



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA



DOMAINE : Sciences et de la Technologie

FILIERE : Génie électrique



UNIVERSITÉ
DE BISKRA

Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en

Spécialité : les Energies Renouvelables

THEME

**Etude du rayonnement solaire global (Willaya
de Biskra) pour la gestion de la production
d'énergie photovoltaïque**

Préparé par :

-Soukeur Abdelmouniem

-Ouamen Youcef

Soutenu devant le jury composé de:

Mr. Arif A

Mr. Dhiabi F

Mr. Guettaf A

Université de Mohamed Khider–Biskra

Université de Mohamed Khider–Biskra

Université de Mohamed Khider–Biskra

Examinateur

Président

Examinateur

2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENT

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre
dieu "الله" ALLAH

de nos avoir donné la force et le courage.

Mes sincères et profonds remerciements
vont à Monsieur « Arif Ali » notre encadreur,
et l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de nous
encadrer.

Avec un intérêt constant et une grande compétence
ainsi pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à notre
travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements pour
mes parents, ma famille
et toute personne ayant participé de loin ou de près
pour l'aboutissement de ce
modeste travail.

Dédicaces

Merci mon professeur encadreur Arif Ali merci

mon professeur superviseur Fouad Chabane

Le plus grand merci A

Source de vie...Ma mère

Soutien de vie...mon père

Et Pour toute ma famille , mes frères et mes amis.

Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Nomenclature.....	III
List des figures	V
Résumé.....	1
Introduction général.....	2
Chapitre I : Généralité sur le gisement solaire	
- 1.Introduction	13
- 2. Le soleil	13
- 3. Durée d’insolation	13
- 4. Le gisement solaire	14
- 5. Le rayonnement solaire	14
- 5.1. Le rayonnement solaire au sol.....	15
- 5.2. Les types de rayonnement solaire reçus au sol.....	15
- 5.2.1. Le rayonnement direct.....	15
- 5.2.2. Le rayonnement diffus.....	15
- 5.2.3. Le rayonnement réfléchi ou l’albédo du sol.....	15
- 5.2.4. Le rayonnement global.....	15
- 5.3-Potentiel solaire en Algérie.....	16
- 6. Les coordonnées terrestres	17
- 6.1. La longitude	18
- 6.2. La latitude.....	18
- 6.3. L’altitude	18
- 6.4. Coordonnées géographiques de Biskra.....	19
- 7. Mouvement de la terre au tour du soleil	19
- 8. Position du soleil	20
- 8.1. Coordonnées équatoriales (horaires)	20
- 8.2. Coordonnées horizontales	21
- 9. Le temps solaire	22
- 9.1. Temps solaire varis (TSV)	22
- 9.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)	22
- 9.3. Temps universel (TU)	23

- 12. Conclusion.....	24
-----------------------	----

Chapitre II : Modèles d'estimation du rayonnement solaire global

1-Introduction.....	26
2-Modèle de Sayigh.....	26
3- Modèle d'Okundamiya.....	27
4- Modèle de Falayi.....	27
5- Modèle d'Al-Salaymeh.....	29
6- Modèle de Bensahal.....	30
7- Modèle de Chabane.....	31
8-conclusion.....	32

Chapitre III : Etude théorique et expérimentale

1- Introduction	34
1.1.Le vent.....	35
1.2.La température.....	36
1.3.Pression.....	36
1.4.Humidité relative.....	37
2. Ressources matérielles.....	37
2.1.Pyranometre.....	37
2.2. Hygromètre.....	37
2.3.Thermo-anémomètre.....	38
2.4.Thermomètre infrarouge.....	38
3. Ressources logicielles	39
4 – Etudes comparative des erreurs	47
4.1. Tests du chi carré (X2)	47
4.2. L'erreur quadratique moyenne (RMSE)	47
4.3. Somme des erreurs de carré (SSE)	48
4.4. Erreur relatif moyenne (ERM):	48
5- Conclusion.....	50

Chapitre IV : Résultats et discussions

1. Introduction.....	52
2. Région d'étude.....	52
3. Grandeurs utilisées dans l'application des six modèles.....	53
3.1.Le rayonnement solaire globale expérimental.....	53
3.2.Moyenne de l'humidité relative et de la température de l'air.....	54
3.3.Variation de la température ambiante en fonction de la vitesse de vent dans six mois (2020)	56
3.4.Variation de la pression en fonction de la vitesse de vent dans six mois (2020)....	58
3.5.Les Erreur du rayonnement solaire	59
4. Conclusion.....	62

Nomenclature

SYMBOLES

S_0	durée d'insolation théorique. (Durée astronomique du jour) (h)
ω_0	L'angle horaire à la couche de soleil.(°)
n_j	Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.
R_r	l'humidité relative (%)
S	durée d'insolation réel. (h)
φ	latitude du site exprimée en radians.
T_n :	étant respectivement, la moyenne mensuelle de la température de l'air normalisée l'humidité relative moyenne de l'air.
a_0	est l'amplitude
a_1	le centre
a_2	la largeur
T_{air}	est la température horaire de l'air (c°).
T_{min} et T_{max}	sont les températures minimale et maximale de l'air (° C).
I_0	est le solaire constant ($I_0 = 1367 \text{ W / m}^2$).
I	est le rayonnement solaire global (W / m^2).
P_0	est la pression atmosphérique ($P_0 = 101,235 \text{ kPa}$).
P	est la pression atmosphérique à l'emplacement étudié (kPa).
HR	est l'humidité relative (%).
T_0	constante de température = 273.
P_0	constante de pression = 10^5 Pa .
V_0	constante de vent = 25 m/s
H	angle d'élévation du soleil (radian)
N	Nombre de données sur le rayonnement solaire global ou nombre d'heures de la journée.
X_{mod}	le rayonnement solaire global de model proposé.

Xexp	le rayonnement solaire global mesuré.
TSV	Temps solaire vrai.(h)
TU	Temps universel.(h)
TSM	Temps solaire moyen.(h)

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1: Les types de rayonnement solaire reçus au sol.....	19
Figure I.2: Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien au mois de juillet.....	20
Figure I.3:Coordonnées terrestres.....	21
Figure I.4: schématisation des mouvements de la terre autour du sol.....	22

Chapitre II :

Figure II.1: Données mondiales quotidiennes sur le rayonnement solaire avec différentes suggestions modèles de prévision à Amman, en Jordanie, en fonction du temps (jour).....	32
Figure II.2 : Rayonnement solaire global quotidien moyen mesuré à Amman, en Jordanie, comparé à l'éclairement énergétique mensuel moyen simulé sur une surface horizontale.....	32
Figure II.3: l'éclairement mondial prédit en fonction de l'éclairement globale mesurée.....	34

Chapitre III :

Figure III.1:Carte de l'irradiation solaire de l'Algérie.....	40
FigureIII.2: Vitesse de vent correspondante.....	40
FigureIII.3: Température ambiante (station météorologie du Biskra)	41
Figure III.4:Pression et Humidité (le site de Biskra) [https://www.meteoblue.com].....	41
Figure III.5:Pyranomètre (Solarmètre).....	42
Figure III.6:Hygromètre testo 625	43
Figure III.7:Thermo-anémomètre.....	43
Figure III.8:thermomètre infrarouge	44

Chapitre IV :

Figure IV.1:Carte géographique de la zone d'étude.....	57
Figure IV.2:Evaluation de l'intensité du rayonnement solaire globale pour le la région de Biskra de 2020.....	58
Figure IV.3: Evaluation de l'intensité du rayonnement solaire globale mesurée et estimée par le modèle Sayigh pour le la région de Biskra de 2020.....	59
Figure IV.4:l'humidité relative en fonction de la température ambiante en janvier et février.	59
Figure IV.5:l'humidité relative en fonction de la température ambiante en mars et avril.	60
Figure IV.6:l'humidité relative en fonction de la température ambiante en mai et juin.	61
Figure IV.7:la température ambiante en fonction de la vitesse de vent (hiver).	61
Figure IV.8:la température ambiante en fonction de la vitesse de vent (Printemps).	62
Figure IV.9:la vitesse de vent en fonction de temps (hiver).	62
Figure IV.10:la vitesse de vent en fonction de temps (Printemps).	63
Figure IV.11: Evolution de la pression selon la vitesse de vent (hiver).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV.12:Evolution de la pression selon la vitesse de vent (Printemps).....	63
Figure IV.13:Variation de (RMSE) selon les six mois de (2020).....	63
Figure IV.14:Variation du coefficient de détermination (R2) selon les six mois de (2020)....	63
Figure IV.15:Variation de (SSE) selon les six mois de (2020).....	63
Figure IV.16:tests du chi carré (χ^2) selon les six mois de (2020).....	63

Résumé

Les données météorologiques et plus particulièrement solaires sont très utiles pour réaliser un site solaire car l'irradiation globale joue un rôle très important pour construire un site solaire dans n'importe quel lieu. Notre étude a été réalisée pour la wilaya de Biskra avec des données météorologiques de 2020.

Notre objectif dans ce travail est de trouver un modèle d'estimation de rayonnement solaire global de la wilaya de Biskra, ce dernier sera utilisé dans l'avenir.

Notre nouveau modèle de l'irradiation globale horizontale qui a été réalisé sous l'environnement ORIGIN 9 a donné des résultats très encourageants et prometteurs par rapport à la littérature existante.

Introduction générale

Introduction générale

Le soleil peut satisfaire tous nos besoins si nous apprenons à exploiter rationnellement l'énergie qu'il rayonne vers la terre. Il brille dans le ciel depuis presque 5 milliards d'années et les scientifiques ont calculé qu'il est à la moitié de son existence. Nous avons du mal à imaginer qu'au cours d'une année le soleil diffuse vers la terre quatre mille fois plus d'énergie que celle consommée par toute la population mondiale. Aujourd'hui il paraît insensé de ne pas en profiter car nous avons les moyens technologiques nécessaires. De plus il faut considérer que cette source d'énergie est gratuite, propre et inépuisable. Cette énergie pourrait par ailleurs nous libérer de notre dépendance aux énergies fossiles ou aux autres alternatives peu sûres ou polluantes.

L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés, elle est le pilier de l'économie moderne. Elle est l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine. Ses sources se sont diversifiées dans le but de satisfaire leurs besoins continus dans tous les secteurs économiques.

Le choix des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité. Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire (cellules photovoltaïques), etc.... Ce dernier est la source d'énergie la plus puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol peut atteindre 950 Watt/m^2 .

Le rayonnement solaire est une énergie durable à l'échelle humaine, elle est propre et gratuite et facilement convertible en une énergie utilisable par l'intermédiaire des cellules photovoltaïques et des capteurs et distillateurs thermiques.

L'énergie solaire occupe une des places les plus importantes parmi les diverses sources d'énergies possibles. Une connaissance précise de distribution de la radiation solaire à un endroit géographique donné est d'une importance majeure pour le développement des dispositifs d'énergie solaires et pour l'évaluation de leurs performances.

Malheureusement, pour beaucoup de pays en voie de développement les mesures des radiations solaires ne sont pas facilement disponibles. Donc, il est important d'élaborer des modèles d'estimation de la radiation solaire sur la base des données astronomiques et météorologiques.

Au cours des années, beaucoup de modèles ont été proposés pour prévoir la valeur du rayonnement solaire en utilisant plusieurs paramètres. Ces paramètres incluent la radiation solaire extraterrestre, la durée d'insolation, l'humidité relative, le maximum et le minimum de la température, le nombre de jours pluvieux, l'altitude, la latitude.

L'Algérie est un pays à grande insolation. Le nombre des heures d'insolation s'élève à presque 3300h/an. Le climat est très favorable pour l'exploitation de l'énergie solaire, mais la distribution de la radiation solaire n'est pas bien connue.

Le travail présenté dans cette mémoire a porté sur l'évaluation de rayonnement solaire global en Algérie (Willaya de Biskra) et l'estimation du rayonnement solaire global pour une utilisation photovoltaïques.

Dont on a divisé notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre englobe des notions générales sur le rayonnement solaire depuis sa source qui est le soleil, jusqu'au son arrivé au sol avec ces composantes directe et diffuse et global. Les différentes représentations graphiques de la variabilité spatiale et temporelle des différentes mesures du rayonnement ont été exposées aussi dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre est consacré au recueil des modèles les plus utilisés pour l'estimation du rayonnement solaire global horizontal à partir des différentes données météorologiques, et nous avons évoqué principalement les modèles qui utilisent la durée d'ensoleillement pour l'estimation de l'irradiation solaire horizontal avec une synthèse et critique des modèles qui sont appliqués .

Dans le troisième chapitre, nous présentons l'étude théorique et expérimentale

Le quatrième chapitre présente les résultats et discussion de notre nouveau modèle du rayonnement solaire.

Enfin on termine par une conclusion où les synthèses des travaux effectués ainsi que les principaux résultats sont mentionnés.

CHPITRE I
Généralité sur le Gisement
solaire

1. Introduction

Dans ce chapitre on parlera de certaines notions fondamentales sur notre étoile (le soleil), ses dimensions, ses couches, l'origine de l'énergie qu'elle rayonne, la nature de cette énergie et sa répartition à la limite extérieure de l'atmosphère terrestre, ainsi on verra l'histoire de formation de notre globe (la terre). Son atmosphère, sa composition, ses zones, son effet sur le rayonnement solaire et les phénomènes optiques qui en résultent ainsi que la distribution de ce rayonnement au sol.

2. Le soleil

Le soleil est une étoile autour de laquelle gravite la terre. Son énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5800K. La surface lumineuse habituellement visible, ou photosphère, est d'environ 100 km d'épaisseur. La chromosphère est la couche inférieure de l'atmosphère solaire, entre la photosphère et la couronne. Les taches solaires sont des taches sombres sur la surface de la photosphère qui correspondent à des zones plus froides, elles ont une très grande diversité de forme et d'étendue. Les observateurs comme Galilée, ont vu que les taches se déplaçaient au fil du temps, toujours dans le même sens, ainsi montrant la rotation du soleil. Le globe solaire limité par la photosphère à un rayon égal à 696000km, soit environ 109 fois le rayon équatorial de la terre. Sa densité moyenne n'est que de 1,41 de sorte que sa masse est seulement 333.000 fois celle de la terre, pour un volume 1300000 fois plus important. La distance moyenne de la terre au soleil est voisine de 150 millions de km. Le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour nous parvenir [1].

3. Duré d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible.

Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant.

Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement

astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil.

Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qui elle-même dépend de la période de l'année considérée

La durée d'insolation correspond à la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct reçu sur un plan normal dépasse un seuil fixé par convention à 120 W.m^{-2} . En absence permanente de nuages, la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour, qui s'appelle aussi théorique de jour. Elle est défini par [2,3] :

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_0$$

Avec :

S_0 : durée de jour (h).

ω_0 : L'angle horaire à la couche de soleil.

4. Le gisement solaire

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 [4].

5. Le rayonnement solaire

Les réactions nucléaires se produisent dans le noyau solaire, libérant une grande quantité d'énergie. Cette énergie se rend sur Terre à travers les ondes électromagnétiques: le rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'onde radio en plus de rayons cosmiques.

Le rayonnement solaire partiellement absorbé par la Terre, une partie du rayonnement émis parvient jusqu'à la Terre, où des ondes sont réfléchies par l'ionosphère et l'atmosphère (les ondes décimétriques et certains rayons ultraviolets), tandis que d'autres arrivent à la surface des nuages, des océans ou des continents.

L'énergie, E , de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde par la relation [5]:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Où $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ JS}^{-1}$ est la constante de Planck.

$C = 3 \cdot 10^8 \text{ mS}^{-1}$ étant la vitesse de propagation.

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à $10 \mu\text{m}$.

5.1. Le rayonnement solaire au sol

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, il existe quatre types de rayonnement solaire [6,7].

5.1.1. Les types de rayonnement solaire reçus au sol

❖ Rayonnement direct:

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil c'est un flux uniforme de rayons parallèles entre eux et de puissance incidente $I \text{ (W/m}^2\text{)}$. C'est le flux des photons qui n'ont pas interagi avec les constituants de l'atmosphère et ont conservé une direction commune et leurs énergies propres [8].

❖ Rayonnement diffus :

Parmi les photons qui ont interagi avec la couche d'atmosphère, certains ont été absorbés et d'autres ont subi un simple changement de direction (diffusion). Il s'agit donc de la répartition d'un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Pour un élément plan considéré la composante diffuse $D \text{ (W/m}^2\text{)}$ provenant de toutes les directions est la plus difficile des composantes à calculer [8].

❖ Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

❖ Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous figure () est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires c'est sur une surface terrestre [8].

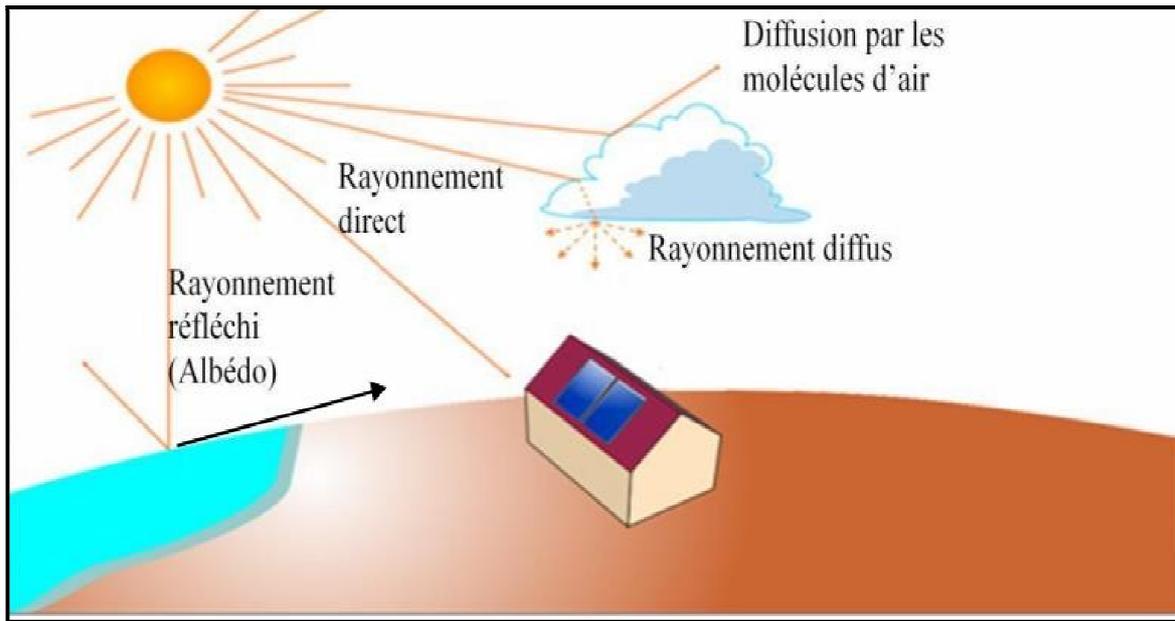


Figure 1 :Les types de rayonnement solaire reçus au sol

5.2. Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays. Le tableau 2.2 résume le potentiel solaire en Algérie [9].

Tableau 1: Potentiel solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

Une évaluation par satellite, effectuée par l'agence spatiale allemande, a montré que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen. Il est de 713,9 TWh/an pour le photovoltaïque [9].

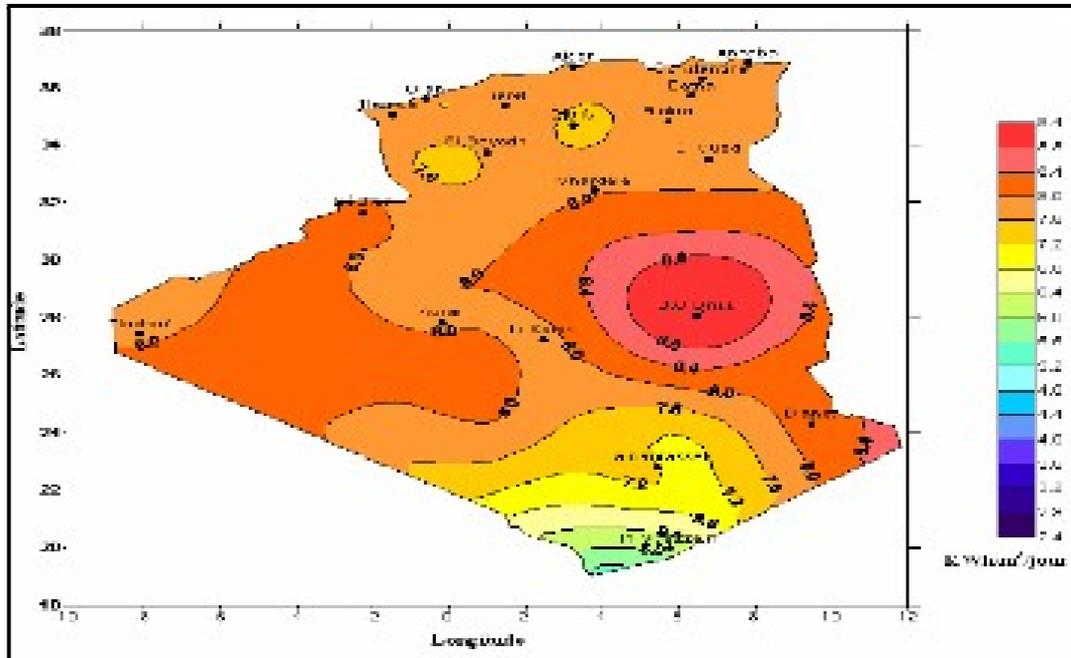


Figure 2: Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien au mois de juillet

5.3. Les coordonnées terrestres

La terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord et le pôle Sud.

Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point ainsi que par son altitude.

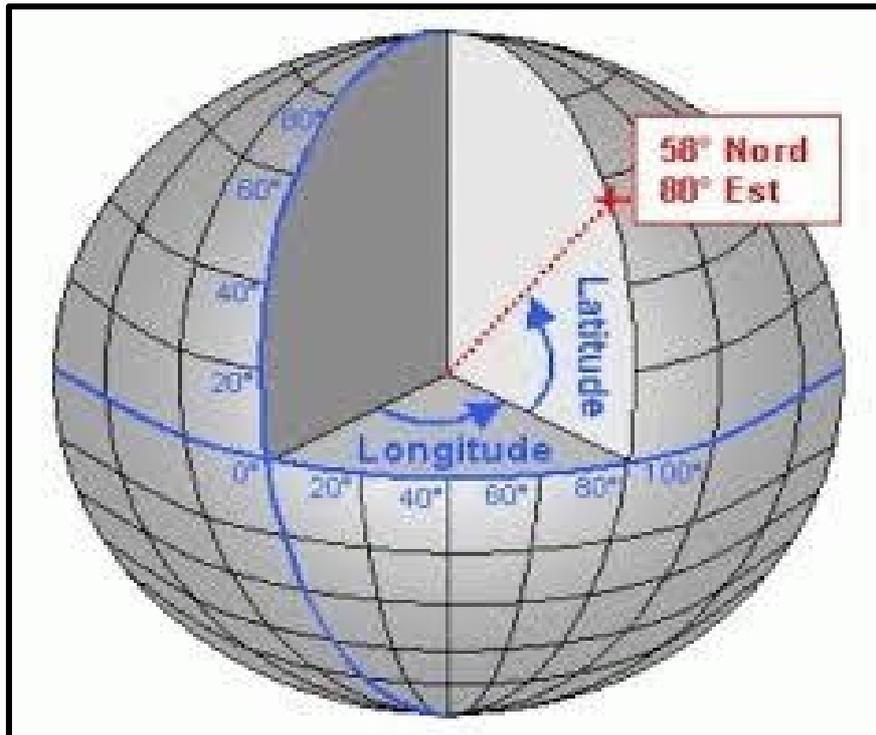


Figure 3: Coordonnées terrestres

5.3.1. La latitude

La latitude d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. La latitude φ est comptée de 0° à $+90^\circ$ dans l'hémisphère nord [10].

5.3.2. La longitude

La longitude d'un lieu peut être comprise entre -180° et $+180^\circ$, à tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. La longitude sera désignée ici par la lettre λ [11].

Longitude OUEST $\lambda < 0^\circ$

Longitude EST $\lambda > 0^\circ$

5.3.3. L'altitude

C'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence [11].

5.3.4. Coordonnées géographiques de Biskra

- ❖ **Latitude:** 34°51'01" Nord
- ❖ **Longitude:** 5°43'40" Est
- ❖ **L'altitude par rapport au niveau de la mer :** 115m

5.4. Mouvement de la terre au tour du soleil

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [12].

Le mouvement de la terre sur sa trajectoire est uniforme, la terre se déplace à vitesse constante (une vitesse moyenne de 29.8 km/s soit 107280 km/h) avec une durée du parcours est d'une année, le déplacement de la terre sur sa trajectoire circulaire est donc d'environ 1° par jour ($360^\circ / 365 \text{ jours}$) le plan qui contient la trajectoire de la terre autour du soleil fait un angle de $23^\circ 27'$ avec le plan de l'équateur.

Lors de son déplacement, l'axe des pôles de la terre reste parallèle à lui-même, le mouvement annuel de la terre autour du soleil s'apparente ainsi à un mouvement géométrique de translation s'effectue sur une trajectoire circulaire [13].

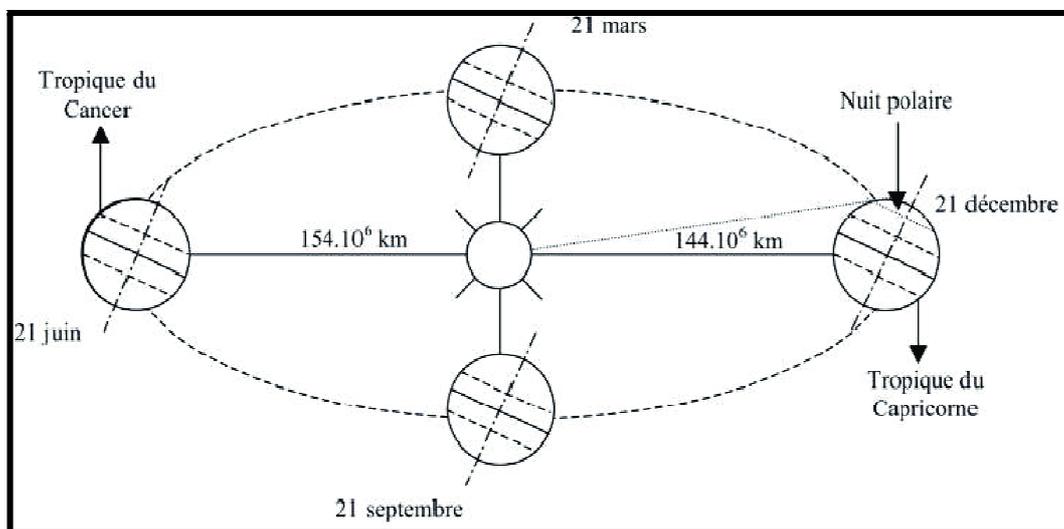


Figure 4: schématisation des mouvements de la terre autour du sol

Au solstice d'hiver (21 décembre) : les rayons solaires frappent la terre avec un angle de déclinaison de $-23^\circ 27'$, c'est la valeur minimum de la déclinaison [14].

- ❖ **Aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (22 septembre) :** le rayon solaire est dans le plan de l'équateur et la déclinaison vaut alors 0° , cette position traduit l'égalité des jours et des nuits [14].

- ❖ **Au solstice d'été (23 juin)** : la position de la terre est opposée à celle du 21 décembre et le soleil frappe l'hémisphère Nord avec l'angle maximum de déclinaison de $23^{\circ}27'$ [14].

5.5. Position du soleil

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

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

5.5.1. Coordonnées équatoriales(horaires)

Les coordonnées horaires sont liées à l'heure de l'observation, et n'ont aucune relation avec la position de l'observation sur la terre. Elles ont comme plan de référence le plan de l'équateur. Les coordonnées équatoriales sont au nombre de deux:

- **La déclinaison solaire (δ):**

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante [15]:

$$\delta = 23.45 \left[\sin \frac{2\pi(284 + nj)}{365} \right]$$

Où :

$n j$: Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

- **Angle horaire du soleil (H):**

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

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

TSV: Temps Solaire Vrai : temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.

5.5.2. Coordonnées horizontales

Les coordonnées horizontales dépendent du lieu d'observation. Elles ont comme plan de référence le plan horizontal, perpendiculaire à la verticale du lieu. Un objet est repéré dans ce système de coordonnées par ces composantes :

- **La hauteur du soleil (h):**

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante [15]:

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos H + \sin \varphi \cdot \sin \delta$$

h varie entre -90° et +90°. On prend:

- **h > 0 ⇒ le jour**
- **h < 0 ⇒ la nuit**
- **h = 0 ⇒ aux lever et coucher**
-

- **Azimut du soleil (a):**

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [16] :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin H}{\cos h}$$

Avec a : varie entre -180° et +180°. On prend:

- a > 0 ⇒ vers l'ouest
- a < 0 ⇒ vers l'est
- a = 0 ⇒ direction du sud

5.6. Le temps solaire :

La terre subit deux types de déplacement : la rotation de la terre autour de l'axe des pôles et sa révolution autour du soleil.

Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notion de journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps. Puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de 15° . La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai [17].

5.6.1. Temps solaire vrais(TSV):

Le temps solaire vrais, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil, ce temps est indiqué par les cadrans solaires et les héliographes, Il est donné par la relation suivante [18,19]:

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15}$$

ω : En degré.

Si $\omega = 0$, TSV=12h.00

Si $\omega < 0$, la

matinée. Si $\omega >$

0,l'après-midi.

5.6.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M) :

Le temps solaire moyen est appelé parfois temps local, Il est donné par la relation suivante [20]:

$$TSM = TSV - ET$$

Avec TSM en heure.

Et : l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M. exprimée en minutes.

5.6.3. Temps universel (TU) :

Le temps universel est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine), appelé encore GMT (Greenwich Mean Time). Est donné par la relation suivante [21]:

$$TU = TSM - \frac{\lambda}{15}$$

Où : λ : est la longitude.

$\lambda > 0$; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$\lambda < 0$; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$; pour le méridien de Greenwich.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire. Le rayonnement solaire est influencé par deux principaux paramètres, en premier lieu on trouve les constituants de l'atmosphère, qu'ils soient permanents ou ceux dont la composition varie largement avec les activités de l'homme, et en second c'est le mouvement de la terre, alors il est important de faire une étude préliminaire du climat pour un site donné avant tout projet d'exploitation de l'énergie solaire.

CHPITRE II
Modèles d'estimation du
rayonnement solaire global

1. Introduction

Ce chapitre est consacré essentiellement à la synthèse des modèles d'estimation du rayonnement solaire. Vu l'importance de l'évaluation du rayonnement solaire global reçu à la surface de la terre, plusieurs auteurs ont établi des modèles pour estimer le rayonnement solaire global à partir des différentes variables météorologiques telles que la température, l'humidité, la nébulosité, la durée d'insolation ... Dans ce chapitre nous présentons les six modèles utilisés dans notre étude pour l'estimation de du rayonnement solaire globale à savoir, le modèle de Sayigh et le modèle d'Okundamiya.

2. Modèle sSayigh

A.A.M Sayigh propose un modèle qui est basé sur différents paramètres météorologiques (durée d'insolation S , humidité relative R_r , température maximale T_{max}). Ce modèle tient compte aussi de la position géographique du site [22], Il est donné par:

$$H = 11.6k. N. ee^{\frac{S}{S_0}} + \frac{R_r}{15} - \left(\frac{1}{T_{max}} \right)$$

Avec :

$$N = 1.7 - 0.458\varphi$$

$$K = 100(n. S_0 + W_{ij} \cos(\varphi))$$

$$n = \frac{0.2}{1+0.1\varphi}$$

Avec :

S_0 : durée d'insolation théorique. (Durée astronomique du jour) R_r : l'humidité relative (%) S : durée d'insolation réel.

φ : latitude du site exprimée en radians.

Le tableau 1 expose le facteur climatique W_{ij} pour les douze mois de

L'année et pour les différentes zones climatiques. i : détermine la zoneclimatique.

- $i=1$ site à l'intérieur dupays
- $i=2$ zone côtière
- $i=3$ zone montagneuse

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wj1	1.28	1.38	1.54	1.77	2.05	2.30	2.48	2.41	2.36	1.73	1.38	1.17
Wj2	1.46	1.77	2.05	2.15	2.05	2.05	2.10	2.17	2.14	1.96	1.60	1.43
Wj3	1.60	1.81	2.00	2.17	2.25	2.26	2.24	2.20	2.10	1.92	1.70	1.60

Tableau 1: Utilisation du facteur climatique pour différentes plages d'humidité, mois par mois

3. Modèle d'Okundamiya

Okundamiya (2014) a développé des corrélations entre le rayonnement solaire et d'autres paramètres météorologiques basés sur les ensembles de données quotidiens moyens mensuels collectés pour différents endroits au Nigeria et a proposé une relation de la forme [23]:

$$\frac{H}{H_0} = a + b.S + c.T_R + d.T_{max} + e.C$$

L'applicabilité de l'équation a été testée par comparaison avec le modèle simple basé sur la température précédemment proposé (Okundamiya et Nzeako 2010). Les résultats ont montré que l'équation se compare plus favorablement avec les données observées pour les emplacements pris en compte au Nigeria (Okundamiya 2014).

4. Modèles de Falayi [24]

Dans ces modèles la fraction d'insolation et la température moyenne de l'air sont utilisées sous l'expression suivante.

$$\frac{H}{H_0} = a + b.\sigma + c.T_n$$

Avec a,b, c: sont les paramètres de ce modèle qui vont être déterminés par la méthode des moindres carrés et (T_n) la moyenne mensuelle de la température de l'air normalisée (T/T_{max}).

Un Autre modèle, exploite trois paramètres climatiques, la fraction d'insolation, température moyenne de l'air et l'humidité relative moyenne pour exprimer le rayonnement global horizontal. L'équation est donnée sous cette forme :

$$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \sigma + c \cdot T_n + d \cdot R$$

a, b, c, d : sont les paramètres de ce modèle qui vont être déterminés par la méthode des moindres carrés.

T_n, R : étant respectivement, la moyenne mensuelle de la température de l'air normalisée l'humidité relative moyenne de l'air.

5. Modèle d'Al-Salaymeh [25]

Le modèle d'Al-Salaymeh s'écrit sous forme exponentielle et donnée par la relation suivante :

$$G = a_0 \cdot \exp\left[-0.5 \times \left(\frac{x-a_1}{a_2}\right)^2\right]$$

a_0 est l'amplitude, a_1 le centre et a_2 la largeur

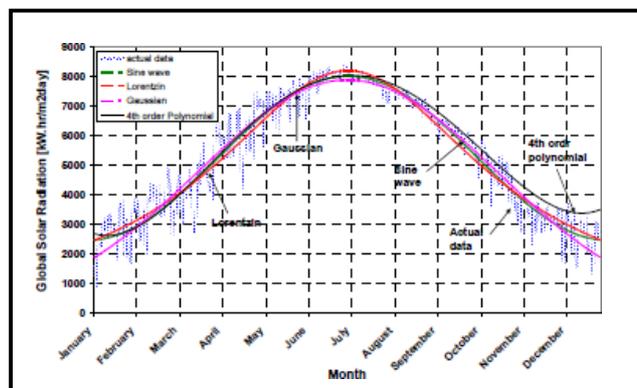


Figure 1: Données mondiales quotidiennes sur le Rayonnement Solaire avec différentes Suggestions modèles de prédiction à Amman, en Jordanie, en fonction du temps(jour).

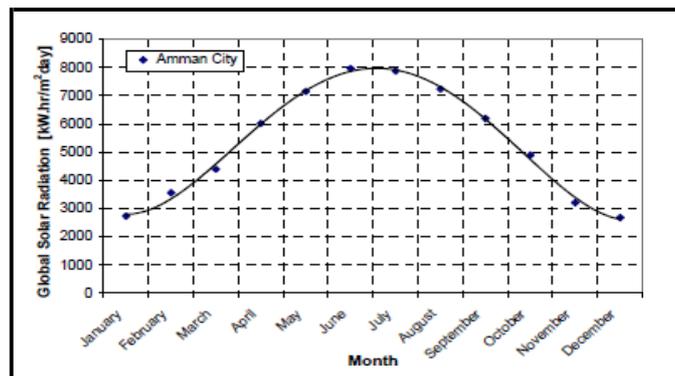


Figure 2 : Rayonnement solaire global quotidien moyen mesuré à Amman, en Jordanie, comparé à l'éclairement énergétique mensuel moyen simulé sur une surface horizontale.

6. Modèle D. Bensahal [26]

La plupart des modèles dans la littérature font de la température un élément essentiel ; Dans ce modèle, la température a été basé sur les données de pression atmosphérique, de rayonnement solaire global et d'humidité relative, Et a été donné l'expression suivante :

$$T_{\text{air}} = T_{\text{min}} + \left(1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}}\right) \times \exp\left(\frac{I}{I_0} + \frac{P}{P_0} + \frac{1-H_r}{2}\right)$$

Avec :

T_{air} : est la température horaire de l'air (c°).

T_{min} et T_{max} : sont les températures minimale et maximale de l'air (° C). I_0 : est le solaire constant ($I_0 = 1367 \text{ W / m}^2$).

I : est le rayonnement solaire global incident sur une surface horizontale à l'emplacement étudié (W / m^2).

P_0 est la pression atmosphérique ($P_0 = 101,235 \text{ kPa}$).

P est la pression atmosphérique à l'emplacement étudié (kPa). H_R est l'humidité relative (%).

Si $T_{\text{max}} \leq 3^\circ\text{C}$, l'équation (11) peut être écrite comme l'expression suivante:

$$T_{\text{air}} = T_{\text{min}} + \left(1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}}\right) \times \exp\left(\frac{I}{I_0} + \frac{P}{P_0} + \frac{1-H_r}{2}\right)$$

Le rayonnement solaire global (I) peut être déduit de l'équation comme suit:

$$I = I_0 \times \left[-\left(\frac{P}{P_0} + \frac{(1-H_R)}{2}\right) + \ln\left(\frac{T_{\text{max}} \times (T_{\text{air}} - T_{\text{min}})}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}\right) \right]$$

7. Modèle Foued CHABANE [27,28]

Le modèle établi a basé sur des régressions non linéaires en fonction la hauteur du soleil et de l'humidité relative écrites en fonction de l'irradiation globale pour plusieurs jours de tests pour un plan incliné (45°) d'orientation sud :

$$G_{\text{proposé}} = 696.42 \times \left(\frac{h}{1.124}\right)^{1.124} + 1.751 \times \left(\frac{Hr}{1.24}\right)^{1.24}$$

Le modèle s'est appuyé sur le développement de cette corrélation en utilisant les données de rayonnement solaire et global au cours d'une année sur la station météorologique de Ghardaïa. Deux prédictions de la distribution du rayonnement solaire: directe et la lumière diffuse sur une zone horizontale modèles, sont examinées pour prédire l'irradiation horaire de Ghardaïa en utilisant l'approche telle que les modèles de régression. Comparaisons entre les prédictions du modèle et les valeurs mesurées. Ce modèle permet de calculer le rayonnement diffus et direct donnée par la relation suivant:

$$\begin{cases} D = a_1 + b_1 \times h + c_1 \times h^2 \\ I = a_2 + b_2 \times h + c_2 \times h^2 \end{cases}$$

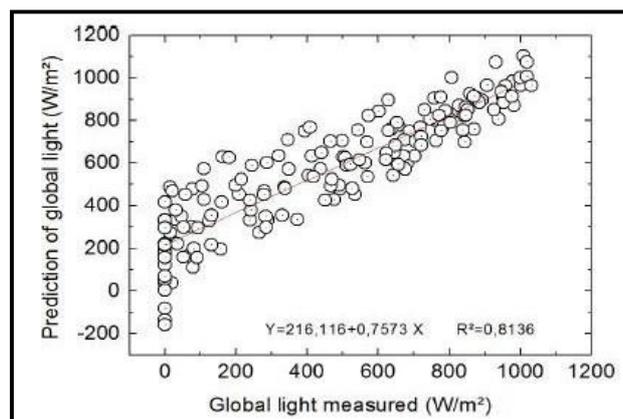


Figure 3: l'éclairement mondial prédit en fonction de l'éclairement globale mesurée.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donnée quelques modèles établies dans le domaine du rayonnement solaire à partir des données de l'étude des sites spécifiques étudiés à partir des différentes données météorologiques à savoir l'humidité relative , la température et la durée d'ensoleillement.

CHPITRE III
Etude théorique et
expérimentale

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le logiciel ORIGIN 9 que nous avons utilisé pour but de tester, simuler et valider les données expérimentales.

Nous avons choisi le site <https://www.meteoblue.com>. Pour cette étude, le choix de ce site s'est porté sur la disponibilité des données que nous voulons les utiliser. Les données expérimentales du rayonnement solaire utilisées sont de l'année 2020.

Nous avons estimé un nouveau modèle de prédiction du rayonnement solaire globale pour la région de Biskra de 2020 en tenant compte des conditions météorologiques (pression, humidité, vent, température).

Biskra est Située au nord du Sahara, au pied du massif de l'Aurès et des monts du Zab. Elle a un climat désertique chaud (classification de KöppenBWh) typique de la région dans laquelle elle se trouve. La ville possède des étés longs et extrêmement chauds et des hivers courts et agréablement chauds. En été, les pics de chaleur figurent parmi les plus élevés du pays avec des températures qui peuvent dépasser 48 °C. Le mois le plus chaud est juillet. Celui-ci a une température maximale d'environ 42 °C. En moyenne, la ville connaît environ plus de 92 jours par an au cours desquels la température égale ou dépasse 38 °C et sur près de 20 jours au-dessus de 43 °C. [<https://fr.wikipedia.org/wiki/Biskra#Situation>]

Biskra est une wilaya d'Algérie qui possède une latitude 34°52'00,12" Nord et une longitude 5°45'00,00" Est, elle a une altitude de 120 m au-dessus du niveau de la mer, ce qui fait d'elle une des villes les plus basses d'Algérie.

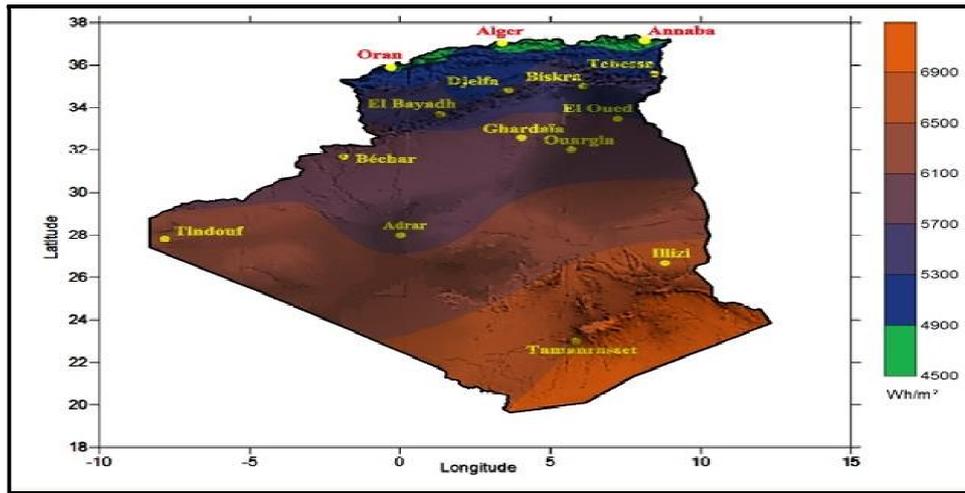


Figure 5: Carte de l'irradiation solaire de l'Algérie

➤ **Le vent**

Nous avons pris seulement un échantillon des données de prévision de la vitesse de vent de la ville de Biskra 2020. On remarque à partir des données de prédiction que la loi de variation représentée sur la **figure (2)** prend une forme plus ou moins sinusoïdale. L'intensité du vent a atteint son maximum le 17 août avec une valeur de 4,3 m/s, avec un changement de direction le 18 août.



Figure 6: Vitesse de vent correspondante
(Station météorologique du Biskra)

➤ **La température**

La température maximale est en été (juillet), elle dépasse 42 degrés Celsius et la température minimale est en hiver, au cours du mois de janvier. La température moyenne annuelle est de 22 ° C. La figure III.3 représente la température au mois d’Aout 2020. Elle est maximale est de 43°C le 19 aout, après-midi, mais elle est minimale le 12aout.

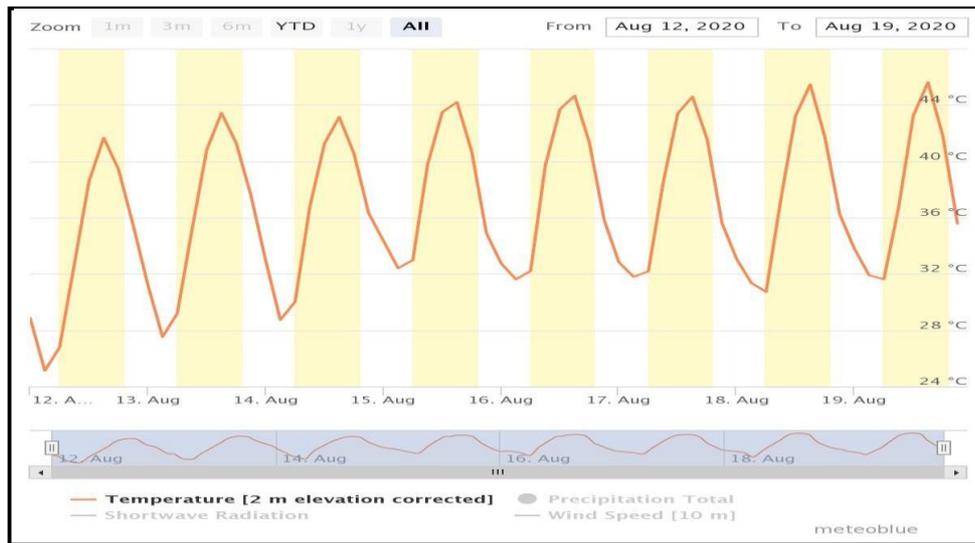


Figure 7: Température ambiante (station météorologique du Biskra)

➤ **Pression**

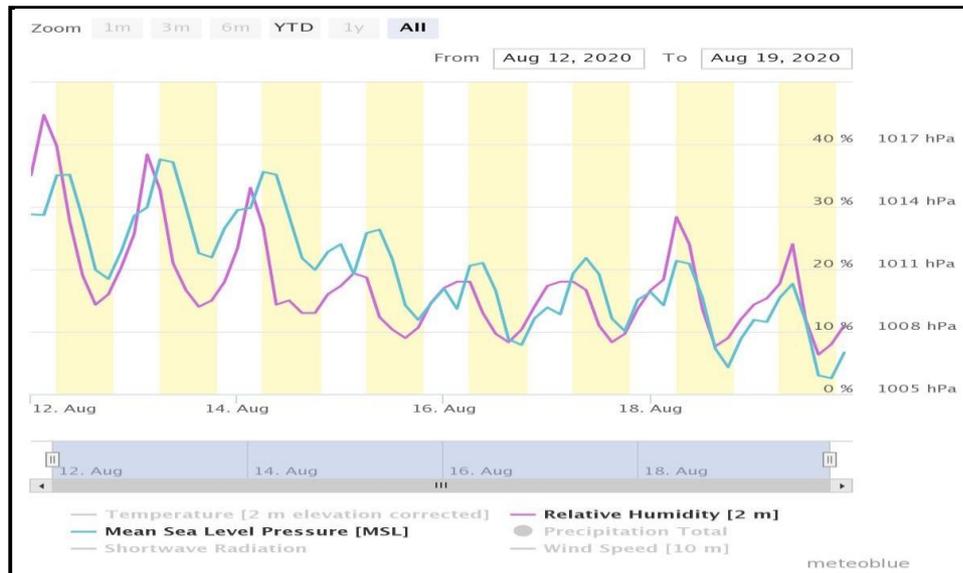


Figure 8: Pression et Humidité (le site de Biskra) [https://www.meteoblue.com].

On distingue que pendant 12 jours, il y'a une différence de pression entre 1005 hpa et 1017 hpa. La pression est toujours de forme sinusoïdale.

➤ Humidité relative

Le (figure 4) représente l'humidité dans la première moitié d'aout 2020 pour la région de Biskra, elle varie entre 5% et 40% pour les jours de 12-18 aout. On remarque toujours la formesinusoïdale.

2. Ressourcesmatérielles

Nous parlerons du processus de mesure des facteurs dont nous avons besoin dans notre étude et nous avons utilisé plusieurs appareils dans cesmesures.

➤ Pyranometre

C'est un instrument permettant de mesurer l'intensité du rayonnement solaire global (la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle) reçue en un point en watts par mètrecarré.



Figure 9:Pyranomètre (Solarmètre)

➤ Hygromètre

Est un appareil compact pour la mesure de l'humidité relative et de la température de l'air et calculer par ailleurs le point de rosée et la température humide.

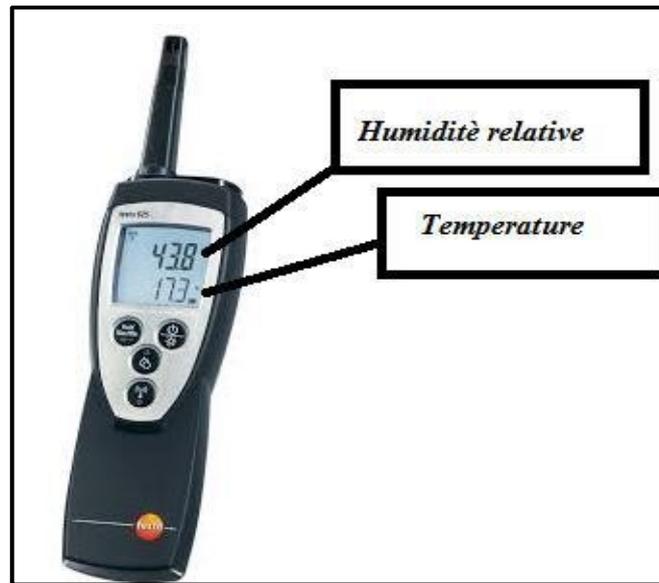


Figure 10:Hygromètre testo 625

➤ **Thermo-anémomètre**

C'est un instrument de mesure de la vitesse et de la température.

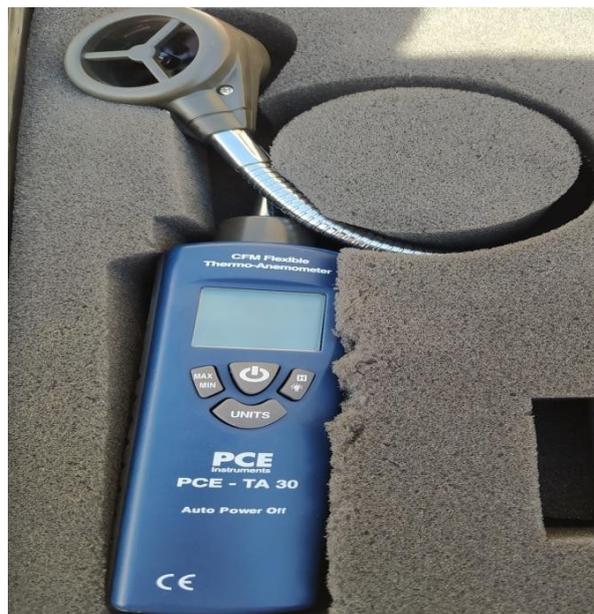


Figure 11:Thermo-anémomètre

➤ **Thermomètre infrarouge**

C'est un instrument de mesure de la température de surface d'un objet à partir du rayonnement du corps noir rayonnement de type corps noir qu'il émet dans l'infrarouge.

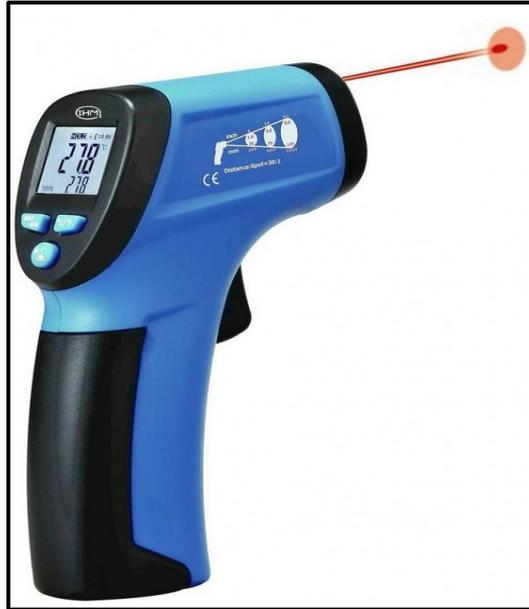


Figure 12:thermomètre infrarouge

3. Ressources logicielles

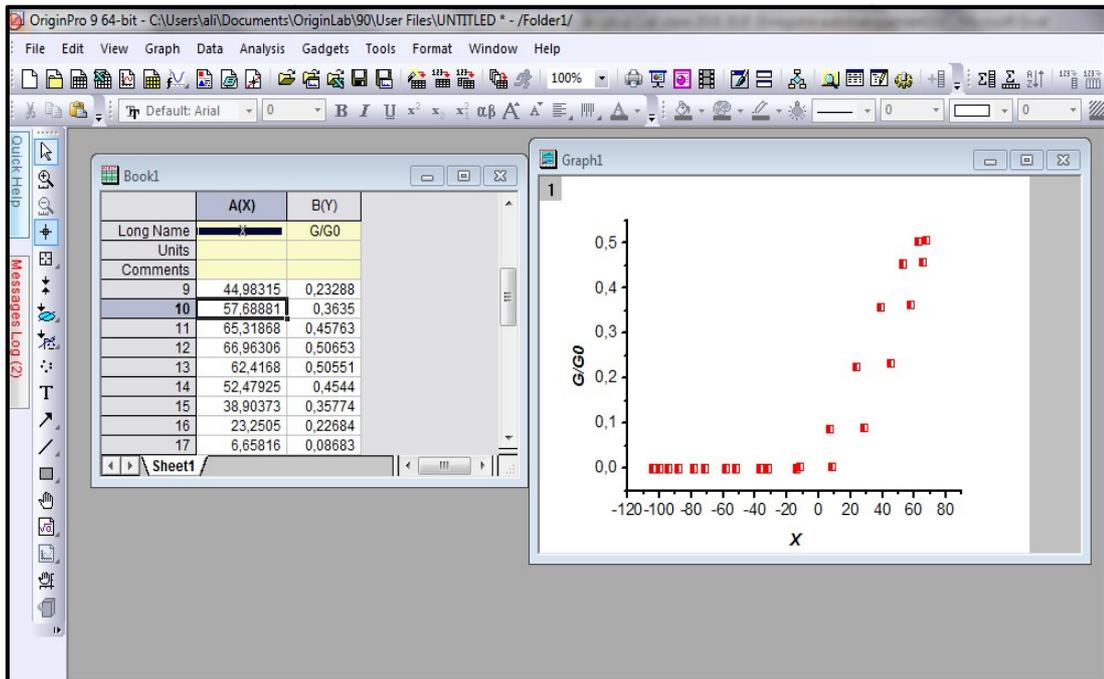
Nous avons choisi le logiciel ORIGIN car il possède des modèles mathématiques très développés et une bonne visualisation graphique. Il est destiné aux chercheurs scientifiques, il est aussi utilisé dans les universités comme dans le monde industriel, il intègre des centaines de modèle mathématiques. C'est pour ces raisons qu'on a choisi Origin 9 pour développer notre travail.

Ce logiciel est facile à utiliser, il vous permet de mettre à jour vos graphiques originaux. Il peut aussi analyser automatiquement les résultats lorsque vous modifiez des données ou des paramètres. Il vous permet de créer des nouveaux modèles.

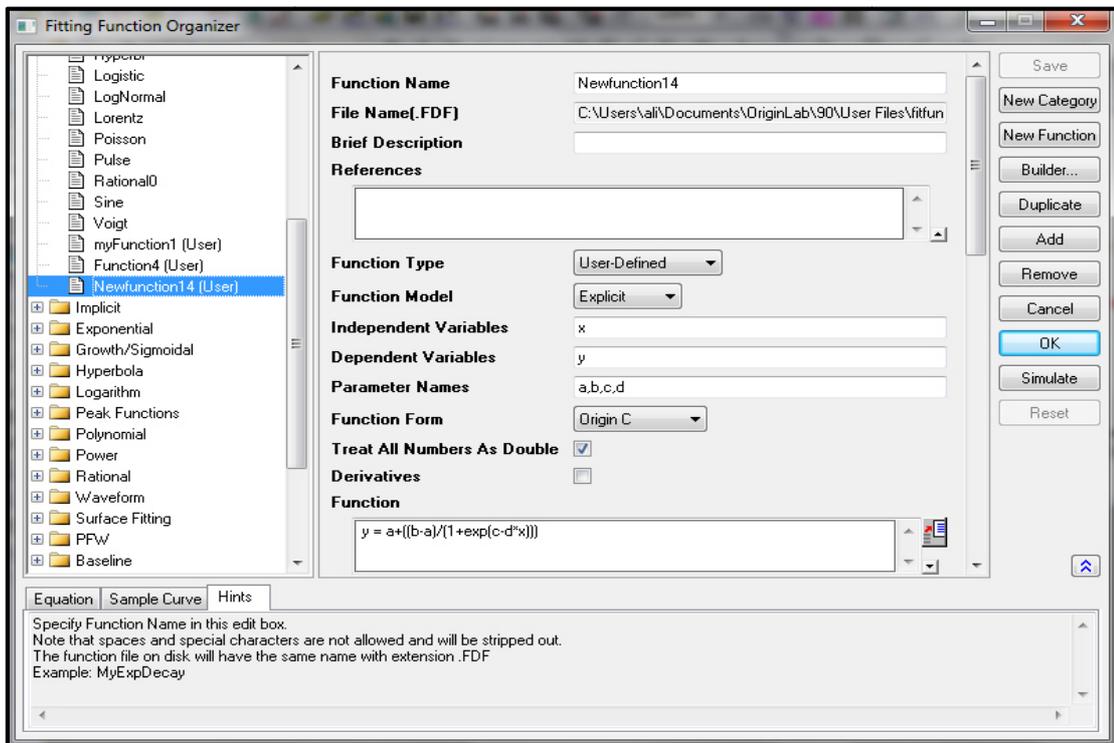
Il nous permet aussi d'utiliser des outils d'analyse avancés et des applications pour le fitting, le Surface Fitting, les statistiques et le traitement du signal.

Voici les étapes à suivre pour créer un nouveau modèle mathématique de prédiction du rayonnement solaire global (6 premier mois de l'année 2020) :

➤ **Etape 1 :** Donner les valeurs expérimentales.



➤ **Etape 2 :** créer un nouveau modèle.



➤ **Etape 3 :** On compile puis on retourne audialogue

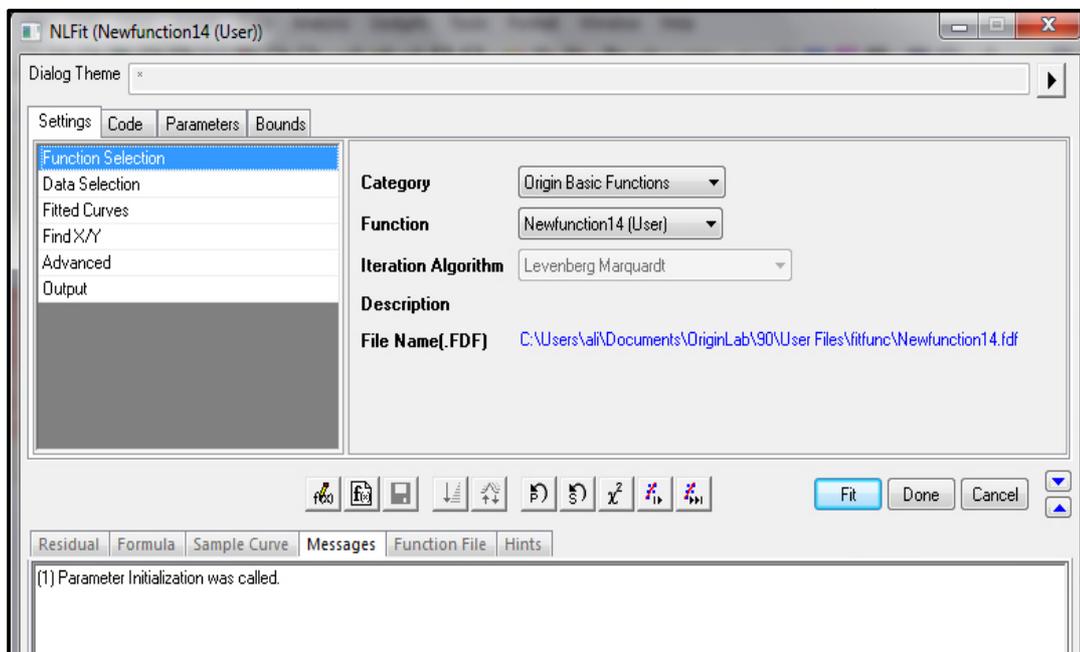
```

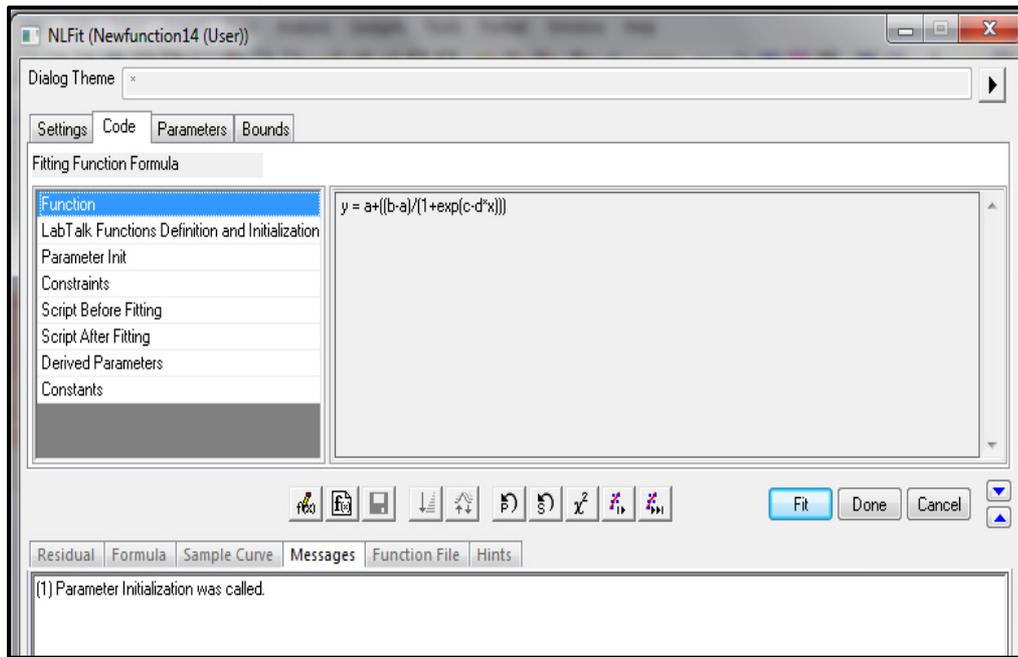
File Edit View Build Tools Window Help
workspace  _nlfNewfunction14.fit X
Origin C Workspace
  Project
  System
  Temporary
  User 'C:\Users\val
Compile Return to Dialog
27 //-----
28 //
29 void _nlfNewfunction14(
30 // Fit Parameter(s):
31 double a, double b, double c, double d,
32 // Independent Variable(s):
33 double x,
34 // Dependent Variable(s):
35 double y)
36 {
37 // Beginning of editable part
38 y = a+(b-a)/(1+exp(c-d*x))
39 // End of editable part
40 }
Output

```

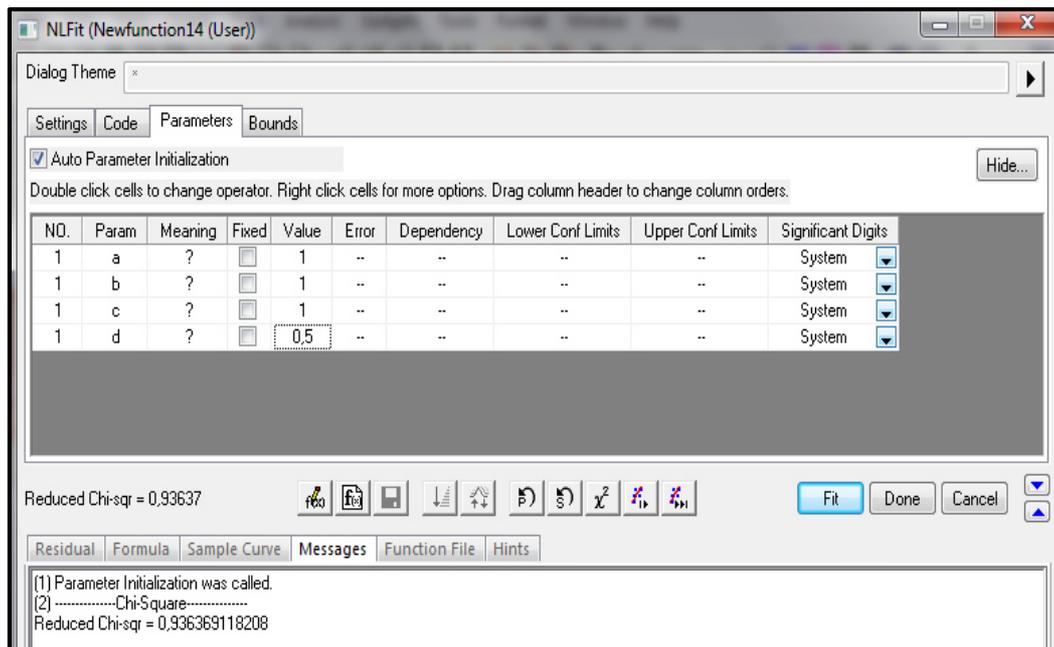
Etape4: on va faire les deux opérations

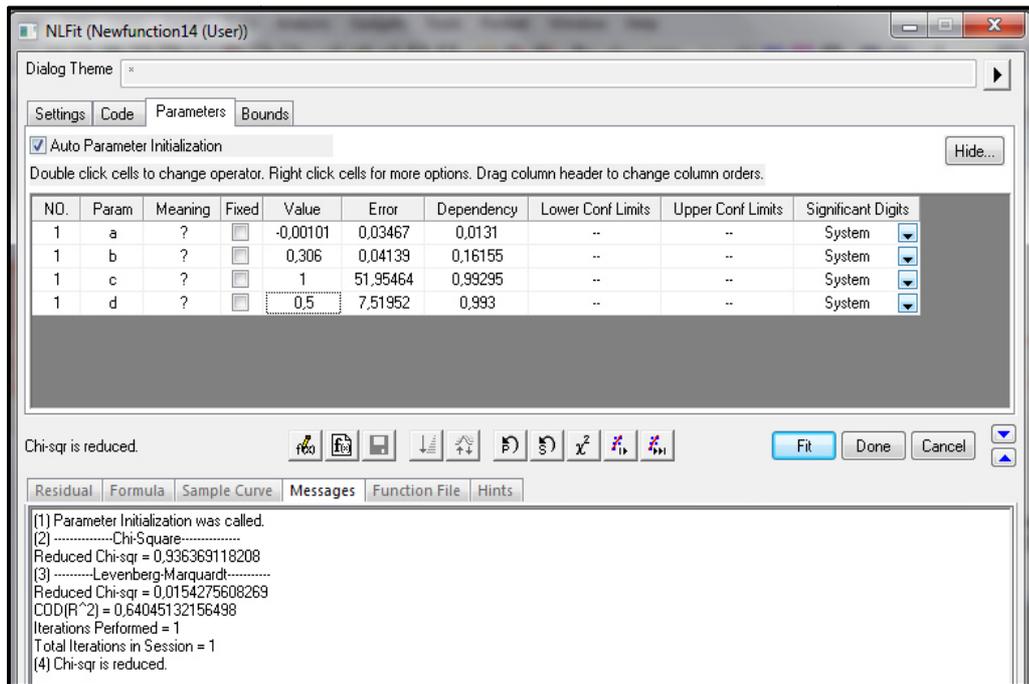
- Analysis
- Fitting
- On donne le nouveau modèle et les quatre paramètres(a,b,c,d)



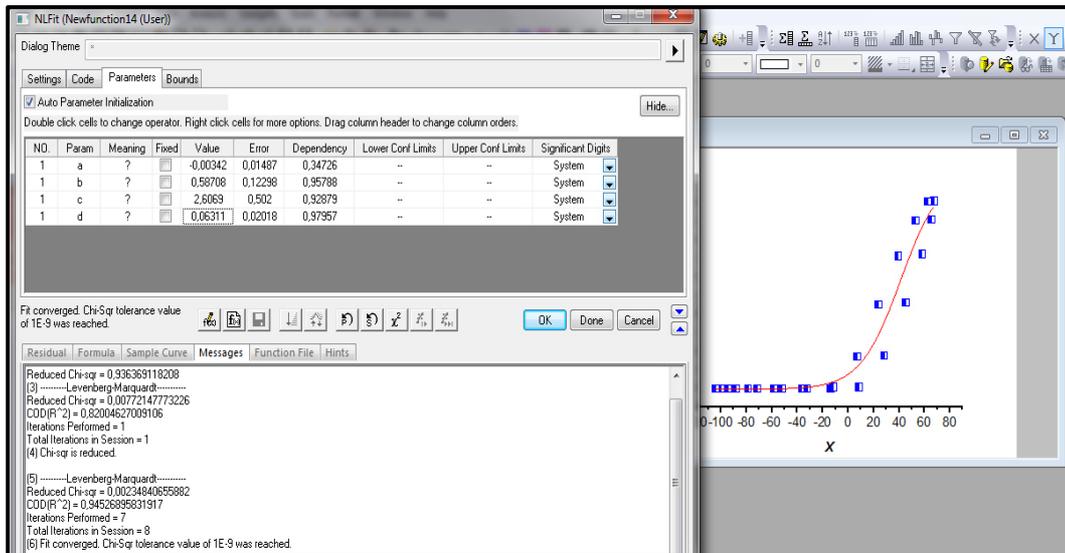


➤ **Etape 5 :** On donne les paramètres et on cherche χ^2

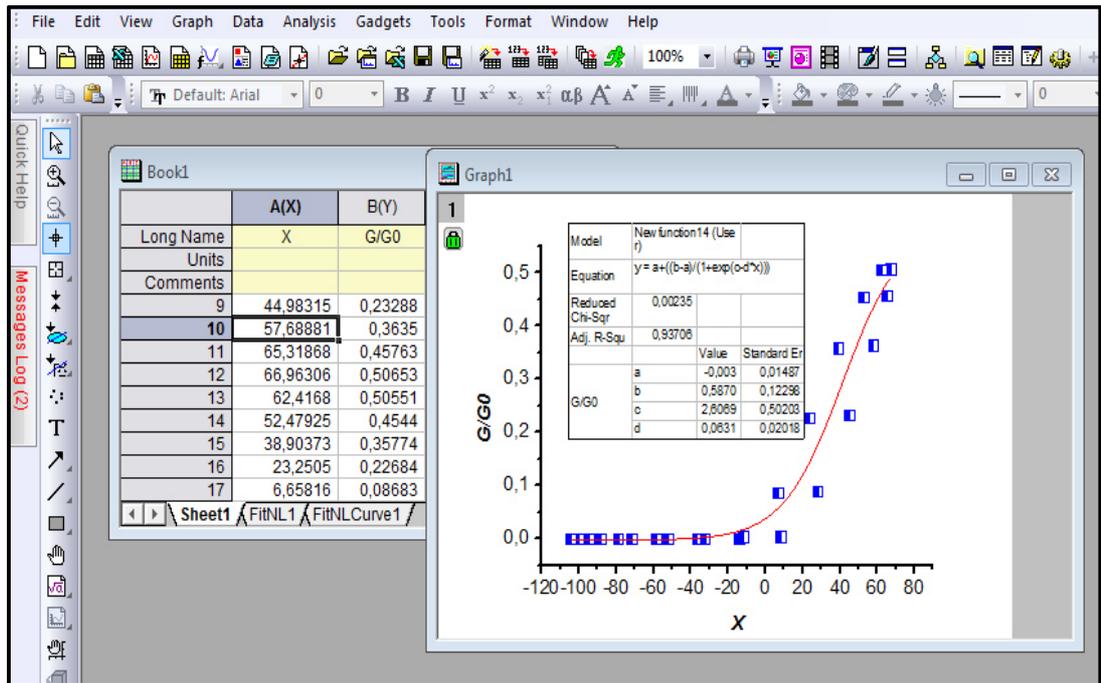




➤ **Etape 7 :** On fait la huitième itération et on calcule de nouveau les paramètres du modèle le x^2 et le R^2



🚩 **Etape 8** : Après fitting, on aura finalement



Le modèle établi est basé sur des régressions non linéaires en fonction du vent, de la température ambiante, de la pression, de l'humidité relative et de la hauteur du soleil écrite en fonction de l'irradiation globale pour plusieurs jours de tests pour un plan horizontal.

Le nouveau modèle du rayonnement solaire global peut être écrit sous la forme suivante :

$$G / G_0 = a + (b - a) / (1 + \exp(c - d * X)) \tag{III.1}$$

$$X = \left(\frac{V}{V_0} + \frac{T}{T_0} + \frac{P}{P_0} + \frac{Hr}{100} \right) \times H \tag{III.2}$$

Avec :

A, b, c, d : les coefficients de modèle proposé.

T₀ : constante de température = 273.

P₀ : constante de pression = 10⁵ Pa.

V₀ : constante de vent = 25 m/s

H : angle d'élévation du soleil (radian)

Après avoir trouvé le modèle de prédiction, on vous propose quelques données pour les deux mois mars et mai pour un jour type claire.

Les tableaux I et II représentent les données mesurés et calculés des deux mois choisis au début. Le tableau III nous donne une aperçue générale sur les constantes (a, b, c, d) du nouveau modèle avec leurs erreurs R^2 .

Tableau 1: Les paramètres du mois de mars.

<i>TSV (h)</i>	<i>Ta (k)</i>	<i>Hr (%)</i>	<i>P (pa)</i>	<i>V (m/s)</i>	<i>G_exp (W/m²)</i>	<i>H (deg)</i>	<i>G_fit (W/m²)</i>
8	290,53	55,32	979,15	5,11	407,2627	26,2658938	484,247952
9	292,31	46,77	979,39	6	591,6433	37,3875313	668,342245
10	294,06	39,32	979,39	5,96	724,9637	46,6334509	738,462726
11	295,58	33,87	979,04	5,73	795,2216	52,8395312	761,622153
12	296,79	29,89	978,51	5,43	798,8165	55,0349728	764,093346
13	297,61	27,27	977,65	5,08	739,2849	52,8395312	749,171623
14	297,9	25,9	976,93	4,65	616,651	46,6334509	701,376879
15	297,37	26,04	976,51	4	437,6624	37,3875313	581,974764
16	296,51	27,41	976,37	3,11	221,309	26,2658938	372,783574

Tableau 2: Les paramètres du mois de mai

<i>TSV (h)</i>	<i>Ta (k)</i>	<i>Hr (%)</i>	<i>P (pa)</i>	<i>V (m/s)</i>	<i>G_exp (W/m²)</i>	<i>H (deg)</i>	<i>G_fit (W/m²)</i>
8	296,41	36,14	973,34	2,08	575,5892	33,5631457	450,084492
9	298,29	27,4	973,31	3	730,1845	44,8733628	619,524386
10	299,87	23,67	972,87	3,85	837,2745	54,3428783	733,559633
11	301,75	19,87	972,06	5,51	884,7744	60,720213	804,098524
12	303,03	18,4	971,35	7,28	869,5024	62,979001	839,920635
13	303,7	18,84	971,15	8,3	795,5983	60,720213	836,67801
14	303,99	19,16	970,97	8,17	664,3958	54,3428783	782,277125
15	304,28	18,75	970,52	7	493,1836	44,8733628	657,380948
16	304,31	18,7	970	5,34	316,5468	33,5631457	443,529074

Tableau 3 : Coefficients des paramètres a, b, c, d du nouveau modèle pour les six mois.

Constantes	A	b	c	d	R ²
Mois					
Janvier	-128,2891	2,5005	-3,90928	0,00452	0,938
Février	-128,302087	3,11145895	-3,70466225	0,00285197	0,850
Mars	-0,00342	0,58708	2,6069	0,06311	0,937
Avril	-128,303854	3,5809676	-3,54606864	0,00257302	0,932
Mai	-128,634873	0,76924679	-4,5708218	0,02146834	0,800
Juin	-846,49777	1,32467	-6,22973	0,0112	0,960

4. Etudes comparative des erreurs

On trouve toujours des erreurs entre les études théorique et expérimentale des paramètres d'environnement, cela influe directement ou indirectement sur le fonctionnement des panneaux solaires. Pour valider les résultats du nouveau modèle obtenus, nous avons établi une série d'erreurs comme les tests du chi carré (X^2), la somme des erreurs de carré (SSE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur relative moyenne (ERM).

✓ Tests du chi carré (X^2)

Est de tester toute hypothèse statistique pour calculer la probabilité que la distribution théorique ou mathématique donnée est appropriée pour les données mesurées, il est donné dans la relation suivante:

$$X^2 = \left[\frac{\sum (X_{\text{mod}} - X_{\text{exp}})^2}{n-1} \right] \quad (\text{III.3})$$

✓ L'erreur quadratique moyenne (RMSE)

Est une mesure de vérification dont la valeur est toujours positive et égale à zéro dans l'état idéal. Elle fournit également des informations sur la performance à court terme des relations en s'appuyant sur chaque terme en comparant les éléments correspondants des prévisions et des observations. Plus la valeur est petite, est le modèle meilleur, donné dans la relation suivante :

$$RMSE = \left[\frac{\sum (X_{\text{mod}} - X_{\text{exp}})^2}{n-1} \right]^{0.5} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

N : Nombre de données sur le rayonnement solaire global ou nombre d'heures de la journée. X_{mod} : le rayonnement solaire global de model proposé.

X_{exp} : le rayonnement solaire global mesuré.

✓ **Somme des erreurs de carré (SSE):**

Représente une mesure de distribution ou de déviation il est calculé par la différence carré entre les données attendue et l'observation dans une ou plusieurs catégories, il est donné dans la relation suivante :

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{\text{exp},i} - M_{\text{mod},i})^2 \quad (\text{III.5})$$

✓ **Erreur relatif moyenne(ERM):**

Est définie comme la valeur absolue de l'erreur absolue sur la valeur réelle, il est donné dans la relation suivante :

$$ERM = \left[\frac{|X_{\text{mod}} - X_{\text{exp}}|}{X_{\text{mod}}} \right] \times 100 \quad (\text{III.6})$$

Le tableau IV présente les erreurs de tests du chi carré (X^2), la somme des erreurs de carré (SSE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur relative moyenne (ERM) les six premier mois de l'année2020.

Tableau 4: Les erreurs de rayonnement solaire global entre le nouveau model et les données expérimentales (année 2020)

	<i>SSE</i>	<i>RMSE</i>	X^2
<i>Janvier</i>	0,00104078	0,03421807	0,00117088
<i>Février</i>	0,00470003	0,07271545	0,00528754
<i>Mars</i>	0,00388705	0,06612811	0,00235
<i>Avril</i>	0,00125864	0,03762936	0,00141597
<i>Mai</i>	0,00623172	0,08372985	0,00701069
<i>Juin</i>	0,00062994	0,026621	0,00070868

5. Conclusion

Une étude a été faite pour trouver un nouveau modèle a partir des données expérimentes pour le site de Biskra pour les mois de Janvier, Février, Mars, Avril, Mai et Juin de l'année 2020. On a obtenu une meilleure estimation du rayonnement solaire (site Biskra, année 2020).

Chapitre IV

Résultats & discussions

1. Introduction

Dans ce chapitre une application des six modèles déjà présentés dans deuxième chapitre pour l'estimation du rayonnement solaire globale pour la région de Biskra de 2020 en tenant compte des conditions météorologiques (pression, humidité, vent, température).

2. Région d'étude

Dans notre étude, la région de Biskra ont été choisi

Tableau 5: Situation géographique de site étudié

Station	Latitude(°)	Longitude(°)	Altitude(m)
Biskra	34°51.0228' Nord	5°43.683' Est	115 m (par rapport au niveau de la mer)

Toutes les coordonnées sont indiquées dans le système global de coordonnées WGS 84.



Figure 13: Carte géographique de la zone d'étude

3. Grandeurs utilisées dans l'application des six modèles

Dans l'application des six modèles on a intérêt à calculer les valeurs des moyennes mensuelles de quelques grandeurs à savoir, le rayonnement solaire globale à la limite de l'atmosphère, l'humidité relative moyenne de l'air, et la température moyenne de l'air, vent, pression.

3.1. Le rayonnement solaire globale expérimental

Dans les figures suivantes on trouve le graphe du rayonnement solaire global expérimental et celui du rayonnement solaire globale estimée par le modèle Sayigh pour région de Biskra de 2020.

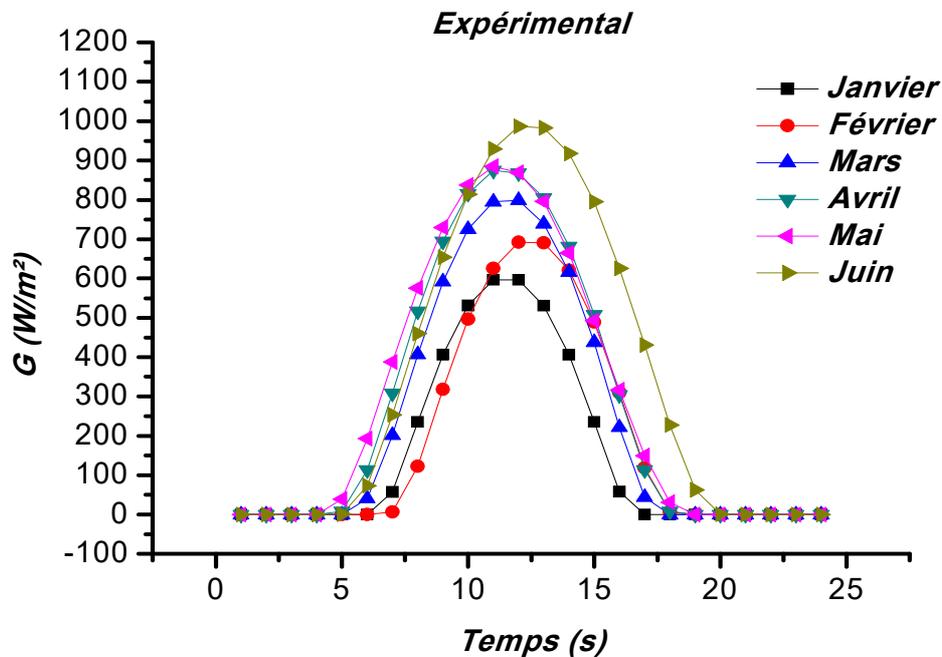


Figure 14: Evaluation de l'intensité du rayonnement solaire globale pour la région de Biskra de 2020

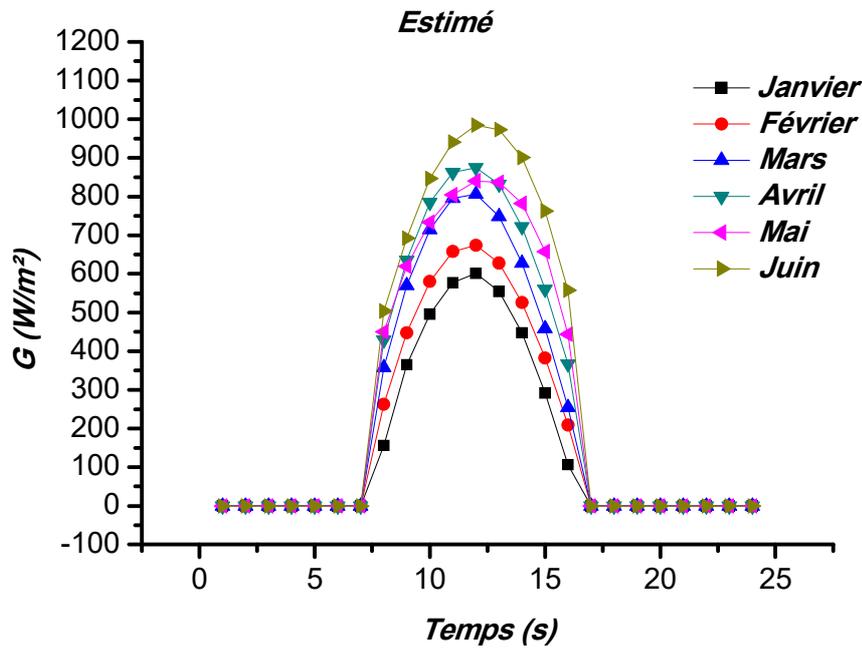


Figure 15: Evaluation de l'intensité du rayonnement solaire globale mesurée et estimée par le modèle Sayigh pour la région de Biskra de 2020

3.2. Moyenne de l'humidité relative et de la température de l'air

Les valeurs des moyennes mensuelles de la température de l'air et de l'humidité relative moyenne de l'air sont dans les trois figures suivantes.

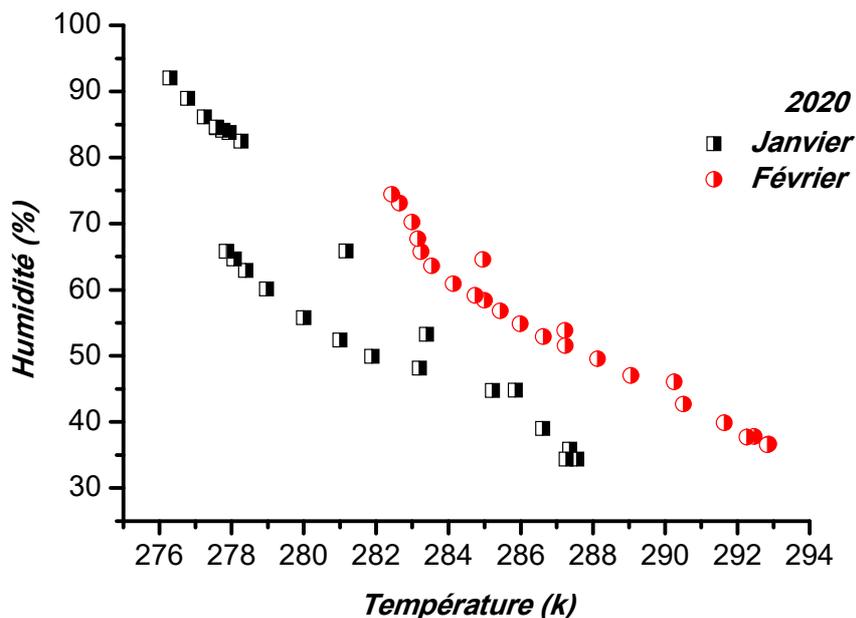


Figure 16: l'humidité relative en fonction de la température ambiante en janvier et février.

La **figure 12** montre la variation de rapport de l'humidité relatif en fonction de température ambiante dans le site de Biskra selon en janvier et février.

On observe que le rapport de température ambiante prend de valeur maximale au midi solaire par contre l'humidité prend de valeur minimal, dans deux mois on cible le rapport $(T/T_0)=1.065$, et pour l'humidité relative prend les valeurs minimale, soit $(H_r/100) = 0.3$.

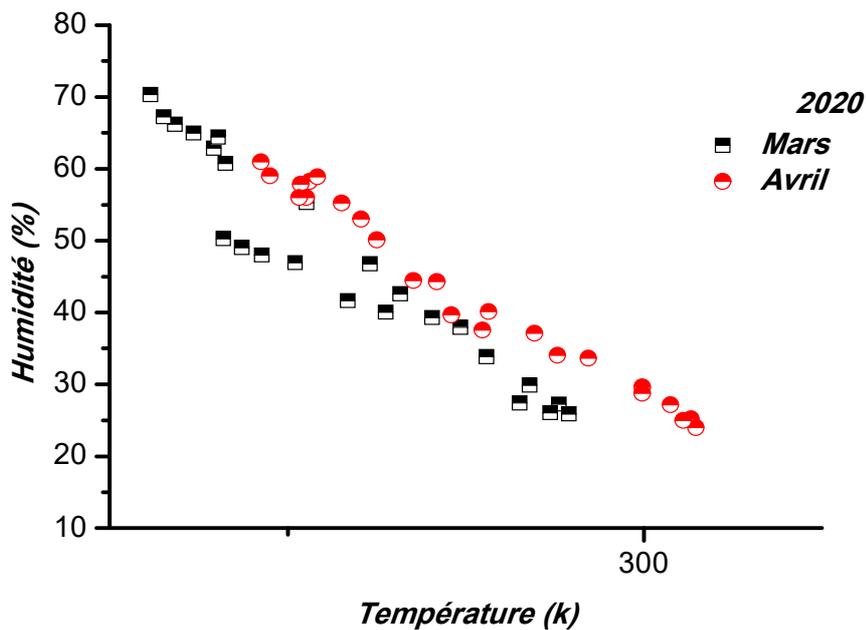


Figure 17: l'humidité relative en fonction de la température ambiante en mars et avril.

La **figure 13** montre la variation de rapport de l'humidité relatif en fonction de température ambiante dans le site de Biskra selon en mars et avril, On observe que le rapport de température ambiante prend de valeur maximale au midi solaire par contre l'humidité prend de valeur minimal, dans deux mois on cible le rapport $(T/T_0)=1.094$, et pour l'humidité relative prend les valeurs minimale, soit $(H_r/100) = 0.8$.

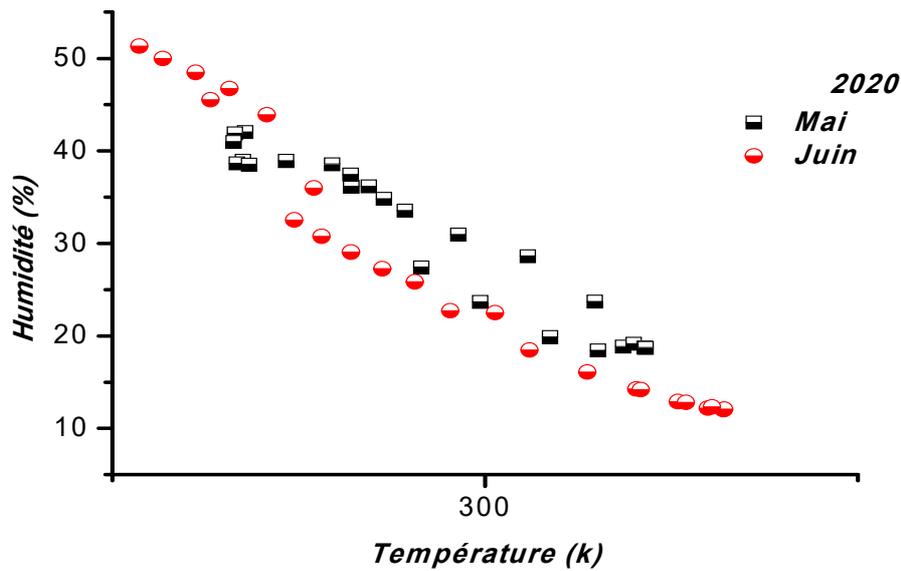


Figure 18:l’humidité relative en fonction de la température ambiante en mai et juin.

La figure 14 montre la variation de rapport de l’humidité relatif en fonction de température ambiante dans le site de Biskra selon mars et avril.

3.3. Variation de la température ambiante en fonction de la vitesse de vent dans six mois (2020)

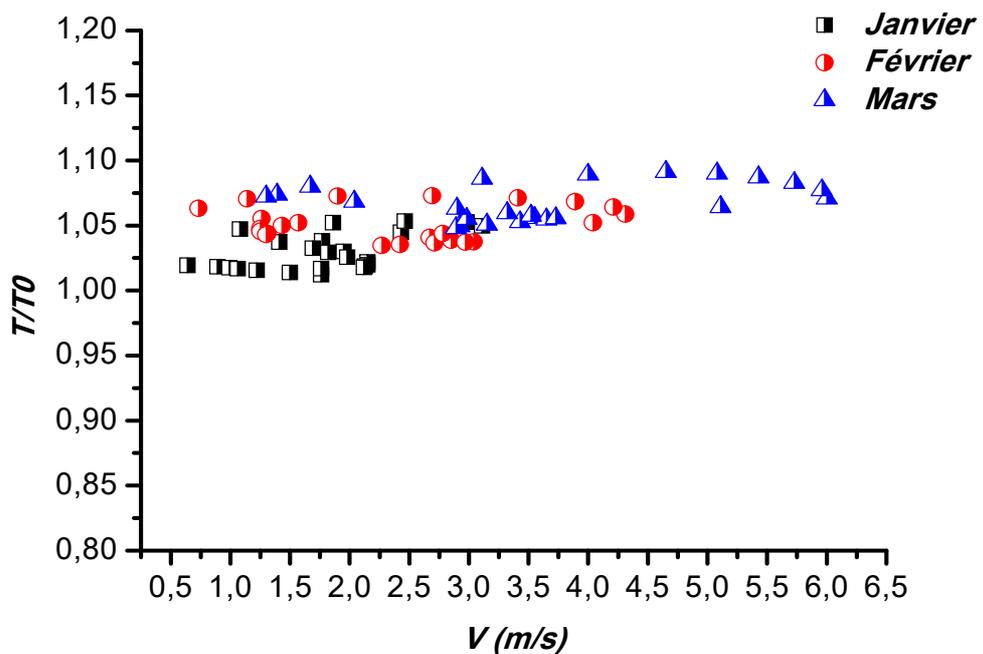


Figure 19:la température ambiante en fonction de la vitesse de vent (hiver).

La **figure 15** montre la variation de rapport de température ambiante en fonction de la vitesse de vent dans le site de Biskra selon les trois mois reliés à la saison d'hiver.

On observe que le rapport de température ambiante et la vitesse de vent prend de valeur maximale au midi solaire pour chaque mois de la saison.

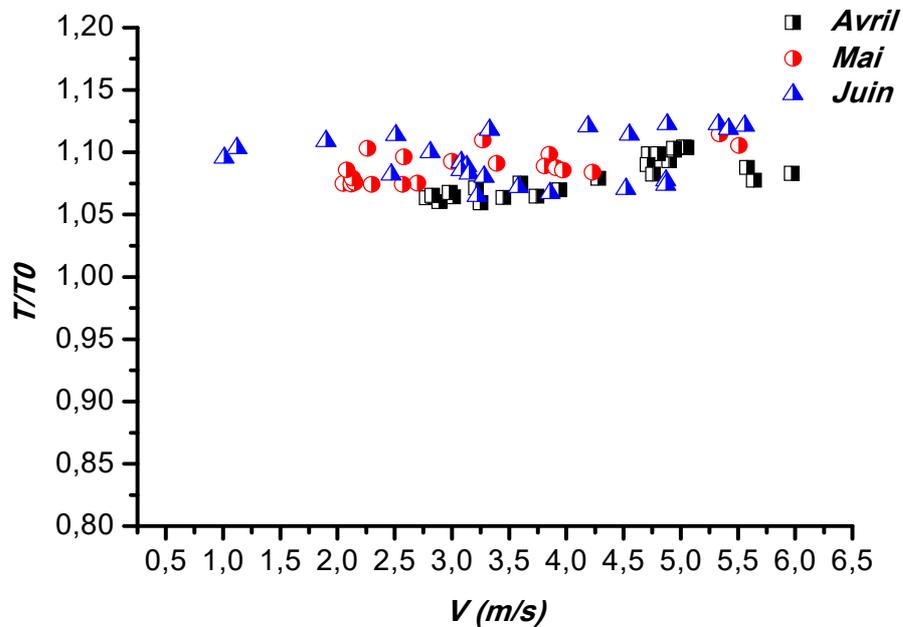


Figure 20: la température ambiante en fonction de la vitesse de vent (Printemps).

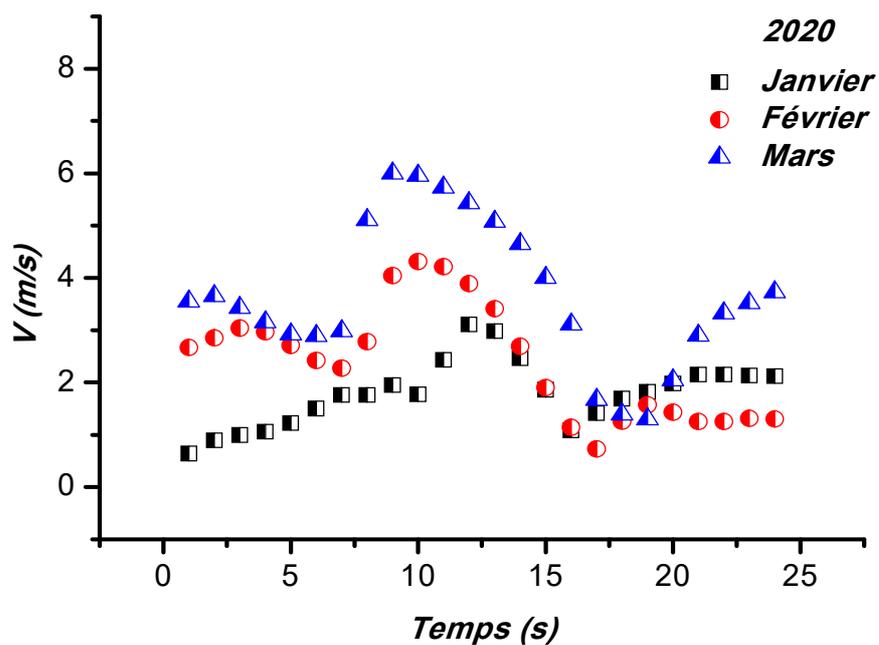


Figure 21: la vitesse de vent en fonction de temps (hiver).

Les figures IV.9 représentent la variation de la vitesse de vent selon le temps, On observe que la vitesse de vent prend une forme plus au mois sinusoïdale au long de la journée, Et nous avons remarqué qu'il prend la valeur maximale au mois de mars.

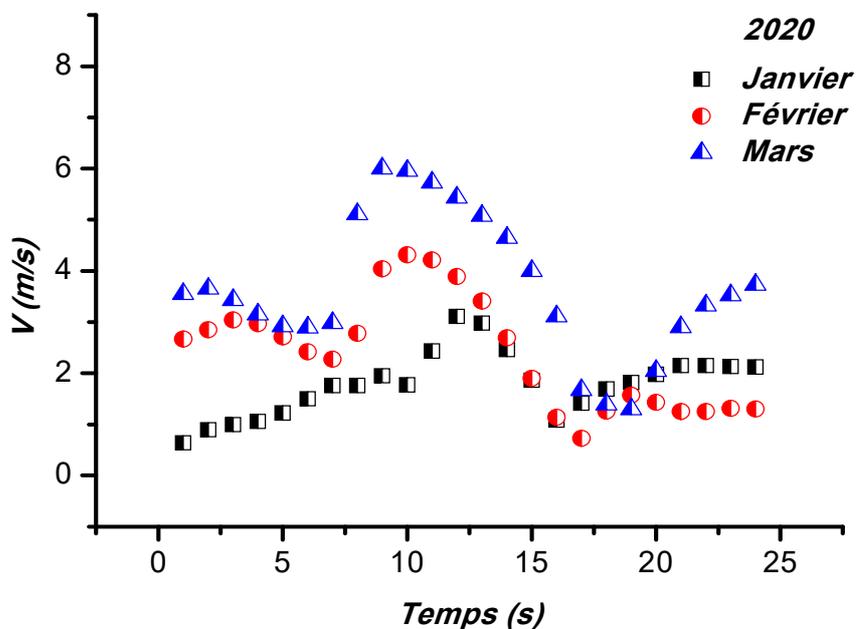


Figure 22: la vitesse de vent en fonction de temps (Printemps).

Les figures 18 représentent la variation de la vitesse de vent selon le temps, On observe que la vitesse de vent prend une forme plus au mois sinusoïdale au long de la journée, Et nous avons remarqué qu'il prend la valeur maximale au mois de mai.

3.4. Variation de la pression en fonction de la vitesse de vent dans six mois (2020) :

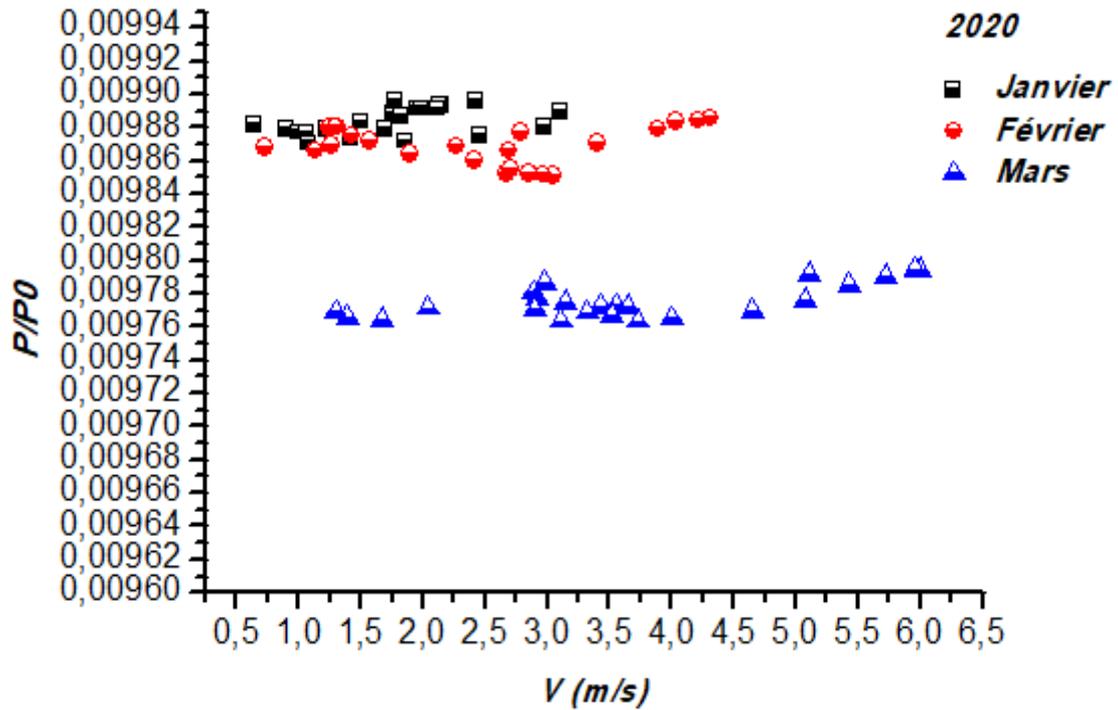


Figure 23 : Evolution de la pression selon la vitesse de vent (hiver).

Les figures 19 représentent la variation de la pression selon la vitesse de vent et On remarque que le rapport de pression est souvent élevé en hiver.

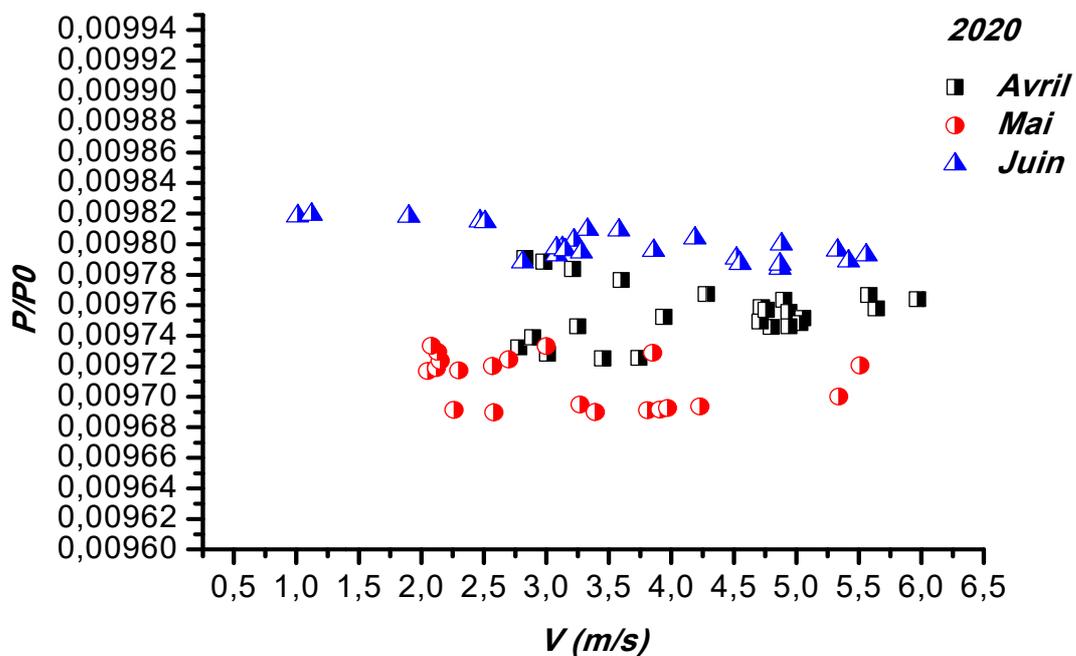


Figure 24: Evolution de la pression selon la vitesse de vent (Printemps).

Les figures 20 représentent la variation de la pression selon la vitesse de vent, On observe que le rapport de la pression prend de valeur maximale au mois de juin.

3.5. Les Erreur du rayonnement solaire :

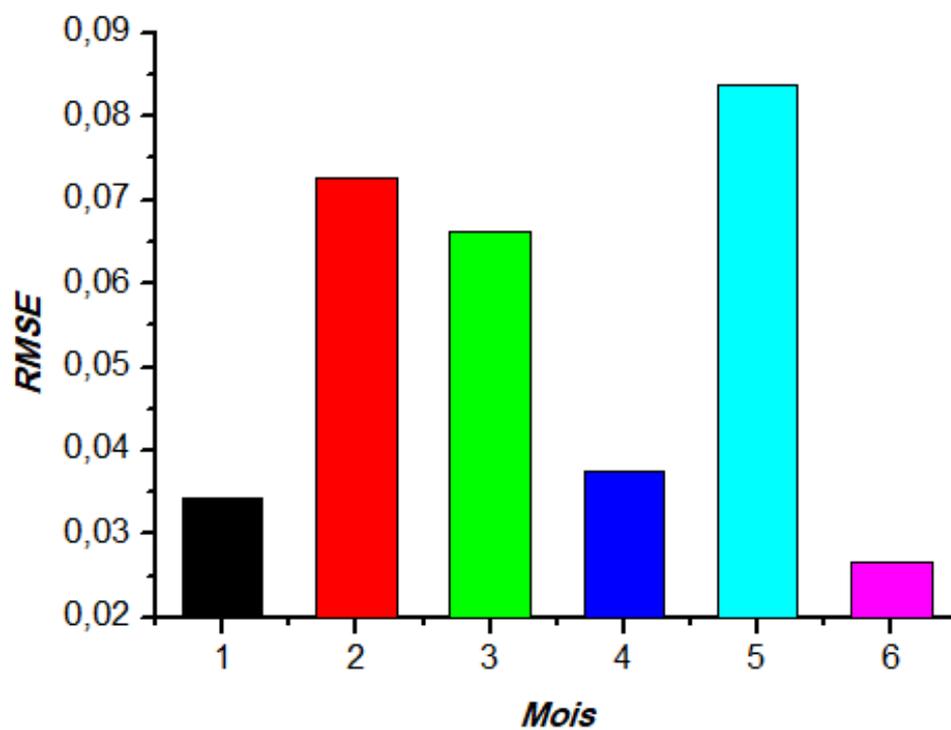


Figure 25: Variation de (RMSE) selon les six mois de (2020)

On observe que RMSE sont données un bonne résultat dans les mois de Janvier,juin tel que prend respectivement les valeurs suivant RMSE : 0.034, 0.026.

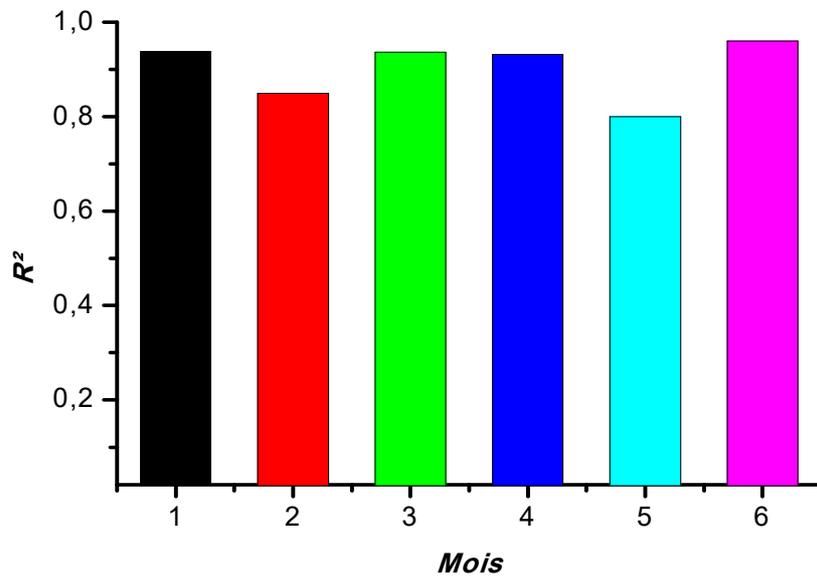


Figure 26:Variation du coefficient de détermination (R2) selon les six mois de (2020)

La figure 22 représente des barres qui traduisent les valeurs de coefficient de détermination R2 selon les six mois de 2020. On observe que R2 sont données un bonne résultat dans les mois de Janvier, mars, avril et juin tel que le coefficient de détermination prend respectivement les valeurs suivant : 0.95, 0.96, 0.968, 0.97.

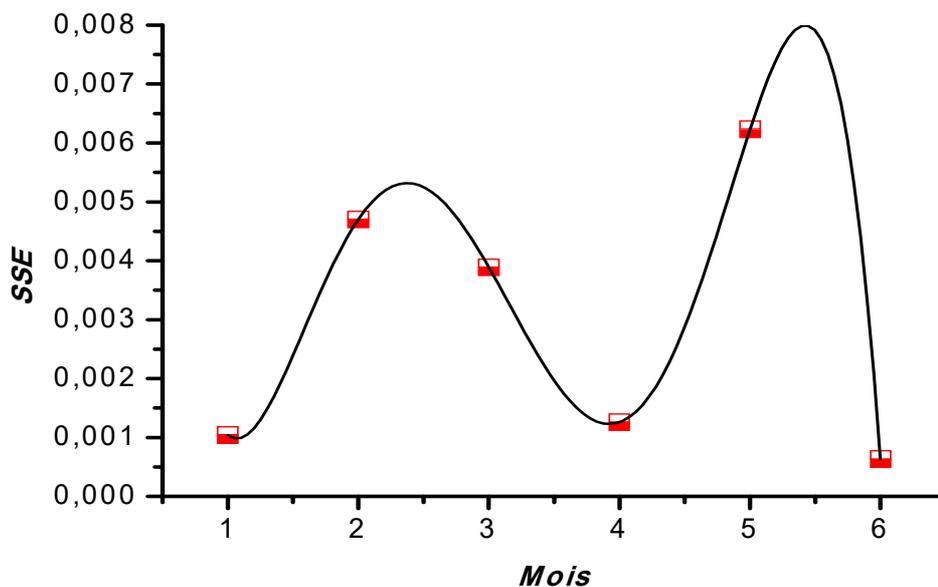


Figure 27:Variation de (SSE) selon les six mois de (2020)

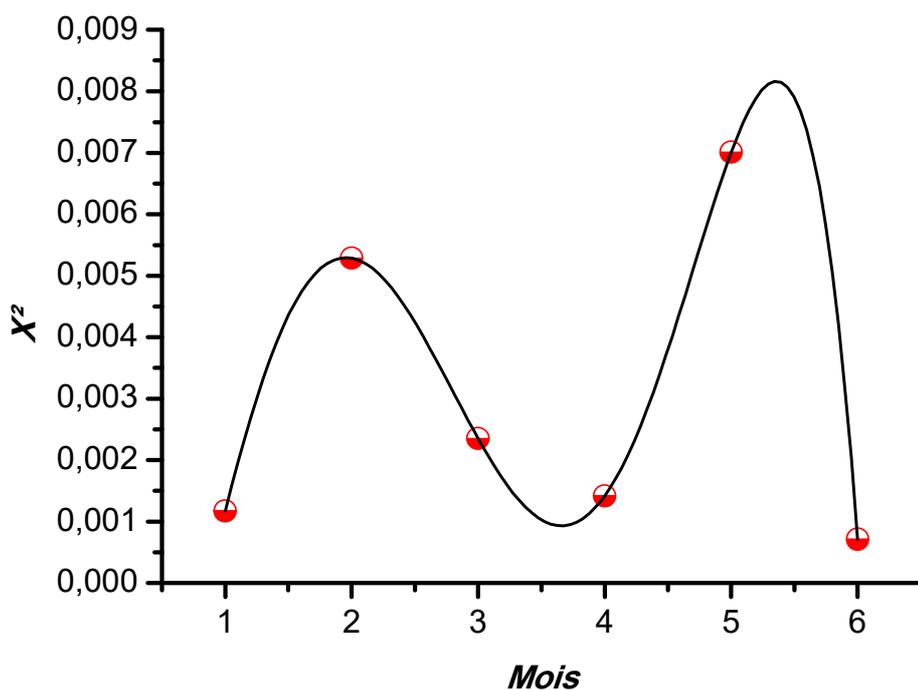


Figure 28:tests du chi carré (χ^2) selon les six mois de (2020)

La figure 23 et la figure 24 exprimer la variation des erreurs SSE, χ^2 en les six mois de 2020, on remarque qu'il y a une correspondance presque parfaite entre les deux, Ils prennent une valeur maximale en mai (0.0077), et la valeur minimal en Janvier, mars, juin (0.0011, 0.001, 0.0005), a partir dans ce contexte en juger que les valeurs minimal est représenter le bonne résultat.

Conclusion

La moyenne mensuelle du rayonnement solaire globale pour la région de Biskra a été estimée en utilisant plusieurs modèles, dans ces modèles plusieurs grandeurs ont été utilisées à savoir la température moyenne de l'air, l'humidité relative moyenne de l'air et la saison, la pression, le vent.

Les mesures du rayonnement global coïncident avec les valeurs calculées par les différents modèles.

Alors une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles estimées par les différents modèles est très remarquable, ce qui nous mène donc à dire, que ces modèles peuvent être utilisés pour estimer l'irradiation solaire globale pour les endroits avec des climats similaires à ceux d'un endroit comme Biskra.

Conclusion Général

L'énergie solaire est l'une des plus importantes parmi les diverses sources d'énergies possibles.

Les besoins et la possibilité d'exploitation de l'énergie solaire sont directement liés aux conditions climatiques.

Une connaissance précise de distribution de la radiation solaire à un endroit géographique donné est d'une importance majeure pour le développement des dispositifs d'énergie solaires et pour l'évaluation de leurs performances.

Le but de ce travail est d'appliquer des différents modèles au site de Biskra pour estimer l'irradiation solaire globale et de faire une étude comparative entre les résultats obtenus.

Les travaux rencontrés qui sont analysés dans la littérature relatifs à la modélisation du rayonnement solaires, montre une diversité des modèles. Il y'en a ceux qui sont basés sur des données expérimentales propres aux sites étudiés et puis ceux qui sont basés sur la simulation. Mais pour chaque cas le modèle peut être amélioré ou remis en question ; son lieu et domaine de validité peuvent être clairement aperçus. Le traitement des données est effectué sur des mesures choisies couvrant l'année 2020, collectées chaque une heure pour le site de Biskra. Toutes ces étapes permettent de choisir de modèle adéquat en fonction de rapport de température ambiante, pression, la vitesse de vent, humidité relative et l'angle d'hauteur du soleil. Notre étude qui est en bon accord avec ceux donnés par le modèle élaboré, il y'a une concordance.

Le présent travail est réparti en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous avons exposé quelques connaissances de base sur le soleil, nous avons fait une répartition du rayonnement solaire à la limite extérieure de l'atmosphère et on a évalué les différentes modifications que subisse le rayonnement solaire en traversant la couche atmosphérique.

Au second chapitre nous avons présenté des différents modèles afin d'estimer le rayonnement solaire globale en utilisant différents paramètres climatiques.

Dans le troisième chapitre, on a présenté une étude théorique et expérimentale.

Le dernier chapitre est réservé aux résultats obtenus par l'application de ces modèles et à une étude comparative entre les résultats obtenus.

Références :

- [1] **Géométrie solaire sur site** Internet.<http://www.outilssolaires.com/Glossaire/spin-geometrie.htm>(consulté le 22/05/2009).
- [2] **M. Belhadj Mohammed** « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome» Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Bechar (2008).
- [3] **M. El-Metwally**, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 67, 1331 (2005).
- [4] **M, Capderou**. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger, (1985).
- [5] **M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche**, « Conception et Validation d'un Programme sous Excel pour L'estimation du Rayonnement Solaire Incident en Algérie ». Cas d'un Ciel Totalemment Clair, Revue des Energies Renouvelables Vol, (2008).
- [6] **Z. Benjellouli** « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire » mémoire de magistère université de Bechar (2009).
- [7] **N. Debili** «Etude et optimisation en environnement Matlab/ Simulink d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister, Université de Constantine (2015).
- [8] **Claude Delorme**, « Gisement solaire » G.D.T.A (1987), texte imprimé à partir du site : <http://catalogue-bibliothèque.upmc.fr> (Sorbonne Université), consulté le 25/05/2018 à 21 h 11. .
- [9] **M. Salmi**, «Contribution à La Quantification De L'irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques», Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif (2012).
- [10] **Anne Labouret et Michel Villosz**. « Energie solaire photovoltaïque », Edition Le moniteur, (2005).
- [11] **Meziani Fariza** « Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG », mémoire de magister en électronique, université Mouloud Maaméri de Tizi Ouzou.
- [12] **J, Bernard**. « Energie solaire calculs et optimisation », Ellipse Edition Marketing, (2004).
- [13] **Daoudi Ahmed, Hadadji Moustafa**, « Calcule du rayonnement solaire pour une surface inclinée (cas d'un site situé à Ouargla) », mémoire d'ingénieur d'état, Université Kasdi Merbah Ouargla, (2009).
- [14] **Raud René**, « Capteur solaire thermique concentrateur a conduite manuelle », Association SOLEIL & VAPEUR, (2007).

- [15] **Yves Jannot.** « Thermique solaire ». Paris (2007).
- [16] **M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche,** « Conception et Validation d'un Programme sous Excel pour L'estimation du Rayonnement Solaire Incident en Algérie ». Cas d'un Ciel Totalement Clair, Revue des Energies Renouvelables Vol, (2008).
- [17] **Y.ATTAF,** 'Détermination du rayonnement solaire globale par imagerie météoat', Thèse de Magister en Automatique Industrielle, Université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2003.
- [18] **J.A. Duffie, and J.W. Beckman,** Solar Engineering of Thermal Processes, 2ed, Inc, 1991et 3rd Ed. John Wiley and Sons, 2006.
- [19] **R. PosadilloR. López** Luque Evaluation of the performance of three diffuse hourly irradiation models on tilted surfaces according to the utilizability concept. Energy Conversion and Management Volume 50, Issue 9, September 2009, Pages 2324-2330.
- [20] **N. Varado,** « Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Benin », thèse de Doctorat en Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement, à l'INPG, soutenue le 28 septembre 2004.
- [21] Le jour solaire vrai et Jour solaire moyen sur site Internet <http://www.cosmovisions.com>. (Consulter le 18/06/2009).
- [22] Z.MERDAOUI, "caractérisation radiométrique des sites,mémoire de magister," Blida, 2007.
- [23] O. Joy Emagbetere & A. Emmanuel Ogujor Michael S. Okundamiya, "Evaluation of various global solar radiation models," International Journal of Green, vol. VOL. 13, no. N° 5, 505–512, 2016.
- [24] J. O. Adepitan, A. B Rabiou, E. O Falayi, "Empirical models for the correlation of global solar radiation with meteorological data for Iseyin, Nigeria," vol. 3, no. 9, 2008.
- [25] 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.
- [26] D. Bensahal* and A. Yousfi ' Hourly Air Temperature Modeling Based on Atmospheric Pressure, Global Solar Radiation and Relative Humidity Data'' Laboratory of Mechanic, Faculty of Technology, University of Laghouat, Algeria 2018.
- [27]F. Chabane et al, 'Predictions of solar radiation distribution Global, direct and diffuse light on horizontal surface' Regular Article, Université Mohamed Khider Biskra 2016.
- [28] F.Chabane, ' Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie

solaire', thèse doctorat en sciences en Génie Mécanique 2015.