

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DU TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

N° : .....



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

OPTION : ENERGETIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par: **DRISSI Kanza**

Intitulé

**Prédiction des Radiations Solaires Application à  
la Région de M'sila**

Soutenue publiquement, le /31/ 05/2017.

Soutenu devant le jury composé de:

**Mr. AMIRAT.B**

Université de M'sila

Président

**Dr. IHDADDENE Razika**

Université de M'sila

Rapporteur

**M<sup>e</sup>. BENKHARBACHE .S**

Université de M'sila

Examineur

**Année universitaire : 2016 /2017**

## Remerciement

*Je tiens ma sincères remerciement s'adressent à Allah le grand merci lui revient, pour mon aide et la volonté qu'il j'a donné pour surmonter tous les obstacles et les difficultés durant mes années d'études et de J'avoir éclairé mon chemin afin de réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier **Dr Ihaddadene** . pour avoir accepté de diriger ce mémoire, pour les conseils qu'il m'a prodigué et pour les efforts qu'il a consenti tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Je tiens à exprimer notre gratitude à tous mon Enseignants.*

*Je remercie également les membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail. Je remercie chaleureusement ma famille, pour leur soutien inconditionnel tout au long de mes longues années d'études.*

*Enfin, J'à adresser mon très sincère remerciement à tous ceux qui m'aide à accomplir ce travail.*

***Kanza Drissi***

# الاهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

(قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون )

صدق الله العظيم

الهي لا يطيب الليل الا بشكرك ولا يطيب النهار الا بطاعتك .. ولا تطيب  
اللحظات الا بذكرك .. ولا تطيب الآخرة الا بعفوك .. ولا تطيب الجنة الا برويتك

"الله جل جلاله"

الى من بلغ الرسالة وادى الأمانة .. ونصح الأمة .. الى نبي الرحمة ونور العلمين

"سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم"

الى من كلله الله بالهبة والوقار .. الى من علمني العطاء بدون انتظار .. الى من احمل  
اسمه بكل افتخار .. ارجو من الله أن يمد في عمرك لثرى ثمارا قد حان قطافها بعد طول انتظار

وستبقى كلماتك نجوم اهتدي بها اليوم وفي الغد والى الأبد

والدي العزيز

الى ملاكي في الحياة .. الى معنى الحب والى معنى الحنان و التفاني .. الى بسمه الحياة وسر

الوجود الى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي الى أغلى الحبايب

أمي الحبيبة

الى من رافقوني منذ أن حملنا حقائب صغيرة ومعكم سرت الدرب خطوة بخطوة ومازلتم

ترافقوني حتى الآن الى شموع متقدة تنير ظلمة حياتي

اخوتي

الى الاخوة والأخوات , الى من تحلو بالإخاء وتميزوا بالوفاء و العطاء الى ينباع الصدق  
الصافي الى من معهم سعدت, وبرفقتهم في دروب الحياة الحلوة و الحزينة الى من كانوا معي

على طريق النجاح و الخير الى من عرفت كيف أجدهم و علموني أن لا اضيعهم

أصدقائي

## *Dédicaces*

*Je dédie mon travail à qui m'ont donné la  
vie :*

*Mon père Saad et ma mère Mebarka*

*A mon frère : Kamel Eddine*

*A mes sœurs : Rokaya, Hada, Nassira,  
Lamia, et petit sœur Hadjer*

*A mon mari Samir, et petit fille Alaa*

*A mes amis et collègues.*

*Yakout, Razika, Zina, Chayma, Amel.*

*a toute ma famille, Et toute la promotion  
de Mécanique et spécialement le groupe*

*d'option Énergétique, et le groupe de*

*Sonatrach SR3 de M'sila*

*Ainsi qu'à toutes les personnes qui m'a  
aidé à la réalisation de ce travail.*

*Drissi Kanza*

## SOMMAIRE

Introduction générale ----- 01

### CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES RADAITIONS SOLAIRES

#### Partie A :

I.1. L'énergie solaire ----- 04

I.1.2. Avantages et Inconvients de l'énergie solaire ----- 04

I.1.3. Applications techniques de l'énergie solaire ----- 05

I.2. Le gisement solaire en Algérie ----- 05

I. 3. Le Soleil ----- 06

I.4. Mouvement de la Terre ----- 07

I.4.1. Mouvement de Rotation ----- 07

I.4.2. Mouvement de Translation ----- 08

I.5. La position géométrique du Soleil ----- 09

I.6. Coordonnées géographique terrestre ----- 10

A. Laltitude ----- 10

B. Longitude ----- 11

I.7. Le rayonnement Solaire ----- 11

I.8. La Constante Solaire ----- 13

I.9. Rayonnement Solaire reçu au niveau du sol ----- 13

I.10. Mesure du rayonnement Solaire -----	14
I.10.1. L'héliographe de Campbell-stokes -----	14
I.10.2. Les pyranomètres -----	15
I.10.3. Les satellites météorologiques -----	16

**Partie B :**

I.11. Prédiction des radiations solaires globales Journalières -----	17
I.11.1. Modèle 1 -----	17
I.11.2. Modèle 2 -----	17
I.11.3. Modèle 3 -----	18
I.11.4. Modèle 4 -----	18
Conclusion : -----	19

**CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE**

II-1. Situation géographique de la région de M'sila -----	21
II-2. La source des données -----	25
II-3. Évolution annuelle des radiations solaires globales -----	27
II-4. Évolution mensuelle des radiations solaires globales -----	27
II-5. Évolution mensuelles et journalières des radiations solaires globales de l'années moyenne -----	28
Conclusion -----	30

## **CHAPITRE III : PREDICTION DES RADIATIONS SOLAIRES GLOBALES**

III.1. Choix des modèles -----	32
III.2. Estimation des paramètres des différentes modèles -----	33
III. 3. Évolution des radiations solaires -----	34
III. 4. Méthodes de comparaison des différents modèles -----	37
III.4.1. Le coefficient de détermination $R^2$ -----	37
III.4.2. Erreur quadratique moyenne RMSE -----	38
III.4.3. L'erreur systématique absolue moyenne MABE -----	38
III. 5. Comparaison des différents modèles -----	39
III. 6. Evolution mensuelle des radiations solaires suivant le modèle de Zang et al. -----	40
Conclusion -----	42
Conclusion générale -----	43
Références bibliographiques -----	45

## Notation et symbole

$E$  : énergie totale.

$m$  : masse.

$C^2$  : le vitesse de lumière.

$j$  : représente le numéro du jour de l'année.

$V_t$ : vitesse maximale (Km/s)

$\delta$ : la valeur de la déclinaison.

$T_r$  : période (rotation).

$T_t$  : période (translation).

$G$  : les radiations solaires globales journalières( $Wh/m^2$ );;

$a, b, c, d, e, f$  : est la constant de ce modèle ;

$\bar{y}$  : présente la valeur moyenne des valeurs des radiations solaires globales mesurées  $y_i$  ;

$y_i$  : la  $i^{\text{ème}}$  radiation solaire globale mesurée ;

$x_i$ : la  $i^{\text{ème}}$  radiation solaire globale calculée pour chaque modèle.

$N$  : le nombre des données des radiations solaires globales qui est le nombre de jour de l'année.

## Liste de Figure

### CHAPITRE I :

<b>Figure I.1 :</b> carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel -----	06
<b>Figure I.2 :</b> La structure du soleil -----	07
<b>Figure I.3 :</b> Le mouvement de la terre autour du soleil-----	09
<b>Figure I.4 :</b> L'angle d'inclinaison de la terre-----	09
<b>Figure I.5 :</b> Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil -----	10
<b>Figure I.6 :</b> Coordonnées géographiques terrestres -----	11
<b>Figure I.7:</b> Analyse spectrale du rayonnement solaire -----	12
<b>Figure I.8 :</b> La constante solaire -----	13
<b>Figure I.9 :</b> Composition du rayonnement solaire -----	14
<b>Figure I.10 :</b> L'héliographe de Campbell-Stokes -----	15
<b>Figure I.11:</b> Pyranomètre -----	15

### CHAPITRE II :

<b>Figure II.1 :</b> La situation géographique de la wilaya de M'sila -----	21
<b>Figure II.2 :</b> Évolution des températures dans la région de M'sila-----	22
<b>Figure II.3 :</b> Évolution des températures maximales dans la région de M'sila -----	23
<b>Figure II.4 :</b> Évolution des jours à ciel nuageux, soleil et de précipitations dans la région de M'sila -----	23
<b>Figure II.5 :</b> Évolution des quantité de précipitations dans la région de M'sila -----	24
<b>Figure II.6a :</b> Évolution des vitesses de vent dans la région de M'sila -----	24
<b>Figure II.6b :</b> La rose des vents dans la région de M'sila -----	25

<b>Figure II.7:</b> Comparaison entre des radiations solaires globales des 15 ans et 20 ans dans l'ordre croissant-----	26
<b>Figure II.8 :</b> Comparaison entre des radiations solaires globales des 15 ans et 20 ans dans l'ordre décroissant -----	26
<b>Figure II.9 :</b> Évolution annuelle des radiations solaires globales dans la région de M'sila --	27
<b>Figure II.10 :</b> Évolution mensuelle des radiations solaires globales des quinze années (1989-2003) -----	28
<b>Figure II.11 :</b> Évolution des radiations solaires globales mensuelles de l'année moyenne (1989-2003) -----	29
<b>Figure II.12:</b> Évolution des radiations solaires globales journalières de l'année moyenne(1989-2003) -----	29

### **CHAPITRE III :**

<b>Figure III.1 :</b> Évolution du modèle 1 des radiations solaires globales de M'sila (89-03) ----	34
<b>Figure III.2 :</b> Évolution du modèle 2 des radiations solaires globales de M'sila (89-03) ----	35
<b>Figure III.3 :</b> Évolution du modèle 3 des radiations solaires globales de M'sila (89-03) ----	35
<b>Figure III.4 :</b> Évolution du modèle 4 des radiations solaires globales de M'sila (89-03) ----	36
<b>Figure III.5 :</b> Évolution des quatre modèles des radiations solaires globales de M'sila (89-03) -----	37
<b>Figure III.6 :</b> Évolution du modèle4 des radiations solaires globales mensuelles de M'sila (89-03) -----	41

## Liste de tableau

### CHAPITRE I :

**Tableau I.1** : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques -----06

**Tableau I.2** : Valeurs énergétiques des photos issue du spectre solaire -----12

### CHAPITRE III :

**Tableau III.1** : Les paramètres des Modeles (Kaplanis et Kaplani, Al-Salaymeh1, Al-Salaymeh2, Zing et al.) de la région de M'sila (1989-2003)-----33

**Tableau III.2** : L'analyse statistique de différents modèles (Modèle 1, Modèle 2, Modèle 3 et Modèle 4) de la région de M'sila (1989-2003). -----39

## Introduction générale

L'énergie solaire se présente comme une des énergies renouvelables, elle est propre, gratuite et promotrice dans le développement des applications solaires (les systèmes photovoltaïques, les systèmes thermiques, les systèmes photo thermiques,.....).

Suite à sa position géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire le plus important du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peu atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara.

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Toutefois, l'intensité des radiations solaires pour une position bien déterminée dépend fortement de la situation géographique du lieu et des conditions atmosphériques tels que la durée d'insolation, la température, l'humidité.....

Les stations de mesure des différentes composantes du rayonnement solaire sont rares ou quasi inexistantes à travers le territoire national. De ce fait il est intéressant de développer de modèles mathématiques qui permettent de décrire les différentes composantes du rayonnement solaire en fonction de ces paramètres.

Cependant, il existe peu d'études qui sont intéressées au développement des modèles mathématiques qui décrivent les radiations solaires journalières en fonction uniquement du nombre de jour comme le seul variable indépendant.

On se basant sur le travail de Hamidi Aissa (thèse de master en énergétique 2015/20016) sur l'étude des radiations solaires dans la région de M'sila, on a tenté de décrire un modèle mathématique des radiations solaires globales sur une surface horizontale de la région de M'sila en fonction uniquement du nombre de jour. Pour cette étude, les radiations solaires globales mesurées ne sont pas disponibles au niveau de la station météorologique de M'sila, c'est pour cette raison qu'on a utilisé les données satellites. Ces données couvrent une durée de 15 ans depuis Janvier 1989 jusqu'à Décembre 2003. Notre mémoire s'articule autour de trois chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le rayonnement solaire. Il est divisé en deux parties ; la première est consacrée à l'énergie solaire comme étant une énergie

renouvelable à savoir ces avantages, ces inconvénients et ces applications. De même, le rayonnement solaire (son spectre, la constante solaire, les mouvements de la terre) et les instruments de mesure des radiations solaires.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation des radiations solaires c-à-d la description des modèles décrivant les radiations solaires uniquement en fonction du nombre du jour.

Dans le deuxième chapitre, on expose la description du site choisi dans notre étude qui est la région de M'sila, sa situation géographique et son climat. De même, on a exprimé les données des radiations solaires globales sur une surface horizontale des quinze années de janvier 1989 jusqu'à Décembre 2003 de cette région utilisées dans notre étude.

Au cours du troisième chapitre, on s'est intéressé à la prédiction des radiations solaires globales sur une surface horizontale dans la région de M'sila durant quinze années allant de 1989 jusqu'à 2003 suivant le nombre de jour uniquement. Pour cela quatre modèles ont été testé dans ce mémoire, le modèle1 de Kaplanis et Kaplani, le modèle 2 de Al-Salaymeh 1, modèle 3 de Al-Salaymeh 2 et le modèle4 de Zang et al.. Afin de déterminer le meilleur modèle qui décrit les radiations solaires globales dans cette région et une analyse statistique était performée pour valider ce choix.



## 1<sup>ER</sup> CHAPITRE

### *Généralités sur le rayonnement solaire*



Dans ce chapitre on présente une synthèse bibliographique sur le rayonnement solaire. Ce dernier est divisé en deux parties ; la première est consacrée à l'énergie solaire comme étant une énergie renouvelable à savoir ces avantages, ces inconvénients et ces applications. De même, sur le rayonnement solaire (son spectre, la constante solaire, les mouvements de la terre) et les instruments de mesure des radiations solaires.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation des radiations solaires c-à-d la description des modèles décrivant les radiations solaires uniquement en fonction du nombre du jour.

## **Partie A :**

### **I. 1.L'énergie solaire :**

L'énergie solaire est l'énergie électromagnétique transmise par le soleil et qui est générée par la fusion nucléaire. Elle est à l'origine de toute forme de vie terrestre et représente environ 420 trillions, de kilowatt-heures (KWh). Le rayonnement lumineux et la chaleur du soleil sont utilisés par les humains depuis l'Antiquité, ce qui a abouti à une série de technologies qui n'ont cessé de se développer. Le rayonnement solaire, ainsi que les ressources à énergie solaire secondaires telles que l'énergie éolienne, l'énergie marémotrice, l'énergie hydroélectrique et la biomasse, représentent la plupart de l'énergie renouvelable disponible sur Terre. Seule une minuscule part de l'énergie solaire disponible est utilisée.[web1]

#### **I .1.2 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :**

L'énergie solaire présente les avantages suivants [1]:

- La source d'énergie solaire (soleil) est une source naturelle,
- Le système d'exploitation de l'énergie solaire est silencieux et sans danger pour les humains,
- Des formes d'aides gouvernementales peuvent aider à financer l'installation des panneaux.

Cette énergie présente également les inconvénients suivants :

- Les prix de fabrication et d'installation des panneaux sont assez élevés,

- Il est impossible d'obtenir une autonomie énergétique complète par le biais de panneaux solaires seulement.

### **I .1.3-Applications techniques de l'énergie solaire :**

En s'appuyant sur la technologie solaire, l'énergie solaire peut être profitable de plusieurs façons [web2]:

- Les cellules solaires produisent de l'électricité à courant continu (photovoltaïque).
- Les panneaux solaires génèrent de la chaleur (thermosolaire).
- Les centrales héliothermiques génèrent de l'électricité à partir de la chaleur et de la vapeur.
- Les plantes et les déchets végétaux peuvent être traités pour produire des liquides exploitables ou des gaz.
- Les centrales éoliennes et hydroélectriques génèrent de l'électricité
- Les cuisinières solaires ou les fours solaires permettent de réchauffer les aliments ou de stériliser les équipements médicaux.

### **I .2-Le gisement solaire en Algérie :**

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [2]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.1:

L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Comme évalué par l'Agence Spatiale Allemande (ASA). Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement.[3]

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [3].

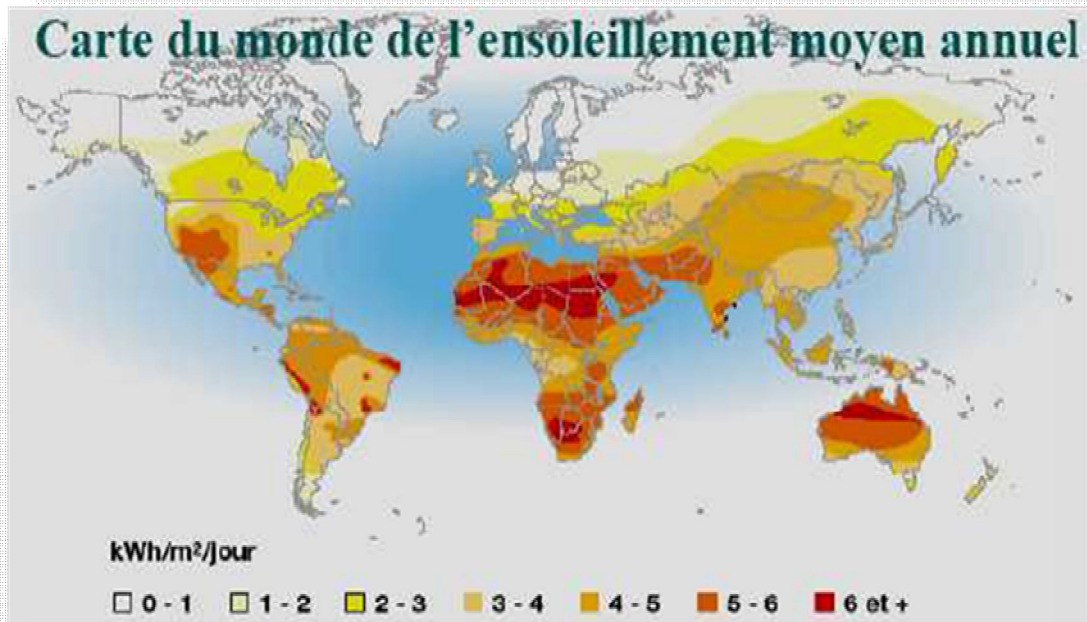


Figure I.1. Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [3].

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m²/an)	1700	1900	2650

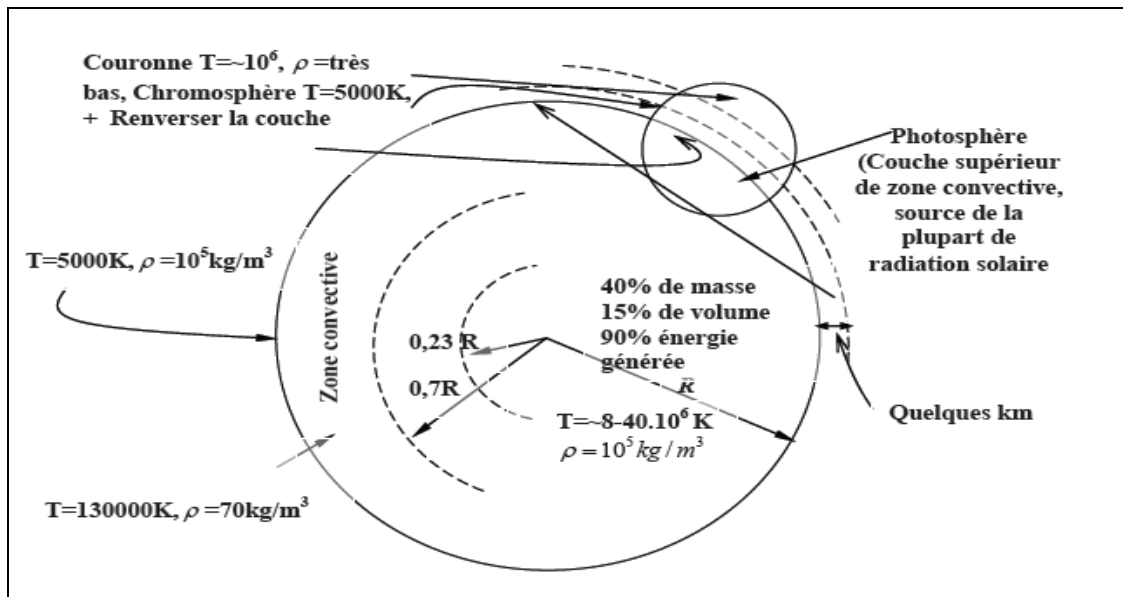
Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

### I.3-Le Soleil :

Le soleil se présente comme une sphère gazeuse composée Presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km et sa masse est de l'ordre de 2.1027 tonnes. Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles

transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence est dissipée sous forme d'énergie ( $E=mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de 36.1022 KW. La terre étant à une distance de 150.106 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de 1,8.1014 KW [4].

Dans la structure schématique du soleil illustré dans la Figure I.2, il est estimé que 90% de l'énergie est générée dans la région du disque solaire située entre 0 et 0,23R, ou R le rayon du soleil, qui représente 40% de la masse du soleil. A distance de 0,7R du centre, la température diminue d'environ 130 000 K et la densité de 70 kg/m<sup>3</sup> ; Là, le processus convectif du soleil devient important et la zone comprise entre 0,7 et 1,0R est appelée : zone convective. Dans cette zone, la température diminue d'environ 5000 K et la densité d'environ 10<sup>-5</sup> kg/m<sup>3</sup> [5].



**Figure I.2 : La structure du soleil [5].**

**I.4-Mouvement de la Terre :**

Les mouvements de la terre peuvent être décomposés en deux mouvements ; le mouvement par rapport au centre de masse (rotation) et le mouvement de ce centre de masse par rapport à lui-même (translation) [6].

**I.4.1 Mouvement de rotation :**

La terre tourne autour de l'axe des pôles (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de

ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs du soleil 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 ( $T_r$ ) de 23h 56mn 04s  $\approx 24$ h

La vitesse linéaire de rotation à l'équateur est environ 0,465km/s.

#### **I.4.2 Mouvement de translation:**

La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne autour du soleil en une période  $T_t = 365$  jours 5h 48mn 40s  $\approx 365,25$  jours [6]. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre, comme illustré sur la figure I.3. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres[6]. La terre tourne autour du soleil avec une vitesse moyenne  $V_t \approx 29,77$ km/s [vitesse maximale], en hiver 30,27 Km/s et minimale en été 29,77 Km/s. Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique direct et provoque le cycle des saisons. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique ; l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé déclinaison et qui vaut  $23,45^\circ$  comme le montre la figure I.4. Elle varie au cours de l'année entre  $-23,45^\circ$  et  $+23,45^\circ$ , elle est nulle aux équinoxes (21 Mars et 21 Septembre) et maximale au solstice d'été (21 Juin) et minimale au solstice d'hiver (21 Décembre). La valeur de la déclinaison(en  $^\circ$ ) peut être calculée par la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \times \sin[0.980(j+284)] \quad (\text{I. 1})$$

Ou :

j : représente le numéro du jour de l'année.

La rotation de la terre nous donne la notion de la journée qui est le temps qui sépare deux passages successifs du soleil au méridien d'un lieu. L'évolution de la terre autour du soleil définit l'année.

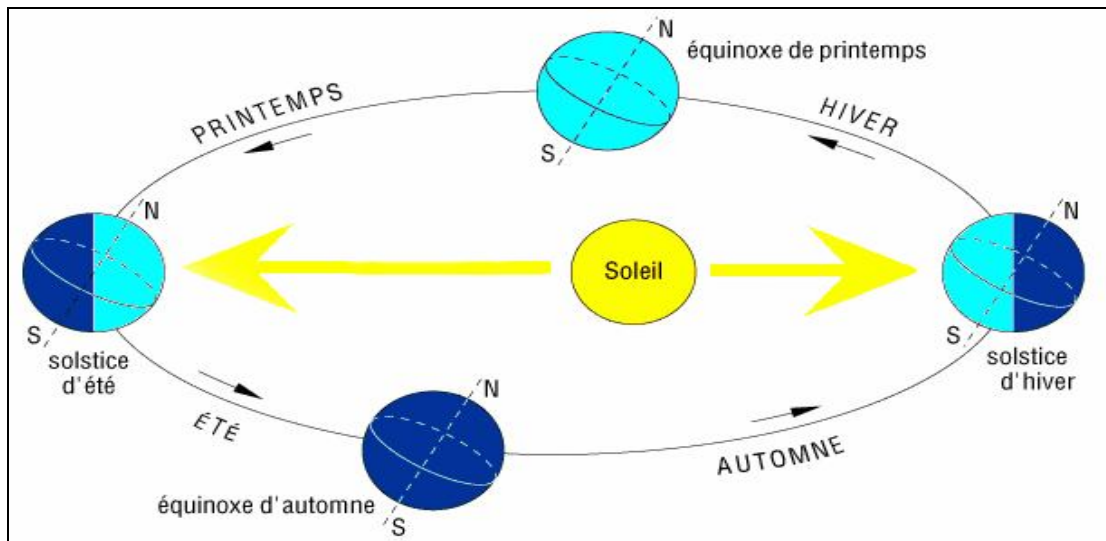


Figure I.3: Le mouvement de la terre autour du soleil.[ 7]

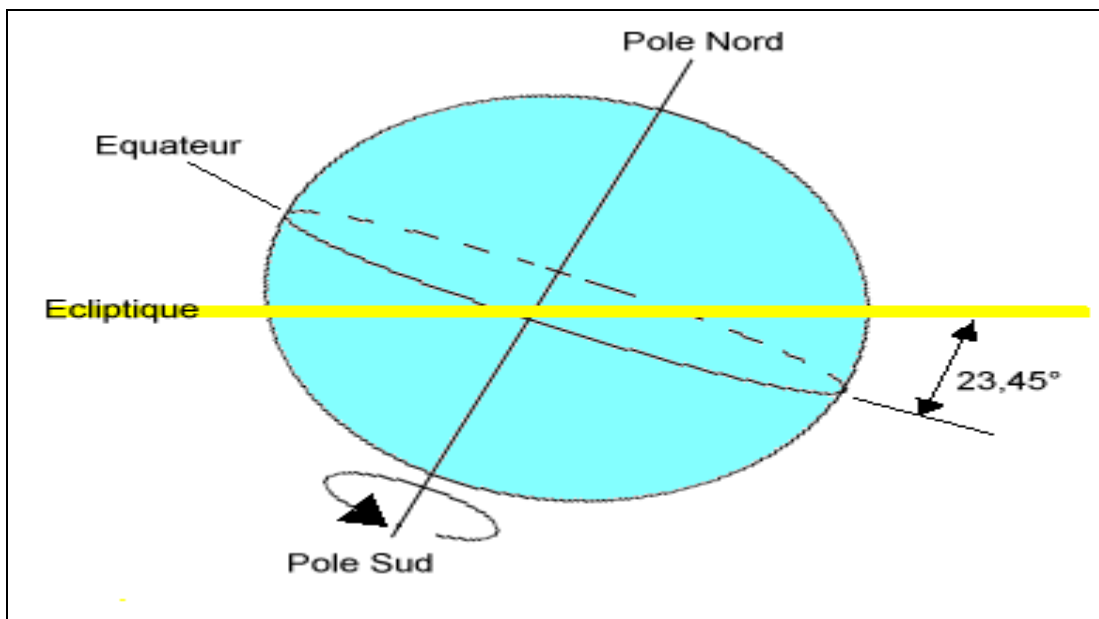


Figure I.4 : L'angle d'inclinaison de la terre [8].

### I.5-La position géométrique du soleil :

La Terre tourne autour d'un axe définissant les pôles nord et sud du globe en 24 heures. Ce phénomène génère ainsi une alternance de jours (l'hémisphère du site considéré est alors éclairé) et de nuit (l'hémisphère est à l'ombre). La trajectoire de la terre autour du soleil constitue une ellipse de très faible excentricité (c'est-à-dire proche d'un cercle), réalisée en environ 365 jours [9]. L'inclinaison de l'axe des pôles terrestres par rapport au plan de

l'écliptique est constante et égale à  $23^{\circ} 27'$  ; elle est à l'origine du phénomène de saison que nous connaissons. La distance terre-soleil varie entre 153.106 km (le 3 juillet) et 147.106 km (le 3 janvier) ; sa valeur moyenne vaut 150.106 km, ce qui donne un rayon apparent du soleil depuis la terre égal à  $0,27^{\circ}$ . Les distances minimale et maximale entre les deux astres valent donc respectivement 0,983 et 1,017 UA [10] (Figure I.5).

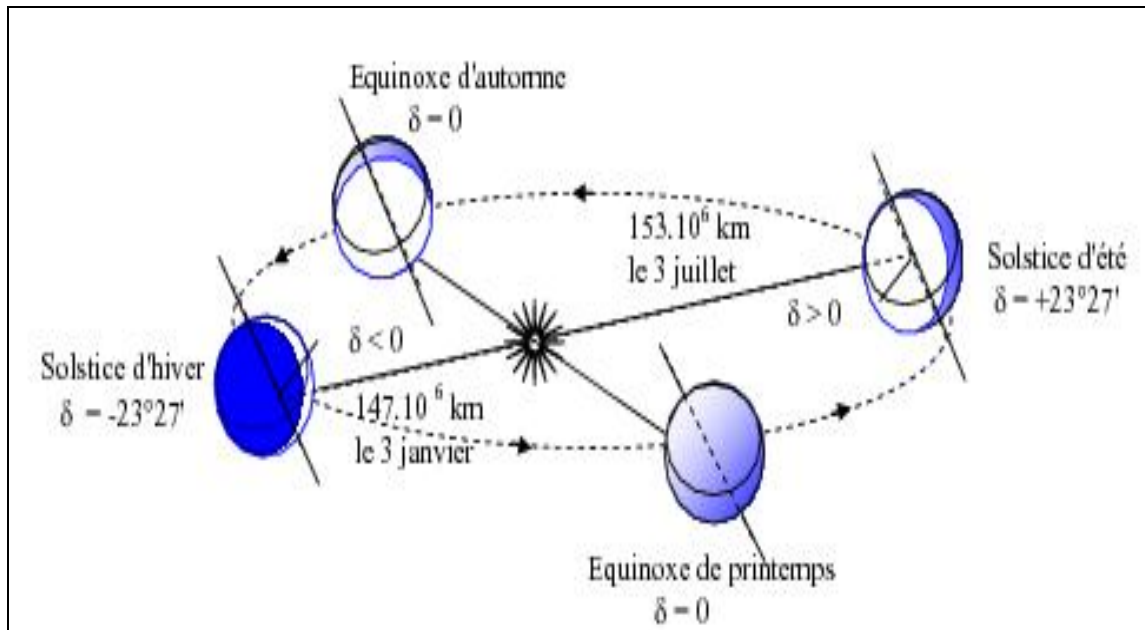


Figure I.5: Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil [9].

## I.6. Coordonnées Géographiques terrestres :

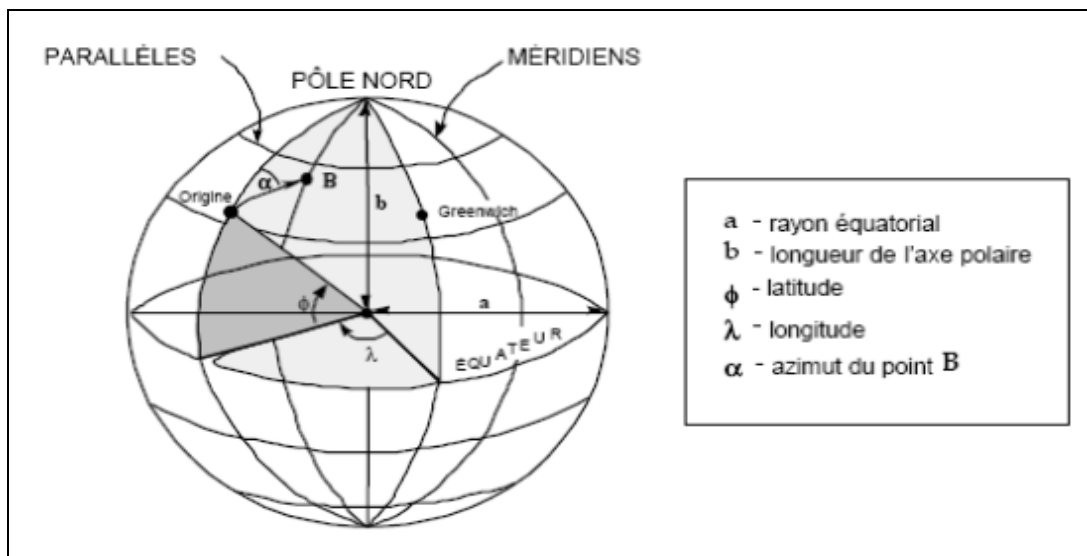
Pour repérer site sur la surface de la terre, on utilise les coordonnées géographiques, elles présentent les composantes suivantes ; la latitude et la longitude [10].

### A. Latitude :

La latitude est un système de repérage géométrique par construction de cercles concentriques imaginaires autour du globe terrestre permettant de localiser un point par rapport à l'équateur désigné par  $0^{\circ}$ , comme illustré sur la figure I.5. Il existe 180 cercles différenciés par  $1^{\circ}$  équivalent à 111 Km. La latitude est l'angle au centre de la Terre formé entre l'équateur et un point quelconque de la surface et elle est de valeur positive dans l'hémisphère Nord.

**B. Longitude :**

La longitude est la coordonnée qui permet de localiser par une mesure en degré un point sur le globe terrestre à l'est ou à l'ouest d'une ligne nord-sud convenue et nommée méridien d'origine. La longitude est l'angle au centre de la Terre formé entre le méridien de Greenwich et un point quelconque de la surface. Elle est de valeur positive à l'est de ce méridien. Il existe 360 lignes différenciées par  $1^\circ$  équivalent à 111.3 Km comme représenté sur la figure I.6.

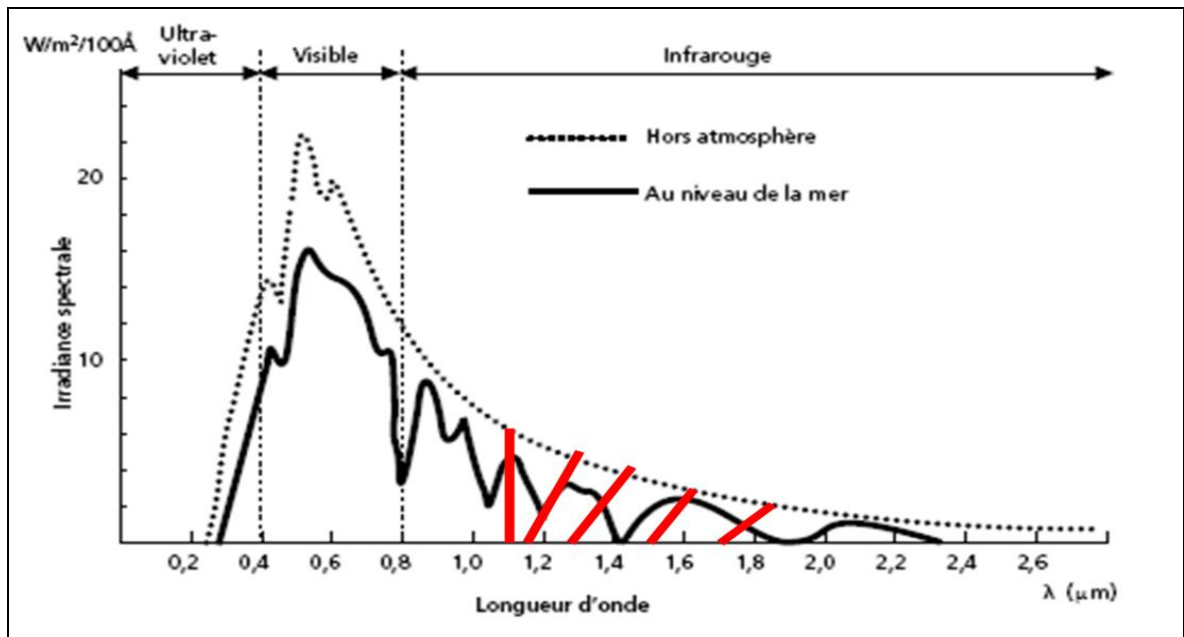


**Figure I.6 : Cordonnées géographiques terrestres [10].**

**I.7. Le rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ( $0,2 \mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $2,5 \mu\text{m}$ ). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement de (comme illustré sur la figure I.7) :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4 \mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible ( $0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8 \mu\text{m}$ ).



**Figure I.7 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [10].**

Le tableau I.2 représente les valeurs énergétiques des photons issues du spectre solaire, elle s'étale entre l'ultra-violet et l'infrarouge. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photos et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

**Tableau I.2: Valeurs énergétiques des photos issues du spectre solaire. [11]**

$\lambda(\mu\text{m})$	$E_{\text{ph}}(\text{eV})$	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, qui sont ensuite collectés afin

de constituer un courant électrique global [11], c'est le principe de base des systèmes photovoltaïques.

### I.8. La 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-Solaire égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire comme représenté sur la figure I.8. La constante solaire a été estimée à  $1367 \text{ W/m}^2$  par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse).

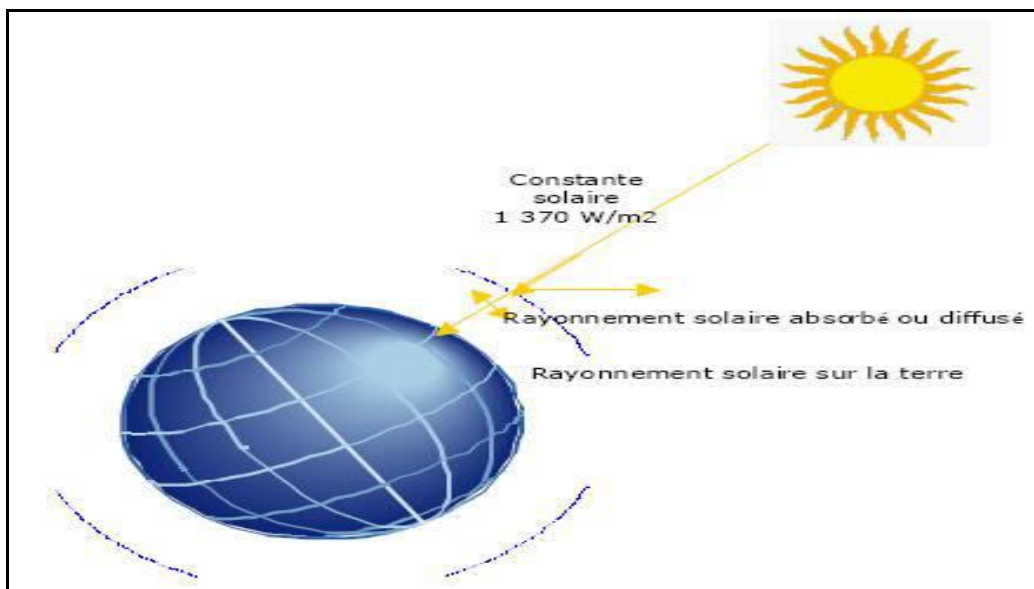


Figure I.8 : La constante solaire [10].

### I.9 . Rayonnement solaire reçu au niveau du sol :

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement, elle perturbe grandement par des processus variés le flux de photons issu du soleil. Donc, après sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire peut être considéré comme la somme de deux composantes direct et diffus comme représenté sur la figure I.9.

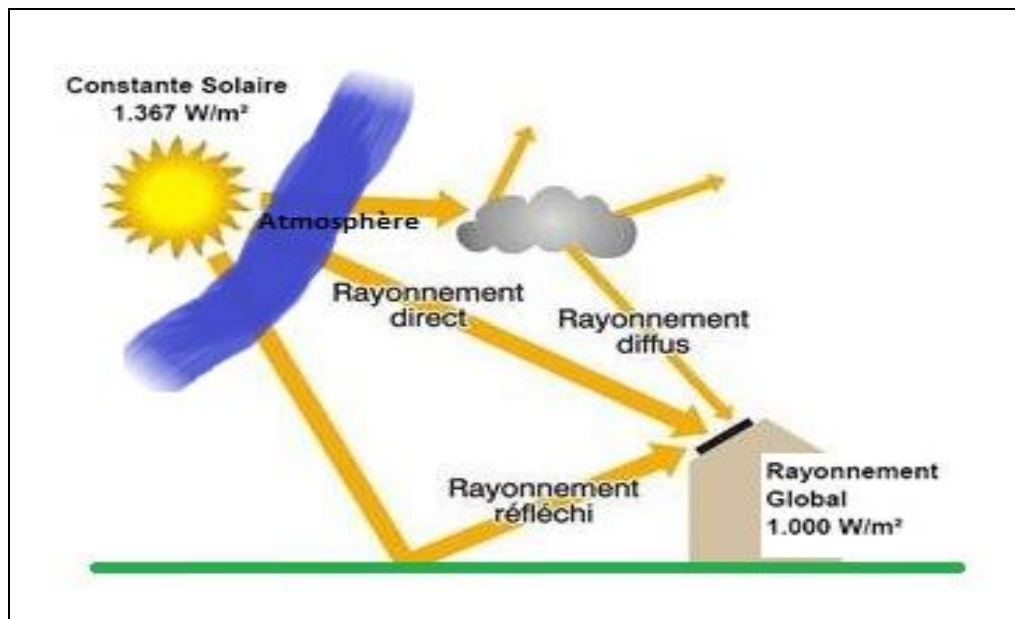


Figure I.9 : Composition du rayonnement solaire [Web3].

- **Le rayonnement direct :** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère (figure I.9).
  - **Le rayonnement diffus :** est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
  - **Le rayonnement global :** est la somme du rayonnement direct et diffus.
- Notant que le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

## I.10. Mesure du rayonnement solaire :

Il existe plusieurs appareils de mesure des radiations solaires ; directes, diffuses, réfléchies ou globales.

### I.10.1. L'héliographe de Campbell-Stokes :

Il comporte une boule de verre et fonctionne suivant le principe de la loupe, permet de mesurer la durée d'insolation (figure I.10), c'est-à-dire la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct a une puissance (en pratique plus de  $120 \text{ W/m}^2$ ) pour bruler ou

décorer une bande de papier changée chaque jour. La mesure de la longueur des parties brûlées permet de calculer la durée d'insolation. Pour en déduire l'irradiation, il faut utiliser des corrélations.

Ces instruments "statiques" sont remplacés par des instruments "dynamiques" où une fibre optique émet régulièrement un signal qui engendre une impulsion dès que l'éclairement reçu par le capteur dépasse 120 watts par mètre carré.



**Figure I.10: L'héliographe de Campbell-Stokes [Web4].**

### **I.10.2. Les pyranomètres :**

Les pyranomètres délivrent une tension directement proportionnelle à l'irradiation. Cette tension provient d'une thermopile dont la partie supérieure s'échauffe par son exposition à l'irradiation solaire alors que la partie inférieure protégée de cette irradiation sert comme référence. Ces appareils sont coûteux, un exemple est représenté sur la figure I.11.



**Figure I.11: Pyranomètre [Web5].**

Le Pyranomètre à rayonnement diffus est identique au précédent, mais comporte une « bande métallique » qui masque le soleil et supprime la composante directe du rayonnement incident. Le Pyranomètre mesure la composante direct du rayonnement solaire, il a besoin d'un « suiveur solaire » et d'un collimateur pour maintenir en permanence le disque solaire focalisé et masquer le reste de la voûte céleste.

### **I.10.3 Les satellites météorologiques :**

Un satellite météorologique est un satellite artificiel qui a comme mission principale le recueil de données utilisées pour la surveillance du temps et du climat de la Terre. Chaque nouvelle génération de satellite comporte des senseurs plus performants et capables d'effectuer des mesures sur un plus grand nombre de canaux ce qui permet de les utiliser pour différencier les divers phénomènes météorologiques : nuages, précipitations, vents, brouillard, etc.[Web8].

Plusieurs pays lancent et maintiennent des réseaux de satellites météorologiques : les États-Unis, les pays européens avec l'agence spatiale européenne (ESA), l'Inde, la Chine, la Russie et le Japon. Tous ces satellites assurent une couverture globale de l'atmosphère [Web6].

Les satellites météorologiques disposent de différents instruments capables de mesurer les différents paramètres utiles à des fins météorologiques. Ainsi, ils contiennent à leur bord des radiomètres, instruments météorologiques mesurant la température de l'atmosphère ou la réflexion solaire sur différentes surfaces (albédo), ou des sondes qui évaluent l'humidité.

Ils peuvent aussi contribuer à estimer la vitesse de fonte des glaces, la température de l'eau et le niveau des mers. En cas de catastrophe, ils servent à observer l'évolution d'un incendie ou d'une nappe de pétrole dans l'océan.

**Partie B :****I.11. prédiction des radiations solaires globales journalières :**

Les informations sur l'énergie solaire et particulièrement les données des radiations solaires journalières sont nécessaires pour la conception et l'étude des performances des systèmes utilisant cette forme d'énergie. Dans la plupart du monde et dans les pays en voie de développement les données sur les radiations solaires ne sont pas disponibles due au prix élevé des équipements ainsi que les difficultés dans leur calibrage et maintenance.

Plusieurs modèles ont été développés pour l'estimation des radiations solaires globales en se basant sur les paramètres géographiques (longitude, latitude et altitude) et données météorologiques tel que ; les températures (minimale et maximale), l'humidité relative, précipitation, la durée d'insolation,.....etc. Parmi tous ces paramètres, la durée d'insolation est le plus utilisé.

Parmi les modèles qui décrivent l'évolution des radiations globales en fonction du nombre de jour on cite quatre modèles :

**I.11.1 Modèle 1 :**

Le premier modèle est le modèle de Kaplanis et Kaplani [12], ils ont proposé un modèle sous forme d'une équation sinus de la forme :

$$G = a + b \cos\left(\frac{2\pi n}{364}\right) \quad [I.1]$$

Avec :

G : les radiations solaires globales journalières ;

N : c'est le nombre de jour de l'année ;

a, b et c sont les constantes de ce modèle.

**I.11.2. Modèle 2 :**

Le deuxième modèle est le modèle de Al-Salaymeh [13], il a proposé un modèle sous forme d'une fonction exponentielle de la forme suivante :

$$G = a e^{(-0,5((n-b)c)^2)} \quad [I.2]$$

Ou,

G et n sont les radiations solaires globales journalières et le nombre de jour de l'année respectivement.

a, b et c sont des constantes de ce modèle.

### I.11.3. Modèle 3 :

Le troisième modèle est aussi un modèle d'Al-Salaymeh [13], il a proposé un modèle sous forme d'une fonction polynomiale de la forme suivante :

$$G = a + b n + c n^2 + d n^3 + e n^4 \quad [I.3]$$

Avec :

G et n sont les mêmes paramètres décrits dans les modèles précédant et les termes de a, b, c, d et e sont les constantes de ce modèle.

### I.11.4. Modèle 4 :

Le quatrième modèle est le modèle de Zang et al. [14], ils ont proposé un modèle sous forme d'une fonction composée des deux fonctions, la fonction cos et la fonction sin de la forme suivante :

$$G = a + b \cos\left(\frac{2\pi n c}{365}\right) + e \sin\left(\frac{2\pi n f}{365}\right) \quad [I.4]$$

Ou,

G et n sont les mêmes paramètres décrits dans les modèles précédant et les constantes a, b, c et f sont des constantes de ce modèle.

## **Conclusion**

L'étude du chapitre 1 présente une synthèse bibliographique sur l'énergie solaire, on peut retenir les points suivants :

- Le rayonnement solaire dépend des mouvements de la terre, il est nécessaire de bien préciser les paramètres géométriques du lieu qui sont la latitude, la longitude.
- Il existe plusieurs des appareils de mesure des radiations solaires ; directes, diffuses, réfléchies ou globales a savoir ; l'héliographe de Campbell-Stokes , les pyranomètres et les satellites météorologiques .
- Les informations sur l'énergie solaire et particulièrement les données des radiations solaires journalières sont nécessaires pour la conception et l'étude des performances des systèmes utilisant cette forme d'énergie.
- Il existe plusieurs modèles pour l'estimation des radiations solaires globales en se basant sur les paramètres géographiques (longitude, latitude et altitude) et données météorologiques tel que ; les températures (minimale et maximale), l'humidité relative, précipitation, la durée d'insolation,.....etc. Parmi tous ces paramètres, la durée d'insolation est le plus utilisé.
- Parmi les modèles qui décrivent l'évolution des radiations globales en fonction du nombre de jour on peut citer ; le modèle de Kaplanis et Kaplani , le modèle de Al-Salaymeh 1, le modèle de Al-Salaymeh 2 et le modèle de Zang et al..



## 2<sup>EME</sup> CHAPITRE

### *Matériel et Méthode*

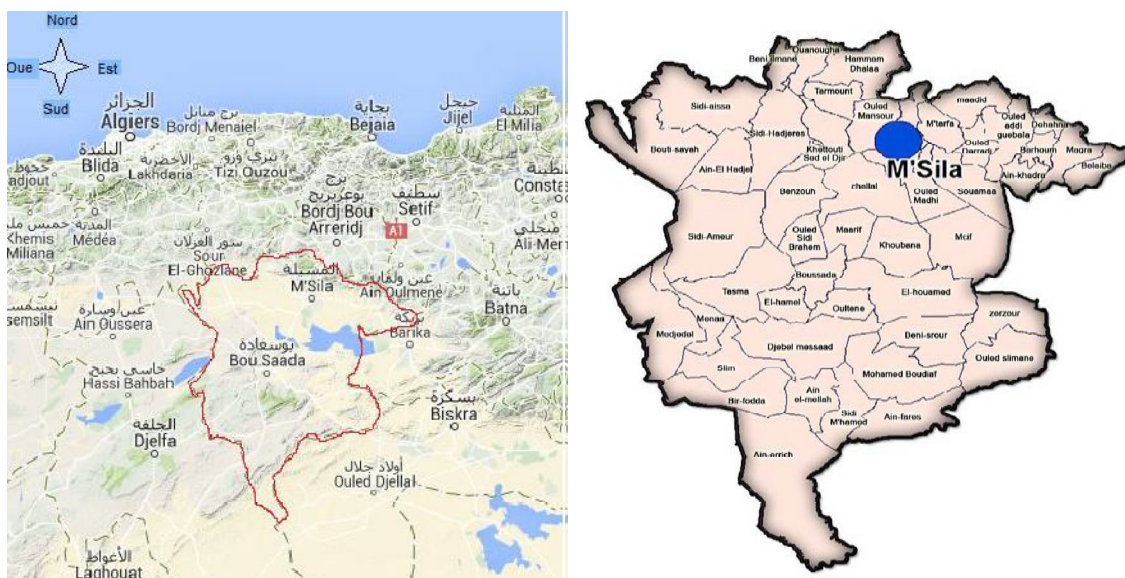


Dans ce chapitre on expose la description du site choisi dans notre étude qui est la région de M'sila, sa situation géographique et son climat. De même, on a exprimé les données des radiations solaires globales sur une surface horizontale des quinze années de janvier 1989 jusqu'à Décembre 2003 de cette région utilisées dans notre étude. En fin nous avons représenté les évolutions journalière et mensuelle des radiations solaires globales.

## II.1. Situation géographique et climat de la région de M'sila :

La Wilaya de M'sila fait partie de la région des Hauts Plateaux du centre, elle s'étend sur une superficie de 18.175 km<sup>2</sup> et sa population est de 1 029 447 habitants [Web7]. Elle est délimitée par les wilayas de Bordj Bou-Arreidj et Sétif au Nord Est, par les wilayas de Médéa et Bouira au Nord Ouest, par la wilaya de Batna à l'est, par la wilaya de Djelfa à l'ouest et par la wilaya de Biskra: au Sud Est comme illustré sur la Figure II.1. Dans ses limites actuelles, elle occupe une position privilégiée dans la Partie centrale de l'Algérie du nord dans son ensemble.

Sa position géographique fait que sa vocation principale demeure l'agro-pastoralisme tributaire d'une pluviométrie malheureusement faible et irrégulière ne dépassant pas les 250 mm par an.

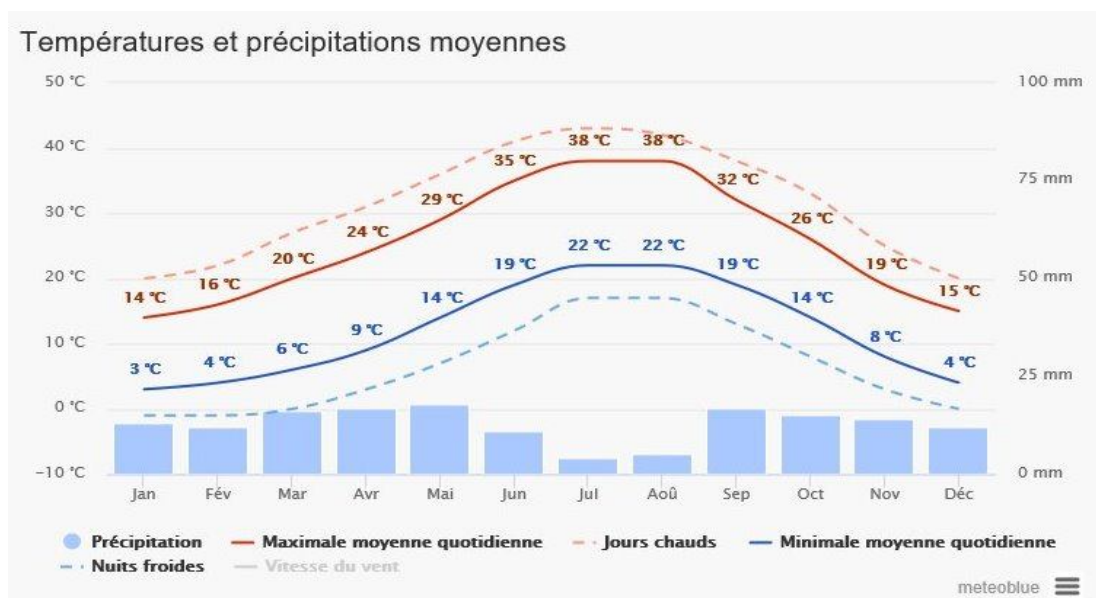


**Figure (II.1) : La situation géographique de la wilaya de M'sila [Web 8].**

Le climat de la wilaya est de type continental soumis en partie aux influences sahariennes. L'été est sec et très chaud, alors que l'hiver est très froid. Sur le plan pluviométrique, la zone la plus arrosée se trouve au Nord; elle reçoit près de 480 mm/an

(Djebel EchChouk – Chott de Ouanougha) quant au reste du territoire. La zone la plus sèche est située à l'extrême Sud de la wilaya et reçoit moins de 200 mm/ an.

Les diagrammes météorologiques de meteoblu sont basés sur 30 ans de simulations de chaque heure des modèles météorologiques et sont disponibles pour chaque lieu sur la Terre [web9]. La Figure II.2 illustre l'évolution des températures moyennes ; la température "maximale moyenne quotidienne" (ligne rouge continue) montre la température maximale moyenne d'un jour pour chaque mois pour M'Sila. De même, «minimale moyenne quotidienne" (ligne bleu continue) montre la moyenne de la température minimale. Les jours chauds et des nuits froides (lignes bleues et rouges en pointillé) montrent la moyenne de la plus chaude journée et la plus froide nuit de chaque mois des 30 dernières années.



**Figure (II.2) : Évolution des températures dans la région de M'sila [web 9].**

Le diagramme de la température maximale à M'sila illustré sur la figure II.3 montre le nombre de jours par mois qui atteignent certaines températures. A titre d'exemple au mois d' Aout, on enregistre 0 jour de gel, 0,4 jours de température > 25°C, 5,3 jours avec une température > 35°C et 20,1 jours avec une température > 35°C et 5,2 jours avec une température >40°C.

Le Figure II.4 montre le nombre mensuel de jours ensoleillés, partiellement nuageux, nuageux et des précipitations. Jours avec moins de 20% de la couverture nuageuse sont considérés comme des jours ensoleillés, avec 20-80% de la couverture nuageuse, comme partiellement ensoleillés et plus de 80% comme nuageux. A titre d'exemple, au moins de

Juillet on constate 23, 2 jours ensoleillé, 7 jours partiellement nuageux et 0,8 jours nuageux. On note également 2,4 jours de précipitations.

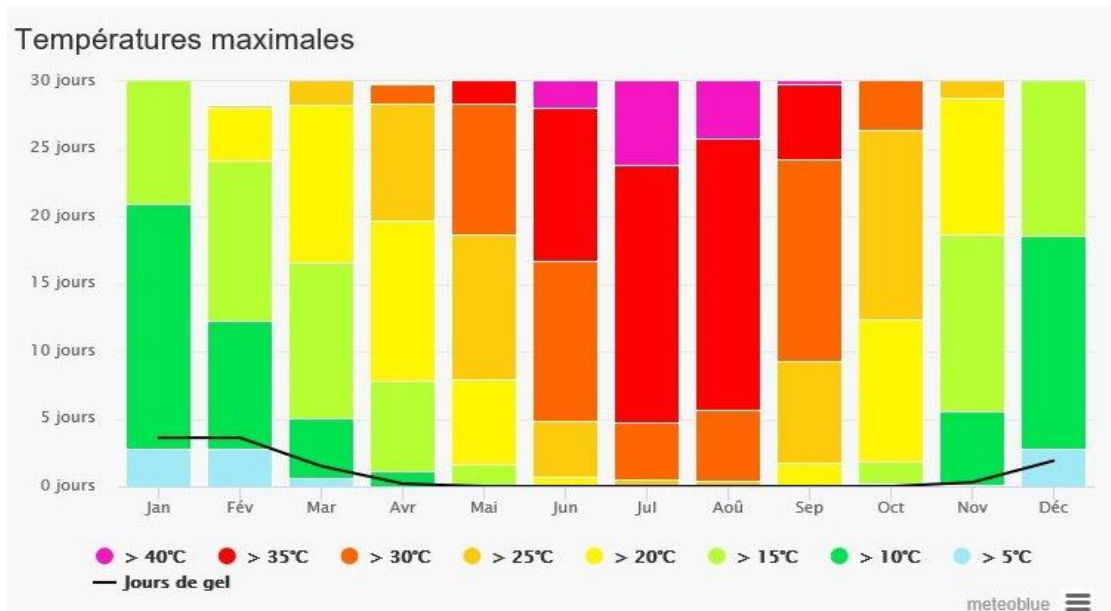


Figure (II.3) : Évolution des températures maximales dans la région de M’sila [web 9].

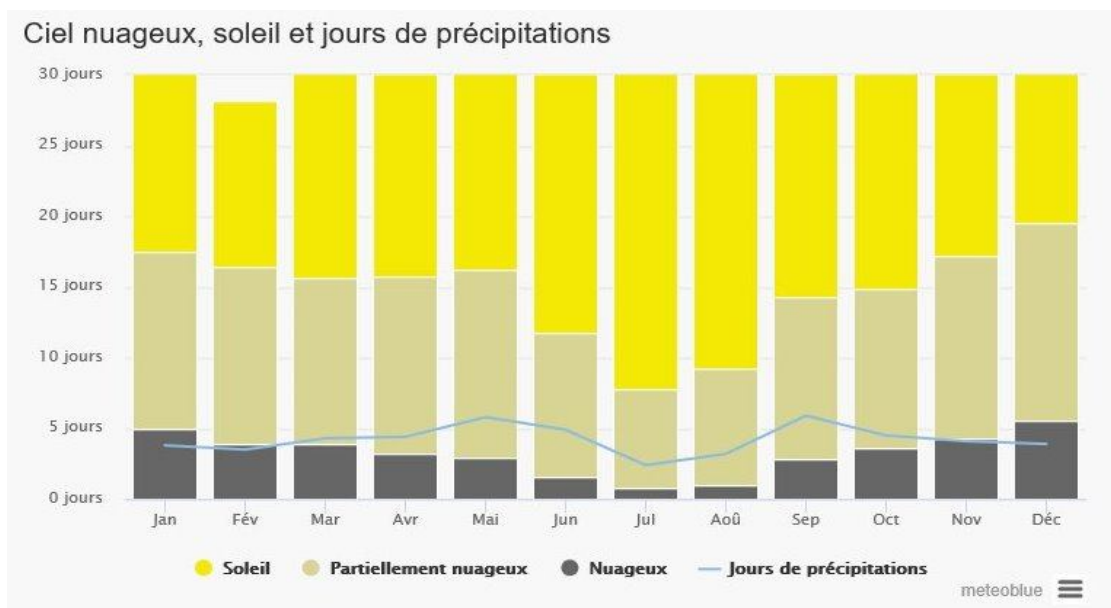


Figure (II.4) : Évolution des jours à ciel nuageux, soleil et de précipitations dans la région de M’sila[web 9].

La Figure II.5 représente les précipitations mensuelles dans la région de M’sila, les précipitations supérieures à 150 mm sont pour la plupart humides, en dessous de 30 mm généralement séchés. A titre d’exemple au mois de Septembre, on a 0,3 jours avec une

précipitation comprise entre 10 et 20 mm, 0,5 jours avec une précipitation comprise entre 5 et 10 mm, 1 jour avec une précipitation comprise entre 2 et 5 mm et 2,3 jours inférieur à 2. On note 25,9 jours secs et 0 jour de neige.

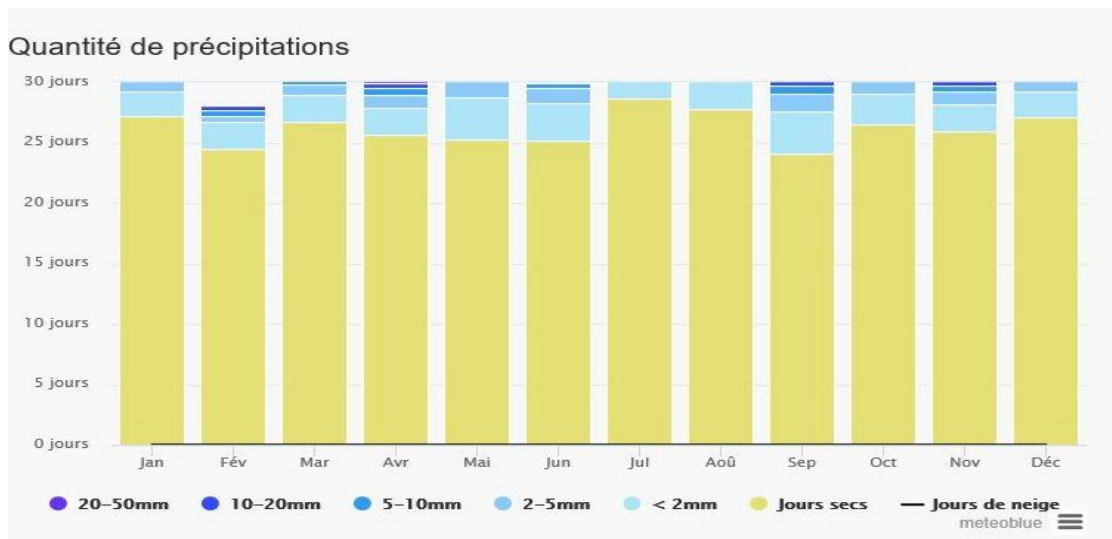


Figure (II.5) : Évolution des quantité de précipitations dans la région de M’sila [web9].

La Figure II.6 présente un diagramme mensuelle des vitesses du vent dans la région de M’sila, c-à-d combien de jours dans un mois peuvent être attendus pour atteindre certaines vitesses de vent. A titre d’exemple au mois d’Avril, on a 5,2 jours avec une vitesse > 5 Km/h, 11,7 2 jours avec une vitesse >12 Km/h, 9,1 jours avec une vitesse >19 Km/h, 3,4 jours avec une vitesse >28 Km/h, 0,6 jours avec une vitesse > 38 Km/h et 0,1 jours avec une vitesse >50 Km/h.

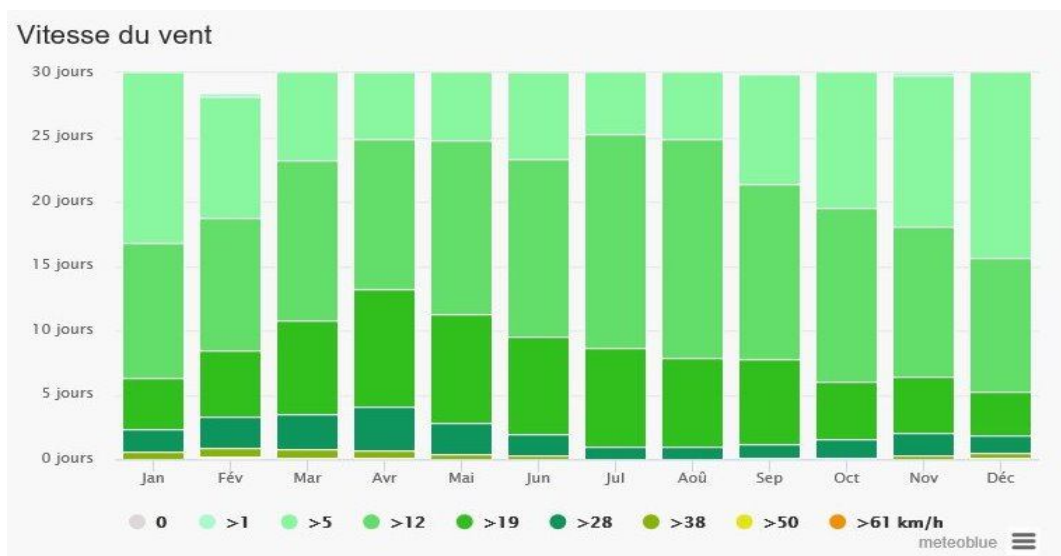
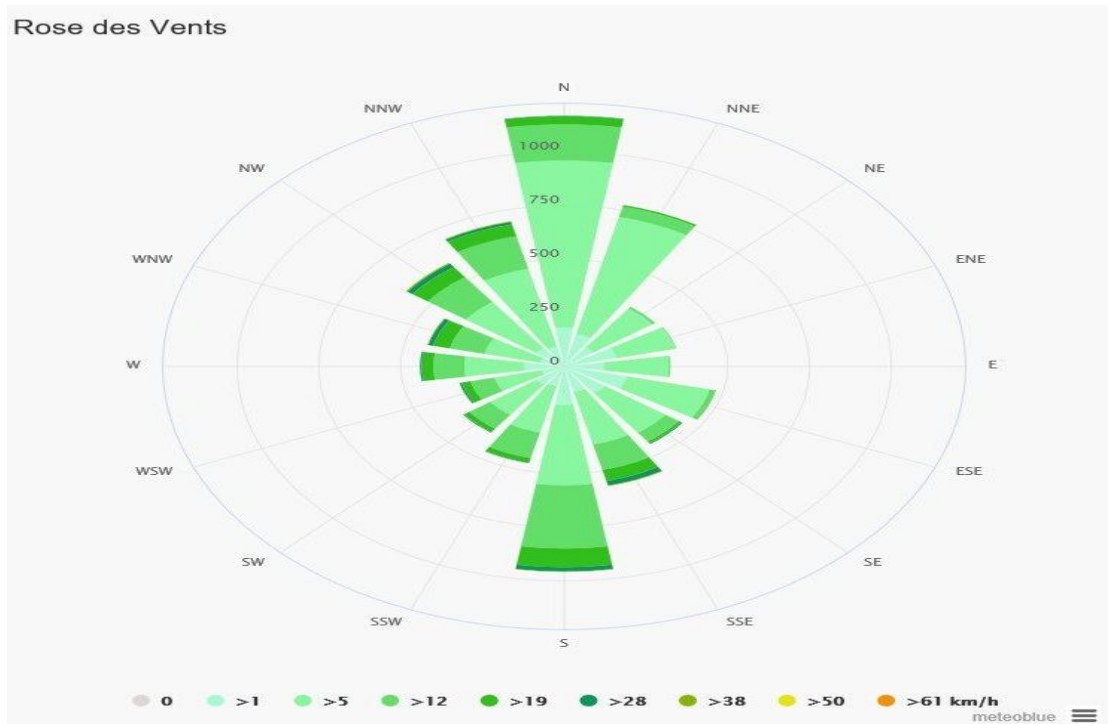


Figure (II.6a) : Évolution des vitesses de vent dans la région de M’sila [web 9].

La Rose des Vents pour la région de M'sila illustrée sur la Figure II.6b montre combien d'heures par an le vent souffle dans la direction indiquée, par exemple SO : Le vent souffle du sud-ouest (SO) au nord-est (NE). A titre d'exemple, le vent du nord souffle 95 h/an avec une vitesse > 1 km/h, 373 h/an avec une vitesse >5 Km/h, 157 h/an avec une vitesse > 12km/h, 57 h/an avec une vitesse >19 km/h, 12 h/an avec une vitesse > 28 km/h, 3h/an avec une vitesse > 38 km/h et 1 h/an avec une vitesse > 50 km/h.

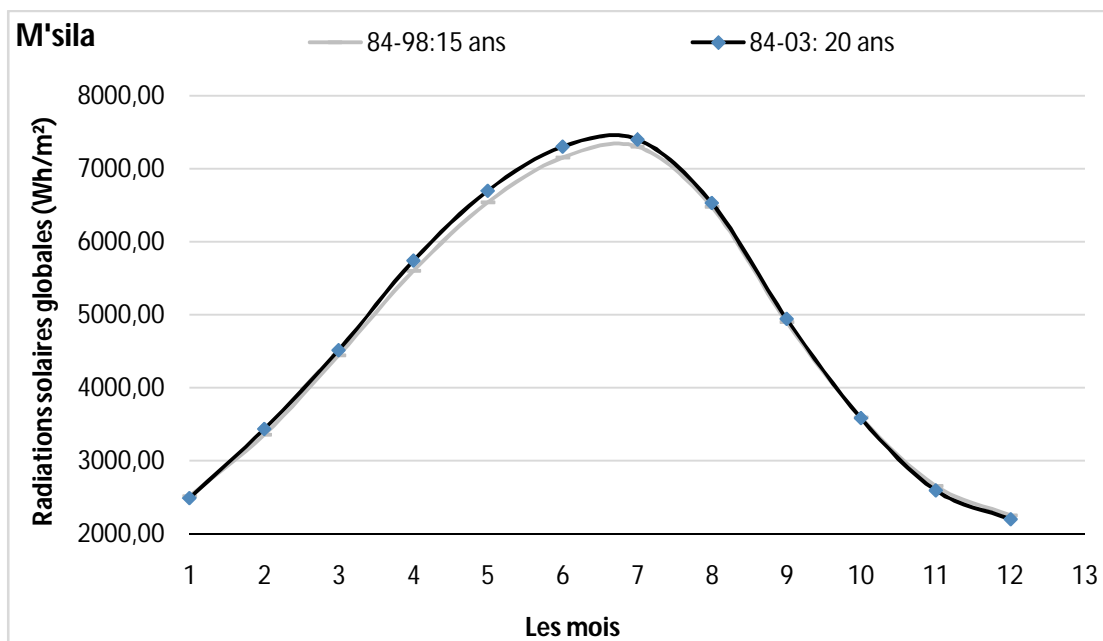


**Figure (II.6b) : La rose des vents dans la région de M'sila [web 9].**

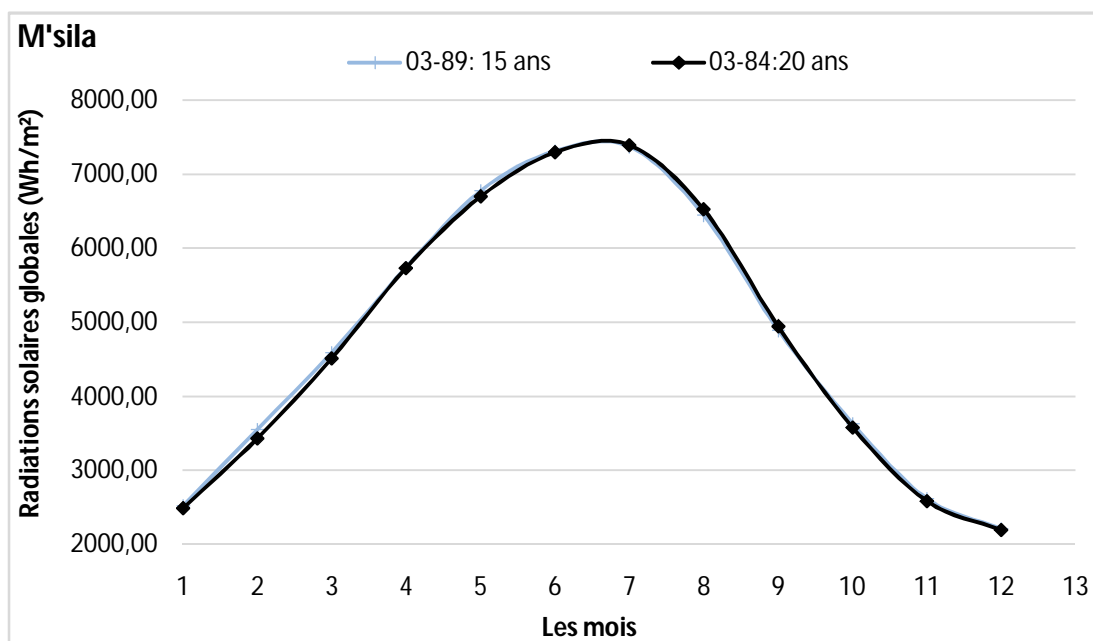
Notant également que la région de M'sila présente une durée d'ensoleillement de 8,72 h/jour durant toute l'année et une intensité de radiation globale sur une surface horizontale de 5428 KWh/m<sup>2</sup> [web9] .Ce qui permis à cette zone d'être bien placée pour bien exploiter l'énergie solaire.

## II.2. La source des données :

On se basant sur le mémoire de master « énergétique » de Mr Hamidi Aissa [15] sur la modélisation des radiations solaires globales, ou il a montré que le nombre d'année optimale pour l'étude des radiations solaires globales sur une surface horizontale dans la région de M'sila est quinze ans. Les figures II.7, II.8 illustrent l'évolution des radiations solaires globales sur une surface horizontale des quinze années dans l'ordre croissant (1984-1998) et dans l'ordre décroissant (2003-1989) respectivement en comparaison avec l'évolution des radiations solaires globales de 20 ans (1984-2003).



**Figure II.7: Comparaison entre des radiations solaires globales des 15 ans et 20 ans dans l'ordre croissant [15].**



**Figure II.8: Comparaison entre des radiations solaires globales des 15 ans et 20 ans dans l'ordre décroissant [15]**

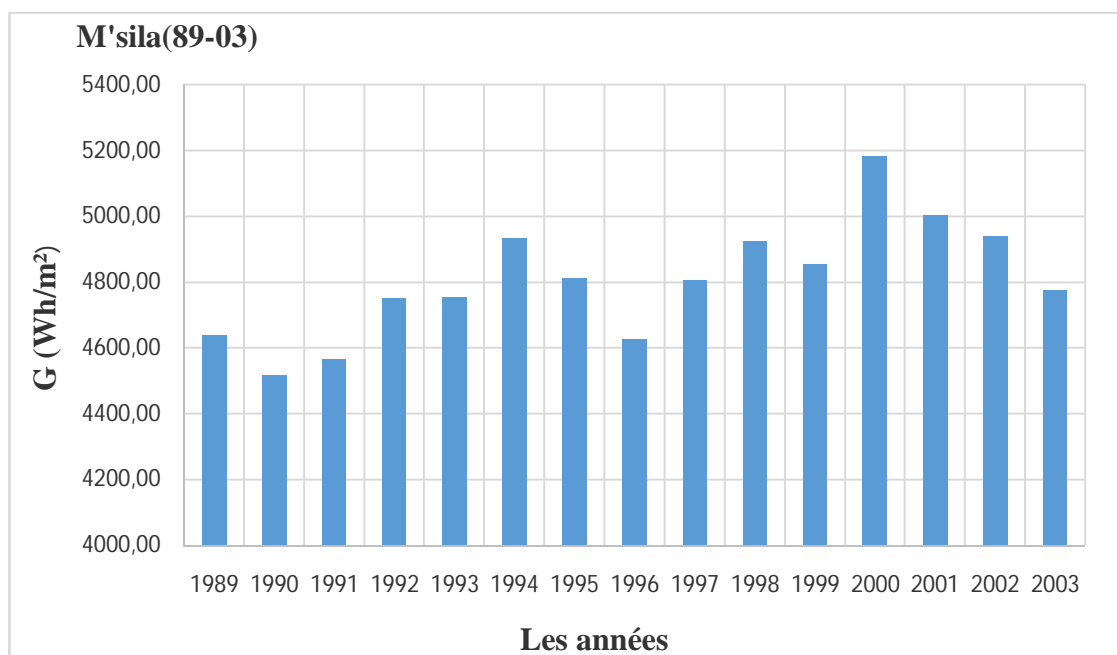
Il a constaté qu'il n'existe pas de différence significative entre l'évolution des radiations solaires globales des 15 années et 20 années que ce soit dans l'ordre croissant ou décroissant. Donc le nombre optimal des années représentatives des radiations solaires globales dans la région de M'sila est 15 années.

Sur cela on retient le nombre d'année dans notre étude à 15 ans de Janvier 1989 jusqu'à décembre 2003. Ces données des radiations solaires globales journalières ont été collectées à partir du site NASA, USA(National Aeronotics and Space Administration)[web10].

### II.3. Évolution annuelle des radiations solaires globales :

Les radiations solaires globales sont des variables très importantes dans le domaine de l'énergie solaire, elles présentent un ordre de grandeur de l'importance de l'énergie solaire reçue durant les années sur le site étudié. La Figure II.9 représente l'évolution annuelle des radiations solaires globales de 1989 jusqu'à 2003 dans la région de M'sila.

On note également que les radiations solaires globales varient d'une année à une autre, l'année 2000 présente les radiations solaires globales les plus élevées, elles sont de 5183.64 Wh/m<sup>2</sup> et l'année 1990 montre les valeurs les plus faibles des radiations solaires globales de 4516.46 Wh/m<sup>2</sup>. Pour les autres années, elles sont comprises entre ces deux valeurs.



**Figure II.9: Évolution annuelle des radiations solaires globales dans la région de M'sila.**

### II.4. Évolution mensuelle des radiations solaires globales :

Une autre représentation de l'évolution des radiations solaires globales est la représentation mensuelle sur les quinze années d'étude comme illustré sur la figure II.10. L'évolution des radiations solaires mensuelle pour chaque année suit la forme d'une

clochette qui représente des valeurs maximales durant les mois de Juin et Juillet et des valeurs minimales durant les mois de Décembre et Janvier. A titre d'exemple pour l'année 2001, la valeur maximale est de 7517.10 KW/m<sup>2</sup> enregistré durant le mois de Juillet et la valeur minimale de 2037.10 enregistré durant le mois de 2037.10 KW/m<sup>2</sup>.

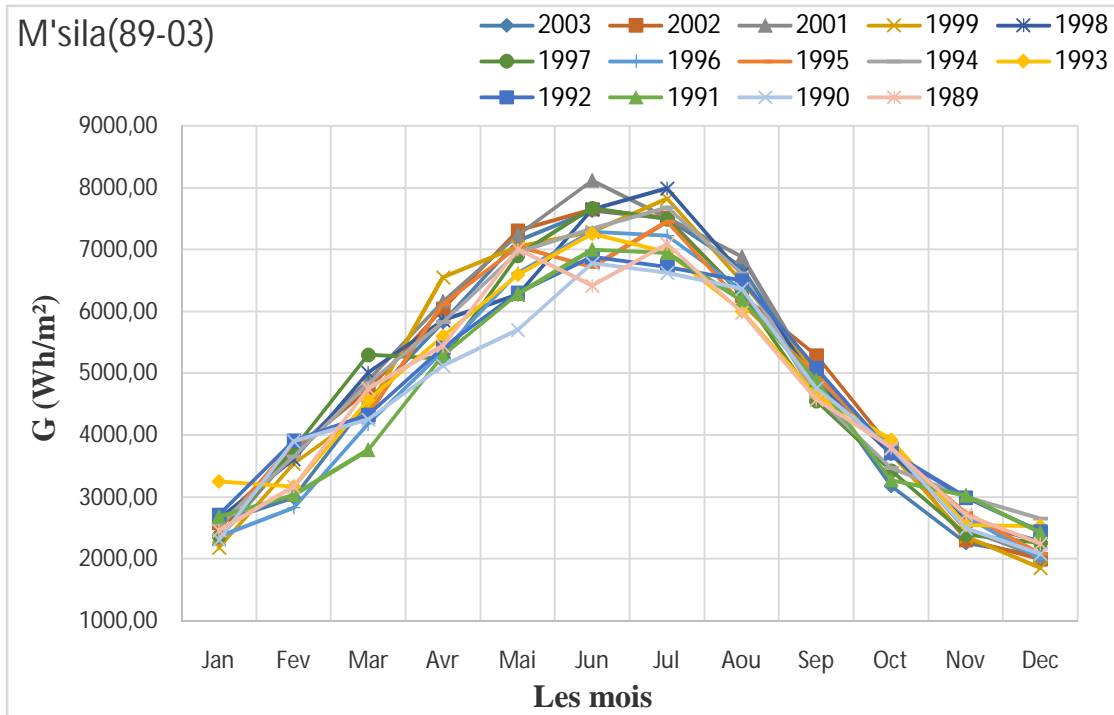
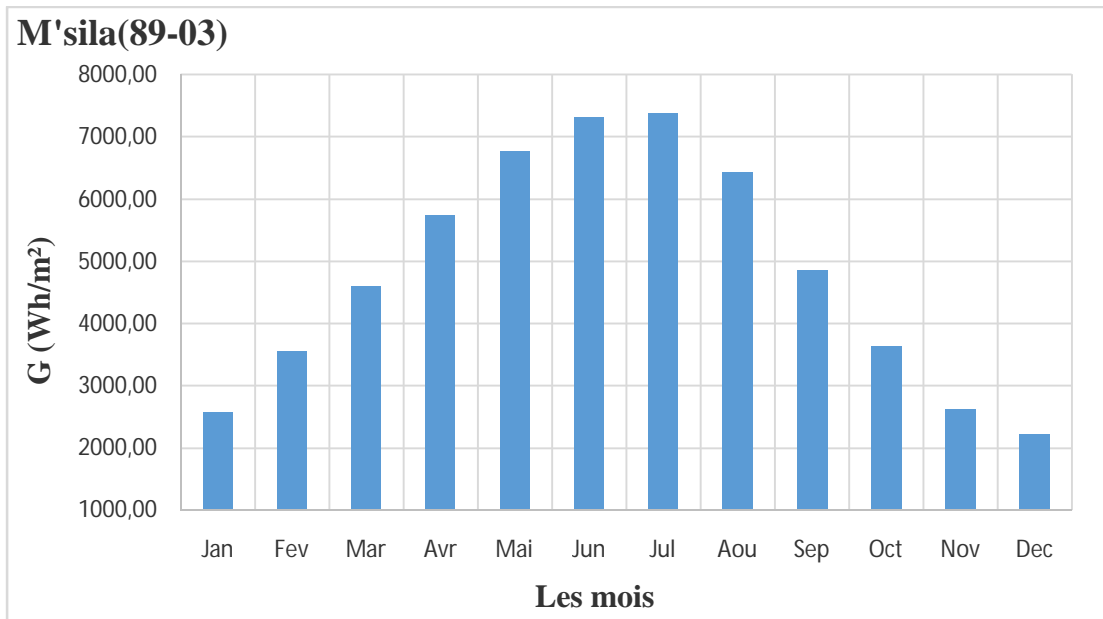


Figure II.10: Évolution mensuelle des radiations solaires globales des quinze années (1989-2003).

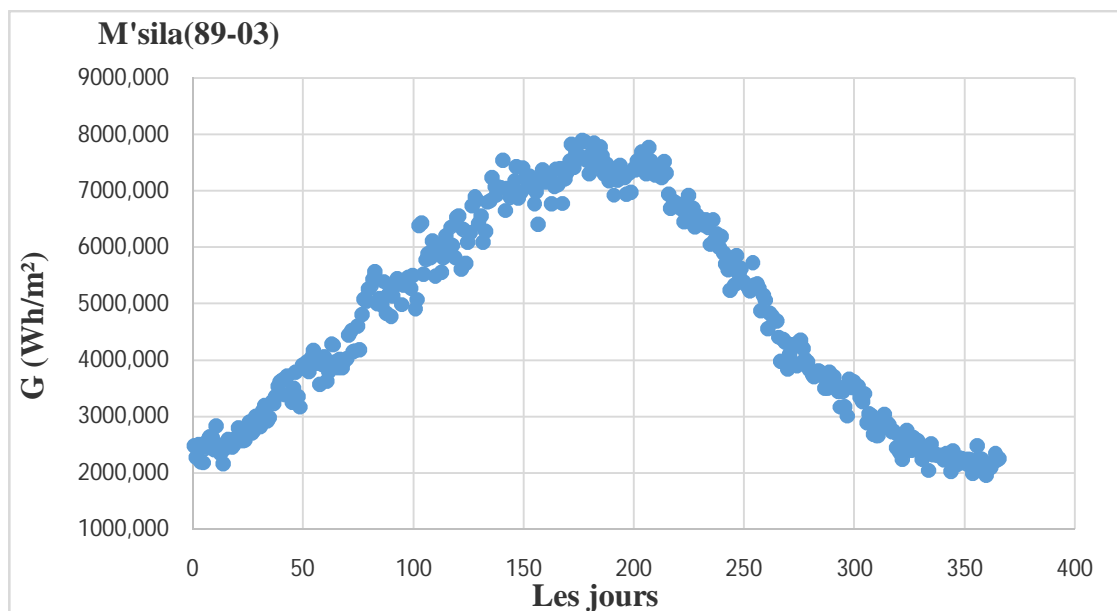
### II.5. Évolution mensuelles et journalières des radiations solaires globales de l'année moyenne :

Pour représenter l'évolution des radiations solaires globales dans la région de M'sila des quinze années de 1989 jusqu'à 2003, on a pris une année moyenne de ces années. Sur la figure II.11, on a représenté l'évolution mensuelle des radiations solaires globales de l'année moyenne. La valeur maximale de cette année moyenne est enregistrée pour le mois de Juillet avec une valeur de 7377.07 KW/m<sup>2</sup> et la valeur minimale au mois de Décembre avec une valeur de 2213.92 KW/m<sup>2</sup>.



**Figure II.11: Évolution des radiations solaires globales mensuelles de l'année moyenne (1989-2003).**

De même, on a représenté l'évolution journalière des radiations solaires globales de l'année moyenne c'est-à-dire l'évolution des radiations solaires globales en fonction des jours de l'année, comme illustrée sur la figure II.12. Cette évolution suit la forme d'une clochette comme toutes les années.



**Figure II.12: Évolution des radiations solaires globales journalières de l'année moyenne (1989-2003).**

## **Conclusion**

L'étude faite durant ce chapitre nous permet de retenir les points suivants :

- On se basant sur le travail de Hamidi. A, les données des radiations solaires globales journalières dans la région de M'sila utilisées dans cette étude couvrent 15 ans (1989-2003), elles ont été collectés du site de la NASA.
- L'évolution des radiations solaires globales journalières sur une surface horizontale dans la région de M'sila en fonction du nombre de jour pour une année moyenne suit la forme d'une clochette comme toutes les années.



### 3<sup>EME</sup> CHAPITRE

#### *Prédiction des radiations solaires globales*



Au cours de ce chapitre, on s'intéresse à la prédiction des radiations solaires globales sur une surface horizontale dans la région de M'sila durant quinze années allant de 1989 jusqu'à 2003 suivant le nombre de jour uniquement. Pour cela quatre modèles ont été testé dans ce mémoire, le modèle 1 de Kaplanis et Kaplani, le modèle 2 de Al-Salaymeh 1, modèle 3 de Al-Salaymeh 2 et le modèle 4 de Zang et al. Afin de déterminer le meilleur modèle qui décrit les radiations solaires globales dans cette région une analyse statistique était performée.

### III.1. Le choix des modèles :

Les modèles que nous avons utilisés dans cette étude pour la description des radiations solaires globales sur une surface horizontale dans la région de M'sila des 15 ans d'étude (de 1989 jusqu'à 2003) sont les modèles décrit au chapitre 1 ; modèle de Kaplanis et Kaplani, modèle de Al-Salaymeh 1, modèle de Al-Salaymeh 2 et le modèle de Zang et al. La formule mathématique de chaque modèle est donnée par les équations suivantes :

- Le modèle 1 de Kaplanis et Kaplani :

$$G = a_1 + b_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{364}\right). \quad (\text{III.1})$$

Avec :

- G : les radiations solaires globales sur une surface horizontale ;
- n: le nombre de jour (de 1 jusqu'à 365) ;
- $a_1$  et  $b_1$  sont les constantes de ce modèle.

- Le modèle 2 de Al-Salaymeh 1 :

$$G = a_2 e^{\left(-0.5 \left(\frac{n-b_2}{c_2}\right)^2\right)} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- G et n sont les mêmes paramètres définis par le modèle précédent.
- $a_2$  ,  $b_2$  et  $c_2$  sont les constantes de ce modèle.

➤ Le modèle 3 de Al-Salaymeh 2 :

$$G = a_3 + b_3 n + c_3 n^2 + d_3 n^3 + e_3 n^4. \quad (III.3)$$

Avec :

G et n sont les mêmes paramètres définis par les modèles précédents.

$a_3$  ,  $b_3$ ,  $c_3$ ,  $d_3$  et  $e_3$  sont les constantes de ce modèle.

➤ Le modèle4 de Zang et al. :

$$G = a_4 + b_4 \cos\left(\frac{2\pi n c_4}{365}\right) + e_4 \sin\left(\frac{2\pi n f_4}{365}\right). \quad (III.4)$$

Avec :

G et n sont les mêmes paramètres définis par les modèles précédents.

$a_4$  ,  $b_4$ ,  $c_4$ ,  $e_4$  et  $f_4$  sont les constantes de ce modèle.

### III.2. Estimation des paramètres des différentes modèles :

Afin de déterminer l'évolution des radiations solaires globales sur une surface horizontale des quinze années dans la région de M'sila selon les quatre modèles choisis (modèle 1, modèle 2, modèle 3 et modèle 4), il faut déterminer les paramètres de chaque modèle choisi. La détermination de ces paramètres a été effectuée en utilisant le logiciel de calcul MATLAB, ils sont regroupés dans le Tableau III.1.

**Tableau III.1 : Les paramètres de chaque modèle (Modèle 1, Modèle 2, Modèle 3 et Modèle 4) de la région de M'sila (1989-2003).**

	a	b	c	e	d	f
Modèle 1	4827	-2571		-	-	-
Modèle 2	7289	173,4	104,6	-	-	-
Modèle 3	2610	-12 ,67	0,8055	-0,004389	$6,229^* 10^{-6}$	-
Modèle 4	4827	-2571	1,003	408,4	-	1,003

### III.3. Évolution des radiations solaires :

Après avoir déterminé les paramètres de chaque modèles (modèle 1, modèle 2, modèle 3 et modèle 4) pour décrire l'évolution des radiations solaires globales pour la région de M'sila sur une période de quinze ans, on a tracé cette évolution pour chaque modèle en comparaison avec l'évolution une année moyenne des quinze années comme illustré sur les Figures III.1, III.2, III.3 et III.4.

La première interprétation de nos résultats nous ont permet de constater que tous ces modèles (1, 2, 3 et 4) suivent la forme d'une clochette qui se décale des valeurs mesurées suivant le modèle choisi.

On remarque que le modèle 1 se décale un peu à droite par rapport aux valeurs mesurées des radiations solaires globales sur une surface horizontale comme illustré sur la figure III.1.

Pour le modèle 2, la courbe de ce modèle s'ajuste mieux que le modèle précédant mais on constate qu'elle se décale visiblement à la fin de l'évolution des radiations solaires globales sur une surface horizontale comme illustré sur la figure III.2.

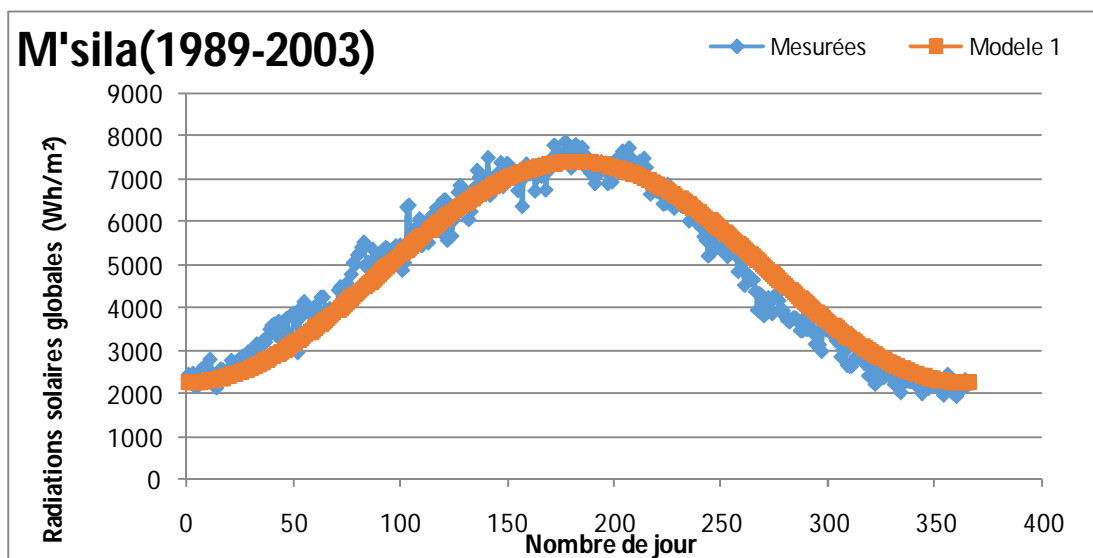


Figure III.1: Évolution du modèle 1 des radiations solaires globales de M'sila (89-03).

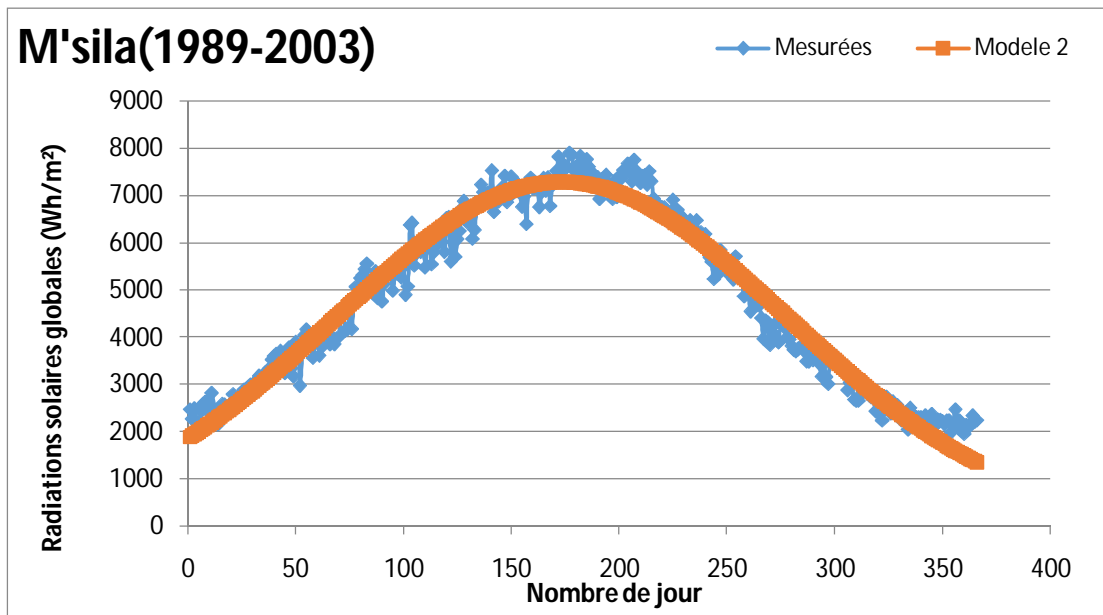


Figure III.2: Évolution du modèle 2 des radiations solaires globales de M'sila (89-03).

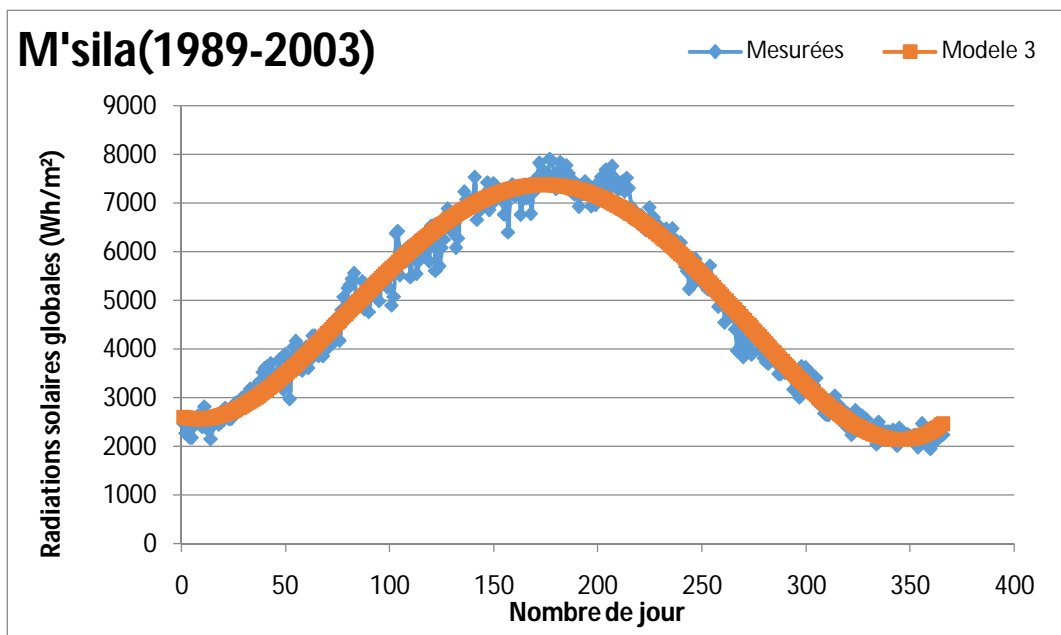
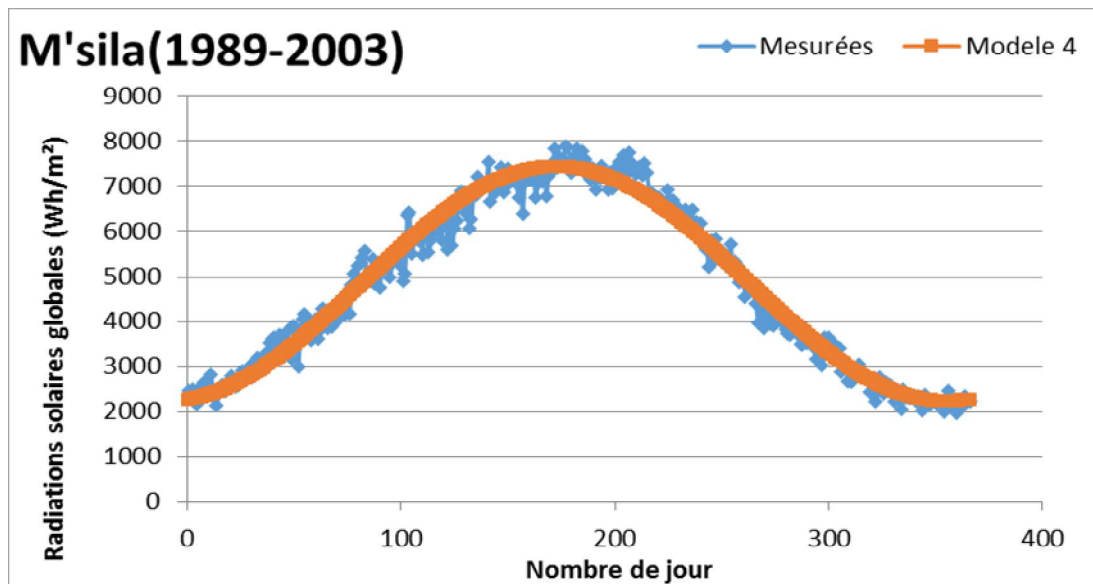


Figure III.3: Évolution du modèle 3 des radiations solaires globales de M'sila (89-03).

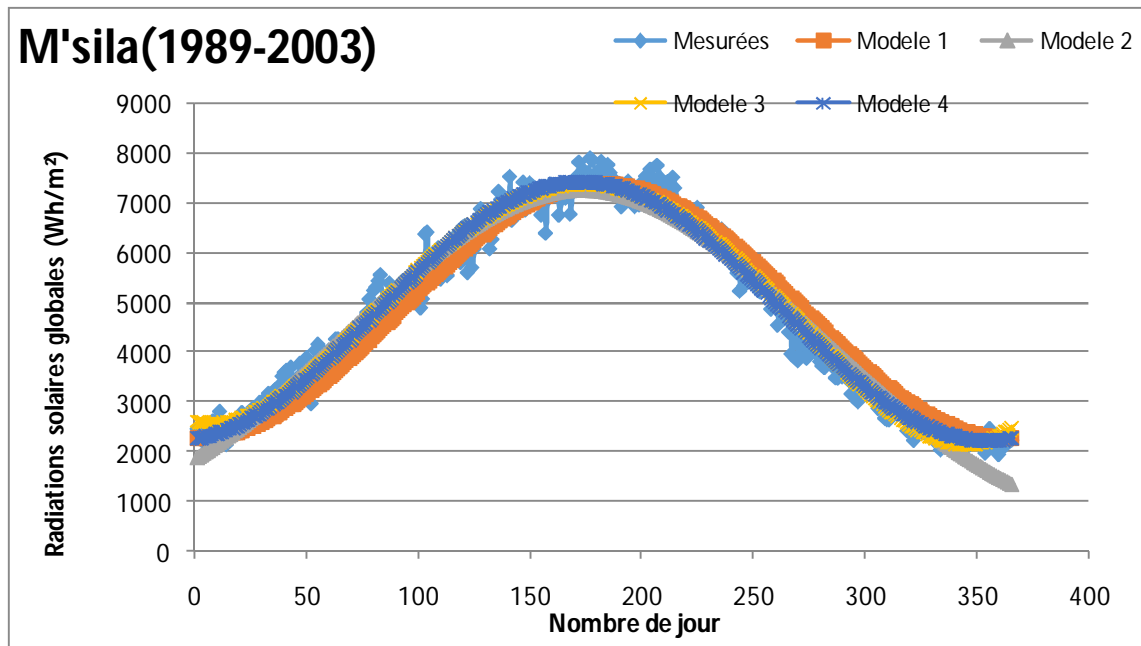


**Figure III.4: Évolution du modèle 4 des radiations solaires globales de M'sila (89-03).**

On remarque que les modèles 3 et 4 s'ajustent bien avec les valeurs mesurées des radiations solaires globales sur une surface horizontale.

Afin de comparer ces quatre modèles, on a tracé l'évolution des radiations solaires globales pour chaque modèle (1, 2, 3 et 4) avec les radiations solaires globales mesurées pour la région de M'sila comme illustré sur la figure III.5.

On constate qu'on ne peut pas faire le choix du meilleur modèle entre ces quatre modèles(1, 2, 3 et 4) donc un analyse statistique est nécessaire pour cela.



**Figure III.5: Évolution des quatre modèles des radiations solaires globales de M’sila (89-03).**

**III.4. Méthodes de comparaison des différents modèles :**

Cependant, on ne peut pas faire la comparaison uniquement à partir des constatations visuelles des courbes de l’évolution des radiations solaires globales mesurées et l’évolution des radiations solaires globales suivant les quatre modèles testés(1, 2, 3 et 4), pour déterminer le meilleur modèle pour la prédiction des radiations solaires globales sur une surface horizontale dans la région de M’sila. Pour atteindre ce but, nous avons appliqués des méthodes statistiques de comparaison telle que le coefficient de détermination R<sup>2</sup>, l’erreur quadratique moyenne RMSE et l’erreur systématique absolue moyenne MABE.

**III.4.1. Le coefficient de détermination R<sup>2</sup> :**

Le coefficient de détermination R<sup>2</sup> ou bien COD présente une valeur comprise entre 0 et 1, il est défini mathématiquement suivant la relation [16, 17] :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \tag{III.5}$$

Ou:

$\bar{y}$  : présente la valeur moyenne des valeurs des radiations solaires globales mesurées

$y_i$ :

$y_i$ : la  $i^{\text{ème}}$  radiation solaire globale mesurée ;

$x_i$ : la  $i^{\text{ème}}$  radiation solaire globale calculée pour chaque modèle.

$N$  : le nombre des données des radiations solaires globales qui est le nombre de jour de l'année.

### III.4.2. Erreur quadratique moyenne (RMSE) :

L'erreur quadratique moyenne RMSE est utilisée pour comparer la déviation actuelle entre les valeurs prédits et les valeurs mesurées. Elle est donnée par l'équation suivante [16, 17] :

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$N$  : le nombre des données des radiations solaires globales ou bien le nombre de jour de l'année ;

$y_i$ : la  $i^{\text{ème}}$  radiation solaire globale mesurée ;

$x_i$ : la  $i^{\text{ème}}$  radiation solaire globale calculée par les différentes modèles.

### III.4.3. L'erreur systématique absolue moyenne MABE :

L'erreur systématique absolue moyenne MABE présente la valeur moyenne des valeurs absolues des erreurs relatives, il est donné par l'équation suivante [16, 17] :

$$\text{MABE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad (\text{III.7})$$

Ou :  $y_i$ ,  $x_i$  et  $N$  sont définis dans l'équation précédente (III.2).

#### Remarque :

Le meilleur modèle est caractérisé par une grande valeur du coefficient de détermination  $R^2$  et des faibles valeurs de l'erreur quadratique moyenne RMSE et de l'erreur systématique absolue moyenne MABE [16, 17].

### III.5 Comparaison des différents modèles :

Le tableau III.2 regroupe les résultats de calcul de l'analyse statistique à savoir le coefficient de détermination  $R^2$ , l'erreur quadratique moyenne RMSE et l'erreur systématique absolue moyenne MABE de la comparaison des radiations solaires calculées suivant les quatre modèles et les radiations solaires globales mesurées sur une surface horizontale dans la région de M'sila. Pour avoir plus de précision on a pris quatre chiffres après la virgule lors des calculs des coefficients  $R^2$ , RMSE et MABE.

**Tableau III.2 : L'analyse statistique de différents modèles (Modèle 1, Modèle 2, Modèle 3 et Modèle 4) de la région de M'sila (1989-2003).**

	$R^2$	RMSE (KWh/m <sup>2</sup> )	MABE
Modèle 1	0,9533	403,91	0,079
Modèle 2	0,9640	358,025	0,073
Modèle 3	0,9764	287,245	0,052
Modèle 4	0,9766	286,218	0,049

On constate que le modèle 4(modèle de Zang et al) présente la valeur la plus élevée du coefficient de détermination  $R^2= 0.9766$ , suivie par le modèle 3(modèle d'Al-Salaymeh 2) avec un coefficient de détermination de  $R^2= 0,9764$ , en suite par le modèle 2 (modèle d'Al-Salaymeh 1) avec un coefficient de détermination de  $R^2= 0,9740$  et en fin le modèle 1(modèle de Kaplanis et Kaplani) avec un coefficient de détermination de  $R^2= 0,9533$ .

Par contre on remarque que la valeur maximale de l'erreur quadratique moyenne RMSE est enregistrée pour le modèle 1(modèle de Kaplanis et Kaplani) avec une valeur 403,91 KWh/m<sup>2</sup>, suivi par le modèle 2(modèle d'Al-Salaymeh 1) avec une valeur de 358,025 KWh/m<sup>2</sup>, en suite le modèle 3 (modèle d'Al-Salaymeh 2) avec une valeur de 287,245 KWh/m<sup>2</sup> et en fin le modèle 4 (modèle de Zang et al.) avec une valeur de 286,218 KWh/m<sup>2</sup>.

De même, la valeur maximale de l'erreur systématique absolue moyenne MABE est enregistrée pour le modèle 1(modèle de Kaplanis et Kaplani) avec une valeur 0,079

suivi par le modèle 2(modèle d'Al-Salaymeh 1) avec une valeur de 0,073 en suite le modèle 3 (modèle d'Al-Salaymeh 2) avec une valeur de 0,052 et en fin le modèle 4 (modèle de Zang et al.) avec une valeur de 0,049.

A partir de ces résultats, on peut dire que le modèle 4(modèle de Zang et al.) avec la plus grande valeur du coefficient de détermination  $R^2$  et les plus faibles valeurs de l'erreur quadratique moyenne RMSE et de l'erreur systématique absolue moyenne MABE présente le meilleur modèle de la prédiction des radiations solaires globales sur une surface horizontale dans la région de M'sila. Ce modèle est donné par la formule suivante :

$$G = 4827 + 408,4 \sin(2 \pi n (1,003)/365) - 2571 \cos(2 \pi n (1,003)/365) \quad (\text{III.8})$$

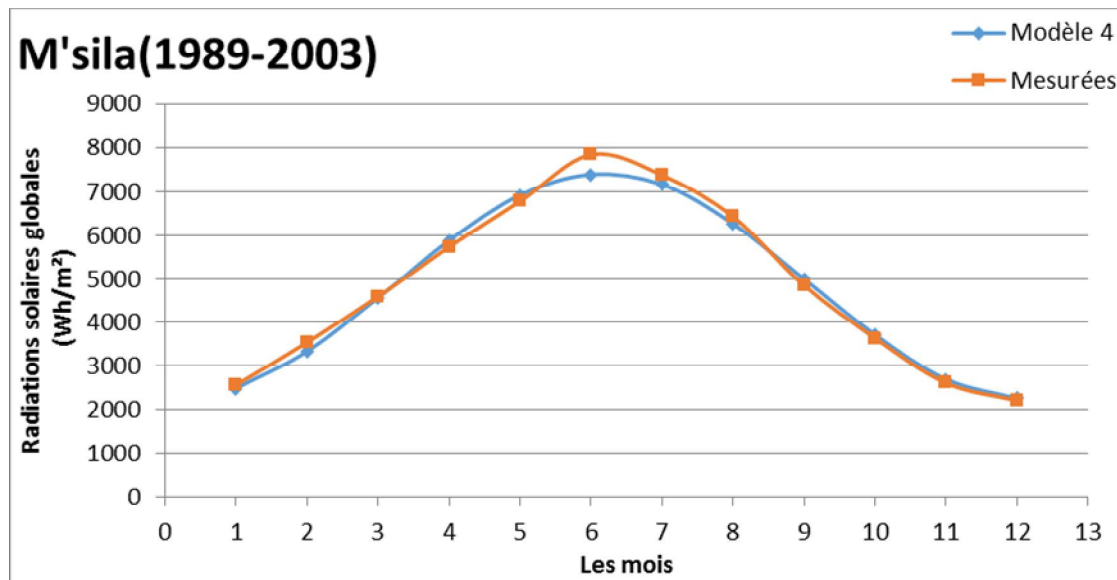
Le deuxième modèle est le modèle d'Al-Salaymeh 2 avec un coefficient de détermination  $R^2$  de 0,9764, une valeur de l'erreur quadratique moyenne RMSE de 287,245 KWh/m<sup>2</sup> et une valeur de l'erreur systématique absolue moyenne MABE de 0,052.

Le troisième modèle est le modèle d'Al-Salaymeh 1 avec un coefficient de détermination  $R^2$  de 0,9640, une valeur de l'erreur quadratique moyenne RMSE de 358,025 KWh/m<sup>2</sup> et une valeur de l'erreur systématique absolue moyenne MABE de 0,073.

Le dernier modèle est le modèle Kaplanis et Kaplani avec un coefficient de détermination  $R^2$  de 0,9533, une valeur de l'erreur quadratique moyenne RMSE de 403,91 KWh/m<sup>2</sup> et une valeur de l'erreur systématique absolue moyenne MABE de 0,079.

### **III.6. Evolution mensuelle des radiations solaires suivant le modèle de Zang et al. :**

Une autre représentation des radiations solaires globales sur une surface horizontale pour la région de M'sila est illustrée sur la figure III.6. C'est une représentation mensuelle des radiations solaires globales suivant le modèle de Zang et al. En comparaison avec les valeurs mesurées.



**Figure III.6: Evolution du modèle4 des radiations solaires globales mensuelles de M'sila (89-03).**

On constate que le modèle de Zang et al. (modèle 4) présente également mieux les radiations solaires globales mensuelles sur une surface horizontale dans la région de M'sila. On remarque un petit décalage au mois de Juin entre ce modèle et les valeurs mesurées. Le coefficient de détermination  $R^2$  dans ce cas est de 0,9921 ce qui indique un bon agrément entre les valeurs des radiations solaires prédis par ce modèle et les valeurs mesurées.

## Conclusion

L'étude faite le long de ce chapitre nous permis de retenir les points suivants :

- Le modèle de Zang et al. est le mieux adapté pour la prédiction des radiations solaires globales sur une surface horizontale dans la région de M'sila suivant le nombre de jour, il est donné par l'équation suivante :

$$G = 4827 + 408,4 \sin(2 \pi n (1,003)/365) - 2571 \cos(2 \pi n (1,003)/365)$$

$(R^2 = 0,9766).$

- Le modèle de Zang et al est suivi par le modèle d'Al-Salaymeh 2 ensuite le modèle d'Al-Salaymeh 1 et en fin le modèle Kaplanis et Kaplani.
- De même le modèle de Zang et al peut être utilisé pour la prédiction des radiations solaires globales mensuelles sur une surface horizontale dans la région de M'sila.

## CONCLUSION GENERALE

L'étude des radiations solaires sur un lieu d'étude est le point de départ de toute investigation dans le domaine d'énergie renouvelable dite solaire. Cependant, l'intensité de ces radiations solaires dépend de plusieurs facteurs tels que ; la durée d'insolation, les coordonnées géographiques, l'altitude du lieu, l'albedo au sol, .....

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde, avec une durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien de 3500 heures.

Les stations de mesure des différents composants des radiations solaires sont rares ou inexistantes sur tout le territoire national. De ce fait, il est intéressant d'établir des modèles Mathématiques qui décrivent les radiations solaires en fonction des paramètres météorologiques tels que ; les températures, la pression, la durée d'insolation, l'humidité la vitesse du vent ..... Le modèle le plus courant est celui de la durée d'insolation.

Cependant, il existe peu d'études qui sont intéressées au développement des modèles mathématiques qui décrivent les radiations solaires journalières en fonction uniquement du nombre de jour comme le seul variable indépendant. C'est dans cette voie qu'on a orienté notre étude.

Suite au travail de Hamidi Aissa (mémoire de Master en énergétique, 20015/2016) sur l'étude des radiations solaires dans la région de M'sila, on a adapté le choix de quinze années optimales de janvier 1989 jusqu'à décembre 2003 pour la détermination des radiations solaires globales dans la région de M'sila notre site d'étude. Ces données ont été obtenues à partir du site de la NASA, USA (National Aeronotics and Space Administration). On a fixé l'objectif de déterminer un modèle mathématique qui écrit les radiations solaires globales dans la région de M'sila en fonction du nombre de jour en comparant quatre modèles : le modèle1 de Kaplanis et Kaplani, le modèle2 de Al-Salaymeh1, modèle3 de Al-Salaymeh2 et le modèle4 de Zang et al. et de déterminer le meilleur modèle pour l'estimation des radiations solaires sur une surface horizontale dans cette région.

Notre étude nous a permis de retenir les points suivants :

- L'évolution des radiations solaires globales journalières sur une surface horizontale dans la région de M'sila en fonction du nombre de jour pour une année moyenne suit la forme d'une clochette comme toutes les années.

- Le modèle de Zang et al. est le mieux adapté pour la prédiction des radiations solaires globales sur une surface horizontale dans la région de M'sila suivant le nombre de jour, il est donné par l'équation suivante :

$$G = 4827 + 408,4 \sin(2 \pi n (1,003)/365) - 2571 \cos(2 \pi n (1,003)/365) \quad (R^2 = 0,9766).$$

- Le modèle de Zang et al est suivi par le modèle d'Al-Salaymeh 2 ensuite le modèle d'Al-Salaymeh 1 et en fin le modèle Kaplanis et Kaplani

De même le modèle de Zang et al. peut être utilisé pour la prédiction des radiations solaires globales mensuelles sur une surface horizontale dans la région de M'sila.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1]: **Khoudrane Ismail** « Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques ». Mémoire de master en énergétique. Université de Ksdi Merbah Ouargla, 2014.
- [2]: **M, Capderou**. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger, 1985.
- [3]: **A, Mefti; M, Y, bouroubi; H, Mimouni**. Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, décembre, 2002.
- [4]: **C, Fröhlich**. 1978: World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490.
- [5]: **J.A. Duffie**, and **J.W. Beckman**, Solar Engineering of Thermal Processes, 2ed, Inc, 1991et 3rd Ed. John Wiley and Sons, 2006.
- [6]: **T. P. Chang**, “ Investigation on frequency distribution of global radiation using different probability density functions”, International Journal of Science and Engineering Vol. 8(2),2011.
- [7]:**CHENNI.Rachid**, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire », These de doctoraten sciences en physique Energetiques ,Université Mantouri de constantine,2007.
- [8]: **PIERRE HENRI** «héliothermique le gisement solaire méthodes et calculs » ,éditions du GRE. imprimerie de L'UPS . 2002
- [9]: **Bouden Abdelmalek**, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque », Mémoire de magistère en électronique, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [11]: **M. Iqbal** .Une introduction au rayonnement solaire, Academic Press, New York, 1983.

[10] : **Bendjellouli Zakaria**, « contribution à la modélisation d'une cellule solaire », mémoire de magistère en micro-électronique-photovoltaïque, Université de Bechar, 2009.

[12] : **Kaplanis S, Kaplani E**. A model to predict expected and stochastic hourly global solar radiation  $I(h,nj)$  values. *Review Energy* .32(8): 1414-25, 2007;

[13]: **Al-Salaymeh A**. Model for the prediction of global daily solar radiation on horizontal surfaces for Amman city, Emirates. *J Eng Res* 2006; 11(1):49–56.

[14] : **Zang H., Xu Q. & Bian H**, Generation of typical solar radiation data for different climates of China. *Energy*, 38(1), pp.236–248, 2012,

[15] : **HAMIDI AISSA**: « Étude des radiations solaires Application à la région de M'sila », mémoire de master “Énergétique”, université de M'sila, 2016.

## WEBOGRAPHE

[web1]: [www./en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy/](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy/),18.11.2010

[web2]: [www./science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/](http://www.science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/), 19.11.2010

[Web3]: <http://nomana.free.fr/public/solaire.html>

[Web4]: <http://www.astrosurf.com/luxorion/meteo-instruments5.htm>

[Web5]: [http://www.kippzonen.fr/News/581/Principe-de-fonctionnement-d-un-pyranometre-a-thermopile#.WNZsR\\_k1\\_IU](http://www.kippzonen.fr/News/581/Principe-de-fonctionnement-d-un-pyranometre-a-thermopile#.WNZsR_k1_IU)

[Web6]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Satellite\\_m%C3%A9t%C3%A9orologique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Satellite_m%C3%A9t%C3%A9orologique)

[Web7]: <http://www.msila-dz.org-geoportail.php>

[Web 8]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya\\_de\\_M'Sila](https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_M'Sila)

[Web9]:[https://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/modelclimate/m%E2%80%99silalgie\\_2486690](https://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/modelclimate/m%E2%80%99silalgie_2486690).

[web10]: <http://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/SEM08/S08P16.HT>