

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

**FACULTE DES SCIENCES**  
**DEPARTEMENT : PHYSIQU**  
**N° : Ph/ENR/17/2021**



**FILIERE : Physique**  
**OPTION : Physique énergétique et énergies renouvelables**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par: DEBIH Bouthaina**  
**GHANEM Faiza**

**Intitulé**

**Estimation de l'irradiation solaire globale pour  
le site de M'sila par des modèles empiriques  
basés sur la température**

**Soutenu devant le jury composé de:**

TAHROUR Farouk	Université de M'sila	Président
HADDAD Zakaria	Université de M'sila	Rapporteur
MAHDI Khaled	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2020 /2021**

# *Remerciements*

*En premier lieu, merci au grand Seigneur qui m'a donné la volonté et le courage de faire ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Mr. Haddad Zakaria, enseignant à l'université Mohamed Boudiaf- M'sila, pour le sujet qu'il m'a proposé et lui exprimer ma profonde reconnaissance pour tout son aide, sa disponibilité, ses conseils, et surtout l'intérêt qu'il a porté à mon travail et l'attention accordé à la lecture et à la correction de ce Mémoire.*

*Mr. Mahdi Khaled, pour avoir accepté l'examination de ce travail*  
*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mr. Tahrouf Farouk enseignant à l'université Mohamed Boudiaf- M'sila, pour avoir accepté de présider le jury.*

*Je remercie tous les enseignants de physique qui ont contribué à l'enseignement.*

*Et tous les travailleurs du département de physique.*

*En fin, Tous mes remerciements à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste projet.*

*Merci*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la plus forte et patiente femme au monde ma très chère maman pour ses grandes sacrifices et qui n'a jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*C'est grâce à elle que j'ai arrivé à ce stade et à mon très cher tendre père pour tout l'amour qu'il m'a donné... Si je dois consacrer toute ma vie pour eux je ne peux pas rendre ce qu'ils mon fait, qu'ALLAH les garde et leur accorde une longue vie.*

*A mes frères:*

*Oussama et AbdElghani ALLAH yrhmh*

*A mes chères sœurs : Monira, Widad, Kanza, Asma, Manar , Ghofran, Rayhana, Samia*

*A mes amies :*

*Selma , Maroua, Maycha, Nabila*

*Mon oncle:*

*Mohammed*

*À toute ma famille de près ou de loin a tous mes enseignants*

*À tous ceux qui m'aiment Et mes collègues de la promotion de master " physique énergétique et énergies renouvelables " (2020/2021)*

*A mes amies que j'ai vécu avec elles des beaux moments au cours de mon cursus à l'université.*

*A ma camarade de ce travail .*

*Debih Bouthaina*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À la plus forte et patiente femme au monde ma très chère maman pour ses grands sacrifices et qui n'a jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*À mon très cher tendre père pour tout l'amour qu'il m'a donné... Si je dois consacrer toute ma vie pour eux je ne peux pas rendre ce qu'ils m'ont fait, qu'ALLAH les garde et leur accorde une longue vie.*

*À ma très chère fille et mon mari*

*À mes chères sœurs et leurs enfants.*

*À ma défunte sœur Fattoum.*

*Et surtout à Zakaria Nabil et Iyad*

*À toute ma famille de près ou de loin, à tous mes enseignants*

*À tous mes collègues de la promotion de master " physique énergétique et énergies renouvelables " (2020|2021)*

*Et à ma camarade de ce travail.*

*Faiza Ghanem*

# *Sommaire*

Dédicaces.....	I
Remerciements.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des Tableaux.....	VI

## **Table des Matières**

Introduction Générale .....	1
-----------------------------	---

### **Chapitre I: Généralités sur la température**

1. Introduction.....	3
2. Définition de la température.....	3
3. Unités de la température.....	4
3.1. Kelvin (K).....	4
3.2. Celsius (°C).....	4
3.3. Fahrenheit (°F).....	5
3.4. Rankine (°R, °Ra).....	5
3.5. Réaumur (°Ré, °Re).....	6
4. Conversions des unités de température.....	6
5. Variation diurne de la température.....	6
6. Appareils de mesure de la température.....	6
6.1. Thermomètre à tension de vapeur saturante.....	7
6.2. Thermomètre acoustique.....	7
6.3. Thermomètre à bruit thermique.....	8
6.4. Thermomètre à effet Tunnel.....	9
6.5. Thermomètre paramagnétique.....	9
6.6. Thermomètre paramagnétique électronique.....	9
6.7. Thermométrie paramagnétique nucléaire.....	10
6.8. Thermomètre à anisotropie de rayonnement $\gamma$ .....	11
7. Relation entre l'irradiationsolaire et la température .....	11

## Chapitre II : Modèles d'estimation de l'irradiation solaire basé sur la température

1.	Introduction.....	12
2.	Modèles d'estimation de l'irradiation solaire.....	13
2.1.	Modèle d'Angstrom-Prescott.....	13
2.1.1.	Modèle d'Angstrom-Prescott.....	14
2.2.	Modèle Ogleman-poran.....	14
2.3.	Modèle Bahel.....	14
2.4.	ModèleNewland.....	14
2.5.	Modèle KadirBakirci.....	14
2.6.	Modèle Elagib-Mansell.....	14
3.	Modèles basé sur la température.....	17
3.1.	Modèle linéaire.....	17
3.1.1.	En fonction de la température maximale( $T_{\max}$ ).....	17
3.1.2.	En fonction de la température minimale ( $T_{\min}$ ).....	17
3.1.3.	En fonction de la température moyenne ( $T_{\text{moy}}$ ).....	18
3.1.4.	En fonction du rapport de température ( $T_R$ ).....	18
3.2.	Modèle quadratique.....	19
3.2.1.	En fonction de la température maximale( $T_{\max}$ ).....	19
3.2.2.	En fonction de la température minimale ( $T_{\min}$ ).....	19
3.2.3.	En fonction de la température moyenne ( $T_{\text{moy}}$ ).....	19
3.2.4.	En fonction du rapport de température ( $T_R$ ).....	19
3.3.	Modèle Hargreaves et Allen.....	19
3.4.	Modèle Hargreaves.....	19
3.5.	Modèle Annandale et al.....	20
3.6.	Modèle de Bristow et Campbell.....	20
3.7.	Modèle Meza et Varas.....	20
3.8.	Chen et coll.....	20
3.9.	Autres modèles.....	20
3.9.1.	Modèle basé sur la différence entre $T_{\max}$ et $T_{\min}$ .....	20
3.9.2.	Modèle de Hargreaves et Samani.....	21
3.9.3.	Modèle de Garcia.....	21
3.9.4.	Modèle de Garcia 2 <sup>ème</sup> ordre.....	21
3.9.5.	Modèle de Garcia 3 <sup>ème</sup> ordre.....	21

3.9.6. Modèle exponentielle de Garcia.....	21
3.9.7. Modèle logarithmique de Garcia.....	21
3.9.8. Modèle température maximum rapport.....	22
3.9.9. Modèle Chandel et al.....	22
4. Evaluation des modèles.....	23

**Chapitre III: Modèles basés sur la température  
pour le site de M'sila**

1. Introduction.....	27
2. Situation géographique de M'sila.....	27
3. Méthodologie du travail.....	27
4. Appareil de mesure.....	28
5. Application de quelques modèles basés sur la temperature pour le site de M'sila.....	29
5.1. Modèles en fonction de $T_{moy}$ .....	29
5.2. Modèles en fonction de $T_{max}$ .....	31
5.3. Modèles en fonction de $T_{min}$ .....	33
5.4. Modèles en fonction de $(T_{max}-T_{min})$ .....	34
5.5. Modèles en fonction de $T_R$ .....	36
6. Évaluation des modèles.....	37

**Conclusion générale**

Conclusion générale.....	41
--------------------------	----

Références

# *Nomenclature*

<b>Notations</b>		<b>Unités</b>
T	Température	-
C	Celsius	°C
F	Fahrenheit	°F
K	Kelvin	°K
R	Rankine	°R, °Ra
G	Irradiation globale moyenne mensuelle mesurée sur un plan horizontal	(MJ/m <sup>2</sup> )
G <sub>0</sub>	Irradiation globale hors atmosphère sur un plan horizontal	(MJ/m <sup>2</sup> )
G <sub>c</sub>	Irradiation globale sous ciel clair	(MJ/m <sup>2</sup> )
S	Durée effective de l'ensoleillement.	H
S <sub>0</sub>	Durée maximale d'ensoleillement ou durée du jour	H
a ,b,c,d	Constants empirique déterminant l'état climatique de la région étudiée	-
I <sub>0</sub>	Constante solaire	W/m <sup>2</sup>
n	Numéro du jour de l'année à partir du premier janvier	-
λ	Latitude du lieu.	degré (°)
ω	Angle horaire	degré (°)
δ	Déclination	degré (°)

$T_{\text{moy}}$	Température moyenne	°C
$T_{\text{min}}$	Température minimale	°C
$T_{\text{max}}$	Température maximale	°C
$T_R$	Rapport de température	°C
$\Delta T$	Différence de température maximale et minimale	°C
$Z$	Hauteur au-dessus du niveau de la mer	M
$e_i$	L'erreur	–
$Y_{\text{mes}}$	Valeurs mesurées	–
$Y_{\text{cal}}$	Valeurs calculées	–
$m$	Nombre de répétitions	–
MBE	Valeur du coefficient de corrélation	(MJ/m <sup>2</sup> )
RMSE	Valeur moyenned'erreur de biais	(MJ/m <sup>2</sup> )

## Liste des figures

### Chapitre II

Figure II. Comparaison entre les valeurs de l'irradiation solaire globale moyenne mensuelle mesurées et celles estimées.....	17
--	----

### Chapitre III

Figure III.1 Situation géographique de M'sila.....	25
Figure III.2 Station météorologique de type Davis.....	26
Figure III.3 Modèle linéaire en fonction de $T_{moy}$ .....	27
Figure III.4 Modèle quadratique en fonction de $T_{moy}$ .....	28
Figure III.5 Modèle cubique en fonction de $T_{moy}$ .....	28
Figure III.6 Modèle linéaire en fonction de $T_{max}$ .....	29
Figure III.7 Modèle quadratique en fonction de $T_{max}$ .....	29
Figure III.8 Modèle cubique en fonction de $T_{max}$ .....	30
Figure III.9 Modèle quadratique en fonction de $T_{min}$ .....	30
Figure III.10 Modèle quadratique en fonction de $T_{min}$ .....	30
Figure III.11 Modèle quadratique en fonction de $T_{min}$ .....	31
Figure III.12 Modèle quadratique en fonction de $T_{max} - T_{min}$ .....	31
Figure III.13 Modèle quadratique en fonction de $T_{max} - T_{min}$ .....	32
Figure III.14 Modèle quadratique en fonction de $T_{max} - T_{min}$ .....	32
Figure III.15 Modèle quadratique en fonction de $T_R$ .....	33
Figure III.16 Modèle quadratique en fonction de $T_R$ .....	33
Figure III.17 Modèle quadratique en fonction de $T_R$ .....	34

## **Liste des Tableaux**

Tableaux I.1 formule de calculs pour la conversion des unités de temperature enture elles.....	<b>6</b>
Tableaux II.1 Modèles basés sur la durée d'ensoleillement.....	<b>15</b>
Tableaux II.2 Comparaison entre des modèles basés sur la durée d'ensoleillement.....	<b>16</b>
Tableaux II.3 Modèles basés sur les températures.....	<b>21</b>
Tableaux II.4 Evaluation des modèles basés sur les températures pour Nigeria et Ethiopie.....	<b>23</b>
Tableau III.1 Evaluation des modèles.....	<b>35</b>

**Introduction**

**générale**

## Introduction Générale

La conception d'un système de conversion d'énergie solaire nécessite une connaissance précise de la disponibilité de l'irradiation solaire globale à l'endroit d'intérêt. Et car l'irradiation solaire globale atteint la terre dépend des paramètres météorologiques locales, l'étude de l'irradiation solaires sous les conditions climatiques locales est indispensable.

Par conséquent, divers modèles ont été explorés par des chercheurs pour l'estimation avec une précision raisonnable de l'irradiation solaire à partir des données météorologiques disponibles comme la température de l'air car les observations d'ensoleillement, et de nuages ne sont pas disponibles dans la plupart des stations météorologiques. Il est donc nécessaire de développer des modèles d'estimation de l'irradiation solaire basés sur des variables journalières disponibles et fiables comme la température de l'air ambiante.

Ainsi, dans le cadre de ce travail, nous avons étudié trois modèles (linéaire, quadratique et cubique) basés sur la température, pour l'estimation du rayonnement solaire global à partir des valeurs mesurées de la température et de l'irradiation solaire globale, au niveau de la station météorologique de M'sila. Nous avons par la suite évalués ces modèles pour le site de M'sila.

Ce mémoire est organisée en trois chapitres, complétés par une introduction et une conclusion générales.

- Le premier chapitre présente des généralités sur la température.
- Le second chapitre est consacré aux modèles d'estimation de rayonnement solaire basés sur les températures.
- Les principaux résultats obtenus font l'objet du troisième chapitre.

**Chapitre I :**

**Généralités sur**

**La température**

## 1. Introduction

La température n'est pas une grandeur directement mesurable. Sa perception varie d'un individu à l'autre et selon les conditions atmosphériques (vent, pluie, ensoleillement...). Pour déterminer la grandeur physique de la température, plusieurs échelles ont été définies. Dans la majorité des pays on utilise le degré Celsius. Le 0°C de cette échelle correspond au point de congélation de l'eau, et le 100°C au point d'ébullition de l'eau. Son nom est emprunté à l'astronome et physicien suédois Anders Celsius (1701-1744). Il a inventé en 1742 une des premières échelles centigrades de température basée sur les mêmes points de référence mais inversés : 0 correspondait au point d'ébullition de l'eau, 100 à son point de congélation. Quelques pays anglo-saxons utilisent encore l'échelle Fahrenheit, du nom du physicien allemand (1686-1736) qui l'a mise au point en 1724. Celui-ci avait basé son échelle sur deux points de référence bien différents : d'une part la température la plus basse obtenue en laboratoire en mélangeant un volume égal de chlorure d'ammonium et d'eau, et d'autre part, la température du sang d'un cheval en bonne santé. Sur cette échelle, l'eau congèle à 32°F et bout à 212°F. L'actuelle unité internationale de température, le kelvin (K), est utilisée par les scientifiques. Par convention, le zéro de l'échelle kelvin (0 K) est le zéro absolu, c'est-à-dire la température la plus basse possible dans l'univers. A cette température il n'y a plus aucune agitation moléculaire. Cette échelle possède un seul point de référence : la valeur particulière du point triple de l'eau à 273,16 K. Il correspond aux conditions dans lesquelles coexistent les trois états : liquide, solide et gazeux. Un écart de un kelvin correspond très exactement à un degré Celsius [1].

## 2. Définition de la température

En physique moderne, on définit la température (absolue) T au moyen de la formule :

$$\frac{1}{k \cdot T} = \frac{\partial S}{\partial U} \quad (\text{I. 1})$$

Où k est la constante de Boltzmann, S est l'entropie d'un corps donné en équilibre thermodynamique, et U est son énergie interne. [ 2]

La chaleur est une forme d'énergie et c'est un élément très important du climat. Il affecte l'activité humaine, les vêtements, l'habitation et la nourriture, ainsi que d'autres éléments du système. La température affecte la plupart des éléments du climat tels que la pression atmosphérique, les vents, l'évaporation et l'humidité relative.

La chaleur est définie comme la quantité d'énergie cinétique dans un seul atome ou une partie du composant de la substance, et la température est définie comme une mesure qui détermine la quantité

moyenne d'énergie cinétique d'un atome partiel [3].

Pour les températures élevées, il n'y a pas vraiment de limites, et il est possible d'atteindre une température très élevée. Par exemple, la température à la surface du soleil est de 5 800 kelvin, tandis que la température à l'intérieur du soleil monte jusqu'à 13,6 millions de kelvins.

Mais pour les températures basses, il existe une limite très spécifique, qui est la température zéro absolue, la température la plus basse possible. Le zéro absolu est un état théorique qui ne peut jamais être atteint. En théorie, tous les mouvements des atomes cesseraient presque immédiatement, ne retenant que l'énergie du point zéro de la mécanique quantique. La température du zéro absolu est égale à 0 kelvin, -273,15 °Celsius ou -459,67 °Fahrenheit. Dans l'espace, la température est assez froide et la température moyenne de l'univers est inférieure à 3 kelvin.[4]

### 3. Unités de la température

Les unités de la température sont [ 5]:

#### 3.1.Kelvin (K)

Le kelvin est l'unité de base de la température dans le système SI (Système international d'unités). L'abréviation de l'unité kelvin est °K (pas de degré ni de signe degré). C'est William Thomson (Lord Kelvin) qui a présenté l'unité kelvin pour la première fois en 1848.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le kelvin est actuellement défini par la fraction  $1/273,16$  de la température thermodynamique du point triple de l'eau, le point zéro absolu étant 0°K. La taille d'un kelvin est la même que celle d'un degré Celsius. La température de fonte de la glace est de 273,15 °K (le triple point de l'eau est 273,16 °K).

Le kelvin est souvent utilisé en science et en technologie. À part cela, il n'est pas très utilisé dans la vie de tous les jours. Le symbole du système de température Kelvin selon l'échelle ITS-90 est T90 avec la lettre T en majuscule.

#### 3.2.Celsius (°C)

Le Celsius est actuellement une unité dérivée de température dans le système SI, le kelvin étant l'unité de base. L'abréviation de Celsius est °C (degré Celsius) et la taille d'un degré Celsius est la même que celle d'un kelvin. C'est le Suédois Andreas Celsius qui a présenté l'unité et l'échelle Celsius pour la première fois en 1742. Les deux principaux points de référence de l'échelle Celsius étaient le point de congélation de l'eau (ou le point de fusion de la glace) défini à 0 °C et le point d'ébullition de l'eau à 100 °C.

Le point de fusion de la glace est une spécification précise relative (en assumant que l'on a de la glace

Purifiée et qu'elle est correctement mélangée), mais la température d'ébullition de l'eau n'est pas une température si précise en pratique, car la température d'ébullition dépend beaucoup de la pression atmosphérique. Comme le Celsius est une unité SI dérivée du kelvin, il est aussi lié à l'échelle ITS-90 et l'échelle de son symbole est  $t_{90}$  avec la lettre t en minuscule. En termes de l'échelle ITS-90, le point de fusion de la glace est légèrement en dessous de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  et le point d'ébullition de l'eau à pression atmosphérique normale est d'environ  $99,974\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Le Celsius est mieux adapté à une utilisation de tous les jours que le kelvin et est très populaire dans le monde, bien qu'il ne soit pas très utilisé aux États-Unis. Un degré Celsius est parfois appelé centigrade.

### 3.3. Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ )

L'abréviation de l'unité Fahrenheit est  $^{\circ}\text{F}$ . L'échelle Fahrenheit a été introduite pour la première fois par un hollandais appelé Gabriel Fahrenheit en 1724. Les deux principaux points de référence de l'échelle sont le point de congélation de l'eau défini à  $32\text{ }^{\circ}\text{F}$  et la température du corps humain à  $96\text{ }^{\circ}\text{F}$ .

En pratique, il est facile de voir que la température d'un corps humain n'est pas une définition très précise. De nos jours, l'échelle Fahrenheit a été redéfinie de sorte que le point de fusion de la glace est exactement de  $32\text{ }^{\circ}\text{F}$  et le point d'ébullition de l'eau exactement  $212\text{ }^{\circ}\text{F}$ . La température du corps humain est d'environ  $98\text{ }^{\circ}\text{F}$  sur l'échelle révisée.

Dans de nombreux domaines, le Fahrenheit a été remplacé par le Celsius comme unité de température, mais le Fahrenheit est toujours utilisé aux USA, dans les Caraïbes et aussi en utilisation parallèle au Celsius en Australie et au Royaume- Uni.

### 3.4. Rankine ( $^{\circ}\text{R}$ , $^{\circ}\text{Ra}$ )

L'abréviation du Rankine est  $^{\circ}\text{R}$  ou  $^{\circ}\text{Ra}$ . C'est l'écossais William Rankine qui a présenté l'échelle Rankine pour la première fois en 1859, quelques années donc après l'échelle Kelvin. Le point de référence de l'échelle Rankine est le zéro absolu à  $0\text{ }^{\circ}\text{R}$ , comme sur l'échelle Kelvin. La taille d'un degré Rankine est la même que la taille d'un degré Fahrenheit, mais le point zéro est très différent. Le point de congélation de l'eau est égal à  $491,67\text{ }^{\circ}\text{Rankine}$ .

L'échelle Rankine n'est pas très utilisée. Elle était utilisée dans certains domaines technologiques aux États-Unis, mais le NIST recommande de ne plus utiliser le Rankine.

### 3.5. Réaumur (°Ré, °Re)

L'échelle Réaumur a été introduite par René de Réaumur en 1730. Ses points de référence sont le point de congélation de l'eau à 0 °Ré et le point d'ébullition de l'eau à 80 °Ré.

L'échelle Réaumur était utilisée dans certaines parties de l'Europe et en Russie, mais elle a principalement disparu dans le courant du siècle dernier.

## 4. Conversions des unités de température

Le tableau ci-dessous offre des formules de calcul pour la conversion des relevés de température d'une unité à une autre[6].

De/En	En °C	En °F	En K	En °Ra	En °Re
De °C	1	$T_{(°C)} \times 1.8 + 32$	$T_{(°C)} + 273.15$	$(T_{(°C)} + 273.15) \times 1.8$	$T_{(°C)} \times 0.8$
De °F	$(T_{(°F)} - 32) / 1.8$	1	$(T_{(°F)} + 459.67) / 1.8$	$T_{(°F)} + 459.67$	$T_{(°F)} - 32 \times 4/9$
De K	$T_{(K)} - 273.15$	$T_{(K)} \times 1.8 - 459.67$	1	$T_{(K)} \times 1.8$	$(T_{(K)} - 273.15) \times 0.8$
De °Ra	$(T_{(°Ra)} - 491.67) / 1.8$	$T_{(°Ra)} - 459.67$	$T_{(°Ra)} / 1.8$	1	$(T_{(°Ra)} - 491.67) \times 4/9$
De °Re	$T_{(°Re)} / 0.8$	$T_{(°Re)} \times 9/4 + 32$	$T_{(°Re)} \times 1.25 + 273.15$	$T_{(°Re)} \times 9/4 + 491.67$	1

Table 2: Formule de calculs pour la conversion des unités de température entre elles

Tableaux I.1 formule de calculs pour la conversion des unités de température entre elles

## 5. Variation diurne de la température

La température de l'air varie avec l'alternance du jour et de la nuit mais aussi, dans la journée, avec l'ensoleillement. Les bulletins météorologiques indiquent ainsi la température maximale et la température minimale du jour. Contrairement aux idées reçues, la température maximale de la journée n'est pas atteinte à midi solaire, mais plutôt vers 15h solaire (soit 17h en France l'été). Le minimum de température est atteint peu après le lever du soleil. Par temps couvert, le cycle est le même mais l'amplitude (différence entre la température maximale et la température minimale) est moindre. Sur la planète, il fait en moyenne 15°C. Les températures relevées les plus basses peuvent atteindre - 89 °C et les plus élevées plus de + 56°C [1].

## 6. Appareils de mesure de la température

Le choix d'un instrument de mesure n'est pas toujours facile. Il faut avant toute chose se poser les bonnes questions, prendre connaissance des diverses possibilités de mesure et répondre raisonnablement à ces questions. Dans ce choix intervient aussi l'influence des conditions particulières de la mesure envisagée sur la précision de la mesure [7]

### 6.1. Thermomètre à tension de vapeur saturante

La conférence internationale des poids et mesures de 1958 a recommandé l'emploi d'une échelle de Tension de vapeur de l'He4 comme étalon international de thermométrie de 1K à 5,2 K. Cette échelle a été établie en ajustant les résultats de toutes les mesures disponibles de tension de vapeur et son expression théorique déduite de la thermodynamique statistique :

$$\log P = i_0 - \frac{L_0}{RT} + \frac{5}{2} \log T - \frac{1}{RT} \int_0^T S_1 dT + \frac{1}{RT} \int_0^P V dP + \varepsilon \quad (\text{I.2})$$

$$i_0 = \log \frac{K^{2/3} (2\pi m)^{2/3}}{h^3} \quad (\text{I.3})$$

$$\text{et } \varepsilon = \log \left( \frac{PV}{NRT} \right) - 2B \left( \frac{N}{V} \right) - \frac{2}{3} C \left( \frac{3}{2} \right)^2 \quad (\text{I.4})$$

$L_0$  est la chaleur latente de vaporisation de l'He<sub>4</sub> liquide à ° K (SI) et VI, entropie et volume molaire de l'He<sub>4</sub> liquide, m, masse de l'atome d'He<sub>4</sub>, B et C, coefficients du viriel, ont été calculés à partir de données expérimentales. La tension de vapeur a été mesurée en fonction de températures obtenues à l'aide de thermomètres à gaz et par extrapolation à densité nulle des isothermes de l'hélium. Entre ces points d'étalonnage, les températures ont été interpolées en utilisant des thermomètres à résistance de carbone ou paramagnétiques. En dessous de 2,17 °K, la superfluidité de l'He<sub>4</sub> présente des inconvénients pour une détermination précise des tensions de vapeur car elle est, entre autre, à l'origine de courants de convection. Pour éviter ces difficultés et étendre la thermométrie pratique à de plus basses températures, de 3,2 °K à 0,3 °K on peut utiliser l'échelle de pression de vapeur de l'He<sub>3</sub>, recommandée par le Comité International des Poids et Mesures en 1962 (échelle T62). Il est préférable d'utiliser les deux échelles, He<sub>3</sub> et He<sub>4</sub>, dans la région de température où elles se recoupent. En pratique, deux techniques sont communément utilisées pour la mesure de tension de vapeur : soit prendre la pression en un point quelconque au-dessus du niveau du bain, auquel cas il peut être nécessaire de faire une correction de pression hydrostatique pour les températures supérieures à celle du point. Soit utiliser un bulbe contenant une faible quantité d'hélium, placé en contact avec le corps dont on veut mesurer la température. Aux basses pressions, il peut se produire des pertes de charge thermo moléculaires délicates à corriger, qui rendent difficile la mesure des températures inférieures à 0,6 °K (p 0,5 mm Hg) avec un bulbe à He<sub>3</sub>.

## 6.2. Thermomètre acoustique

En 1965 a été adoptée provisoirement une échelle basée sur la thermométrie acoustique entre 2 K et 20 K, représentée par six thermomètres à résistance de Germanium. La vitesse du son  $v$  dans un gaz s'exprime en fonction des coefficients du virile :

$$v^2 = \gamma_0 \frac{RT}{M} \left[ 1 + \frac{2p}{RT} \left( B + \frac{2T}{3} \frac{dB}{dT} + \frac{2}{15} T^2 \frac{d^2B}{dT^2} \right) \right] \quad (\text{I.5})$$

$$\gamma_0 = \left( \frac{C_p}{C_v} \right)_{p=0} \quad (\text{I.6})$$

Une utilisation précise de cette formule nécessite une très bonne connaissance de  $B$ . On peut diminuer l'importance des trois derniers termes en mesurant  $\nu$  à une température donnée pour plusieurs pressions  $p$  et en extrapolant à pression nulle, c'est-à-dire en se rapprochant des conditions du gaz parfait. Le thermomètre est essentiellement constitué d'un interféromètre acoustique. A fréquence fixe, à température constante et pour une série de valeurs de la pression, on détermine la position d'un piston réflecteur par rapport au quartz, position qui correspond à un nombre entier de demi-longueurs d'onde. La température ainsi obtenue est systématiquement supérieure à celle donnée par l'échelle T5, suggérant que la température d'ébullition de l'hélium est trop basse dans cette échelle T5, d'environ 8 (+3)(mK). Contrairement à la thermométrie par tension de vapeur, le volume de l'appareillage mis en jeu la rend impraticable de façon courante.

### 6.3. Thermomètre à bruit thermique

Un autre type de thermomètre susceptible de donner une échelle primaire de température a pour principe la mesure du bruit thermique d'une résistance  $R$  :

$$V^2 = 4kTRf \quad (\text{I.7})$$

$f$  est la largeur de bande du bruit auquel le système est sensible. Des techniques de corrélation efficaces permettent d'étendre les mesures aux températures inférieures à 1K avec une précision meilleure que 1%.<sup>11</sup> semble cependant possible d'obtenir beaucoup mieux avec une jonction Josephson. Si l'on maintient sur une telle jonction une tension de polarisation  $V$ , elle émet à une fréquence  $f=2 eV/h$ . Le bruit thermique d'une faible résistance  $R$  branchée en parallèle avec elle superpose à  $f$  une composante fluctuante d'amplitude dépendant de la température.

Une mesure de ces fluctuations est la largeur de raie  $\delta f$  du signal dû au bruit thermique :

$$\delta f = \frac{16\pi kTRe^2}{h^2} \quad (\text{I.8})$$

Une autre technique consiste à en mesurer la variance avec un fréquencemètre

$$\langle (f - \langle f \rangle)^2 \rangle = \frac{KTR8e^2}{\tau h^2} \quad (\text{I.9})$$

Ces équations ne contiennent que des constantes fondamentales et des quantités faciles à mesurer avec des méthodes automatiques, et permettent d'obtenir directement la température absolue des électrons de conduction d'un métal normal. On peut espérer observer l'ordre de grandeur du milli kelvin (mK).

#### 6.4. Thermomètre à effet Tunnel

On peut aussi utiliser directement l'effet Tunnel supraconducteur. A basse température le courant Tunnel, pour des tensions de polarisation  $eV < 2 A(T)$ , dépend du nombre de quasi particules capables de franchir la barrière par effet Tunnel. Il faut évaluer numériquement les expressions détaillées de la dépendance exacte du courant Tunnel en fonction de la température. La gamme de température que peut couvrir un tel thermomètre dépend de la température critique  $T_C$  du supraconducteur employé : elle est effectivement comprise entre  $0,2 T_C$  et  $T_C$ .

#### 6.5. Thermomètre paramagnétique

On peut donc obtenir avec une très bonne précision une échelle des températures supérieures à environ  $0,5^\circ K$ , la technique la plus utilisée est la mesure de tension de vapeur saturante. Pour les températures inférieures à  $0,5^\circ K$ , la thermométrie paramagnétique est la seule employée depuis de nombreuses années, mais elle est encore loin de fournir une échelle de température universellement reconnue, particulièrement en ce que concerne la gamme du milli kelvin. Cette méthode permet de déterminer  $T$  en mesurant la susceptibilité  $x$  de substances qui obéissent à un loi de Curie ou de Curie-Weiss

$$X = \frac{C}{T - A} \quad (\text{I. 10})$$

Où  $C$  et  $A$  sont des constantes.

La sensibilité augmente quand la température diminue, ce qui en fait un outil idéal aux très basses températures où son emploi est cependant limité par les interactions internes entre ions paramagnétiques. D'origine dipolaire, d'échange ou autre, elles mènent à un ordre Ferromagnétique à une température caractéristique  $T$ , et provoquent d'importantes déviations à la loi de Curie à partir de températures de l'ordre de 3 fois  $T$ . Vers les hautes températures, la sensibilité est faible, et d'autres déviations à la loi de Curie peuvent provenir de la proximité des états excités. Le paramagnétisme utilisé est soit d'origine électronique, dans la gamme du m K, soit d'origine nucléaire pour les températures inférieures.

#### 6.6. Thermomètre paramagnétique électronique

De nombreux composés inorganiques ont été utilisés pour le refroidissement et la thermométrie : les ions paramagnétiques sont dilués dans un sel comportant en général de nombreuses molécules d'eau qui ont pour effet de diminuer les interactions. Le donne la température d'ordre et la constante de Curie des sels les plus usuels. L'emploi de nitrate double de Cérium Magnésium (CMN) s'est généralisé ces dernières années car sa faible température d'ordre permet de définir une échelle de température allant jusqu'à quelques Mk. D'une façon générale, on peut définir une échelle de température  $T$  déduite de la loi de Curie  $C/Tx$ . Si  $H_e$  est le champ extérieur appliqué pour la mesure de  $X$ , le champ local vu par les ions

paramagnétiques sera la somme de ce champ appliqué, d'un champ démagnétisant dépendant de la forme de l'échantillon et d'un champ d'interactions entre ions, fonction du type d'arrangement cristallin :

$$H_{loc} = H_{ext} + H_0 + H_{int} = H_{ext} + (-D + N) \frac{M}{V} \quad (I.11)$$

D'où

$$x = \frac{c}{T^x} = \frac{c}{T-\Delta} \text{ avec } \Delta = (N - D) \frac{fC}{V} \quad (I.12)$$

Dans le cas idéal d'un sel de forme sphérique et des structure cubique

$$N = D = \frac{4\pi}{3}, \Delta = 0 \quad (I.13)$$

$$T = T^x \quad (I.14)$$

L'écart à l'arrangement cubique des dipôles. Pour le CMN  $\delta = -0,27(\text{mK})$ . La loi de Curie, ou plutôt de Curie-Weiss avec  $\delta$ , est suivie avec précision (1%) jusqu'à environ 6 (mK). Pour les températures inférieures, et jusqu'à T, -3(mK), une correspondance a été établie par diverses méthodes qui concordent plus ou moins aux températures les plus basses :

-Dans une méthode purement thermodynamique, on mesure la variation d'énergie interne dQ correspondant à une faible variation d'entropie dS, d'où

$$T = \frac{dQ}{dS} = \frac{dQ}{dT^x} / \frac{dS}{dT^x} \quad (I.15)$$

En pratique, on désaimante adiabatiquement le thermomètre à partir de conditions initiales connues, donc d'entropie connue, jusqu'à un champ nul, d'où une température  $T_x = C/X$  où C est supposé connu. Ensuite, on chauffe l'échantillon jusqu'à une température fixée. En variant les conditions initiales, on obtient les courbes S(T<sub>x</sub>) et Q(T<sub>x</sub>) d'où l'on peut dériver les relations S(T) et T<sub>x</sub>(T).

-Une autre méthode utilise l'orientation nucléaire. Elle va faire l'objet d'un paragraphe séparé en tant qu'étalon primaire de température. Elle a l'avantage d'une plus grande sensibilité que la précédente à basse température. La correspondance obtenue pour le CMN La détermination de a été remise en question par l'utilisation de thermomètres de CMN en poudres de différentes granulométries, de forme cylindrique (de hauteur égale au diamètre).

### 6.7. Thermométrie paramagnétique nucléaire

L'importance des interactions entre ions paramagnétiques ayant l'effet que l'on vient de voir sur la thermométrie, on a pensé utiliser le paramagnétisme des moments nucléaires de métaux, dans certaines conditions d'équilibre thermique. Les métaux utilisés pour leur bonne conductibilité thermique doivent être choisis sans couplage quadripolaire qui provoquerait une déviation par rapport à la loi de Curie. Les plus faciles à employer sont l'aluminium, le cuivre et le platine, ce dernier étant le meilleur grâce à son faible temps de relaxation spin-réseau T<sub>1</sub>.

### 6.8. Thermomètre à anisotropie de rayonnement $\gamma$

Cette méthode a servi à établir la relation du CMN pour l'établissement de l'échelle de température absolue. Pour des noyaux radioactifs, la population des niveaux d'énergie séparés par le couplage hyperfin est fonction de la température et provoque une anisotropie dans le spectre d'émission de rayonnement  $\gamma$ . La distribution angulaire de rayonnement  $\gamma$  en fonction de l'angle  $\alpha$  avec la direction du champ d'alignement s'écrit :

$$W(\alpha, T) = \sum_i \alpha_i B_i P_i(\cos \alpha) \quad (\text{I. 16})$$

Les coefficients  $B_i$  peuvent s'exprimer en fonction d'un paramètre  $B/kT$  de l'Hamiltonien de spin de forme connue ; la valeur de  $B$  est calculée à partir d'un étalonnage à haute température. La mesure du nombre de coups par unité d'angle solide pour un angle  $\alpha$  donné procurera donc une mesure de la température. On utilise pour cela des détecteurs à NaI ou Ge Li couplés à un analyseur multi canal. La limite haute température de la méthode réside dans la faiblesse de l'anisotropie qu'il est alors difficile de mesurer avec précision. A basse température l'anisotropie dépend peu de la température et la vitesse de comptage devient faible. C'est le cas aux environs de 10 mK pour le  $^{60}\text{Co}$  qui est pourtant actuellement le noyau le plus utilisé en thermométrie [8].

### 7. Relation entre l'irradiation solaire et la température

La planète tourne autour de son axe en rotation complète toutes les 24 heures et à cause des rayons du soleil, il vient d'une direction, donc il est produit à partir de ce jour et de cette nuit, et la température varie sur une période. La journée est intense, donc les rayons au lever et au coucher du soleil sont plus inclinés vers l'horizon. Par conséquent, il est moins sévère qu'à midi, ce qui entraîne une différence de température sur une période de temps.

Il existe une corrélation directe entre la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface de la terre et le rayonnement net affectant la température de surface de la terre et la température de l'air en contact de la surface de la terre, donc on a une relation directe entre le rayonnement solaire et la température de l'air tout au long de la journée et avec les différentes saisons de l'année. Dans le chapitre suivant on a détaillé cette relation.

# **Chapitre II:**

## **Modèles d'estimation de l'irradiation solaire globale basée sur la température**

## 1. Introduction

Les données de rayonnement solaire au niveau du sol sont importantes pour plusieurs domaines tels que la météorologie, l'ingénierie, les sciences agricoles (en particulier pour la physique des sols, l'hydrologie agricole, la modélisation des cultures et l'estimation de l'évapotranspiration des cultures), dans le secteur de la santé et dans la recherche de nombreux domaines de sciences naturelles. Quelques exemples montrant la diversité des applications peuvent inclure: l'architecture et la conception des bâtiments (par exemple, les systèmes de climatisation et de refroidissement), conception et utilisation des systèmes de chauffage solaire, production d'énergie solaire et courses de voitures à énergie solaire, modèles de prévisions météorologiques et climatiques, évaporation et irrigation, calcul des besoins en eau pour les cultures, surveillance de la croissance des plantes et de la lutte contre les maladies et les recherches sur le cancer de la peau.

Les valeurs moyennes à long terme de l'irradiation solaire instantanée (ou horaires, quotidiennes, mensuelles) globales et diffuses sur une surface horizontale est nécessaires dans de nombreuses applications de conceptions d'énergie solaire. Les valeurs mesurées de ces paramètres sont disponibles à quelques endroits. Dans d'autres, aucune mesure n'existe et ici la pratique consiste à les estimer à partir des modèles théoriques ou empiriques qui ont été développés sur la base des valeurs mesurées. Par conséquent, un certain nombre de corrélations et de méthodes ont été développées pour estimer le rayonnement solaire global quotidien ou mensuel sur la base des données météorologiques facilement disponibles. Les modèles empiriques qui ont été utilisés pour calculer le rayonnement solaire sont généralement basés sur les paramètres suivants :

- Paramètres astronomiques (constant solaire, distance terre –soleil, déclinaison et angle horaire).
- Paramètre géographique (latitude, longitude et élévation du site).
- Paramètres géométriques (angle d'azimut de la surface, angle d'inclinaison de la surface, angle d'élévation du soleil, angle d'azimut du soleil).
- Paramètres physiques (dispersant des molécules équitables, teneur en vapeur d'eau, diffusion de poussières et autres constituants atmosphériques tels qu'O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O, etc.).
- Paramètres météorologiques (durée d'ensoleillement du rayonnement solaire extraterritorial, température, précipitations, humidité relative, effets de la nébulosité, température du sol, évaporation, réflexion de la localité, etc.).

## 2. Modèles d'estimation de l'irradiation solaire

Plusieurs modèles empiriques ont été développés pour estimer le rayonnement solaire global en utilisant divers paramètres comme la durée d'ensoleillement, l'albédo, la température, l'humidité relative, les précipitations et l'altitude. On cite ici quelques modèles utilisés.

### 2.1. Modèle d'Angstrom-Prescott

Il est logique de considérer que le rayonnement solaire est directement proportionnel à la durée d'ensoleillement. Une telle relation a été présentée par Angstrom en 1924[9].

$$\frac{G}{G_c} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{II.1})$$

Où

G : irradiation globale moyenne mensuelle mesurée sur un plan horizontal.

G<sub>c</sub> : irradiation globale sous ciel clair.

S : durée d'ensoleillement (heures)

S<sub>0</sub> : durée de jour astronomique (la durée du jour).

a et b : coefficients empiriques. Ces coefficients sont des coefficients spécifiques à l'emplacement.

Le rapport S/S<sub>0</sub> donne des informations sur les caractéristiques atmosphériques et les conditions de la zone d'étude.

#### 2.1.1. Modèle d'Angstrom-Prescott

Le modèle d'Angstrom a été modifié par Prescott (en 1940) en remplaçant (G<sub>c</sub>) par le rayonnement extraterrestre, sur un plan horizontal (G<sub>0</sub>). Il est populairement connu sous le nom de modèle d'Angstrom-Prescott. Donné par la relation [10] :

$$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{II.2})$$

Le rapport G/G<sub>0</sub> est appelé indice de clarté, avec :

$$G_0 = \left( \frac{24 \cdot I_0}{\pi} \right) \cdot \left( 1 + 0.033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \cdot \left( \cos \lambda \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega + \left( \frac{\pi \cdot \omega}{180} \right) \sin \lambda \cdot \sin(\delta) \right) \quad (\text{II.3})$$

Où toutes les angles en degrés et G<sub>0</sub> en (Wh/m<sup>2</sup>). Si on multiplie G<sub>0</sub> par (3600) et divise par 10<sup>6</sup> on trouve G<sub>0</sub> en (MJ/ m<sup>2</sup>). [11]

I<sub>0</sub> : Constante solaire (1367W/m<sup>2</sup>). La relation corrigée de la constante solaire [12] est :

$$I_0 = 1367 \cdot \left( 1 + 0.033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \quad (\text{II.4})$$

λ : Latitude du lieu.

ω : Angle horaire,  $\omega = \cos^{-1}(-\tan \lambda \cdot \tan \delta)$

δ : Déclinaison, elle est donnée par :  $\delta = 23.45 \cdot \sin \left( \frac{360 \cdot (284 + n)}{365} \right)$

$n$  : Numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

$S_0$  : Durée maximale d'ensoleillement ou durée du jour, ( $S_0 = \frac{2 \cdot \omega}{15}$ )

$S$  : Durée effective de l'ensoleillement.

### 2.2. Modèle Ogleman-poran

Ce modèle a été développé par Ogleman en 1984 (Turquie), c'est un polynôme de 2<sup>ème</sup> degré [13]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + c \left( \frac{S}{S_0} \right)^2 \quad (\text{II.5})$$

### 2.3. Modèle Bahel

L'équation donnée sous forme d'un polynôme de 3<sup>ème</sup> degré comme suit :

$$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + c \left( \frac{S}{S_0} \right)^2 + d \left( \frac{S}{S_0} \right)^3 \quad (\text{II.6})$$

Ce modèle était suggéré par Bahelen 1987 [14].

### 2.4. Modèle New land

New land a développé en 1988 un modèle linéaire logarithmique pour obtenir la meilleure corrélation entre  $\left( \frac{S}{S_0} \right)$  et  $\left( \frac{G}{G_0} \right)$  d'où [15] :

$$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + c \ln \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{II.7})$$

### 2.5. Modèle Kadir Bakirci

En 2009, le scientifique Kadir Bakirci a développé des modèles exponentiels linéaires, ce sont des dérivations du type angström. [16]

$$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + c \exp \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{II.8})$$

$$\frac{G}{G_0} = a \left( \frac{S}{S_0} \right)^b \quad (\text{II.9})$$

### 2.6. Modèle Elagib-Mansell

En 2000, Elagib et Mansell ont créé l'équation suivante pour prédire le rayonnement solaire en fonction de la durée d'ensoleillement [17]:

$$\frac{G}{G_0} = a \exp \left( b \frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{II.10})$$

N°	Modèles	sources	date	Réf	Equation
1	Linéaire	Angstrom- Prescott	1924 1940	[10]	$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right)$
2	Quadratique	Ogleman	1984	[13]	$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + c \left( \frac{S}{S_0} \right)^2$
3	Cubique	Bahel	1987	[14]	$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + c + d \left( \frac{S}{S_0} \right)^3$
4	Logarithmique	New land	1988	[15]	$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + c \ln \left( \frac{S}{S_0} \right)$
5	Puissance	Bakirci Kadir	2009	[16]	$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + c \exp \left( \frac{S}{S_0} \right)$ $\frac{G}{G_0} = a \left( \frac{S}{S_0} \right)^b$
6	Exponentiel	Elagib- Mansell	2000	[17]	$\frac{G}{G_0} = a \exp \left( b \frac{S}{S_0} \right)$

Tableau III: Modèles basés sur la durée d'ensoleillement.

	Modèles	a	b	c	d	R	RMSE	MBE	MAE
Ethiopia	Angstrom- Prescott	0.3580	0.3896	-	-	0.5187	0.2849	-0.0029	0.2629
	Ogleman	0.4659	- 0.2104	0.7587	-	0.5728	0.2684	-0.0010	0.2299
Nigeria	Bahel	0.16	0.87	-0.61	0.34	0.790	10.357	8.87	-
	Newland	- 0.1481	1.0549	- 0.5713	-	0.5839	0.2649	-6.5x10- 4	0.2258
Ethiopia	Bakirci	- 0.4318	- 0.9106	0.8719	-	0.5682	0.2698	- 6.32x10- 4	0.2333
	Kadir	0.6628	0.2676	-	-	0.4579	0.3023	0.0054	0.2781
	Elagib- Mansell	0.3784	0.7516	-	-	0.5360	0.2797	0.0060	0.2558

TableauII2 : Comparaison entre des modèles basés sur la durée d'ensoleillement.

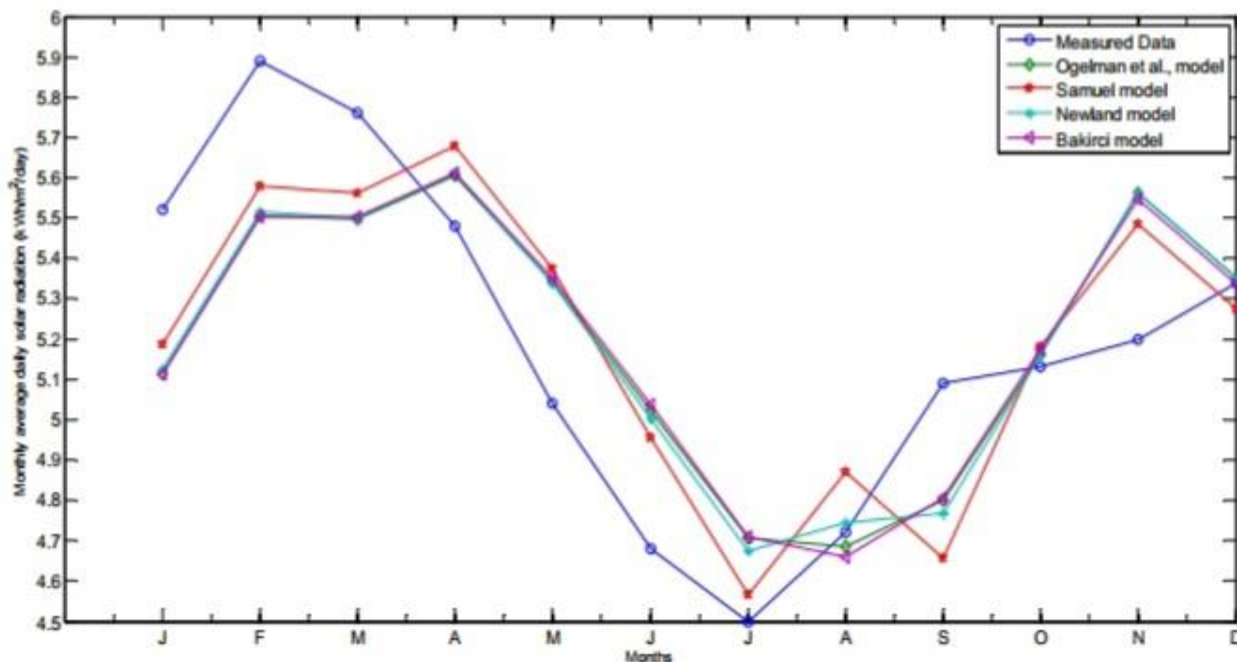


Figure II 1. Comparaison entre les valeurs de l'irradiation solaire globale moyenne mensuelle mesurées et celles estimées.

### 3. Modèles basés sur la température

La disponibilité des valeurs des températures maximales et minimales de l'air à encourager les chercheurs pour développer des modèles d'estimation de rayonnement solaire globale en fonction de la température. Ils ont été observé que la nébulosité, l'humidité relative, l'altitude, la topographie, la latitude, la proximité d'une grande masse d'eau autre que le rayonnement solaire influencent la différence de température [18].

#### 3.1. Modèle linéaire

##### 3.1.1. En fonction de la température maximale ( $T_{max}$ )

Dans ce groupe, l'indice de clarté ou le rayonnement solaire global est corrélé à la température maximale sous la forme [19]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{max}) \tag{II.11}$$

##### 3.1.2. En fonction de la température minimale ( $T_{min}$ )

Dans ce groupe, la clarté est liée à la température minimale ( $T_{min}$ ) sous la forme [19]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{min}) \tag{II.12}$$

##### 3.1.3. En fonction de la température moyenne ( $T_{moy}$ )

Dans ce groupe, l'indice de clarté ou le rayonnement solaire global est corrélé à la température moyenne sous la forme [19]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{moy}) \tag{II.13}$$

### 3.1.4. En fonction du rapport de température ( $T_R$ )

Dans cette classe, l'indice de clarté ou le rayonnement solaire global est corrélé au rapport de température sous la forme [19]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b(T_R) \quad (\text{II.14})$$

## 3.2. Modèle quadratique

### 3.2.1. En fonction de la température maximale ( $T_{\max}$ )

Dans ce groupe, l'indice de clarté ou le rayonnement solaire global est corrélé au second ordre de température maximale sous la forme [19]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{\max}) + c(T_{\max})^2 \quad (\text{II.15})$$

### 3.2.2. En fonction de la température minimale ( $T_{\min}$ )

Dans ce groupe, la clarté est liée au second ordre de température minimale ( $T_{\min}$ ) sous la forme [19]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{\min}) + c(T_{\min})^2 \quad (\text{II.16})$$

### 3.2.3. En fonction de la température moyenne ( $T_{\text{moy}}$ )

Dans ce groupe, l'indice de clarté ou le rayonnement solaire global est corrélé au second ordre de température moyenne sous la forme [19]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{\text{moy}}) + c(T_{\text{moy}})^2 \quad (\text{II.17})$$

### 3.2.4. En fonction du rapport de température ( $T_R$ )

Dans cette classe, l'indice de clarté ou le rayonnement solaire global est corrélé au deuxième ordre du rapport de température ( $T_R$ ) sous la forme [19]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b(T_R) + c(T_R)^2 \quad (\text{II.18})$$

## 3.3. Modèle Hargreaves et Allen

Dans ce groupe, l'indice de clarté est corrélé à la différence entre la température maximale et minimale ( $\Delta T$ ) en utilisant le modèle de Hargreaves et Allen (2003) sous la forme [20]:

$$\frac{G}{G_0} = a(\Delta T)^{0.5} \quad (\text{II.19})$$

## 3.4. Modèle Hargreaves

Hargreaves et Samani en 1982 ont recommandé une simple équation pour estimer le rayonnement Solaire en utilisant les températures maximale et minimale [20]:

$$\frac{G}{G_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (\text{II.20})$$

## 3.5. Modèle Annandale et al

En 2002, Annandale et al. ont proposé la corrélation suivante [21]:

$$\frac{G}{G_0} = a(1 + 2.7 \times 10^{-5} Z)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (\text{II.21})$$

### 3.6. Modèle de Bristow et Campbell

En 1984, Bristow et Campbell ont suggéré une relation basée sur la différence entre les températures maximales et minimales  $\Delta T$  comme suit [22]:

$$\frac{G}{G_0} = a(1 - \exp(-b \Delta T^c)) \quad (\text{II.22})$$

Bien que les coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  soient empiriques, ils ont une certaine signification physique. Les coefficients  $a$  et  $c$  représentent le rayonnement maximal auquel on peut s'attendre par temps clair. Les coefficients  $b$  et  $c$  contrôlent la vitesse à laquelle le coefficient  $a$  est approché lorsque la différence de température augmente.

### 3.7. Modèle Meza et Varas

En 2000, Meza et Varas ont supposé que les coefficients  $a$  et  $c$  du modèle de Bristow – Campbell sont fixes et seul le coefficient  $b$  a été ajusté pour minimiser les erreurs de carré, donc l'équation est [23] :

$$\frac{G}{G_0} = 0.75(1 - \exp(-b \Delta T^2)) \quad (\text{II.23})$$

### 3.8. Chen et coll

En 2004, Chen et coll ont développé les modèles suivants [24]:

$$\frac{G}{G_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + b \quad (\text{II.24})$$

$$\frac{G}{G_0} = a \ln(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + b \quad (\text{II.25})$$

### 3.9. Autres modèles

#### 3.9.1. Modèle basé sur la différence entre $T_{\max}$ et $T_{\min}$ [25]

$$\frac{G}{G_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + b + (T_{\max} - T_{\min}) \quad (\text{II.26})$$

#### 3.9.2. Modèle de Hargreaves et Samani

Dans cette classe, l'indice de clarté est corrélé à la différence de second ordre de la température ( $\Delta T$ ) [26].

$$\frac{G}{G_0} = a + b(\Delta T)^{0.5} + c((\Delta T)^{0.5})^2 \quad (\text{II.27})$$

#### 3.9.3. Modèle de Garcia

Dans ce groupe développé par Garcia (1994), l'indice de clarté est corrélé avec le rapport entre la différence des températures maximales et minimales ( $\Delta T$ ) et la durée du jour sous la forme:

$$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right) \quad (\text{II.28})$$

**3.9.4. Modèle de Garcia 2<sup>ème</sup> ordre**

Dans ce groupe, l'indice de clarté est corrélé avec le rapport entre la différence des températures maximales et minimales ( $\Delta T$ ) et la durée du jour avec une équation quadratique sous la forme:

$$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right) + c \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right)^2 \quad (\text{II.29})$$

**3.9.5. Modèle de Garcia 3<sup>ème</sup> ordre**

Dans ce groupe, l'indice de clarté est corrélé avec le rapport entre la différence des températures maximales et minimales ( $\Delta T$ ) et la durée du jour avec une équation cubique sous la forme[27]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right) + c \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right)^2 + d \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right)^3 \quad (\text{II.30})$$

**3.9.6 Modèle exponentielle de Garcia**

Dans ce groupe, l'indice de clarté est corrélé avec le rapport entre la différence des températures maximales et minimales ( $\Delta T$ ) et la durée du jour avec une équation exponentielle, sous la forme [27]:

$$\frac{G}{G_0} = a + e^{\left( \frac{\Delta T}{S_0} \right)^b} \quad (\text{II.31})$$

**3.9.7. Modèle logarithmique de Garcia**

Dans ce groupe, l'indice de clarté est corrélé avec le rapport entre la différence des températures maximales et minimales ( $\Delta T$ ) et la durée du jour avec une équation logarithmique, sous la forme [27]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b \log \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right) \quad (\text{II.32})$$

**3.9.8. Modèle température maximum rapport**

Dans ce groupe, l'indice de clarté est corrélé avec ( $T_R$ ) et ( $T_{\max}$ ) sous la forme [19]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b(T_R) + (T_{\max}) \quad (\text{II.33})$$

**3.9.9. Modèle Chandel et al**

Dans ce groupe qui a été développé en 2005, Chandel et al. ont modifié le modèle de Hargreaves-Samani comme suit[19] :

$$\frac{G}{G_0} = a + b \ln(\Delta T) \quad (\text{II.34})$$

N	Modèles	Sources	Dat	Réf	Equation
1	Linéaire	$T_{\max}$		[19]	$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{\max})$
2	Quadratique	$T_{\max}$ 2 <sup>ème</sup> ordre		[19]	$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{\max}) + c(T_{\max})^2$
3	Linéaire	$T_{\text{moy}}$		[19]	$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{\text{moy}})$
4	Quadratique	$T_{\text{moy}}$ 2 <sup>ème</sup> ordre		[19]	$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{\text{moy}}) + c(T_{\text{moy}})^2$
5	Linéaire	$T_R$		[19]	$\frac{G}{G_0} = a + b(T_R)$
6	Quadratique	$T_R$ 2 <sup>ème</sup> ordre		[19]	$\frac{G}{G_0} = a + b(T_R) + c(T_R)^2$
7	Linéaire	$T_{\min}$		[19]	$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{\min})$
8	Quadratique	$T_{\min}$ 2 <sup>ème</sup> ordre		[19]	$\frac{G}{G_0} = a + b(T_{\min}) + c(T_{\min})^2$
9	Linéaire	Hargreaves et Allen	2003	[20]	$\frac{G}{G_0} = a(\Delta T)^{0.5}$
10	Linéaire	Hargreaves et Samani	1982	[20]	$\frac{G}{G_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$
11	Linéaire	Annandale et al	2002	[21]	$\frac{G}{G_0} = a(1 + 2.7 \times 10^{-5} Z)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$
12	Exponentiel	Bristow et Campbell	1984	[22]	$\frac{G}{G_0} = a(1 - \exp(-b \Delta T^c))$
13	Exponentiel	Meza et Varas	2000	[23]	$\frac{G}{G_0} = 0.75(1 - \exp(-b \Delta T^2))$
14	Linéaire Logarithmique	Chen et coll.	2004	[24]	$\frac{G}{G_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + b$ $\frac{G}{G_0} = a \ln(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + b$

15	Linéaire	Proposés		[25]	$\frac{G}{G_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + b + (T_{\max} - T_{\min})$
16	Quadratique	Hargreaves et Samani	1982	[26]	$\frac{G}{G_0} = a + b(\Delta T)^{0.5} + c((\Delta T)^{0.5})^2$
17	Linéaire	Garcia	1994	[27]	$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right)$
18	Quadratique	Garcia	1994	[27]	$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right) + c \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right)^2$
19	Cubique	Garcia	1994	[27]	$\frac{G}{G_0} = a + b \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right) + c \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right)^2 + d \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right)^3$
20	Exponential	Garcia	1994	[27]	$\frac{G}{G_0} = a + e^{\left( \frac{\Delta T}{S_0} \right)^b}$
21	Logarithmique	Garcia	1994	[27]	$\frac{G}{G_0} = a + b \log \left( \frac{\Delta T}{S_0} \right)$
22	Linéaire	$T_R$ et $T_{\max}$		[19]	$\frac{G}{G_0} = a + b(T_R) + (T_{\max})$
23	Logarithmique	Chandel et al	2003	[19]	$\frac{G}{G_0} = a + b \ln(\Delta T)$

Tableau II3: Modèles basés sur les températures.

#### 4. Evaluation des modèles

Les précisions des modèles ont été testés par le calcul de l'erreur de biais moyenne (MBE) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) :

$$MBE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m e_i \quad (II.35)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m e_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (II.36)$$

m: est le nombre des mesures, et le pourcentage d'erreur relatif est défini comme suit:

$$e_i = (Y_{\text{mes}} - Y_{\text{cal}}) \times \frac{100}{Y_{\text{mes}}} \quad (II.37)$$

$Y_{\text{cal}}$  et  $Y_{\text{mes}}$  sont les  $n^{\text{ièmes}}$  valeurs calculées et mesurées du rayonnement solaire global.

Le tableau suivant présente l'évaluation des modèles cités précédemment pour les pays de Nigeria et Éthiopie [28][29].

	Modele	A	b	c	d	RMSE	MBE
Nigeria	$T_{max}$	-8.7	0.8	-	-		
	$T_{max} 2^{ème} \text{ ordre}$	-3.386	0.220	-0.003	-		
	$T_{moy}$	- 0.9787	0.05722	-	-		
	$T_{moy} 2^{ème} \text{ ordre}$	- 8.4341	0.6383	-0.0115	-		
	$T_R$	1.7217	-1.691	-	-		
	$T_R 2^{ème} \text{ ordre}$	-0.987	5.256	-4.536	-		
	$T_{min}$	0.625	-0.007	-	-		
	$T_{min} 2^{ème} \text{ ordre}$	5.689	-0.453	0.0310	-		
	Hargreaves et Allen	0.1945	-	-	-		
Ethiopie	Hargreaves et Samani	0.1958	-	-	-	0.2003	-0.0108
	Annandale et al	0.1908	-	-	-	0.2000	-0.0108
	Bristow and Campbell	0.70	0.0120	2.4	-	0.2814	0.0951
	Meza and Varas	0.75	0.0240	2	-	0.3252	0.0024
	Chen et al	-0.135	0.2468	-	-	0.1728	-0.0068

Nigeria		0.3334	-0.1298	-	-	0.1723	6.81x10 <sup>-4</sup>
	Hargreaves et Samani	-2.041	1.4341	-0.2094	-		
	Garcia	0.188	0.362		-		
	Garcia	0.052	0.67	-0.27	-		
	Garcia	-0.086	1.20	-0.95	0.25		
	Garcia	0.24	0.064	-	-		
	Garcia	0.45	0.39	-	-		
	T <sub>R</sub> et T <sub>max</sub>	-1.256	0.3815	0.05440	-		
	Chandel et al	-0.155	0.264	-	-		

Tableau II4: Evaluation des modèles basés sur les températures pour Nigeria et Ethiopia.

**Chapitre III:**  
**Modèles basés sur la**  
**température**  
**pour le site de M'sila**

## 1. Introduction

La connaissance précise de la distribution de l'irradiation solaire sur un site géographique particulier est d'une grande importance pour le développement des installations solaires (thermiques ou photovoltaïques), ainsi qu'à l'évaluation de leurs performances.

Le manque des moyens de mesure de l'irradiation solaire global dans tous les endroits a obligé les chercheurs, les ingénieurs, les concepteurs des systèmes solaires à utiliser des corrélations ou des relations empiriques basées sur des données météorologiques disponibles tel que la température ambiante pour estimer l'irradiation solaire global. Pour cela, on a essayé de proposer des modèles basés sur la température ambiante pour la région de M'sila dans ce chapitre.

## 2. Situation géographique de M'sila

La wilaya de M'sila est située à l'est de l'Algérie, dont l'altitude est de  $35^{\circ}42'7''N$ , longitude est de  $4^{\circ}3'48''E$ , l'altitude est de 442m et l'albédo est 0,2. Elle a une superficie de  $18175 \text{ km}^2$ , limitée par la wilaya de Médéa, Bouira, Bordj-Bou-Argeridj et Sétif au nord, Batna à l'est, Djelfa à l'ouest et Biskra au sud[30].



Figure III.1 Situation géographique de M'sila.

## 3. Méthodologie du travail

Les mesures de l'irradiation solaire globale et la température ambiante que nous utiliserons dans le cadre de notre étude, proviennent de la station météorologique de M'sila (latitude  $35^{\circ}40'N$ , longitude  $4^{\circ}30'E$ ), effectuées durant la période, d'octobre 2015 jusqu'à mars 2016, plus le mois de juin 2016. Les mesures ont été effectuées avec une station météorologique de marque Vantage Pro2 Plus, des laboratoires DAVIS. Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire globale et la température ambiante ont été obtenues avec EXCEL. Un programme en FORTRAN a été élaboré afin de calculer l'irradiation solaire globale moyenne

mensuelle hors atmosphère sur un plan horizontal. Les courbes qui illustrent la variation de  $(G/G_0)$  en fonction de  $(T)$  pour chaque modèle ont été tracées avec le logiciel ORIGIN.

#### 4. Appareil de mesure

La station météo complète (figure III.1) de Davis Instruments est l'appareil utilisé dans cette étude, dont la liaison entre les capteurs extérieurs (ISS) et la console se fait par ondes radio sur la fréquence 868.0 – 868.6 MHz avec une portée de 300 mètres au maximum. La console est équipée d'un large écran LCD rétro-éclairé, elle peut être fixée contre un mur ou posée sur une table ou une étagère. La console permet de visualiser les conditions météo en temps réel, les extrêmes (maxi et mini), les graphiques correspondant aux différentes variables. Il est également possible de régler des alarmes et de connecter la console sur un ordinateur (avec l'interface WeatherLink non fournie).



Figure III.2 Station météorologique de type Davis.

L'ISS est très robuste et peut être installée sur un mât (tube) ou sur un poteau en bois. Une double sonde pour mesurer la température et l'humidité extérieure est placée dans un abris anti radiations (solaires) normalisé. Le pluviomètre est équipé d'un système à 2 augets basculants pour mesurer les précipitations. L'anémomètre - girouette peut être désolidarisé de l'ISS pour être installé sur un toit par exemple grâce à son câble de 12 mètres.[31]

Cette station permet de mesurer :

- La température intérieure - Résolution 0,1°C.
- La température extérieure - Résolution 0,1°C.
- L'humidité intérieure - Resolution: 1%.
- L'humidité extérieure - Resolution: 1%.
- La pression atmosphérique - Résolution: 0,1 h Pa.
- L'indice de chaleur - Résolution 1°C.

- Le point de rosée - Résolution 1°C.
- Les précipitations - Résolution 0,2 mm.
- La température ressentie - Résolution 1°C.
- La vitesse du vent de 3 à 241 km/h - Résolution 1 km/h.
- La direction du vent - Résolution 1°.

Un kit classique pour la station, permet d'exploiter très finement les données collectées par les stations météo Vantage Pro2. Ce kit comprend un enregistreur de données (datalogger) qui fonctionne en mode connecté à un PC, et un logiciel d'exploitation Weather-Link. Il est possible de consulter en temps réel les données climatiques ou en mode non connecté [18] L'enregistreur collecte les données à un intervalle de 5 minutes.

### 5. Application de quelques modèles basés sur la température pour le site de M'sila

On a choisis trois modèles (linéaire, quadratique et cubique) basé sur la température, qui sont largement utilisées pour l'estimation de l'irradiation solaire globale mensuelle. Les températures utilisées dans cette étude sont :  $T_{max}, T_{min}, T_{moy}, T_R (T_R = T_{min} / T_{max}), (T_{max} - T_{min})$ .

#### 5.1. Modèles en fonction de $T_{moy}$

##### • Modèle linéaire

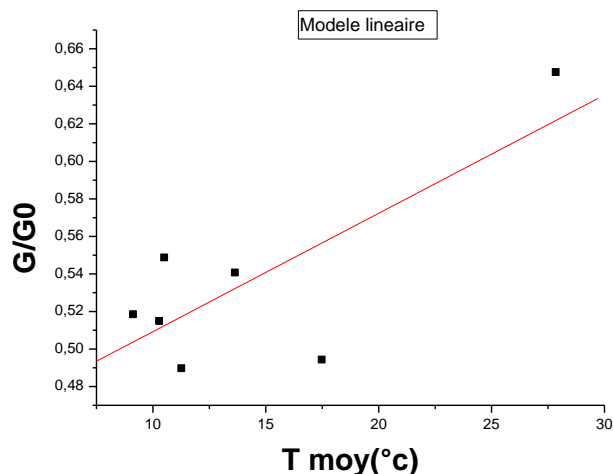
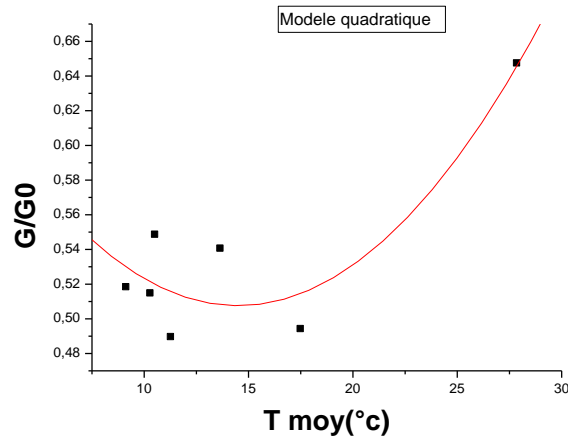


Figure III.3 Modèle linéaire en fonction de  $T_{moy}$

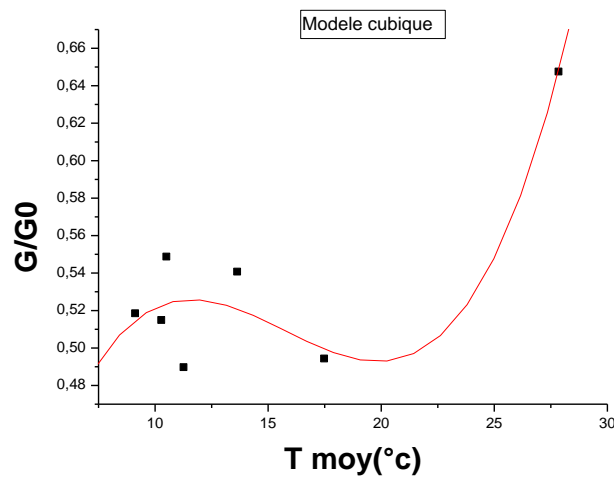
$$\frac{G}{G_0} = 0,44623 + 0,00631(T_{moy}) \quad (III.1)$$

- **Modèle quadratique**

Figure III.4 Modèle quadratique en fonction de  $T_{moy}$ 

$$\frac{G}{G_0} = 0,67016 - 0,02243(T_{moy}) + 7,73694E - 4(T_{moy})^2 \quad (III.2)$$

- **Modèle cubique**

Figure III.5 Modèle cubique en fonction de  $T_{moy}$ 

$$\frac{G}{G_0} = 0,14006 + 0,08246(T_{moy}) + -0,00562(T_{moy})^2 + 1,19107E - 4 \quad (III.3)$$

## 5.2. Modèles en fonction de $T_{\max}$

### • Modèle linéaire

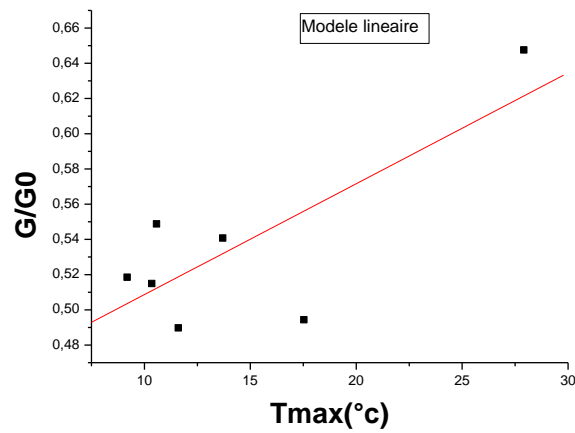


Figure III.6 Modèle linéaire en fonction de  $T_{\max}$

$$\frac{G}{G_0} = 0,44566 + 0,0063(T_{\max}) \quad (\text{III.4})$$

### • Modèle quadratique

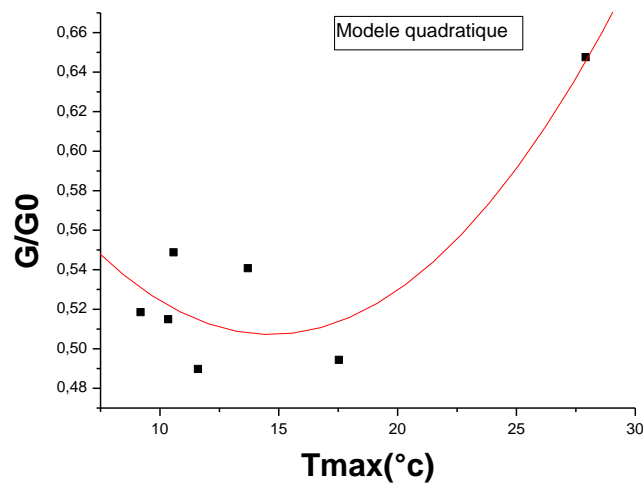


Figure III.7 Modèle quadratique en fonction de  $T_{\max}$

$$\frac{G}{G_0} = 0,67654 - 0,02309(T_{\max}) + 7,8731E - 4(T_{\max})^2 \quad (\text{III.5})$$

• **Modèle cubique**

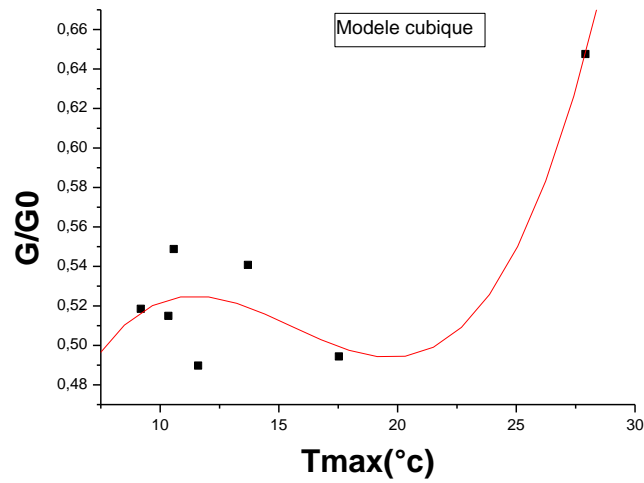


Figure III.8 Modèle cubique en fonction de  $T_{max}$

$$\frac{G}{G_0} = 0,18063 + 0,07465(T_{max}) + -0,00512(T_{max})^2 + 1,10395E - 4(T_{max})^3 \quad (III.6)$$

**5.3. Modèles en fonction de  $T_{min}$**

• **Modèle linéaire**

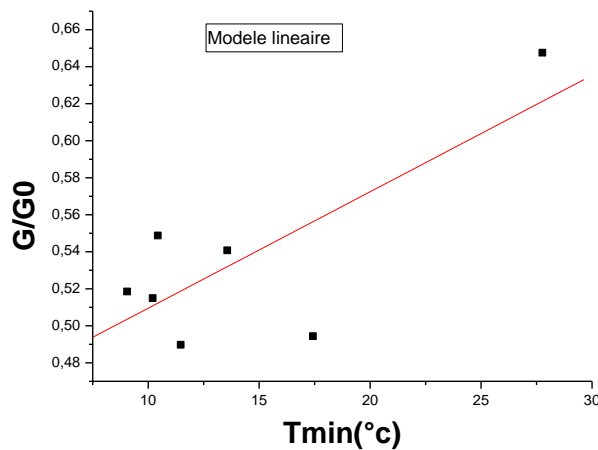
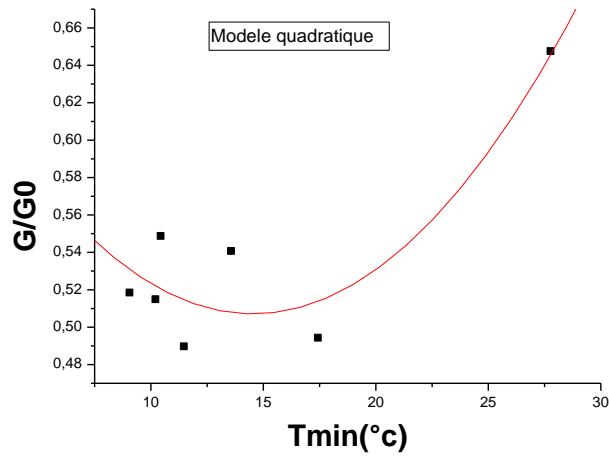


Figure III.9 Modèle quadratique en fonction de  $T_{min}$

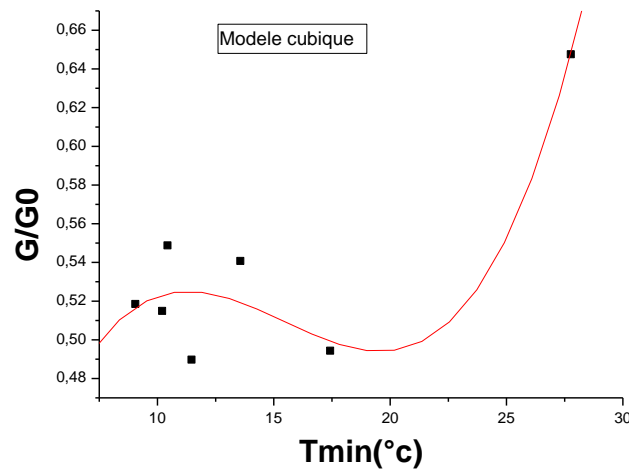
$$\frac{G}{G_0} = 0,4466 + 0,4466(T_{min}) \quad (III.7)$$

- **Modèle quadratique**

Figure III.10 Modèle quadratique en fonction de  $T_{\min}$ 

$$\frac{G}{G_0} = 0,67408 \pm 0,02297(T_{\min}) + 7,90156E - 4(T_{\min})^2 \quad (\text{III.8})$$

- **Modèle cubique**

Figure III.11 Modèle quadratique en fonction de  $T_{\min}$ 

$$\frac{G}{G_0} = 0,18962 + 0,07345(T_{\min}) - 0,00512(T_{\min})^2 + 1,1066E - 4(T_{\min})^3 \quad (\text{III.9})$$

5.4. Modèles en fonction de (Tmax – Tmin)

• Modèle linéaire

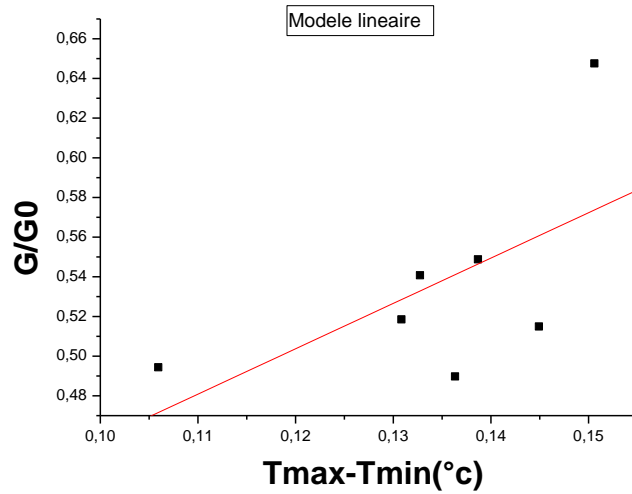


Figure III .12Modèle quadratique en fonction de Tmax – Tmin

$$\frac{G}{G_0} = 0,22934 + 2,28642(T_{max} - T_{min}) \tag{III.10}$$

• Modèle quadratique

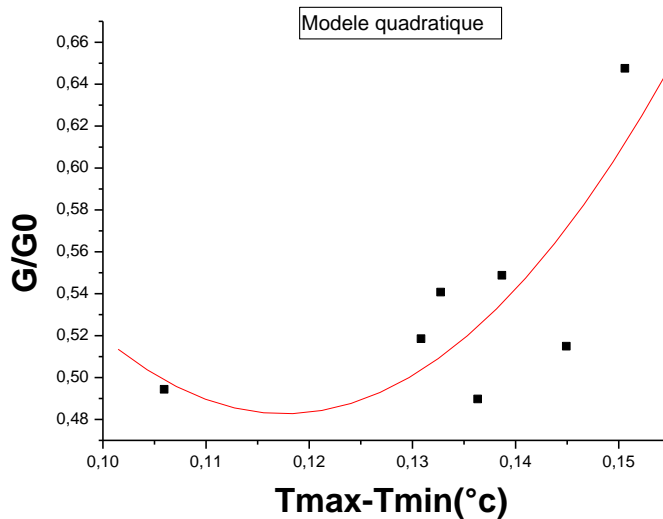


Figure III .13 Modèle quadratique en fonction de Tmax – Tmin

$$\frac{G}{G_0} = 2,12184 - 27,87667(T_{max} - T_{min}) + c(T_{max} - T_{min})^2 \tag{III.11}$$

• **Modèle cubique**

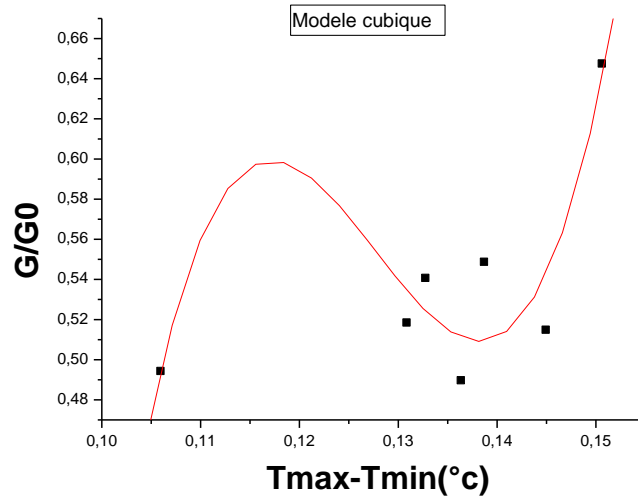


Figure III.14 Modèle quadratique en fonction de Tmax – Tmin

$$\frac{G}{G_0} = -38,93419 + 940,37254(T_{max} - T_{min}) - 7413,02514(T_{max} - T_{min})^2 + 19347,10833(T_{max} - T_{min})^3 \quad (III.12)$$

**5.5. Modèles en fonction de TR**

• **Modèle linéaire**

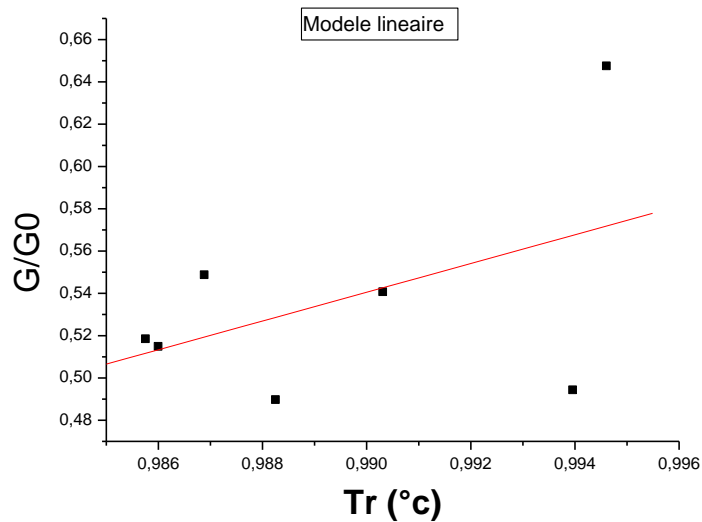
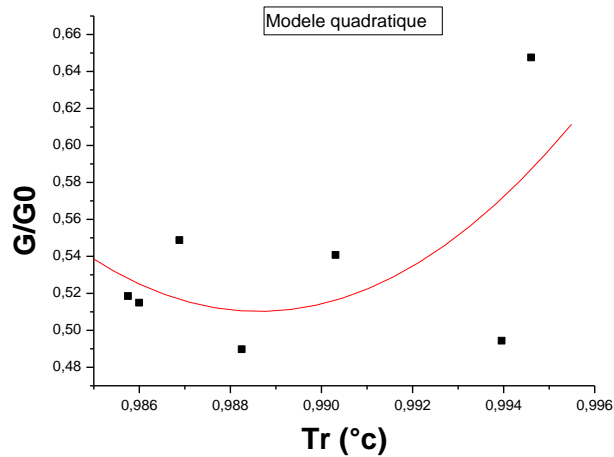


Figure III.15 Modèle quadratique en fonction de TR

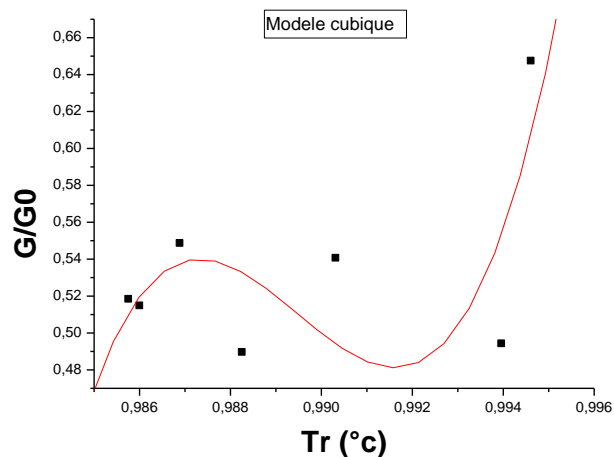
$$\frac{G}{G_0} = -6,18838 + 6,79688(T_R) \quad (III.13)$$

- **Modèle quadratique**

Figure III.16 Modèle quadratique en fonction de  $T_R$ 

$$\frac{G}{G_0} = 2101,0831 - 4249,47349(T_R) + 2149,17854(T_R)^2 \quad (\text{III.14})$$

- **Modèle cubique**

Figure III.17 Modèle quadratique en fonction de  $T_R$ 

$$\frac{G}{G_0} = -1,44148E6 + 4,3705E6(T_R) - 4,41703E6(T_R)^2 + 1,48802E6(T_R)^3 \quad (\text{III.15})$$

## 6. Evaluation des modèles

D'après la littérature l'évaluation des modèles empiriques est basé sur le calcul des paramètres statistiques suivants : R (coefficient de détermination), RMSE (Root Mean Square Error), MBE (Mean Bias Error),

---

MABE (Mean Absolute Bias Error), MPE (Mean Percentage error) et MAPE (Erreur de pourcentage absolu moyen). Un modèle est plus efficace lorsque R est plus proche de 1 (un). Le RMSE renseigne sur les performances à court terme des corrélations en permettant une comparaison terme à terme de l'écart entre les valeurs calculées et mesurées. Les valeurs du MBE représentent l'erreur systématique ou le biais, une valeur positive de MBE montre une surestimation tandis qu'une valeur négative une sous-estimation par le modèle. Le MABE donne la valeur absolue de l'erreur de biais et c'est une mesure de la qualité de la corrélation. Le MPE est une mesure globale du biais de prévision, calculé à partir des différences réelles entre une série de prévisions et le point de données réel observé ; chaque différence est exprimée en pourcentage de chaque point de données observé, puis additionnée et moyennée. Le MAPE est une mesure globale de l'exactitude des prévisions, calculée à partir des différences absolues entre une série de prévisions et les données réelles observées. L'inconvénient associé à MBE et MPE est que des erreurs de signes différents peuvent s'annuler. Plus la valeur est petite, les performances du modèle sont meilleures, mais quelques valeurs dans la somme peuvent produire une augmentation significative du paramètre. Le MBE et le MPE offrant des informations concernant la surestimation ou la sous-estimation des données estimées ; de faibles valeurs de ces erreurs moyennes sont souhaitables, bien qu'il faille noter que la surestimation d'un élément de données individuel annulera la sous-estimation dans une observation distincte [32]. Dans cette étude, on a confiné sur les paramètres R, RMSE, MBE. Les valeurs obtenues de ces paramètres sont présentés dans le tableau suivant :

Modèle		R	MBE	RMSE
<b>Linéaire</b>	Tmoy	0,77485	-0,3464576	0,916640648
	Tmax	0,77177	-0,3422952	0,90562805
	Tmin	0,7707	-1150,6785	4634213,81
	Tmax – Tmin	0,6081	-0,4784405	0,80116864
	$T_R$	0,46645	-0,6209637	1,34958566
<b>quadratique</b>	Tmoy	0,81753	-0,169105845	0,44741201
	Tmax	0,82174	-0,17	0,09583116
	Tmin	0,82141	-0,16547	0,09583116
	Tmax – Tmin	0,5936	95,49577214	31918,0487
	$T_R$	0,31487	95,47403637	31918,0487
<b>Cubique</b>	Tmoy	0,86046	-0,266722759	0,24899361
	Tmax	0,86011	0,00590692	0,00012212
	Tmin	0,86014	-0,2925632	0,29957622
	Tmax – Tmin	0,80478	95,49773851	31919,3632
	$T_R$	0,45974	30,13599526	3178,623

Tableau III.1 Evaluation des modèles.

L'analyse des valeurs du tableau III.1, permis de remarque que les valeurs de MBE sont faibles pour le modèle linéaire, à l'opposé de celles obtenues à partir des modèles quadratique et cubique, qui sont beaucoup plus grandes surtout pour les températures  $T_R$  et  $(T_{\max} - T_{\min})$ .

Il en est de même, pour les valeurs de RMSE, également faibles pour le modèle linéaire, et élevées pour les modèles quadratique et cubique surtout pour les températures  $T_R$  et  $(T_{\max} - T_{\min})$ .

A la lumière de ces résultats, nous pouvons avancer que pour le site de Msila le modèle linéaire donne de meilleurs résultats, comparativement aux deux autres modèles.

## Conclusion générale

En l'absence de données sur le rayonnement solaire global, des estimations fiables peuvent être faites à partir des données météorologiques facilement disponibles, telle que la température. Plusieurs modèles empiriques basés sur la température ont été proposés par les chercheurs pour estimer le rayonnement solaire global sur une surface horizontale.

Dans cette étude, on a utilisé trois modèles pour prédire le rayonnement solaire global sur la base d'un ensemble de données météorologiques de site de M'sila .Puis, on a sélectionné le modèle approprié. Les modèles sont été comparés sur la base des calculs statistiques.

On a testé et évalués les trois modèles choisis à l'aide des données météorologiques quotidiennes de la température pendant la période d'octobre 2015 jusqu'au juin 2016. D'après les résultats obtenus, on peut avancer que le modèle linéaire est le plus adéquat et approprié par rapport au modèle quadratique et cubique. Egalement, on a constaté qu'il y a une concordance entre les valeurs estimées et celles mesurées par la station météorologique de M'sila.

## REFERENCES

- [1] <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/parametres-observees/temperature>
- [2] Annales de l'I. H. P., section A, tome 8, 1968.  
[http://www.numdam.org/item?id=AIHPA\\_1968\\_\\_8\\_1\\_1\\_0](http://www.numdam.org/item?id=AIHPA_1968__8_1_1_0)
- [3] <http://repository.sustech.edu/handle/123456789/9318>
- [4] <https://blog.beamex.com/fr/les-unites-de-temperature-et-leur-conversion>
- [5] <https://blog.beamex.com/fr/les-unites-de-temperature-et-leur-conversion>, consulté le: 20/06/2021
- [6] <https://blog.beamex.com/fr/les-unites-de-temperature-et-leur-conversion>
- [7] Techniques de l'ingénieur, Mesure de température : généralités, échelles de température et étalonnage, Réf. Internet: 42542 | 4<sup>e</sup> édition, consulté: 20/06/2021
- [8] HAL Id: jpa-00213854, <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00213854>, 1970.
- [9] A. Angstrom, Solar terrestrial radiation, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 50, pp. 121–126, 1924.
- [10] J. A. Prescott, Evaporation from water surface in relation to solar radiation, Transactions of The Royal Society of South Australia, Vol. 40, pp. 114–118, 1940.
- [11] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processing, John Wiley & Sons, Madison, Wis, USA, 2<sup>nd</sup> edition, 1991.
- [12] M. Yorukoglu, A.N. Celik, A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration, Energy Conversion and Management, Vol.47, pp. 2441-2450, 2006.
- [13] H. Ogelman, A. Ecevit, E. Tasdemiroglu. A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data, Solar Energy, Vol.33, pp. 619–25, 1984.
- [14] V. Bahel, H. Bakhish, R. Srinivasan, A correlation for estimation of global solar radiation, Solar Energy, pp.131–135, 1987.
- [15] F.J. Newland, A study of solar radiation models for the coastal region of South China, Solar Energy, Vol.31, pp.227–35, 1988.
- [16] K. Bakirci, Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey, Energy, Vol.34, pp. 485–501, 2009.
- [17] N. Elagib, M. Mansell, New approaches for estimating global solar radiation across Sudan, Energy Conversion and Management, Vol.41, pp. 419–34, 2000.
- [18] Haddad Zakaria, Contribution à l'étude de nouvelles technologies, thèse de doctorat, université des frères Mentouri Constantine 1, 2020.
- [19] S.C. Nowkolo, J.C. Ogbulezie, A quantitative review and classification of empirical models for predicting global solar radiation in West Africa. Beni-Suef Univ, J. Basic Appl, Sci, 2017.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.05.001>

- [20] G.H. Hargreaves, Z.A. Samani, Estimating potential evapo-transpiration, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol.108, pp. 223–30, 1982.
- [21] J.G. Annandale, N.Z. Jovanic, N. Benade, R.G. Allen, Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapo-transpiration, *Irrigation Science*, Vol.21, pp. 57-67, 2002.
- [22] K. L. Bristow, G. S. Campbell, On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature, *Agric Forest Meteorology*, Vol.31, pp. 59– 166, 1984.
- [23] F. Meza, E. Varas, Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.100, pp. 231–241, 2000.
- [24] R. Chen, K. Ersi, J. Yang, S. Lu, W. Zhao, Validation of five global radiation models with measured daily data in China, *Energy Conversion and Management*, Vol.45, pp. 1759–69, 2004.
- [25] <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.
- [26] G.H. Hargreaves, Z.A. Samani, Estimating potential evaporation, *J. Drain, Eng.* Vol.108, pp.223–23, 1982.
- [27] J.V. Garcia, *Principios físicos de la Climatología*, Ediciones, UNALM, 1994.
- [28] M. Capderou, *Atlas solaire de l'Algérie*, Office des publications universitaires, T1-3, 1988.
- [29] Zekai Sen, Simple nonlinear solar irradiation estimation model, *Renewable energy*, Vol.32, pp.342–350, 2007.
- [30] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya\\_de\\_M'Sila](https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_M'Sila)
- [31] Davis instruments [www.davisnet.com](http://www.davisnet.com)
- [32] <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ijees>

## Résumé

Pour bien exploiter l'énergie solaire, il faut savoir estimer la quantité de rayonnement solaire dans une région du globe. Pour cette raison, les chercheurs ont essayés de trouver et développer des modèles empiriques qui dépendent de différents variables météorologiques.

Dans cette étude, on a avons discuté trois modèles basés sur la température, qui sont les modèles linéaire, quadratique et cubique en utilisant la température moyenne ( $T_{moy}$ ), minimale ( $T_{min}$ ), maximale ( $T_{max}$ ), la différence ( $\Delta T$ ) et la température relative ( $T_R$ ) et l'adéquation de ces modèles afin d'estimer l'irradiation solaire pour le site de M'sila.

D'après les résultats obtenus on peut déduire que ces modèles sont appropriés à prédire l'irradiation solaire vu les valeurs du MBE et MRSE calculés.

**Mots clé :** température, irradiation solaire, modèle linière, modèle quadratique, modèle cubique

## Abstract

To harness solar energy, one must know how to estimate the amount of solar radiation in a region of the globe. For this reason, researchers have been trying to find and develop empirical models that depend on different meteorological variables.

In this study, we have discussed three models based on temperature, which are linear, quadratic and cubic models using mean ( $T_{moy}$ ), minimum ( $T_{min}$ ), maximum ( $T_{max}$ ), difference ( $\Delta T$ ) and temperature relative temperature ( $T_R$ ) and the suitability of these models in order to estimate solar irradiation for the M'sila site.

From the results obtained it can be deduced that these models are suitable for predicting solar irradiation given the calculated MBE and MRSE values.

**Keywords:** temperature, solar irradiation, linear model, quadratic model, cubic model.

## ملخص

إن استغلال الطاقة الشمسية يجب معرفة كيفية تقدير كمية الإشعاع الشمسي في منطقة ما من العالم، ولهذا السبب، كان الباحثون يحاولون إيجاد طرق وتطوير نماذج تجريبية تعتمد على متغيرات الطقس المختلفة.

في هذه الدراسة، ناقشنا ثلاثة نماذج تعتمد على درجة الحرارة، وهي النماذج الخطية و التريبيعية والمكعبة باستخدام المتوسط ( $T_{moy}$ )، والحد الأدنى ( $T_{min}$ )، والحد الأقصى ( $T_{max}$ )، والفرق ( $\Delta T$ ) ودرجة الحرارة النسبية ( $T_R$ ) ومدى ملائمة هذه النماذج لتقدير الإشعاع الشمسي لمنطقة المسيلة.

من النتائج التي تم الحصول عليها يمكن استنتاج أن هذه النماذج مناسبة للتنبؤ بالإشعاع الشمسي بالنظر إلى قيم MBE و MRSE المحسوبة.

**كلمات مفتاحية:** درجة الحرارة، الإشعاع الشمسي، النموذج الخطي، النموذج التريبيعي، النموذج التكعيبي.

