



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétiques

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**Mr. Aymen BOUTALBI**

Le : mardi 9 juillet 2019

## **Prédiction de rayonnement solaire global sur le plan horizontal en fonction de la pression, humidité relative et de la température ambiante.**

---

### Jury :

Dr.	Arfaoui BEN ARFAOUI	MAA	Université de Biskra	Président
Dr.	Foued CHABANE	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Abdelghani LAKROUNE	MAA	Université de Biskra	Examineur



## *Remerciements*

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

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

*Je remercie Dr.Arfaoui Ben Arfaoui pour avoir bien voulu accepter de présider le jury.*

*Je remercie Dr. Abdelghani Lakroune, d'avoir accepté d'examiner ce mémoire et d'être membre du jury.*

*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.*

*Aymen Boutalbi.*

## *Dédicaces*

Je dédié mon travail à qui m'ont donné la

vie :

Mon père et ma mère

Tous mes frères : A.halim, Wafa, Moussa,  
Awatif, Nesro et la petite sœur Achwak

Toute ma famille.

Tous mes proches.

Mes amies: Ilyas, Okba, Wail, Ayoub,  
Yousef.

Tous mes amis et connaissances sans  
exception.

Tous ceux qui m'ont aidé et encouragé.

Toute la promotion génie mécanique  
énergétique.

Aymen Boutalbi.

### Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Nomenclature.....	III
List des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VIII
Introduction général.....	1

### Chapitre I : Gisement solaire

I.1.Introduction .....	3
I.2.L'énergie solaire .....	3
I.2.1.Avantages et inconvénients de l'énergie solaire .....	3
I.3.Le gisement solaire en Algérie .....	4
I.4.Le soleil .....	5
I.4.1.Distance Terre-soleil .....	5
I.5.Constante solaire .....	6
I.6.Le rayonnement solaire .....	6
I.7.Les différents types de rayonnement .....	7
I.7.1.Rayonnement extraterrestre .....	8
I.7.2.Rayonnement solaire en atmosphère terrestre .....	8
I.8.Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère .....	9
I.8.1.Formation de l'atmosphère terrestre .....	9
I.8.2.Régions atmosphérique .....	9
I.8.2.1.La troposphère .....	10
I.8.2.2.La stratosphère .....	10
I.8.2.3.La mésosphère .....	10
I.8.2.4.La thermosphère .....	10
I.9.Mouvement de la Terre .....	10
I.9.1.Mouvement de rotation .....	11
I.9.2.Mouvement de translation.....	11
I.10.coordonnées géographiques terrestres .....	12
I.11.Les coordonnées horaires .....	12
I.12.Les coordonnées horizontales .....	14

## ***Sommaire***

---

I.13.Temps solaire .....	15
I.13.1.Temps universel (TU) .....	15
I.13.2 .Temps solaire local (TSL).....	15
I.13.3 Temps solaire vrai (TSV) .....	15
I.13.4.Le temps solaire moyen (TSM) .....	15
I.13.5 .Temps légal .....	16
I.14.Conclusion : .....	16

### **Chapitre II : Etat de l'art**

II.1.Introduction: .....	17
II.2.Les modèle de rayonnement solaire .....	17
II.2.1.Modèle Foued CHABANE .....	17
II.2.2.Modèle de Lacis & Hansen .....	17
II.2.3. Modèle de Zang et al.....	19
II.2.4.Relation d'A. Sambo .....	19
II.2.5.Modèle de L. Imane .....	19
II.2.6.Modèle de Perrin-Brichambaut .....	20
II.2.7.Modèle de K. Zina .....	22
II.2.8.Modèle de Foued CHABANE et Al .....	23
II.2.9.Modèle de Bekkouche.....	24
II.2.10.Modèle D. Bensahal and A. Yousfi .....	25
II.2.11.Modèle de Kaplanis et Kaplani .....	25
II.2.12.Modèle d'Al-Salaymeh .....	26
II.2.13.Modèle d'Eftimie .....	26
II.3.Conclusion .....	27

### **Chapitre III : Etude théorique et experimental**

III.1. Introduction .....	28
III.2. Modélisation du rayonnement solaire global sur le plan horizontal .....	28
III.3. Méthodologie et présentation de site.....	28
III.3.1. Les caractéristiques climatiques de la ville de Biskra .....	28
III.4. Description du banc d'essai .....	30
III.4.1. Les instruments de mesure .....	30
III.4.2. Le site d'infoclimat .....	31
III.4.2.1.Définition de site .....	31
III.4.3 .Originpro version 9 .....	32

## *Sommaire*

---

III.4.4.Explication de l'expérience .....	34
III.5.Les Erreur du rayonnement solaire : .....	37
III.5.1. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) .....	37
III.5.2. Somme des erreurs de carré (SSE) .....	37
III.5.3. Tests du chi carré ( $\chi^2$ ) .....	38
III.5.4. Erreur relatif moyenne (ERM) .....	38
III.6.Organigramme principal.....	39
III.7.Conclision.....	40

### **Chapitre IV :Résultat et interprétation**

IV.1. Introduction .....	41
IV.2. Variation du rayonnement solaire global en fonction de temps selon les quatre saisons .....	41
IV.2.1. Comparaison entre les données de F Chabane (2018) et le modèle proposé à saison de l'hiver : .....	41
IV.2.2. Comparaison entre les données de F. Chabane (2018) et le modèle établis suivant la saison de printemps: .....	42
IV.2.3. Comparaison entre les données de F.Chabane (2018) et modèles proposés à saison d'Été : .....	43
IV.2.4. Comparaison entre les données de F.Chabane (2018) et modèles proposés à saison d'Automne : .....	44
IV.3.Variation de la température ambiante en fonction l'humidité relative dans les quatre saisons.....	45
IV.4. Variation de la pression en fonction à tous les mois (2018).....	47
IV.5. Comparaison de rayonnement solaire entre les données de F.Chabane (2018) - modèles proposés –mesuré (2019) : .....	48
IV.6.Les erreur du rayonnement solaire:.....	49
IV.7.Conclusion : .....	50

### **Nomenclature**

a : azimut soleil	(°)
Dh : Moyenne mensuelle par jour de l'irradiation diffuse	(W/m <sup>2</sup> )
Gh : Moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale	(W/m <sup>2</sup> )
Gh0 : Irradiation extraterrestre calculée sur plan horizontal	(W/m <sup>2</sup> )
DI : Durée d'insolation	(heur)
KD : Fraction de l'irradiation diffuse	(-)
KT : Indice de clarté	(-)
Ha : Humidité absolue	(%)
HR : Humidité relative	(%)
h : angle horaire soleil	(°)
R <sup>2</sup> : résidu	(-)
Ta : Température ambiante	(°C)
Tm : Température moyenne	(°C)
Tmax : Température maximale durant le mois considéré	(°C)
Tmin : Température minimale	(°C)
TSV : Temps solaire vrai	(heur)
TSM : Temps solaire moyen	(heur)
TU : Temps universel	(heur)
TL : Temps légal	(heur)
t : Nombre de jours pluvieux par mois	(-)
Ψ <sub>i j</sub> : Facteur climatique	(-)
ω <sub>0</sub> : Angle horaire du lever du soleil	(°)
φ : Latitude du lieu	(°)
L : longitude	(°)
δ : La déclinaison du soleil	(°)
w : L'angle horaire	(°)
I <sub>SC</sub> : est la constante solaire extraterrestre	(W/m <sup>2</sup> )
I <sub>0</sub> : la constante solaire moyenne	(W/m <sup>2</sup> )
n <sub>j</sub> : le numéro de jour dans l'année	(-)
α <sub>0</sub> : Le coefficient correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone	(-)
U <sub>w</sub> : l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu	(cm)



## *Nomenclature*

---

$m_a$ : la masse d'air corrigée	(kg)
$m_r$ : la masse d'air optique relative	(kg)
$\alpha_w$ : représente le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau	(-)
$X_w$ : l'épaisseur d'eau condensable	(cm)
$P$ : la pression atmosphérique	(atm)
$G$ : le rayonnement mondial quotidien moyen mensuel sur une surface horizontale	(W/m <sup>2</sup> )
$G_0$ : le rayonnement extraterrestre quotidien moyen mensuel sur une surface horizontale une surface horizontale	(W/m <sup>2</sup> )
$t$ : l'équation du temps	
$\Delta H$ : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré	

Liste des figures

**Chapitre I**

<b>Figure I.1 :</b> Carte du monde de l'enseillent moyen annuel.....	4
<b>Figure I.2:</b> Distance terre –soleil.....	5
<b>Figure I.3 :</b> La structure du soleil.....	6
<b>Figure I.4:</b> Spectre d'absorption du rayonnement solaire au niveau de la mer .....	7
<b>Figure I.5:</b> Les composants du rayonnement solaire.....	8
<b>Figure I.6:</b> Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil.....	11
<b>Figure I.7 :</b> L'angle d'inclinaison de la terre .....	12
<b>Figure I.8:</b> Cordonnées géographiques terrestres.....	12
<b>Figure I.9:</b> Coordonnées horaires.....	13
<b>Figure I.10:</b> Repérage du soleil.....	14
<b>Figure I.11:</b> Equation du temps en fonction du jour de l'année.....	16

**Chapitre II**

<b>Figure II.1:</b> Rayonnement solaire global sur le plan horizontal selon TSV_(Février). .....	20
<b>Figure II.2:</b> Rayonnement solaire global sur le plan horizontal selon TSV (Mars). .....	20
<b>Figure II.3:</b> Rayonnement solaire global sur le plan horizontal selon TSV_(Avril). .....	20
<b>Figure II.4:</b> Rayonnement global sur un plan horizontal dans le site de Biskra pour 21 Mars	21
<b>Figure II.5:</b> Rayonnement global sur un plan horizontal dans le site de Biskra pour 21 Juin.	21
<b>Figure II.6:</b> Rayonnement global sur un plan horizontal dans le site de Biskra pour 21 September.....	21
<b>Figure II.7:</b> Rayonnement global sur un plan horizontal dans le site de Biskra pour 21 Décembre. ....	22
<b>Figure II.8:</b> Comparaison : L'évolution de rayonnement solaire global « Modèles proposé– Mesurer 2018 – F.Chabane–M-Y.Mechraoui » suivant le mois de Février.....	22
<b>Figure II.9:</b> Comparaison : L'évolution de rayonnement solaire global « Modèles proposé– Mesurer 2018 – F.Chabane–M-Y.Mechraoui » suivant le mois de Mars. ....	23
<b>Figure II.10:</b> Comparaison : L'évolution de rayonnement solaire global « Modèles proposé– Mesurer 2018 – F.Chabane–M-Y.Mechraoui » suivant le mois d'Avril. ....	23
<b>Figure II.11:</b> l'éclairement mondial prédit en fonction de l'éclairement globale mesurée....	24
<b>Figure II.12:</b> Eclairiments estimés par le modèle de Capderou. Ghardaïa 08 juin2006 .....	24
<b>Figure II.13:</b> Eclairiments estimés par modèle de Capderou Ghardaïa 09 juin 2006 .....	24
<b>Figure II.14:</b> Eclairiments estimés par le modèle de Perrin. Batna 27 juin 2003 .....	25

**Figure II.15:** Données mondiales quotidiennes sur le rayonnement solaire avec différentes suggestions modèles de prévision à Amman, en Jordanie, en fonction du temps (jour)..... 26

**Figure II.16:** Rayonnement solaire global quotidien moyen mesuré à Amman, en Jordanie, comparé à l'éclairement énergétique mensuel moyen simulé sur une surface horizontale. .... 26

**Figure II.17:** Horizontal éclairement global. .... 27

**Figure II.18:**Éclairement énergétique global sur une surface inclinée ..... 27

### Chapitre III

**Figure III. 1 :** Température ambiante correspondent la station météorologie du Biskra..... 28

**Figure III.2 :** Vitesse de vent ..... 29

**Figure III.3 :** Pression sur le site du Biskra ..... 29

**Figure III.4 :** Humidité relative à Biskra ..... 30

**Figure III.5 :** Pyranomètre (solarmètre)..... 30

**Figure III.6 :** Hygromètre testo 625..... 31

**Figure III.7 :** la fenêtre de site infoclimat. .... 31

**Figure.III.8 :** Fenêtre d'ouverture l'Originpro version 9. .... 34

**Figure.III.9:** fichier d'Excel version 2007 avec des données du rayonnement Solaire, température ambiant,Hr et la pression..... 35

**Figure.III.10 :** Description l'opération de l'interpolation sur l'Originpro version 9..... 35

**Figure.III.11 :** Analyse opératif pour choisir le modèle le plus fiable..... 36

**Figure.III.12 :** Fenêtre de l'interpolation. .... 36

**Figure.III.13 :** Dialogue de thème pour une fonction choisir (Exp2PMod1). .... 36

**Figure.III.14 :** Interpolation direct de fonction (Exp2PMod1) sur L'Originpro. .... 37

**Figure.III.15 :** Organigramme principale ..... 40

### Chapitre IV

**Figure. IV. 1 :** Rayonnement solaire global suivant le modèle établis (Hiver). .... 41

**Figure. IV. 2 :** Rayonnement solaire global suivant les donnés de F. Chabane (Hiver)..... 41

**Figure. IV. 3 :** Rayonnement solaire global suivant le modèle établis (Printemps). .... 42

**Figure. IV. 4 :** Rayonnement solaire global suivant les donnés de F. Chabane (Printemps).. 42

**Figure. IV. 5 :** Rayonnement solaire global suivant le modèle établis (Été). .... 43

**Figure. IV. 6 :** Rayonnement solaire global suivant les donnés de F. Chabane (Été)..... 43

**Figure. IV. 7:** Rayonnement solaire global suivant le modèle établis (Automne)..... 44

**Figure. IV. 8:** Rayonnement solaire global suivant les donnés de F. Chabane (Automne). ... 44

**Figure. IV. 9:** La température ambiante en fonction l'humidité relative (hiver). .... 45

**Figure. IV. 10:** La température ambiante en fonction l’humidité relative (Printemps). ..... 46

**Figure. IV. 11:** La température ambiante en fonction l’humidité relative (Été). ..... 46

**Figure. IV. 12:** La température ambiante en fonction l’humidité relative (Automne). ..... 47

**Figure. IV. 13:** Evolution de la pression selon le temps (tous les mois de 2018). ..... 47

**Figure. IV. 14:** Comparaison de rayonnement solaire global « Modèles établis .....  
– Mesurer 2019 – F.Chabane 2018 » le mois de Février. .... 48

**Figure. IV. 15:** Comparaison de rayonnement solaire global « Modèles établis .....  
– Mesurer 2019 – F.Chabane 2018 » le mois de mars. .... 48

**Figure. IV. 16:** Comparaison de rayonnement solaire global « Modèles établis .....  
– Mesuré 2019 – F.Chabane 2018 » le mois d’avril. .... 48

**Figure. IV. 17:** Variation de (RMSE) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) selon tout les  
mois de 2018. .... 49

**Figure. IV. 18:** Variation de (SSE) et tests du chi carré ( $\chi^2$ ) selon tout les mois de 2018. .... 49

**Figure. IV. 19:** Erreur relatif au midi solaire entre les valeurs mesuré 2018 du rayonnement  
global et le modèle proposé suivant tout les mois (2018). ..... 50

List des tableaux

**Tableau I.1:** Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques .....5

**Tableau III.1 :** Les Valeurs des coefficients A, B et  $R^2$  de modèle proposé selon tout les mois de Janvier .....33

**Tableau III.2 :** Les paramètres de h, Ta, Pr, Hr,  $(I/I_0)_{exp}$  et  $(I/I_0)_{modèle}$  selon le mois de Février.....33

**Tableau III.3 :** Les paramètres de h, Ta, Pr, Hr,  $(I/I_0)_{exp}$  et  $(I/I_0)_{modèle}$  selon le mois de Mars.....34

**Tableau III.4:** Les paramètres de h, Ta, Pr, Hr,  $(I/I_0)_{exp}$  et  $(I/I_0)_{modèle}$  selon le mois d'Avril.34

**Tableau III.5 :** Les erreurs de rayonnement solaire global entre model proposé et mesuré (Dr f.chabane) en fonction tout les mois de 2018.....38

**Tableau III.6 :** Les erreurs de rayonnement solaire global entre model proposé et mesuré (2019) en fonction des mois (Fev, Mars, Avr).....39

*Introduction*  
*Général*

# Introduction Général

L'énergie solaire est une source majeure du système terrestre et atmosphérique non infini du tout, il est également exempt de toute pollution. En effet, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie demandent une légère maintenance et présentent une bonne fiabilité de fonctionnement, une autonomie de plus en plus accrue, une résistance extrême aux conditions naturelles.

L'énergie solaire a connu un développement majeur dans ses applications telles que les systèmes photovoltaïques ou les systèmes thermiques tels que le chauffage de l'eau et d'autres applications.

L'utilisation de cette source d'énergie offre une réelle alternative et apporte des solutions globales et durables aux défis environnementaux, mais les besoins et le potentiel de l'énergie solaire directement liés aux conditions climatiques.

L'énergie solaire est principalement reflétée par la chaleur qui diffusée vers la terre au trois composantes : global, direct et diffus.

En Algérie, le rayonnement solaire global est différent selon les régions (l'altitude au niveau de la mer) est l'un des facteurs déterminants, la région sud-algérienne présentant des caractéristiques exceptionnelles pour toutes les formes d'énergie solaire, qui est considérée comme l'une des plus grandes sources d'énergie au monde, le recours au développement de ce type d'énergie est un choix stratégique pour notre pays.

A cet effet, nous avons consacré cette étude à l'utilisation un modèle de calcul du rayonnement solaire global sur le site de Biskra. Ce modèle nous permet de faire une étude comparative avec les données expérimentales obtenues et les données de Dr.Foued Chabane (2018).

Cette étude est constituée de quatre chapitres :

Le premier chapitre comporte des notions fondamentales astronomiques qui donnent des informations et des renseignements très utiles sur le gisement solaire.

Le deuxième chapitre comporte l'ensemble des modèles d'éclairement (le rayonnement global, direct et diffus sur un plan incliné et horizontal).

## ***Introduction Général***

---

Le troisième chapitre est basé sur l'étude expérimentale et théorique du rayonnement solaire global sur plan horizontal, Cette étude est employée pour valider les modèles qui permettent de prévoir la variation du rayonnement solaire global en fonction de l'humidité relatif, température ambiante, la pression et la hauteur de soleil.

Le dernier chapitre consiste à afficher les données et à discuter les résultats expérimentaux obtenus avec nos données expérimentales et les données expérimentales de Dr.F Chabane (2018).



*Chapitre I :*

*Gisement solaire*

**I.1.Introduction :**

Dans ce chapitre on présente une synthèse bibliographique sur le rayonnement solaire. La première est consacrée à l'énergie solaire comme étant une énergie renouvelable à savoir ces avantages, ces inconvénients et ces applications.

De même, sur le rayonnement solaire (la constante solaire, les mouvements de la terre...etc.)

**I.2.L'énergie solaire :**

L'énergie solaire est une lumière rayonnante et la chaleur du soleil qui sont exploitées à l'aide d'une gamme de technologies en constante évolution, telles que le chauffage solaire, les systèmes photovoltaïques, l'énergie solaire thermique, l'architecture solaire [1,2].

C'est une source importante d'énergie renouvelable et ses technologies sont généralement caractérisées comme étant un système solaire passif ou un système solaire actif, en fonction de la manière dont elles capturent et distribuent l'énergie solaire ou la convertissent en énergie solaire. Les techniques solaires actives comprennent l'utilisation de systèmes photovoltaïques, l'énergie solaire concentrée et le chauffage de l'eau solaire pour exploiter l'énergie. Les techniques solaires passives consistent à orienter un bâtiment vers le soleil, à sélectionner des matériaux ayant une masse thermique favorable ou des propriétés de dispersion de la lumière favorables, et à concevoir des espaces dans lesquels l'air circule naturellement.

La grande quantité d'énergie solaire disponible en fait une source d'électricité très attrayante. Le Programme de développement des Nations Unies dans son évaluation énergétique mondiale de 2000 a révélé que le potentiel annuel d'énergie solaire était compris entre 1 575 et 49 837 exajoules (EJ). Cette consommation est plusieurs fois supérieure à la consommation mondiale totale d'énergie, qui s'élevait à 559,8 EJ en 2012 [3,4].

**I.2.1.Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :**

L'énergie solaire présente les avantages suivants:

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

Cette énergie présente également les inconvénients suivants :

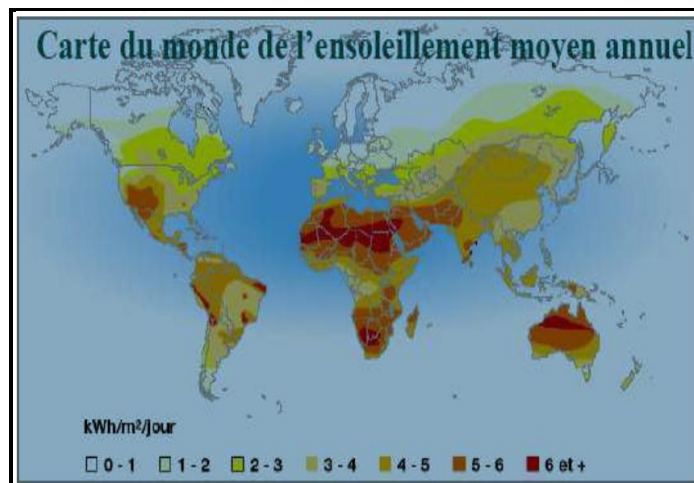
- Les prix de fabrication et d'installation des panneaux sont assez élevés.

- Il est impossible d'obtenir une autonomie énergétique complète par le biais de panneaux solaires seulement [3].

### I.3. Le gisement solaire en Algérie:

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [4].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la (figure I.1) :



**Figure I.1 :** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [5].

L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

Comme évalué par l'Agence Spatiale Allemande (ASA). Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement.

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

Régions	Région côtières	Haute plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau I.1:** Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [6].

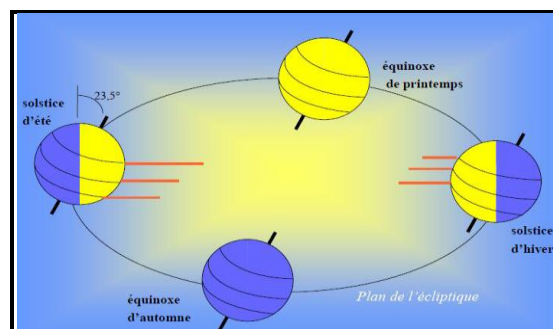
#### I.4. Le soleil :

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.1027 tonnes.

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ( $E=mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de 36.1022 KW. La terre étant à une distance de 150.106 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de 1,8.1014 KW [7].

##### I.4.1. Distance Terre-soleil :

Le soleil est situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la terre .Cette distance varie peu au cours de l'année (+/-1.65 %) car l'excentricité de l'orbite terrestre est peu accentuée ( $e=0.017$ ), d'où la terre suit une révolution elliptique autour du soleil (en réalité elle est légèrement circulaire). La période de révolution est définie a une année. L'angle entre l'axe de rotation de la terre et le plan écliptique est de  $66.55^\circ$ , ce qui donne un angle de  $23.45^\circ$  entre  $-23.45^\circ$  entre l'équateur et le plan de l'écliptique [8].



**Figure I.2:** Distance terre –soleil [9].

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

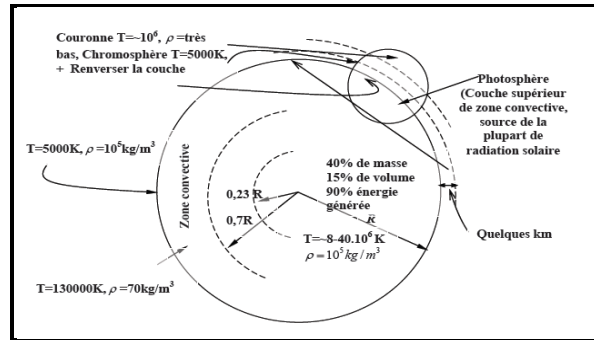


Figure I.3 : La structure du soleil [10].

### I.5.Constante solaire :

C'est le flux solaire moyen reçu par surface orientée perpendiculairement aux rayons solaire en dehors de l'atmosphère terrestre, en ( $\text{W/m}^2$ ). Constante (qui varie pue dans le temps et l'espace). Les mesures effectuées par la NASA à bord des satellites avancent la valeur moyenne de  $1353 \text{ (W/m}^2)$ , certains ouvrages avancent la valeur de  $1390 \text{ (W/m}^2)$  par Claus Frohlich et Christoph Wehrli du centre radiométrique mondial. Si on adopte la valeur moyenne de ( $I=1353 \text{ W/m}^2$ ) l'énergie d'irradiation qui lui correspond en une journée de 8 h est égale à ( $1353.8=10, 824\text{KWh/m}^2$ ) Les mesures récentes faites à l'aide radiomètres embarqués sur satellite (nimbus 7, NOAA 10) ont permis de bien mettre évidence les faibles variations de la constante solaire. Les mesures par satellite ont permis d'établir une formule empirique, d'une précision acceptable, donnant la constante solaire (I) en fonction du jour (j) de l'année [11] :

$$I = I_0 \times [1 + 0.033 \times \cos(0.984 \times j)] \tag{I.1}$$

$I_0$  : constant solaire ( $1367 \text{ w/m}^2$ )

### I.6.Le rayonnement solaire :

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de  $5800 \text{ K}$ , il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de  $0,22$  à  $10 \mu\text{m}$  et se décompose approximativement sur 3 bandes :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ( $< 0.4 \mu\text{m}$ )

- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm)
- 44% dans la bande des infrarouges (> 0,8 μm)

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m<sup>2</sup> cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000 W/m<sup>2</sup> à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu [12].

L'énergie,  $E_{ph}$ , de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  par la relation

$$E_{ph} = \frac{h \times c}{\lambda} \tag{I.2}$$

Où h : est la constante de Planck,  $h = 6,62.10^{-34}$  J.s

c : l'énergie en électronvolts (ev).

$\lambda$  : la longueur d'onde (μm).

### I.7. Les différents types de rayonnement :

Le rayonnement solaire se compose de radiations électromagnétiques émises par le soleil, dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques. Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes infrarouge, visible et ultraviolette, ainsi que la gamme radioélectrique et celles des microondes. La distribution spectrale de ce rayonnement est donnée par la (fig.1.4)

Le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère, dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire et vaut 1367 W/m<sup>2</sup>. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci [13].

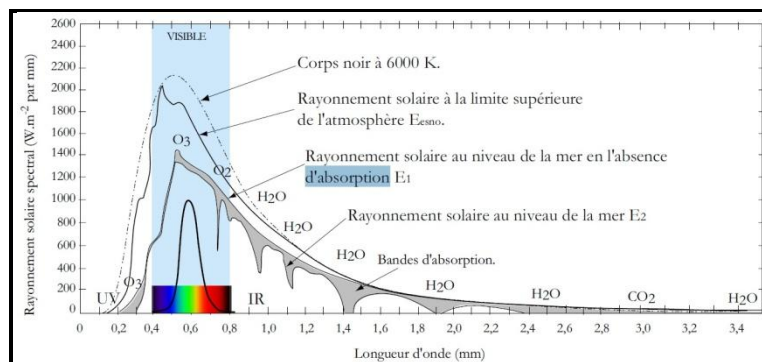


Figure I-4: Spectre d'absorption du rayonnement solaire au niveau de la mer [14].

### I.7.1. Rayonnement extraterrestre :

Le rayonnement solaire extraterrestre couvre un très large domaine de longueur d'ondes. Il ne dépend d'aucun paramètre météorologique, mais il est fonction de quelques paramètres astronomiques et géographique tel que: la latitude du lieu ( $\varphi$ ), la déclinaison solaire ( $\delta$ ), et l'angle horaire au coucher du soleil ( $\omega_0$ ). Sur une surface horizontale, et pour le jour  $n$ , le rayonnement extraterrestre  $G_0$  ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ ) est obtenu à l'aide de l'équation suivante [15] :

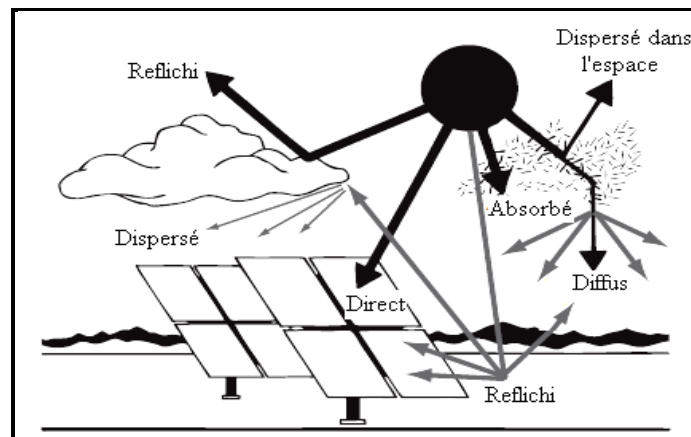
$$G_0 = \left( 24 \times \frac{60}{\pi} \right) \times G_{sc} \left[ 1 + 0.034 \cos\left( \frac{2\pi n}{365} \right) \right] \left[ \omega_0 \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_0) \right] \quad (\text{I.3})$$

$G_{sc}$  : est la constante solaire égale à  $0,0082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{mn}^{-1}$ .

$n$  : est le numéro du jour à partir du premier Janvier.

### I.7.2. Rayonnement solaire en atmosphère terrestre :

Le rayonnement reçu sur l'atmosphère terrestre n'occupe qu'une faible portion du spectre d'ondes électromagnétiques solaire. Il est caractérisé par des longueurs d'ondes comprises entre  $0,2$  et  $2,5 \mu\text{m}$ , il inclut le domaine du visible (ondes lumineuses de  $0,4$  à  $0,8 \mu\text{m}$ ). Les capteurs d'énergie solaire, qui correspondent aux cellules solaires devront donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme d'électrons (fig I.5) [16].



**Figure I.5:** Les composants du rayonnement solaire [17].

En traversant l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé, on distingue plusieurs composantes :

- **Le rayonnement direct** : est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.
- **Le rayonnement diffus** : est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et

peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.

**- Le rayonnement global :** qui est la somme du rayonnement direct et diffus.

Nous exposons dans ce qui suit les expressions et les principales caractéristiques des deux composantes du rayonnement global.

## **I.8.Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère :**

### **I.8.1.Formation de l'atmosphère terrestre :**

Durant le processus de refroidissement de la terre d'énormes quantités, de méthane, d'ammoniac de gaz carbonique, et d'eau furent rejetées du noyau de la terre vers l'extérieur; Ainsi c'est formé la première atmosphère. En agissant comme une serre cette atmosphère a réduit la perte de chaleur de la terre vers l'espace et notre planète demeura ainsi assez chaude pour que puisse naître la vie.

Après environs 4.5 milliards d'années la vapeur d'eau s'est condensée donnant naissance à la formation des océans. Le gaz carbonique se combina à des minéraux et fut absorbé par les océans et fut utilisé par les premiers êtres vivants. L'azote est resté dans l'atmosphère à cause de sa faible réaction avec les autres constituants. Il y a 3 milliards d'années l'atmosphère contenait peu d'oxygène, c'est par des réactions chimiques compliquées entre le méthane, l'ammoniac, l'eau, et le rayonnement solaire que s'est formée une couche d'ozone, cette couche joue un rôle important dans l'évolution de la vie sur terre puisqu'elle empêche les rayons solaire nuisibles à la vie d'atteindre la terre. Les premières plantes apparurent il y a 2 milliards d'années et transformèrent une grande partie du gaz carbonique en oxygène. Ce processus se poursuit toujours et l'atmosphère d'aujourd'hui contient environs 78% d'azote et 21% d'oxygène [18].

L'atmosphère actuelle est composée d'un mélange de gaz et de particules, elle est très mince de sorte qu'on peut représenter son épaisseur relativement à la terre comme la pelure d'une pomme relativement à l'ensemble du fruit. C'est la force d'attraction qui retient l'atmosphère autour du globe.

### **I.8.2.Régions atmosphérique :**

La terre est entourée d'une mince couche gazeuse : l'atmosphère. L'atmosphère joue le rôle de bouclier protecteur pour toutes les espèces vivantes qui habitent à la surface du globe. En outre, elle les isole de l'espace glacé et menaçant et les protège des rayons ultraviolets. L'organisation mondiale de la météorologie (OMM) définit quatre zones successives pour l'atmosphère à savoir la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère. Ce



sont les variations verticales de la température de l'air qui définissent la division de l'atmosphère en ces quatre grandes régions [18].

**I.8.2.1. La troposphère :**

C'est la couche atmosphérique la plus proche du sol, dans laquelle nous vivons. Son épaisseur varie de 7 kilomètres de hauteur au-dessus des pôles, 18 kilomètres au-dessus de l'équateur et environ 13 kilomètres selon les saisons, dans la zone tempérée. La température diminue à mesure qu'on s'élève dans la troposphère, c'est-à-dire à mesure qu'on s'éloigne du sol, atteignant 56 C à la tropopause (zone séparant la troposphère de la stratosphère); l'air près du sol est plus chaud qu'en altitude car la surface le réchauffe.

**I.8.2.2. La stratosphère :**

C'est la couche atmosphérique au-dessus de la troposphère, dans la stratosphère on trouve la couche d'ozone. Sa formation il y a 3 milliards d'années, a permis le développement de la vie sur notre planète. Car elle filtre une partie des rayons ultraviolets du soleil qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère. Les équations chimiques suivantes décrivent la formation de la molécule d'ozone.

**I.8.2.3. La mésosphère :**

Elle se trouve juste au-dessus de la stratosphère. Dans cette couche, la température recommence à décroître avec l'altitude pour atteindre un minimum de -80 degrés Celsius à une altitude d'environ 80 kilomètres. Les poussières et particules qui proviennent de l'espace (les météores) s'enflamment lorsqu'elles entrent dans la mésosphère à cause de la friction de l'air. Ce phénomène nous apparaît sous la forme « d'étoiles filantes ».

**I.8.2.4. La thermosphère :**

C'est la couche la plus haute. Dans cette couche, la température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ 100 degrés Celsius. La thermosphère atteint des milliers de kilomètres d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace. La partie inférieure de la thermosphère réfléchit les ondes courtes (ondes radio), elle s'appelle l'ionosphère [19,14]

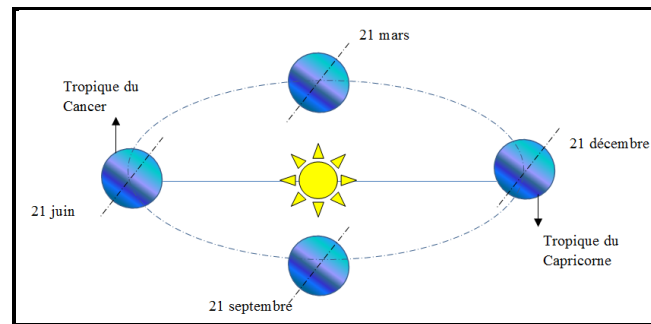
**I.9. Mouvement de la Terre :**

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**.

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de  $\pm 1,7 \%$  par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 10 6 km [20].

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'**équateur**. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à

l'écliptique en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé **inclinaison** de l'ordre de  $23^{\circ}27'$ .



**Figure I.6:** Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil [21].

### I.9.1.Mouvement de rotation :

La terre tourne autour de l'axe des pôles (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs du soleil au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période ( $T_r$ ) de  $23\text{h } 56\text{min } 04\text{s} \approx 24\text{h}$ . La vitesse linéaire de rotation à l'équateur est environ  $0,465\text{km/s}$ .

### I.9.2.Mouvement de translation:

La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne autour du soleil en une période  $T_t = 365\text{ jours } 5\text{h } 48\text{mn } 40\text{s} \approx 365,25\text{ jours}$  [13]. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre, comme illustré sur la (figure I.4). Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres [6]. La terre tourne autour du soleil avec une vitesse moyenne  $V \approx 29,77\text{km/s}$  [vitesse maximale], en hiver  $30,27\text{ Km/s}$  et minimale en été  $29,77\text{ Km/s}$ . Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique direct et provoque le cycle des saisons.

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

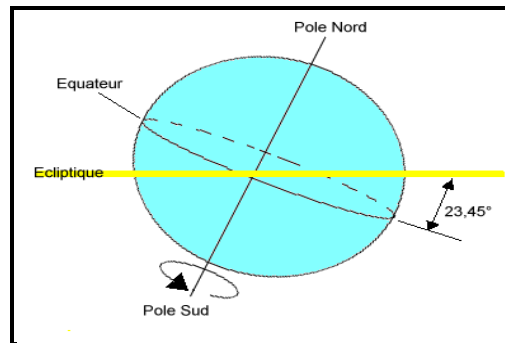


Figure I.7 : L'angle d'inclinaison de la terre [15].

### I.10.coordonnées géographiques terrestres :

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :

- a) **La latitude  $\phi$**  : C'est l'angle  $\phi$  que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial. Si  $\phi > 0$ , le site se trouve dans l'hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud.
- b) **La longitude  $\lambda$**  : C'est l'angle  $\lambda$  formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre -180 (vers l'ouest) et +180 (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle même ( $360^\circ$ ), chaque heure représente  $15^\circ$  d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes.
- c) **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. [20]

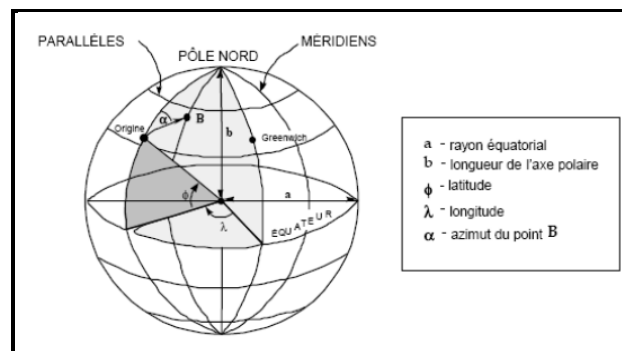


Figure I.8: Cordonnées géographiques terrestres [22].

### I.11.Les coordonnées horaires :

- a) **La déclinaison ( $\delta$ )** : C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver ( $-23^\circ,27'$ ) et au solstice d'été ( $+23^\circ,27'$ ). Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper [23]. La valeur de la déclinaison en ( $^\circ$ ) peut être calculée par la formule suivante :

$$\delta = 23,45 \times \sin \left[ \frac{360}{365} (j + 284) \right] \quad (I.4)$$

Ou :

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

**b) L'angle horaire ( $\omega$ ) :** L'angle horaire étant l'angle ou l'arc compté sur l'équateur dans le sens rétrograde à partir du plan vertical du lieu passant par le sud jusqu'au plan méridien passant par le centre du soleil. Il mesure la course du soleil dans le ciel. L'angle horaire définit le temps solaire vrai TSV, il est midi TSV si  $\omega=0$  [24]. Exprimé en degrés d'angle, sa valeur est nulle à midi solaire, elle est négative le matin, positive en après-midi et augmente de  $15^\circ$  par heure (un tour de  $360^\circ$  en 24 heures). L'angle horaire  $\omega$  ( $^\circ$ ) est donné par la formule suivante [25] :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (I.6)$$

TSV : est le temps solaire vrai en heure, se calcul par l'équation suivante [26] :

$$TSV = TU + \left( \frac{L}{15} \right) + E_T \quad (I.7)$$

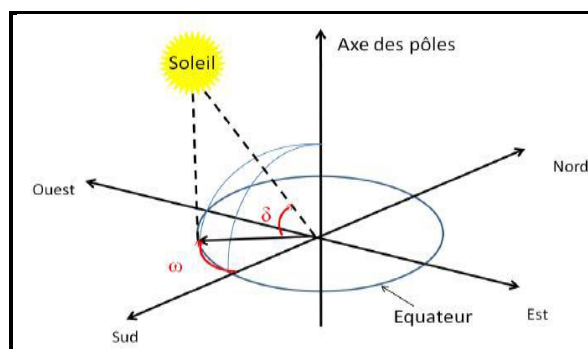
$$E_T = 9.87 \sin(2N) - 7.53 \cos(N) - 1.5 \sin(N) \quad (I.8)$$

$$N = (n_j - 81) \times \frac{360}{365} \quad (I.9)$$

TU : est le temps universel du méridien de Greenwich (GMT).

Cette formule n'est pas valable pour les heures de lever et de coucher du soleil. Il faut ainsi déterminer l'angle solaire au coucher, et au lever qui dépendent de la déclinaison et de la latitude du lieu [27]

$$\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan(\varphi)\tan(\delta)) \quad (I.10)$$



**Figure I.9:** Coordonnées horaires.

**c) Equinoxes :** Les équinoxes représentent les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial sa déclinaison est alors nulle et les durées du jour et de la nuit sont égales.

L'équinoxe d'automne intervient vers le (23 septembre) et printemps vers le (21 mars). Le solstice été (vers le 22 juin), est la période au cours de laquelle la durée qui sépare

le levé et le coucher du soleil cesse de croître. Le solstice d'hiver (Vers 22 décembre) est la période au court de la quelle cette durée cesse de décroître [28].

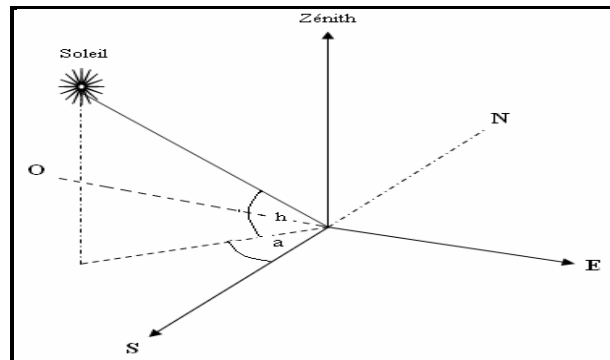
**I.12. Les coordonnées horizontales :**

**a) Azimut solaire (a) :**

L'azimut (a) est l'angle entre la direction sud et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud (Figure I.10)

Il se compte de 0° à 360° à partir du sud dans le sens rétrograde. La relation qui donne l'azimut est donnée ci-dessous [29-31].

$$\cos(a) = \frac{(\sin \gamma \sin \theta - \sin \delta)}{\cos \gamma \cos \theta} \tag{I.11}$$



**Figure I.10:** Repérage du soleil.

**b) L'angle de la hauteur solaire (h):**

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal.  $\gamma$  varie de 0° à 90° vers le zénith et de 0° vers - 90° vers le nadir. L'angle de la hauteur solaire est donné par [31] :

$$\sin(h) = \cos \delta . \cos \omega . \cos \varphi + \sin \delta . \sin \varphi \tag{I.12}$$

Avec :

$\varphi$  : L'altitude du lieu.

$\delta$  : La déclinaison du soleil.

$\omega$  : L'angle horaire

Il s'agit de la formule fondamentale, permettant de connaître, quels que soient le jour, l'heure et le lieu, la hauteur du soleil sur l'horizon. La hauteur maximale du soleil (à midi solaire) :

$$\gamma_{\max} = \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta \quad (\text{I.13})$$

Il faut noter que la hauteur du soleil intervient fortement sur la valeur de l'éclairement solaire [32].

### I.13. 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  $15^\circ$ . La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai [33].

#### I.13.1. Temps universel (TU) :

C'est le temps civil de Greenwich, qui joue un rôle particulier, du fait que les longitudes sont comptées à partir du méridien de Greenwich [34].

$$TU = TSM - \left( \frac{L}{15} \right) \quad (\text{I.14})$$

Où : L : est la longitude.

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

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

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

#### I.13.2. Temps solaire local (TSL):

La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude. La correction de longitude est donnée par la formule:

$$TSL = TU + \left( \frac{L}{15} \right) \quad (\text{I.15})$$

#### I.13.3 Temps solaire vrai (TSV) :

C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil [10,35].

$$TSV = TSL + \Delta T \quad (\text{I.16})$$

#### I.13.4. Le temps solaire moyen (TSM) :

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation [15]

$$TSM = TSV - E_T \quad (\text{I.17})$$

Avec :

$E_t$  : l'équation du temps, qui corrige le TSV par rapport au TSM. Voir eq (1.8)

**I.13.5 .Temps légal :**

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [15] :

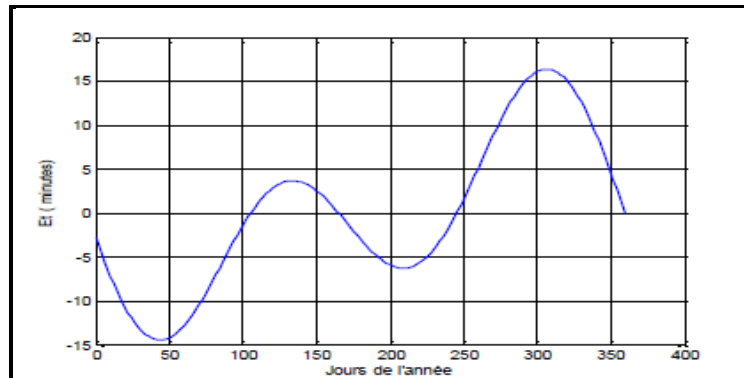
$$TL = TU + \Delta H \quad (I.18)$$

Où :

$\Delta H$  : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie.

Cette équation du temps varie de 14' le 11 février à -16' le 3 novembre.



**Figure I.11:** Equation du temps en fonction du jour de l'année [36].

**I.14.Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu du champ solaire, en expliquant les caractéristiques de base de l'astronomie solaire et 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.

*Chapitre II :*  
*Etat de l'art*



## II.1. Introduction:

Notre région, en particulier le Sud Algérien est caractérisée par un potentiel énergétique important, qui favorise le développement et l'utilisation de l'énergie solaire. Les besoins et la possibilité d'exploitation de cette source d'énergie sont directement liés aux conditions climatiques. D'une part, l'énergie solaire est très diluée d'où le recours à des équipements importants, impliquant souvent des investissements lourds et injustifiés pour de modeste puissances récoltées, et d'autre part, par sa disponibilité aléatoire et intermittente dans le temps et dans l'espace, elle pose de vrais problèmes de dimensionnement et d'exploitation des systèmes solaire. Ces aspects impose, pour des raisons de rentabilité, une parfaite connaissance du gisement solaire avant d'entreprendre toute action ou programme de valorisation.

En raison de l'étendu de notre pays, du coût très élevés de l'investissement et de la maintenance de stations de mesures radiométrique au sol, le recours à des modèles empiriques est nécessaire dans cette phase. De nombreuses études et travaux de recherches se sont fixés comme objectif cette estimation du rayonnement solaire, et divers modèles empiriques ont été développés dans diverse sortes de condition météorologique et géographique [37-38].

Il existe de nombreux modèles pour la reconstitution des composantes du rayonnement solaire. Ces modèles dépendent essentiellement du but prévu d'atteindre, des données utilisées et la puissance des moyens de calcul disponibles. [39]

## II.2. Les modèle de rayonnement solaire :

### II.2.1. Modèle Foued CHABANE [21]:

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 :

$$G_{proposè} = 696.42 \times \left( \frac{h}{1.124} \right)^{1.124} + 1.751 \times \left( \frac{H_r}{1.24} \right)^{1.24} \quad (\text{II.1})$$

### II.2.2. Modèle de Lacis & Hansen [40] :

La formule générale proposée par Lacis & Hansen pour le calcul du rayonnement solaire global sur un plan horizontal:

$$G = I_{sc} \times \cos \theta_z \left[ \frac{(0.647 - \rho_s - \alpha_\omega)}{(1 - 0.0685\rho)} \right] + 0.353 - \alpha_\omega \quad (\text{II.2})$$

$I_{sc}$  est la constante solaire extraterrestre calculée par:

$$I_{SC} = I_0 \times \left[ 1 + 0.033 \times \cos \left( \frac{360}{365} (n_j - 3) \right) \right] \quad (\text{II.3})$$

Avec  $I_0$  : la constante solaire moyenne égale à  $1367 \text{ W.m}^{-2}$  et  $n_j$  : le numéro de jour dans l'année ( $n_j = 1$  pour le 1er Janvier et  $n_j = 365$  pour le 31 Décembre).

$\theta_z$  est l'angle zénithal,  $\theta_z = 90^\circ - h$  où  $h$  est la hauteur du soleil, donnée en annexe A.

Le coefficient  $\alpha_0$  correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone, est calculé par la relation :

$$\alpha_0 = \frac{0.02118U_0}{1 + 0.042U_0 + 3.23 \cdot 10^{-4} U_0^2} + \frac{1.082U_0}{(1 + 138.6U_0)^{0.805}} + \frac{0.0658U_0}{1 + (103.6U_0)^3} \quad (\text{II.4})$$

Où,  $U_0$ , l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et définie par:

$$U_0 = I \times m_r \quad (\text{II.5})$$

Où,  $m_r$  est la masse d'air optique relative donnée l'équation :

$$m_r = \left[ \cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253} \right]^{-1} \quad (\text{II.6})$$

Et,  $l$  représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone)

$$l = \left\{ 235 + \left[ 150 + 40 \sin(0.9856(n_j - 30)) + 20 \sin(3L) \left[ \sin^2(1.28\varphi) \right] \right] \right\} / 1000 \quad (\text{II.7})$$

$L$  et  $\varphi$  sont respectivement la longitude et la latitude du lieu.

$\alpha_w$  représente le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau. donnée par l'équation :

$$\alpha_w = \frac{2.9X_w}{(1 + 141.5X_w)^{0.635} + 5.925X_w} \quad (\text{II.8})$$

$X_w$  est l'épaisseur d'eau condensable corrigée par trajet optique du rayonnement à travers cette couche, donnée par :

$$X_w = m_a \times U_w \quad (\text{II.9})$$

$U_w$  est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm). Elle est donnée par l'équation :

$$U_w = \frac{0.493}{T} HR \times \exp \left( 26.23 - \frac{5416}{T} \right) \quad (\text{II.10})$$

Avec,  $m_a$  la masse d'air corrigée exprimée par:

$$m_a = m_r \left( \frac{P}{1013} \right)^{0.75} \times \left( \frac{273}{T} \right)^{0.5} \quad (\text{II.11})$$

$P$  est la pression atmosphérique (mbar). Elle peut être calculée à partir de :

$$P = P_0 \exp(-0.0001184 \times Z) \quad (\text{II.12})$$

$P_0$  est la pression atmosphérique au niveau de la mer ( $P_0 = 1013$  mb);  $z$ , l'altitude du site (m), par rapport au niveau de la mer;  $T$ , la température ambiante (K) et  $HR$ , l'humidité relative (%).

### II.2.3. Modèle de Zang et al [41] :

Ils ont proposé un modèle sous forme d'une fonction composée des deux fonctions, la fonction cos et la fonction sin de la forme suivante :

$$G = a + b \cdot \cos\left(\frac{2\pi n c}{365}\right) + e \cdot \sin\left(\frac{2\pi n f}{365}\right) \quad (\text{II.13})$$

Ou

$G$  et  $n$  sont les mêmes paramètres décrits dans les modèles précédant et les constantes

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

### II.2.4. Relation d'A. Sambo [42] :

Une période de 60 mois de mesure de la durée d'insolation, des températures maximales et minimales, de la température moyenne et de l'humidité spécifique, a été utilisée pour développer 12 différentes corrélations avec lesquelles la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale pourra être calculée pour le site de Kano au nord du Nigeria.

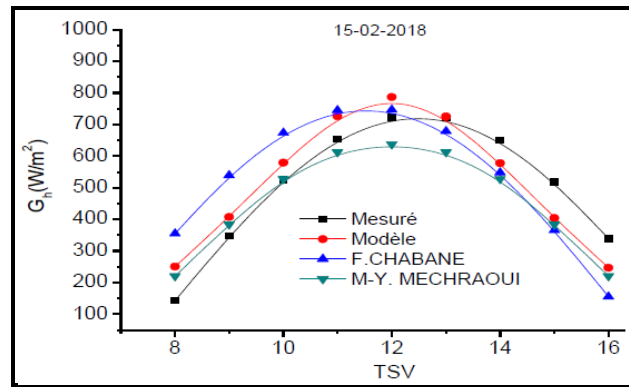
Les corrélations obtenues ont été combinées pour aboutir à une forme d'équation type d'Angström simplifiée, cette corrélation est donnée comme suit:

$$K_T = 0.62 - 0.294 \frac{DI}{T_m} + 0.178 \left( \frac{DI}{T_m} - H_r - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \right) + 0.491 \left( \frac{DI}{T_m} \times \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \right) \quad (\text{II.14})$$

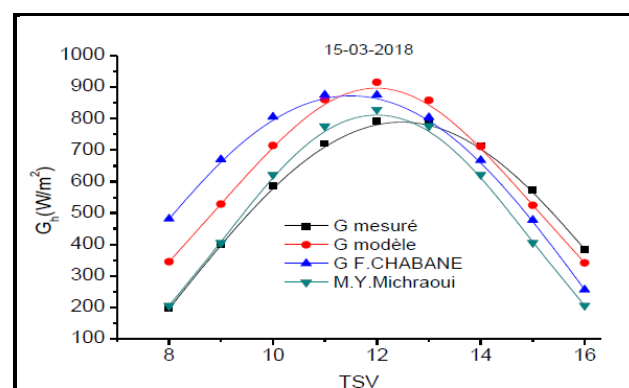
### II.2.5. Modèle de L. Imane [43] :

Le modèle établi est basé sur des régressions non linéaires en fonction l'humidité relative et hauteur du soleil écrite en fonction de l'irradiation global pour plusieurs jours de tests pour un plan horizontal. le modèle proposé sous la forme :

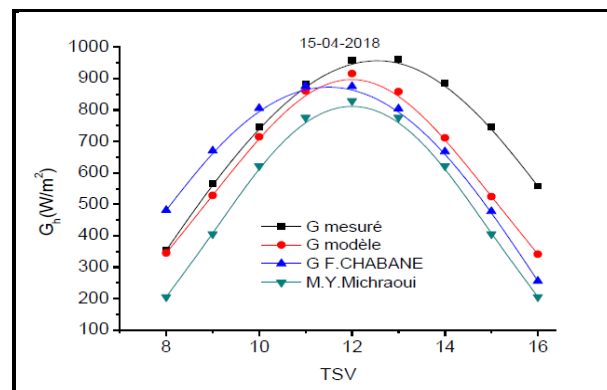
$$G_{proposè} = A \times \left| \left( \frac{h + H_r}{100} \right) - X_c \right| + Y_0 \quad (\text{II.15})$$



**Figure II.1:** Rayonnement solaire global sur le plan horizontal selon TSV (Février).



**Figure II.2:** Rayonnement solaire global sur le plan horizontal selon TSV (Mars).



**Figure II.3:** Rayonnement solaire global sur le plan horizontal selon TSV (Avril).

**II.2.6. Modèle de Perrin-Brichambaut [44]:**

Le rayonnement global sur un plan horizontal est la somme du rayonnement direct et diffus donné par :

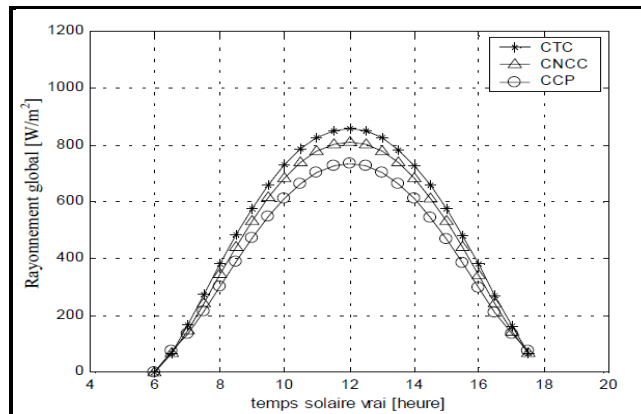
$$G_h = I_h \cdot \sin(h) + D_h \tag{II.16}$$

Où

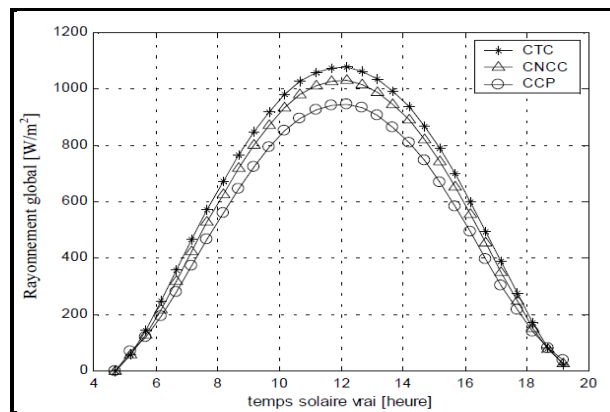
$I_h$  : le rayonnement direct reçu par une surface horizontale.

$D_h$ : le rayonnement diffus provenant du ciel, reçu par une surface horizontale.

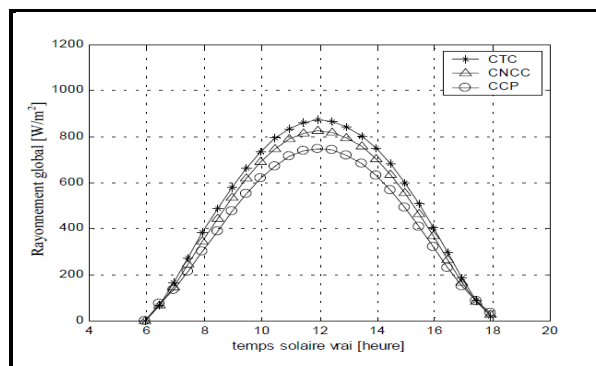
$G_h$  : le rayonnement global reçu par une surface horizontale.



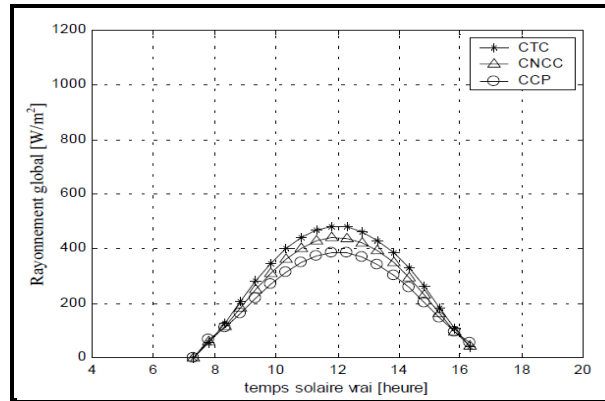
**Figure II.4:** Rayonnement global sur un plan horizontal dans le site de Biskra pour 21 Mars [45]



**Figure II.5:** Rayonnement global sur un plan horizontal dans le site de Biskra pour 21 Juin. [45]



**Figure II.6:** Rayonnement global sur un plan horizontal dans le site de Biskra pour 21 Septembre. [45]



**Figure II.7:**Rayonnement global sur un plan horizontal dans le site de Biskra pour 21 Décembre. [10]

Avec :

CTC : ciel très claire.

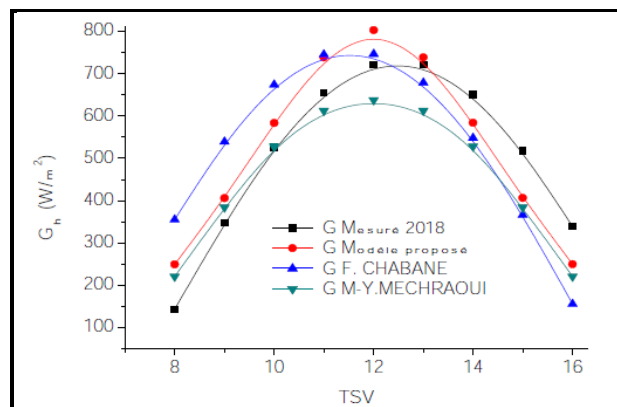
CNCC : conditions normales de ciel clair.

CCP : un ciel clair pollué.

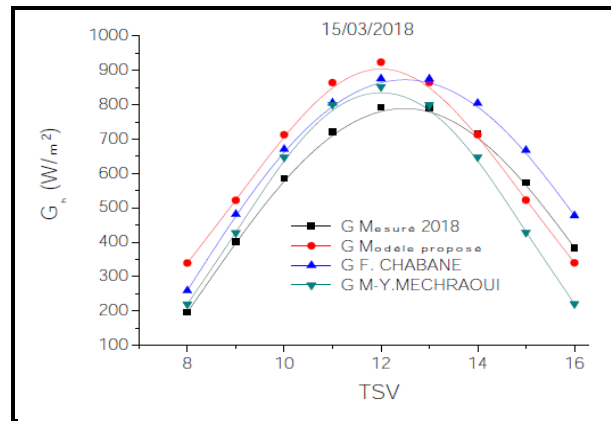
**II.2.7.Modèle de K. Zina [46] :**

Le modèle établi est basé sur des régressions non linéaires en fonction de la température ambiante et hauteur du soleil écrite en fonction de l’irradiation globale pour un plan horizontal. Ceci nous donne le modèle proposé sous la forme :

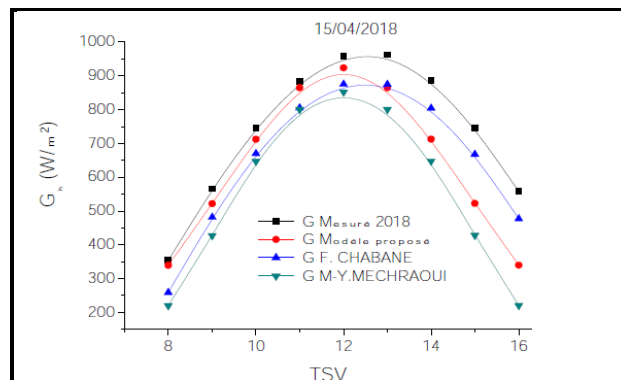
$$G_{proposè} = A \times \left( h + \frac{T_a}{320} \right) - X_c \quad (II.7)$$



**Figure II.8:**Comparaison : L'évolution de rayonnement solaire global « Modèles proposé – Mesurer 2018 – F.Chabane–M-Y.Mechraoui » suivant le mois de Février.



**Figure II.9:** Comparaison : L'évolution de rayonnement solaire global « Modèles proposé – Mesurer 2018 – F.Chabane–M-Y.Mechraoui » suivant le mois de Mars.



**Figure II.10:** Comparaison : L'évolution de rayonnement solaire global « Modèles proposé – Mesurer 2018 – F.Chabane–M-Y.Mechraoui » suivant le mois d'Avril.

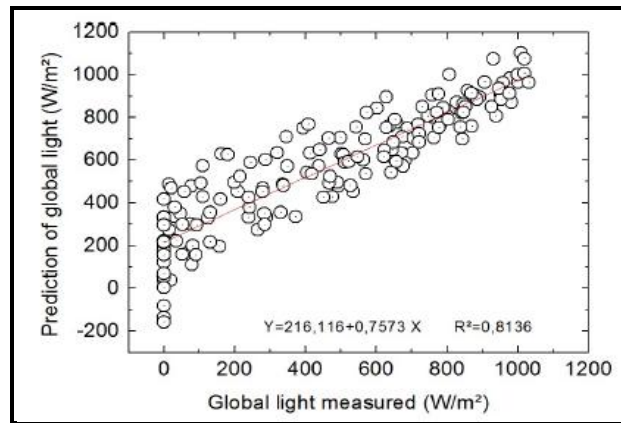
**II.2.8.Modèle de Foued CHABANE et al [47] :**

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 :

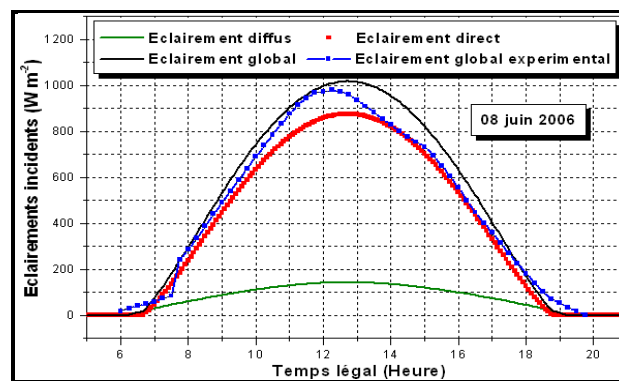
$$\begin{cases} D = a_1 + b_1 \times h + c_1 \times h^2 \\ I = a_2 + b_2 \times h + c_2 \times h^2 \end{cases} \quad (II.18)$$



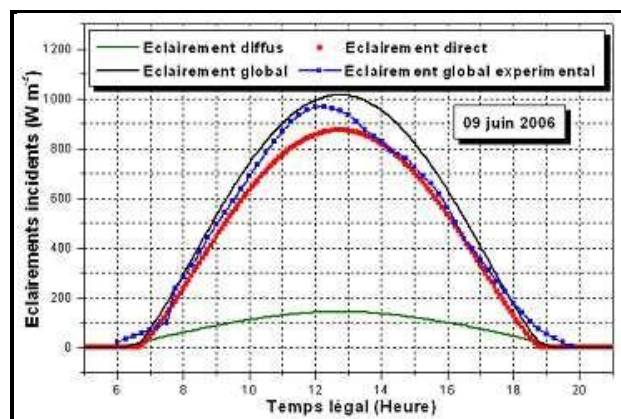
**Figure II.11:** l'éclairement mondial prédit en fonction de l'éclairement globale mesurée.

**II.2.9. Modèle de Bekkouche [48]:**

a effectué une comparaison entre le rayonnement solaire expérimental et théorique par le modèle de Capderou pour le site de Ghardaïa et le modèle de Perrin Brichambaut pour la station de Batna (Figure II -13-14-15).

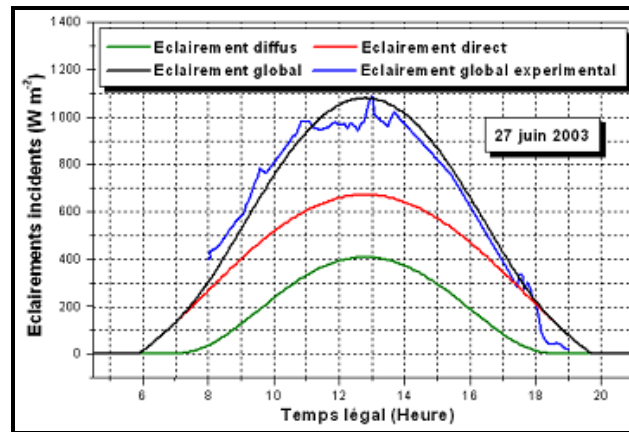


**Figure II.12:** Eclairements estimés par le modèle de Capderou. Ghardaïa 08 juin 2006



**Figure II.13:** Eclairements estimés par modèle de Capderou Ghardaïa 09 juin 2006





**Figure II.14:**Eclaircissements estimés par le modèle de Perrin. Batna 27 juin 2003

**II.2.10.Modèle D. Bensahal and A. Yousfi [49]:**

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 :

$$T_{air} = T_{min} + \left(1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}\right) \times \exp\left(\frac{I}{I_0} + \frac{P}{P_0} + \frac{(1 - H_R)}{2}\right) \tag{II.19}$$

Avec :

$T_{air}$  : est la température horaire de l'air ( $^{\circ}C$ ).

$T_{min}$  et  $T_{max}$  : sont les températures minimale et maximale de l'air ( $^{\circ}C$ ).

$I_0$  : 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 ( $\text{W / m}^2$ ).

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

$P$  est la pression atmosphérique à l'emplacement étudié ( $\text{kPa}$ ).

$H_R$  est l'humidité relative (%).

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

$$T_{air} = T_{min} + 0.01 \times \exp\left(\frac{I}{I_0} + \frac{P}{P_0} + \frac{(1 - H_R)}{2}\right) \tag{II.20}$$

Le rayonnement solaire global ( $I$ ) peut être déduit de l'équation (11) comme suit:

$$I = I_0 \times \left[ -\left(\frac{P}{P_0} + \frac{(1 - H_R)}{2}\right) + \text{Ln}\left(\left(\frac{T_{max} \times (T_{air} - T_{min})}{T_{max} - T_{min}}\right)\right) \right] \tag{II.21}$$

**II.2.11.Modèle de Kaplanis et Kaplani [50] :**

Ils ont proposé un modèle sous forme d'une équation sinus de la forme :

$$G = a + b \cos\left(\frac{2\pi n}{364}\right) \tag{II.22}$$

Avec :

G : les radiations solaires globales journalières ;

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

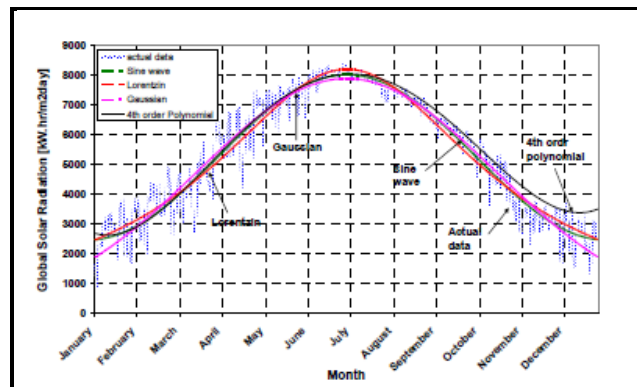
a, b et c sont les constantes de ce modèle.

**II.2.12.Modèle d'Al-Salaymeh [51] :**

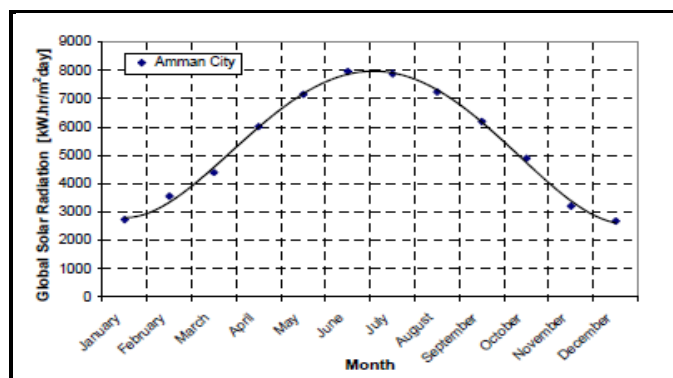
Le modèle d'Al-Salaymeh s'écrit sous forme exponentielle et donnée par la relation suivante :

$$G = a_0 \cdot \exp\left[-0.5 \times \left(\frac{x - a_1}{a_2}\right)^2\right] \tag{II.23}$$

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



**Figure II.15:** Données mondiales quotidiennes sur le rayonnement solaire avec différentes suggestions modèles de prévision à Amman, en Jordanie, en fonction du temps (jour).

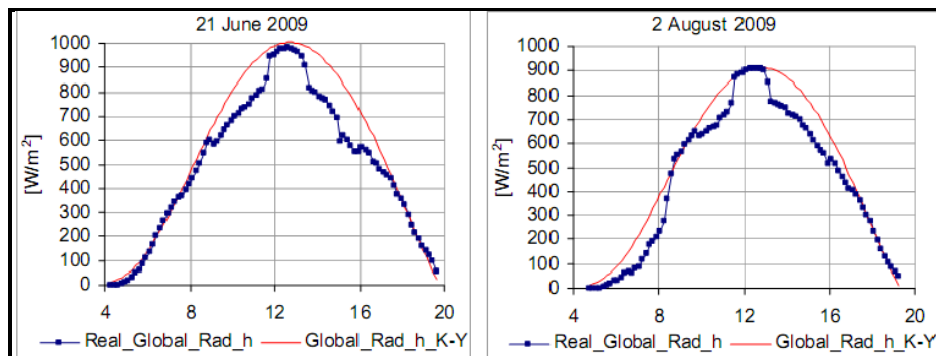


**Figure II.16:** Rayonnement solaire global quotidien moyen mesuré à Amman, en Jordanie, comparé à l'éclairement énergétique mensuel moyen simulé sur une surface horizontale.

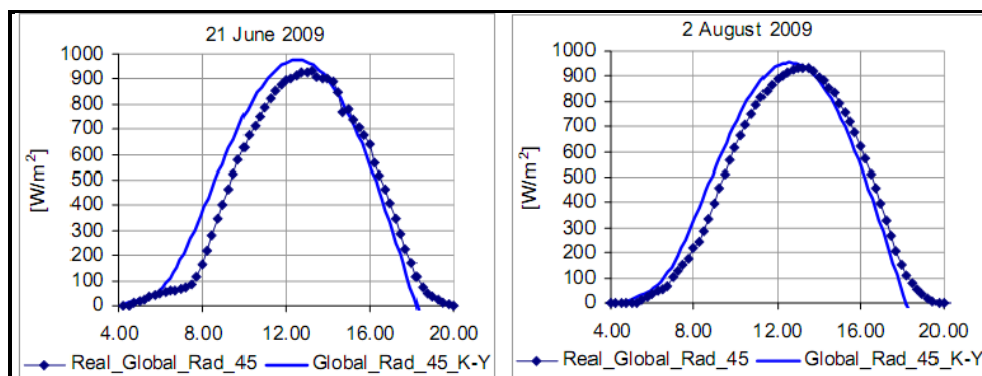
**II.2.13.Modèle d'Eftimie [52] :**

A réalisé une comparaison du rayonnement solaire global théorique et expérimental. La Figure I.1, présente la variation du rayonnement global enregistré sur une surface horizontale

et le rayonnement global horizontal théorique, obtenu avec le modèle Kasten-Young. La Figure I.1, présente les diagrammes comparatifs du rayonnement réel et théorique globale sur une surface inclinée à 45 degrés.



**Figure II.17:**Horizontal éclairage global.



**Figure II.18:**Éclairage énergétique global sur une surface inclinée

L'analyse comparative du diagramme superposé met l'accent sur les conclusions suivantes :

Les fonctions proposées sont très théoriques précises pendant le lever du soleil et 9 h, 11 h, 13 h, 16 h, au coucher du soleil. Ces périodes sont caractérisées par des erreurs très faibles entre les valeurs théoriques et réelles du rayonnement global.

Les valeurs maximales réelles du rayonnement global sur une surface inclinée sont enregistrées environ 13 heure solaire, la courbe théorique du rayonnement global sur une surface inclinée est un peu hors de centre avec la courbe réelle.

Les deux courbes réelles et théoriques du rayonnement global sur une surface inclinée sont très proches, l'erreur quotidienne est d'environ 2-8% ce qui signifie une bonne précision du modèle théorique.

### II.3.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné quelques modèles établies dans le domaine du rayonnement solaire à partir des données de l'étude des sites spécifiques étudiés.

*Chapitre III :*

*Étude  
théorique et  
expérimentale*

### III.1. Introduction :

La conversation thermique de l'énergie est basée sur l'intensité des irradiations solaire dans le site choisie, plusieurs études ont été menées pour modéliser ce paramètre clé.

Le but de l'étude proposer un modèle pour estimer le rayonnement solaire à basé des paramètres mesuré suivante : pression, température ambiante et humidité relative.

Dans ce chapitre on doit faire la comparaison entre les données expérimental du rayonnement solaire global sur le plan horizontal de Dr. F.Chabane correspondent l'année 2018 selon le jour type avec le modèle établir, en même temps nous avons comparé notre résultats expérimentaux avec les données de Dr. F.Chabane et le modèle établir.

### III.2. Modélisation du rayonnement solaire global sur le plan horizontal :

Notre région désertique est caractérisée par une source énergie importante nous encourage à l'utiliser et la possibilité d'exploitation est directement liée aux conditions climatiques; malgré la facilité d'utilisation des équipements, les investissements y sont faibles par rapport à leur stock.

### III.3. Méthodologie et présentation de site:

La compagne des mesures a été effectuée dans le hall technologique du département de génie mécanique de l'Université de Biskra (année 2019) avec des données de Dr. F.CHABANE qui donne à nous les résultats pour tout les mois de l'année 2018.

#### III.3.1. Les caractéristiques climatiques de la ville de Biskra :

La ville Biskra se caractérise par son climat désertique. Les caractéristiques géographiques de la ville sont  $34^{\circ} 48'$  nord de latitude,  $5^{\circ} 44'$  Est longitude et une altitude de 87 mètres au dessus du niveau de la mer.

Également caractérisé la température maximale en été, qui en juillet à 42 degrés Celsius et la température minimale en hiver jusqu'à 7 degrés Celsius au cours du mois de janvier. La température moyenne annuelle est de  $21.5^{\circ} C$ .

#### - Température :

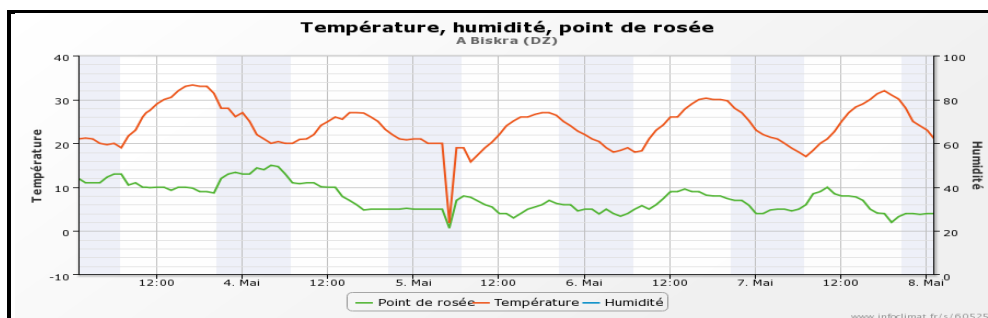
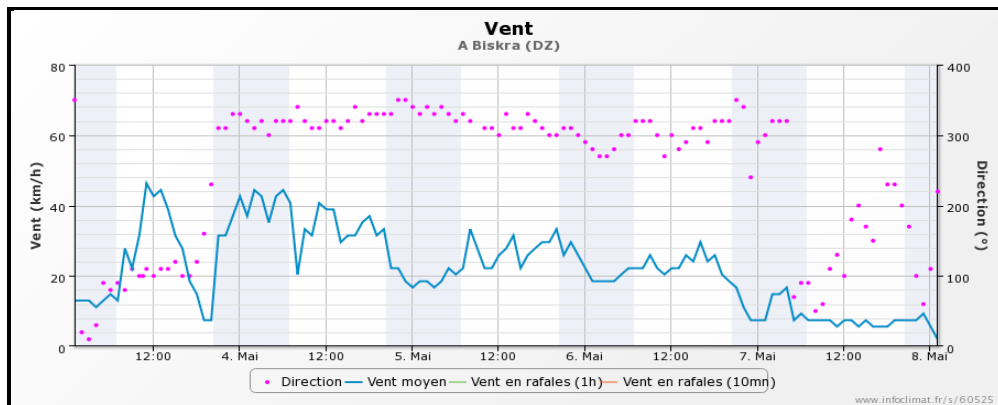


Figure III. 1 : Température ambiante correspondent la station météorologie du Biskra [53].

Nous avons pris seulement un échantillon des données de prévision de la température de la ville de Biskra 2019, on remarque sur la figure (III.11) prenne une forme plus au mois sinusoïdale.

Où la température maximale est de 3 à 7 du mois de mai après midi, mais la température minimale est presque à 6 ou 5 heures du matin de tous les jours.

#### - Vent :

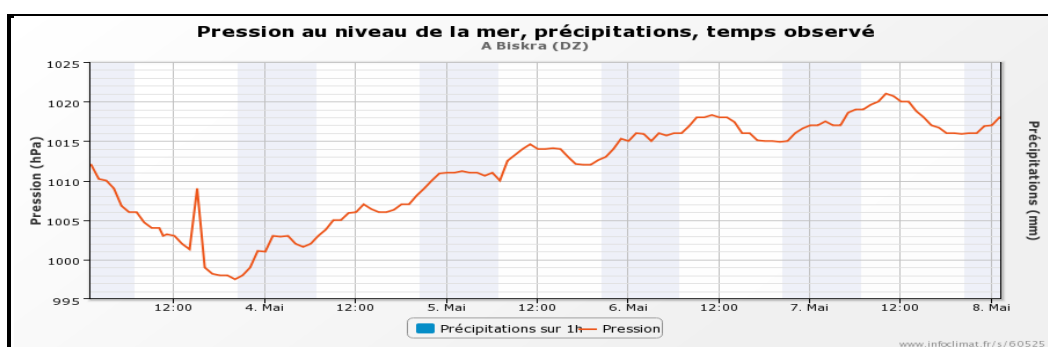


**Figure III.2 :** Vitesse de vent [53].

On remarque à partir des données des prédictions que la loi de variation représentées sur la figure (III.2) prenne une forme plus au mois sinusoïdale.

L'intensité du vent a atteint son maximum les 4 et 5 mai, sans changement de direction avant le 6 mai à midi, qui a commencé à diminuer et à changer de direction.

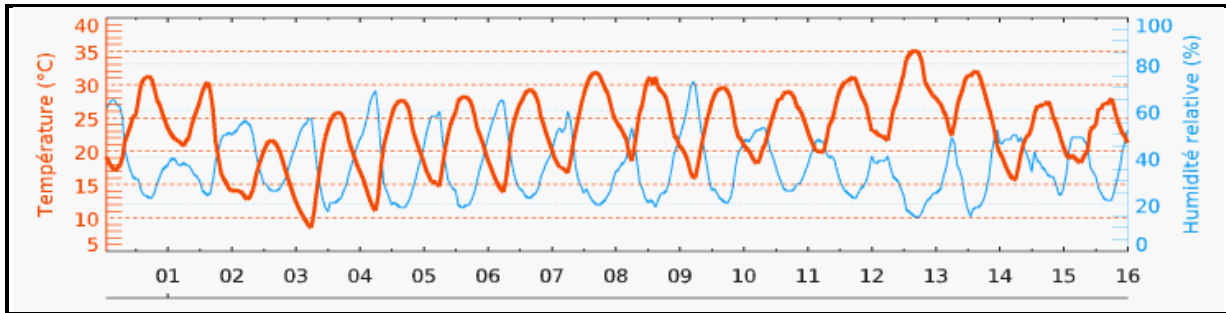
#### - Pression :



**Figure III.3 :** Pression sur le site du Biskra [53].

On remarque sur la figure (III.13) grande différence de pression au fil des jours tout en conservant la forme sinusoïdale, où il représente le 5 mai est la pression moyenne pour les autres jours.

- **Humidité relative :**



**Figure III.4 :** Humidité relative à Biskra [54].

Le (figure III.4) représente l'humidité dans la première moitié de mai 2019 pour la région de Biskra, au fil des jours tout en conservant la forme sinusoïdale on remarque aussi qu'ils sont inversement proportionnels à la température. soit un maximum à minuit (60%-70%) de chaque jour et à midi c'est minime.

**III.4. Description du banc d'essai :** Nous avons basé dans cette banc d'essai sur des quelque'un instrument de mesure pour prendre des informations ou des données et insérer des tableaux, nous les mentionnons :

**III.4.1. Les instruments de mesure :**

- **Pyranometre :** 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 mètre carré.



**Figure III.5 :** 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 III.6 : Hygromètre testo 625.

**III.4.2. Le site d'infoclimat** : nous sommes appuyés sur le site dans notre étude pour prendre des données de pression au niveau de ville de Biskra à période de février à avril

**III.4.2.1. Définition de site** : Est un site global, professionnel et gratuit qui contient une base de données d'événements météorologiques depuis 1870 dans le monde entier.

On estime qu'il s'agit de l'un des sites Web les plus sensibles aux conditions météorologiques (observation semi-permanente des prévisions météorologiques), Il comporte également une base climato/pluvio est constituée d'un réseau de stations amateurs ou non, qui communiquent leurs relevés mensuellement. Ils sont tous équipés de stations et de pluviomètres soigneusement implantés et vérifiés pour pouvoir avoir des reports les plus fiables possibles.

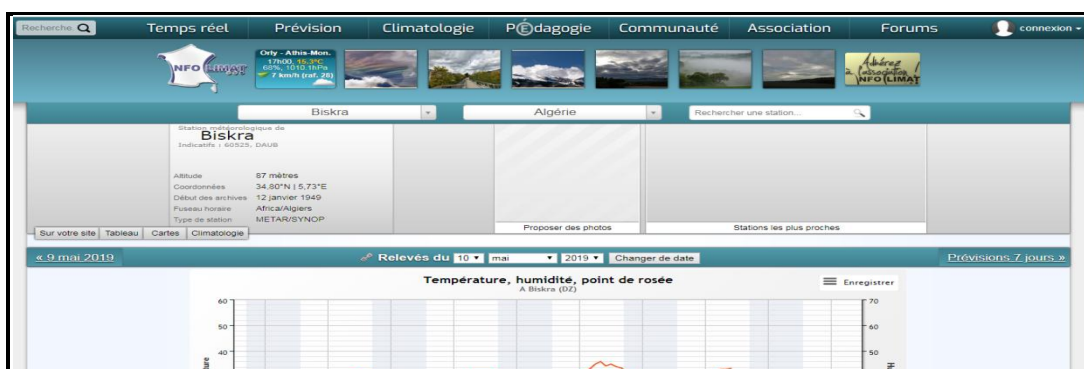


Figure III.7 : la fenêtre de site infoclimat.



**III.4.3 .Originpro version 9** : Est l'un de plusieurs Logiciels spécialement conçus mise en page ou graphique et de données, Utilisé pour répondre aux besoins des scientifiques et des ingénieurs.

Ce qui distingue l'origine des autres applications Il est facile à utiliser cela vous permet de mettre à jour vos graphiques originaux et analyser automatiquement les résultats lorsque vous modifiez des données ou des paramètres, ce qui vous permet de créer des modèles pour des tâches répétitives ou d'effectuer des opérations par lot à partir de l'interface utilisateur sans programmation.

C'est aussi des caractéristiques d'origine, propose des outils d'analyse avancés et des applications pour le **Peak Fitting**, le surface **Fitting**, les statistiques et le traitement du signal.

En graphiques Avec plus de 100 types de graphiques intégrés et une personnalisation par pointer-cliquer de tous les éléments, Origin facilite la création et la personnalisation de graphiques de qualité publication. Vous pouvez ajouter des axes et des panneaux supplémentaires. Pour répondre à vos besoins. Batch tracez de nouveaux graphiques avec une structure de données similaire, ou enregistrez le graphique personnalisé en tant que modèle de graphique ou enregistrez des éléments personnalisés sous forme de thèmes graphiques pour un usage ultérieur.

Le modèle établi est basé sur des régressions non linéaires en fonction de la température ambiante, la pression, humidité relative et hauteur du soleil écrite en fonction de l'irradiation globale pour plusieurs jours de tests pour un plan horizontal. Le rayonnement solaire global peut être écrit sous la forme à partir des mesures expérimentales, on calcule selon la forme du modèle choisi :

Exponentiel(**Exp2PMod1**). Ceci nous donne le modèle proposé sous la forme :

$$\frac{I}{I_o} = a \times \exp \left( b \times \left[ \frac{T_a}{T_0} + \frac{P}{P_0} + \frac{HR}{100} \right] \times h \right) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$I_0$  : constant solaire = 1367 w/m<sup>2</sup>

A et B : les coefficients de modèle proposé.

$T_0$  : constant de température = 273.

$P_0$  : constant de pression = 10<sup>5</sup> Pa.

Ensuite, nous avons considéré les valeurs moyennes des données obtenues pour chaque mois tels que :

- **Remarque 1** : les données expérimentales sont mesurées par Dr. F.Chabane pour tout les mois de l'année 2018.

	A	B	R <sup>2</sup>
Janvier	0,05749	0,02761	0,97567
Février	0,07593	0,02206	0,97274
Mars	0,08378	0,01579	0,86573
Avril	0,08132	0,0145	0,95074
Mai	0,0512	0,01741	0,95814
Juin	0,11793	0,012	0,91463
Juillet	0,10557	0,01273	0,92291
Août	0,10543	0,01338	0,93899
septembre	0,07639	0,01615	0,96316
Octobre	0,0253	0,0253	0,83809
Novembre	0,04421	0,02685	0,9656
Décembre	0,05954	0,0273	0,96932

**Tableau III.1** : Les Valeurs des coefficients A, B de modèle proposé selon tout les mois

- **Remarque2** : Dans cette étape, nous développerons les données que nous avons mesurées sur une période de trois mois à partir de février 2019 ; Nous sommes également basés sur le site web Infoclimat pour connaître les valeurs de la pression atmosphérique a tous les jours dans le site de Biskra.

Nous avons fait un choix de jour selon le type de jour (claire).

14 Février 2019						
TSV(h)	Ta (k)	Pr (pa)	Hr (%)	H (°)	(I/I <sub>0</sub> ) <sub>exp</sub> (w/m <sup>2</sup> )	(I/I <sub>0</sub> ) <sub>modèle</sub> (w/m <sup>2</sup> )
8	289,8	103300	28,6	13.9880	0,195318	0,15828341
9	287,2	103400	31,8	23.6119	0,319678	0,26560532
10	290,4	103460	21	31.4938	0,367228	0,37748693
11	293,1	103400	19,8	36.7994	0,468178	0,49349231
12	296,2	103400	16,6	38.6928	0,561814	0,53388906
13	297,1	103400	20,2	36.7994	0,542794	0,50102144
14	298,1	103300	15,3	31.4938	0,548647	0,36959913
15	297	103200	16	23.6119	0,486467	0,24897913
16	295,5	103180	16,5	13.9880	0,419166	0,15341123

**Tableau III.2** : Les paramètres de h, Ta, Pr, Hr, (I/I<sub>0</sub>)<sub>exp</sub> et (I/I<sub>0</sub>)<sub>modèle</sub> selon le moi de Février.

04 Mars 2019						
TSV(h)	Ta (k)	Pr (pa)	Hr (%)	H (°)	$(I/I_0)_{\text{exp}}(\text{w/m}^2)$	$(I/I_0)_{\text{modèle}}(\text{w/m}^2)$
8	289,5	102400	34	18.5881	0,1863058	0,17067858
9	290,6	102500	28,3	28.7395	0,3014045	0,24587244
10	291,2	102510	28,1	37.2423	0,4184345	0,33815819
11	293,8	102500	31	43.1069	0,5201244	0,43241695
12	296	102400	29,6	45.2370	0,5740161	0,46662725
13	297,3	102380	27,3	43.1069	0,4832773	0,42501121
14	301,1	102200	20	37.2423	0,3313241	0,32877821
15	300,5	102100	20,1	28.7395	0,2528018	0,24038522
16	298,8	102120	24,1	18.5881	0,166474	0,16731893

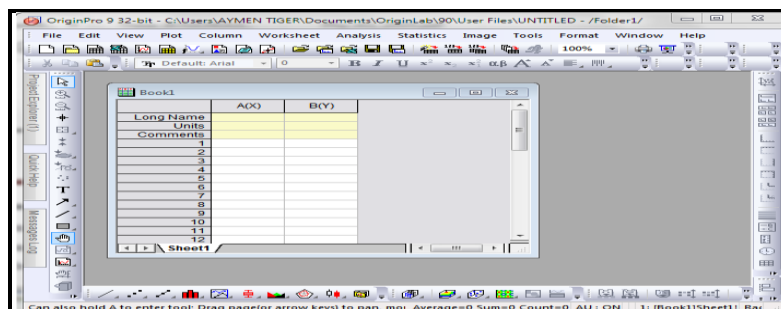
**Tableau III.3 :** Les paramètres de h, Ta, Pr, Hr,  $(I/I_0)_{\text{exp}}$  et  $(I/I_0)_{\text{modèle}}$  selon le mois de Mars.

15 Avril 2019						
TSV(h)	Ta (k)	Pr (pa)	Hr (%)	H (°)	$(I/I_0)_{\text{exp}}(\text{w/m}^2)$	$(I/I_0)_{\text{modèle}}(\text{w/m}^2)$
8	292,8	101700	29,7	29,3341	0,2670081	0,22441302
9	293,3	101700	27	40,6081	0,4250183	0,32662129
10	294,3	101710	26,5	50,7512	0,5052524	0,46182582
11	299	101600	23	58,436	0,5879078	0,59121192
12	301,6	101600	19,1	61,4669	0,6308339	0,63829218
13	302	101530	19,6	58,436	0,6161717	0,5794525
14	303,2	101500	17,7	50,7512	0,5552158	0,44269212
15	302,8	101400	16,4	40,6081	0,4882078	0,31265809
16	303,8	101350	17	29,3341	0,2986979	0,21596561

**Tableau III.4 :** Les paramètres de h, Ta, Pr, Hr,  $(I/I_0)_{\text{exp}}$  et  $(I/I_0)_{\text{modèle}}$  selon le mois d'Avril  
Les Valeurs des coefficients A, B et  $R^2$  de modèle proposé selon les mois donnés dans le tableau (Tableau III.1)

#### III.4.4.Explication de l'expérience :

Premièrement on ouvre la fenêtre du programme l'Origine version 9 après l'avoir installée dans le micro-ordinateur voir la Figure III.8.



**Figure.III.8 :** Fenêtre d'ouverture l'Originpro version 9.

Après avoir ouvert le programme de l'Originpro aller au fichier contenant les données à placer dans ce programme, voir Fig.III.9.

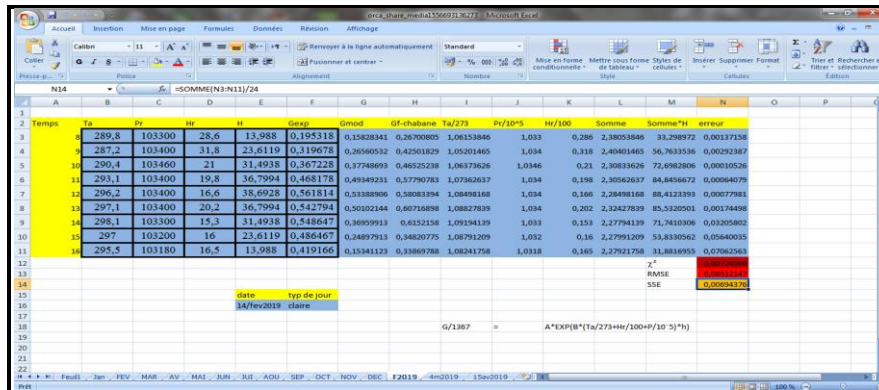


Figure.III.9: fichier d'Excel version 2007 avec des données du rayonnement Solaire, température ambiante, Hr et la pression.

On choisit la valeur indépendante X qui a été écrite sur la forme suivante :

$$X = \left( \left[ \frac{T_a}{T_0} + \frac{P}{P_0} + \frac{HR}{100} \right] \times h \right)$$

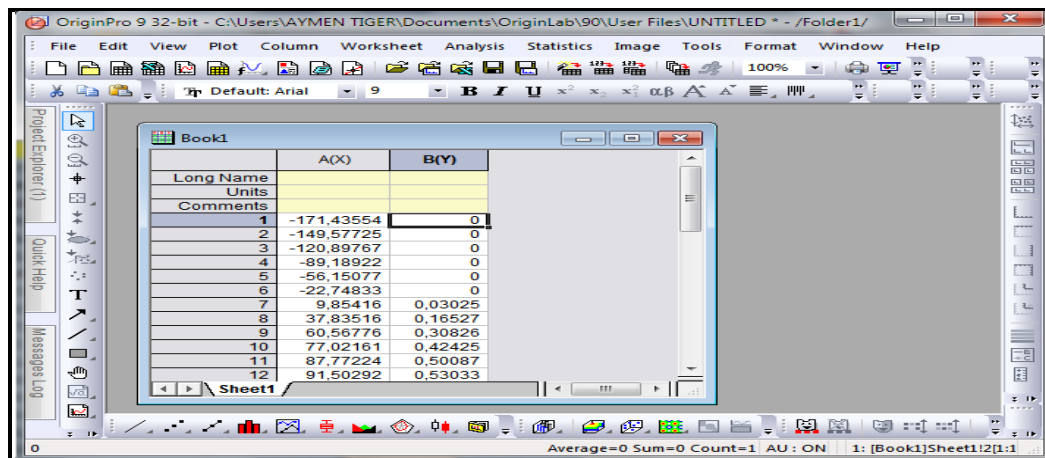


Figure.III.10 : Description l'opération de l'interpolation sur l'Originpro version 9.

La Figure III.10 montre la description les données nécessaire de l'interpolation pour choisir une modèle mathématique qui prédire notre résultats.

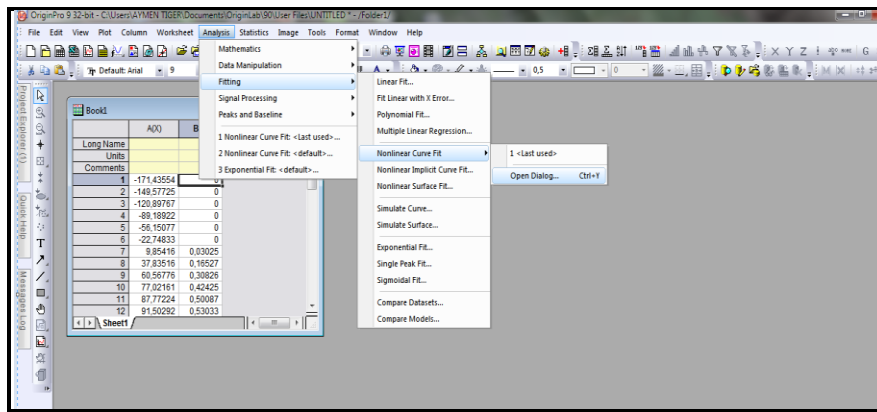


Figure.III.11 : Analyse opératif pour choisir le modèle le plus fiable.

Dans le Fig.III.11 qui montre l’opération du travail nécessaire pour choisir le modèle mathématique le plus fiable de notre résultat obtenu. Donc on click sur l’Analyse et puis en allant directement Fitting (interpolation) et ensuite on choisi Nonlinear Curve Fit (courbe de l’interpollation nonlineaire) et enfin appuis sur l’Open Dialog (ouvrir le dialogue).

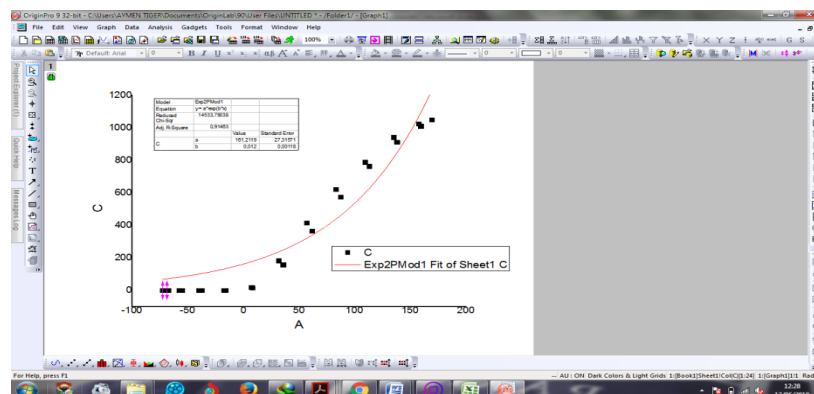


Figure.III.12 : Fenêtre de l’interpolation.

La figure III.12, montre l’interpolation correspondent les données du rayonnement solaire globale selon les paramètres climatique.

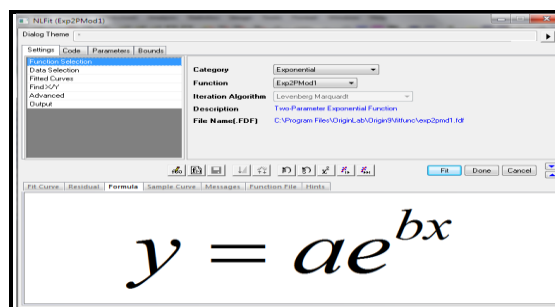


Figure.III.13 : Dialogue de thème pour une fonction choisir (Exp2PMod1).

Après de choisir le **Nonlinear Curve Fit** qu’est aperçus sur l’Originpro, directement on choisi dans le **Category** d’Originlab le mode d’exponentiel qu’il doit cibler la fonction de

(Exp2PMod1), cette fonction donne la meilleure prédire selon les résultats obtenus, la fonction (Exp2PMod1) s'écrit sous forme suivante :  $Y = a.e^{bx}$

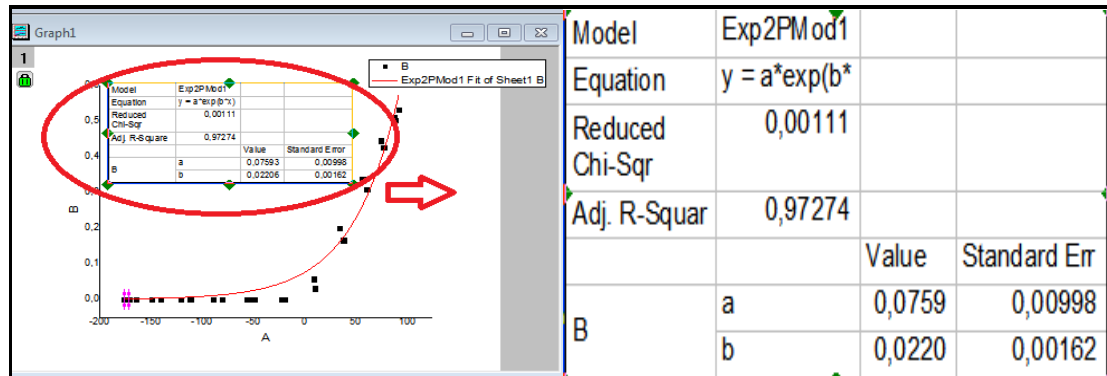


Figure.III.14 : Interpolation direct de fonction (Exp2PMod1) sur L'Originpro.

D'après l'interpolé les données du rayonnement solaire global sur le plan horizontal selon le paramètre climatique. On obtient directement le tableau qui donne les constantes d'interpolation selon la fonction choisie.

**III.5.Les Erreur du rayonnement solaire :**

Nous trouvons souvent des erreurs dans le domaine expérimental, ce qui est dû à plusieurs des causes, il existe donc des moyens d'atteindre le meilleur modèle de rayonnement solaire. Dans ce contexte, nous utiliserons des méthodes statistiques comparatives.

**III.5.1. 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 :

$$RMSE = \left[ \frac{\sum (X_{mod} - X_{exp})^2}{n - 1} \right]^{0.5} \tag{III.5}$$

Avec :

N : Nombre de données sur le rayonnement solaire global ou nombre d'heures de la journée.

X<sub>mod</sub> : le rayonnement solaire global de model proposé.

X<sub>exp</sub> : le rayonnement solaire global mesuré.

**III.5.2. 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 :

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{\text{exp},i} - M_{\text{mod},i})^2 \quad (\text{III.6})$$

### III.5.3. Tests du chi carré ( $\chi^2$ ) :

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 :

$$\chi^2 = \left[ \frac{\sum (X_{\text{mod}} - X_{\text{exp}})^2}{n-1} \right] \quad (\text{III.7})$$

### III.5.4. 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 :

$$ERM = \left[ \frac{|X_{\text{mod}} - X_{\text{exp}}|}{X_{\text{mod}}} \right] \times 100 \quad (\text{III.8})$$

➤ Nous traduisons ces erreurs en fonction des mois dans le tableau suivant :

	$\chi^2$	RMSE	SSE
Jan	0,00094264	0,03070246	9,03E-04
Fev	0,00106312	0,03260555	0,00102
Mars	0,00438227	0,06619873	0,0042
Avr	0,00283594	0,05325357	0,00272
Mai	0,00304087	0,05514404	0,00291
Jun	0,00743944	0,08625	0,00713
Juil	0,00599617	0,07743	0,00575
Aout	0,00457728	0,06766	0,00439
Sep	0,00191475	0,04376	0,00183
Oct	0,00172619	0,04155	0,00165
Nov	0,00068759	0,02622	6,59E-04
Déc	0,00064302	0,02536	6,16E-04

**Tableau III.5 :** Les erreurs de rayonnement solaire global entre model proposé et mesuré (Dr F.Chabane) en fonction tout les mois de 2018.

	$\chi^2$	RMSE	SSE
Fév	0,00724566	0,08512147	0,00694376
Mars	0,00141537	0,03762144	0,0013564
Avr	0,00283134	0,05321037	0,0047681

**Tableau III.6:** Les erreurs de rayonnement solaire global entre model établis et mesuré (2019) en fonction des mois (Fév., Mars, Avr).

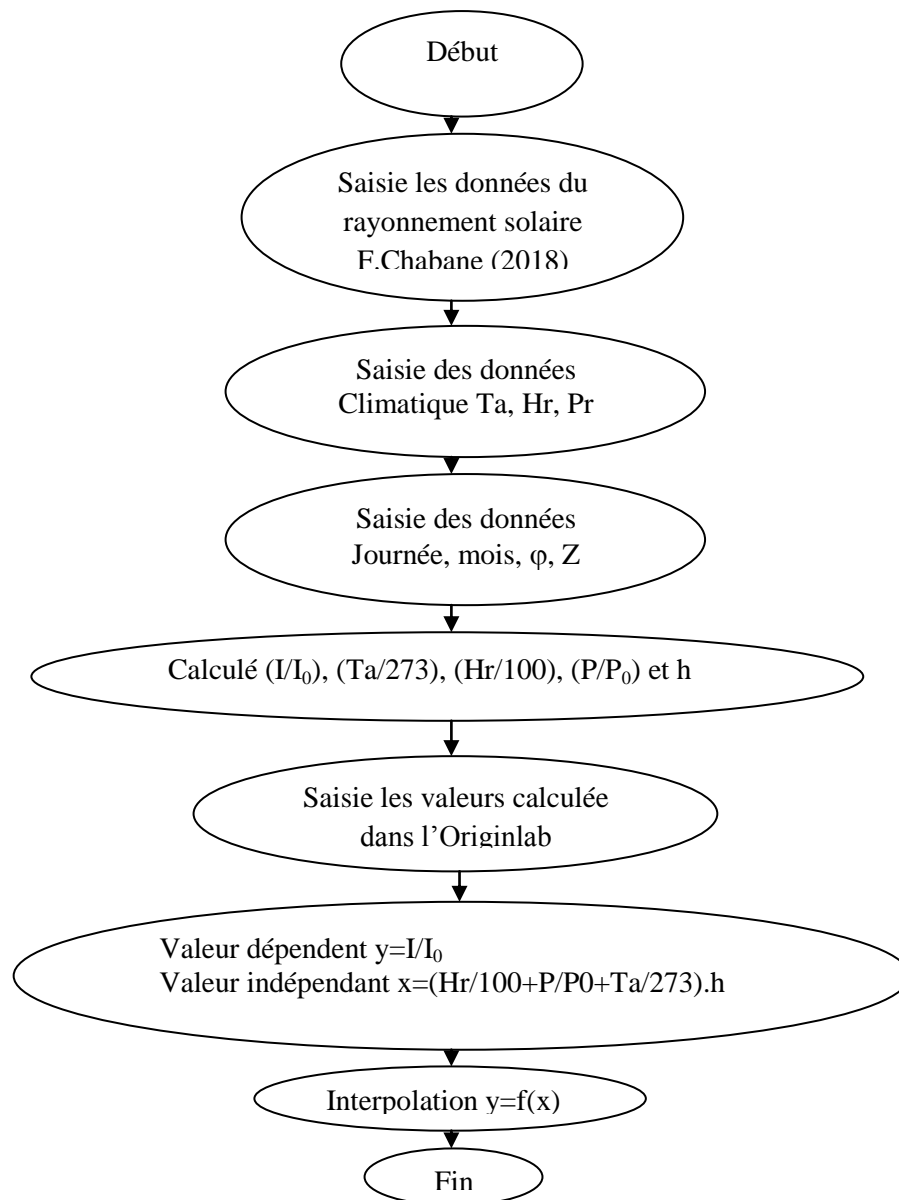
### III.6.Organigramme principal :

L'organigramme montre le processus de l'interpolation de rapport du rayonnement solaire globale suivant les paramètres climatique tel que le pression, l'humidité relative et la température ambiante selon les étapes suivante :

- 1- On va saisir les données du rayonnement solaire global de jour type pour chaque mois de l'année 2018 correspondent les données mesurées de Mr. F. Chabane.
- 2- Puis on va saisir les données climatiques respectivement.
- 3- On entrée aussi les données (journée, mois,  $\phi$ , Z).
- 4- Après tout ça on va calculer les rapports  $(I/I_0)$ ,  $(T_a/273)$ ,  $(H_r/100)$ ,  $(P/P_0)$  et h.
- 5- Puis on doit faire la somme de rapports  $(T_a/273)$ ,  $(H_r/100)$ ,  $(P/P_0)$  et on multiple par la hauteur solaire h.
- 6- On traduit les valeurs calculée dans l'Originlab,  $y=(I/I_0)$  et  $x=[(T_a/273), (H_r/100), (P/P_0)]*h$ .
- 7- Et en suit on interpolé les données, pour obtenir les constantes de l'interpolation a et b selon le meilleur  $R^2$ .

On répété le procédure de mois Janvier jusqu'à le mois de Décembre.





**Fig. III.15 :** Organigramme de l'interpolation.

### III.7. Conclusion

Ce chapitre est concerné l'étude expérimental et théorique, pour obtenir une modèle mathématique qui prédire les valeurs de rapport du rayonnement solaire selon les paramètres climatiques (pression, température et humidité relative). Une étude théorique ne peut être jugée sur sa validité que si elle est couplée à l'aspect expérimental. L'expérimental basé sur des instruments de mesure qui utilisés comme outils de référence pour obtenu des valeurs exactes.

*Chapitre IV :*

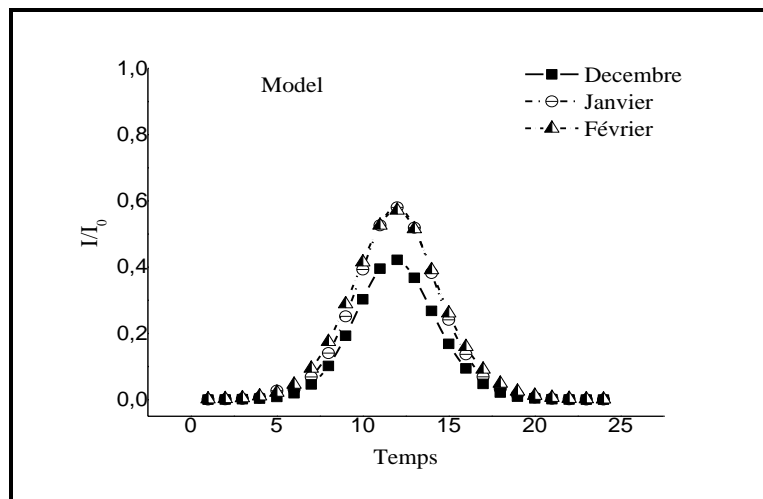
*Résultat et  
interprétation*

**IV.1. Introduction :**

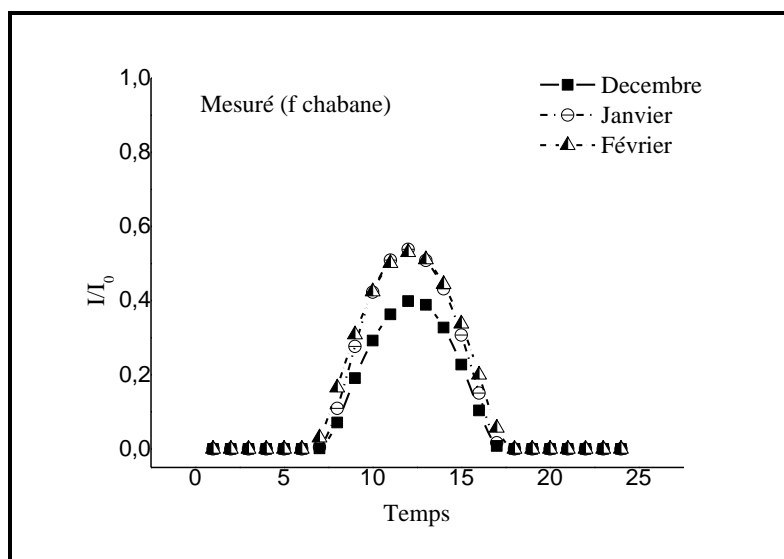
Dans ce chapitre nous traduisant les résultats obtenus à partir les modèles établis comparés à ceux obtenus expérimentalement et les données de F.CHABANE (2018) du rayonnement solaire pour voir la différence de notre valeur mesurée réellement et les données de F.CHABANE (2018).Le rayonnement solaire global est obtenu pour des jours clairs sur un plan horizontal du site de Biskra.

**IV.2. Variation du rayonnement solaire global en fonction de temps selon les quatre saisons :**

**IV.2.1. Comparaison entre les données de F Chabane (2018) et le modèle proposé à saison de l’hiver :**



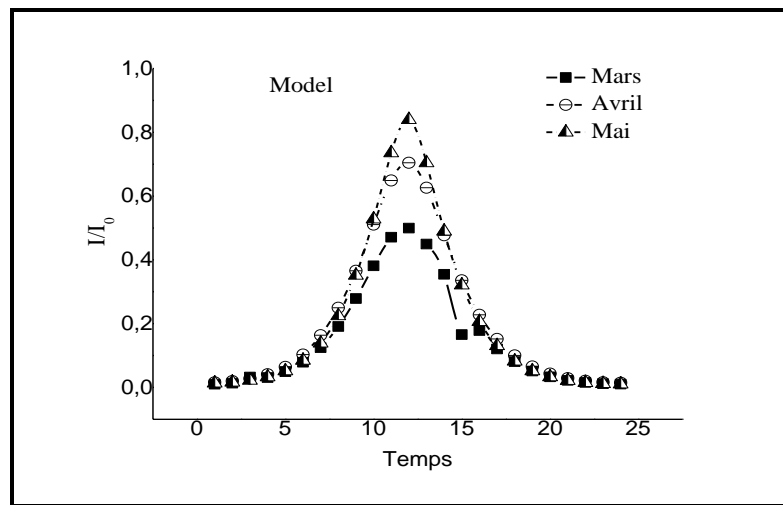
**Figure. IV. 1 :** Rayonnement solaire global suivant le modèle établis (Hiver).



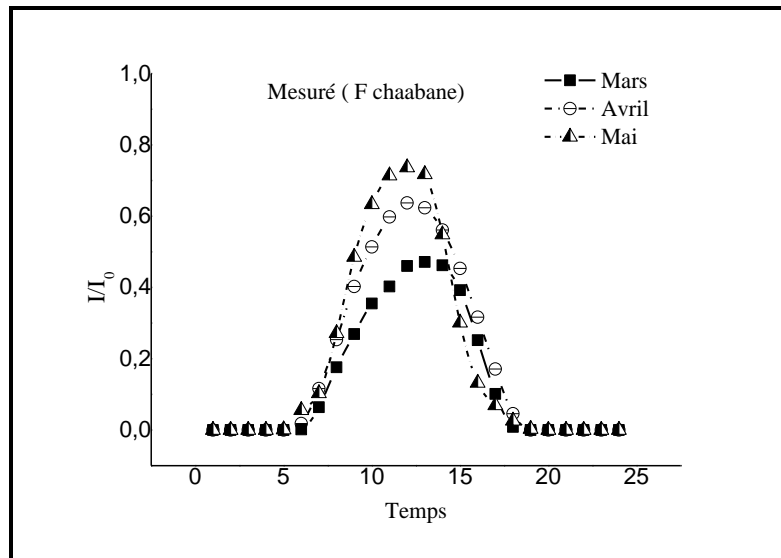
**Figure. IV. 2 :** Rayonnement solaire global suivant les données de F. Chabane (Hiver).

Les figures IV.1 et IV.2 représentent la comparaison entre le modèle établi et les données mesurées selon l'année 2018 de F. CHABANE, montrent la variation du rapport du rayonnement solaire global sur le plan horizontal en fonction de temps solaire vrai correspondant la saison de l'hiver. On observe que le rayonnement solaire global prend de valeur maximale au midi solaire par contre le lever et le coucher solaire, et l'approche entre les courbes de données mesurées et de modèle établis est importante.

**IV.2.2. Comparaison entre les données de F. Chabane (2018) et le modèle établis suivant la saison de printemps:**



**Figure. IV. 3 :** Rayonnement solaire global suivant le modèle établis (Printemps).

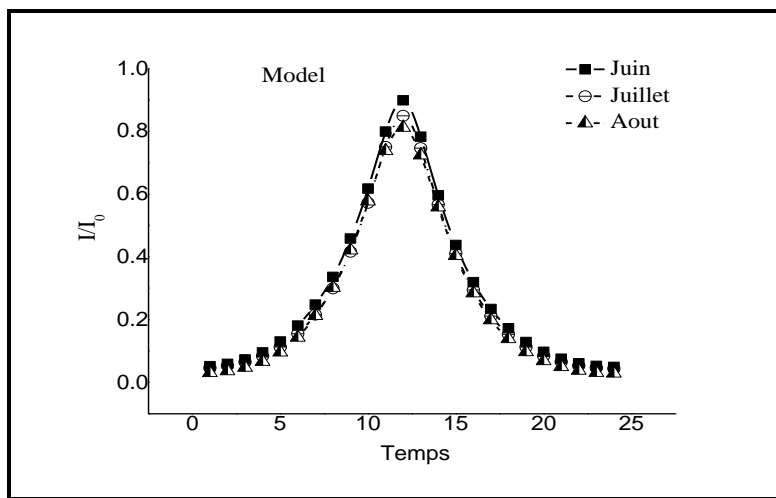


**Figure. IV. 4 :** Rayonnement solaire global suivant les données de F. Chabane (Printemps).

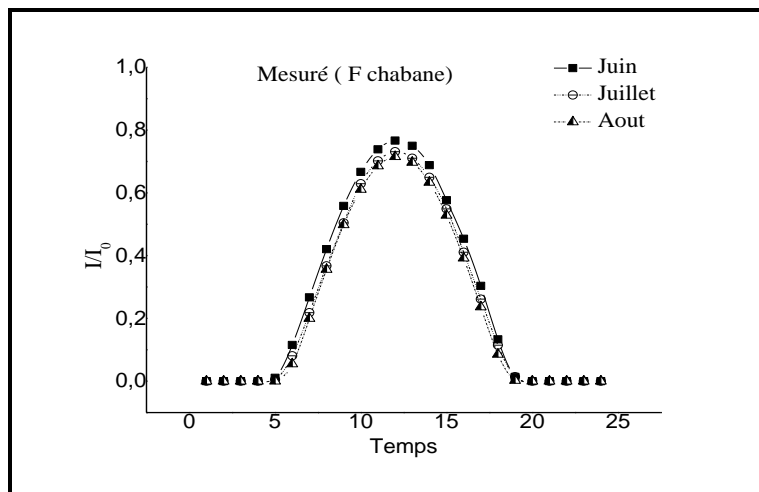
Les figures IV.3 et IV.4 montrent la variation du rapport du rayonnement solaire global et le constant solaire en fonction de temps solaire vrai selon les mois de Mars, Avril

et Mai, correspondent la saison de printemps, suivant les données de F.Chabane et le modèle établi. On remarque que la valeur de rapport du rayonnement solaire prend de valeur maximale au mois de Mai qui attend de valeur  $(I/I_0)_{mes} = 0.80$ ,  $(I/I_0)_{model} = 0.83$  au midi solaire, et minimale au mois de Mars, ou  $(I/I_0) = 0.48_{mes}, 0.5_{model}$  et intermédiaire de la saison est  $(I/I_0) = 0.63_{mes}, 0.7_{model}$ . On conclue que l'écart de rapport entre le modèle et les données mesurées montre bonne approche.

**IV.2.3. Comparaison entre les données de F.Chabane (2018) et modèles proposés à saison d'Été :**



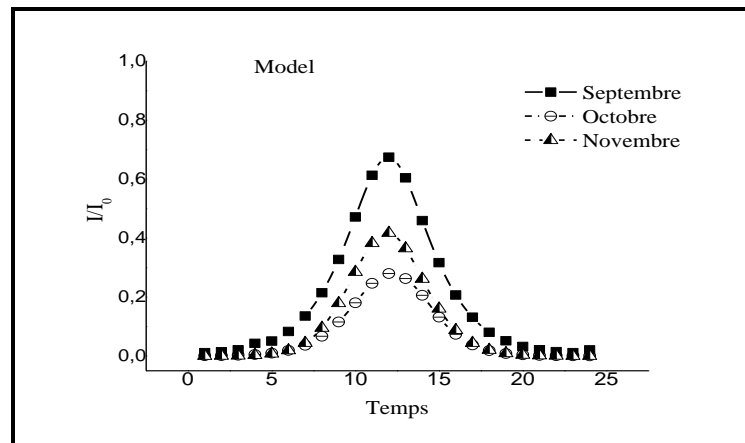
**Figure. IV. 5 :** Rayonnement solaire global suivant le modèle établis (Été).



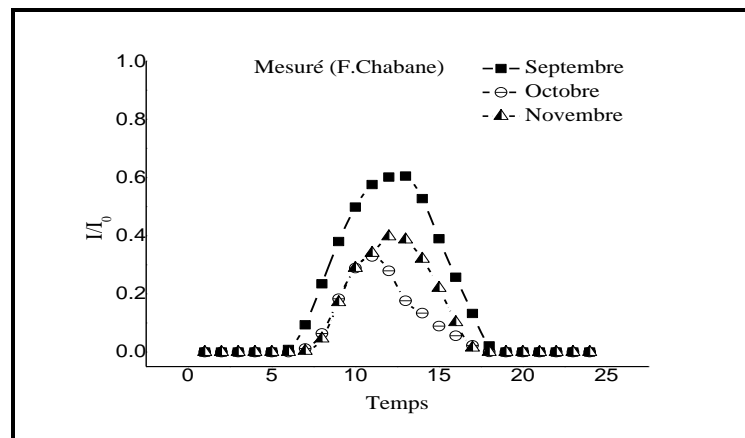
**Figure. IV. 6 :** Rayonnement solaire global suivant les données de F. Chabane (Été).

Les figures IV.5 et IV.6 représentent l'évolution du rapport du rayonnement solaire global et le constant solaire en fonction de temps solaire vrai selon les mois de Juin, Juillet et Aout correspond la saison d'Été, suivant les données de F.Chabane et le modèle établi. On observe que la valeur de rapport du rayonnement solaire est proche et parallèle entre les données et le modèle en tout les mois, tel que prend de valeur maximale au midi solaire attend  $(I/I_0) = 0.85_{\text{modèle}}, 0.81_{\text{mes}}$ .

**IV.2.4. Comparaison entre les données de F.Chabane (2018) et modèles proposés à saison d'Automne :**



**Figure. IV. 7:** Rayonnement solaire global suivant le modèle établis (Automne).

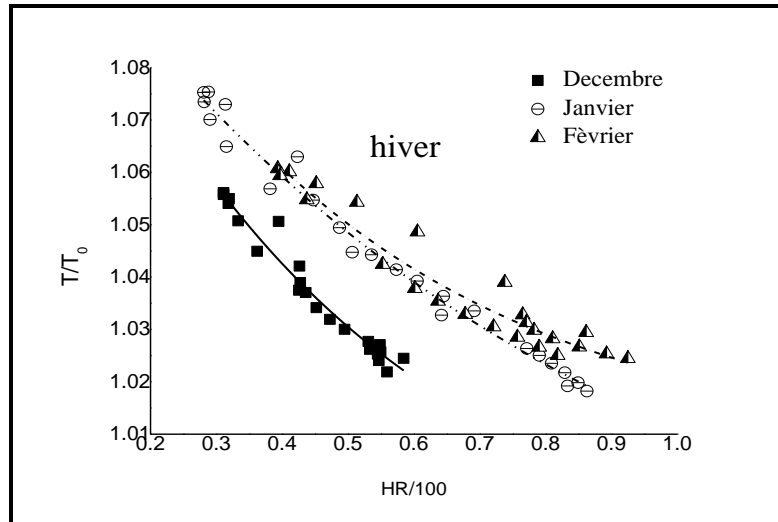


**Figure. IV. 8:** Rayonnement solaire global suivant les données de F. Chabane (Automne).

Les figures IV.7 et IV.8 représentent la variation du rapport du rayonnement solaire global et le constant solaire en fonction de temps solaire vrai selon les mois de Septembre, Octobre et Novembre, correspondent la saison automne, suivant les données de F.Chabane et le modèle établi. On remarque que la valeur de rapport du rayonnement solaire prend de valeur maximale au mois de Septembre qui attend de valeur  $(I/I_0) = 0.7$  au midi solaire,

et minimale au mois de Octobre, ou  $(I/I_0)=0.28$  et intermédiaire de la saison est  $(I/I_0)=0.4$ .

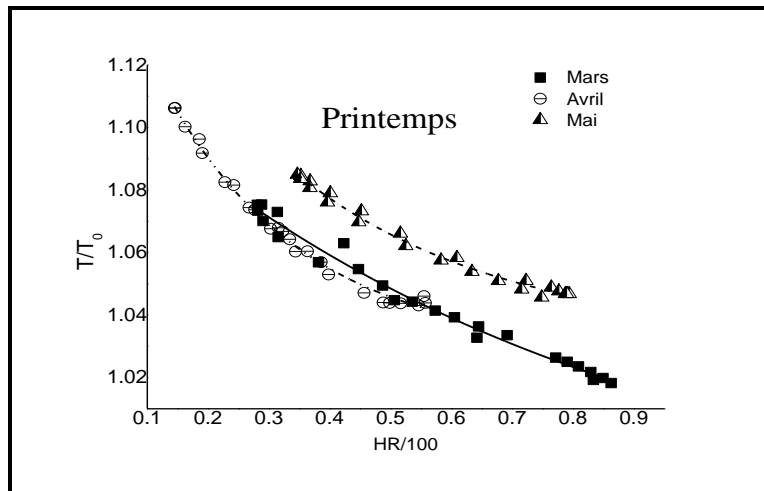
**IV.3. Variation de la température ambiante en fonction l’humidité relative dans les quatre saisons :**



**Figure. IV. 9:** la température ambiante en fonction l’humidité relative (hiver).

Les figures IV.9 montre la variation de rapport de température ambiante en fonction de l'humidité relatif dans le site de Biskra selon les trois mois relié à la saison d'hiver.

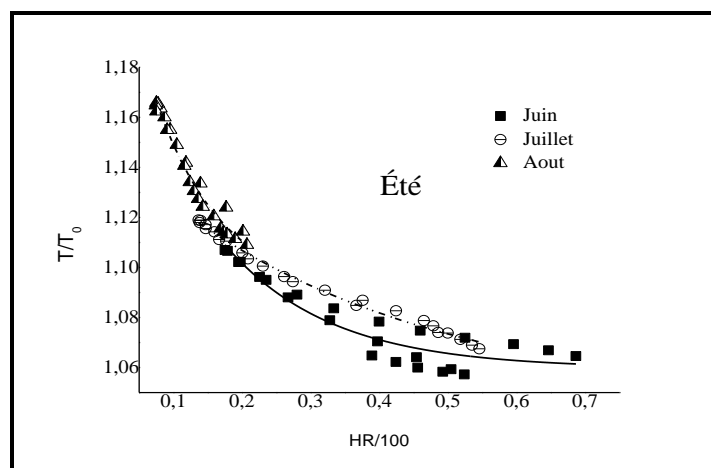
On observe que le rapport de température ambiante prend de valeur maximale au midi solaire par contre l'humidité prend de valeur minimal, pour chaque mois de la saison. On cible le rapport  $(T/T_0)=1.055, 1.075$  et  $1.060$  respectivement l'ordre du mois à la saison d'hiver sont représentées par de valeurs maximale, et pour l'humidité relative prend les valeurs minimale, soit  $(H_r /100)=0.3, 0.28$  et  $0.4$  respectivement l'ordre de mois.



**Figure. IV. 10:** la température ambiante en fonction l’humidité relative (Printemps).

Les figures IV.10 représentent l’évolution de rapport de température ambiante en fonction de l’humidité relatif au site de Biskra selon les trois mois se la saison printemps.

On observe que le rapport de température ambiante prend de valeur maximale au midi solaire par contre l’humidité prend de valeur minimal, pour chaque mois de la saison on cible le rapport  $(T/T_0) = 1.08, 1.11$  et  $1.088$  respectivement l’ordre du mois à la saison printemps sont représentées par de valeurs maximale, et pour l’humidité relatif prend les valeurs minimale  $(H_r / 100) = 0.3, 0.15$  et  $0.35$ , respectivement l’ordre de mois.



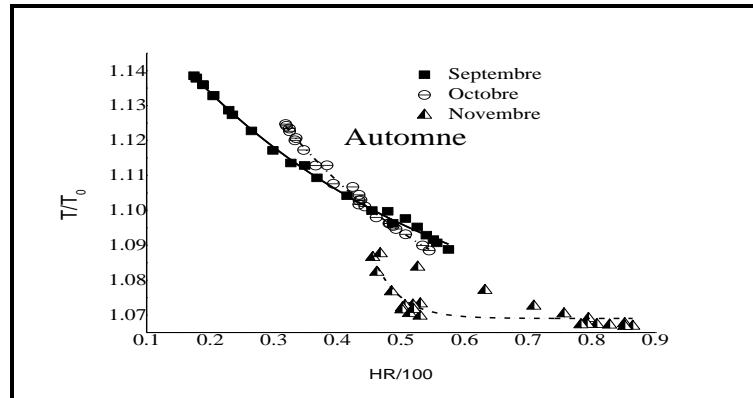
**Figure. IV. 11:** la température ambiante en fonction l’humidité relative (Été).

Les figures IV.11 montre l’évolution de rapport de température ambiante en fonction de l’humidité relatif au site de Biskra selon les trois mois se la saison printemps.

On observe l’approche entre les courbes et le rapport de température ambiante prend de valeur maximale au midi solaire par contre l’humidité prend de valeur minimal, pour



chaque mois de la saison on cible le rapport  $(T/T_0)=1.11,1.10$  et  $1.163$  respectivement l'ordre du mois à la saison d'été représente les valeurs maximale, et pour l'humidité relatif prend les valeurs minimale  $(H_r /100)=0.19,0.21$  et  $0.08$ , respectivement l'ordre de mois.

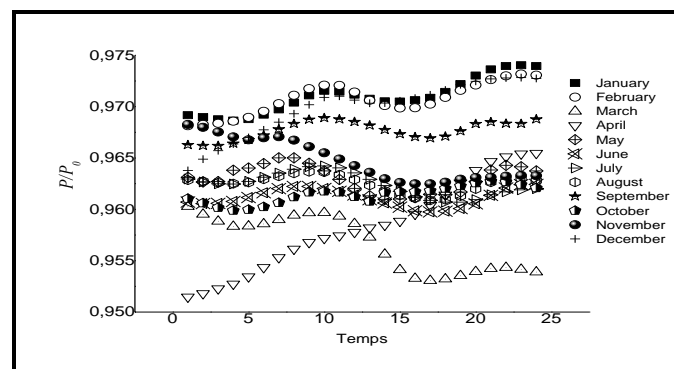


**Figure. IV. 12:** la température ambiante en fonction l’humidité relative (Automne).

Les figures IV.12 montre l’évolution de rapport de température ambiante en fonction de l’humidité relatif au site de Biskra selon les trois mois se la saison printemps.

On observe que le rapport de température ambiante prend de valeur maximale au midi solaire par contre l’humidité prend de valeur minimal, pour chaque mois de la saison on cible le rapport  $(T/T_0)=1.14,1.125$  et  $1.07$  respectivement l'ordre du mois à la saison d'automne sont représente les valeurs maximale, et pour l'humidité relatif prend les valeurs minimale  $(H_r /100)=0.19,0.35$  et  $0.45$ , respectivement l'ordre de mois.

**IV.4.Variation de la pression en fonction temps à tous les mois (2018) :**

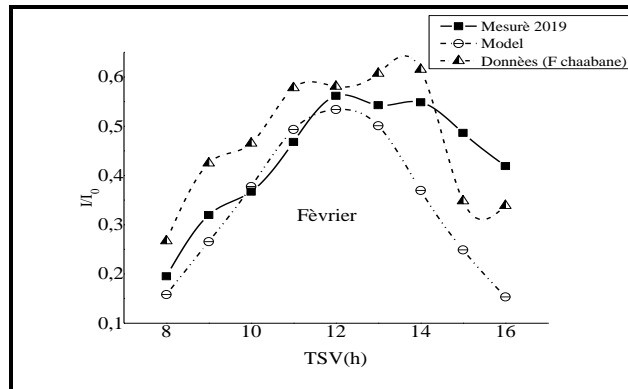


**Figure. IV. 13:**Evolution de la pression selon le temps (tous les mois de 2018).

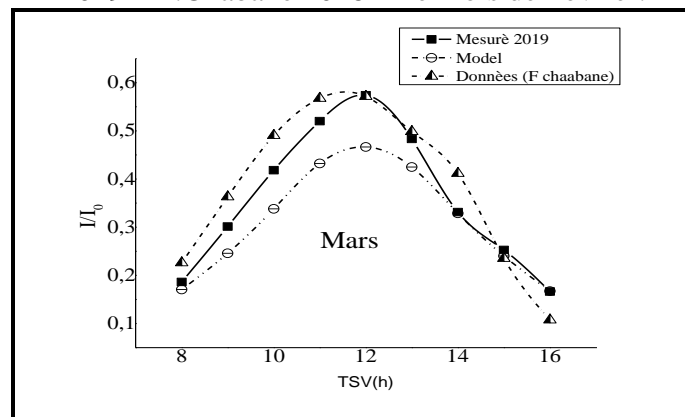
Les figures IV.13 représentent la variation de la de la pression selon le temps correspondent donnée par Dr F. CHABANE. On observe que la pression prend une forme

plus au mois sinusoïdale au long de la journée, quelles que soient les valeurs obtenues chaque mois. De plus, le rapport de pression est souvent élevé en hiver.

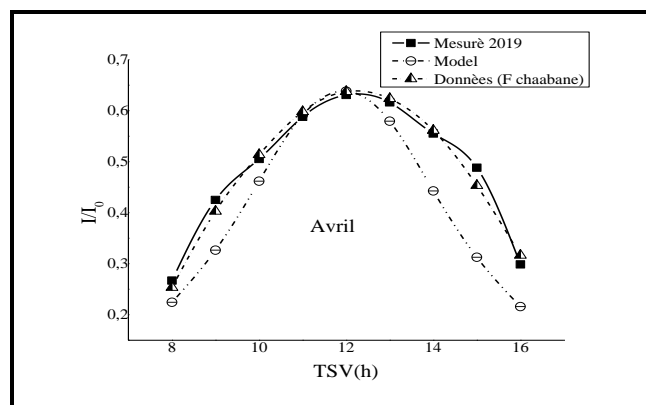
**IV.5. Comparaison de rayonnement solaire entre les données de F.Chabene (2018) - modèles proposés –mesuré (2019) :**



**Figure. IV. 14:** Comparaison de rayonnement solaire global « Modèles établis – Mesurer 2019 – F.Chabane 2018 » le mois de Février.



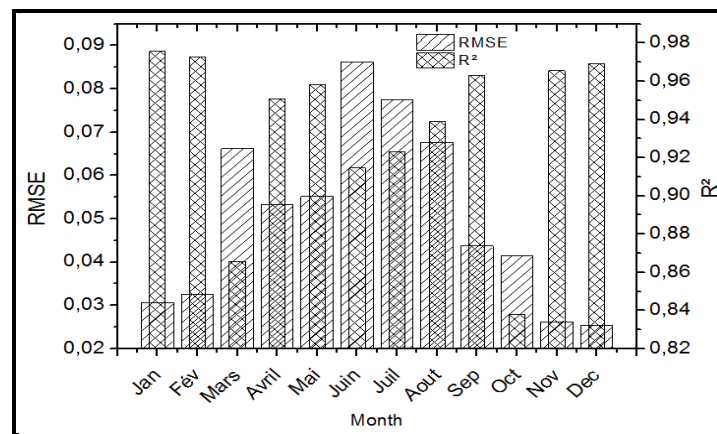
**Figure. IV. 15:** Comparaison de rayonnement solaire global « Modèles établis – Mesurer 2019 – F.Chabane 2018 » le mois de mars.



**Figure. IV. 16:** Comparaison de rayonnement solaire global « Modèles établis – Mesuré 2019 – F.Chabane 2018 » le mois d’avril.

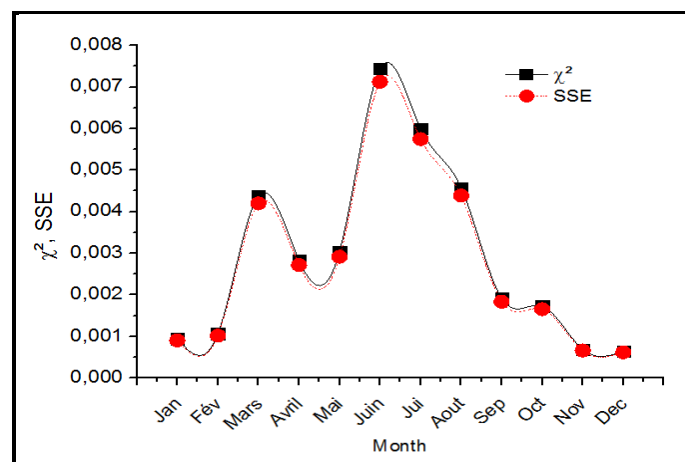
Les figures IV. 14, 15,16 représente la variation du rapport du rayonnement solaire globale « Modèles établis– Mesuré 2019 – F.Chabane 2018 » en fonction de temps solaire vrai selon les mois Février, Mars et Avril, on remarque la convergence dans les trois courbes, et la valeur de rapport du rayonnement solaire prend de valeur maximale au mois d’avril qui attend de valeur  $(I/I_0) = 0.65$  au midi solaire, et minimale au mois de Février, ou  $(I/I_0) = 0.5$ .

**IV.6.Les Erreur du rayonnement solaire :**



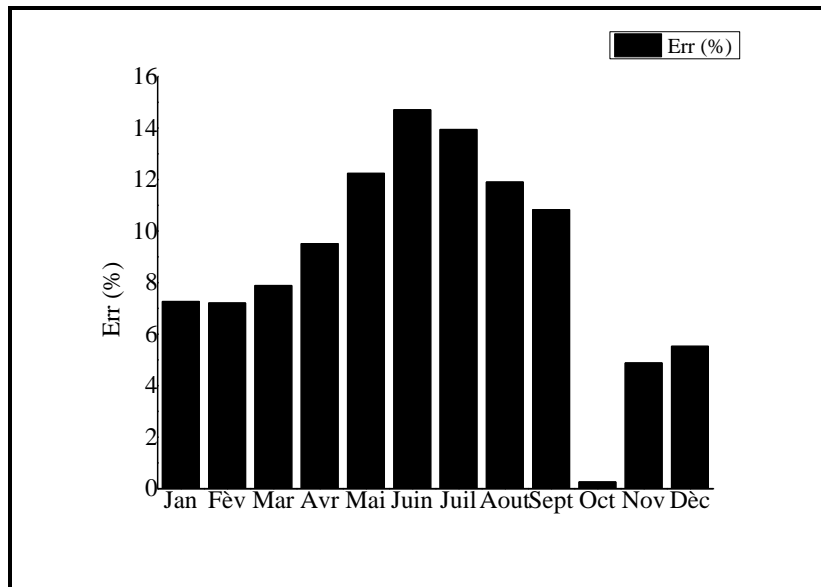
**Figure. IV. 17:** Variation de (RMSE) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) selon les mois de 2018.

La figure IV. 18 représente des barres qui traduisent les valeurs de RMSE et de coefficient de détermination  $R^2$  selon les mois de 2018. On observe que RMSE et  $R^2$  sont données un bon résultat dans les mois de Janvier, Février, Novembre et Décembre, tel que le coefficient de détermination prend respectivement les valeurs suivantes : 0.97, 0.968, 0.96, 0.966, et RMSE : 0.028, 0.03, 0.026, 0.025.



**Figure. IV. 18:** Variation de (SSE) et tests du chi carré ( $\chi^2$ ) selon tout les mois de 2018.

La figure IV. 19 exprimer la variation des erreurs SSE,  $\chi^2$  en tout les mois de 2018, on remarque qu'il y a une correspondance presque parfaite entre les deux, Ils prennent une valeur maximale en juin (0.0075), et la valeur minimal en Janvier, Février, Novembre et Décembre (0.001, 0.0011, 0.0005 et 0.0004), a partir dans ce contexte en juger que les valeurs minimal est représenter le bonne résultat.



**Figure. IV. 19:** Erreur relatif au midi solaire entre les valeurs mesuré 2018 du rayonnement global et le modèle proposé suivant tout les mois (2018).

La figure IV.20 exprimé l'erreur relative au midi solaire entre les valeurs mesurées 2018 du rayonnement solaire globale et le modèle proposé en tout les mois de 2018. On observe que les valeurs d'erreur relatif varié de (0.26 %) dans le mois d'octobre jusqu'à (14.76%) en juin.

#### IV.7.Conclusion :

Après avoir traduit notre données et les de F.Chabane sur le plan horizontal de Biskra en courbes. On conclure que le modèle proposé est proche de celle mesurée lors de l'expérimentation, comme elle est proche des travaux réalisés par Dr.f.Chabane

*Conclusion  
générale*

## Conclusion général

Ce travail, est réalisé pour proposer un modèle suffisamment pour prévoir selon divers contextes de rayonnement solaire global sur un plan horizontal .Ceci est très important pour toute une série d'applications de la conversion de l'énergie solaire. En effet, l'absence de données auparavant, on ne saura pas quelle sera le potentiel solaire préalable pour assurer d'une telle faisabilité ou telle fonction.

Les travaux rencontrés qui est 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 2018, 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, humidité relative et l'angle de hauteur soleil a partir ces études qui a les valeurs trouvées sont en bon accord avec ceux donnés par le modèle élaboré qui est en concordance avec celui mesurées en 2019. A remarquer également que le modèle sont très proches de l'expérimental et les données de F. Chabane.

Nous espérons que les prochaines promotions utilisent nos résultats comme base de données qui servira comme référence des études dans le domaine du gisement solaire.

- [1] **M.Koussa, M. Haddadi et A. Malek**, ‘Reconstitution des irradiations globale et diffuse en fonction de quelques paramètres météorologiques pour un ciel quelconque’. (2007).
- [2] **DRISSI Kanza** ‘‘Prédiction des Radiations Solaires Application à la Région de M’sila’’, Mémoire de master en énergétique. Université de MOHAMED BOUDIAF - M’SILA 2017.
- [3] **Khoudrane Ismail** « Etude d’un système de poursuite solaire pour les panneaux Photovoltaïques ». Mémoire de master en énergétique. Université de Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [4] **Mommi Nouredine**, ‘Energie renouvelable’, professeur en Génie Mécanique Université de Biskra.
- [5] **M.Capderou**, ‘Atlas solaire de l’Algérie’, O.P.U, Alger. (1985).
- [6] **A, Mefti; M, Y, bouroubi; H, Mimouni**. Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, décembre, 2002.
- [7] **C, Fröhlich**. 1978: World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112.
- [8] **S.Yousef-Ali**, ‘Étude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à convection forcée : Application à la pomme de terre’, thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2001.
- [9] **Noémie Poize**, ‘livre de gisement solaire CNFPT’, – Rhônalénergie-Environnement.– 21-23 février 2007.
- [10] **J.A. Duffie**, and **J.W. Beckman**, Solar Engineering of Thermal Processes, 2ed, Inc, 1991et 3rd Ed. John Wiley and Sons, 2006.
- [11] **Yves Jannot**, «Thermique solaire», Paris (2007).
- [12] **Mohamed-Yazid MECHRAOUI** , ‘Etude comparative de deux modelés de calcul du rayonnement solaire par ciel claire en Biskra’,05 Juin 2017.
- [13] **T. P. Chang**, “ Investigation on frequency distribution of global radiation using different probability density functions”, International Journal of Science and Engineering Vol. 8(2), 2011.
- [14] **Zekai Sen**. Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, Springer 2008
- [15] **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.

- [16] **S. M. Ait cheikh**, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », thèse de Doctorat d'Etat en électronique, Ecole Nationale Polytechnique, soutenue en Décembre 2007.
- [17] **Viorel Badescu**. Modeling solar radiation at the earth's surface, Springer 2008
- [18] **Yassine Sahnoune**. Modélisation du rayonnement solaire sur quelques sites algériens. Mémoire de magister (2007), université de Sétif
- [19] SiteInternet.[http://docinsa.insa-Lyon.fr/these/2004/chain/05\\_chapitre\\_1](http://docinsa.insa-Lyon.fr/these/2004/chain/05_chapitre_1)(Consulté le21/06/2009).
- [20] **M<sup>elle</sup> MEZIANI Fariza** “ Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG” Mémoire de Magister faculté de génie électrique et de l'informatique département d'électronique, université mouloud Mammeri de tizi ouzo.
- [21] **F.Chabane**, ‘ Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire’, thèse doctorat en sciences en Génie Mécanique 2015.
- [22] **Bendjellouli Zakaria**, « contribution à la modélisation d'une cellule solaire », mémoire
- [25] **P. I. Cooper**, ‘The absorption of solar radiation in solar stills’, Sol. Energy 12 (3), 333-346, 1969.
- [26] **R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz**, « Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique et applications », Technique & Documentation, Ed. Lavoisier, France, 1983.
- [27] **M. Capderou**, « Atlas Solaire de l'Algérie, modèles théoriques et expérimentaux», Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [28] **K. MAHDI**, « Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique », mémoire de Magister en physique, Université Mentouri Constantine, soutenue le 08 mars 2008.
- [29] **K. Danel, L. Gautret**, « Génération du disque solaire des communes de l'Ouest », ARER, Mars - Août 2008.
- [30] **H .Chenoufi**, ‘étude et simulation du panneau solaire par les réseaux des neurones artificiel’, mémoire d'ingénieur, Centre Universitaire d'el-oued ,2007.
- [31] Géométrie solaire sur site Internet.[http://www.outilssolaires.com/Glossaire/spin geometrie.htm](http://www.outilssolaires.com/Glossaire/spin_geometrie.htm) (consulté le 22/05/2009).
- [32] **Viorel Badescu**. Modeling solar radiation at the earth's surface, Springer 2008
- [31] **M.IQBAL**, ‘An introduction to solar radiation’, Academic press, New York, 1983.



- [32] **J.M. Chasseriau**, « Conversion Thermique du Rayonnement Solaire », Ed. Dunod, France, 1984.
- [33] **Y.ATTAF**, ‘Détermination du rayonnement solaire globale par imagerie météo-sat’, Thèse de Magister en Automatique Industrielle, Université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2003.
- [34] Le jour solaire vrai et Jour solaire moyen sur site  
Internethttp://www.cosmovisions.com. (Consulter le 18/06/2009).
- [35] **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.
- [36] **Y.Jonnet**, ‘thermique solaire’, Octobre2003.
- [37] **Jamil Ahmad M.**, Tiwari. G.N., (2010): Solar radiation models – review, international journal of energy and environment. Volume 1, Issue 3, 2010 pp.513-532 .
- [38] **Bakirci. K.**, (2009): Models of solar radiation with hours of bright sunshine: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 2580–2588.
- [39] **BOUCHOUICHA Kada**,’’ Modélisation multispectrale des images satellitaire - Application : Quantification du bilan d’énergie Sol-Atmosphère’’, thèse de doctora en science, université .S.T.O.M.B –Oran 2017.
- [40] **M. Mesri-Merad, I. Rougab, A. Cheknane et N.I. Bachari**, ‘Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques’, Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 451 – 463.
- [41] **Zang H., Xu Q. & Bian H**, Generation of typical solar radiation data for different climates of China. Energy, 38(1), pp.236–248, 2012.
- [42] **A.S. Sambo**, ‘Empirical Models for the Correlation of Global Solar Radiation with Meteorological Data for the Northern Nigeria’, Solar Energy, Vol. 3, N°2, pp. 89 – 93, 1986.M. Koussa et al. 92.
- [43] **Laznek Imene**, Prédiction de l’irradiation solaire globale sur le plan horizontal avec l’effet de l’humidité relative’’, Mémoire de master en énergétique.Université Mohamed Khider Biskra Juin 2018
- [44] **M. Capderou**, Atlas solaire en Algérie (tome 1, 2 et 3), O.P.U Alger, 1988.
- [45] **Hamani Nadjette**’’ Modélisation du flux solaire incident et de la température de sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident’’mémoire de Magister En Physique du Solide, Université Mohamed Khider-Biskra 2005.

- [46] **Khadraoui Zina,** "Influence des paramètres climatiques sur le rayonnement solaire global selon le plan horizontal", Mémoire de master en énergétique. Université Mohamed Khider Biskra Juin 2018.
- [47] **F. Chabane et al,** 'Predictions of solar radiation distribution Global, direct and diffuse light on horizontal surface' Regular Article, Université Mohamed Khider Biskra 2016.
- [48] **S M E Bekkouche.** "Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires" thèse Doctorat en Physique, l'université abou-bakr belkaïd Tlemcen, 2009.
- [49] **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.
- [50] **Kaplanis S, Kaplani E.** A model to predict expected and stochastic hourly global solar radiation  $I(h,n_j)$  values. *Review Energy* .32(8): 1414-25, 2007.
- [51] **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.
- [52] **EFTIMIE Elena** „Computer program for the solar irradiance evaluation–simulated data validation“ Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume IX (XIX), NR2, 2010.
- [53]<https://www.infoclimat.fr/observationsmeteo/archives//60525.html?graphies>.  
5/mai/2019/biskra
- [54][https://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/archive/biskra\\_alg%C3%A9rie\\_2503826https://www.wofrance.fr/weather/maps/city](https://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/archive/biskra_alg%C3%A9rie_2503826https://www.wofrance.fr/weather/maps/city) 5 mai 2019.

**Résumé :** Notre travail est consacré l'étude expérimentale et théorique du rayonnement solaire global sur le plan horizontal selon le site de Biskra. On doit établir un modèle mathématique sous forme exponentielle en fonction de la hauteur soleil, la température ambiante, l'humidité relative et la pression. Ce modèle est basé sur les données mesurées par Dr. Foued Chabane en 2018 correspondent le même région de Janvier jusqu'à le mois de Décembre. On examiné les résultats de l'année actuel avec le modèle mathématique établis sont donnés bon d'accord par minimum errors, ou le coeffecient de détermination  $R^2$  est comprimé entre 0.83809 et 0.97567 et petite valeur de tests du chi carré ( $\chi^2$ ) qui comprimé entre 0.00064302 et 0.00743944. Le meilleur interpolation est ciblé selon le mois de Janvier, Novembre et Décembre et ça ne dit pas que les autres mois ne pas parfait par contre ils ont édifiant.

**Mots clés :** rayonnement solaire, température ambiante, humidité, pression, corrélation.

**Abstract:** Our work is devoted to the experimental and theoretical study of global solar radiation on the horizontal plane according to the site of Biskra. An exponential mathematical model should be established as a function of sun height, ambient temperature, relative humidity, and pressure. This model is based on the data measured by Dr. Foued Chabane in 2018 correspond the same region from January until the month of December. We examine the results of the current year with the established mathematical model are given good agreement by minimum errors, or the coefficient of determination  $R^2$  is compressed between 0.83809 and 0.97567 and small value of Chi square tests ( $\chi^2$ ) that compressed between 0.00064302 and 0.00743944. The best interpolation is targeted according to the month of January, November and December and it does not say that the other months are not perfect by cons they have edifying.

**Key words:** solar radiation, ambient temperature, humidity, pressure, correlation.

**ملخص:** يكرس عملنا دراسة تجريبية ونظرية للإشعاع الشمسي العالمي على المستوى الأفقي وفقًا لموقع بسكرة. حيث قمنا بإنشاء نموذج رياضي في شكل الأسّي بدلالة إرتفاع الشمس , درجة الحرارة المحيطة , الرطوبة النسبية والضغط. يعتمد هذا النموذج على البيانات التي قاسها الدكتور فؤاد شعبان في عام 2018 وهي تتوافق مع نفس المنطقة من جانفي حتى شهر ديسمبر. أختبرت نتائج العام الحالي مع النموذج الرياضي المعمول به حيث أعطت توافق في القيم مع وجود أخطاء دنيا, تم تحديد  $R^2$  (معامل التحديد ) بين 0.83809 و 0.97567 وقيمة (اختبار مربع صغير) ( $\chi^2$ ) التي تم حصرها بين 0.00064302 و 0.00743944. وجد أفضل إستيفاء في شهر جانفي, نوفمبر و ديسمبر و هذا لا يعكس أن الأشهر الأخرى ليست مثالية بالعكس مقبولة.

**الكلمات المفتاحية:** الإشعاع الشمسي, درجة الحرارة المحيطة, الرطوبة, الضغط, علاقة