



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf

Faculté de Physique

Département de Physique Energétique

# THÈSE

En vue de l'obtention du

Diplôme de Doctorat LMD

Présenté et Soutenu par :

*NAIM Houcine*

Intitulé

*Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise  
au point d'un dispositif automatique de mesures,  
contrôles et régulation de l'énergie électrique*

*Domaine* : *Science de la matière*  
*Spécialité* : *Physique*  
*Intitulé de la Formation* : *Système photovoltaïque*

Le jury est composé de :

<i>Grade, Nom &amp; Prénom</i>	<i>Statut</i>	<i>Domiciliation</i>
<i>Pr, BELASRI Ahmed</i>	<i>Président</i>	<i>USTO.MB</i>
<i>Pr, BENABADJI Nouredine</i>	<i>Rapporteur</i>	<i>USTO.MB</i>
<i>Dr, HASSINI Abdelatif</i>	<i>Co-Rapporteur</i>	<i>Univ.Oran-2 Mohamed Ben Ahmed</i>
<i>Pr, ZEBIRATE Soraya</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ.Oran-2 Mohamed Ben Ahmed</i>
<i>Pr, BELKAID Nouredine</i>	<i>Examineur</i>	<i>USTO.MB</i>
<i>Pr, BOUHAMIDA Mohamed</i>	<i>Examineur</i>	<i>USTO.MB</i>

Année Universitaire 20 15 / 20 16

## Remerciements

*Je remercie avant tout ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience qui m'ont permis d'accomplir ce petit et modeste travail.*

*Je tiens à présenter ma profonde gratitude à Pr Nouredine BENABADJI d'avoir proposé un sujet de recherche d'actualité, pour sa patience et son soutien. Son oublier Mr Abed BOUADI pour son suivi et sa disponibilité. Je voudrais également remercier Mr Abdelatif HASSINI pour ses précieux conseils, Pr. Ahmed BELBACHIR et Mr Sid Ahmed BENDALLA pour leur aide précieuse.*

*Je remercie infiniment les enseignants examinateurs de cette thèse pour avoir accepté de la prendre en charge.*

*Je tiens aussi à remercier tous mes collègues pour leur aide matériel et leur soutien moral.*

*Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à ma famille qui m'a soutenue.*

---

## **Dédicaces**

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science  
et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la  
Prosperité de l'humanité.*

*NAIM Hocine ...*

---

# ***Table de Matière***

<i>INTRODUCTION GENERALE</i> .....	1
<b>CHAPITRE I</b> .....	4
<b>I.1 Introduction</b> .....	5
<b>I.2 Mouvement de la terre</b> .....	6
I.2.1 Mouvement de rotation .....	6
I.2.2 Mouvement de translation : .....	7
<b>I.3 Mouvement apparent du soleil</b> .....	7
<b>I.4 Repérage d'un site sur la surface terrestre</b> .....	8
<b>I.5 Coordonnées du soleil :</b> .....	9
I.5.1 Coordonnées équatoriales : .....	10
I.5.2 Coordonnées horizontales : .....	12
<b>I.6 Durée du jour</b> .....	14
I.6.1 Influence de la latitude sur la durée du jour .....	15
<b>I.7 Mesure du rayonnement solaire</b> .....	15
<b>I.8 Durée d'insolation</b> .....	18
<b>I.9 Mesure de la température solaire</b> .....	18
<b>I.10 Données environnementales collectées in situ :</b> .....	19
<b>I.11 Application et vérification des modèles du rayonnement solaire journalier</b> .....	21
I.11.1 Modèle de PERRIN DE BRICHAMBEAU .....	21
I.11.2 Modèle de HOTTEL et LIU JORDAN[13-14].....	24
I.11.3 Vérification expérimentale des modèles du rayonnement solaire .....	25
<b>I.12 Energie solaire globale mensuelle reçue sur un plan horizontal</b> .....	26
I.12.1 Formules de base .....	26
I.12.2 Premier modèle (modèle d'Angstrom).....	27
I.12.3 Le deuxième modèle .....	28

---

I.12.4	Résultat et discussion .....	28
I.12.5	Paramètres statistiques : .....	33
I.12.6	Comparaison entre les deux modèles : .....	33
<b>I.13</b>	<b>Conclusion</b> .....	35
<b>I.14</b>	<b>Bibliographie chapitre I</b> .....	36
<b>CHAPITRE II</b>	.....	38
<b>II.1</b>	<b>Introduction</b> .....	39
<b>II.2</b>	<b>Cellule PV</b> .....	39
II.2.1	L'effet photovoltaïque.....	39
II.2.2	Principe de fonctionnement.....	40
II.2.3	Modélisation de la cellule photovoltaïque : .....	41
II.2.4	Types de cellules solaires : .....	43
II.2.5	Groupements des cellules : .....	45
<b>II.3</b>	<b>Les panneaux photovoltaïques :</b> .....	48
<b>II.4</b>	<b>Mesure des caractéristiques du panneau solaire :</b> .....	55
II.4.1	Méthode et analyse.....	55
II.4.2	Résumé des résultats : .....	59
<b>II.5</b>	<b>Conclusion</b> .....	60
<b>II.6</b>	<b>Bibliographie chapitre II</b> .....	61
<b>CHAPITRE III</b>	.....	63
III.1	<b>Introduction :</b> .....	64
III.2	<b>Centrale solaire photovoltaïque</b> .....	64
III.3	<b>Éléments de l'installation photovoltaïque</b> .....	64
III.3.1	Production d'énergie (Panneaux photovoltaïques) .....	65
III.3.2	Stockage de l'énergie .....	65
III.3.3	Système de régulation.....	71
III.3.4	Système de conversion.....	72
III.4	<b>Utilisation de l'énergie produite</b> .....	73

---

III.4.1	Expression en Wattheures par jour (Wh/j) : .....	73
III.4.2	Expression en Ampère-heure par jour (Ah/j) : .....	73
III.5	<b>Type de systèmes photovoltaïque</b> .....	73
III.5.1	Système autonome avec batterie : .....	74
III.5.2	Système autonome sans batterie : .....	74
III.5.3	Système hybride PV/génératrice : .....	74
III.5.4	Système PV centralisé : .....	74
III.5.5	Système PV sur réseau décentralisé : .....	74
III.5.6	Système PV sur réseau diesel : .....	75
III.6	<b>Protection des systèmes photovoltaïques</b> .....	75
III.6.1	Protection par diodes .....	75
III.7	<b>Le câblage</b> .....	76
III.8	<b>Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque</b> .....	76
III.9	<b>Conclusion</b> .....	77
III.10	<b>Bibliographie chapitre III</b> .....	78
	<b>CHAPITRE IV</b> .....	79
IV.1	<b>Introduction</b> .....	80
IV.2	<b>Pyranomètre</b> : .....	80
IV.3	<b>DATALOGGER (enregistreur de données)</b> : .....	81
IV.4	<b>Suiveur de Soleil</b> : .....	81
IV.4.1	Type de suiveur solaire : .....	82
IV.4.2	L'utilité des suiveurs solaire .....	83
IV.4.3	Les Capteurs : .....	84
IV.4.4	Afficheurs .....	87
IV.4.5	La communication série RS 232 : .....	88
IV.5	<b>Microcontrôleur</b> .....	89
IV.5.1	Identification d'un PIC : .....	89
IV.5.2	Microcontrôleur PIC16F716 .....	90

---

IV.5.3	Aspect matériel du PIC16F716 .....	91
IV.5.4	Programmation .....	91
<b>IV.6</b>	<b>Conclusion:</b> .....	92
<b>IV.7</b>	<b>Bibliographie chapitre IV</b> .....	93
<b>CHAPITRE V</b>	.....	94
<b>V.1</b>	<b>Réalisation d'un appareil de mesures du rayonnement solaire "PYRANOMETRE"</b>	95
1.	PRÉSENTATION .....	95
2.	Description Hardware .....	96
3.	Le microcontrôleur 8-BIT (PIC10F222) .....	97
4.	Le module afficheur 4 DIGITS A LED 7-SEGMENTS.....	98
5.	L'alimentation régulée 2,56V .....	100
6.	Description Firmware .....	100
7.	Conclusion .....	102
<b>V.2</b>	<b>Conception et réalisation d'un moniteur solaire multicanaux</b> .....	103
1.	Introduction.....	103
2.	Matériel ET méthode.....	104
3.	Description hardware:.....	104
3.1	Le microcontrôleur 8-bit (PIC16F716) : .....	105
3.2	Le module afficheur 4 digits à LED 7-segments :.....	106
3.3	Le clavier de 3 boutons poussoirs : .....	107
3.4	La circuiterie pour 4 voies de mesures :.....	108
3.5	Section d'alimentation régulée double tension .....	108
4.	Résultats et discussions.....	109
5.	Conclusion .....	111
<b>V.3</b>	<b>Conception et Réalisation d'Un Mini-Datalogger Solaire Multicanaux</b> .....	112
1.	Présentation .....	112
2.	Description hardware.....	113
2.1	Le microcontrôleur 8-BIT (PIC16F716) .....	114
2.2	Le module afficheur LCD 2X16 caractères.....	115
2.3	Le clavier de 3 boutons poussoirs .....	117

---

2.4	La circuiterie pour 4 voies de mesures .....	118
2.5	La section alimentation régulée.....	119
2.6	La mémoire EEPROM externe.....	119
<b>V.4</b>	<b>Mise au point d'un suiveur solaire a un seul axe .....</b>	<b>122</b>
1.	Introduction :.....	122
2.	Détermination de la position du soleil .....	122
2.1	Calcul des angles .....	123
2.2	Algorithme pour déterminer la position du soleil.....	124
3.	Mise au point du dispositif électronique :.....	126
4.	Description hardware :.....	126
4.1	Le microcontrôleur 8-bit (PIC16F716) .....	126
4.2	Le module afficheur LCD 2x16 caractères.....	127
4.3	Le clavier de 3 boutons poussoirs .....	128
4.4	L'étage tampon pilote du moteur positionneur.....	129
4.5	La section alimentation.....	129
5.	Description firmware :.....	130
5.1	Principe de calcul des angles (AZ et EL) dans EXCEL .....	130
6.	CONCLUSION .....	133
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>135</b>



# Liste des Figures

## Liste des Figures Introduction générale

<b>Figure I</b> Actions de sources d'énergie dans l'offre totale mondiale d'énergie primaire en 2008 .....	1
--	---

## Liste des Figures Chapitre I

<b>Figure I-1</b> Rayonnement solaire annuel dans le monde (KWh/m <sup>2</sup> .an).....	5
<b>Figure I-2</b> Les mouvements de la terre .....	7
<b>Figure I-3</b> Repérage d'un site S sur la surface terrestre .....	9
<b>Figure I-4</b> Direction du soleil (S) repéré en coordonnées équatoriales et en coordonnées horizontales en un lieu donné de latitude $\varphi$ .....	10
<b>Figure I-5</b> Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année N.....	11
<b>Figure I-6</b> Variation de la durée du jour tout au long de l'année pour la région d'Oran (Latitude =35.38°).....	14
<b>Figure I-7</b> Variation de la durée du jour durant l'année pour différentes latitudes.....	15
<b>Figure I-8</b> Appareil de mesure des rayons directs (pyrhéliomètre).....	16
<b>Figure I-9</b> Appareil de mesure des rayons diffus (pyranomètre) .....	16
<b>Figure I-10</b> Appareil de mesure des rayons diffus (Albédo mètre) .....	17
<b>Figure I-11</b> Appareil de mesure des rayons (direct+diffus+albédo) Pyranomètre.....	17
<b>Figure I-12</b> Appareil de mesure de la durée d'insolation (héliographe) .....	18
<b>Figure I-13</b> Appareil de mesure de la température (thermocouple).....	19
<b>Figure I-14</b> Organigramme global du système de station de l'environnement : Vantage Pro II .....	20
<b>Figure I-15</b> Variation de la puissance globale, directe et diffusée, au cours d'un jour clair (le 21 juin) sur un plan horizontal par le modèle PERRIN DE BRICHAMBEAU .....	23
<b>Figure I-16</b> Evaluation de l'intensité du rayonnement global relatif aux trois états atmosphériques .....	23
<b>Figure I-17</b> Evaluation de l'intensité du rayonnement diffus relatif aux trois états atmosphériques.....	24
<b>Figure I-18</b> Variation de la puissance globale, directe et diffusée au cours d'un jour clair (le 21 juin) sur un plan horizontal par le modèle HOTTEL et LIU JORDAN.....	25
<b>Figure I-19</b> Rayonnement globale sur un plan horizontal pour le 21 Juin .....	26
<b>Figure I-20</b> Fraction d'insolation mensuelle et l'indice de clarté pour le site d'Oran .....	30
<b>Figure I-21</b> Moyennes mensuelles des insolutions, durées astronomiques du jour, et de l'irradiation globale .....	30

---

<b>Figure I-22</b> Distribution annuelle d'irradiation journalière dans le site d'Oran.....	31
<b>Figure I-23</b> L'irradiation solaire globale mesurée et estimée pour le site d'Oran .....	33

## Liste des Figures Chapitre II

<b>Figure II-1</b> Schéma d'une cellule solaire.....	40
<b>Figure II-2</b> Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque .....	41
<b>Figure II-3</b> La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque .....	42
<b>Figure II-4</b> Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.....	42
<b>Figure II-5</b> Cellules mono-cristallines.....	44
<b>Figure II-6</b> Cellules poly-cristallines.....	44
<b>Figure II-7</b> Cellule amorphe.....	45
<b>Figure II-8</b> Association de Ns modules solaires en série .....	46
<b>Figure II-9</b> Association de Np modules solaires en parallèle.....	47
<b>Figure II-10</b> Association mixte de NSP branches et de NMS module composés de NC cellules identiques.....	47
<b>Figure II-11</b> Modèle électrique de la cellule.....	49
<b>Figure II-12</b> $I = f(V)$ , $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.....	52
<b>Figure II-13</b> Influence de l'éclairement sur le module .....	53
<b>Figure II-14</b> Influence de la température sur le module .....	53
<b>Figure II-15</b> L'influence de la résistance série $R_s$ sur la caractéristique I (V) , P(V).....	54
<b>Figure II-16</b> L'influence de la résistance shunt $R_{sh}$ sur la caractéristique I (V) , P(V).....	54
<b>Figure II-17</b> Schéma des mesures du panneau photovoltaïque.....	56
<b>Figure II-18</b> Courbes des caractéristiques du module photovoltaïque pour $G=930W/m^2$ .....	57
<b>Figure II-19</b> Courbes des caractéristiques du module photovoltaïque pour $G=700W/m^2$ .....	58
<b>Figure II-20</b> Courbes des caractéristiques du module photovoltaïque pour $G=600W/m^2$ .....	59
<b>Figure II-21</b> Superposition des courbes pour les différents rayonnements.....	60

## Liste des Figures Chapitre III

<b>Figure III-1</b> Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage .....	64
<b>Figure III-2</b> Principe de production d'électricité dans un convertisseur électrochimique.....	66
<b>Figure III-3</b> Protection par diodes en série.....	75



## Liste des Figures Chapitre IV

<b>Figure IV-1</b> Schéma synoptique d'un traqueur solaire sensible .....	82
<b>Figure IV-2</b> Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système fixe .....	83
<b>Figure IV-3</b> Schéma principal d'un capteur.....	84
<b>Figure IV-4</b> Schéma partiel du capteur de courant .....	84
<b>Figure IV-5</b> Schéma synoptique de la mesure de température. ....	85
<b>Figure IV-6</b> Caractéristique de la photodiode utilisée (BPW21) .....	86
<b>Figure IV-7</b> Caractéristique de la photodiode utilisée (BPW34).....	86
<b>Figure IV-8</b> Schéma partiel de l'afficheur 4 digits .....	87
<b>Figure IV-9</b> Photos d'un afficheur et son brochage.....	87
<b>Figure IV-10</b> Connecteur DB 9 male.....	88
<b>Figure IV-11</b> Brochage du PIC16F716.....	91

## Liste des Figures Chapitre V

### Liste des Figures Chapitre V-1

<b>Figure 1</b> Synoptique du dispositif réalisé.....	96
<b>Figure 2</b> Synoptique du dispositif réalisé.....	97
<b>Figure 3</b> Module afficheur 4 digits à LED 7-segments avec compteur binaire 12-bit. ....	98
<b>Figure 4</b> Etage d'entrée pour 2 voies de mesures analogiques. ....	99
<b>Figure 5</b> Graphe Courant Inverse $I_r$ [ $\mu$ A] en fonction de l'illuminance [Lux]. ....	99
<b>Figure 6</b> Alimentation régulée discrète, à très faible consommation propre.....	100
<b>Figure 7</b> Schéma détaillé et complet du dispositif réalisé. ....	101
<b>Figure 8</b> Affichage de la mesure du rayonnement incident direct du visible .....	102
<b>Figure 9</b> Affichage de la mesure du rayonnement incident proche-infrarouge. ....	102

### Liste des Figures Chapitre V-2

<b>Figure 1</b> Aperçu du dispositif réalisé. ....	104
<b>Figure 2</b> Synoptique du montage réalisé. ....	105
<b>Figure 3</b> Circuit du PIC16F716, avec son quartz de 4 MHz. ....	105
<b>Figure 4</b> Module afficheur 4 digits à LED 7-segments classique. ....	106
<b>Figure 5</b> Module afficheur 4 digits à double multiplexage. ....	107
<b>Figure 6</b> Clavier 3 boutons poussoirs et sortie jour/nuit (pin Ra4). ....	107

---

<b>Figure 7</b> Circuiterie pour les 4 voies de mesures analogiques. ....	108
<b>Figure 8</b> Assemblage de test minimaliste .....	109
<b>Figure 9</b> Schéma détaillé et complet du dispositif réalisé. ....	110

### Liste des Figures Chapitre V-3

<b>Figure 1</b> Aperçu du dispositif réalisé. ....	113
<b>Figure 2</b> Synoptique du dispositif réalisé. ....	114
<b>Figure 3</b> Circuit du PIC16F716, avec son quartz de 4 MHz. ....	115
<b>Figure 4</b> Module afficheur LCD en mode 8-bit classique. ....	116
<b>Figure 5</b> Module afficheur LCD 2x16 en mode 4-bits et 1 ligne de commande doublée. ....	117
<b>Figure 6</b> Clavier 3 boutons poussoirs et sortie jour/nuit (pin Ra4). ....	117
<b>Figure 7</b> Circuiterie pour les 4 voies de mesures analogiques. ....	118
<b>Figure 8</b> Section alimentation régulée. ....	119
<b>Figure 9</b> Section EEPROM externe. ....	120
<b>Figure 10</b> Schéma détaillé et complet du dispositif réalisé. ....	121

### Liste des Figures Chapitre V-4

<b>Figure 1</b> Production d'énergie d'un système à P.V. fixe comparé à celui motorisé. ....	122
<b>Figure 2</b> Définition des angles $\alpha$ et $h$ pour un point M de la voûte céleste. ....	123
<b>Figure 3</b> Calcul des angles $\alpha$ (azimuth) et $h$ (élévation) du Soleil pour un point de longitude et latitude $(\lambda, \varphi)$ .....	125
<b>Figure 4</b> Synoptique du montage réalisé. ....	126
<b>Figure 5</b> Circuit du PIC16F716, avec ses deux quartz (4 MHz et 32768 Hz). ....	127
<b>Figure 6</b> Module afficheur LCD en mode 4-bit, mais utilisant seulement 5 lignes I/O depuis le microcontrôleur .....	128
<b>Figure 7</b> Clavier de 3 mini boutons poussoirs. ....	128
<b>Figure 8</b> Circuit tampon pour le pilotage du positionneur numérique. ....	129
<b>Figure 9</b> Section alimentation à double régulateur série discret .....	130
<b>Figure 10</b> Représentation des dates-clés durant une année. ....	131
<b>Figure 11</b> FlashROM du PIC16F716. ....	132
<b>Figure 12</b> Organigramme fonctionnel du programme assembleur. ....	133

# Liste des Tableaux

## Liste des Tableaux Chapitre I

Tableau I-1	Potentiel de l'énergie photovoltaïque en Algérie .....	6
Tableau I-2	Valeurs des coefficients A, B et C .....	21
Tableau I-3	Calculs et mesures du rayonnement global .....	29
Tableau I-4	Calculs et mesures du rayonnement global .....	32
Tableau I-5	Erreur relative moyenne.....	34
Tableau I-6	Valeurs de MBE, MAE et RMSE.....	34

## Liste des Tableaux Chapitre II

Tableau II-1	Relevés des mesures effectuées avec le panneau solaire pour $G=930\text{W/m}^2$ .....	51
Tableau II-2	Relevés des mesures effectuées avec le panneau solaire pour $G=930\text{W/m}^2$ .....	56
Tableau II-3	Relevés des mesures effectuées avec le panneau solaire pour $G=700\text{W/m}^2$ .....	57
Tableau II-4	Relevés des mesures effectuées avec le panneau solaire pour $G=600\text{W/m}^2$ .....	58
Tableau II-5	Résultats de mesures des caractéristiques du panneau solaire .....	59

## Liste des Tableaux Chapitre III

Tableau III-1	Différents type de batterie (avantages et inconvénients) .....	67
Tableau III-II	Principales comparaisons des 2 familles technologiques de la batterie au plomb .....	68

## Liste des Tableaux Chapitre V

### Liste des Tableaux Chapitre V-2

Tableau 1	Paramètres du panneau solaire [TEA-520173750]. .....	109
Tableau 1	Paramètres de mesure .....	110

### Liste des Tableaux Chapitre V-3

Tableau 1	Format d'enregistrement d'un paquet de mesures par jour.....	120
-----------	--	-----

---

# *Nomenclature*

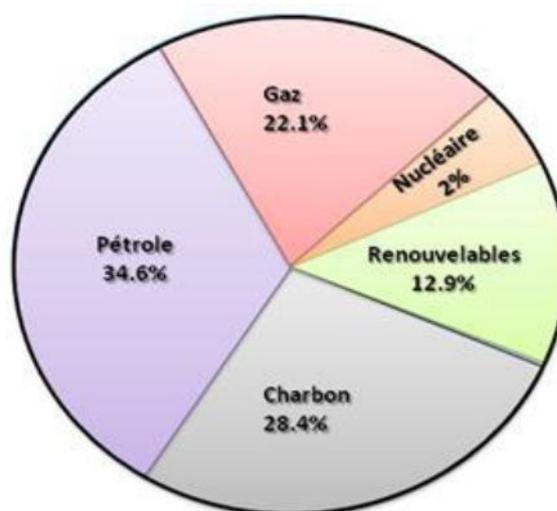
Désignation	Définition	Unité
$\phi$	Latitude du lieu	(°)
$\lambda$	Longitude du lieu	(°)
Z	Angle zénithal	(°)
h	Hauteur du soleil	(°)
a	Azimut du soleil	
$\delta$	Déclinaison du soleil	
N	Numéro du jour de l'année	
Ap	Nombre de module photovoltaïque	
DTS	Distance Terre- Soleil	(U.A)
$\sigma$	Constante de Stéphane	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
G <sub>ref</sub>	L'ensoleillement	W/m <sup>2</sup>
HL	L'heure du lever du soleil	(h)
HC	L'heure du coucher du soleil	(h)
TL	Temps légal	(h)
TSV	Temps solaire vrai	(h)
PV	Photovoltaïque	
K	Coefficient de Boltzman	(J / K)
q	Charge de l'électron	Coulombs
n	Facteur d'idéalité	
RS	Résistance série équivalente	( $\Omega$ )
RP	Résistance parallèle équivalente	( $\Omega$ )
I <sub>cc</sub>	Photo courant	(A)

<b>ID</b>	Courant générer par la diode	(A)
<b>Is</b>	Courant de saturation	(A)
<b>Vop</b>	Tension optimale	(V)
<b>Iop</b>	Courant optimum	(A)
<b>Vco</b>	Tension à circuit ouvert	(V)
<b>Icc</b>	Courant de court circuit	(V)
<b>Pm</b>	Puissance crête	(Wc)
<b>PR</b>	Coefficient de performance	(%)
<b>G</b>	l'ensoleillement dans le plan des	(kWh/m <sup>2</sup> ).
<b>EPV</b>	l'énergie solaire utilisée par le	(kWh)
<b>PO</b>	la puissance crête du générateur	(Wc)

## INTRODUCTION GENERALE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles.

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.



**Fig. 1** Actions de sources d'énergie dans l'offre totale mondiale d'énergie primaire en 2008 [1]

Les énergies renouvelables peuvent être des solutions en raison de leur abondance et elles sont inépuisables à l'échelle de temps humain [2, 3,4].

Parmi les principales ressources d'énergie renouvelable, on distingue l'énergie solaire (l'énergie que transporte le rayonnement solaire), l'énergie éolienne, l'énergie hydro-éolienne (ces éoliennes sous-marines utilisent les courants marins pour produire de l'électricité), l'énergie de la biomasse, l'énergie géothermique et l'énergie hydraulique. On cite comme exemple la conversion du rayonnement solaire, soit par la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique directement utilisable par les systèmes photovoltaïques, ou par les systèmes de concentration du rayonnement solaire afin de produire la vapeur d'eau à haute pression, qui sert à actionner les turbines et en fin produire de l'énergie électrique ainsi que le chauffage. La

source d'énergie solaire est une source renouvelable distribuée d'une manière plus au moins équitable sur notre planète terre, qui est disponible partout sur le globe terrestre.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'étude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique, pour ce faire nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestre et horaires, le mouvement du soleil, les mesures du rayonnement solaire, la modélisation et simulation du flux solaire incident basé sur les modèles semi-empiriques de Perrin de Brichambaut, de Liu-Jordan, modèle d'Angstrom et modèle d'Angstrom amélioré.

Dans le second chapitre, nous rappelons brièvement des généralités sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres, enfin on fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.

Le troisième chapitre donne un aperçu général sur les différents composants et installations d'un système photovoltaïque tel que La partie production d'énergie, le stockage de l'énergie avec les accumulateurs, enfin l'adaptation d'un générateur PV à une charge à l'aide de différents types des convertisseurs.

Le quatrième chapitre est consacré sur l'étude théorique des différents dispositifs dont on nous avons besoin afin de surveiller et d'évaluer le rendement de la centrale solaire.

Le cinquième chapitre, nous décrivons les différents dispositifs réalisés à savoir :

- Réalisation d'un appareil de mesures de rayonnement solaire "PYRANOMETRE "
- Conception et réalisation d'un moniteur solaire multicanaux
- Conception et Réalisation d'Un Mini-Datalogger Solaire Multicanaux
- Mise au point d'un suiveur solaire a un seul axe

*Bibliographie Introduction Générale*

- [1] IEA (2010a). Energy Balances of Non-OECD Countries. International Energy Agency, Paris, France.
- [2] A. ndraka, E. Charles, "Solar Heat Pipe Testing of the Stirling Thermal Motors 4-120 Stirling Engine." *IEEE.DE-AC04-94AL85000*, 1996.
- [3] S. A. Kalogirou. "Solar thermal collectors and applications" *Prog Energy Combust Sci*; **30(3)**: 231-95, 2004.
- [4] P. Schawarzböl, R. Buck, C. Sugarmen, A. Ring, "Solar gas turbine systems: design, cost and perspectives" *Sol Energy*; **80(10)**: 1231- 40, 2006.

# CHAPITRE I

## I.1 Introduction

Le soleil est une étoile en fusion nucléaire permanente, apparu il y a environ 5 milliards d'années et dont la température au centre est estimée à 14 millions de degrés.

La fusion nucléaire du soleil libère une énergie colossale qui nous parvient 8 minutes plus tard sous forme d'ondes électromagnétiques (rayons solaires visibles et invisibles) appelé le rayonnement solaire.

L'énergie solaire reçue est inégalement répartie sur le globe terrestre, où dans les régions les plus chaudes du globe, l'ensoleillement annuel peut atteindre **2 300 kWh/m<sup>2</sup>.an** (Energie reçue par une surface de 1 m<sup>2</sup> pendant une année).

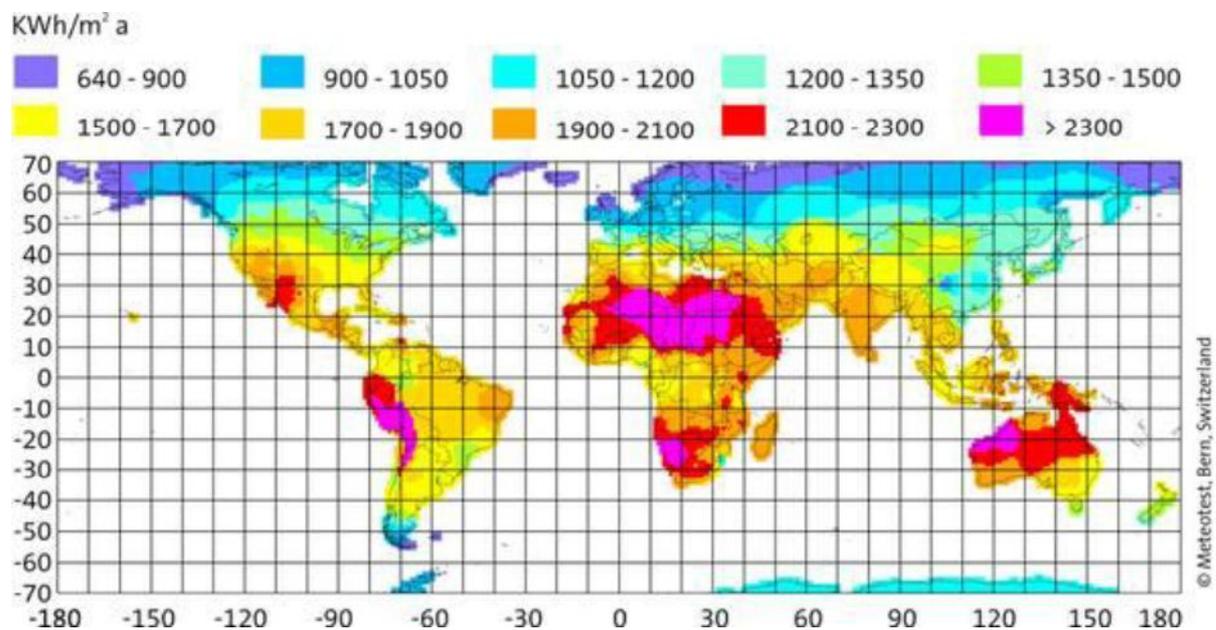


Fig. I-1 Rayonnement solaire annuel dans le monde (KWh/m<sup>2</sup>.an).

Signalons que, outre l'incidence de l'atmosphère, l'irradiation solaire dépend :

- de l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- de la latitude du lieu et son degré de pollution,
- de la période de l'année,
- de l'instant considéré dans la journée,
- de la nature des couches nuageuses.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière. [1].

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme surtout dans le Sud du pays (Tableau I.1). La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures. [2]

**Tableau I-1 Potentiel de l'énergie photovoltaïque en Algérie.**

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (H/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Dans ce chapitre, nous présentons les paramètres essentiels pour l'estimation des énergies captées par les systèmes PV.

## 1.2 Mouvement de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est légèrement elliptique, ayant le soleil pour foyer et dont le rayon moyen est de  $149,6.10^6$  km avec une variation de presque 1,7% au cours de l'année du fait de la légère excentricité de l'orbite terrestre, l'axe de rotation de la terre sur elle-même est inclinée de  $23^{\circ}27'$  par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre) [3]. On peut décomposer le mouvement de chacun d'eux en mouvement de rotation et mouvement de translation.

### 1.2.1 Mouvement de rotation

La terre tourne autour de son axe de rotation (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens Ouest - Est. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme de la durée moyenne entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de :  $P_r = 23\text{h } 56\text{mn } 04\text{s} \approx 24\text{h}$ .

Sa vitesse linéaire de rotation à l'équateur est ;  $V_r \approx 0,465\text{Km/s}$ , elle est variable en fonction de la latitude  $\varphi$  telle que :

$$V_r(\varphi) = V_r(\text{Cos}(\varphi)) \quad \text{(I-1)}$$

### 1.2.2 Mouvement de translation :

La terre est en rotation sur elle-même et tourne aussi autour du soleil en  $Pt = 365\text{jours } 5\text{h } 48\text{mn } 40\text{s} \approx 365,25 \text{ jours}$ . Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil est presque au centre.

Elle correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres. La terre tourne autour du soleil avec une vitesse moyenne  $Vt \approx 29,77\text{Km/s}$ . Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons. [2]

Il existe quatre points remarquables du mouvement de translation :

- Solstice hiver le 21 décembre,
- Solstice été le 21 juin,
- Equinoxe automne le 21 septembre,
- Equinoxe printemps le 21 mars.

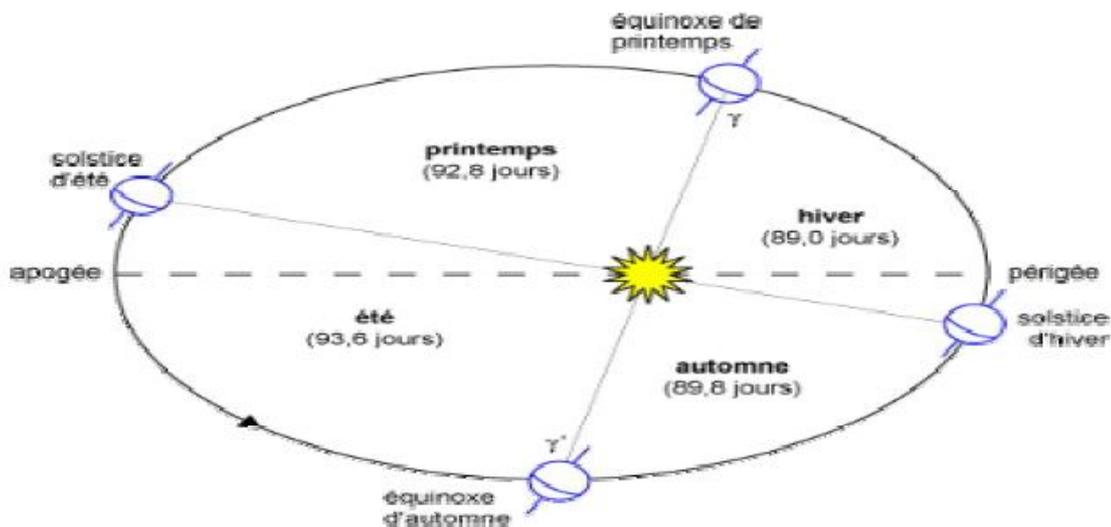


Fig. I-2 Les mouvements de la terre [4]

### 1.3 Mouvement apparent du soleil

Pour étudier le mouvement du soleil, nous examinerons le mouvement apparent du soleil pour un observateur sur terre.

En un point de latitude  $\varphi$  au Nord de l'équateur, le soleil décrit un arc de cercle variable chaque jour à raison de 150 par heure.

L'angle que fait la direction du soleil avec le vertical du lieu est appelé « Distance Zénithale (ou angle zénithal) » noté  $Z$ . Elle varie quotidiennement et annuellement entre [2] :

$$\phi - 23^{\circ}27' \leq Z \leq \phi + 23^{\circ}27'$$

- Aux équinoxes (EA et EP)  $\rightarrow Z = \phi$

Les journées ont une durée de 12h.

- Au solstice hiver (SH)  $\rightarrow Z = \phi + 23^{\circ}27'$

Les journées ont une durée inférieure à 12h.

- Au solstice été (SE)  $\rightarrow Z = \phi - 23^{\circ}27'$

Les journées ont une durée supérieure à 12h.

- En un point de l'équateur ( $\phi = 0$ )

La durée des jours est de 12h = constante.

- En un point de l'attitude  $\phi$ , le mouvement du soleil sera identique si on inverse les positions du sud et du nord.

## I.4 Repérage d'un site sur la surface terrestre

Les coordonnées géométriques utilisées pour déterminer la localisation d'un point sur la surface terrestre sont la latitude et la longitude. Elles sont calculées sous forme d'angles qui s'expriment en degrés, minutes et secondes.

- La latitude  $\phi$  donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur ; elle varie de  $0^{\circ}$  à l'équateur à  $90^{\circ}$  N (ou S) aux pôles.

$$\Phi: \text{Varie de } -90^{\circ} \text{ à } +90^{\circ} \text{ tel que: } \left\{ \begin{array}{l} \phi > 0 \text{ Vers le Nord} \\ \phi < 0 \text{ Vers le Sud} \end{array} \right.$$

- La longitude  $\lambda$ , permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest d'une ligne Nord-Sud de référence appelée le méridien (Greenwich). [5].

$$\lambda: \text{Varie de } -180^{\circ} \text{ à } +180^{\circ} \text{ tel que: } \left\{ \begin{array}{l} \lambda > 0 \text{ à l'est du méridien de Greenwich} \\ \lambda < 0 \text{ à l'ouest du méridien de Greenwich.} \end{array} \right.$$

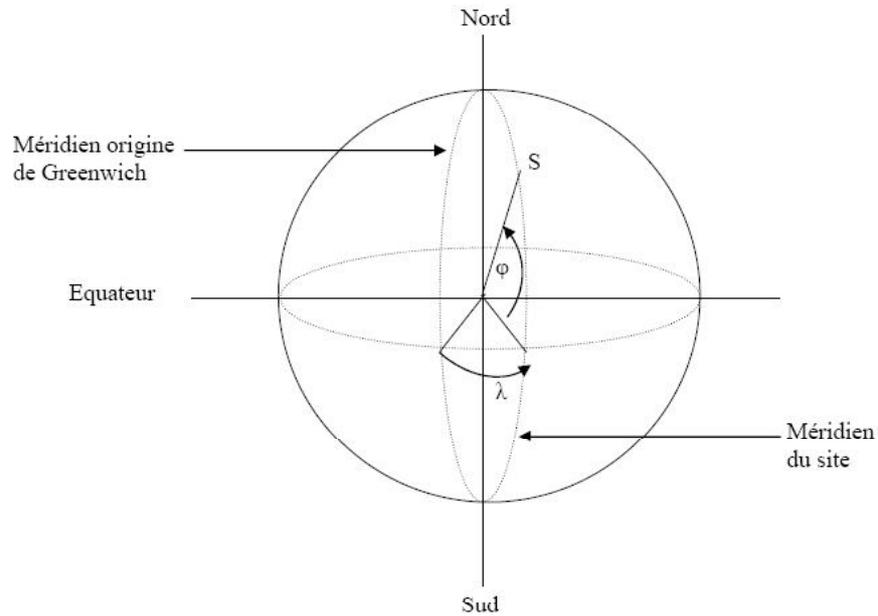


Fig. I-3 Repérage d'un site S sur la surface terrestre

## 1.5 Coordonnées du soleil :

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

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

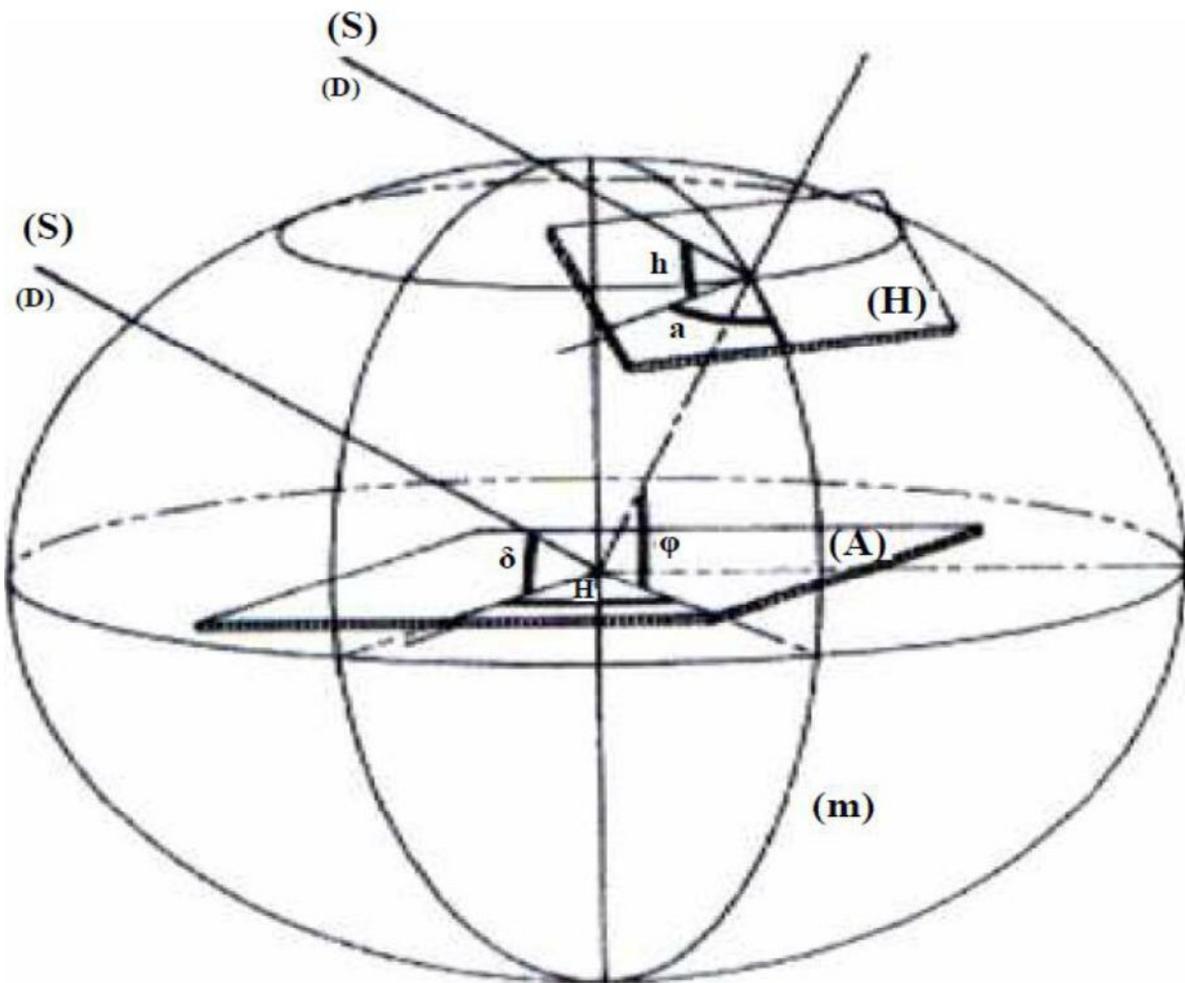


Fig. I-4 Direction du soleil (S) repéré en coordonnées équatoriales et en coordonnées horizontales en un lieu donné de latitude  $\varphi$  [4].

### 1.5.1 Coordonnées équatoriales :

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles ( $\delta$ , H).

#### a) Déclinaison du soleil $\delta$ :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. La déclinaison du soleil varie quotidiennement selon la relation [6] :

$$\delta = 23,45 \cdot \text{Sin} \left[ \frac{360}{365} (N - 80) \right] \quad (\text{I-2})$$

$N$  : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c-à-d il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année :

- Année civile :  $N = 365$  jours.
- Année bissextile :  $N = 366$  jours.

$\delta$ : varie entre deux valeur extrêmes :  $-\delta^0 \leq \delta \leq +\delta^0$  avec  $\delta^0 = 23,45^\circ$ .

On prend :

- $\delta = 0$  aux Equinoxes (E.P, E.A)
- $\delta = 23,45^\circ$  au Solstice été (S.E)
- $\delta = -23,45^\circ$  au Solstice hiver (S.H)

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure (I-5).

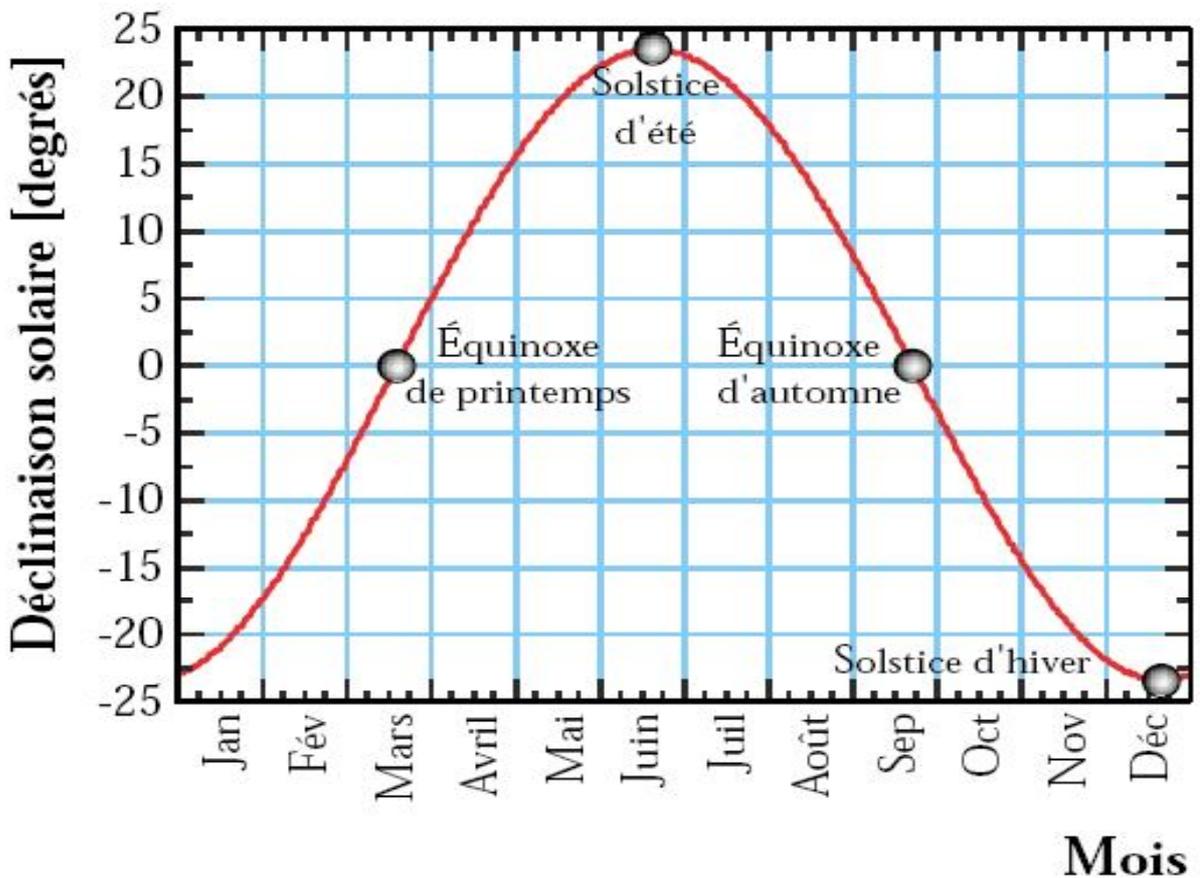


Fig. I-5 Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année  $N$ .

**b) Angle horaire du soleil H :**

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante [3] :

$$H = 15 (TSV - 12)$$

(I-3)

$$\text{Avec : } \begin{cases} TSV = TL - DE + \left( \frac{E_t + 4\lambda}{60} \right) \\ E_t = 9,87 \cdot \sin 2N' - 7,35 \cos N' - 1,5 \sin N' \\ N' = \frac{360}{365} (N - 81) \\ DE = +1 \quad \text{Pour l'Algérie.} \end{cases}$$

- ✓  $DE$  : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.
- ✓  $TSV$  : temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.
- ✓  $TL$  : temps légal = temps donné par une montre.
- ✓  $E_t$  : correction de l'équation du temps.
- ✓  $\lambda$  : longitude du lieu.
- ✓ L'angle horaire  $H$  varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ .

$$\text{On prend : } \begin{cases} H > 0 \text{ après midi.} \\ H < 0 \text{ le matin} \\ H = 0 \text{ midi TSV.} \end{cases}$$

**1.5.2 Coordonnées horizontales :**

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan horizontal du lieu de latitude  $\phi$  par deux angles  $h$  et  $a$ .

**a) La hauteur du soleil h :**

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal.

La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante [7]:

$$\mathbf{Sin h = Cos \delta . Cos \varphi . Cos H + Sin \varphi . Sin \delta} \quad \mathbf{(I-4)}$$

Avec h varie entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$ .

$$\mathbf{On\ prend :} \left\{ \begin{array}{ll} h > 0 & \text{le jour} \\ h < 0 & \text{la nuit} \\ h = 0 & \text{aux lever et coucher} \end{array} \right.$$

**b) L'azimut du soleil a :**

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud.

L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [7] :

$$\sin a = \frac{\cos \delta . \cos H}{\sin h} \quad \mathbf{(I-5)}$$

Avec a : varie entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ .

$$\mathbf{On\ prend :} \left\{ \begin{array}{ll} a > 0 & \text{vers l'ouest} \\ a < 0 & \text{vers l'est} \\ a = 0 & \text{direction du sud} \end{array} \right.$$

### I.6 Durée du jour

Le jour est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donne une hauteur  $h$  du soleil nulle sont appelés : le lever et le coucher du soleil [8].

➤ La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire :

$$\sin h = \cos \delta \cos H \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi \tag{I-6}$$

➤ La relation donnant la durée du jour peut s'écrire :

$$Dj = \frac{H_C - H_L}{15} = \frac{2}{15} \cdot \text{Arc} \cos T \tag{I-7}$$

Avec :

$$\begin{aligned} H_C &= \arccos(-\tan \delta \tan \varphi) \\ H_L &= -H_C \\ \text{et} \\ T &= -\tan \delta \cdot \tan \varphi \end{aligned}$$

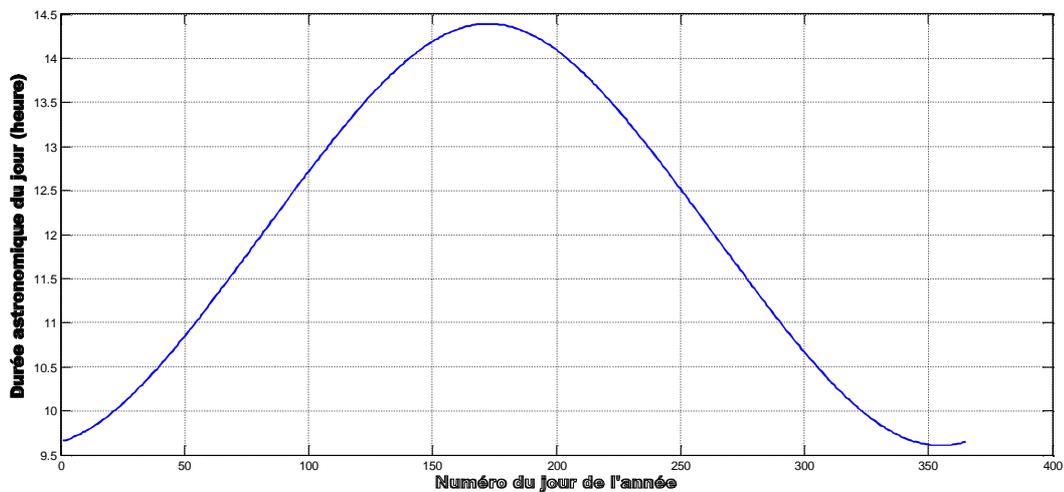


Fig. I-6 Variation de la durée du jour tout au long de l'année pour la région d'Oran (Latitude =35.38°)

### 1.6.1 Influence de la latitude sur la durée du jour

On a aussi tracé la variation de la durée du jour au cours de l'année pour différentes latitudes, on constate suivant la figure (IV-2) que la durée du jour augmente avec la latitude pour la période d'été et diminue avec la latitude pour la période d'hiver. A l'équateur pour la latitude zéro les journées sont égales à 12 h tout au long de l'année.

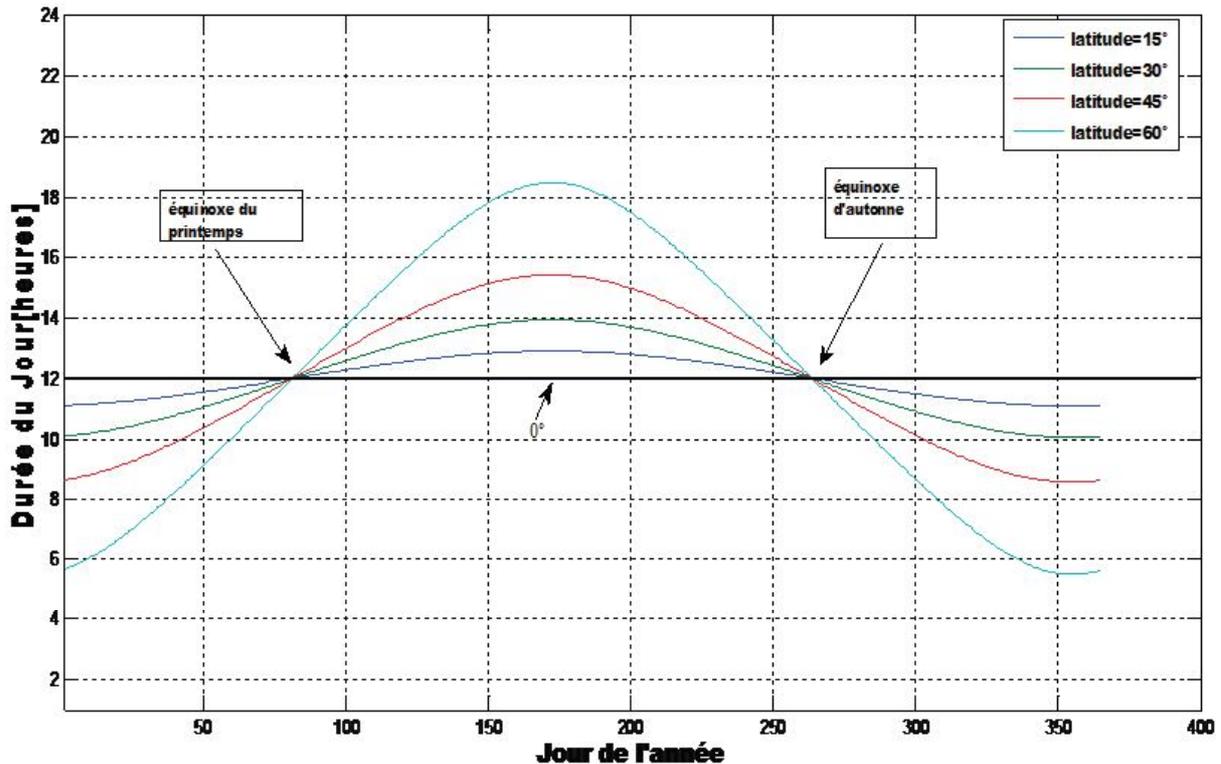


Fig. I-7 Variation de la durée du jour durant l'année pour différentes latitudes

## 1.7 Mesure du rayonnement solaire

L'ensoleillement ( $G$ ) correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ). L'ensoleillement varie de zéro, au lever du Soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire.

L'ensoleillement peut également exprimer la quantité d'énergie solaire captée sur un plan pendant un intervalle déterminé.

Il existe quatre types de rayonnement [9] :

#### a) Rayonnement direct :

C'est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre