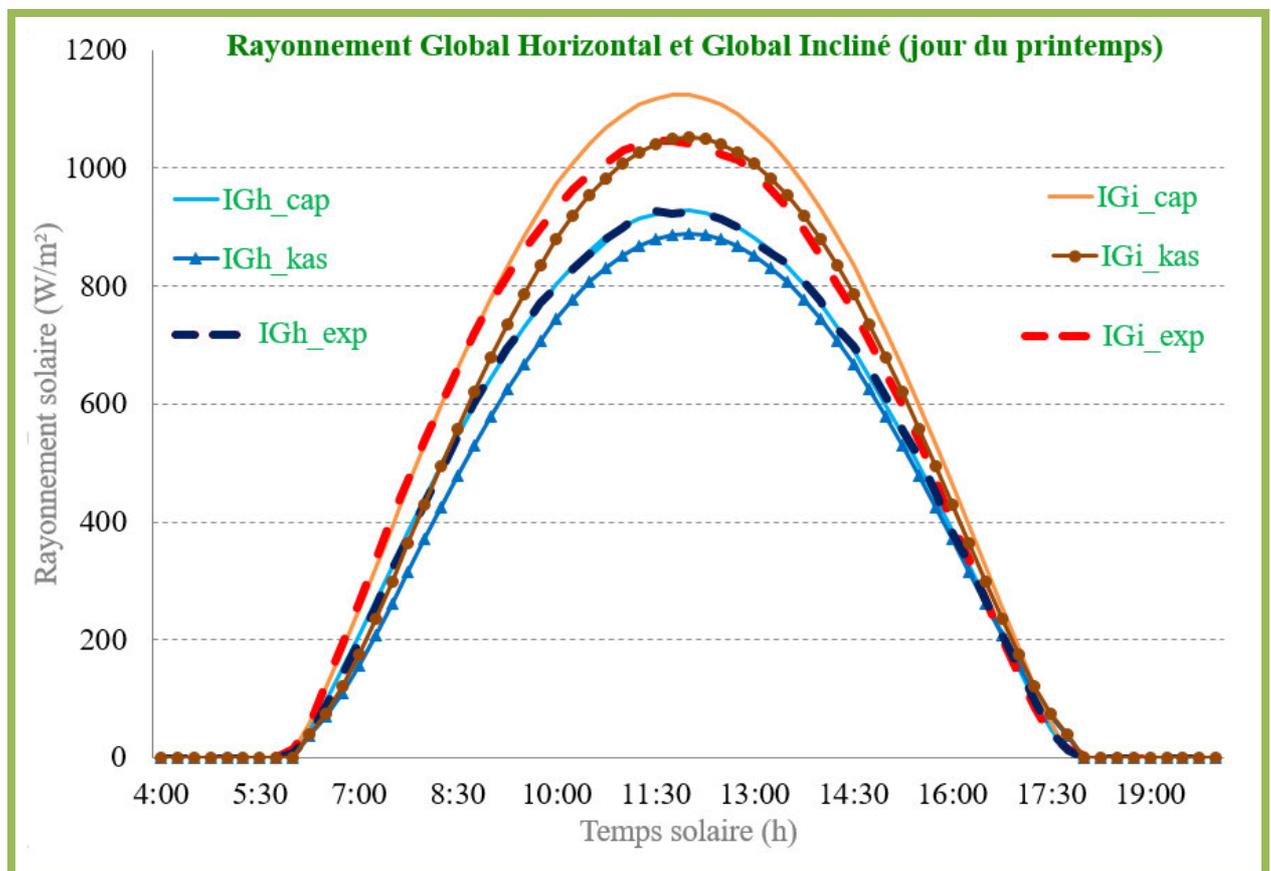


Figure III.16 : Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement global horizontal et global incliné pour un jour clair du printemps.

- Jour du printemps : Direct normal (IN) avec poursuite 2 axes et Direct horizontal (IB<sub>h</sub>), ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) = (0, 0)

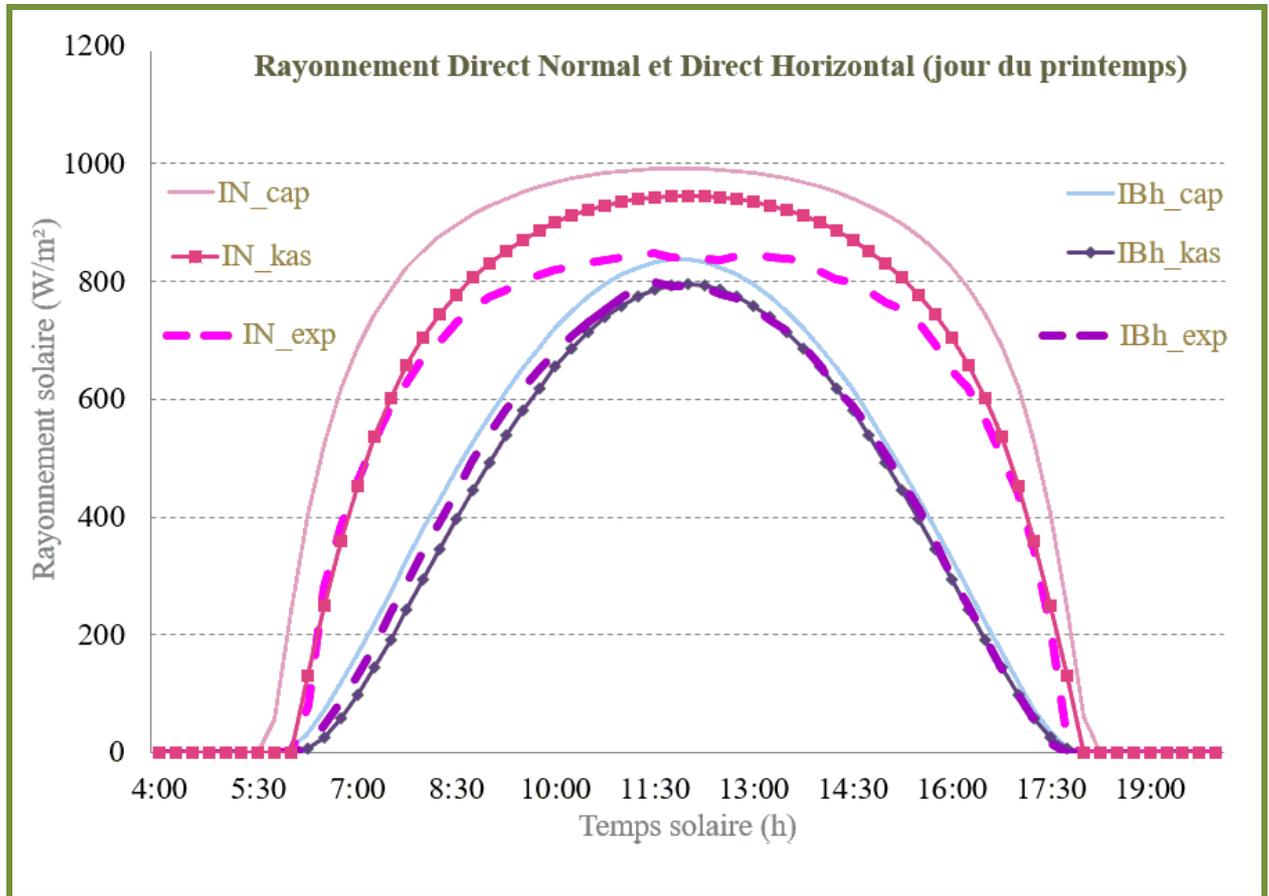


Figure III.17 : Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement direct normal et direct horizontal pour un jour clair du printemps.

La superposition des courbes des deux modèles sur un même graphique permet de ressortir un modèle qui est plus proche des valeurs expérimentales, c'est le modèle Capderou. Par ailleurs, le modèle Kasten sur ou sous-estime les deux types de rayonnement, le global horizontal et global incliné (Figure III.16). En ce qui est de la figure (Figure III.17), les résultats obtenus indiquent que le modèle Kasten se rapproche le mieux des valeurs expérimentales. Le modèle de Capderou a tendance à une légère surestimation du rayonnement direct horizontal et direct normal.

### III.4. Validation et discussion des résultats

Les graphes nous renseignent peu sur les modèles, une étude plus approfondie est nécessaire. Dans un but d'une meilleure validation, une évaluation statistique des résultats a été réalisée pour le meilleur modèle sur les mesures du rayonnement solaire pour les journées claires sélectionnées. En comparant les mesures avec les résultats d'estimation obtenus à l'aide des deux modèles, nous pouvons en déduire les précisions de chaque modèle afin d'en tirer le meilleur.

#### III.4.1. Évaluation statistique des modèles (Méthodologie)

Soit une grandeur (Y) dont les valeurs mesurées sont ( $Y_{mes}$ ); et les valeurs estimées par un modèle mathématique donné sont ( $Y_{est}$ ). Pour comparer les résultats des différents modèles une étude statistique a été faite en évaluant :

- L'erreur moyenne absolue (MAE), qui correspond à la moyenne des erreurs relatives absolues, plus cette valeurs est proche de zéro plus le modèle a une erreur moyenne faible ;

$$MAE (\%) = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Y_{sim,i} - Y_{mes,i}}{Y_{mes,i}} \right) \cdot 100 \quad (3.1)$$

- L'erreur moyenne (Mean Bias Error, MBE) qui quantifie l'écart moyen entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées, avec  $N_d$  est le nombre de données. Le MBE reflète la tendance d'ensemble de la grandeur simulée à sa surestimation ( $MBE > 0$ ) ou à sa sous-estimation ( $MBE < 0$ ).

$$MBE = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^N (Y_{sim,i} - Y_{mes,i}) \quad (3.2)$$

$$MBE (\%) = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^N (Y_{sim,i} - Y_{mes,i}) \cdot 100 \quad (3.3)$$

- L'Erreur Quadratique Moyenne (Root Mean Square Error, RMSE) qui est un indicateur qui mesure l'amplitude de l'erreur. Elle renseigne sur l'erreur moyenne commise en valeur

absolue entre les valeurs mesurées et celles estimées par le modèle, plus cette erreur est faible plus les valeurs simulées par le modèle sont proches des valeurs mesurées, elle s'exprime comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^N (Y_{sim,i} - Y_{mes,i})^2} \quad (3.4)$$

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^N (Y_{sim,i} - Y_{mes,i})^2} \cdot 100 \quad (3.5)$$

- Ainsi que le coefficient de corrélation  $R^2$  : La corrélation quantifié la correspondance temporelle des variations des champs simulés et celles mesurés. Il nous donne le comportement des simulations par rapport aux mesures, plus la corrélation est élevée, plus les variations des simulations sont bien placées. Des meilleures simulations ont comme coefficient de corrélation proche de 1.

### III.4.2. Interprétation des résultats

La récapitulation des paramètres statistiques obtenus par l'application des deux modèles au site de Ghardaïa est présentée dans les tableaux III.2 suivant :

Tableau III.2: Tests statistiques pour le rayonnement solaire instantané, Global horizontal (IG<sub>h</sub>), Direct horizontal (IB<sub>h</sub>), Global incliné à la latitude (IG<sub>i</sub>), et le rayonnement Direct normal (IN).

Type d'erreur	Horizontal		Normal		Incliné				
	R. Global (IG <sub>h</sub> )		R. direct (IB <sub>h</sub> )		R. Normal (IN)		R. Global (IG <sub>i</sub> )		
	Cap	Kas	Cap	Kas	Cap	Kas	Cap	Kas	
MBE (W/m <sup>2</sup> )	Hiver (355)	-17.69	-45.07	-13.10	-61.61	83.39	-66.97	17.27	-12.27
	Eté (173)	8.10	16.01	73.66	91.53	190.94	198.24	-9.75	-4.95
	Printemps (80)	0.46	32.86	40.11	170.41	-33.94	-16.18	-17.67	59.19
RMSE (W/m <sup>2</sup> )	Hiver (355)	44.30	65.08	37.76	74.36	100.12	103.12	58.20	52.55
	Eté (173)	31.76	35.08	78.37	101.48	196.36	199.93	61.99	55.91
	Printemps (80)	6.39	41.47	24.26	33.83	174.40	68.92	52.60	52.96
MPE (%)	Hiver (355)	30.62	68.21	23.19	-13.29	22.07	-13.12	19.80	4.70
	Eté (173)	2.08	7.45	161.50	114.04	729.30	483.57	-17.40	8.67
	Printemps (80)	2.05	-3.18	-5.20	16.66	203.49	23.01	2.35	-4.92
R <sup>2</sup>	Hiver (355)	0.981	0.977	0.98	0.977	0.974	0.958	0.958	0.953
	Eté (173)	0.996	0.997	0.997	0.998	0.987	0.995	0.987	0.988
	Printemps (80)	1.000	0.998	1.000	0.998	0.996	0.994	0.998	0.991

Les coefficients de corrélation liant les estimations instantanées des rayonnements solaires aux mesures au sol sont satisfaisants car ils varient de 95% à 100%. La comparaison des valeurs estimées par différents modèles avec les valeurs mesurés montre que : parmi les deux modèles proposés pour le site de Ghardaïa, nous constatons que le modèle de Capderou est assez

représentatif du rayonnement solaire en donnant des coefficients de détermination les plus élevés et des RMSE les plus bas en comparaison avec le modèle Kasten, notamment pour la période hivernale et printanière représentant tous types de rayonnements :  $IG_h$ ,  $IB_h$ ,  $IN$  et  $IG_i$ .

En termes de MBE et RMSE, le modèle Capderou atteint des valeurs maximales en Juin et des valeurs minimales en Décembre, avec une surestimation en été et une sous-estimation en hiver des puissances horizontales, ce qui est indiqué par le signe du MBE. Le RMSE est de l'ordre de  $44 \text{ W/m}^2$  en hiver,  $31.7 \text{ W/m}^2$  en été et  $6.4 \text{ W/m}^2$  au printemps, le RMSE atteint un maximum de  $196 \text{ W/m}^2$  pour le rayonnement direct normal un minimum  $52.6 \text{ W/m}^2$  pour le global incliné à la latitude. Une explication de ces résultats peut être liée aux méthodes différentes utilisées par chaque un des modèles pour l'estimation du facteur de trouble  $e$  Linke.

Donc du point de vue performance, nous constatons que le modèle Capderou est le meilleur, puisque il peut réaliser une estimation assez fidèle du rayonnement solaire incident dans la région de Ghardaïa dans le cas d'un ciel clair.

### III.5. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons exposé nos résultats obtenus par programmation Matlab des deux modèles Capderou et Kasten pour l'estimation du rayonnement solaire incident sur plan horizontal et incliné. L'évaluation des modèles choisis sur une base graphique et statistique montre que les meilleurs résultats sont donnés par le modèle de Capderou.

Suite à une comparaison entre les valeurs estimées à partir des modèles et les mesures au sol pour le site de Ghardaïa, nous avons obtenu un coefficient de corrélation supérieur à 95%, ce qui signifie que les valeurs estimées sont proches de celles mesurées par le pyranomètre. On peut conclure alors que l'utilisation de modèles semi-empiriques peut fournir des informations assez précises sur l'évolution du rayonnement solaire. En fin une analyse statistique est faite en employant les indicateurs MBE et RMSE et une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles estimées par le modèle Capderou est remarquable en période hivernale et printanière, ce qui nous mène donc à dire, que ce modèle peut être utilisé pour estimer le rayonnement solaire dans la région de Ghardaïa et pour des endroits dont les climats sont similaires à celui de Ghardaïa.

## CONCLUSION GENERALE

L'énergie solaire est l'une des plus importantes parmi les diverses sources d'énergies possibles. Une connaissance précise des puissances instantanées du rayonnement solaire à un endroit géographique donné est d'une importance majeure pour le développement des dispositifs d'énergies solaires et pour l'évaluation de leurs performances, notamment si on considère que l'Algérie est un pays de soleil par excellence où le nombre des heures d'insolation s'élève à presque 3300 h/an. Cependant, pour beaucoup de pays en voie de développement ; les mesures du rayonnement solaire ne sont pas facilement disponibles. Il est donc, important d'élaborer des modèles d'estimation de ce paramètre sur la base des données astronomiques et météorologiques.

Dans le cadre de ce travail, il a été proposé de faire la modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal et incliné par deux modèles semi-empiriques : le modèle de Capderou et le modèle de Kasten. Après une étude bibliographique sur le sujet, on a procédé à la programmation des deux modèles par Matlab. Les valeurs instantanées du rayonnement direct  $IB_h$  et global horizontal  $IG_h$ , direct normal  $IN$  et global incliné  $IG_i$  ont été estimées en utilisant les deux modèles, dans ces modèles plusieurs grandeurs ont été utilisées à savoir : la déclinaison du soleil  $\delta$ , l'angle horaire  $\omega$ , la hauteur du soleil  $\gamma_s$  et l'azimut solaire  $\chi_s$ , la masse d'air optique  $m_A$  et l'épaisseur optique de Rayleigh  $\delta_R$  et le facteur le plus important qui est le facteur de trouble atmosphérique de Linke  $T_L$ . Les tests entrepris pour vérifier aussi bien le bon fonctionnement et la fiabilité des programmes réalisés, montrent que le programme de travail défini initialement a été réalisé dans son ensemble et les résultats obtenus sont satisfaisants.

Une analyse statistique est faite en employant l'erreur moyenne (MBE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Alors une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles estimées par les deux modèles est remarquable avec un coefficient de corrélation supérieur à 95%, ce qui nous ramène donc à dire, que ces modèles peuvent être utilisés pour estimer le rayonnement solaire par ciel clair au niveau du site de Ghardaïa. Cependant, les meilleurs

résultats sont obtenus par le modèle de Capderou, notamment pour la saison hivernale et printanière.

La connaissance de la quantité d'énergie reçue au sol est très importante pour tous concepteurs de systèmes solaires. Pour le moment, la majorité des travaux pour le calcul du rayonnement incliné concernent l'estimation du rayonnement diffus. Dans cette étude, on remarque que l'élément qui introduit énormément d'erreur dans les calculs est l'estimation du rayonnement direct sur le plan incliné. Cette grandeur est assez difficile à mesurer expérimentalement, elle ne peut qu'être calculée indirectement. Il sera intéressant de déterminer cet élément expérimentalement et de développer des modèles plus précis, propre à ce paramètre et de généraliser les modèles pour tout le territoire Algérien. Il serait également très intéressant d'approfondir les recherches sur l'estimation des aérosols (le trouble atmosphérique). En effet, ces aérosols absorbent ou diffusent une partie importante du rayonnement solaire.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] Q.Sylvain, Les Centrales Solaires à Concentration, France: Université de Liège, Faculté des sciences appliquées, 2007.
- [2] Yettou F., Malek A., Haddadi M., Gama A., Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie, Revue des Energies Renouvelables., Vol. 12 (2), 331-346 (2009).
- [3] Yettou F. Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude. Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique, Alger 2009.
- [4] Bouchouicha. k. Modélisation multi spectrale des images satellitaire, application : quantification du bilan d'énergie sol-atmosphère. Thèse de Doctorat en science. Université Mohammed Boudiaf, Oran 2017.
- [5] 'Matlab/Simulink Tutorial', School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Release 13, Version 6.5, 2<sup>nd</sup> Edition, 2003.
- [6] Chabani zeyneb; "La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030", Mémoire de magister; Université M'Hamed Bougara-Boumerdes; 2014.
- [7] Total Solar Expert : construire un avenir énergétique durable, juin 2013.
- [8] Laponche Bernard : L'avenir est ouvert, mars 2003.
- [9] Gitay Habiba, Suarez Avelino, Dokken David Jon, T. Watson Robert: Les changements climatiques et la biodiversite, avril 2002.
- [10] Rojey Alexandre : Energie et climat, Réussir la transition énergétique, Edition Technip 2008.
- [11] Bouhdjar Amor ; Bulletin des énergies renouvelables n°22-2012, énergies renouvelables - développement durable- environnement, 2012.
- [12] Robert Jerome, Fabas Laurent : Guide de la maison économe, Edition Eyrolle, paris 2008.
- [13] Bonal Jean. Rossetti Pierre : énergies alternatives. Edition omniscience, France 2007.
- [14] Schenkel Y., Temmerman M., Marchal D., Schaar C : Une analyse comparative de l'impact sur l'emploi d'une installation de chauffage au bois. Biotechnol. agron. soc. environ, 2005.
- [15] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. b 8 585 1- b 8 585 21,2002.

- [16] M. Jourieh "Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien", Thèse de doctorat, ENSAM de France, 2007.
- [17] A. Mirecki "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de doctorat, INPT de France, 2005.
- [18] De Kerorguen Yan: guide de toutes les énergies, connues et inconnues, Edition Technip, 2010.
- [19] Auzias Dominique, Labourdette Jean-paul: France bio, Edition petit fute, Paris 2013.
- [20] Vernier Jacques : que sais-je ? les énergies renouvelables ; Edition puf, Paris 2012.
- [21] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives : questions de physique autour de l'énergie solaire : Paris 2012.
- [22] Yacine Fouad "Etude de nouvelle génération de cellules photovoltaïques", Mémoire de Magister ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO.MB), 2011.
- [23] M. Capderou, 'Atlas solaire de l'Algérie', Modèles théoriques et expérimentaux, vol. 1, t1, office des publications universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [24] R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, 'Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications', technique & documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.
- [25] J. Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, ellipse Edition marketing. (2004).
- [26] Z. Sen. Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).
- [27] J. M Chasseriau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [28] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz. Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation, Paris, 1983.
- [29] Bouden Abdelmalek "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque", Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [30] Y. Jannot. Thermique solaire, mars 2011.
- [31] A. Khedim, 'L'énergie solaire utilisation thermique et photovoltaïque', ANEP, 359 p., 2005.
- [32] J.M. Chasseriau, 'Conversion thermique du rayonnement solaire', Ed. Dunod, France., 1984.
- [33] R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, 'Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications', technique & documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.

- [34] A. Labouret, 'Energie solaire photovoltaïque', Ed. Dunod, France, 302 p., 2003.
- [35] M. Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, tome 1, vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [36] F. Linke, 'Transmissions - koeffizient und trübungsfaktor', beiträge zur physik der atmosphäre, vol. 10, pp. 91 – 103, 1922.
- [37] F. Kasten, 'A simple parameterization of two pyrhelimetric formulae for determining the linke turbidity factor', Meteorology rdsch, vol. 33, pp. 124 - 127, 1980.
- [38] K. Feussner and P. Dubois, 'Trübungsfaktor, precipitable water', Staub. gerlands beitr., geophysical, vol. 27, pp. 132 - 175, 1930.
- [39] A. Louche, G. Peri and M. Iqbal. 'An analysis of linke turbidity factor'. Solar Enegy.vol. 37, n°6, pp.393 - 396, 1986.
- [40] A. Moumami, N. Hamani, N. Moumami et al. Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra, 2006, vol. 3, p. 4.
- [41] Pierre Bessemoulin et Jean Olivieri, Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, la meteorologie 8e serie - n° 31 - Septembre 2000.
- [42] P. Rivet. Le rayonnement solaire ; CNRS.
- [43] J. A. Duffie, W. A. Beckman. Solar engineering of thermal processes, John wiley and sons. (1980)
- [44] M. Katz, A. Baille and M. Mermier, 'Atmospheric turbidity in a semi rural site i', Solar energy, vol. 28, pp. 323 – 327, 1982.
- [45] M. Katz, A. Baille and M. Mermier, 'Atmospheric turbidity in a semi rural site', Solar Energy, vol. 28, pp. 329 – 334, 1982.
- [46] P. Bessemoulin and J. Olivieri, 'Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette', Document Meteo-france (Service central d'exploitation de la meteorology and centre radiometrique de carpentras), 2000.
- [47] J. Hofierka and M. Sári, 'The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications', Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [48] A. Gama, F. Yettou, A. Malek, C. Larbès et B. Azoui, 'Determination of atmospheric turbidity using solar radiation measurements for two Algerian sites', 2<sup>nd</sup> International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources (NURER10), 04 - 07 Juillet 2010, Ankara - Turquie.

- [49] L. Diabaté, J. Remund and L. Wald, 'Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa', *Solar Energy*, vol. 75 (12), pp. 111-119, 2003.
- [50] A.Mefti, 'Contribution à la détermination du gisement solaire par traitement de données solaires au sol et d'images météosat', Thèse de Doctorat d'Etat en Physique, Spécialité, Conversion Thermodynamique, Université USTHB, 2007.

## ABSTRACT

The long-term evaluation of the performance of solar energy conversion systems is carried out through digital simulation programs, which require knowledge of meteorological and radiometric parameters, such as ambient temperature, wind speed and solar radiation. The use of solar radiation estimation models remains practically one of the only ways to overcome the problem of radiometric data because of the scarcity of radiometric stations on the national territory. In this context, this master thesis focuses on the estimation of clear sky global solar radiation at ground level by two semi-empirical models (Capderou model and Kasten model) from Matlab programs developed for this purpose.

The application of these two models makes possible to estimate the direct and diffuse components of incident solar radiation on a horizontal or inclined surfaces with different orientations. In addition, a validation of the results obtained by comparing the calculated values with the radiometric values measured at Ghardaïa site shows a good agreement between the estimated data and the experimental data. Both models are evaluated on a graphical and statistical basis and the results of the statistical study are very encouraging and promising.

**Key words :** Solar energy, Estimation of solar radiation, Capderou model, Kasten model, Statistical study.

## ملخص

يتم تقييم طويل الأجل لأداء أنظمة تحويل الطاقة الشمسية باستخدام برامج محاكاة رقمية، التي تتطلب معرفة خصائص مناخية والإشعاعية، مثل درجة حرارة الجو، سرعة الرياح والإشعاع الشمسي. إذا فإن استخدام نماذج تقدير الإشعاع الشمسي هو عمليا من بين طرق وحيدة لتغلب على مشكلة بيانات الإشعاعية بسبب نقص محطات القياس في الإقليم الوطني. وفي هذا السياق، تركز هذه مذكرة على تقدير الإشعاع الشمسي عام سماء صافية على مستوى الأرض بواسطة نموذجين شبه تجريبيين (نموذج Capderou، ونموذج Kasten) باستعمال برنامج ماتلاب الذي تم تطويره لهذا الغرض. إن تطبيق هذين النموذجين يجعل من الممكن تقدير مكونات مباشرة ومنتشرة للإشعاع الشمسي ساقط على مستوى الأفقي أو مائل مع اتجاهات مختلفة. بالإضافة إلى ذلك، فإن تحقق من نتائج التي تم الحصول عليها عن طريق مقارنة قيم محسوبة مع قيم الإشعاعية المقاسة على مستوى منطقة غرداية تظهر انسجاما جيدا بين البيانات المقطرة وبيانات تجريبية. وذلك من أجل تقييم كلا النموذجين على أساس بياني وإحصائي حيث ان نتائج دراسة الإحصائية مشجعة للغاية وواعدة.

**الكلمات المفتاحية:** طاقة شمسية، تقدير الإشعاع الشمسي، نموذج Capderou، نموذج Kasten، دراسة إحصائية.