

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'Automatique et Electromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Energies Renouvelables*

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

**Par :** **BENCHACHA Mebarka**

**Thème**

**Développement d'un Outil Informatique Pour  
l'Estimation de l'Eclairement Solaire Incident  
Sur un Plan Horizontal en Algérie**

**Soutenu publiquement le : 18 /09 /2019**

**Devant le jury :**

<b>MEDOUKALI Hemza</b>	Maître de Conférences B	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>FERKOUS Khaled</b>	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>YETTOU Fatiha</b>	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
<b>ARIF Mohammed</b>	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	<b>Co-encadreur</b>

**Année Universitaire : 2018 / 2019**

# Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant de m'avoir  
donné la foi, l'amour et la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons tout particulièrement à remercier chaleureusement Dr YETTOU Fatiha et Dr  
GAMA Amor pour leurs enthousiasme, leurs admirable implication dans ce travail, leurs  
conseil avisés.

Nous remercions fièrement Mr ARIF Mohammed, pour son soutien, son aide et ces conseils  
précieux durant tous notre parcours, qui ont donnés fruit à ce travail qui clôt nos études.

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

Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté à  
notre travail

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribués de près ou de  
Loin à la réalisation de ce travail.

## ملخص

يتم إجراء تقييم طويل الأجل لأداء أنظمة تحويل الطاقة الشمسية من خلال برامج المحاكاة الرقمية ، والتي تتطلب معرفة المعلومات الأرصاد الجوية والإشعاعية ، مثل درجة الحرارة المحيطة وسرعة الرياح. والإضاءة الشمسية. يظل استخدام نماذج تقدير الإشعاع الشمسي من الناحية العملية واحدة من الطرق الوحيدة للتخفيف من مشكلة البيانات الإشعاعية بسبب ندرة المحطات الراديوية في الإقليم الوطني. في هذا السياق ، سيتم إنتاج برنامج كمبيوتر (تطبيق) باستخدام لغة برمجة "موجهة للكائنات". التطبيق مخصص لتقدير مكونات الإضاءة الشمسية المباشرة والمنتشرة بواسطة سماء صافية على مستوى الأرض لهذا Matlab ضرورية وسيتم تطوير برنامج Matlab ستكون خطوة البرمجة الأولى لـ Capderou باستخدام نموذج الغرض. علاوة على ذلك ، فإن التحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها بمقارنة القيم المحسوبة مع القيم الإشعاعية المقاسة على موقع غرداية يظهر توافقاً جيداً بين البيانات المقدر والبيانات التجريبية. يتم تقييم النموذج على أساس بياني وإحصائي ونتائج الدراسة الإحصائية مشجعة للغاية وواعدة ، التطبيق سهل الاستخدام وفوق كل شيء مفيد للغاية لتطوير مشاريع أنظمة الطاقة الشمسية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية ، تقدير الإضاءة الشمسية ، نموذج كابديرو ، برمجيات البرمجة ، دراسة إحصائية

## 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, un programme informatique (application), sera réalisé à l'aide d'un langage de programmation 'orienté objet'. L'application est dédiée à l'estimation des composantes de l'éclairement solaire direct et diffus par ciel clair au niveau du sol en utilisant le modèle de Capderou. Une première étape de programmation par Matlab sera nécessaire et un programme Matlab sera développé à cet effet. 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. Le modèle est évalué sur une base graphique et statistique et les résultats de l'étude statistique sont très encourageants et prometteurs, l'application est facile à utilisation et surtout très utile pour le développement des projets de systèmes à énergie solaire.

**Mots clés :** Energie solaire, Estimation de l'éclairement solaire, Modèle Capderou, logiciels de programmation, Etude statistique.

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Rayonnements solaires	6
Figure I.2	Répartition spectrale du rayonnement solaire	6
Figure I.3	Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontale au mois de Juillet et Décembre respectivement	8
Figure I.4	Irradiation globale journalière reçue sur un plan normal au mois de Décembre et Juillet respectivement	8
Figure I.5	Illustration sur l'effet photovoltaïque	9
Figure I.6	Cellule poly cristalline et monocristalline	11
Figure I.7	Cellule photovoltaïque en silicium amorphe	11
Figure I.8	Caractéristique I-V d'une cellule	12
Figure I.9	Performances électriques d'un module	13
Figure I.10	Influence de l'éclairement sur les courbes courant-tension	14
Figure I.11	Influence de la température sur les courbes courant-tension	15
Figure I.12	Caractéristique résultante des cellules associées en série	16
Figure I.13	Caractéristique résultante des cellules associées en parallèle	16
Figure I.14	Association mixte des modules	17
Figure I.15	Caractéristique I-V pour l'association mixte	17
Figure I.16	Schéma bloc d'une installation PV autonome avec stockage d'énergie	18
Figure I.17	Centrales à collecteurs cylindro-paraboliques	21
Figure I.18	Les centrales à collecteurs paraboliques	22
Figure I.19	Centrale à tour	22
Figure II.1	Image de l'étoile soleil du système solaire	25
Figure II.2	Structure de l'étoile soleil	26
Figure II.3	Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil	27
Figure II.4	Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude (L)	28
Figure II.5	La sphère céleste	28
Figure II.6	Les coordonnées terrestres	30
Figure II.7	Variation de l'équation du temps en fonction du jour	31
Figure II.8	Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour	33
Figure II.9	Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil)	34
Figure II.10	Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour	35
Figure II.11	Variation de l'azimut solaire en fonction du temps	36
Figure II.12	Angle d'inclinaison d'un capteur solaire	37
Figure II.13	Les angles caractérisant un capteur plan incliné	37
Figure II.14	Les trois composantes du rayonnement solaire incident sur un plan incliné	39
Figure II.15	Pyrhéliomètre pour la mesure de l'éclairement direct	40
Figure II.16	Pyranomètre pour la mesure du rayonnement direct et diffus	41
Figure II.17	Héliographe pour la mesure de l'insolation	41

Figure II.18	Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil	43
Figure II.19	Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air	44
Figure II.20	Analyse spectrale du rayonnement solaire	45
Figure II.21	Rayonnement solaire hors atmosphère	47
Figure II.22	Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire	49
Figure III.1	Organigramme général de l'application pour le calcul de l'éclairement solaire.	54
Figure III.2	Feuille de présentation de l'application réalisée.	55
Figure III.3	Feuille de choix du site de l'application réalisée.	56
Figure III.4	Feuille de calcul de l'éclairement solaire.	57
Figure III.5	Feuille de calcul de l'énergie solaire journalière.	57
Figure III.6	Feuille de calcul de l'énergie solaire mensuelle.	58
Figure III.7	Feuille de calcul de l'énergie solaire mensuelle moyenne.	58
Figure III.8	Feuille de calcul de l'éclairement annuel à midi.	58
Figure III.9	Feuille d'affichage de la table de l'énergie solaire mensuelle.	59
	Feuille d'affichage de la table de l'énergie solaire mensuelle moyenne.	59
Figure III.10		
Figure III.11	Feuille d'affichage du rapport de l'application réalisée.	60
Figure III.12	Station radiométrique de l'URAER (Ghardaïa).	62
Figure III.13	Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle Capderou).	63
	Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Décembre.	64
Figure III.14		
	Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Juin.	64
Figure III.15		
	Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Mars.	65
Figure III.16		
	Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Décembre, donné par notre application.	65
Figure III.17		
	Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Juin, donné par notre application.	66
Figure III.18		
	Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Mars, donné par notre application.	66
Figure III.19		
	Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou et les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.	67
Figure III.20		
	Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou et les données expérimentales pour le rayonnement direct normal pour un jour clair d'hiver.	67
Figure III.21		
	Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou et les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.	67
Figure III.22		
	Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou et les données expérimentales pour le rayonnement direct normal pour un	68

	jour clair d'été.	
Figure III.24	Carte de l'énergie solaire directe annuelle incidente sur un plan horizontal.	72
Figure III.25	Carte de l'énergie solaire globale annuelle incidente sur un plan horizontal.	72
Figure III.26	Carte de l'énergie solaire directe normale annuelle incidente sur un plan horizontal.	73

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Potentiel solaire en Algérie des trois régions (côtière, plateaux et Sahara)	7
Tableau II.1	Caractéristiques principales du soleil	25
Tableau II.2	Valeurs d'albédo selon différents types de sol	38
Tableau II.3	Répartition spectrale du rayonnement thermique	42
Tableau III.1	Tests statistiques pour le rayonnement solaire instantané, Global horizontal ( $I_{G_h}$ ), Direct horizontal ( $I_{B_h}$ ) et le rayonnement Direct normal (IN).	71

## NOMENCLATURE

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>	<b>Unité</b>
$\varphi$	Latitude du lieu	Degrés
$\lambda$	Longitude du lieu	Degrés
TSV	Temps solaire vrai	Heure
TSM	Temps solaire moyen	Heure
t	Temps local	min
ET	Equation de temps	min
N'	Angle journalier	Degrés
N	Numéro du jour	[-]
TU	Temps universel	Heure
DE	Décalage horaire	Heure
L	Point de latitude	min
TL	Temps légal	Heure
C <sub>1</sub>	Décalage horaire par rapport au Greenwich	Heure
C <sub>2</sub>	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) <sub>l</sub>	L'heure solaire au lever du Soleil= $h_l$	Heure
(TSV) <sub>c</sub>	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 <sub>A</sub>	Masse d'air	[-]
Alt	Altitude du lieu	km
$\delta_R$	Epaisseur totale optique de Rayleigh	[-]
T <sub>L</sub>	Facteur de trouble total de Linke	[-]

## NOMENCLATURE

$T_0$	Trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau	[-]
$T_1$	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
$Y$	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 matières

RESUME  
NOMENCLATURE  
LISTE DES FIGURES  
LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE 01

## CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

<b>I.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>03</b>
<b>I.2.</b>	<b>Energies renouvelables</b>	<b>03</b>
I.2.1.	Définition	03
I.2.2.	Classification des énergies renouvelables	04
I.2.3.	Les différentes familles des énergies renouvelables	04
I.2.3.1.	Le solaire photovoltaïque	04
I.2.3.2.	Le solaire thermique	04
I.2.3.3.	L'éolien	04
I.2.3.4.	L'énergie hydraulique	05
I.2.3.5.	La biomasse	05
I.2.3.6.	La géothermie	05
<b>I.3.</b>	<b>Energie solaire</b>	<b>05</b>
I.3.1.	Définition	05
I.3.2.	Rayonnement solaire	06
I.3.3.	Potentiel solaire en Algérie	07
I.3.4.	Les applications de l'énergie solaire	08
<b>I.4.</b>	<b>Solaire photovoltaïque</b>	<b>09</b>
I.4.1.	L'effet photovoltaïque	09
I.4.2.	Les grandeurs d'un système photovoltaïque	10
I.4.3.	Les différentes technologies	10
I.4.3.1.	Cellule en silicium monocristallin	10
I.4.3.2.	Cellule en silicium poly cristallin	10
I.4.3.3.	Cellule en silicium amorphe	11
I.4.4.	Caractéristiques d'une cellule	12
I.4.4.1.	Caractéristique I-V d'une cellule	12
I.4.4.2.	Caractéristique P-V d'une cellule	12
I.4.4.3.	Paramètres influent sur la caractéristique $I=f(V)$	14
I.4.5.	Module photovoltaïque	15
I.4.6.	Générateur photovoltaïque	15
I.4.6.1.	Association en série	16
I.4.6.2.	Association en parallèle	16
I.4.6.3.	Association mixte (série parallèle)	17
I.4.7.	Système photovoltaïque	17
I.4.7.1.	Générateur photovoltaïque	18
I.4.7.2.	Batterie	18
I.4.7.3.	Régulateur	18

I.4.7.4.	Onduleur	19
I.4.8.	Différents systèmes photovoltaïques	19
I.4.8.1.	Systèmes photovoltaïques autonomes	19
I.4.8.2.	Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	19
I.4.8.3.	Systèmes photovoltaïques hybrides	20
I.4.8.4.	Systèmes photovoltaïques au fil du soleil	20
<b>I.5.</b>	<b>Technologies solaires à concentration</b>	<b>20</b>
I.5.1.	Principe de fonctionnement des systèmes à concentration	20
I.5.2.	Types des concentrateurs solaires	21
I.5.2.1.	Centrales à collecteurs cylindro-paraboliques	21
I.5.2.2.	Centrales à collecteurs paraboliques	21
I.5.2.3.	Centrales à tour	22
<b>I.6.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>23</b>

## CHAPITRE 2 : MODELISATION MATHEMATIQUE DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE

<b>II.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>24</b>
<b>II.2.</b>	<b>Aspects géométrique du rayonnement solaire</b>	<b>24</b>
II.2.1.	Soleil	24
II.2.1.1.	Description du soleil	25
II.2.1.2.	Mouvement de la terre autour du soleil	26
II.2.1.3.	Mouvement apparent du soleil	27
II.2.1.4.	Sphère céleste	28
II.2.1.5.	Coordonnées géographiques d'un site	29
II.2.2.	Temps solaires	30
II.2.2.1.	Temps solaire vrai (TSV)	30
II.2.2.2.	Temps solaire moyen (TSM)	30
II.2.2.3.	Equation du temps (ET)	30
II.2.2.4.	Temps universel (TU)	31
II.2.2.5.	Temps légal (TL)	32
II.2.2.6.	Lever et coucher du soleil ( $h_l, h_c$ )	32
II.2.2.7.	Durée du jour ( $d_j$ )	32
II.2.3.	Coordonnées du soleil par rapport à un observateur	32
II.2.3.1.	Repère équatorial	33
a.	Déclinaison du soleil ( $\delta$ )	33
b.	Angle horaire ( $\omega$ )	33
II.2.3.2.	Repère horizontal	34
a.	Hauteur du soleil ( $\gamma_s$ )	35
b.	Azimut du soleil ( $\chi_s$ )	35
II.2.3.3.	Orientation d'un plan	36
a.	Inclinaison du plan ( $\beta$ )	36
b.	Azimut du plan ou déviation azimutale ( $\alpha$ )	37
II.2.4.	Rayonnement solaire reçu au niveau du sol	37
II.2.4.1.	Composante directe	38
II.2.4.2.	Composante diffuse	38
II.2.4.3.	Albédo du sol (le rayonnement réfléchi)	38

II.2.4.4.	Rayonnement global	39
<b>II.3.</b>	<b>Mesure du rayonnement solaire</b>	<b>39</b>
II.3.1.	Mesure du rayonnement direct (le Pyrhéliomètre)	40
II.3.2.	Mesure du rayonnement diffus et global (le Pyranomètre)	40
II.3.3.	Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe)	41
<b>II.4.</b>	<b>Aspects énergétiques du rayonnement solaire</b>	<b>42</b>
II.4.1.	Paramètres de l'atmosphère	42
II.4.1.1.	Masse atmosphérique	42
II.4.1.2.	Epaisseur optique de l'atmosphère	42
II.4.2.	Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère	44
II.4.3.	Facteur de trouble de Linke	45
II.4.3.1.	Absorption par la vapeur d'eau	46
II.4.3.2.	Absorption par les gaz et diffusion de Rayleigh	46
II.4.3.3.	Diffusion par les aérosols	46
<b>II.5.</b>	<b>Modélisation du rayonnement solaire par le modèle de CAPDEROU</b>	<b>46</b>
II.5.1.	Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal par ciel clair	46
II.5.1.1.	Constante solaire	46
II.5.1.2.	Eclairement hors atmosphère	47
II.5.1.3.	Eclairement global incident sur un plan horizontal	47
II.5.1.4.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	48
II.5.1.5.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	48
II.5.2.	Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque par ciel clair	48
II.5.2.1.	Angle d'incidence	48
II.5.2.2.	Eclairement incident sur un plan quelconque	49
II.5.2.3.	Eclairement direct incident sur le plan quelconque	49
II.5.2.4.	Eclairement diffus incident sur le plan quelconque	50
a.	Le rayonnement diffus de la part du sol	50
b.	Le rayonnement diffus de la part du ciel	50
II.5.2.5.	Calcul du rayonnement global	52
<b>II.6.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>52</b>

### CHAPITRE 3 : DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL INFORMATIQUE POUR L'ESTIMATION DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE

<b>III.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>53</b>
<b>III.2.</b>	<b>Organigramme de l'application développée</b>	<b>53</b>
<b>III.3.</b>	<b>Présentation de l'application développée</b>	<b>55</b>
III.3.1.	Feuille principale	55
III.3.2.	Menu principal	56
III.3.3.	Choix du site	56
III.3.4.	Feuilles d'affichages des résultats	56
<b>III.4.</b>	<b>Tests et validation des résultats obtenus</b>	<b>60</b>
III.4.1.	Site de Ghardaïa	60
III.4.2.	Données utilisées	61
III.4.3.	Tests et résultats obtenus	62
III.4.3.1.	Calcul du facteur de trouble	62
III.4.3.2.	Calcul de l'éclairement instantané par Matlab	63

III.4.3.3.	Calcul de l'éclairement instantané par Delphi	65
III.4.4.	Validation des résultats	66
III.4.5.	Évaluation statistique et discussion des résultats	69
III.4.5.1.	Évaluation statistique des modèles	69
III.4.5.2.	Interprétation des résultats	70
<b>III.5.</b>	<b>Mapping des cartes solaires de l'Algérie</b>	<b>72</b>
<b>III.6.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>74</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		<b>75</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>		

# **INTRODUCTION GENERALE**

Les besoins énergétiques de l'humanité n'ont pas cessé de croître avec son évolution: on a utilisé d'abord des ressources naturelles tel que le charbon, le bois et par la suite avec le progrès scientifique, le pétrole, le gaz, l'énergie hydraulique et l'énergie nucléaire. Actuellement les énergies fossiles sont consommées bien plus rapidement qu'elles ne se forment dans la nature et selon les estimations, les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au plus tard vers 2100 si des efforts sont fournis concernant la production et la consommation nécessaire [1]. Cette forme d'énergie étant limitée dans le temps, 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.

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 [2]. 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 [3, 4, 5].

Le but de ce travail est le développement d'un outil informatique pour l'estimation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal en Algérie en utilisant le modèle Capderou. Pour cela, nous avons choisi un langage visuel orienté objet, qui est le logiciel Delphi 5.0 de Borland [52].

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 est présentée, les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes de l'éclairement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal sont programmées avec Matlab 2016b [51] 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 au développement d'un outil informatique facilitant l'exploitation des données par programmation du modèle Capderou en utilisant le logiciel Delphi. La validation des résultats obtenus à partir des données de mesure du rayonnement solaire au sol est aussi envisagée. Finalement une conclusion générale contenant les interprétations terminera ce mémoire.

---

## **CHAPITRE I**

# **Généralités sur les énergies renouvelables**

## II.1. Introduction

L'énergie solaire c'est la conversion de la lumière du soleil en électricité ou en chaleur. Selon les estimations l'énergie rayonnée par le soleil représente chaque année 40000 fois les besoins énergétiques que l'humanité consomme sous forme d'énergies fossiles. Malgré cela, l'énergie solaire reste un domaine assez peu exploité. Néanmoins la prise de conscience collective en fait une énergie douce d'avenir (même si elle est connue et utilisée depuis des millénaires).

Aujourd'hui, la production mondiale grâce à l'énergie photovoltaïque dépasse les 35GW, ce qui est environ l'équivalent de 35 réacteurs nucléaires (il y a environ 60 réacteurs en France).

Selon l'EPIA (European Photovoltaic Industry Association), cette production atteindra environ 1 800GW en 2030, soit 14% de la consommation mondiale d'électricité [10].

À cette date, le solaire photovoltaïque permettra d'alimenter plus de 4,5 milliards d'individus !

L'énergie que nous envoie constamment le soleil, et qui est potentiellement exploitable, est de l'ordre de  $175 \times 10^6$ GW, et à titre de comparaison, un réacteur nucléaire possède une puissance de l'ordre de d'un 1GW. Le calcul est donc très simple : cette énergie est gigantesque ! De façon plus concrète, nous recevons environ sur chaque mètre carré 1kW.

## II.2. Les énergies renouvelables

### I.2.1. Définition

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la terre, la croissance des végétaux... On qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", elles-mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz, uranium). Contrairement à celle des énergies fossiles, l'exploitation des énergies renouvelables n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Mais elles sont encore sous-exploitées par rapport à leur potentiel puisque ces énergies renouvelables ne couvrent que 20% de la consommation mondiale d'électricité.

L'utilisation des énergies renouvelables présente de nombreux avantages. Cela aide à lutter contre l'effet de serre, en réduisant notamment les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère.

Cela participe de plus à une gestion intelligente de ressources naturelles et à la création d'emplois.

### **I.2.2. Classification des énergies renouvelables**

Les énergies renouvelables peuvent être classées en 3 grandes catégories suivant leurs sources primaires d'énergie :

- A) Solaire direct : les procédés utilisant directement le rayonnement solaire ou la lumière.
- B) Solaire indirect : les procédés utilisant indirectement le soleil pour fournir une autre forme d'énergie.
- C) Non-solaire : n'utilisant pas le rayonnement solaire.

Dans tous les cas, le soleil est la base directe ou indirecte de toutes sources d'énergies que ce soient fossile ou éolien ou biomasse. [11]

### **I.2.3. Les différentes familles des énergies renouvelables**

#### **I.2.3.1. Le solaire photovoltaïque**

L'électricité est produite à partir de la lumière du soleil au moyen d'installations photovoltaïques. Celles-ci alimentent des sites isolés ou le réseau de distribution général.

#### **I.2.3.2. Le solaire thermique**

On désigne par "solaire thermique" l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique à travers un cycle thermodynamique et en électricité utilisant une génératrice [12].

#### **I.2.3.3. L'éolien**

Entraînés par le vent, les aérogénérateurs produisent des dizaines de millions de mégawatt heures. Cette électricité éolienne permet d'alimenter des sites isolés et aussi les grands réseaux de distribution. Les éoliennes mécaniques servent à pomper de l'eau dans de nombreux pays.

#### **I.2.3.4. L'énergie hydraulique**

La force motrice des chutes d'eau est utilisée par des turbines installées sur les rivières et les fleuves pour générer de l'électricité. Les centrales dans les grands barrages et les usines marémotrices forment la filière hydraulique, qui est la deuxième source d'énergie renouvelable dans le monde.

#### **I.2.3.5. La biomasse**

La biomasse regroupe le bois, la paille, les rafles de maïs, le biogaz et les biocarburants. Le bois issu des déchets de la forêt ou des industries du bois est brûlé pour produire de la chaleur. Il représente 14% de la consommation énergétique mondiale. 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...etc) : les plus courants sont le biodiesel (ou ester méthylique d'huile végétale, EMHV), l'éthanol, et son dérivé, l'éthyl-tertio-butyl-ether, ou encore l'ETBE.

#### **I.2.3.6. La géothermie**

Cette énergie utilisant la chaleur du sous-sol, la géothermie peut permettre de chauffer des locaux (avec une température moyenne ou faible), ou de produire de l'électricité par vapeur interposée (avec une température élevée).

### **II.3. L'énergie solaire**

#### **I.3.1. Définition**

L'énergie solaire présente certains avantages non négligeables sur les autres sources énergétiques, elle est : locale, gratuite, propre, silencieuse et durable. L'énergie solaire peut être utilisée sur toute la surface de la terre ou presque, il suffit donc de capter celle-ci et de l'utiliser [13].

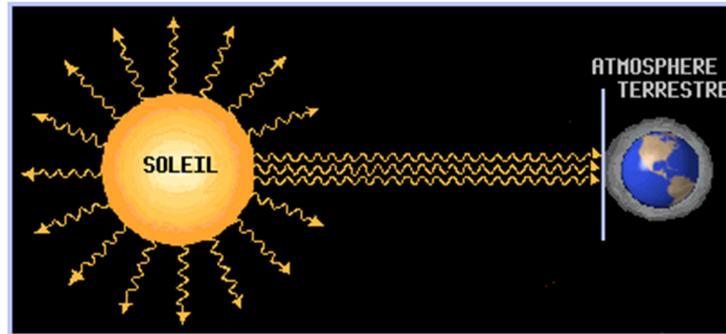


Figure I.1 : Rayonnements solaires.

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, le soleil n'est qu'une étoile parmi tant d'autres dans notre galaxie ; sa lumière met 8mn et 18s pour parvenir sur terre (voir Fig 1-1). C'est une énorme sphère incandescente de plasma à la température voisine de 5800K dont le diamètre atteint 1391000km. La puissance émise par ce dernier est estimée à  $1,7 \times 10^{23}$  kW dont une partie de l'ordre de  $8,5 \times 10^{13}$  kW atteint le globe terrestre, seuls 70% (environ  $6 \times 10^{13}$  kW) de cette puissance pénètrent l'atmosphère [14].

### I.3.2. Rayonnement solaire

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de  $0,22\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$ , la figure.1.1 représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Sur ce graphe on constate que pour  $\lambda \leq 0,3\mu\text{m}$  le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre  $0,3$  et  $0,7\mu\text{m}$  l'absorption par l'atmosphère est faible [15].

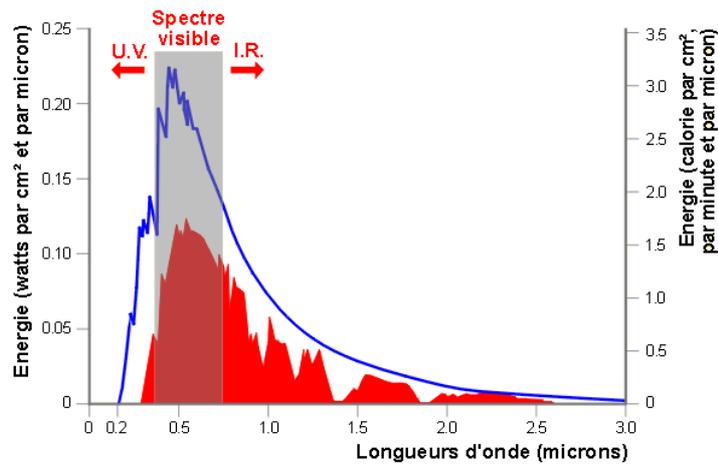


Figure I.2 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.

Le soleil dispense typiquement à un instant ' t ' sur la terre (en rayonnement global) :

- 1000 W/m<sup>2</sup> avec un soleil au zénith et un ciel parfaitement dégagé ;
- 100-500 W/m<sup>2</sup> sous un ciel nuageux ;
- moins de 50 W/m<sup>2</sup> sous un ciel vraiment couvert.

Deux phénomènes atténuent le rayonnement solaire traversant l'atmosphère terrestre .il s'agit de l'absorption et de la diffusion

L'absorption est sélective et dépend principalement de 4 éléments :

- L'ozone qui forme un écran qui arrête les UV ( $\lambda < 0.28\mu\text{m}$ ) nocif pour la vie
- L'oxygène qui absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers 0.69 et 0.76 $\mu\text{m}$ )
- Le gaz carbonique qui absorbe une partie de l'IR lointain ( $\lambda > 2\mu\text{m}$ )
- La vapeur d'eau qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR on ne la rencontre pratiquement qu'au niveau du sol ( $z < 5\text{km}$ ) [15].

### I.3.3. Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 KWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays [16].

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie des trois régions (côtière, plateaux et Sahara).

	Région Côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'insolation (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

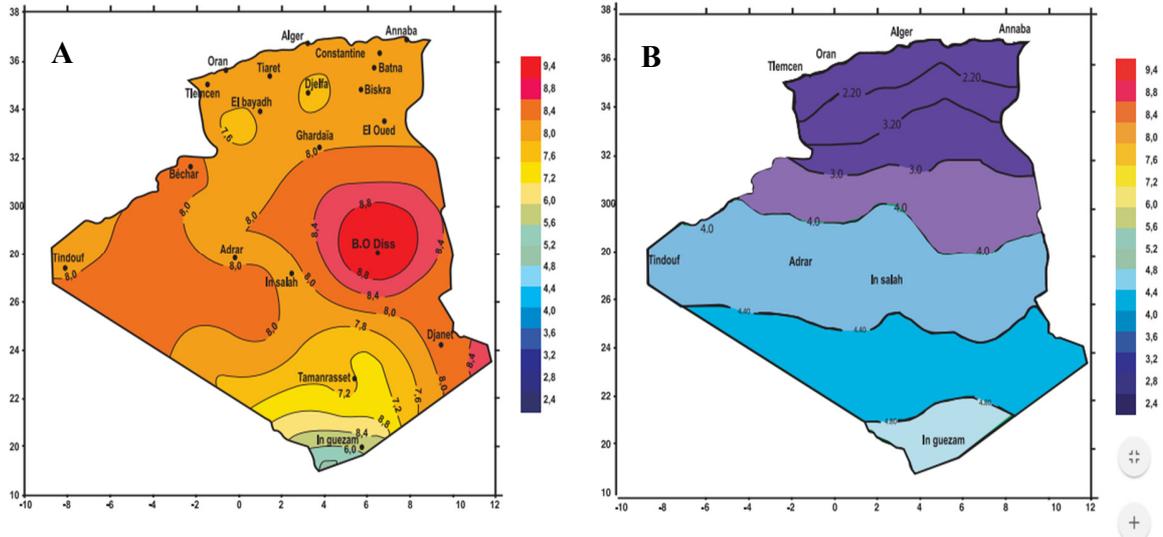


Figure I.3 : Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontale : (A) au mois de Juillet et (B) Décembre respectivement [16].

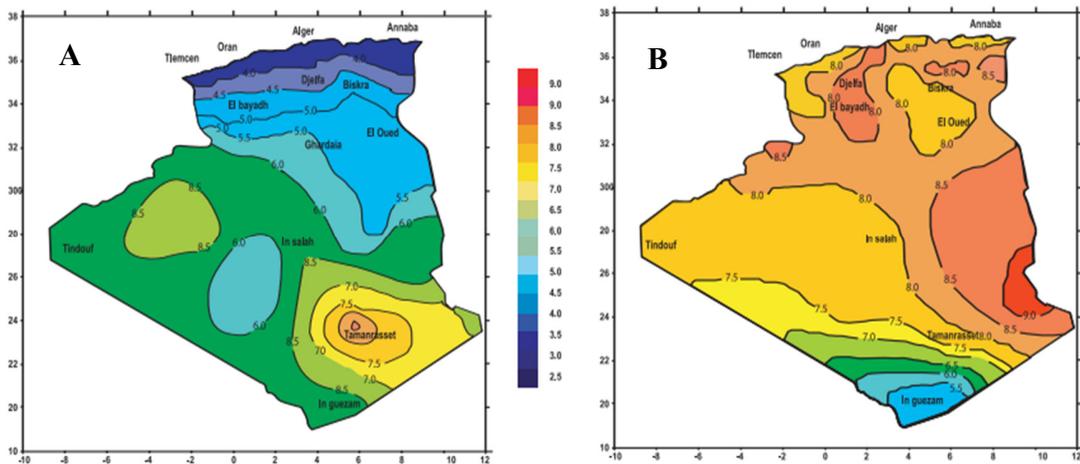


Figure I.4 : Irradiation globale journalière reçue sur un plan normal au mois de (A) Décembre et (B) Juillet respectivement [16].

### I.3.4. Les applications de l'énergie solaire

Aujourd'hui, nous captions l'énergie solaire pour chauffer les maisons, l'eau et pour produire de l'électricité, et cela au moyen de trois différentes méthodes et technologies on cite le solaire thermique et le solaire photovoltaïque.

## II.4. Le solaire photovoltaïque

L'électrification par énergies renouvelables est une solution attractive en site isolé, à accès difficile ou éloigné du réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer dans ce domaine mais ils nécessitent un raccordement de dispositifs capables de convertir l'énergie solaire en énergie électrique exploitable à des fins d'alimentation.

### I.4.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de photons lumineux en courant électrique par l'intermédiaire d'un matériau semi-conducteur. La majorité des capteurs photovoltaïques actuels, à base de silicium monocristallin, poly cristallin ou amorphe.

La majorité des cellules photovoltaïques sont à base de silicium dopé. Lorsqu'une cellule est exposée au rayonnement solaire (figure.1-6), les photons transmettent leur énergie aux atomes de la jonction, énergie qui permet aux atomes de libérer des électrons, [17] générant ainsi des paires électrons - trous qui seront séparées par le champ électrique de la barrière de potentiel. Une fois les charges P et N isolées, il suffira de fermer le circuit entre ces deux zones pour mettre en mouvement les électrons et créer ainsi un courant électrique.

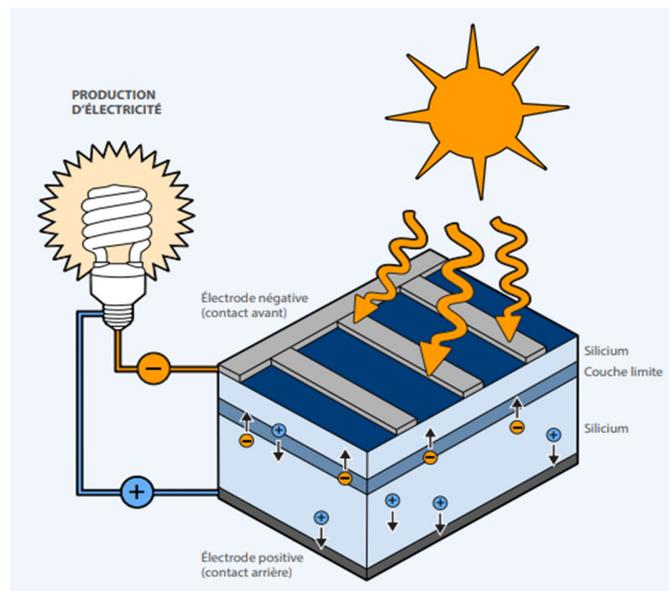


Figure I.5 : Illustration sur l'effet photovoltaïque.

### **I.4.2. Les grandeurs d'un système photovoltaïque**

Pour mesurer les performances énergétiques d'un module photovoltaïque, une courbe courant-tension (courbe I-V), la courbe puissance-tension (courbe P-V) permet quant à elle de déterminer avec précision la puissance maximale du module.

Les principaux paramètres électriques mesurés pour déterminer la performance d'un module photovoltaïque sont :

- VCO : la tension de circuit ouvert.
- ICC : le courant de court-circuit.
- VMPP : la tension au point de puissance maximale.
- IMPP : le courant au point de puissance maximale.
- MPPT : la puissance au point de puissance maximale en sortie du MPPT.
- PModule : la puissance en sortie d'un module photovoltaïque.

$$\eta_{MPP} = \frac{P_{DC}}{P_{MPP}} \quad (1.1)$$

Où  $P_{DC}$  est la puissance à l'entrée de l'onduleur (coté continu à la sortie du MPPT) et  $P_{MPP}$  est le point maximum déterminé par le MPPT sur la courbe puissance-tension à la sortie des modules.

### **I.4.3. Les différentes technologies**

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel.

#### **I.4.3.1. Cellule en silicium monocristallin**

Le silicium fondu se solidifie en formant 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.

#### **I.4.3.2. Cellule en silicium poly cristallin**

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.



Figure I.6 : Cellule poly cristalline et monocristalline

#### I.4.3.3. Cellule en silicium amorphe

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncée.



Figure I.7 : Cellule photovoltaïque en silicium amorphe.

On trouve aussi certaines cellules qui utilisent d'autres matériaux :

- GaAs : Arséniure de gallium. Matériau monocristallin, qui fournit des cellules en couches minces ayant un très bon rendement mais dont le prix les destine au domaine spatial. •
- CdTe : Tellurure de cadmium. Matériau poly cristallin déposé sur un substrat en verre.
- CIS : Di séléniure de cuivre et d'indium. Ce matériau donne des photopiles très stables dans le temps. •
- TiO<sub>2</sub> : Dioxyde de titane. Cette technologie en est au stade expérimental.

Ces technologies sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements bien supérieurs au silicium et une durée de vie plus grande.

#### I.4.4. Les caractéristiques d'une cellule

##### I.4.4.1. Caractéristique I-V d'une cellule

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes suivantes : 25°C, 1000W/m<sup>2</sup> et une masse d'aire de AM=1.5

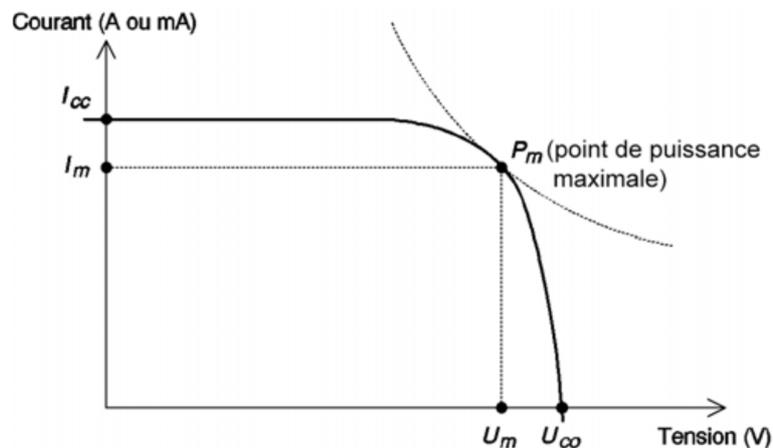


Figure I.8 : Caractéristique I-V d'une cellule

##### I.4.4.2. Caractéristique P-V d'une cellule

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc..), la puissance électrique P(W) disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni 'I' par une tension continue donnée 'U':

$$P=U \times I \quad (1.2)$$

P (W), Watt : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

U (V), Volt : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I (A), Ampère : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

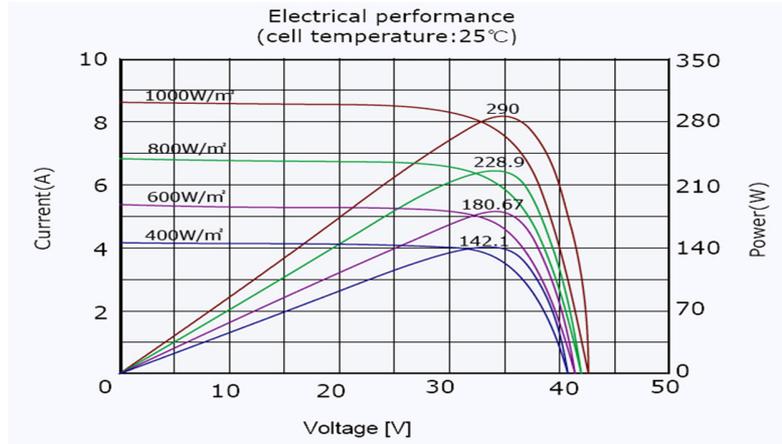


Figure I.9 : Performances électriques d’un module.

**a. La puissance max**

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum  $P_{max}$  idéale correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  multipliée par le courant de court-circuit :

$$P_{Max\ idéal\ e} = V_{CO} \times I_{CC} \tag{1.3}$$

$P_{max\ idéal\ e}$  (W), Watt : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

$V_{CO}$ (V), Volt : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I_{CC}$ (A), Ampère : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV.

**b. Le facteur de forme**

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}$ , dans des conditions d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, et le produit du courant de court-circuit  $I_{CC}$  par la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC} \times V_{CO}} \tag{1.4}$$

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{CC} \times V_{CO}} \tag{1.5}$$

FF. : Facteur de forme

$P_{\max}$  (W): Puissance maximale aux bornes de la cellule PV.

$V_{CO}$  (V): Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I_{CC}$  (A): Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV.

Le facteur de forme FF est de l'ordre de 70 % pour une cellule de fabrication industrielle.

Par extension et par facilité, les professionnels caractérisent un module PV simplement par :

- La puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard (STC) ;  $P_{\text{nominale}}=P_{\max}$  (Wc ou  $W_p$ ) Watt.
- La tension nominale du module PV (en général 12, 24, 48  $V_{cc}$  ;  $V_{\text{nominale}}$  (V)).

#### I.4.4.3. Les paramètres influent sur la caractéristique $I=f(V)$

##### a. L'influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (1-11) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes :

Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.

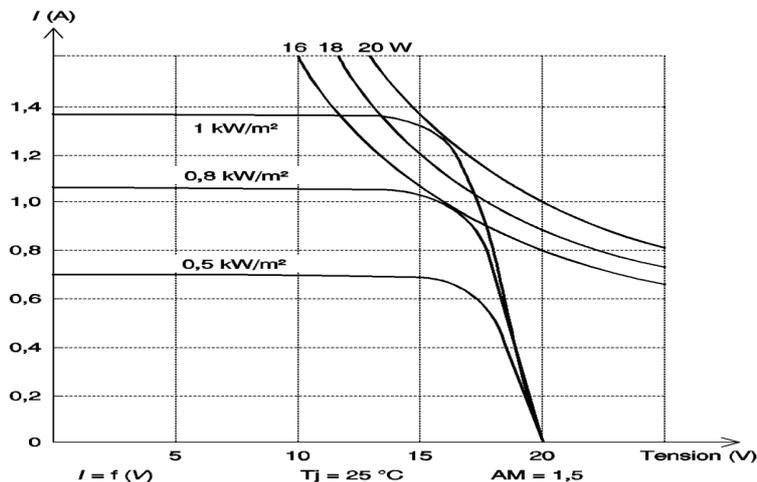


Figure I.10 : Influence de l'éclairement sur les courbes courant-tension.

### b. L'influence de la température

C'est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les réchauffer ; de plus une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en électricité mais se dissipe sous forme de chaleur.

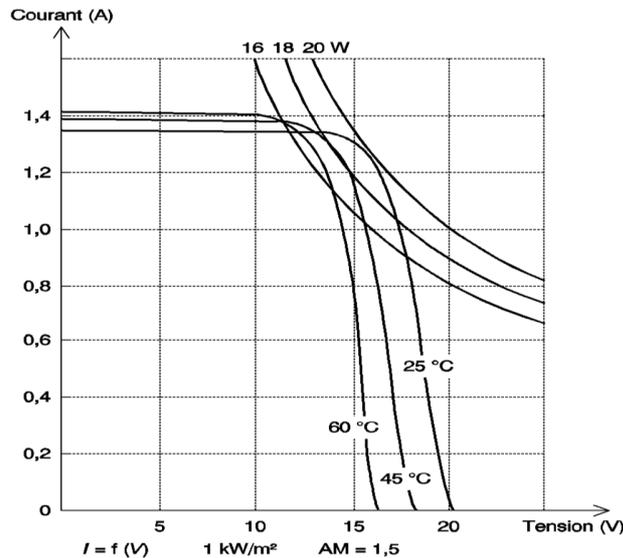


Figure I.11 : Influence de la température sur les courbes courant-tension.

#### I.4.5. Le module photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque produit une tension d'environ 0,6V, pour augmenter cette tension on connecte un certain nombre des cellules (36 ou 72 cellules) en série pour aboutir à une tension désirée de l'ordre de 21V. Quand les cellules connectées en série sont placées dans une armature, l'ensemble constitue un module photovoltaïque. Un module de 36 cellules fournit une tension appropriée pour charger une batterie de 12V, et pareillement un module de 72 cellules est approprié pour une batterie de 24V.

#### I.4.6. Le générateur photovoltaïque

Des modules multiples peuvent être câblés ensemble en série ou parallèle pour livrer la tension et le courant nécessaire. Le groupe de modules s'appelle un panneau photovoltaïque

#### I.4.6.1. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste la même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

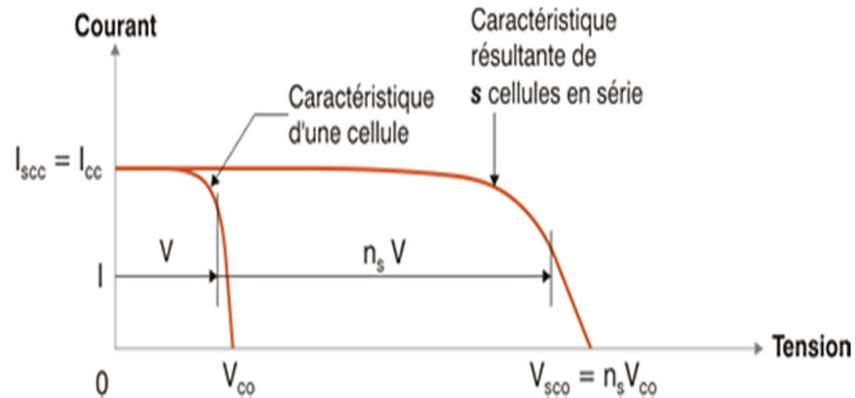


Figure I.12 : Caractéristique résultante des cellules associées en série.

#### I.4.6.2. Association en parallèle

En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

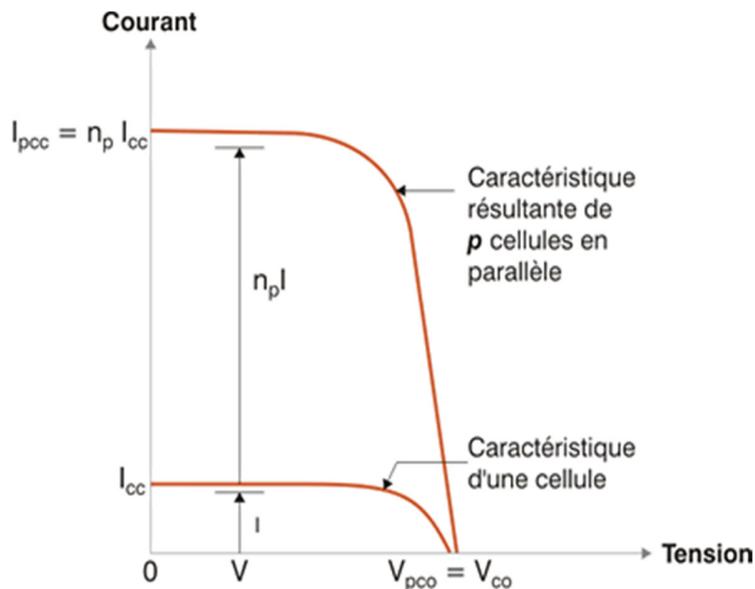


Figure I.13 : Caractéristique résultante des cellules associées en parallèle.

### I.4.6.3. Association mixte (série parallèle)

Pour obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

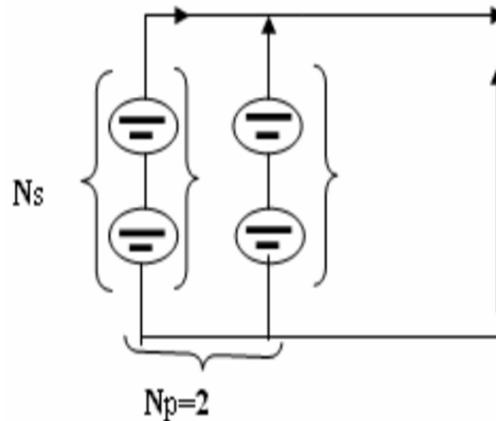


Figure I.14 : Association mixte des modules.

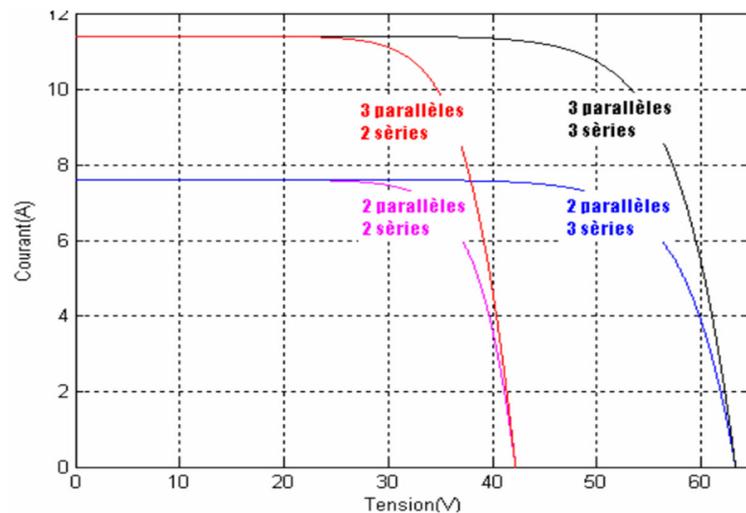


Figure I.15 : Caractéristique I-V pour l'association mixte [18].

### I.4.7. Le système photovoltaïque

Les différents éléments constituant le système photovoltaïque (*figure.1-16*), générateur d'énergie électrique, sont essentiellement : le module ou le panneau solaire, la batterie d'accumulateur, le régulateur et l'onduleur. Ils sont représentés dans le schéma bloc suivant :

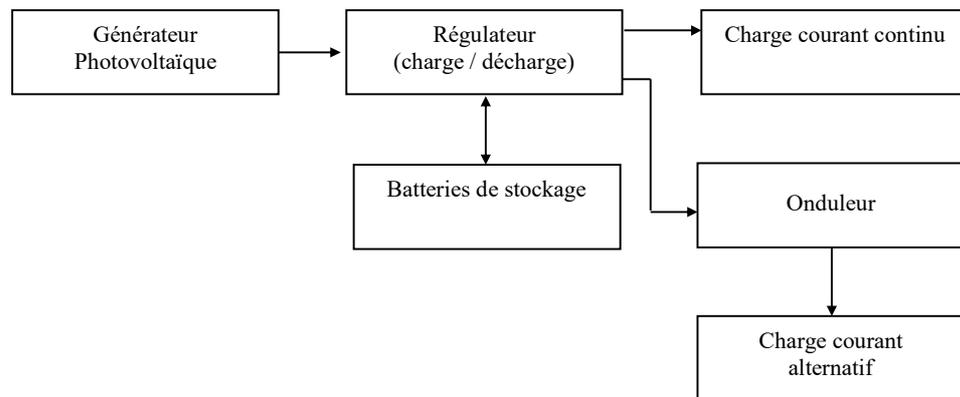


Figure I.16 : Schéma bloc d'une installation PV autonome avec stockage d'énergie.

#### I.4.7.1. Le générateur photovoltaïque

La puissance électrique crête délivrée par un module s'avérant très insuffisante, dans la majorité des applications, il faudra donc associer plusieurs modules. Ce groupement s'effectue entre des modules ayant des caractéristiques identiques pour former des associations en série ou en parallèle ou encore série parallèle. Cette interconnexion de modules entre eux définit la notion de champ photovoltaïque.

#### I.4.7.2. La batterie

Les caractéristiques de l'énergie solaire posent le problème du stockage au niveau des installations photovoltaïque. En effet, l'apport et les besoins en énergie ne coïncident pas, les besoins augmentent là où les apports solaires n'existent pas. Le moyen le plus adapté aux systèmes photovoltaïques est le stockage électrochimique. Le système le plus couramment utilisé est la batterie d'accumulateur électrochimique qui permet le stockage d'énergie électrique sous forme chimique pour la restituer sur demande grâce à des réactions réversibles.

#### I.4.7.3. Le régulateur

La batterie d'accumulateurs est l'un des éléments les plus fragiles du système photovoltaïque. En effet, une charge excessive entraîne un dégagement gazeux dû aux réactions internes, ce qui provoque l'oxydation des électrodes, de même qu'une décharge profonde provoque la sulfatation des électrodes, c'est à dire une couche blanche de sulfate de plomb qui empêche toute recharge. Afin de contrôler au mieux les conditions de charge et de décharge on

intercale entre le générateur et la batterie un dispositif de régulation appelé régulateur de charge et de décharge, il est l'électronique entièrement automatique à laquelle sont reliés le panneau photovoltaïque, la batterie, ainsi que les équipements destinataire de l'électricité solaire [19].

#### **I.4.7.4. L'onduleur**

Un onduleur est un dispositif électronique statique servant à convertir le courant électrique continu produit par le générateur photovoltaïque en courant alternatif (signal carré ou sinusoïdal) avec la fréquence souhaitée, dont il existe une très grande variété sur le marché.

### **I.4.8. Les différents systèmes photovoltaïques**

Il existe différents types de générateurs en fonction du service et des applications recherchées :

#### **I.4.8.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes**

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum [18].

#### **I.4.8.2. Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau**

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires, ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique [18].

### **I.4.8.3. Les systèmes photovoltaïques hybrides**

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes photovoltaïques sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée ou lorsque l'énergie doit être fournie sur demande [18].

### **I.4.8.4. Les systèmes photovoltaïques au fil du soleil**

L'énergie électrique produite par les modules solaires est directement utilisée par le récepteur, il n'y a donc pas de stockage électrochimique. Généralement les générateurs au fil du soleil sont destinés à alimenter des moteurs électriques en courant continu ou alternatif (dans ce cas un appareil de conversion d'énergie est requis) [20].

## **I.5. Les technologies solaires à concentration**

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel. Le récepteur absorbe l'énergie réfléchi par le miroir et la transfère à la fluide thermodynamique. Les systèmes à concentration en lignent généralement un facteur de concentration inférieur à celui des concentrateurs ponctuels [21].

### **I.5.1. Le principe de fonctionnement des systèmes à concentration.**

Un capteur à concentration est un capteur solaire comportant un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement reçu. Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200 °C et 2000 °C, avec un rendement supérieur à 70 %. Cette chaleur primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés industriels, par exemple sous forme de vapeur d'eau, ou pour effectuer des transformations ou des synthèses de matériaux, ou bien être convertie en vecteurs énergétiques comme l'électricité ou l'hydrogène. Le temps de retour énergétique des installations solaires à concentration est que de 5 mois et leur durée de vie est estimée entre 25 et 30 ans [22].

### I.5.2. Les types des concentrateurs solaires

On distingue 3 types de centrales solaires, en fonction de la méthode de focalisation des rayons solaires :

#### I.5.2.1. Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques

Ce sont des alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques Fig I.17, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal, où circule le fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers la centrale elle-même. La température du fluide peut monter jusqu'à  $500^{\circ}\text{C}$ . Ce type de centrale est le plus fréquent [23].

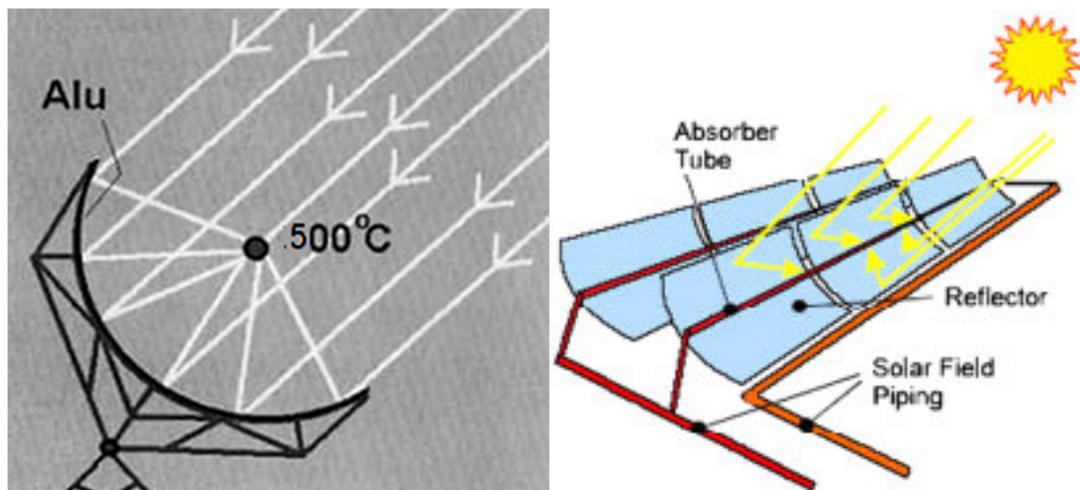


Figure I.17 : Centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.

#### I.5.2.2. Les centrales à collecteurs paraboliques.

La même forme que nos antennes paraboliques, mais en plus grand, les paraboles ont un diamètre de 10 à 20 m et sont orientables. Le rayonnement solaire est concentré sur la focale de la parabole (Fig I.18), où se trouve une mini-centrale électrique. La température obtenue atteint  $800^{\circ}\text{C}$ . La mini-centrale produit de l'électricité grâce à un moteur Stirling, qui fonctionne non pas avec du carburant mais grâce à un apport de chaleur extérieur. Les pistons du moteur se déplacent sous l'effet de l'expansion d'un gaz en un point où arrive la chaleur et de sa contraction en un point plus froid [23].

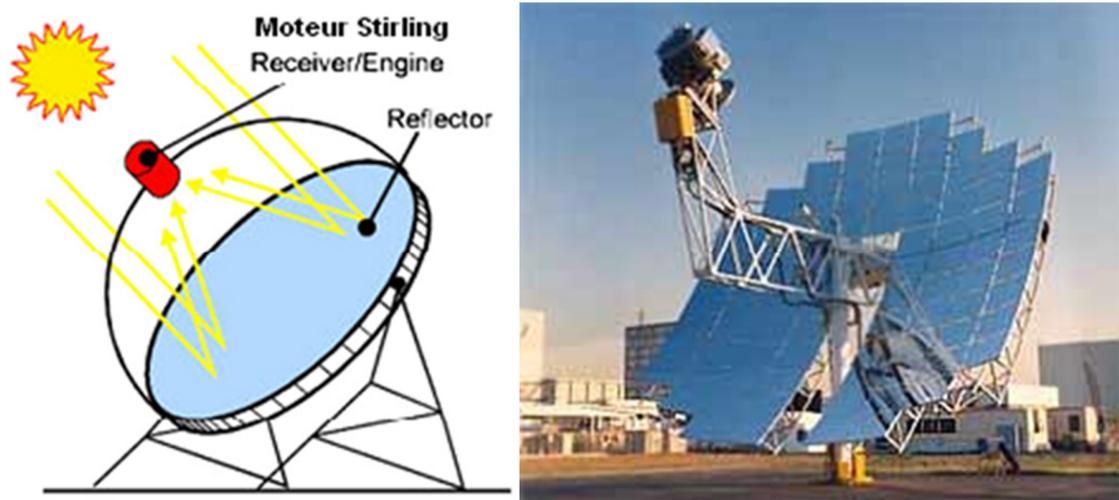


Figure I.18 : Les centrales à collecteurs paraboliques.

### I.5.2.3. Les centrales à tour

Une centrale à tour (Fig I.19) est constituée d'un champ de capteurs solaires spéciaux appelés héliostats orientables qui concentrent tous le rayonnement solaire avec précision sur un même point. La température obtenue ainsi est de  $600^{\circ}\text{C}$ . Un liquide caloporteur envoyé dans une chaudière située en haut de la tour transforme le liquide en vapeur. La vapeur fait tourner des turbines qui entraînent des alternateurs produisant de l'électricité, voir la figure suivante [23] :

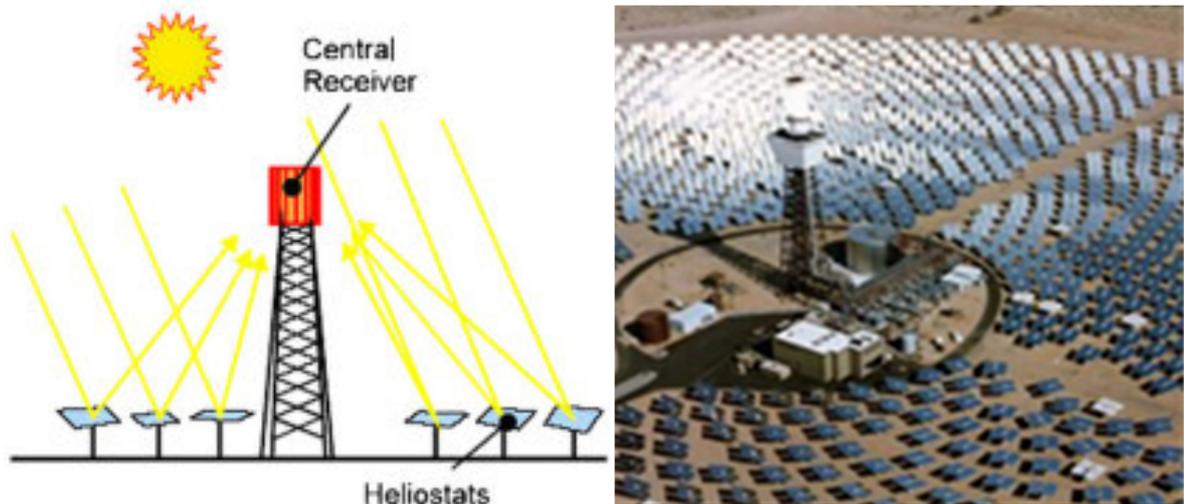


Figure I.19 : Centrale à tour.

## **II.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les énergies renouvelables, on a commencé par une introduction, la classification et les différentes familles des énergies renouvelables puis, nous avons parlé de l'énergie solaire, du rayonnement, et du potentiel solaire de l'Algérie. Ensuite, on a expliqué en bref l'effet photovoltaïque et les différentes technologies des cellules PV, ainsi que les différents types d'installations PV. Les technologies solaires à concentration font partie des applications du solaire thermique et un bref aperçu est aussi donné dans ce chapitre.

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

# Modélisation mathématique de l'éclairement solaire

## **II.1. Introduction**

Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné [24]. 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 le modèle de Capderou.

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 du modèle Capderou, le modèle Capderou [25], qui sert de référence aux concepteurs de systèmes énergétiques solaires, reste le plus utilisé en Algérie.

## **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 [26]. 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. [27, 28].

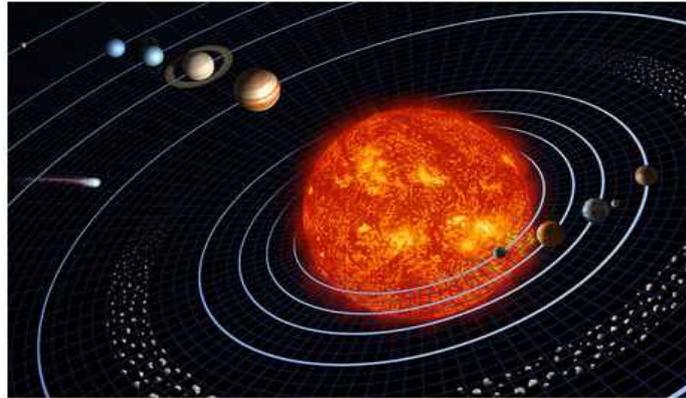


Figure II.1 : Image de l'étoile soleil du système solaire.

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

Sur la structure du soleil illustrée sur la figure (II.2), on distingue trois régions particulières [27,29, 30] :

- ❖ **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, décroissant 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).

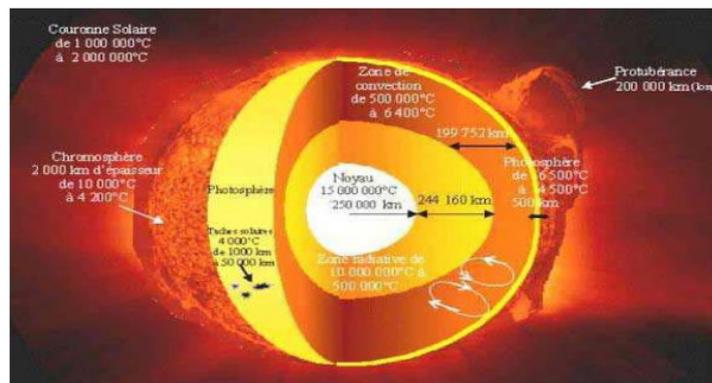


Figure II.2 : Structure de l'étoile soleil.

### 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°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.

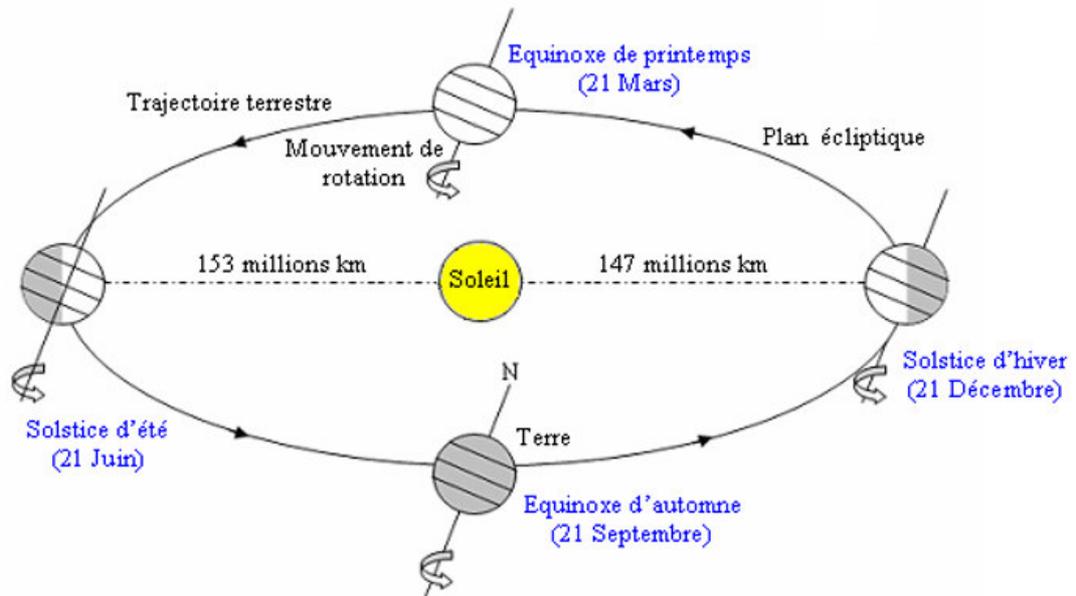


Figure II.3 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.

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

Le mouvement que paraît 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 :

- 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 apparaît 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.

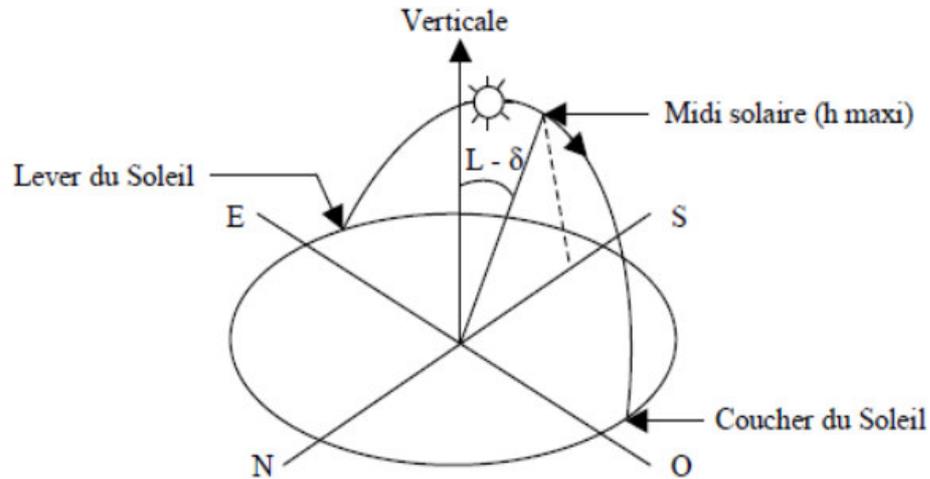


Figure II.4 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude (L).

#### 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).

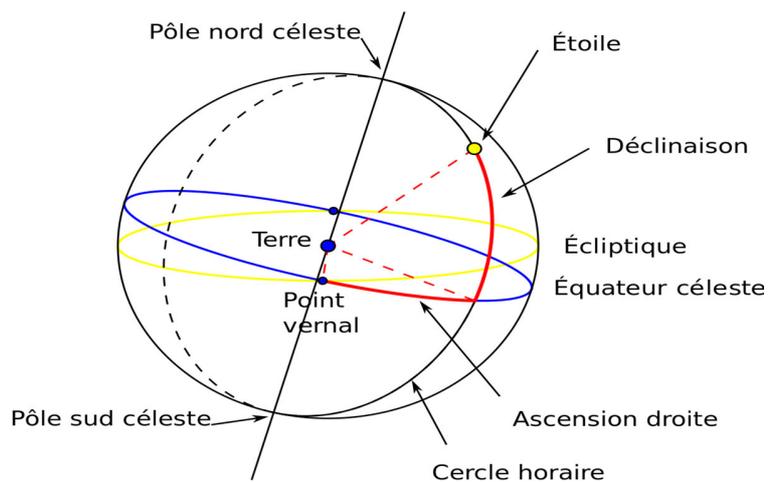


Figure II.5 : La sphère céleste.

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 [31].

#### ➤ 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  $+90^\circ$  [31].

#### ➤ 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) [31].

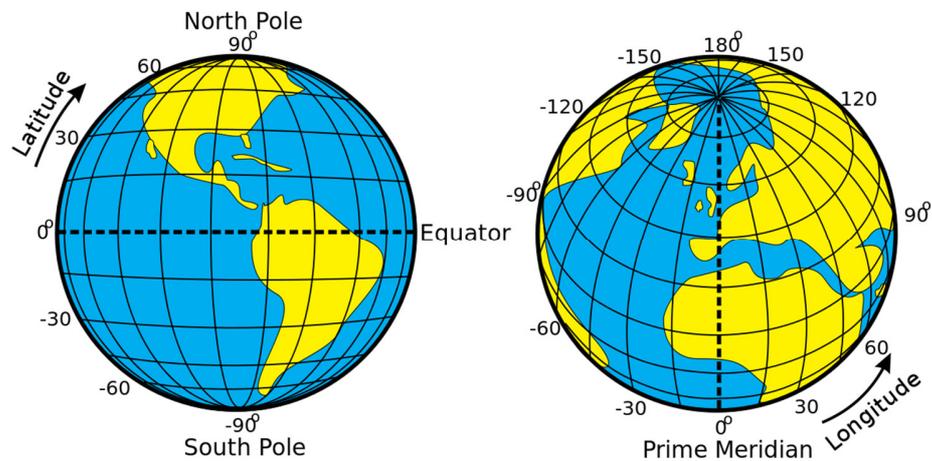


Figure II.6 : Les coordonnées terrestres.

## 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 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 moyenne. L'équation du temps

est donnée en fonction du jour de l'année  $N$  avec une bonne précision par la formule suivante [25] :

$$ET = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot N') - 7.53 \cdot \cos(N') - 1.5 \cdot \sin(N') \quad (2.1)$$

$$\text{Avec : } N' = \frac{360}{365} \cdot (N - 81) \quad (2.2)$$

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) :

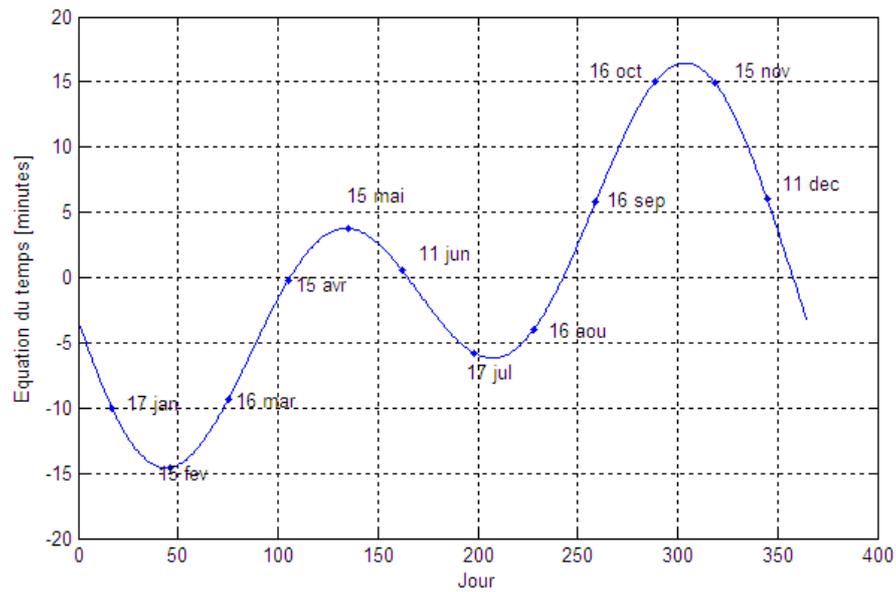


Fig. II.7: Variation de l'équation du temps en fonction du jour.

#### 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 [27] :

$$TU = TSM + \frac{L}{15} \quad (2.3)$$

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.

$$TL = TU + C_1 + C_2 \quad (2.4)$$

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 ( $h_1$ , $h_c$ )

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

$$\omega_1 = \cos^{-1}[-\tan \delta \cdot \tan \varphi] \quad (2.5)$$

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

$$(TSV)_1 = h_1 = 12 - \frac{\omega_1}{15} \quad (2.6)$$

L'angle horaire  $\omega_c$  au coucher du soleil est l'opposé de l'angle horaire au lever du soleil, on a donc  $\omega_c = -\omega_1$ , l'heure solaire au coucher du Soleil a donc pour valeur :

$$(TSV)_c = h_c = 12 - \frac{\omega_c}{15} = 12 + \frac{\omega_1}{15} \quad (2.7)$$

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

La durée du jour est donnée par la relation suivante [32]:

$$d_j = (TSV)_c - (TSV)_1 = 2 \cdot \frac{\omega_1}{15} \quad (2.8)$$

## 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 [33], 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 [34]. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante utilisé par Capderou dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (ASA) :

$$\sin(\delta) = 0.398 \cdot \sin\left[\frac{360}{365} \cdot (N - 82) + 2 \cdot \sin\left\{\frac{360}{365} \cdot (N - 2)\right\}\right] \quad (2.9)$$

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.8) :

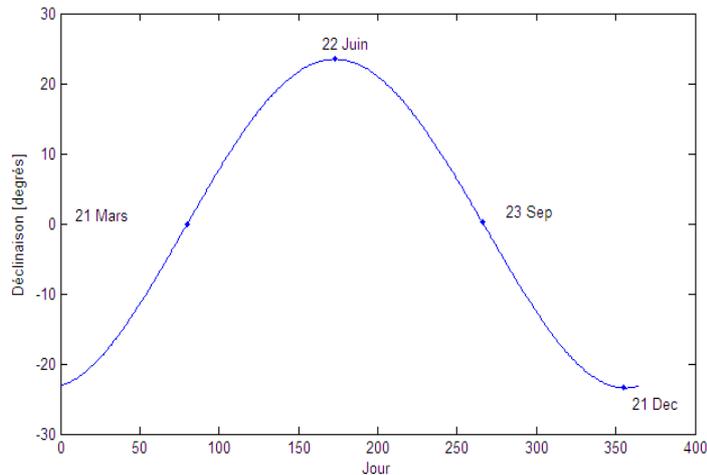


Fig. II.8: Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.

#### 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 [35], 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 [34]. 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.

$$\text{TSV} = t - \text{DE} + (\text{ET} + 4 \cdot \lambda) / 60 \quad (2.12)$$

### 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  $\chi_s$ ) [36]. Le complément de  $\gamma_s$  ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelée angle zénithal  $\theta_z$ .

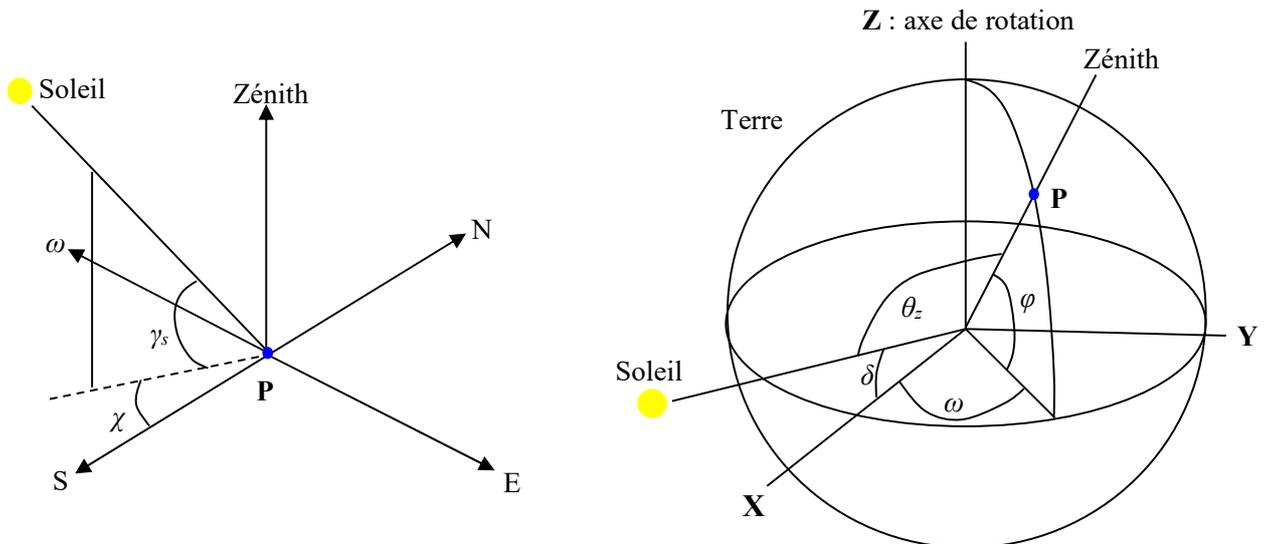


Fig. II.9: Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil).

### 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.

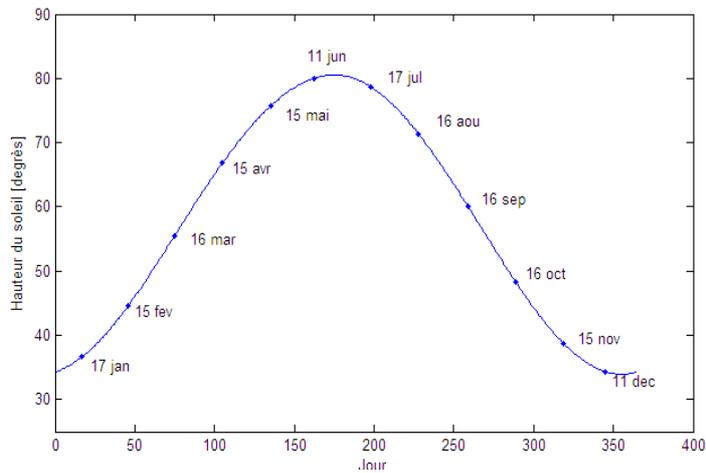


Fig II.10: Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.

### 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  $-180 \leq \chi_s \leq 180^\circ$  [34]. 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).

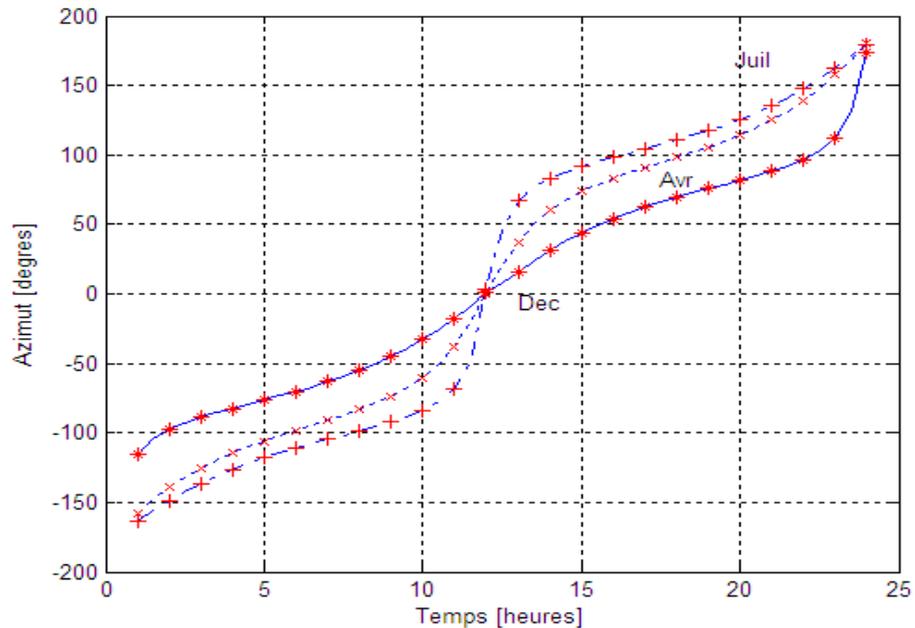


Fig II.11: Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.

### 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 [29, 37] :

#### 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.

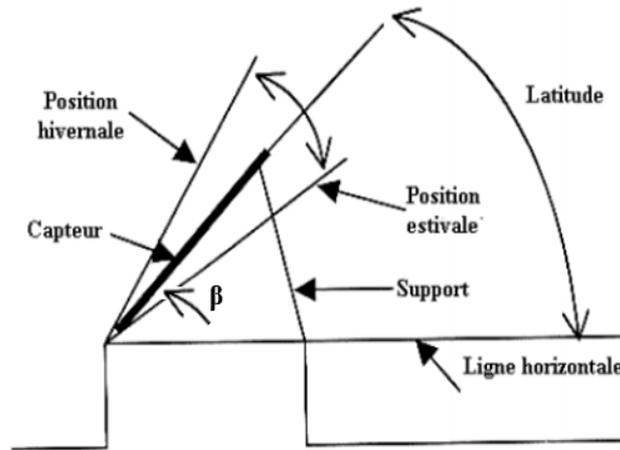


Fig II.12 : Angle d'inclinaison d'un capteur solaire.

### 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.

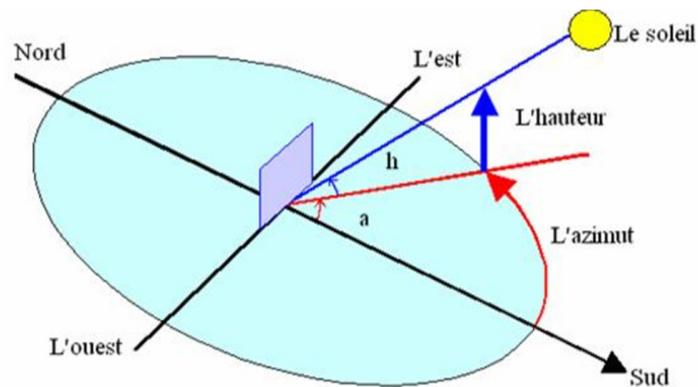


Figure II.13 : Les angles caractérisant un capteur plan incliné.

### II.2.4. 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.2.4.1. 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 [38].

### II.2.4.2. 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 [31].

### II.2.4.3. 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 :

$$\text{Albédo } (\rho) = \frac{\text{Energie réfléchie}}{\text{Energie reçue}} \quad (2.15)$$

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 fraîche	0.8 à 0.95

#### II.2.4.4. 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 [38].
- ❖ Sur une surface inclinée ( $IG_i$ ) : Rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements : direct, diffus et réfléchi (voir fig II.14).

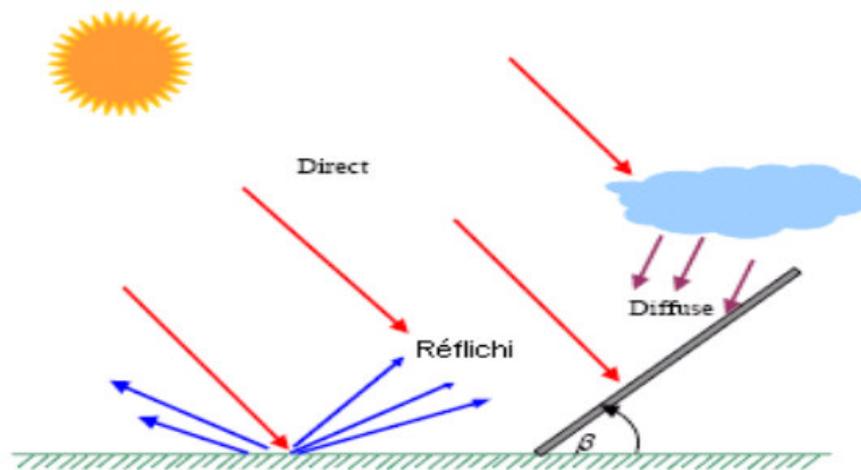


Figure II.14 : Les trois composantes du rayonnement solaire incident sur un plan incliné.

### II.3. Mesure du rayonnement solaire

Les instruments de mesure du rayonnement solaire peuvent être classés en trois catégories [39] :

- 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.3.1. Mesure du rayonnement direct (le Pyrhéliomètre)

Mesure de l'éclairement énergétique direct (Fig II.15) : 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 pyrhéliomètre 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.

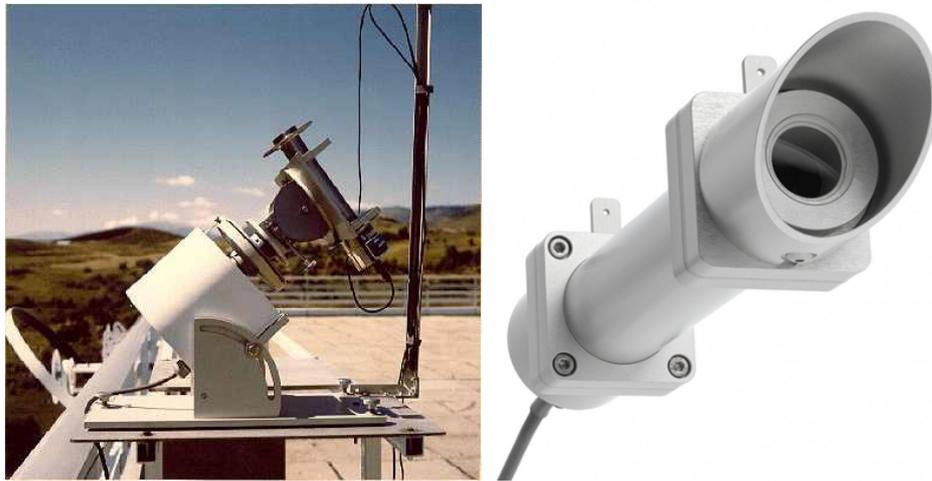


Figure II.15 : Pyrhéliomètre pour la mesure de l'éclairement direct normal.

### II.3.2. Mesure du rayonnement diffus et global (le Pyranomètre)

Les mesures effectuées par un pyranomètre (Fig II.16) 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.



Figure II.16 : Pyranomètre pour la mesure du rayonnement global et diffus.

### II.3.3. 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.17) : 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.



Figure II.17 : Héliographe pour la mesure de l'insolation.

## II.4. 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  $\mu\text{m}$  [40].

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 [32]. 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 [41].

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.4.1. Paramètres de l'atmosphère

#### II.4.1.1. 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 [36]. 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 :

$$m_A = 1 / \text{Sin}(\gamma_s) \quad (2.16)$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante (Fig II.18):

$$m_A = \frac{1}{\text{Sin}(\gamma_s) + [9.40 \cdot 10^{-4} \cdot \{\text{Sin}(\gamma_s) + 0.0678\}^{-1.253}]} \quad (2.17)$$

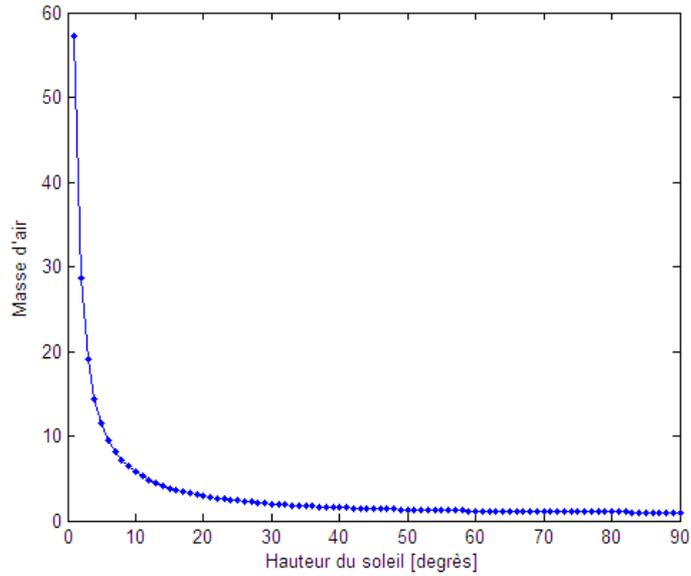


Figure II.18 : Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil.

#### II.4.1.2. Epaisseur optique de l'atmosphère

En 1922, Linke [42] 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 [43] utilisa les données spectrales publiées par Feussner et Dubois en 1930 [44] 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.

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \cdot m_A) \quad (2.18)$$

Dans cette formule utilisé depuis fort longtemps, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que :  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2$  et le  $\text{CO}$  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.19):. En 1986, Louche [45] 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.

$$(\delta_R)^{-1} = 6.5567 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (2.19)$$

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  $\delta_R$ .

$$(\delta_R)^{-1} = 6.6296 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (2.20)$$

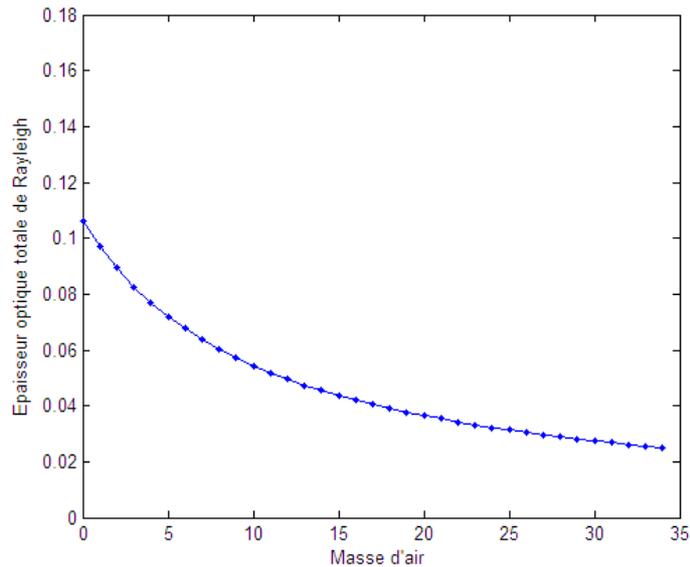


Figure II.19 : Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.

#### II.4.2. 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.20).

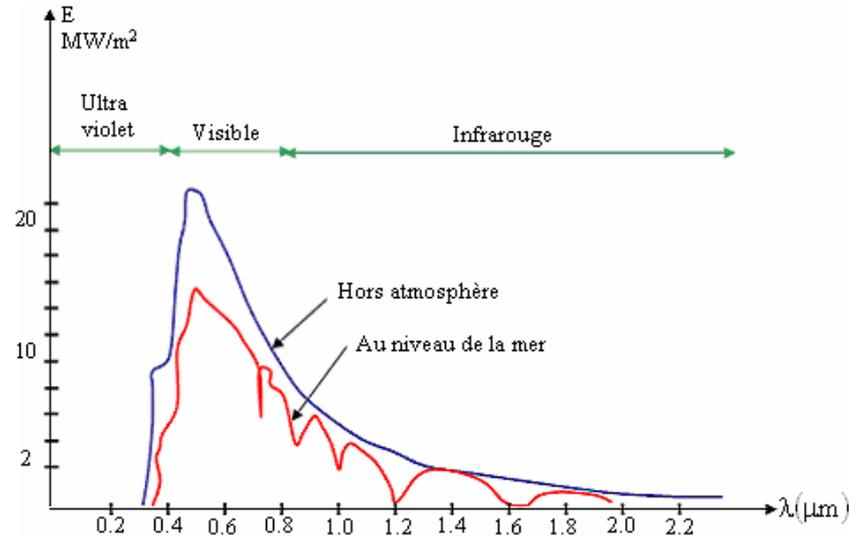


Figure II.20 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

### II.4.3. 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 [46, 47]. 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 ( $T_L$ ) [42].

En 1987 Capderou [25] ; 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.4.3.1. Absorption par la vapeur d'eau

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

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

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

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

### II.4.3.2. Absorption par les gaz et diffusion de Rayleigh

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

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

Alt est l'altitude en km.

### II.4.3.3. Diffusion par les aérosols

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

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

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

### II.5.1. Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal par ciel clair

#### II.5.1.1. 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 [48].

### II.5.1.2. Eclairage hors atmosphère

En dehors de l'atmosphère le rayonnement solaire est d'intensité  $I_0=1367 \text{ W/m}^2$ . 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) [50].

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

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

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

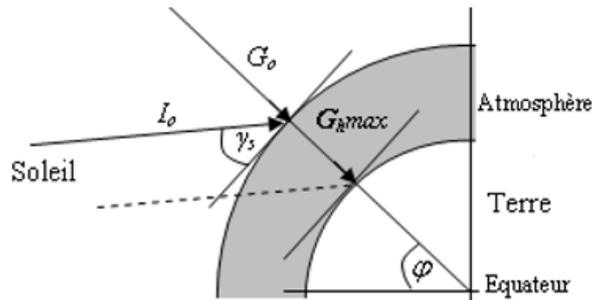


Figure II.21 : Rayonnement solaire hors atmosphère.

### II.5.1.3. Eclairage global incident sur un plan horizontal

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (ASA) [25], 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.5.1.4. Eclairement 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  $T_L$  :

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

### II.5.1.5. Eclairement 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  $\gamma_s$  :

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

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

$$b = \log(T'_L) - 2.80 + 1.02 \cdot [1 - \text{Sin}(\gamma_s)]^2 \quad (2.30)$$

## II.5.2. Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque par ciel clair

### II.5.2.1. 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  $\text{Cos}(\delta^{\text{inc}})$  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) :

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

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

$$b' = \text{Cos}(\delta) \cdot [\{\text{Cos}(\alpha) \cdot \text{Cos}(\gamma) \cdot \text{Sin}(\varphi)\} + \{\text{Sin}(\gamma) \cdot \text{Cos}(\varphi)\}] \quad (2.33)$$

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

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

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 (II.22) :

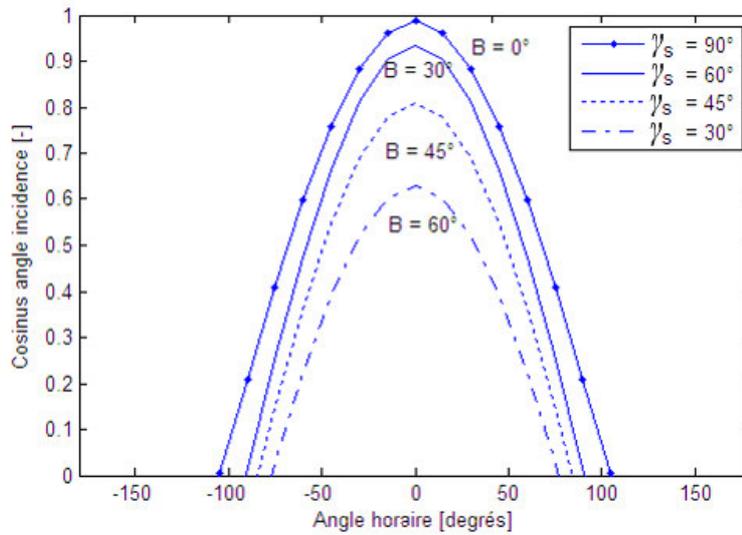


Figure II.22 : Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.

### II.5.2.2. Eclairement incident sur un plan quelconque

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

### II.5.2.3. Eclairement direct incident sur le plan quelconque

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

$$I_{B_i} = I_N \cdot \text{Cos}(\delta^{\text{inc}}) \quad (2.36)$$

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

### II.5.2.4. Eclairement diffus incident sur le plan quelconque

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

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

$$\text{Avec : } \delta^a = \rho \cdot IB_h \quad (2.39)$$

#### 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 :

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

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

$\delta^d$  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  $\delta^{i'}$  :

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

##### ➤ Le diffus directionnel

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

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

$\delta^d$  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.5.2.5. Calcul du rayonnement global

M. Capderou dans l'ASA [25], 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.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 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. Le modèle utilise des équations propres pour déterminer les paramètres géométriques (déclinaison solaire, angle horaire, hauteur du soleil, azimut 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, ces équations ont été également programmées et représentées graphiquement.

Dans le prochain chapitre un logiciel de programmation visuel 'le Delphi 5' a été utilisé pour le développement d'une application permettant le calcul de l'éclairement solaire. Une confrontation des valeurs de l'éclairement solaires estimées par notre programme et celle mesurées sur le site de Ghardaïa sera élaborée dans un but d'une validation du programme.

---

## **CHAPITRE III**

# **Développement d'un outil informatique pour l'estimation de l'éclairement solaire**

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

Dans un chapitre précédent, nous avons réalisé une modélisation sous environnement Matlab [51] de l'éclairement solaire par le modèle Capderou pour une incidence sur un plan horizontal et incliné. Cette partie est consacrée à la traduction de ce modèle sous interface graphique, facilitant l'utilisation et l'exploitation des résultats, nous devons alors, pour cela, utiliser un langage visuel orienté objet, et c'est le logiciel Delphi 5.0 [52] de Borland que nous avons choisi. Les tests réalisés sur le programme réalisé seront discutés. Une visualisation numérique et graphique des résultats obtenus est assurée et un rapport détaillé est établi.

### **III.2. Organigramme de l'application développée**

L'organigramme général (Fig III.1) représentant les fonctions du programme réalisé est décrit comme suit :

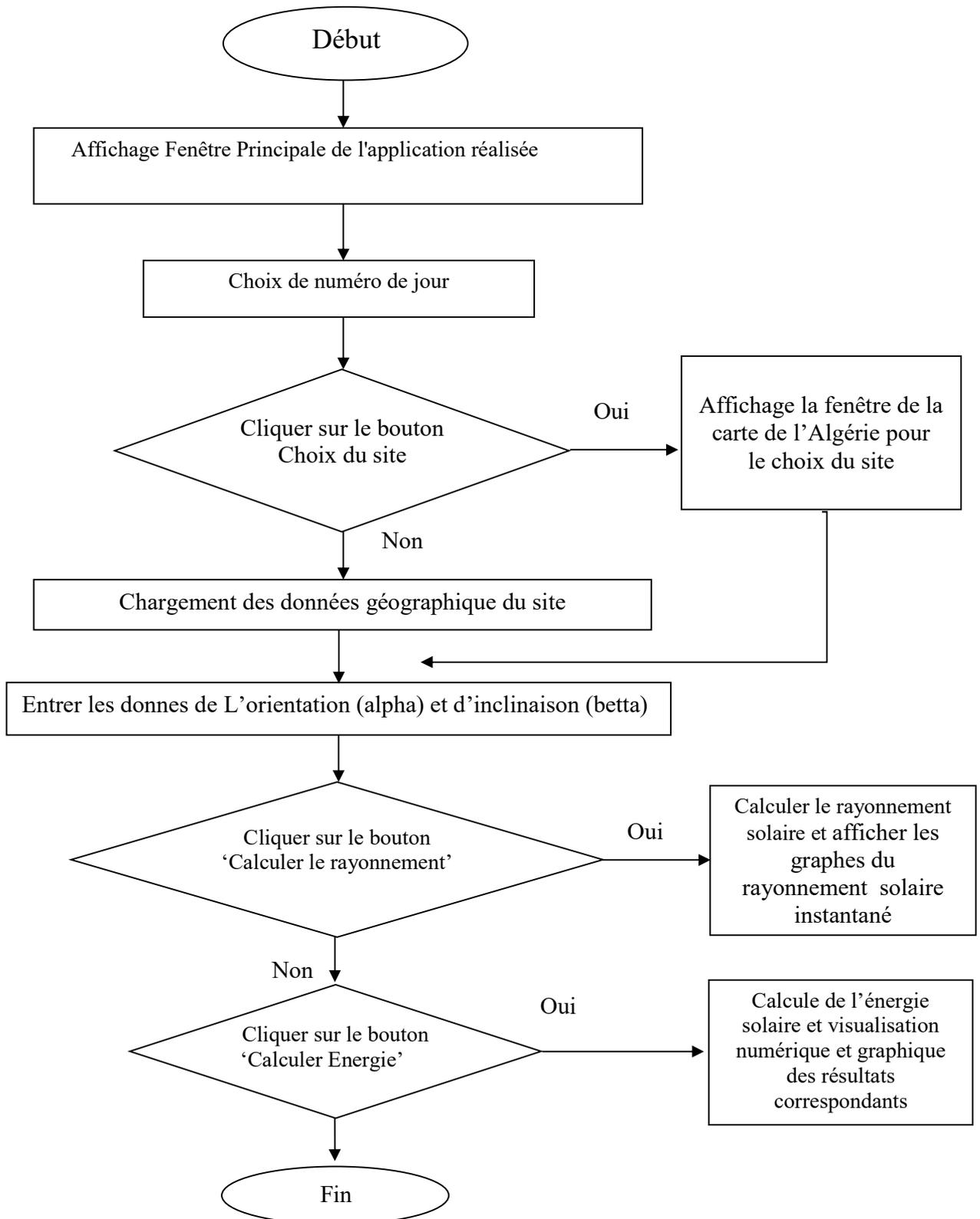


Figure III.1 : Organigramme général de l'application pour le calcul de l'éclairement solaire.

### III.3. Présentation de l'application développée

#### III.3.1. Feuille principale

L'application réalisée est basé sur la modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal en utilisant le modèle Capderou. Pour la présentation de l'application, les étapes sont les suivantes : Après l'exécution de l'application, la feuille de la figure III.2 est affichée.

Depuis cette feuille on peut calculer l'éclairement et l'énergie solaire par le modèle Capderou pour une incidence sur un plan horizontal, en intégrant les données relatives au site (latitude, longitude, altitude et albédo) dans les zones de textes et en cliquant sur le bouton 'Calculer Capderou'. Une visualisation numérique et graphique des résultats obtenus est donnée en cliquant sur les boutons 'Instantané' et 'Energie', et en permutant entre les différents onglets de la feuille d'affichage. Un rapport des données et des résultats est réalisé, pour l'afficher il suffit de cliquer sur le bouton 'Imprimer'. A la fin de chaque exécution un fichier .DAT contenant un résumé des résultats peut être créé avec simple clique sur le bouton 'Enregistrer résultats'. Ce fichier peut être utilisé pour d'autres applications ou logiciels servant les concepteurs en systèmes à énergie solaire.

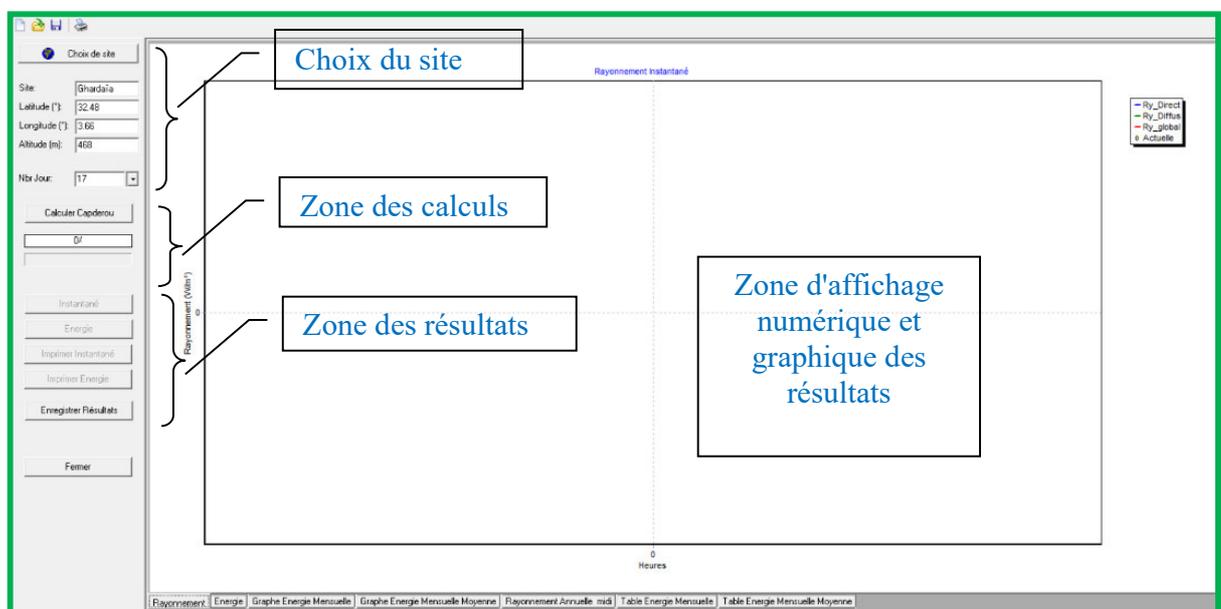


Figure III.2 : Feuille de présentation de l'application réalisée.

### III.3.2. Menu principal

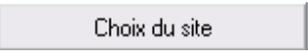
Les fonctionnalités du menu de cette feuille sont les suivantes :

- Fonction '**Fichier**' permet de :

Fichier		
	Nouveau	Ctrl+N
	Enregistrer	Ctrl+E
	Imprimer	Ctrl+I
	Ouvrir	Ctrl+O
	Ouvrir Rapport	Ctrl+P
	Quitter	Ctrl+Q

- Ouverture d'un nouveau projet ;
- Enregistrement des données ;
- Impression des données ;
- Ouverture des données ;
- Ouvrir des rapports déjà enregistrés ;
- Fin d'exécution.

### III.3.3. Choix du site

Si un lieu est défini et ses coordonnées ne sont pas connues, dans ce cas il faut se servir du bouton  qui affichera la feuille de la figure III.3. Cette feuille permet la sélection de n'importe quel site sur la carte d'Algérie.

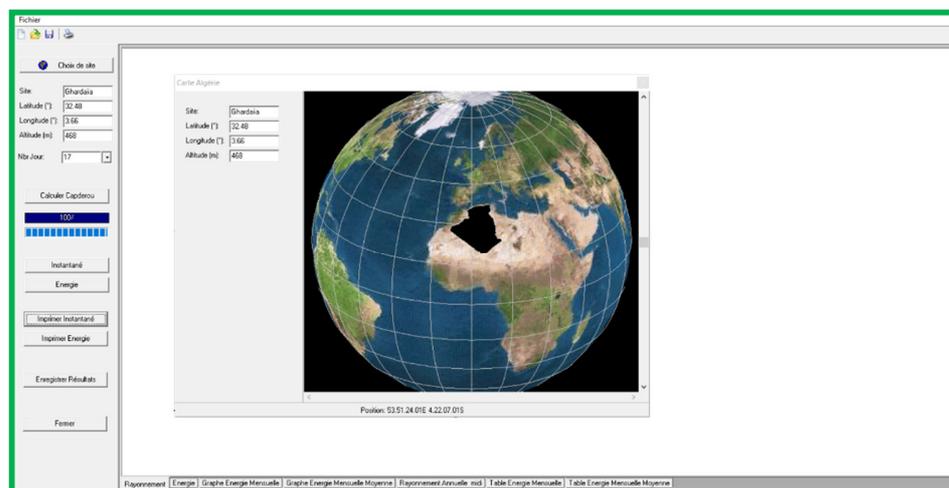


Figure III.3 : Feuille de choix du site de l'application réalisée.

### III.3.4. Feuilles d'affichages des résultats

Après le calcul des valeurs de l'éclairage solaire instantané et journalier, un affichage des résultats est assuré par les feuilles des figures suivantes :

- Figure III.4 : Affichage des résultats de l'éclairement solaire instantané.
- Figure III.5 : Affichage des résultats de l'énergie solaire journalière.
- Figure III.6 : Affichage des résultats de l'énergie solaire mensuelle.
- Figure III.7 : Affichage des résultats de l'énergie solaire mensuelle moyenne.
- Figure III.8 : Affichage des résultats de l'éclairement annuel à midi.
- Figure III.9 : Affichage des résultats sur table de l'énergie solaire mensuelle.
- Figure III.10 : Affichage des résultats sur table de l'énergie solaire mensuelle moyenne.
- Figure III.11 : Affichage des résultats sous forme de rapport.

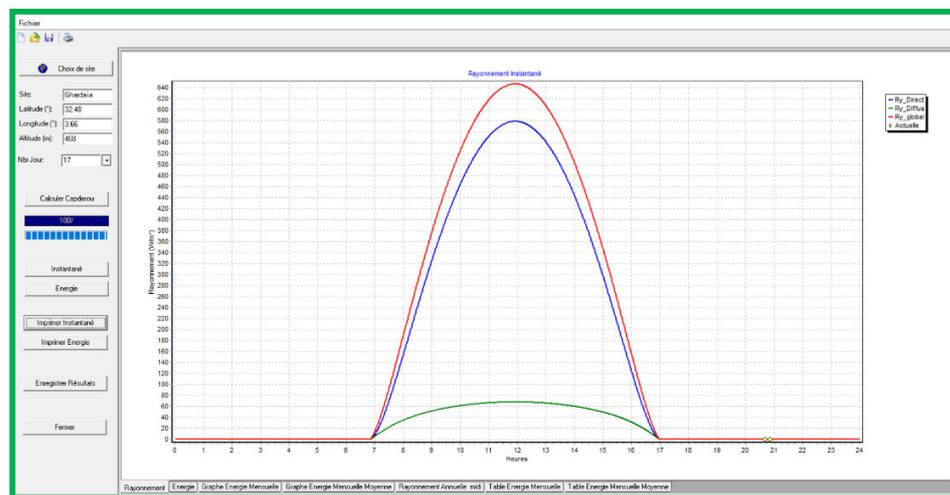


Figure III.4 : Feuille de calcul de l'éclairement solaire.

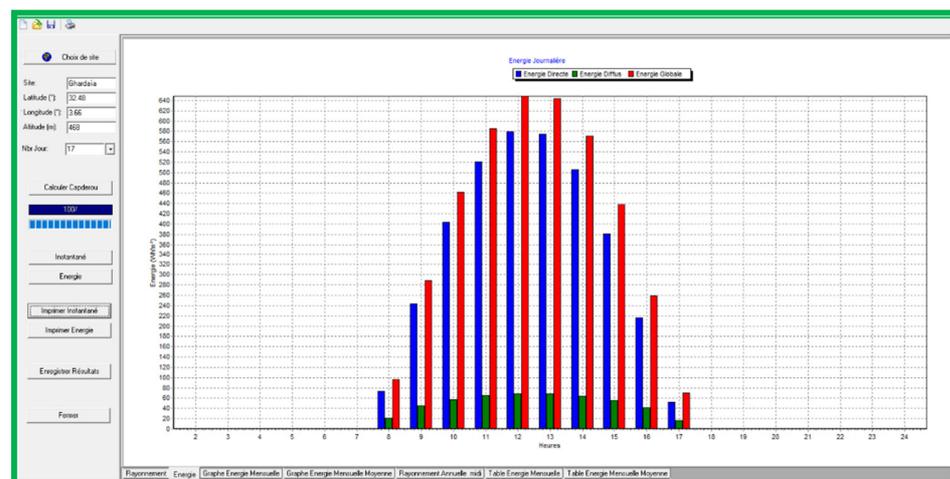


Figure III.5 : Feuille de calcul de l'énergie solaire journalière.

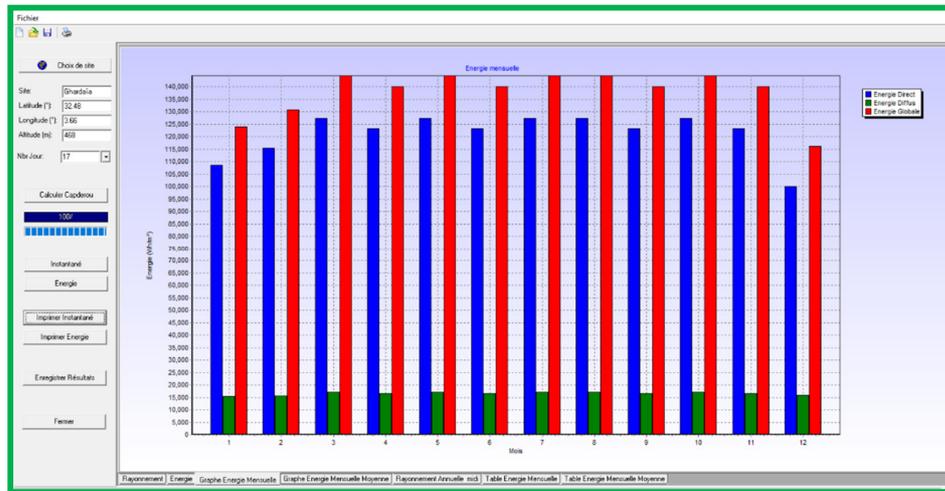


Figure III.6 : Feuille de calcul de l'énergie solaire mensuelle.

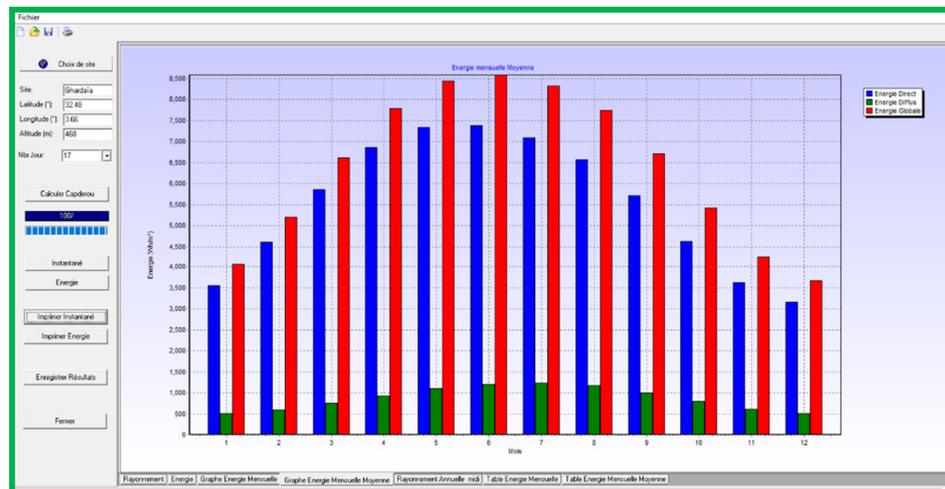


Figure III.7 : Feuille de calcul de l'énergie solaire mensuelle moyenne.

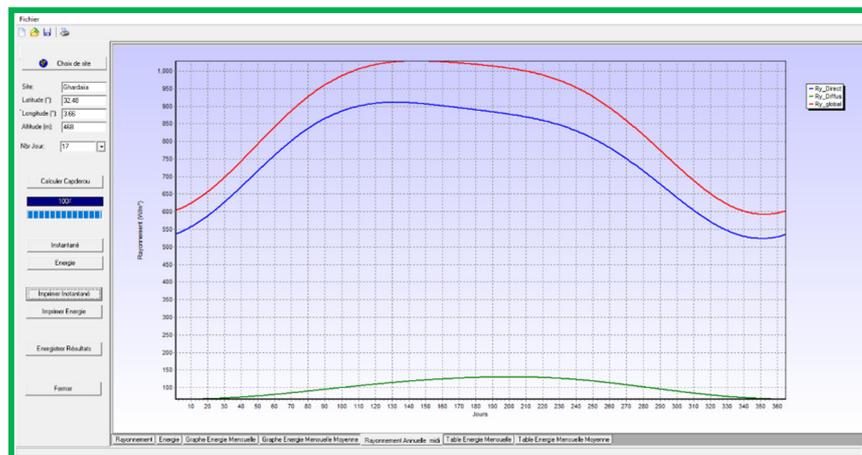


Figure III.8 : Feuille de calcul de l'éclairage annuel à midi.

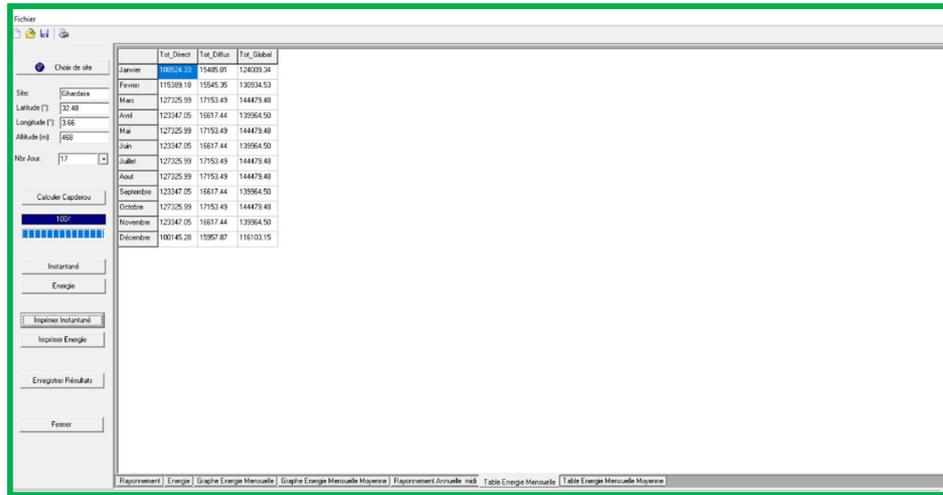


Figure III.9 : Feuille d'affichage de la table de l'énergie solaire mensuelle.

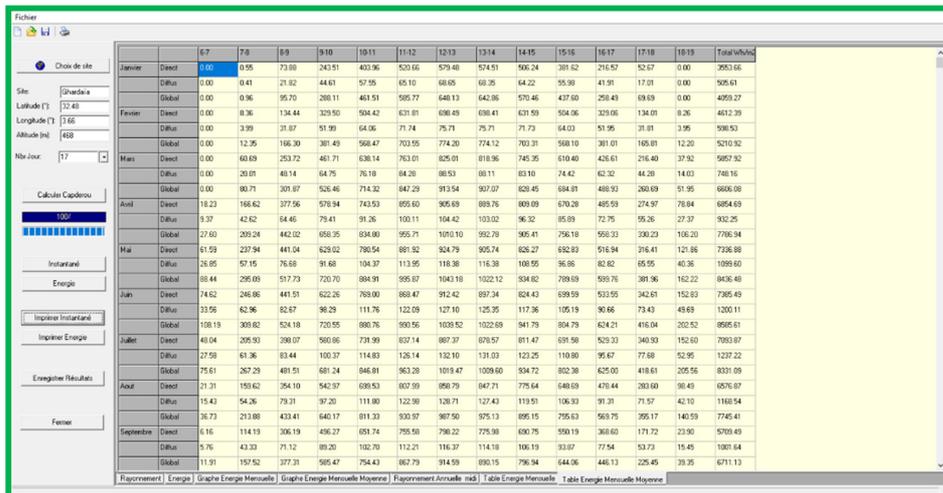


Figure III.10 : Feuille d'affichage de la table de l'énergie solaire mensuelle moyenne.

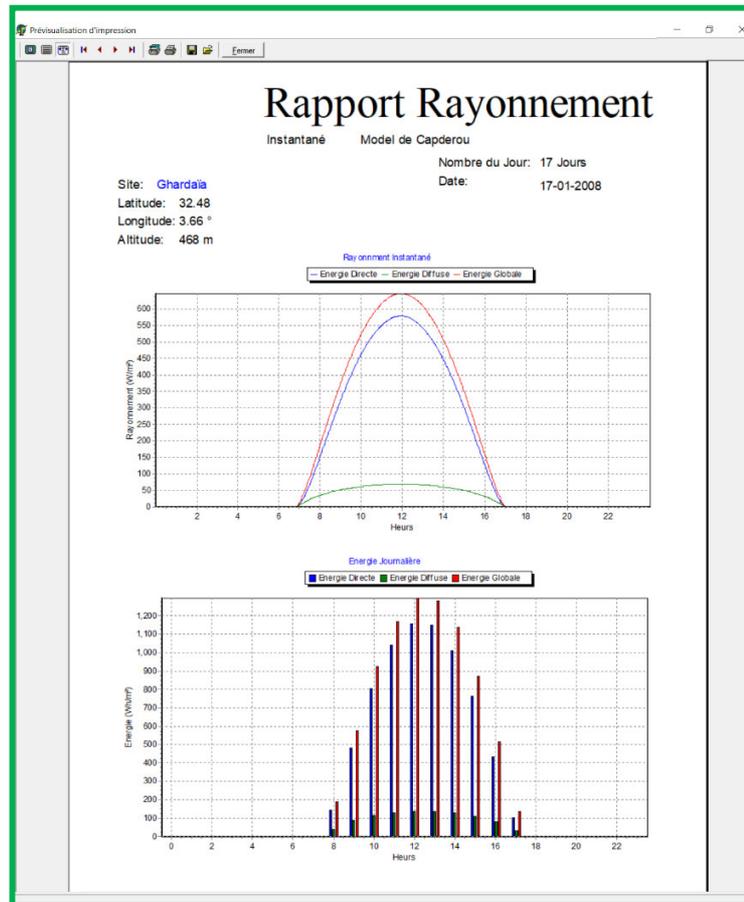


Figure III.11 : Feuille d'affichage du rapport de l'application réalisée.

### III.4. Tests et validation des résultats obtenus

L'objectif de cette partie est de comparer les valeurs du rayonnement solaire mesurées avec celles qui sont estimés par notre application, à savoir ; les données expérimentales mesurées sur le site de Ghardaïa et les données du modèle Capderou pour le rayonnement solaire instantané et journalier. Une statistique est menée afin de déterminer la validité du modèle.

#### III.4.1. Site de Ghardaïa

Le site de Ghardaïa est situé au centre de l'Algérie et distant de 600 km d'Alger à 32.48° de latitude Nord, de 3.66° 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.4.2. 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 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 pyréliomètre CHP1 de Kipp & Zonen (Fig III.12). Les données sont enregistrées par pas de 1 minute et stockées sur disque d'un micro-ordinateur.



Figure III.12 : Station radiométrique de l'URAER (Ghardaïa).

### III.4.3. Tests et résultats obtenus

Dans cette partie de travail nous représentons les principaux résultats obtenus par notre application en appliquant le modèle de Capderou sur le site de Ghardaïa.

#### III.4.3.1. Calcul du facteur de trouble

Les variations au niveau de la mer du rayonnement direct et diffus incident sur un plan horizontal sur un plan 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.13).

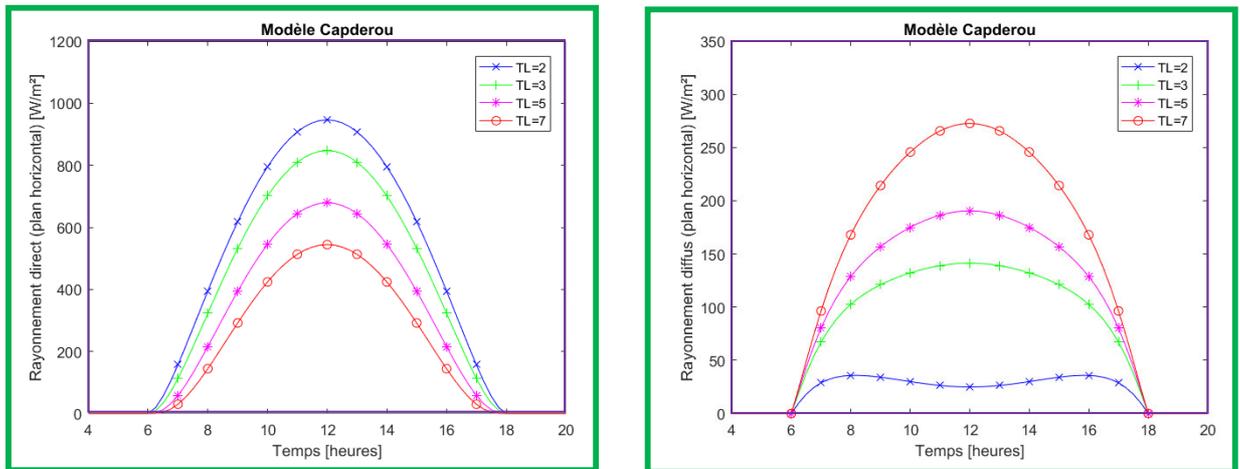


Figure III.13 : Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle Capderou).

Sur la figures (III.13) on remarquera d'une manière générale que l'évolution du rayonnement direct horizontal est grandement influencé par le facteur de trouble de Linke. En effet, les variations de cette composante est inversement proportionnelle à ce facteur, une légère augmentation de ce dernier engendrera une diminution considérable de cette composante, 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 la composantes du rayonnement diffus horizontale, 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).

#### III.4.3.2. Calcul de l'éclairement instantané par Matlab

Les figures suivantes illustrent les variations des composantes : directe et diffuse horizontale, du rayonnement global horizontal et du rayonnement direct normal pour différents jours types de l'année (hiver (Fig III.14), été (Fig III.15) et printemps (Fig III.16)), délivrées par Matlab.

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

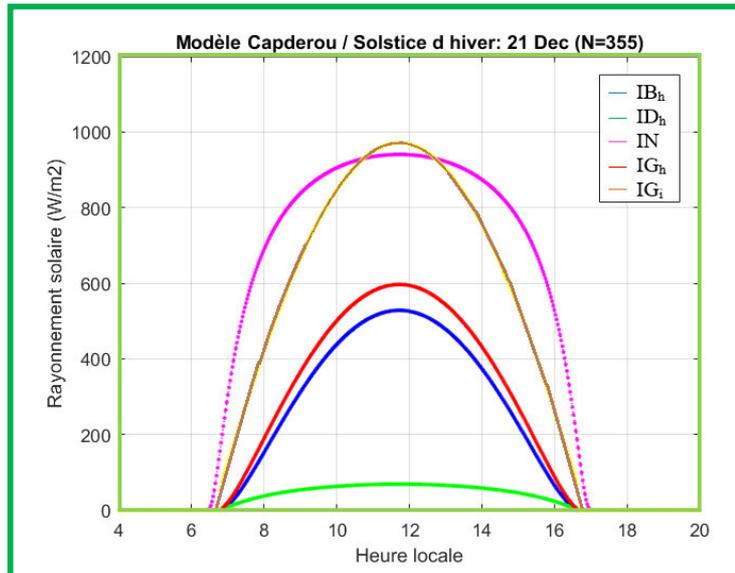


Figure III.14 : Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Décembre.

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

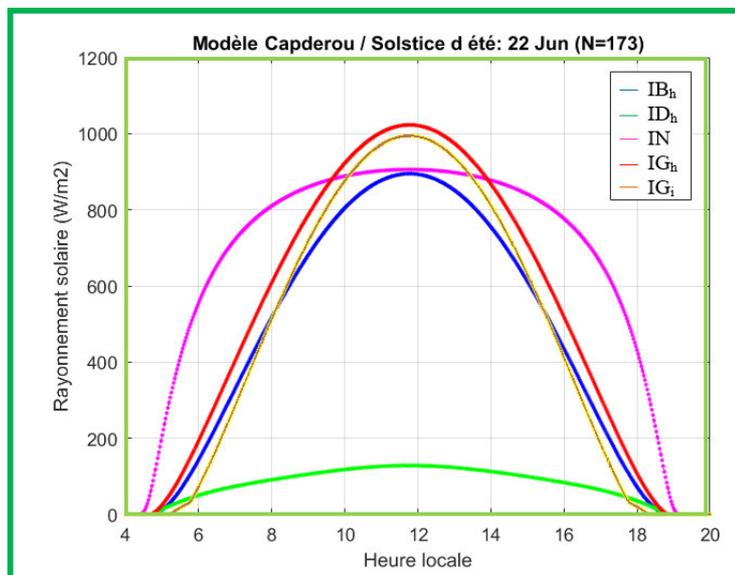


Figure III.15 : Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Juin.

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

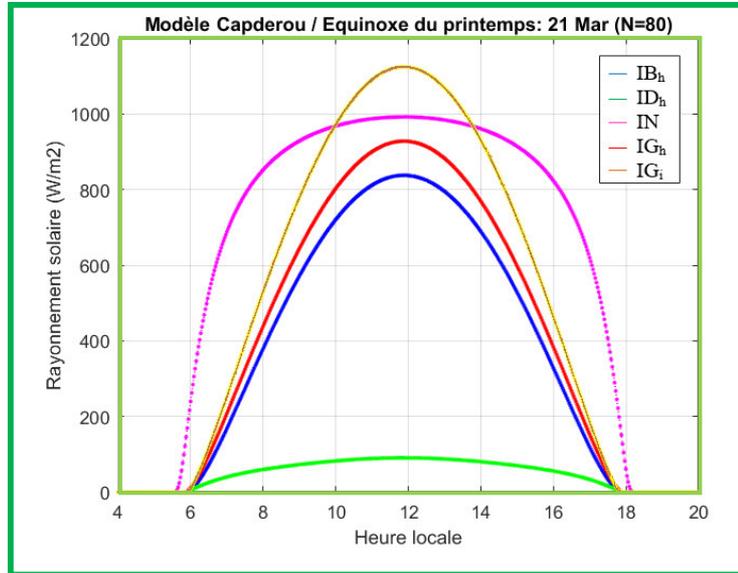


Figure III.16 : Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Mars.

### III.4.3.3. Calcul de l'éclairement instantané par Delphi

Les figures suivantes illustrent les variations des composantes : directe et diffuse horizontale, du rayonnement global horizontal et du rayonnement direct normal pour différents jours types de l'année (hiver (Fig III.17), été (Fig III.18) et printemps (Fig III.19)) , délivrées par notre application (avec Delphi).

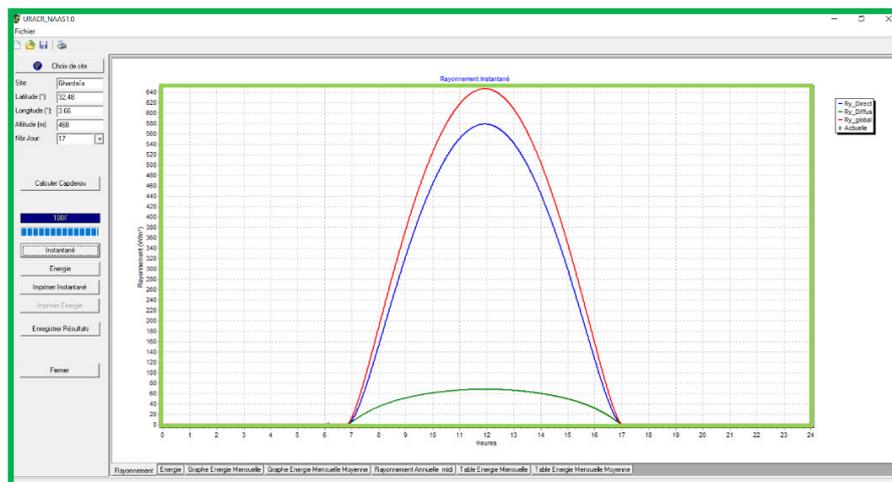


Figure III.17 : Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Décembre, donné par notre application.

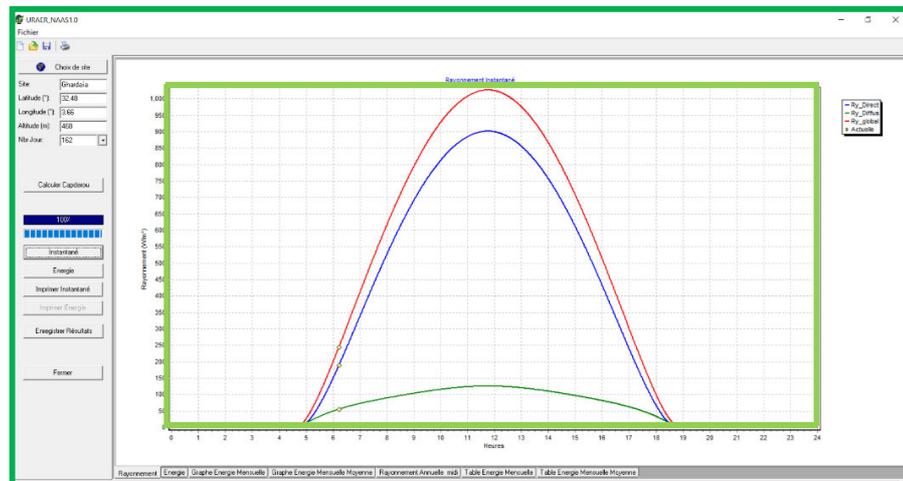


Figure III.18 : Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Juin, donné par notre application.

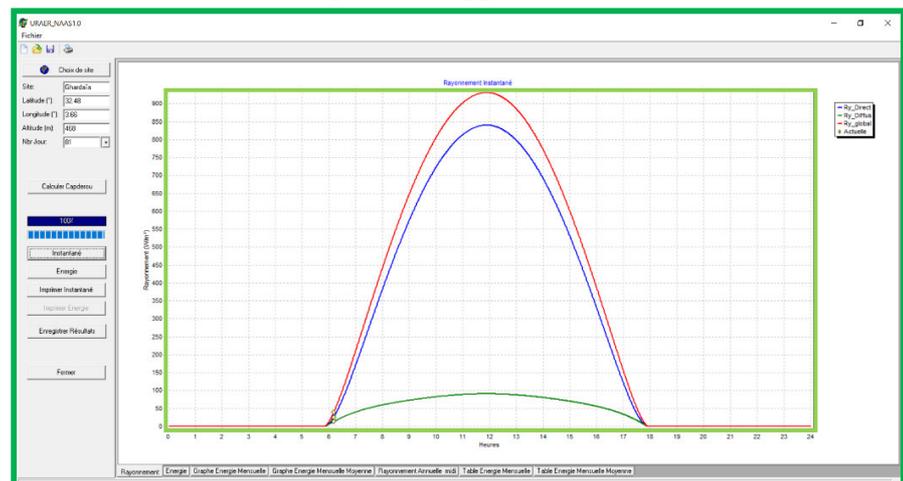


Figure III.19 : Eclairement incident sur un plan horizontal pour un jour type du mois de Mars, donné par notre application.

#### III.4.4. Validation des résultats

Dans le but d'évaluer les estimations réalisées par le modèle Capderou 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 le modèle 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.20 - III.23), 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 ( $IB_h$ )

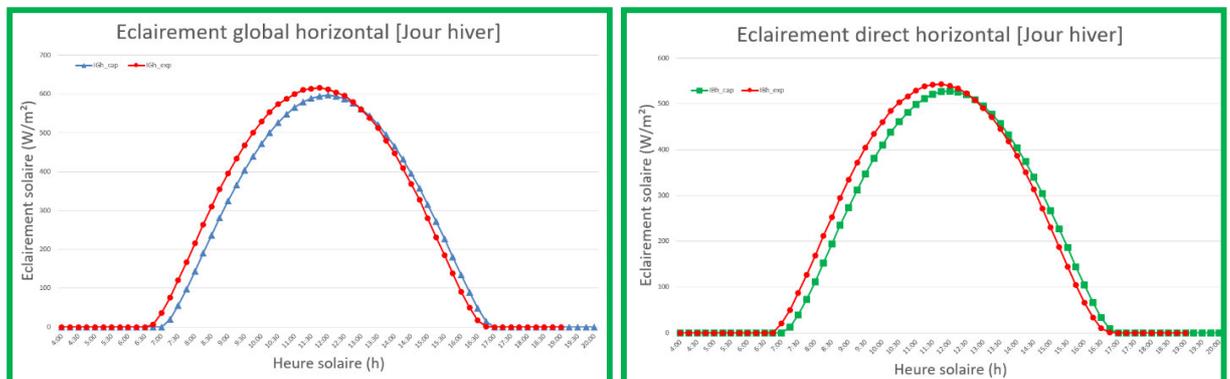


Figure III.20 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou et les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.

- Jour d'hiver : Direct normal ( $IN$ ) avec poursuite 2 axes

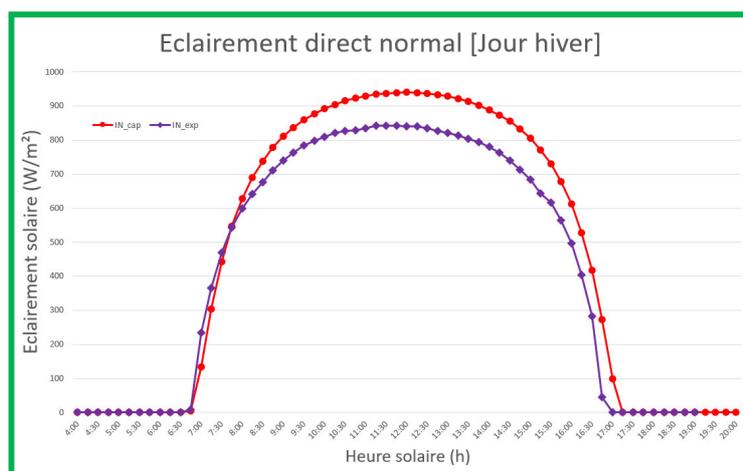


Figure III.21 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou et les données expérimentales pour le rayonnement direct normal pour un jour clair d'hiver.

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 ( $IG_h$ ) et Direct horizontal ( $IB_h$ )

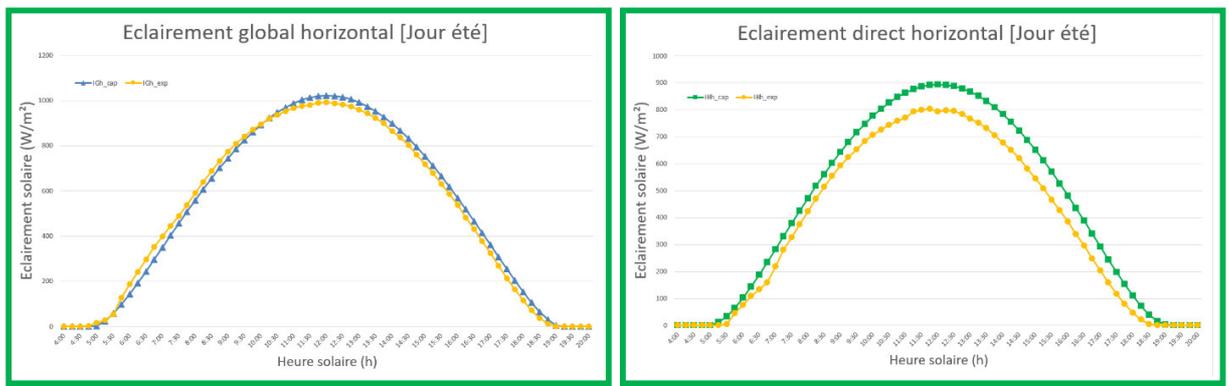


Figure III.22 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou et les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.

- Jour d'été : Direct normal (IN) avec poursuite 2 axes

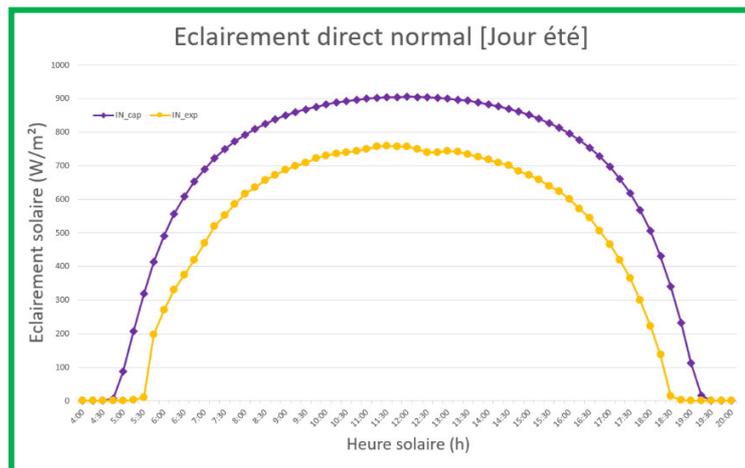


Figure III.23 : Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou et les données expérimentales pour le rayonnement direct normal pour un jour clair d'été.

Pour une période hivernale (Figure III.20), on remarquera que le modèle Capderou sous-estime la composante directe horizontale et le rayonnement global, néanmoins, il se rapproche de l'expérimentale. Par ailleurs, sur la figure (III.21), le modèle Capderou s'écarte de l'expérimental et surestime l'éclairement avec un écart important qui peut atteindre les 100 W/m<sup>2</sup>. En période estivale (Figures III.22), le modèle Capderou présente un très bon rapprochement de valeurs mesurées. Pour le rayonnement direct normal représenté sur la figure (III.23), le modèle a tendance à surestimer ce paramètre. Le traitement des graphes des figures III.20 - III.23 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.4.5. Évaluation statistique et discussion des résultats

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

#### III.4.5.1. Évaluation statistique des modèles

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 valeur 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 ( $MBE < 0$ ).

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

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

- 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 :

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

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

- 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.

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{sim,i} - Y_{mes,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{sim,i} - \bar{Y}_{mes,i})^2} \right] \quad (3.6)$$

#### III.4.5.2. Interprétation des résultats

La récapitulation des paramètres statistiques obtenus par l'application du modèle Capderou sur le site de Ghardaïa est présentée dans les tableaux III.1 suivant :

Tableau III.1: Tests statistiques pour le rayonnement solaire instantané, Global horizontal ( $IG_h$ ), Direct horizontal ( $IB_h$ ) et le rayonnement Direct normal (IN).

Type d'erreur		Horizontal		Normal
		R. Global ( $IG_h$ )	R. direct ( $IB_h$ )	R. Normal (IN)
MBE ( $W/m^2$ )	Hiver (355)	<b>-17.69</b>	<b>-13.10</b>	<b>83.39</b>
	Eté (173)	<b>8.10</b>	<b>73.66</b>	<b>190.94</b>
	Printemps (80)	<b>0.46</b>	<b>32.86</b>	<b>170.41</b>
RMSE ( $W/m^2$ )	Hiver (355)	<b>44.30</b>	<b>37.76</b>	<b>100.12</b>
	Eté (173)	<b>31.76</b>	<b>78.37</b>	<b>196.36</b>
	Printemps (80)	<b>6.39</b>	<b>33.83</b>	<b>174.40</b>
MPE (%)	Hiver (355)	<b>30.62</b>	<b>23.19</b>	<b>22.07</b>
	Eté (173)	<b>2.08</b>	<b>161.50</b>	<b>729.30</b>
	Printemps (80)	<b>2.05</b>	<b>16.66</b>	<b>203.49</b>
$R^2$	Hiver (355)	<b>0.981</b>	<b>0.98</b>	<b>0.974</b>
	Eté (173)	<b>0.996</b>	<b>0.997</b>	<b>0.987</b>
	Printemps (80)	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>0.996</b>

Les coefficients de corrélation liant les estimations instantanées des rayonnements solaires aux mesures au sol sont satisfaisants car ils varient de 96% à 100%. La comparaison des valeurs estimées par le modèle Capderou avec les valeurs mesurées montre que : le modèle de Capderou est assez représentatif du rayonnement solaire en donnant des coefficients de détermination élevés et des RMSE bas, notamment pour la période hivernale et printanière représentant tous types de rayonnements :  $IG_h$ ,  $IB_h$  et IN.

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  $W/m^2$  en hiver, 31.7  $W/m^2$  en été et 6.4  $W/m^2$  au printemps, le RMSE atteint un

maximum de  $196 \text{ W/m}^2$  pour le rayonnement direct normal. Une explication de ces résultats peut être liée à la méthode utilisées par le modèle Capderou pour l'estimation du facteur de trouble de Linke.

Donc du point de vue performance, nous constatons que le modèle Capderou est bon, 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. Mapping des cartes solaires de l'Algérie

Dans cette partie, des cartes de rayonnement solaire de l'Algérie sont développées pour des applications spécifiques. Les cartes de rayonnement direct, direct normal et global sont générées (Fig III.24 et Fig III.25 et Fig III.26). Une carte du rayonnement global sur un plan horizontal sera utile pour les systèmes photovoltaïques et une carte du rayonnement direct normal est utile pour les systèmes à concentration utilisant un suivi à deux axes comme les paraboles par exemple. Le potentiel de l'énergie solaire annuel est calculé pour les technologies CSP et PV afin d'identifier les meilleures zones ou lieux géographiques pour la mise en œuvre de leurs projets.

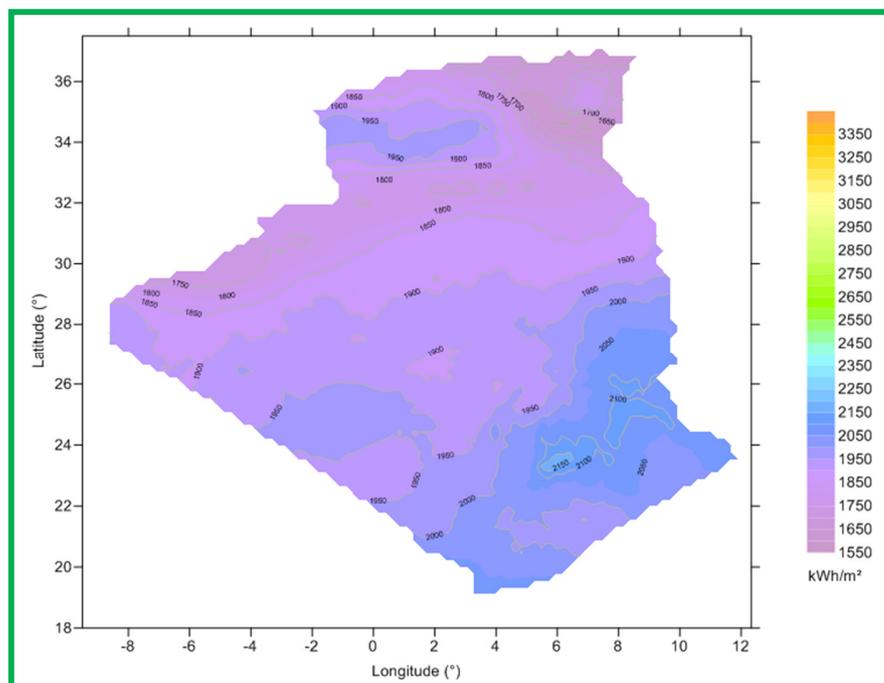


Figure III.24 : Carte de l'énergie solaire directe annuelle incidente sur un plan horizontal.

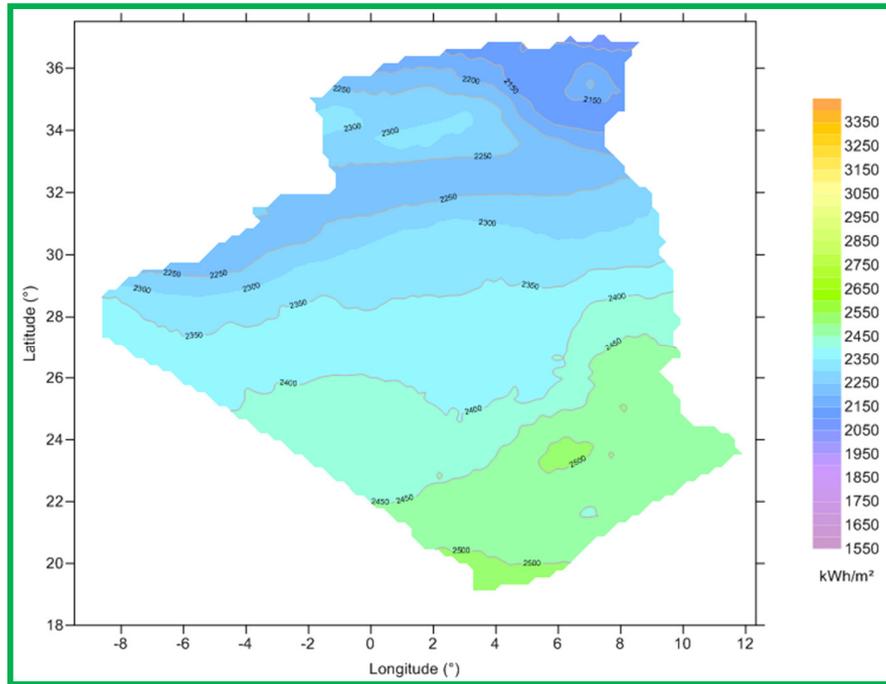


Figure III.25 : Carte de l'énergie solaire globale annuelle incidente sur un plan horizontal.

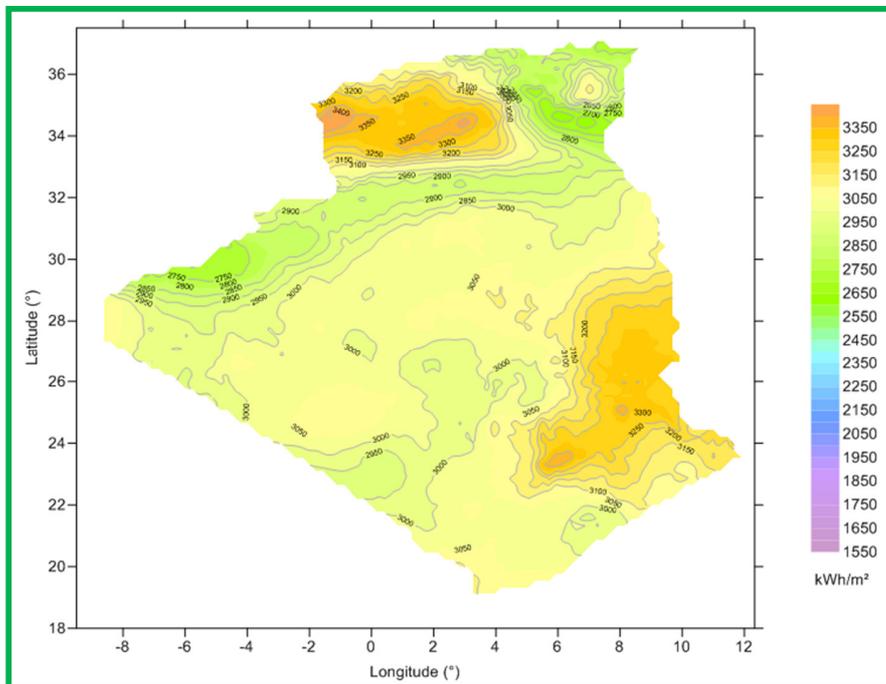


Figure III.26 : Carte de l'énergie solaire directe normale annuelle incidente sur un plan horizontal.

### III.6. Conclusion

Finalement, nous pouvons dire que ce chapitre à était le fruit de notre travail, il a pris la majeure partie de notre projet et il à englober toute les parties de ce projet. Dans ce chapitre, nous avons donné l'organigramme utilisé pour le développement de notre application, également nous avons donné une présentation détaillée du programme de calcul de l'éclairement solaire, où nous avons proposé une application, simple et efficace qui peut aider et encourager les constructeurs en systèmes à énergie solaire à investir dans ce domaine intéressant. Au niveau des résultats une visualisation numérique et graphique des données existe dans les différentes parties du logiciel est disponible. Des exemples de calcule son également illustrés et des rapports de résultats sont donnés par l'application.

Suite à une comparaison entre les valeurs estimées à partir du modèle et les mesures au sol pour le site de Ghardaïa, nous avons obtenu un coefficient de corrélation supérieur à 96%, 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**

## 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 on s'est proposé de développer un outil informatique pour l'estimation des composantes de l'éclairement solaire sur un plan horizontal en Algérie. Après une étude bibliographique sur le sujet, on a procédé à la programmation du modèle Capderou par Matlab en premier lieu et avec logiciel Delphi 5 en seconde étape. Les valeurs instantanées du rayonnement direct  $IB_h$  et global horizontal  $IG_h$  et direct normal  $IN$  ont été estimées en utilisant ce modèle, où 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 du programme réalisé, 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 le modèle est remarquable avec un coefficient de corrélation supérieur à 96%, ce qui nous ramène donc à dire, que ce modèle peuvent être utilisé pour estimer le rayonnement solaire par ciel clair au niveau du site de Ghardaïa associé à notre application qui est facile à utiliser.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Yettou F. Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude. Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique, Alger 2009.
- [2] Q.Sylvain, Les Centrales Solaires à Concentration, France: Université de Liège, Faculté des sciences appliquées, 2007.
- [3] 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).
- [5] 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.
- [10] : Site Internet : <http://www.Planete-energies.com>,2007.
- [12] : B.Rivoire, Le solaire thermodynamique, CNRS, France, avril 2002.
- [13] : D. Amine, «Contrôle de la Puissance d'un Générateur photovoltaïque pour le pompage solaire,» 2013.
- [14] : Site Internet : <http://www.futura-sciences.com/>, 2007.
- [15] : R.Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire, Conversion thermique et applications, Technique & documentation LAVOISIER, France, 250 pages, 1983.
- [16] : Site Internet : <http://www.energy.gov.dz>, 2018
- [17] : A. Labouret, Energie solaire photovoltaïque, DUNOD, France, 302 pages, 2003
- [18] : Rachid CHENNI, étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire. Algérie, 2007
- [19] : Site Internet : <http://www.cipcsp.com/pages/053.html>, 2007.
- [20] : Document, Informations techniques sur le photovoltaïque, BP Solar, France, 2000.
- [21] : A, Sfeir ; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [22] : Z, Sen. Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).
- [23] : Ch, Perrin de Brichambaut; C, Vauge. Le gisement solaire, Technique et Documentation, Paris. (1982).

- [24] : Yacine Fouad "Etude de nouvelles génération de cellules photovoltaïque", Mémoire de Magister ; Université des Sciences et de le Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO.MB), 2011.
- [25] : M. Capderou, 'Atlas solaire de l'Algérie', Modèles théoriques et expérimentaux, vol. 1, t1, office des publications universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [26] : R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, 'Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications', technique & documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.
- [27] : J. Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, ellipse Edition marketing. (2004).
- [28] : Z. Sen. Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).
- [29] : J. M Chasseriau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [30] : R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz. Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation, Paris, 1983.
- [31] : Bouden Abdelmalek "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque", Universite Mentouri de Constantine, 2008.
- [32] : Y. Jannot. Thermique solaire, mars 2011.
- [33] : A. Khedim, 'L'énergie solaire utilisation thermique et photovoltaïque', ANEP, 359 p., 2005.
- [34] : J.M. Chasseriau, 'Conversion thermique du rayonnement solaire', Ed. Dunod, France., 1984.
- [35] : R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, 'Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications', technique & documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.
- [36] : A. Labouret, 'Energie solaire photovoltaïque', Ed. Dunod, France, 302 p., 2003.
- [37] : M. Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, tome 1, vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [38] : A. Moummi, N. Hamani, N. Moummi et al. Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra, 2006, vol. 3, p. 4.
- [39] : Pierre Bessemoulin et Jean Olivieri, Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, la meteorologie 8e serie - n° 31 - Septembre 2000.
- [40] : P. Rivet. Le rayonnement solaire ; CNRS.
- [41] : J. A. Duffie, W. A. Beckman. Solar engineering of thermal processes, John wiley and sons. (1980)

- [42] : F. Linke, 'Transmissions - koeffizient und trübungsfaktor', beiträge zur physik der atmosphäre, vol. 10, pp. 91 – 103, 1922.
- [43] : F. Kasten, 'A simple parameterization of two pyrhelimetric formulae for determining the linke turbidity factor', Meteorology rdsch, vol. 33, pp. 124 - 127, 1980.
- [44] : K. Feussner and P. Dubois, 'Trübungsfaktor, precipitable water', Staub. gerlands beitr., geophysical, vol. 27, pp. 132 - 175, 1930.
- [45] : A. Louche, G. Peri and M. Iqbal. 'An analysis of linke turbidity factor'. Solar Enegy.vol. 37, n°6, pp.393 - 396, 1986.
- [46] : M. Katz, A. Baille and M. Mermier, 'Atmospheric turbidity in a semi rural site i', Solar energy, vol. 28, pp. 323 – 327, 1982.
- [47] : M. Katz, A. Baille and M. Mermier, 'Atmospheric turbidity in a semi rural site', Solar Energy, vol. 28, pp. 329 – 334, 1982.
- [48] : 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.
- [50] : 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.
- [51] : Matlab/Simulink Tutorial', School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Release 13, Version 6.5, 2nd Edition, 2003.
- [52] : S. Teixeira and X. Pacheco, 'Borland Delphi 6 Developer's Guide', Indiana, USA, 1200 p., 2002.

## 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, a software will be realized using an oriented object language. The application is dedicated to estimate the direct and diffuse component of solar radiation on horizontal surfaces by clear sky at ground measurement level. A first step is to model the solar radiation with Matlab and a proper model is developed for this purpose. 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. The Capderou model is evaluated on a graphical and statistical basis and the results of the statistical study are very encouraging and promising. The developed application is practical for solar energy designer and easy to use.

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