

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



**FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° : Ph/ENR/26/2020

DOMAINE : Sciences de la matière

**FILIERE : Physique
OPTION : physique énergétique
Et Energies Renouvelables**

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

**Réalisé par:
Kihoul Khadidja Et Bounab Lynda**

Intitulé

**Estimation du Rayonnement Solaire en Station
d'Ain El Melh Cas d'un Ciel Clair**

Soutenu le..... /09 /2020 devant le jury composé de :

TALOUB Djedid	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Président
BOURAS Abdelkarim	Université Mohamed Boudiaf- M'silla	Rapporteur
NAHOUI Azzeddine	Université Mohamed Boudiaf- M'silla	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et c'est grâce à lui que ce travail a pu être réalisé.

*Nous remercions le docteur **BOURAS ABEDELKRIM** d'avoir accepté d'être notre encadreur de mémoire, ses conseils et son soutien ont été pour nous un vrai support scientifique*

Aux membres du jury, vous nous faites un grand honneur en acceptant de juger ce modeste travail, nous vous en remercions et vous témoignons notre profonde et respectueuse gratitude.

*Nous remercions le Directeur de la Station d'Ain El Melh d'avoir accepté Demande de ponctuation, nous remercions également tout le personnel administratif pour la bonne réception en particulier les ingénieurs **Mouad kichan** et **Soufian louahdi** nous accompagnent tout au long de la période de formation avec une donnée Toutes les informations sur l'énergie solaire.*

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en premier lieu À mes très chers parents en reconnaissance de leur soutien dans mes études.

A mes sœurs Sabrina, Chafia, Toubba et Maroua.

A mon frère Zakaria.

A mon fiancé Monsieur Sabri Abdeldjalil ainsi qu'à sa famille

A Toute Ma Famille

A mes intimes et à toute personne qui me connaît.

A tous mes collègues d'étude, en particulier mon binôme Lynda à sa famille.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

KHADIDJA KIHOU

بسم الله الرحمن الرحيم

اهداء

بفضل الله وكرمه وعطاءه انهينا عملنا المتواضع

الذي بين ايديكم

اهدي هذا العمل الى من كان سبب الوجود وعلّة الكيان

ابي وامي الكريمين

الى من انتضرت منه الصبر والتفهم فامطرني

تشجيعا و مساعدة و ايمانا بجهدى و برسالتى زوجى

صديق و الى ثمرة عمري ابنتى ايلين و الى جميع الغالى

افراد اسرتى و احبابى

الى كل من ساعدنى من قريب او من بعيد ولو

بابتسامة تشجيع .

RESUME

L'évaluation à long terme des performances des systèmes de conversion de l'énergie solaire s'établit par l'intermédiaire de programmes de simulation numérique, qui nécessitent la connaissance des paramètres météorologiques et radiométriques, tels que le vent, l'insolation, la température, l'humidité relative, la pression et les composantes de rayonnement solaire. L'utilisation des modèles d'estimation de l'éclairement solaire reste pratiquement l'un des seuls moyens pour pallier au problème des données radiométriques à cause de la rareté des stations radiométriques sur le territoire national.

Dans ce travail, nous avons analysé des données météorologiques : d'un mois Février 2020 et nous avons fait une étude comparative entre des valeurs de rayonnement solaires mesurées sur la station d'Ain El Melh (32. °N, 5°E) et des valeurs estimées par le modèle théorique LIU JORDAN.

L'étude comparative des résultats obtenus a montré que le modèle LIU JORDAN donne une différence négligeable entre les valeurs mesurées et celles calculées.

Ain El Melh est une très bonne région pour le projet d'énergie photovoltaïque car elle a un climat adapté, Un flux important de rayonnement solaire.

Mots clés : l'énergie solaire, simulation, paramètres météorologiques, modèle théorique LIU JORDAN.

ABSTRACT

Long-term evaluation of the performance of solar energy conversion Systems is established through numerical simulation programs, which require knowledge of meteorological and radiometric parameters, such as wind, insolation, temperature, relative humidity, pressure and solar radiation components. The use of solar light estimation models remains virtually one of the only means to overcome the problem of radiometric data because of the scarcity of radiometric stations in the national territory.

In this work, we analyzed meteorological data: from a self February 2020 and we made a comparative study between solar radiation values measured on the station of Ain El Melh (32. °N, 5°E) and values estimated by the theoretical model LIU JORDAN.

The comparative study of the results obtained showed that the LIU JORDAN model gives negligible deference between the measured and calculated values.

Ain El Melh is a very good area for photovoltaic energy project because it has a suitable climate, An important flow of solar radiation.

Key words: solar energy, simulation, knowledge of meteorological, model LIU JORDAN.

المخلص

يتم تقييم أداء أنظمة تحويل الطاقة الشمسية على المدى الطويل من خلال برامج محاكاة رقمية تتطلب معرفة المعلومات المتعلقة بالأرصاد الجوية و الإشعاعية مثل الرياح، الشمس، درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، الضغط، مكونات الإشعاع الشمسي. ولا يزال استخدام نماذج تقدير الإشعاع الشمسي يشكل في الواقع إحدى الوسائل الوحيدة للتغلب على مشكلة البيانات الإشعاعية بسبب ندرة المحطات الإشعاعية في الإقليم الوطني.

في هذا العمل، قمنا بتحليل بيانات الأرصاد الجوية خلال شهر فبراير 2020، كما قمنا بإجراء دراسة مقارنة بين قيم الإشعاع الشمسي التي تم قياسها على مستوى محطة عين الملح (32 درجة شمالاً و 5 درجة شرقاً) والقيم التي يقدرها النموذج النظري لي جوردون.

ولقد أظهرت الدراسة المقارنة للنتائج التي تم الحصول عليها أن نموذج لي جوردون يعطي خطأ ضئيلاً بين القيم المقاسة و المحسوبة.

عين الملح منطقة جيدة جداً لمشروع الطاقة الضوئية لأن لها مناخ مناسب، تدفق هام من الإشعاع الشمسي.

الكلمات المفتاحية :

الطاقة الشمسية، محاكاة، الأرصاد الجوية، ، نموذج لي جوردون.

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Liste des abréviations

Introduction générale.....2

CHAPITRE I : Gisement solaire

I.1.Introduction 6

I.2.Soleil 6

I.2.1. Caractéristiques de soleil.....6

I.2.2.Composition7

I.2.3.origine9

I.3. Mouvement apparent du soleil..... 9

I.3.1. Remarque9

I.4. Mouvement de la terre..... 10

I.5.L'énergie solaire 11

I.6.Constante solaire..... 11

I.7. Irradiation ou rayonnement solaire au sol 12

I.7.1. Rayonnement direct (D).....12

I.7.2. Rayonnement diffus(S).....13

I.7.3.Albédo 13

I.7.4. Rayonnement global(G) 14

I.8. Coordonnées géographiques 14

I.8.1.La longitude (L).....15

I.8.2.L'altitude (z):15

I.8.3.La latitude θ15

I.9.Coordonnées célestes horaires.....	15
I.9.1. Déclinaison (δ)	15
I.9.2.Angle horaire (ω)	16
I.10.Coordonnées célestes horizontales	16
I.10.1. Hauteur du soleil(h).....	16
I.10.2 .Azimut(a)	17
I.11. Paramètre de temps	17
I.11.1. Temps universel (TU)	17
I.11.2. Temps Solaire Moyen (TSM)	18
I.11.3.Équation du temps.....	18
I.11.4. Temps Solaire Vrai (TSV)	18
I.11.5. Temps légal (TL).....	19
I.12.Lever et coucher du soleil	19
I.13. Durée et taux d'enseillement	19
I.13.1. Durée d'enseillement	19
I.13.2. Taux d'enseillement	20
I.14. Gisement solaire en Algérie	20
II.14.1 Variation spatio-temporelle de La durée d'insolation	21
I.15.Conclusion	23

CHAPITR II : les modèles

II.1.Introduction.....	25
II. 2. Description des Modèles.....	25
II .3.Modèle de Capderou	25
II .3.1. Eclairment direct par ciel clair obtenu sur un plan horizontal.....	25
II .3.2.Eclairment global reçu sur un plan horizontal	26

II .3.3.Eclairage direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné.	26
II .3.4. Eclairage diffus incident sur un plan incliné	26
II .4. Modèle de R-sun-:	26
II. 4. 1. Facteur de trouble de linke.....	26
II .4.2 .Rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair.....	26
II .4.3. Rayonnement direct normal sur un plan incline.....	27
II .5.Modèle de LIU & JORDAN	27
II .5.1.Irradiation directe sur un plan incliné.....	28
II. 5. 2. Facteur d'inclinaison du rayonnement direct.....	28
II .5.3. Irradiation réfléchie sur un plan incliné.....	28
II. 6. Modèle de Bird & Hulstrom:	28
II. 6.1. Eclairage dû au rayonnement direct sur un plan horizontal	28
II. 6.1.1. Calcul du rayonnement direct	28
II. 6.1.2. Calcul du rayonnement diffus	30
II. 6.1.3. Calcul du rayonnement global.....	31
II.7.Conclusion	31

CHPITRE III: Station d'Ain El Melh

III.1. Introduction	33
III.2.Energie photovoltaïque.....	33
III.2.1.Types et rendement des cellules photovoltaïques	34
III.2.1.1.Cellules monocristallines.....	34
III.2.1.2.Cellules polycristallines	34
III.2.1.3.Cellules amorphes	34
III.3. Principe de fonctionnement de la cellule PV	34

II.5. Avantages et inconvénients des systèmes Pv	35
II.5.1. Avantages.....	35
II.5.2. Inconvénients	35
III.6. Présentation de SKTM	37
III.6.1. But de création	37
III.6.2. Missions principales de SKTM	37
III.7. Présentation de la centrale	37
III.7.1. Production d'électricité PV	38
III.7.2. Composition du système photovoltaïque	38
III.7.3. Présentation d'un Système photovoltaïque	39
III.8. Appareils de mesures utilisées dans la station d'Ain El Melh	40
III.8.1. Capteur 5 éléments	40
III.8.2. Capteur pour mesurer l'humidité en bas	41
III.8.3. Capteur de quantité de pluie	41
III.8.4. Deux capteurs collés	42
III.8.5. Pyranomètre	42
III.9. Quelques informations intitulé la station.....	43
I.10. Conclusion	44

CHAPITRE IV: Résultats et discussions

IV.1. Introduction	46
IV.2. Données utilisées	46
IV.3. Caractères Moyens du Climat a station d'Ain El Melh	46
IV.3.1. Temperatures	46
IV.3.2. Vitesse de vent.....	47
IV.3.3. Pression	48

SOMMAIRE

IV.3.4.L'humidité.....	49
IV.4. Rayonnements solaires.....	50
IV.5. Puissance totale	51
IV.6.Estimation du rayonnement solaire global instantané.....	52
IV.7.Comparaison des valeurs estimées aux mesures au sol.....	54
IV.8.Conclusion.....	55
Conclusion général.....	57
Bibliographie.....	60

Liste des figures

Chapitre I : Gisement solaire

Figure I.1	Structure du soleil.....	8
Figure I.2	Mouvement apparent du soleil en un point de l'équateur.....	9
Figure I.3	Mouvement apparent du soleil aux équinoxes.....	10
Figure I.4	Mouvement de la terre autour du soleil.....	11
Figure I.5	Variation mensuelle de la constante solaire.....	12
Figure I.6	Composantes principales du rayonnement solaire.....	14
Figure I.7	Longitudes et latitudes sur le globe.....	15
Figure I.8	La déclinaison du soleil (δ).....	16
Figure I.9	Repérage du soleil.....	17
Figure I.10	Les coordonnées célestes horizontales.	17
Figure I.11	Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....	21
Figure I.12	Carte de la durée d'ensoleillement moyen annuel en..... Heure (1983-2012).	22
Figure I.13	Répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie.....	22

Chapitre III : Station d'Ain El Melh.

Figure. III.1	Types des cellules photovoltaïques.....	34
Figure. III.2	Principe de fonctionnement de la cellule PV.....	35
Figure. III.3	symbole de SKTM.....	36
Figure. III-4	Installation photovoltaïque de la station d'Ain El Melh.....	38
Figure. III-5	principe de la production électrique solaire.....	38
Figure. III-6	Schéma de la centrale de production d'électricité PV.....	39
Figure. III.7	capteur 5 éléments de station.....	41
Figure. III-8	capteur pour mesurer l'humidité en bas de la station.....	41
Figure. III-9	capteur de mesure la quantité de pluie.....	42
Figure. III-10	pyranomètre.....	43

Chapitre IV : Résultats et discussions.

Figure IV. 1	Évolution de la température ambiante en fonction du temps pour 4, 27 Février 2020.....	47
---------------------	---	----

Figure IV.2 : Évolution de la température de panneau en en fonction du temps pour 4, 27 Février 2020 .	47
Figure IV.3 Variation de la vitesse des vents a la station d'Ain El Melh pour le 4,27 Février 2020.	48
Figure IV.4 : variation de pression atmosphérique en fonction de temps pour le 4,27 Février 2020....	49
Figure IV.5 variation de l'humidité a station pour le 4 et 27 Février 202.....	50
Figure IV.6 évolution du rayonnement direct pour le 4,27 Février 2020.....	51
Figure IV.7 : évolution de rayonnement totale pendant le 4,27 Février 2020.....	51
Figure IV.8 évolution de rayonnement diffus pour le 4,7 Février 2020.....	51
F Figure IV.9 évolution de rayonnement totale sur un plan incliné pour le 4,7 Février 2020.....	51
Figure IV.10 Evolution de puissance totale en fonction de temps pour le 4,27 Février 2020.....	52
Figure IV.11 Estimation du rayonnement solaire global de la station d'Ain El Melh les 5, 10, 15,17 et 20 Février 2020 (ciel clair.....	53
Figure IV.12 : Estimation du rayonnement solaire global de la station d'Ain El Melh les 8, 12,19, 21 et 29 Février 2020 (Ciel nuageux).....	54
Figure IV.13 : évolution de l'indice de clarté (15/02/2020).....	54
Figure IV.14 Comparaison des valeurs du flux dû au rayonnement globale mesurées et estimées par le modèle d' LIU JORDAN.....	55

Liste des tableaux

Chapitre I: Gisement solaire.

Tableau. I.1.	caractéristiques principales du soleil.....	7
Tableau. I.2.	Albédo de différente surface.....	13
Tableau. I.3.	Potentiel solaire en Algérie.....	21

Chapitre III: Station d'Ain El Melh.

Tableau. III.1.	Installation photovoltaïque.....	39
------------------------	----------------------------------	----

Chapitre IV: Résultats et discussions.

Tableau. IV.1.	Coordonnées géographiques de site utilisé.....	46
-----------------------	--	----

LISTE DES SYMBOLES ET NOMENCLATURE

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>
C	la constante solaire.
I_0	Est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue égal 1353 (W/m ²).
N	le numéro du jour de l'année (jour).
h	Hauteur du soleil (°).
T_L	Est le facteur de trouble de linke.
P_V	Est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en (mm Hg).
G	Rayonnement global (w/m ²).
D	Rayonnement direct (w/m ²).
S	Rayonnement diffus (w/m ²).
HD	Rayonnement diffus horizontal.
ρ	Albédo.
I^*	L'éclairement solaire direct (S) sur un plan horizontal (w/m ²).
G_h	Le rayonnement global parvenant au sol sur une surface horizontale (w/m ²).
D_h	Le rayonnement diffus parvenant au sol sur une surface horizontale (w/m ²).
d_{re}	Rayonnement solaire réfléchi par le sol (w/m ²).
T_{st}	Le temps standard ou officiel.
FH_{loc}	Fuseau horaire du lieu considéré.
F	Taux d'enseillement ou taux d'insolation.
SS	Insolation (heures).
SS_0	Durée maximale d'enseillement (Durée du jour) (heures).
C_{t-s}	Facteur de correction de la terre-soleil (m).
m_A	Masse d'air à la pression réelle.
δ_R	Epaisseur optique de l'atmosphère.
T_n	Facteur de transmission.
F_d	La fonction de l'altitude solaire.
δ_{exp}	La position du soleil par rapport à une surface inclinée.
F_B	La fonction du rayonnement diffus du ciel.
I_{SC}	Constante solaire.
τ_r	La diffusion Rayleigh.
τ_g	L'absorption par les mélanges gazeux.

τ_w	L'absorption par la vapeur d'eau.
τ_a	L'atténuation par les aérosols.
τ_0	L'absorption par l'ozone.
K_a	Epaisseur optique de l'aérosol (cm)
K_c	L'indice de clarté.
RH	Humidité relative(%).
ΔH	Le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré (heure).
θ	La latitude(°).
L	La longitude(°).
Z	l'altitude(m)
δ	La déclinaison (°).
ω	L'angle horaire(°).
γ	Angle azimutal(°).
β	Angle du plan d'inclinaison (°).
a	L'azimut (°).
θ_z, θ_s	Angle zénithal solaire (°)
λ	Longueur d'onde (μ).

LISTE DES ABREVIATIONS

ASA	l'Agence Spatiale Allemande.
ET	Equation du temps.
GMT	Greenwich Mean Time.
MT	Poste d'évacuation
ONM	Office National de la Météorologie.
OMN	Organisation Météorologique Mondiale.
PV	Photovoltaïque.
SKTM	Shariket Kahraba Wa Taket Moutadjadida.
TU	Le temps universel (heure).
TSM	Le temps solaire moyen (heure).
TSV	Temps solaire vrai (heure).
TL	Le temps légal (heure).
TG	une centrale turbine à gaz.
UPSE	l'unité de production Sud-est).
UPSO	L'unité de production Sud-Ouset).

Introduction générale

Introduction Générale

Le soleil fournit une énergie lumineuse grandiose à la Terre, cette énergie est renouvelable énorme et inépuisable. L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des autres énergies renouvelables. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre [1]. Ce déséquilibre dans l'exploitation des différentes sources d'énergie a causé d'importants problèmes pour la santé humaine et pour la dégradation de l'environnement due à la pollution. Dans cette situation l'homme a été obligé de s'orienter vers d'autres sources d'énergies propres, tel que l'énergie solaire. Le rayonnement solaire représente une source inépuisable à l'échelle humaine. Elle est propre et gratuite. Ce rayonnement est converti en une énergie utilisable par l'intermédiaire de systèmes tels que les capteurs et distillateurs thermiques, les cellules solaires.

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contrechoc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 après la signature du protocole de Kyoto qui prévoit une baisse de 5.2% des émissions des gaz à effet de serre des pays riches sur la période de 2002-2012 par rapport à 1990.

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire [2]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur le quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays [3-4]. Ce qui favorise l'utilisation de l'énergie solaire dans différents domaines

tel que la production de l'électricité, le séchage agroalimentaire, et La connaissance de ce gisement est d'un intérêt majeur pour concevoir et dimensionner les systèmes énergétiques solaires. Ainsi, un bon dimensionnement n'est possible que si les mesures sont disponibles d'une manière continue dans l'espace et dans le temps.

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

De nombreuses études et travaux de recherches se sont fixés comme objectif cette estimation de l'éclairement solaire, et divers modèles empiriques ont été développés dans diverse sortes de condition météorologique et géographique [5,6, 7].

Plusieurs études ont été menées sur l'évaluation du rayonnement solaire par des modèles empirique dans le but de générer des séquences artificielles de données radiométriques [8]. D'autres travaux [9-10] ont utilisés soit les paramètres météorologiques, soit la durée d'insolation pour estimer les composantes du rayonnement solaire. [11] ont proposé quelques modèles théoriques qui permettent d'estimer le rayonnement solaire global reçu au sol. Ces modèles tiennent compte des effets de diffusion et d'absorption que subit le rayonnement solaire lors de sa traversée de l'atmosphère pour les différents sites. [12] ont déterminé la nébulosité en fonction de l'irradiation globale journalière mesurée sur surface horizontale. Des exemples des journées de différents types de ciel pour des sites de Ghardaïa et Bouzaréah-Alger. Ont été étudiés et présentés pour la validation et la confrontation des résultats expérimentaux. [13] ont effectué une étude comparative entre deux approches semi empiriques de calcul du gisement solaire dans le site de Biskra. Pour cela on a adopté deux modèles différents pour estimer l'éclairement : le modèle de PERRIN DE BRICHAMBAUT qui emploie le facteur de trouble totale de Linke rarement utilisé en comparaison avec le modèle de LIU JORDAN qui est le plus fréquemment employé. A partir des deux modèles considérés on a pu calculer les trois composantes du rayonnement solaire ; direct, diffus et global dans les conditions du ciel clair. [14] ont mené une étude sur l'estimation de l'ensoleillement solaire global par ciel clair au niveau du sol par deux modèles semi-empiriques (Modèle de Capderou et Modèle de Kasten) à partir de programmes Matlab développés à cet effet dans la région de Ghardaïa. L'application de ces deux modèles permet d'estimer les composantes directes et diffuse de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal ou incliné avec différentes orientations. [15] ont étudié un travail traite d'abord d'un modèle théorique d'évaluation du potentiel solaire de Nouakchott et de Dakar et de sa

validation. La mise au point de la modélisation a été effectuée à l'aide d'une campagne de mesures du rayonnement solaire global, sur un plan horizontal, réalisée à un pas de temps d'une minute, durant l'année 2004, dans le site de Nouakchott dans le nord-ouest de la Mauritanie et à l'aide des mesures effectuées dans la période du 1er Mars 2006 aux 28 Février 2007 toutes les 10 minutes, sur le site de Dakar dans l'ouest du Sénégal.

Dans le cadre de ce travail, nous avons analysé des données météorologiques d'un mois Février 2020 et nous avons élaboré une étude comparative entre des valeurs de rayonnement solaires mesurées sur le site de Ain El Melh et des valeurs estimées par le modèle théorique LIU JORDAN.

Le présent travail est reparti en quatre chapitres.

- Le premier chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.
- Dans le deuxième chapitre nous donnons une présentation des modèles d'estimation du rayonnement solaire terrestre tel que le modèle LIU JORDAN.
- Le troisième chapitre parle sur la station électrique d'Ain El Melh.
- Dans le quatrième, nous présenterons et commenterons les différents résultats obtenus pour la station d'Ain El Melh et en utilisant le modèle empirique de LIU JORDAN pour modéliser le rayonnement solaire à station.
- En fin, nous terminons par une conclusion générale et les perspectives ouvertes par ce travail de recherche.

CHAPITRE I : LE GISEMENT SOLAIRE

I.1.Introduction

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. Le Gisement solaire est une science qui propose radiométrique et météorologique de l'atmosphère. En effet, l'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la terre sous forme de rayonnement électromagnétique.

Dans ce chapitre, nous étudierons brièvement le soleil, son énergie et son rayonnement reçus au niveau de la terre. Nous définirons quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude, les différents phénomènes physiques de ce rayonnement, la structure de l'atmosphère et ces effets sur le rayonnement solaire. Ainsi, les différentes composantes du rayonnement solaire. Enfin, le gisement solaire en Algérie.

I.2.Soleil

La plus simple définition du soleil, c'est une étoile parmi des millions d'autres de l'univers. Pour la terre et les autres planètes du système solaire et d'autre part, la source principale de l'énergie qui leur vient de l'extérieur, une énergie qui se présente sous forme de lumière ou de chaleur. Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre.

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques. [16]

I.2.1. Caractéristiques de soleil

Le soleil est une étoile de type spectral (couleur jaunâtre, correspondant à une température de surface légèrement inférieure à 6000 K), située à environ 150 millions kilomètres de la terre, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène.

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau (I .1) :

Tableau (I.1) caractéristiques principales du soleil.

Caractéristiques	Valeurs
Masse (kg)	2.10^{30}
Diamètre (km)	$13,92. 10^5$
Surface (km ²)	$6,09.10^{12}$
Température au centre (MK)	16
Température à la surface (K)	5900
Volume (km ³)	$1,41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217

I.2.2.Composition

Le soleil est composé (en masse) de 75 % d'hydrogène, de 25 % d'hélium et de presque 0,1 % d'éléments plus lourds que l'hélium (ou métaux).

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de :

- Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de 25.10^4 km, elle présente les caractéristiques suivantes [17], [18] :
 - Une température de 15.10^6 °C.
 - Une densité est de 1015 kg/m^3 .
 - Une pression de 109 atm.
- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [18], [19] :
 - Une épaisseur de 244160 km.
 - Une température variant de 10.10^6 °C à 50.10^4 °C.

- La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection turbulente, elle présente les propriétés suivantes [17], [18] :
 - Une température comprise entre $50 \cdot 10^4 \text{°C}$ à 6400°C .
 - Une épaisseur de l'ordre 199758 km.
- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [20] :
 - La température de surface décroît de 6400°C à 4500°C .
 - Une épaisseur de 500 km.
 - Une pression de 1/100 atm.
- La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes [19], [20] :
 - Une épaisseur 2000 km.
 - Une température augmentant de 4200°C à 10^4°C .
- La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont [18] :
 - Elle est sans limite précise.
 - La température augmente de 10^6°C à $2 \cdot 10^6 \text{°C}$.

La figure I.1 montre la structure du soleil.

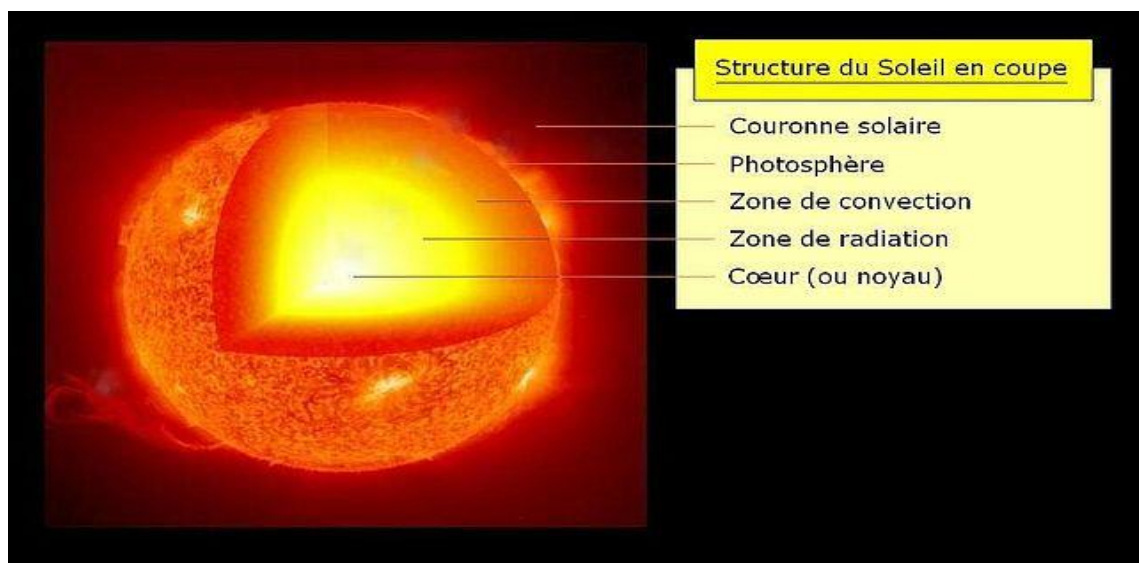
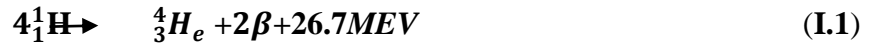


Figure I.1. Structure du soleil

I.2.3. Origine

Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X.

Selon l'équation suivante :



Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3.7.10^{26}$ j/s.

I.3. Mouvement apparent du soleil

Pour un observateur terrestre, le soleil décrit un cercle autour de l'axe de rotation de la terre (Figure I. 2) [3]. Ce cercle est parallèle au plan de l'équateur.

Aux équinoxes, le soleil se lève à l'Est, passe par la verticale à midi et se couche à l'Ouest. Entre le 21 mars et le 21 septembre, le soleil passe au Nord de la verticale et pendant la deuxième moitié il passe au Sud de la verticale. Aux solstices (solstice d'été et d'hiver), l'angle que fait le soleil avec la verticale au midi solaire sera respectivement $\pm 23^{\circ}27'$.

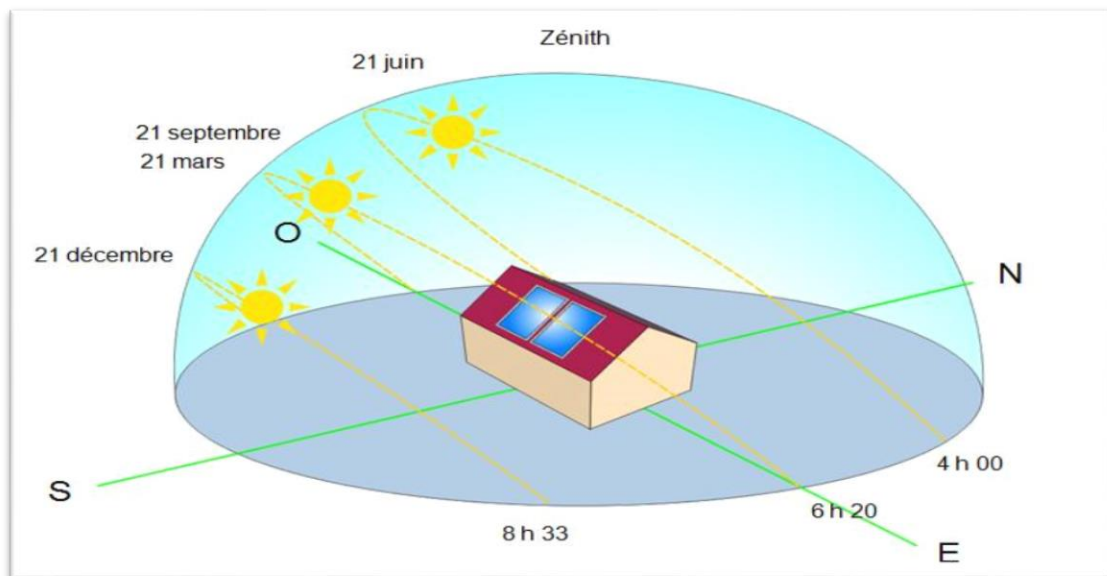


Figure I. 2 : Mouvement apparent du soleil en un point de l'équateur.

I.3.1. Remarque

Il est à noter qu'aux équinoxes le soleil décrit un cercle de 180° dans la voûte céleste à raison de 15° par heure ce qui implique des jours de 12 heures, à midi solaire l'angle que fait la direction du soleil avec l'axe verticale est égal à la latitude du lieu (L).

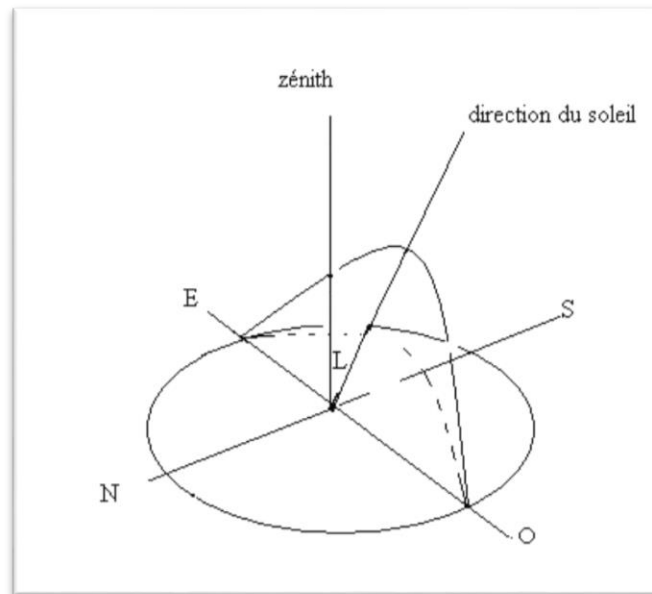


Figure I.3 : Mouvement apparent du soleil aux équinoxes

Le mouvement apparent du soleil (de même pour la terre) n'est pas uniforme (pas la même trajectoire, pas la même vitesse) et cela donne plusieurs définitions du jour et du temps [21].

I.4. Mouvement de la terre

La Terre fait un tour autour du Soleil en un an. La trajectoire de la terre autour du soleil est légèrement elliptique, ayant le soleil pour foyer et dont le rayon moyen est de 149,6.106 km avec une variation de presque 1,7% au cours de l'année du fait de la légère excentricité de l'orbite terrestre, l'axe de rotation de la terre sur elle-même est inclinée de $23^\circ 27'$ par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre) [21].

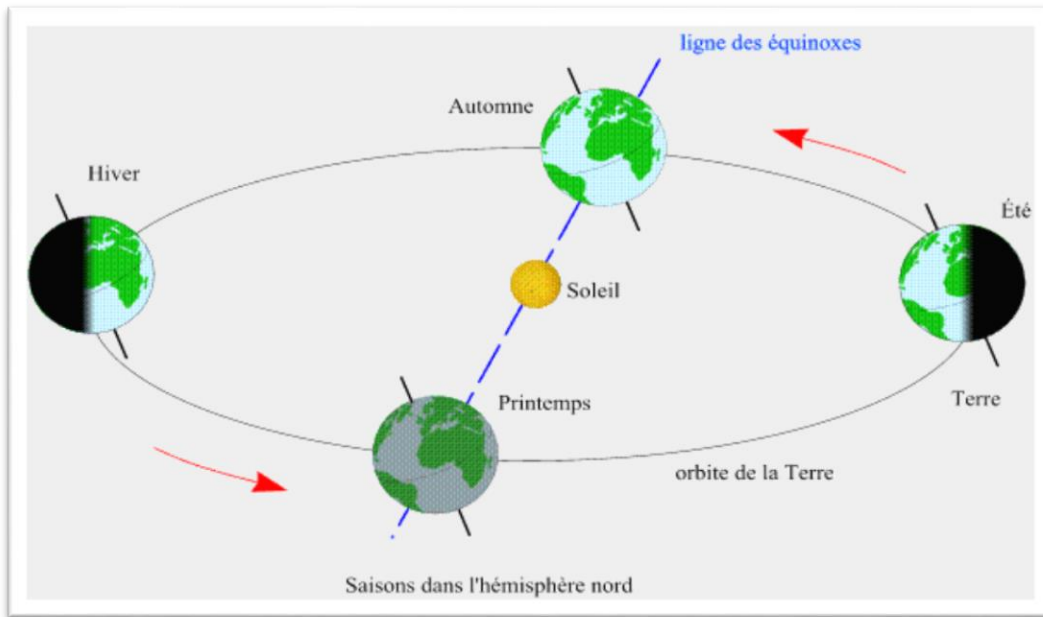


Figure I.4: Mouvement de la terre autour du soleil

I.5.Énergie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et traversant l'atmosphère, qui absorbe une partie de l'énergie, et parvenant à la surface de la Terre. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, Les 98% de l'énergie émise se situent dans la bande de longueur d'onde comprise entre 0.25 et 3 μ m. [22]

L'énergie solaire varie en fonction de :

- La latitude du lieu.
- L'orientation et l'inclinaison du plan de collecte.
- La saison (maxima en été, minima en hiver).
- La situation atmosphérique (ciel clair ou couvert).
- La hauteur du soleil sur l'horizon (maxima à midi solaire).

I.6.Constante solaire

Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 149.5 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367 W/m². [16]

La variation de la constante solaire suit la relation suivante : [18]

$$C = I_0 [1 + 0,033 \cos (0,984N)] \quad (I.2)$$

C : la constante solaire.

$I_0=1353 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue. [23]

N: le numéro du jour de l'année.

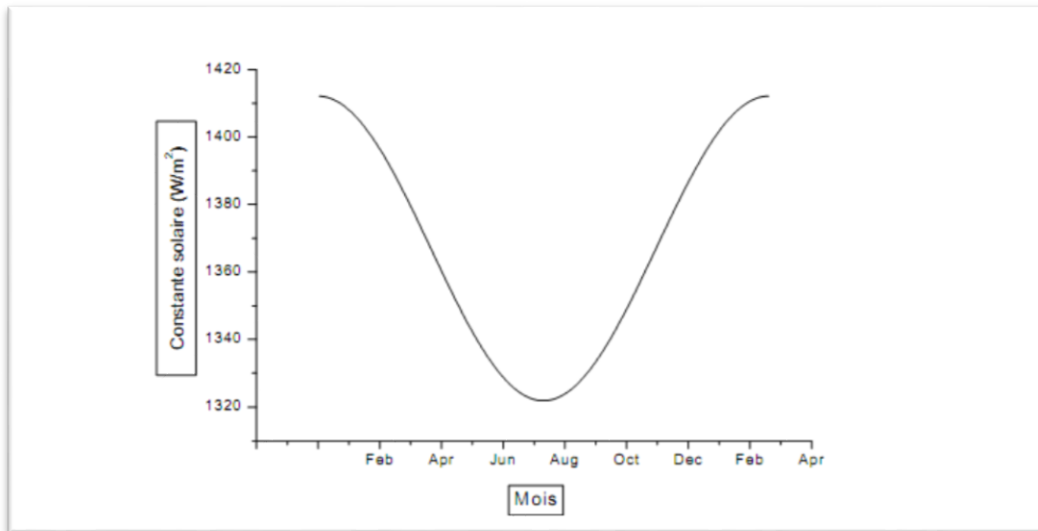


Figure I.5 : Variation mensuelle de la constante solaire

I.7. Irradiation ou rayonnement solaire au sol

Le rayonnement solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. Ce qui ne permet que la réception au sol des composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus. L'albédo ou la partie réfléchié par le sol du rayonnement solaire global. [24]

I.7.1. Rayonnement direct (D)

Le rayonnement solaire direct est le rayonnement reçu sur un plan normal parvenant directement du disque solaire sans avoir subi de diffusion. Le flux des photons qui n'ont pas interagi avec les constituants de l'atmosphère et ont conservé une direction commune et leurs énergies propres.

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normal est désigné par I.

Nous avons la relation suivante:

$$I_d = I^* \sin(h) \quad (\text{I.3})$$

h : hauteur du soleil.

L'éclairement solaire direct (D) sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles.

$$I^* = 1370 \exp\left[\frac{T_L}{0.9+9.4 \sin(h)}\right] \tag{I.4}$$

Ou T_L est le facteur de trouble de linke calculable par:

$$T_L = 2.4 + 14.6\beta + 0.4 (1+2\beta)L_n P_V \tag{I.5}$$

β : Coefficient de trouble atmosphérique.

P_V : Est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mm Hg.

Avec : h : Hauteur du soleil.

I.7.2. Rayonnement diffus(S)

Le diffus horizontal $H D$ est le rayonnement reçu sur une surface horizontale parvenant de toute la voute céleste a l'exception du disque solaire. Il s'agit du rayonnement diffusé par les aérosols, les gouttelettes d'eau, la vapeur d'eau vers le sol.

$$D^* = 54.8\sqrt{\sin(h)} [T_L - 0.5 - \sqrt{\sin(h)}] \tag{I.6}$$

I.7.3. Albédo

Parvenant au sol, le rayonnement solaire n'est qu'en partie absorbé. On appelle albédo la fraction de rayonnement réfléchi par le sol, il dépend directement de la nature du sol (prairie, terre, désert). Le rayonnement réfléchi par le sol n'est évidemment à prendre en considération que pour les surfaces inclinées [25]

Ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.

$$\rho = \frac{\text{énergie refléchi}}{\text{énergie récu}} \tag{I.7}$$

Tableau. I.2 : Albédo de différente surface

Surface	Albédo
Neige fraîche, Soleil haut	0.80 - 0.85
Neige fraîche, Soleil bas	0.90 - 0.95
Vieille neige	0.50 - 0.60
Sable	0.20 - 0.30
Herbe	0.20 - 0.25
Terre humide	0.10
Terre sèche	0.15 - 0.25
Forêt	0.05 - 0.10
Eau, Soleil horizontal	0.50 - 0.80
Eau, Soleil au Zénith	0.03 - 0.05
Nuage épais	0.70 - 0.80
Nuage mince	0.25 - 0.50

I.7.4. Rayonnement global(G)

Le rayonnement solaire arrivant au sol a plusieurs composantes à traiter différemment : une composante directe I, une composante diffuse D, et l’Albédo, le tout formant le rayonnement global G.

- Rayonnement Global sur une surface horizontale

Le rayonnement global parvenant au sol sur une surface horizontale G_h est la somme du rayonnement direct et du diffus (Figure I.6), selon la formule suivante :

$$G_h = D_h + I_d \cos(\theta_s) \tag{I.8}$$

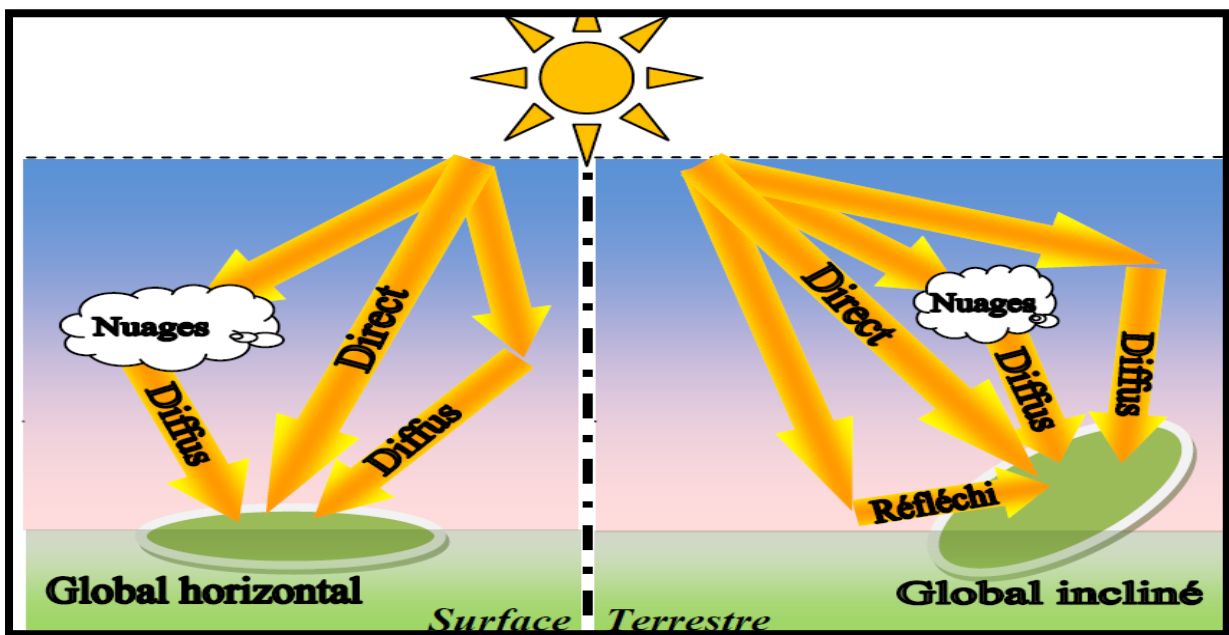


Figure. I.6: Composantes principales du rayonnement solaire.

- Le rayonnement Global sur une surface inclinée

Le rayonnement solaire global sur une surface arbitraire ayant une inclinaison β par rapport à l’horizontale et un angle azimutal γ est la somme des trois composantes directe, diffuse et réfléchie par le sol du rayonnement solaire (Figure I.6). [22, 26]

$$G_\beta = D_\beta + I_{d\beta} + d_{re} \tag{I.9}$$

I.8.Coordonnées géographiques

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

I.8.1. Longitude L :

C'est l'angle L 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°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes.

I.8.2. Altitude (z):

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer).

I.8.3. Latitude θ :

Elle permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de 0° à l'équateur à 90° au pôle Nord.

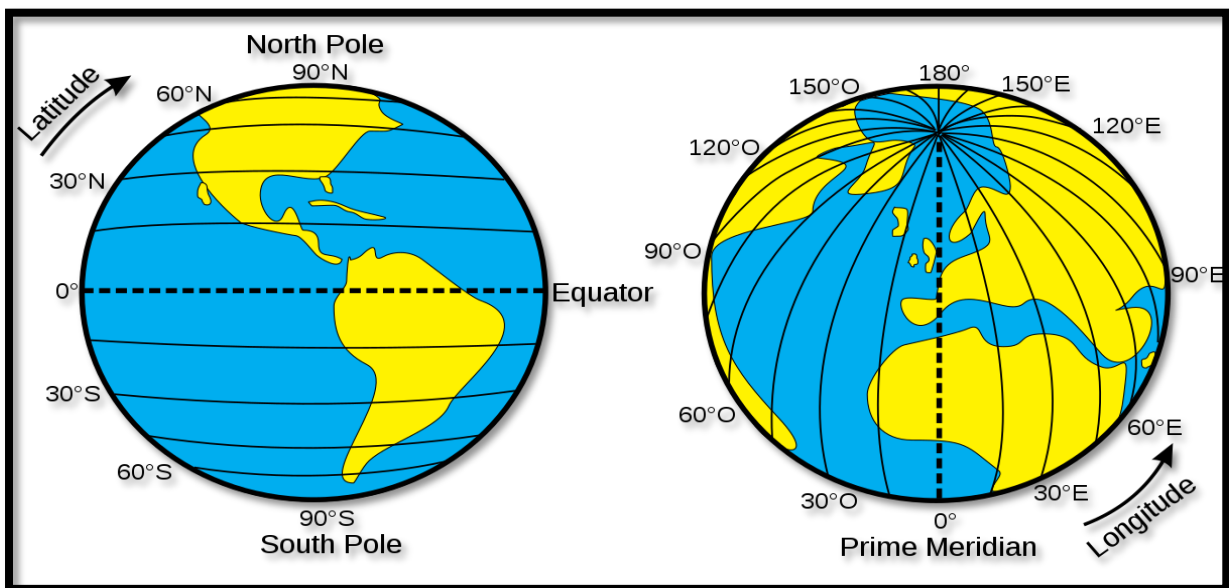


Figure. I.7 : Longitudes et latitudes sur le globe

I.9. Coordonnées célestes horaires

I.9.1. Déclinaison (δ) :

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°,27') et au solstice d'été (+23°,27'). Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper. [27]

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right] \quad (I.10)$$

Quantième jour de l'année $1 \leq N \leq 365$

N : le numéro du jour dans l'année compte a partir du 1er Janvier.

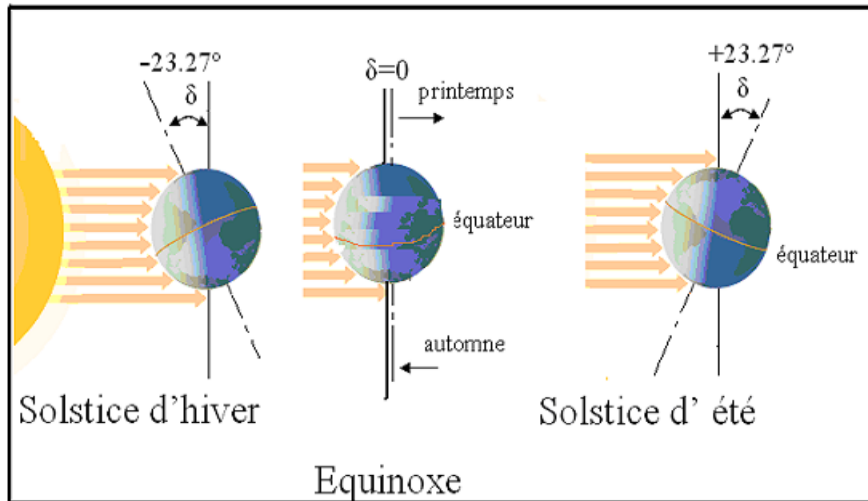


Figure I.8 : La déclinaison du soleil (δ)

I.9.2. Angle horaire (ω) :

L'angle horaire (ω) du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. Cet angle est exprimé en ($^\circ$) et est donné par l'expression suivante [28,29] :

$$\omega = 15. (TSV-12) \quad (I.11)$$

I.10. Coordonnées célestes horizontales

I.10.1. Hauteur du soleil(h)

L'hauteur solaire (h) est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par le point d'observation (Figure II.9). Le complément de (h) ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelé l'angle zénithal. Le zénith est le point le plus élevé de l'hémisphère céleste, se trouvant directement à la verticale de l'observateur. [30, 31]

$$\sin h = \sin L \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (I.12)$$

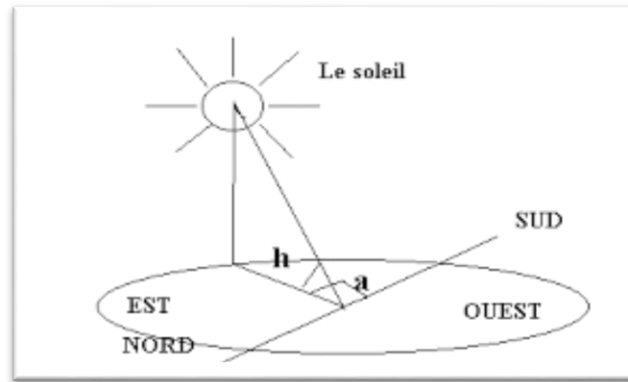


Figure I.9 : Repérage du soleil

I.10.2 Azimut(a)

Ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. Il est compte de 0° a 180° a partir du sud vers l'ouest.il est donne par la relation :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin w}{\cos h} \tag{I.13}$$

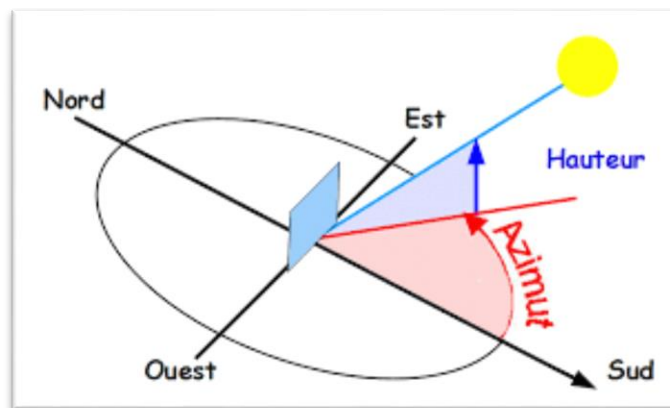


Figure I.10 : Les coordonnées célestes horizontales

I.11.Paramètre de temps

I.11.1. Temps universel (TU)

Le Temps Universel (TU) est défini par le temps de passage du soleil au méridien d'origine ou encore appelé GMT (Greenwich Meridian Time)[16].

$$TU = TSM - \frac{L}{15} \tag{I.14}$$

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.11.2. Temps Solaire Moyen (TSM)

La rotation de la terre autour des pôles, introduit la notion de « Temps Solaire Moyen (TSM) ». La journée solaire moyenne est le temps qui sépare, en moyenne, deux passages successifs du Soleil au méridien d'un lieu. Par définition, la journée solaire moyenne a une durée de 1 jour=24h 00mn 00s [3].

On définit le Temps Solaire Moyen (TSM) par la différence entre le temps universel et la correction de longitude, il est donné par [17] :

Avec TSM en heure

$$TSM= TU + \frac{L}{15} \tag{I.15}$$

L : La longitude en degrés (+ à l'Est et - à l'Ouest).

TU : en heures.

I.11.3.Équation du temps

C'est la différence du temps et elle est appelée équation de correction du temps. Elle varie en fonction du jour et de la longitude et est donnée par l'expression suivante [32,33] :

$$ET=9.87 \times \sin(2 \times \alpha) - 7.53 \times \cos(\alpha) - 1.5 \times \sin(\alpha) \quad \text{en minutes} \tag{I.16}$$

$$\alpha = (n - 81) \times \frac{360}{365} \quad \text{En degrés } ^\circ$$

Avec et n le numéro du jour de l'année.

Il faut rajouter que cette équation n'est pas unique et qu'il en existe plusieurs autres expressions.

I.11.4. Temps Solaire Vrai (TSV)

C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil, ce temps est indiqué par les cadrans solaires et les héliographes.

$$TSV=12 + \frac{\omega}{15} \tag{I.17}$$

$$TSV=T_{st} + \frac{1}{60} E + \frac{1}{15} (L_{st} - L) \tag{I.18}$$

T_{st} est le temps standard ou officiel, duquel on retranche une heure, si l'heure avancée d'été (HAE) est en vigueur.

$$L_{st} = 15FH_{loc} \tag{I.19}$$

Où:

FH_{loc} : Fuseau horaire du lieu considéré.

L : Longitude du lieu.

L_{st} : Longitude méridienne standard.

Le dernier terme de l'équation du temps solaire vrai est un ajustement de la latitude en heure ($360^\circ \rightarrow 24 \text{ h}$ soit $1 \text{ h} \rightarrow 15^\circ$).

I.11.5. Temps légal (TL)

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

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.20)$$

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie

I.12. Lever et coucher du soleil

On peut calculer l'heure solaire vraie du lever et du coucher du soleil à travers les deux méthodes différents suivantes :

a) À partir de la hauteur h , on peut déduire les heures du lever et du coucher du soleil, en faisant $h=0$ [26].

On trouve :

$$\cos \omega_0 = -\tan L \tan \delta \quad (I.21)$$

b) on a les équations suivantes [34] :

$$TSV_{lever} = 12 - (\text{arc sin}(\tan(\theta) * \tan(\delta)))/15 \quad (I.22)$$

$$TSV_{coucher} = 12 + (\text{arc sin}(\tan(\theta) * \tan(\delta)))/15 \quad (I.23)$$

I.13. Durée et taux d'ensoleillement

I.13.1. Durée d'ensoleillement

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent totalement ou partiellement le soleil, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y a respectivement beaucoup ou peu de nuages.

On appelle **durée effective d'ensoleillement** ou **insolation SS** le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. On

appelle rayonnement direct le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le soleil [35].

I.13.2. Taux d'ensoleillement

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la **durée maximale d'ensoleillement SS0**.

On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement [35].

$$F = \frac{SS}{SS_0} \quad (I.24)$$

I.14. Gisement solaire en Algérie

Le soleil, une énergie renouvelable énorme et inépuisable, rayonne sur la terre avec une puissance de 16×10^{15} KWh/m² par an dans toutes les longueurs d'ondes du spectre de la lumière visible. Cette énergie renouvelable est une préoccupation mondiale et d'actualité surtout si elle est exploitée dans la conversion de l'énergie solaire en électricité, qui est l'un des enjeux de la politique énergétique de notre siècle.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrées sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre même les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays, Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh [36].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la Figure (I.11):

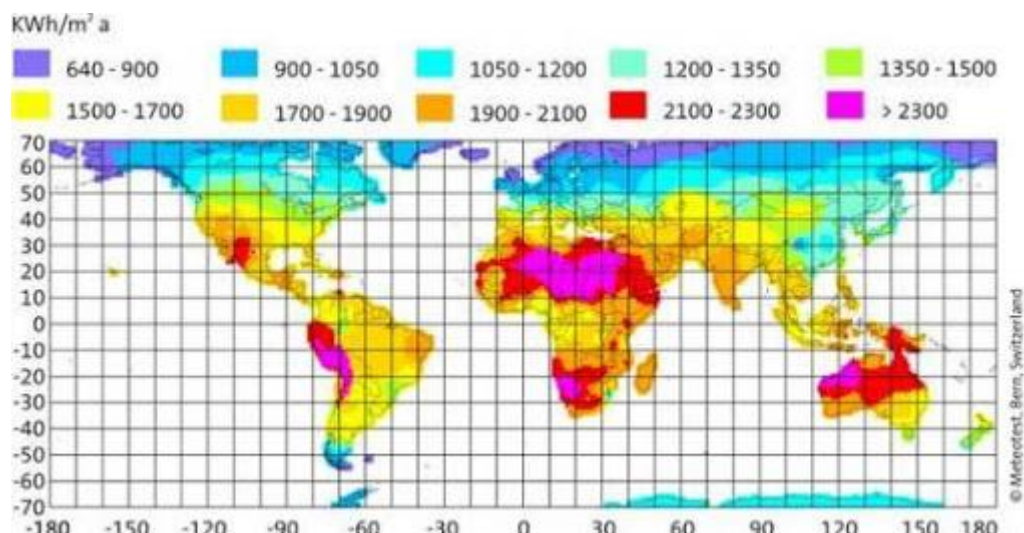


Figure I.11 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que 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. 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 II.2** selon l'ensoleillement reçu annuellement [37].

Tableau II.2 : Potentiel solaire en Algérie.

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

II.14.1. Variation spatio-temporelle de La durée d'insolation

La durée d'insolation moyenne dans le Sud Algérien est de l'ordre de 9 Heure/Jour, on constate qu'elle est toujours supérieure à 8 Heure/Jour sur la majorité du territoire. La région du grand Sud, en particulier le Sud-Est et le Sud-Ouest présente le plus grand potentiel de tout le territoire Algérien (voir **Figure. II.12**).

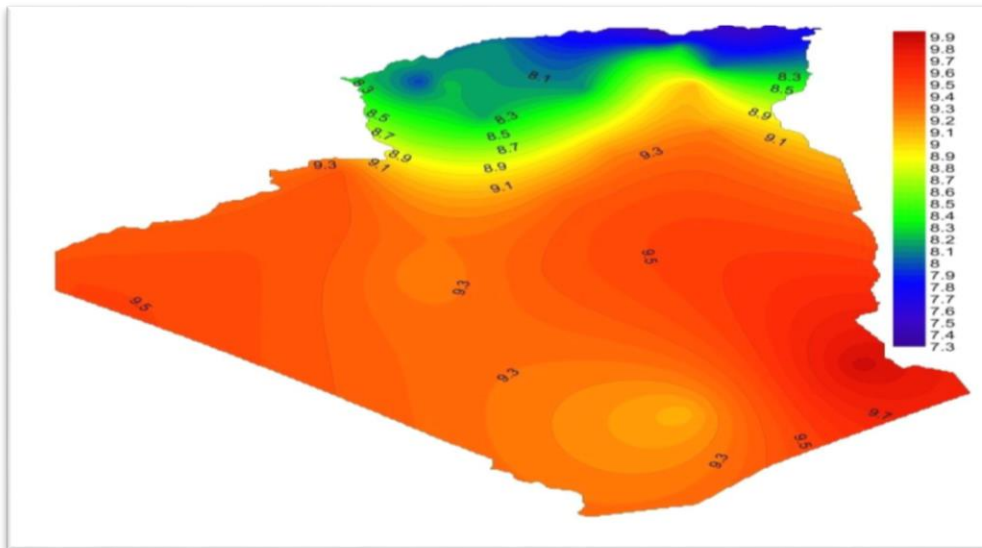


Figure. II.12: Carte de la durée d’enseillent moyen annuel en Heure (1983-2012).

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l’O.N.M réparties sur tout le territoire algérien (figure I.13) [38]. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d’un tel appareillage. La durée d’insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

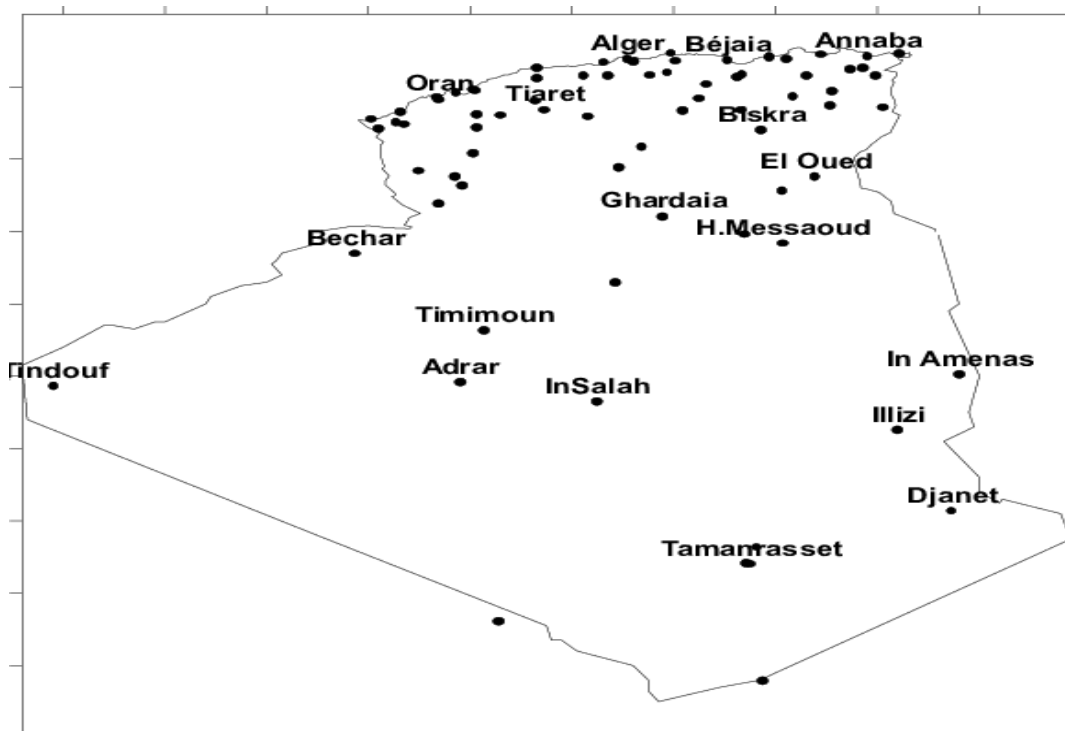


Figure I.13 : Répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie.

I.15.Conclusion

L'objet de ce chapitre traitait la présentation des notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres, horaire, le mouvement du soleil, différentes composantes du rayonnement solaire (direct, diffus et global). Enfin, on remarque que l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme à partir de sa situation géographique.

CHAPITRE II : les modèles

II.1.Introduction

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.

Dans ce chapitre nous présenterons une description de quatre modèles physique pour le calcul des divers composants du rayonnement solaire.

II. 2. Description des Modèles

Les modèles présentés ci-dessous sont des modèles basés sur paramètres géométriques et atmosphériques comme : l'angle horaire de soleil, hauteur de soleil, déclinaison solaire, facteur de trouble atmosphérique de Linke....etc.

II .3.Modèle de Capderou

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directes et diffuses de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs de troubles, à partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directes et diffuses par ciel clair.

II .3.1. Eclairage direct par ciel clair obtenu sur un plan horizontal

$$I_b = I_0 C_{t-s} \sin(h) \exp(-T_L^* (0.9 + \frac{9.4}{0.89z} \sin(h))^{-1}) \quad (II.1)$$

I_0 Est le constant solaire égal 1367 w/m² .

h est la hauteur de soleil.

T_L^* Est le facteur de trouble atmosphérique de linke.

C_{t-s} C'est la correction de distance terre-soleil définie par la relation suivant [40]:

$$C_{t-s} = 1 + 0.03 \cos\left(\frac{360}{365} (j-2)\right) \quad (II.2)$$

Avec j est le nombre de jour. L'éclairage diffus incident sur un plan horizontal I_d est donné par:

$$I_d = I_0 \exp(-1 + 1.06 \log(\sin(h)) + a - \sqrt{a^2 + b^2}) \quad (II.3)$$

Avec : a=1.1

$$b = \log(T_l^* - T_0) - 2.8 + 1.02(\sin h)^2 \quad (\text{II.4})$$

II .3.2. Eclairage global reçu sur un plan horizontal

$$I_G = I_b + I_d \quad (\text{II.5})$$

II .3.3. Eclairage direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné

$$I_{bi} = I_0 C_{t-s} \cos(i) \exp(-T_L^* (0.9 + \frac{9.4}{0.89} \sin(h))) \quad (\text{II.6})$$

Où i est l'angle d'incidence [39].

II .3.4. Eclairage diffus incident sur un plan incliné :

$$I_{di} = d_{ciel} + d_{sol} + \delta_i' \frac{1 + \sin(y)}{2} \quad (\text{II.7})$$

Avec : d_{ciel} , d_{sol} et y sont respectivement Le diffus du ciel, Le diffus de sol et diffus rétrodiffusé [40] .

D'où l'éclairage global incident, à un instant donné sur un plan (x, y) est:

$$I_{Gi} = I_{bi} + I_{di} \quad (\text{II.8})$$

II .4. Modèle de R-sun

II. 4. 1. Facteur de trouble de linke

Le facteur de trouble atmosphérique de linke T_L représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle [41]. L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser.

II .4.2. Rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair

$$B_{hc} = I_0 C_{t-s} * \sin h_0 * \exp[-0.8662 T_l^* m_A * \delta_R(m_A)] \quad (\text{II.9})$$

h_0 , T_l , m_A , δ_R sont respectivement altitude de soleil, facteur de trouble de Linke, masse d'air et l'épaisseur optique de Rayleigh [42].

Le rayonnement diffus incident sur un surface horizontal par ciel clair est donné par :

$$D_{hc} = I_0 C_{t-c} * T_n (T_l) * F_d(h_0) \quad (II.10)$$

T_n , F_d sont facteur de transmission et la fonction de l'altitude solaire [5].

L'éclairement global sur un plan horizontal est calculé comme :

$$G_{hc} = B_{hc} + D_{hc} \quad (II.11)$$

II .4.3. Rayonnement direct normal sur un plan incline

$$B_{hc} = B_{hc} * \sin \delta_{exp} / \sin h_0 \quad (II.12)$$

h_0 : Hauteur du soleil

δ_{exp} Est la position du soleil par rapport à une surface inclinée [42].

Le modèle d'estimation de l'éclairement diffus par ciel clair sur une surface inclinée est représenté par les équations suivantes:

$$D_{ic} = D_{hc} \cdot F_B \quad (II.13)$$

$$F_B = R_i + [\sin \beta - \beta \cdot \cos \beta - \pi \cdot \sin^2 (\frac{\beta}{2})] \cdot N \quad (II.14)$$

$$R_i = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (II.15)$$

$$N = 0.00263 - 0.712 - 0.6883 \cdot K_b^2$$

Où $K_b = \frac{B}{G_{0h}}$ (II.16)

$$G_{0h} = I_0 \cdot C_{t-s} \cdot \sin h_0 \quad (II.17)$$

D_{hc} , F_B et β sont respectivement l'éclairement diffus sur un plan horizontal, la fonction du rayonnement diffus du ciel et l'inclinaison du capteur.

II .5. Modèle de LIU & JORDAN

Ce modèle suppose que le rayonnement diffus du ciel est isotrope, La relation de Liu & Jordan généralisée pour le calcul de l'éclairement global sur un plan incliné d'un angle (β).

La relation de Liu & Jordan généralisée [43] est donnée sous la forme suivante:

$$G = S_h R_b + d \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \rho \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (II.18)$$

ρ est l'Albédo terrestre.

II .5.1.Irradiation directe sur un plan incliné est:

$$S_i = S_h R_b \tag{II.19}$$

II. 5. 2. Facteur d'inclinaison du rayonnement direct est :

$$R_b = \frac{\cos(L-\beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(L-\beta) \sin(\delta)}{\cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(L) \sin(\delta)} \tag{II.20}$$

δ : Déclinaison du soleil

ω : Angle horaire

L : Latitude

β : Inclinaison du plan

d_i L'irradiation diffuse sur un plan incline est :

$$d_i = d_h \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \tag{II.21}$$

II .5.3. Irradiation réfléchie sur un plan incliné :

D'autre part, l'irradiation réfléchie sur un plan incliné est estimée par l'expression:

$$d_{re} = \rho \cdot (S_h + d_h) \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \tag{II.22}$$

S_h et d_h sont respectivement l'éclairement direct et diffus horizontal.

II. 6. Modèle de Bird & Hulstrom

Comme recommandé par le modèle du Bird & Hulstrom, l'irradiante normale directe dans la direction des rayons I (W/m²) à ciel clair est en fonction de l'absorption, de la transmission par les composants atmosphériques.

II. 6.1. Eclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal

II. 6.1.1. Calcul du rayonnement direct

$$I = 0.9751 * I_{sc} * \tilde{\tau}_r * \tilde{\tau}_g * \tilde{\tau}_w * \tilde{\tau}_a * \cos(\theta_z) \tag{II.23}$$

Où, le coefficient d'absorption par la couche d'ozone $\tilde{\tau}_0$ est donné par :

$$\tilde{\tau}_0 = 1 - 0.161 * u_0 * (1.0 + 139.48 * u_0)^{-0.3035^2} \quad (\text{II.24})$$

$$0.00271 * u_0 * (1 + 0.044 * u_0 + 0.0003 u_0^2)^{-1}$$

Et, u_0 est l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche.

Le coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau est donné par:

$$\tilde{\tau}_w = 1 - 2.4959 * u_w * [(1 + 79.03 * u_w + 6.385 * u_w^2)^{-1}] \quad (\text{II.25})$$

u_w Est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm).

Le coefficient de transmission après absorption par les gaz permanents (CO2 et O2) s'exprime en fonction de la masse d'air corrigée :

$$\tilde{\tau}_g = \exp[-0.0127 * m_a^{0.26}] \quad (\text{II.26})$$

Le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire s'exprime aussi en fonction de la masse d'air par:

$$\tilde{\tau}_r = \exp[-0.0903 * m_a^{0.84} (1.0 + m_a - m_a^{1.01})] \quad (\text{II.27})$$

Et le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols peut se calculer par:

$$\tilde{\tau}_a = \exp[-k_a^{0.873} * m_a^{0.9108} * (1.0 + k_a k_a^{0.7088})] \quad (\text{II.28})$$

Où

$$k_a = 0.2758 \times k_{a\lambda/\lambda=0.38\mu\text{m}} + 0.35 \times k_{a\lambda/\lambda=0.5\mu\text{m}} \quad (\text{II.29})$$

$k_{a\lambda/\lambda=0.38\mu\text{m}}$ et $k_{a\lambda/\lambda=0.5\mu\text{m}}$ sont deux coefficients d'atténuation déterminés à partir des mesures expérimentales déduites par l'équation :

$$k_a(\lambda) = \beta \times \lambda^{-\alpha} \quad (\text{II.30})$$

Où, α est le coefficient de distribution granulométrique et β le coefficient de trouble atmosphérique établi par Angstrom. Ces valeurs nous ont permis de calculer $k_{a\lambda/\lambda=0.38\mu\text{m}}$ et $k_{a\lambda/\lambda=0.5\mu\text{m}}$.

II. 6.1.2. Calcul du rayonnement diffus

Dans ce modèle aussi, le rayonnement diffus sur un plan horizontal est la somme des trois composantes diffuses dues aux divers types de diffusion du rayonnement solaire par la pellicule atmosphérique.

$$D = D_r + D_a + D_m \quad (\text{II.31})$$

Le rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh est donné par:

$$D_r = 0.79 * \cos(\theta_z) * \tilde{\tau}_0 * \tilde{\tau}_g * \tilde{\tau}_w * \tilde{\tau}_{aa} * 0.5 * \frac{(1-\tilde{\tau}_r)}{(1+m_a+m_a^{1.02})} \quad (\text{II.32})$$

Où, $\tilde{\tau}_{aa}$ est donnée par l'expression suivante:

$$\tilde{\tau}_{aa} = 1 - (1 - w_0) * (1 - m_a + m_a^{1.06}) * (1 - \tilde{\tau}_a) \quad (\text{II.33})$$

Et w_0 est le coefficient de réflexion unitaire relatif à la diffusion par les aérosols. Dans ce modèle, Bird & Hulstrom recommandèrent $w_0 = 0,90$

Le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols est donnée par:

$$D_a = 0.79 * I_{sc} * \cos(\theta_z) * \tilde{\tau}_0 * \tilde{\tau}_g * \tilde{\tau}_w * \tilde{\tau}_{aa} * F_a * \frac{(1-\tilde{\tau}_{as})}{(1-m_a+m_a^{1.02})} \quad (\text{II.34})$$

Où F_c , est le coefficient de dispersion de l'atmosphère.

$F_c = 0.84$ est la valeur recommandée par ce modèle [44].

$\tilde{\tau}_{as}$ Est donné par la relation suivante:

$$\tilde{\tau}_{as} = \tilde{\tau}_a / \tilde{\tau}_{aa} \quad (\text{II.35})$$

Le diffus dû au phénomène de multi réflexion terre atmosphère est donné par:

$$D_m = \frac{(I + D_a + D_r) * \rho_g * \rho'_a}{(1 - \rho_g * \rho'_a)} \quad (\text{II.36})$$

Avec, ρ est l'albédo terrestre, et ρ'_a est l'albédo du ciel clair donné par:

$$\rho'_a = 0.0685 + (1 - F_c) * (1 - \tilde{\tau}_{as}) \quad (\text{II.37})$$

II. 6.1.3. Calcul du rayonnement global

Le rayonnement global sur un plan horizontal est la somme des deux composantes solaires directe et diffuse soit:

$$G = I + D \quad (\text{II.38})$$

II.7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques modèles d'estimation du rayonnement solaire qui permettent d'estimer les composantes de l'irradiation solaire.

Le modèle numérique de Liu & Jordan a été choisi pour la détermination des irradiances solaires inclinées. Nous procéderons à ce choix, parce que ce modèle est évalué le rayonnement solaire pour différents états du ciel. Aussi des nombreuses études [45, 43,3] menées par de nombreux chercheurs soulignent et attestent que ce modèle donne généralement de bons résultats.

CHAPITRE III : Station d'Ain El Melh

III.1. Introduction

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques, connaît depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40 % par an.

Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et de développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

Dans ce chapitre, D'abord, nous présenterons un concept général d'énergie photovoltaïque, les cellules PV, Principe de fonctionnement de la cellule PV et avantages et inconvénients des systèmes PV. Puis, présentation générale de SKTM. Ensuite, Aperçu de la gare de la station d'Ain El Melh, système d'installation et les Appareils de mesures utilisées. Enfin, quelque des informations générale sur la station.

III.2. Energie photovoltaïque

- Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

- Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel (1745-1827).La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites.
- L'énergie photovoltaïque est produite à partir du rayonnement solaire.
- L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique et utilisé dans les cellules solaires.

Cette cellule est une générale composée de Silicium (Si) et se rencontre sous la forme de plaque d'une épaisseur d'environ un millimètre.

- Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications. [46]
- Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types à savoir [47]:
 - Les systèmes autonomes.
 - Les systèmes connectés au réseau.

- Les systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV).

III.2.1.Types et rendement des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules [48].

III.2.1.1.Cellules monocristallines

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (13 à 17%) mais aussi celle qui ont le cout le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

III.2.1.2. Cellules polycristallines

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication st moins important, cependant leur rendement est plus faible (11 à 15 %).

III.2.1.3. Cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (5-9%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.



Figure.III.5 : Types des cellules photovoltaïques.

III.3. Principe de fonctionnement de la cellule PV

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on

peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court circuit (I_{cc}) [49].

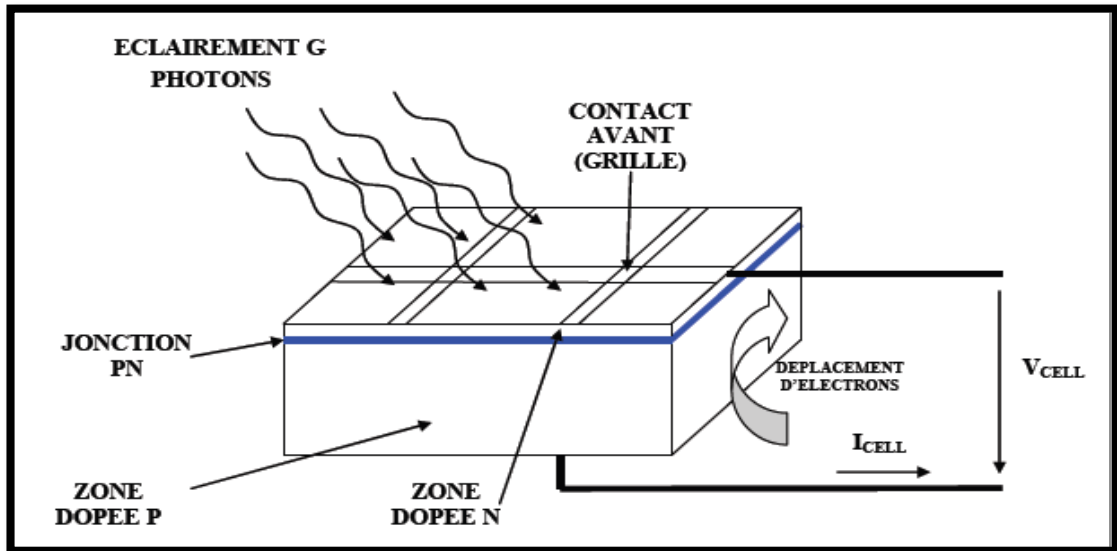


Figure.III.5 : Principe de fonctionnement de la cellule PV

III.5. Avantages et inconvénients des systèmes PV

On peut citer les avantages et les inconvénients suivants :

III.5.1. Avantages

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions.
- Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).
- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).

III.5.2. Inconvénients

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le faible rendement de conversion de module.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Pollution à la fabrication.

III.6. Présentation de SKTM

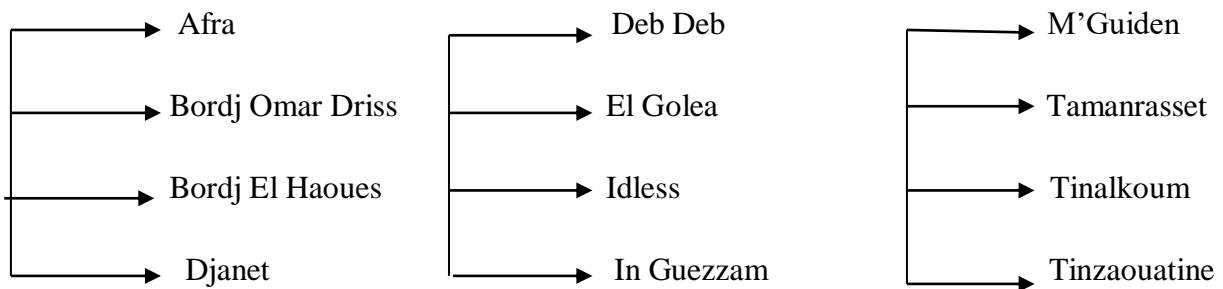


Figure.III.6 : symbole de SKTM

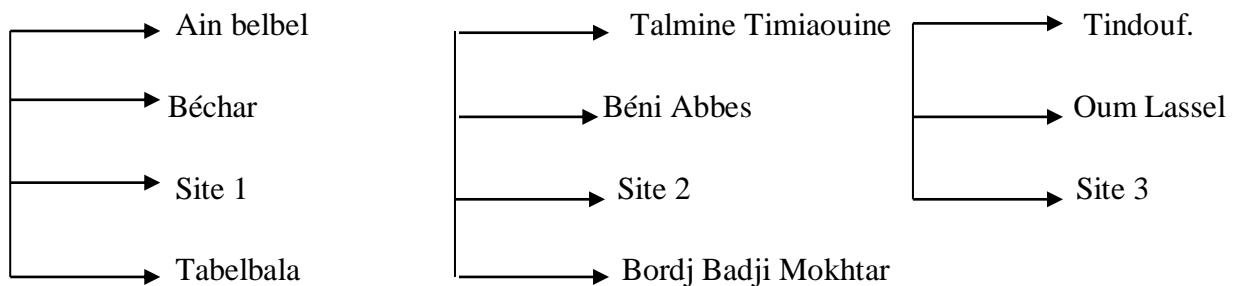
Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida, SKTM, est une société de production d'électricité, dont le capital est souscrit entièrement par la holding Sonelgaz. Créée le 07 avril 2013, par scission de la société SPE (la Société Algérienne de Production de l'Electricité), son siège social est basé à Ghardaïa [50].

SKTM hérite de 26 centrales diesel dont une centrale turbine à gaz (TG), réparties à travers 06 wilayas du sud du pays, à savoir : (Ghardaïa, Bechar, Tindouf, Adrar, Tamanrasset et Illizi) et dont la gestion est assurée via deux unités : **UPSO** dont le siège est basé à Bechar et **UPSE** (l'unité de production Sud-est) basée à Touggourt.

L'unité de production Sud-est de Touggour



L'unité de production Sud-ouest de Bechar



Assure quant à elle, la gestion des centrales de Ain belbel, Béchar, Béni Abbes, Bordj Badji Mokhtar, Site 1, Site 2 et Site 3, Oum Lassel, Tabelbala, Talmine Timiaouine et Tindouf.

III.6.1. But de création

SKTM a été créée pour répondre à des enjeux stratégiques de l'heure. Il s'agit [50] :

- ✓ Des spécificités qui caractérisent la gestion du parc de production Diesel des RIS (Réseaux Isolés du Sud).
- ✓ De satisfaire aux meilleures conditions de continuité et de qualité de service fourni aux populations des régions du sud du pays.
- ✓ De la volonté de concrétiser l'ambitieux programme national de développement des Energies Renouvelables, en mettant en valeur les potentialités énormes dont dispose notre pays, notamment l'étendue de son territoire et la durée d'ensoleillement.

III.6.2. Missions principales de SKTM

- ✓ **SKTM** a pour missions principales l'exploitation des réseaux d'énergie électrique isolés du sud (production d'électricité en conventionnel) et des énergies renouvelables pour l'ensemble du territoire national.
- ✓ Le développement des infrastructures électriques du parc de production des Réseaux Isolés du Sud, de l'Engineering, de la maintenance et de la gestion des centrales électriques relevant de son champ de compétence.
- ✓ La commercialisation de l'énergie produite pour les filiales de distribution notamment après le déploiement des Energies Renouvelables sur les réseaux interconnectés [50].

III.7. Présentation de la centrale

La centrale d'Ain El Melh est une centrale de production d'électricité à partir des panneaux solaires photovoltaïques d'une capacité globale de **20MW**, une tension d'injection 60 kV, et d'une superficie de 41,16 hectares.

Cette station est située à 120 km au sud-ouest de l'état de Msila avec des coordonnées géométriques 32°35N et 05°50E. Établie le 25 janvier 2017 .



Figure III.2: Installation photovoltaïque de la station d'Ain El Melh.

III.7.1 Production d'électricité PV :

La centrale PV produit un courant continu à partir du rayonnement solaire à travers les panneaux raccordés en série, et la mise en place de boîtes de raccordements en parallèle pour atteindre le niveau de courant nominal au niveau de l'onduleur, relié avec le transformateur d'élévation de tension, par lequel le courant continu est transformé en courant alternatif qui sera raccordé au réseau public (GRTE).

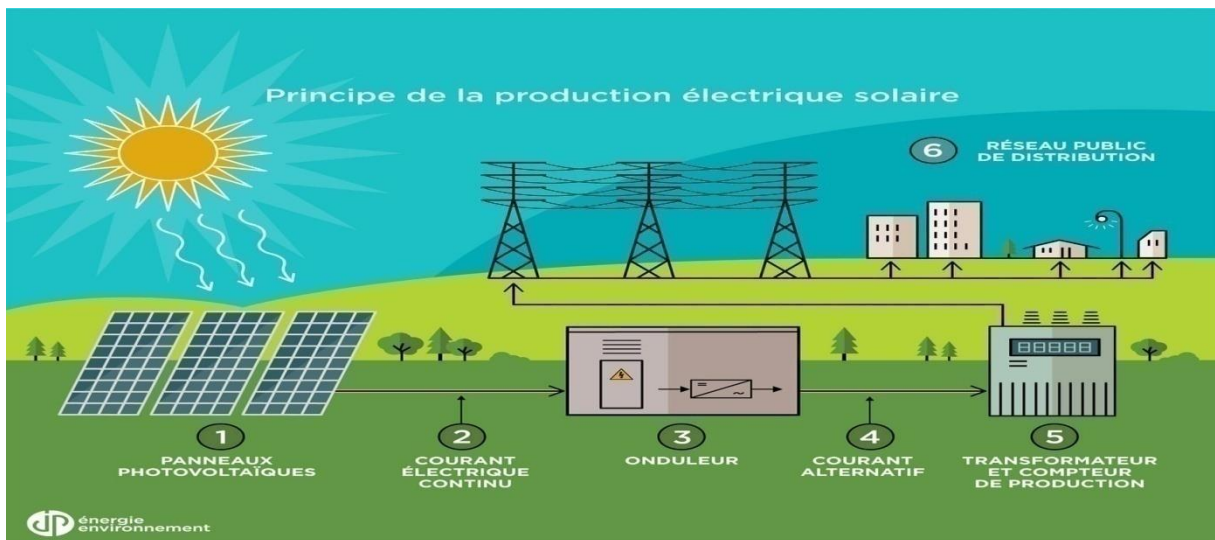


Figure.III.7 : principe de la production électrique solaire.

III.7.2. Composition du système photovoltaïque

1. Panneaux en silicium poly cristallin.
2. Équipement de raccordement (boites de jonctions – boites parallèles).

3. Onduleur.
4. Transformateur
5. Poste d'évacuation MT.
6. Salle de commande.

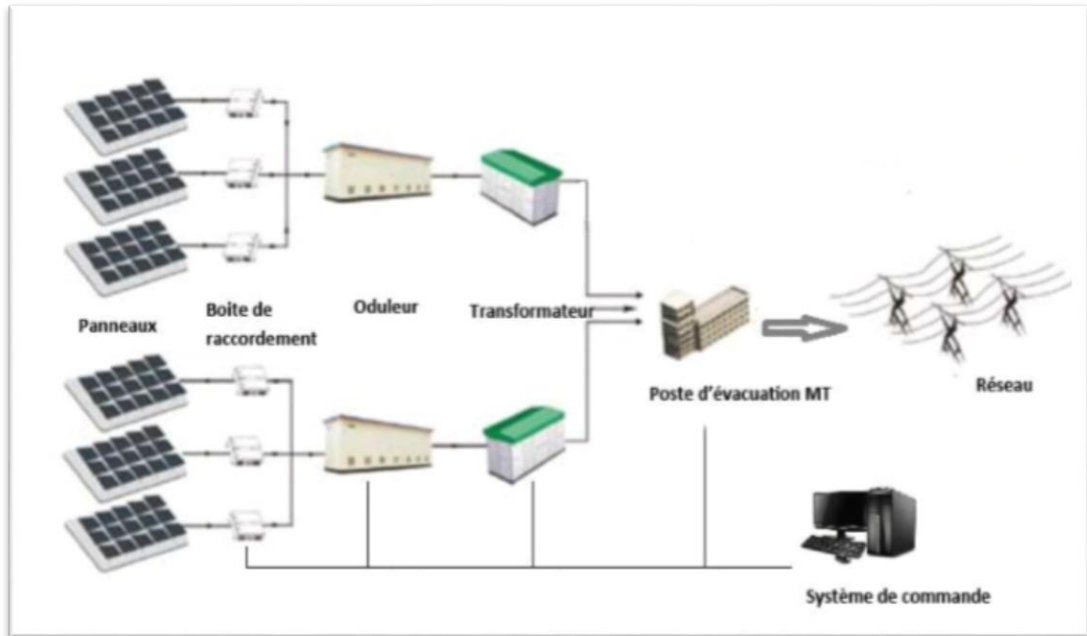


Figure III.8: Schéma de la centrale de production d'électricité PV

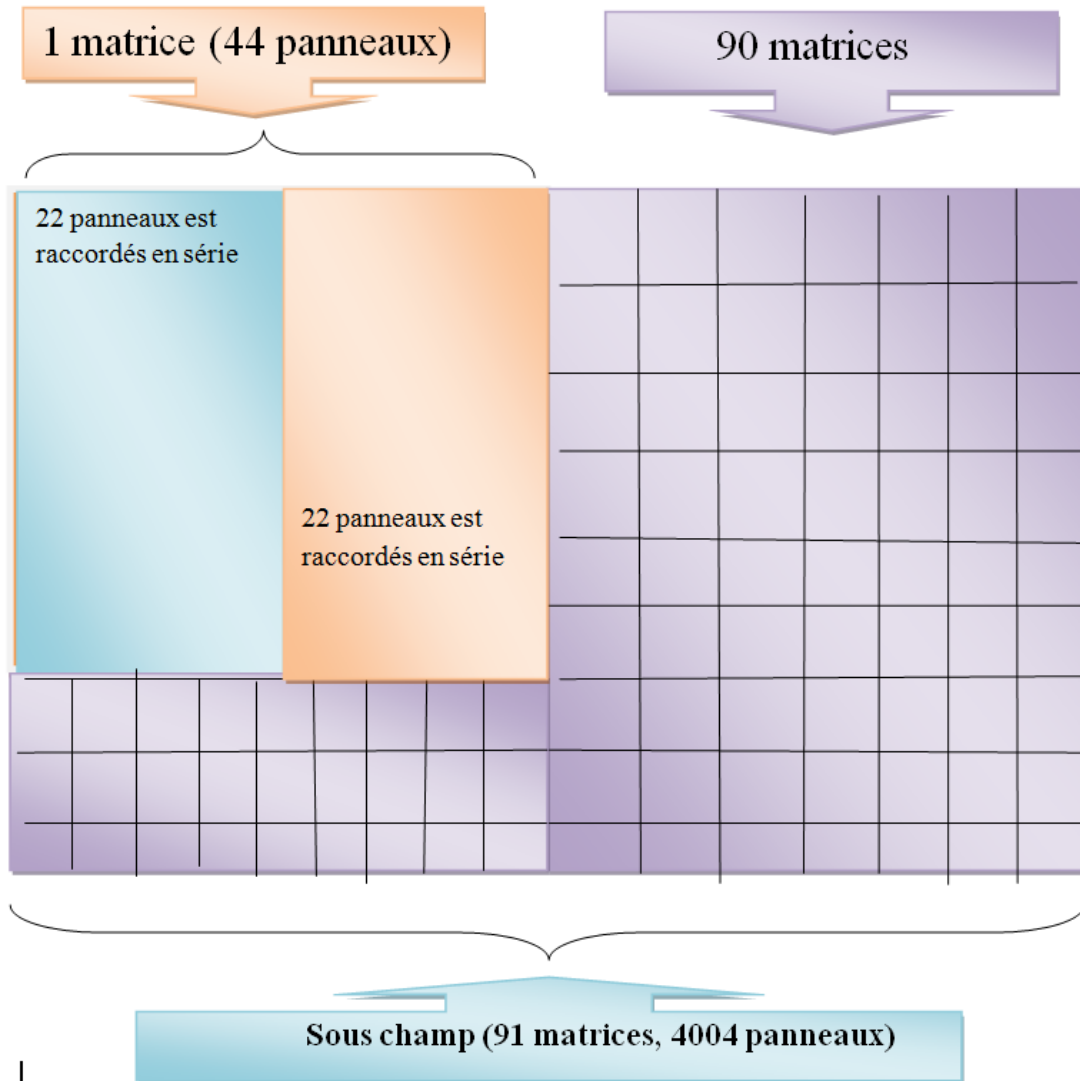
III.7.3. Présentation d'un Système photovoltaïque

Chaque station dispose d'une méthode d'installation d'équipements spéciaux dans le domaine de l'énergie photovoltaïque

Tableau III.1 : Installation photovoltaïque

Nombre de sous-champs	20
Nombre des panneaux sous champ	4004
Nombre de chaîne /sous champ	91
Nombre de panneau/chaîne	44
Onduleur	1 (400V continue en entré – 315V alternative en sortie)
transformateur élévateur	1 (315V en entré – 31.5kVen sortie).
boites de jonction	24
boites parallèles	8
Puissance de panneau	250 w/m²

La centrale est composée de 20 sous-champs chaque un produit 1MW.
 Le sous-champ est composé de :



III.8.Appareils de mesures utilisées dans la station d'Ain El Melh

Est un ensemble de capteurs pour mesurer les paramètres météorologiques liés aux variations du climat.

Elle contient :

III.8.1.Capteur 5 éléments : accrocher en haut pour mesurer la température ambiante, la direction du vent, la vitesse du vent, la pression et l'humidité en haut.



Figure III.9: capteur 5 éléments de station.

III.8.2. Capteur pour mesurer l'humidité en bas



Figure III.10: capteur pour mesurer l'humidité en bas de la station.

III.8.3. Capteur de quantité de pluie



Figure III.11: capteur de mesure la quantité de pluie.

III.8.4. Deux capteurs collés sur les panneaux pour enlever la température des panneaux.
Placer deux capteurs sur le panneau si l'une est désactivée, l'autre fonctionne toujours

III.8.5. Pyranomètre

Un Pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie. Il permet la mesure le rayonnement d'origine solaire (direct+diffus) qui parvient sur une surface horizontale pour un domaine spectral allant de 0.3 à 3 μm à l'aide de thermopiles. Il existe deux grands types de thermopiles utilisées dans ces pyranomètres :

- Les thermopiles à échanges thermiques "verticaux" qui mesurent l'écart thermique entre une surface réceptrice noire et le boîtier du Pyranomètre.
- Les thermopiles à échanges thermiques "horizontaux" qui mesurent l'écart thermique entre une surface noire et une surface blanche situées dans le même plan et exposées au soleil [51].

La surface réceptrice comporte deux anneaux concentriques en Argent; l'anneau intérieur est recouvert de noir, l'anneau extérieur recouvert de blanc.


La différence de température mesurée entre les deux anneaux par des thermocouples en contact thermique avec les surfaces intérieures des anneaux mais isolés électriquement, peut être enregistrée à raison d'une lecture par heure sous forme d'une tension de sortie de l'ordre du mV [28].



Figure III.12 : pyranomètre.

III.9. Quelque des informations intitulé la station

- ✓ La puissance électrique moyenne est de 3GWH par mois.
- ✓ Il y a de nombreux travailleurs à la station dont les rôles sont différents comme suit :
 - 4 ingénieurs.
 - 3 techniciens principaux.
 - 4 techniciens.
 - 8 professionnels.
 - 29 gardes.
- ✓ Les panneaux utilisés dans la centrale sont de technologie poly cristallin.
- ✓ La station a été achevée en environ un an.
- ✓ Les panneaux solaires sont affectés par la température et la poussière.
- ✓ Le fabricant chinois de panneaux solaire s'appelé Yingli Green Energy holding.

- ✓ Il y a 78 polos électriques auto-éclairés dans la station. Fabriqués avec des panneaux d'un type monocristallin.
- ✓ Le rendement des plaques diminue 10 % tous les 10 ans, c'est-à-dire la durée de vie de 25 à 30 ans.
- ✓ La station est capable de fournir de l'électricité à toute l'Ain El Melh.
- ✓ Le système de station injecté au réseau.
- ✓ 1000W/m^2  250W/panneau .

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'énergie photovoltaïque, cellule PV, Principe de fonctionnement de la cellule PV et avantages et inconvénients des systèmes PV. Puis, nous avons abordé la définition de SKTM et ses objectifs, puis présentation de la station d'Ain El Melh, sa situation géographique, la capacité globale, le système d'une installation PV et instruments utilisés pour déterminer la nature du climat dans la région.

Après la formation à la station électrique, nous avons pu découvrir la météo En février 2020 avec les valeurs enregistrées dans la salle de contrôle commande.

Enfin, Ce stage a été très enrichissant pour nous, car il nous a permis de découvrir le domaine des énergies renouvelables spécialement le solaire photovoltaïque.

CHAPITRE IV :

Résultats et discussions

IV.1.Introduction

La connaissance du rayonnement solaire et ces composantes sur des surfaces horizontale et inclinées est nécessaire et indispensable pour toute étude ou dimensionnement d'installations solaires. On généralement, dans les stations météorologiques le rayonnement solaire global est mesuré sur des surfaces horizontales et sur le chef-lieu de chaque région.

Bien qu'il soit difficile de connaître la valeur de l'irradiation solaire pour un site précis, sous une orientation et une inclinaison bien déterminées, il existe quelques modèles approximatifs pour le calcul dans le cas où au moins le rayonnement global horizontal est mesuré ou estimé.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats et graphes comparatifs comme le rayonnement global avec les données expérimentales de mois Février 2020 mesurées par la station d'Ain El Melh, Shariket Kahraba Wa Taket Moutadjadida (SKTM). Dans notre étude, on utilise le modèle de LIU JORDAN pour estimation des rayonnements solaire.

IV.2. Données utilisées

Les données expérimentales, qui ont servi dans notre étude, sont des mesures d'irradiation globale pour le site de station électrique (SKTM) d'Ain El Melh. Ce sont des données solaires fournies par les valeurs enregistrées dans la salle de contrôle commande.

Les caractéristiques géographiques de site étudié sont données sur le Tableau IV.1.

Tableau (IV.1): Coordonnées géographiques de site utilisé

Latitude (°)	32°35N
Longitude(°)	05°50E
Altitude (m)	940

IV.3. Caractères Moyens du Climat a station d'Ain El Melh

IV.3.1. Temperatures

Les figures (1,2) représentent l'évolution de la température ambiante et de panneau varie au cours de la journée pour différents jours de Février d'hiver (04, 27) de la ville d'Ain El Melh. D'après les figures ci-dessus, nous remarquons que la radiance solaire varie au cours

de la journée. Elle est faible au voisinage du lever et de coucher du soleil et elle atteint le maximum au milieu de la journée si le ciel garde le même état pendant une journée. Par contre, si le ciel passe d'un état à un autre, des fluctuations se produisent sur la radiance. Ces fluctuations sont dues essentiellement à la présence des nuages. Avec la :

- Température ambiante maximale atteinte est compris entre (20°C et 22°C pour le 04/02) et entre (15°C et 17°C) pour le 27/02) (**figure IV.1**).
- Temperature de panneau maximale atteint est compris entre (38°C et 42°C pour le 04/02) et entre (43°C et 48°C pour le 27/02)(**figure IV.2**).

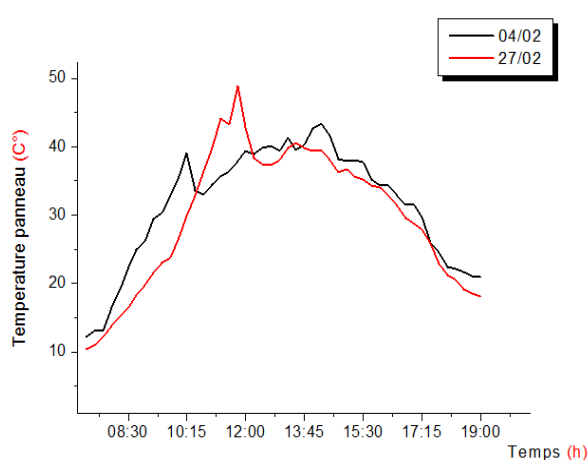


Figure.IV.1 : Évolution de la température ambiante en fonction du temps pour 4, 27 Février 2020 .

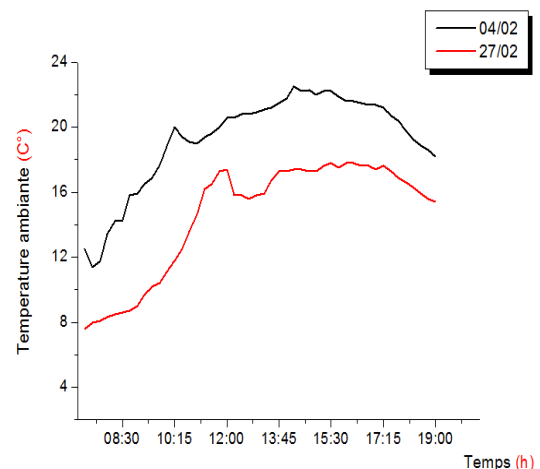


Figure.IV.2: Évolution de la température de panneau en en fonction du temps pour 4, 27 Février 2020.

IV.3.2. Vitesse de vent

La figure (**IV.3**) représente la variation de la vitesse du vent au cours de la journée sur les sites d'Ain El Melh (la station météorologique). On remarque, sur cette figure, que le site d'Ain El Melh présente une évolution des vents pratiquement énormes durant les deux journées.

- Pour le 04/02, les valeurs de la vitesse du vent varient entre 1m/s et 15m/s.
- Pour le 27/02, Les valeurs de vitesse du vent varient entre 2m/s et 9m/s.

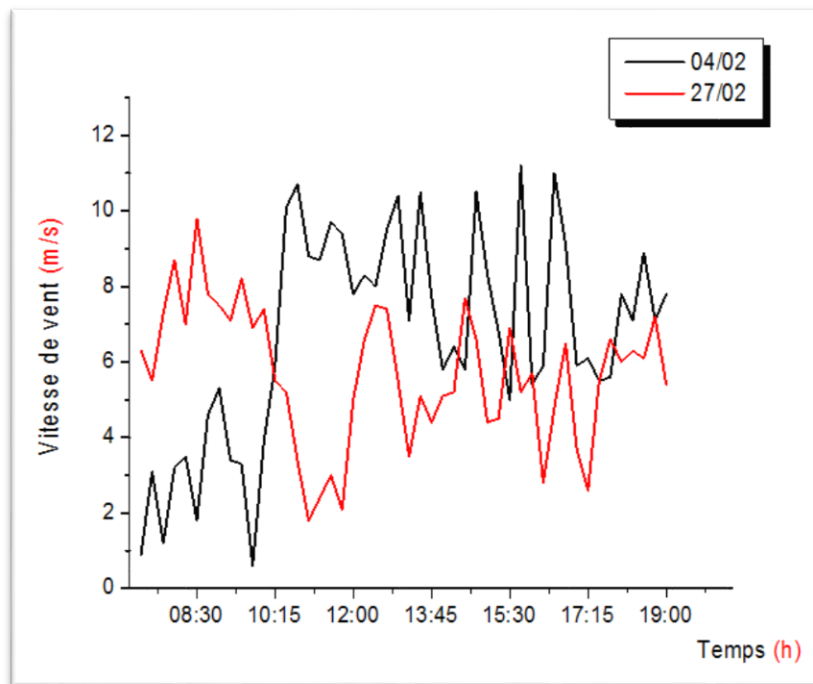


Figure IV.3 : Variation de la vitesse des vents a la station d'Ain El Melh pour le 4,27 Février 2020.

IV.3.3. Pression

La pression atmosphérique est la conséquence de l'agitation incessante et désordonnée des molécules du mélange gazeux qui constitue l'air. La répartition des pressions et leurs variations jouent un rôle important dans l'analyse météorologique et dans l'évolution du temps. L'étude des variations de la pression atmosphérique permet de déterminer la direction du déplacement des perturbations, le creusement ou le comblement des zones de hautes et de basses pressions ; elle permet également de suivre la tendance générale du temps en un lieu donné. Les relevés horaires pour un cycle journalier (**Figure IV.4**) indiquent que la moyenne horaire de la pression dans les deux jours oscille entre **921,3 Hpa** et **913,6 Hpa**. La pression subit une augmentation jusqu'à midi solaire puis diminue pour atteindre sa valeur minimale observée à la fin de la journée.

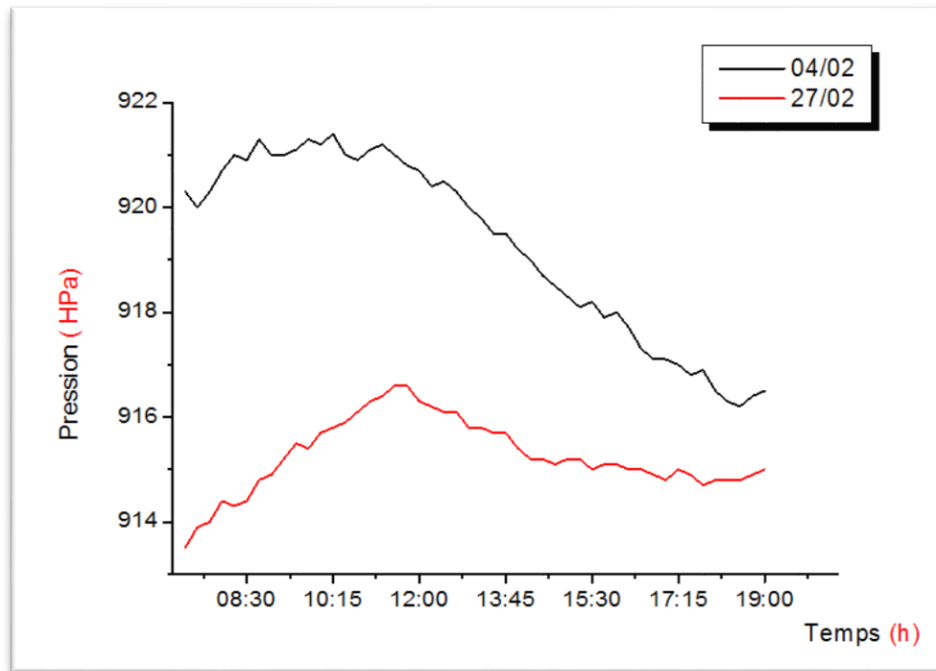


Figure IV.4 : variation de pression atmosphérique en fonction de temps pour le 4,27 Février 2020.

IV.3.4.L'humidité

L'humidité relative de l'air correspond à la quantité de vapeur d'eau dans l'air par rapport à la capacité maximale que ce dernier peut en contenir. La distribution de la vapeur d'eau sur le globe terrestre dépend de la vitesse d'évaporation et du transport de la vapeur d'eau par les courants d'air. L'humidité relative de l'air s'exprime en pourcentage (%) et est mesurée par lecture directe d'un instrument appelé hygromètre. Elle dépend de la température et de la pression. La **Figure IV.5** nous édifie sur la variation horaire du cycle journalier de l'humidité relative observée Pendant les deux jours 4 et 27 Février 2020. L'humidité relative horaire concerne le 27 Février oscille entre 63% observée à 07:45h et 27% % observée à 16 :00 h, même chose concerne le 04 février elle diminue de la valeur de 43 % (à 07 :45 H) à sa valeur minimale (18 %) à 16 heure 00 mn. Les valeurs de l'humidité relative, de façon générale, sont élevées pendant la nuit et faibles pendant le jour. La comparaison des variations horaires de la température et de l'humidité relative confirme qu'elles sont en opposition de phase car l'élévation de la température de surface du sol entraine une diminution de l'humidité relative. Le maximum de l'humidité relative s'observe avant le lever du soleil et le minimum vers 16 :00.

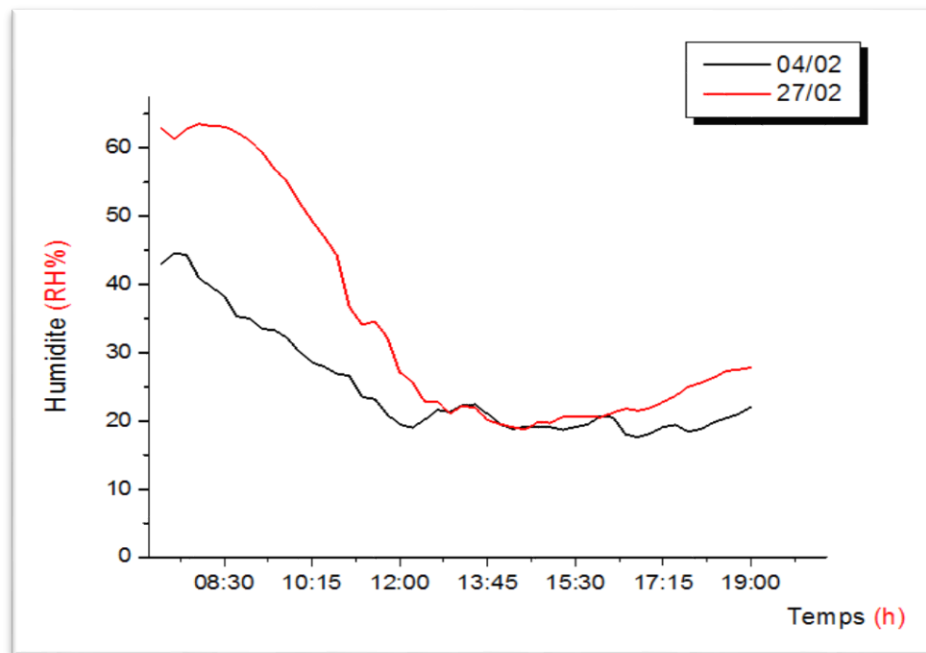


Figure. IV.5 : Evolution de pression en fonction de temps pour le 4,27 Février 2020.

IV.4. Les rayonnements solaires

Les figures 6, 7, 8 et 9 représentent des données expérimentales de l'éclairement solaire enregistré avec la station. Pendant les deux journées 4/02/2020 et 27/02/2020.

A partir des courbes tracées, nous constatons en premier lieu que l'éclairement solaire varie au cours de la journée. Il est faible au voisinage du lever et du coucher du soleil et il atteint le maximum au milieu de la journée.

- Les valeurs maximales de rayonnement global entre 750 et 850w/m²(4,27 Février) a midi solaire.
- Pour le rayonnement direct, sa valeurs maximale entre 650 et 750w/m²(4,27 Février).
- En ce qui concerne le rayonnement diffus, il varie faiblement et sa valeurs maximale entre 80 et 105w/m² (4,27 Février).
- Les valeurs maximales de rayonnement total sur un plan incliné environ 1200w/m².

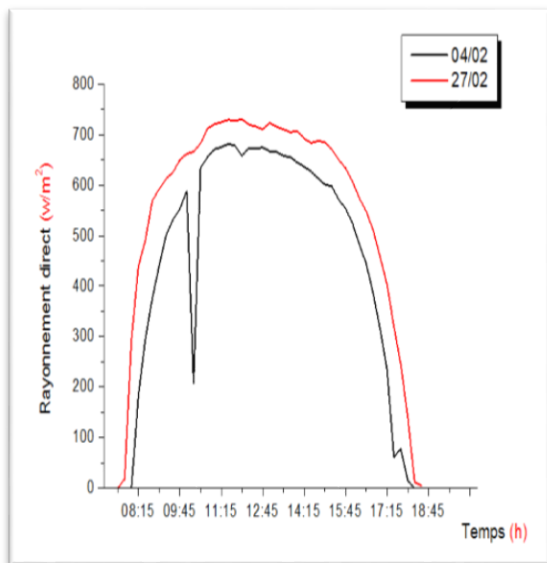


Figure IV.6 : Evolution du rayonnement direct pour le 4,27 Février 2020.

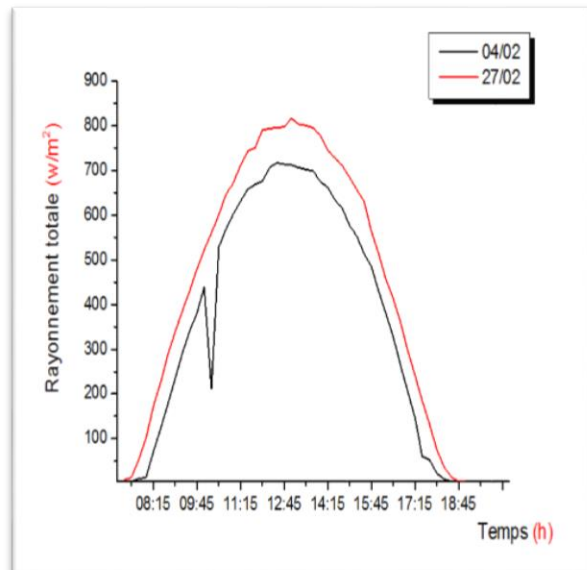


figure.IV.7 : Evolution de rayonnement totale pendant le 4,27 Février 2020.

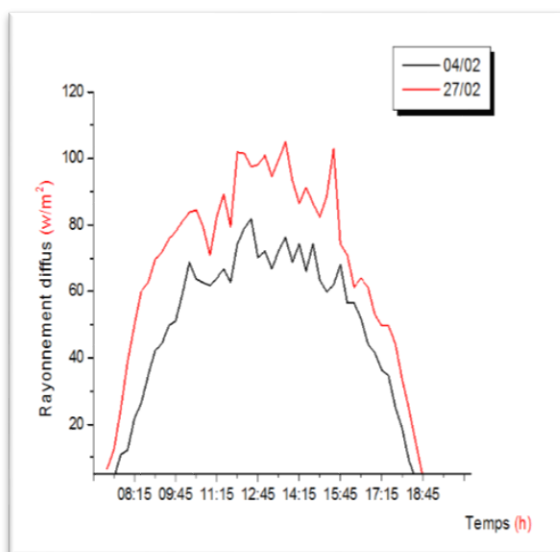


Figure.IV.8 : Evolution de rayonnement diffus pour le 4,7 Février 2020

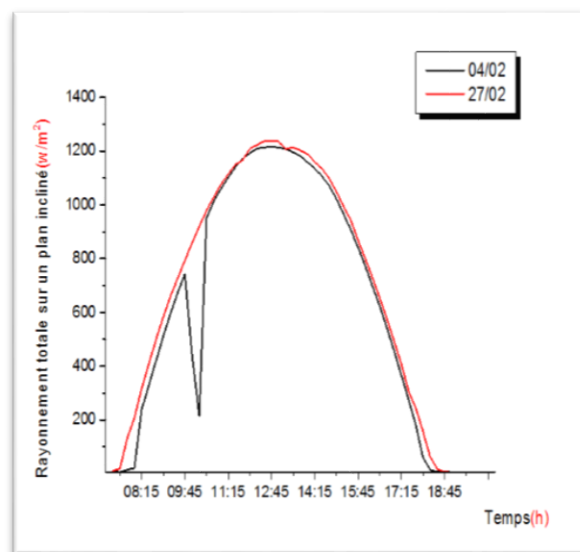


Figure. IV.9 : Evolution de rayonnement totale sur un plan incliné pour le 4,7 Février 2020

IV.5.Puissance totale

La puissance : C'est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre. D'une façon générale, l'intégrale de la puissance fournie au cours du temps représente le travail total fourni. La puissance mesurée en watt ou w. Dans la figure 10 suivantes on trouve que la puissance totale varie au cours de la journée. Il est bas dans le lever et le coucher du soleil et atteint son maximum à midi solaire (12 :00) est environ 1800 kW.

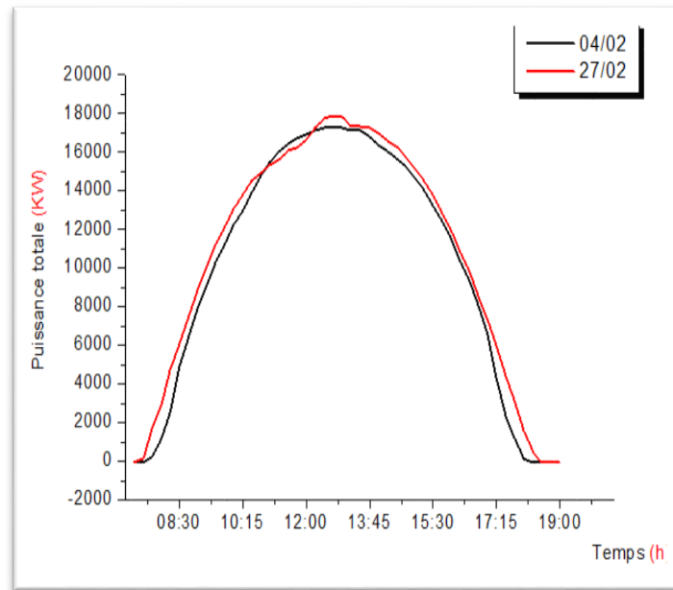


Figure. IV.10 :Evolution de puissance totale en fonction de temps pour le 4,27 Février 2020.

IV.6.Estimation du rayonnement solaire global instantané

Les données solaires exprimée en W/m^2 ou appelé rayonnement solaire. Ce rayonnement est déterminé par une relation entre l'indice de clarté et l'irradiation solaire globale sous ciel clair. Après le calcul du rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale au sol par ciel clair du modèle LUI JORDAN (donnée par les équations du chapitre II), nous avons déterminé des indices de clarté pour la station d'Ain El Melh et nous avons estimé le rayonnement solaire global .Les résultats obtenus de l'estimation du rayonnement solaire pour quelques journées ciel claire et ciel nuageux sont illustrés dans les figures 11 et 12

Dans notre étude nous avons utilisé le Modèle de LUI JORDAN, il est donné dans les équations suivant :

$$K_c = \frac{G(i,j)}{G_{clear}(i,j)} \tag{IV.1}$$

Avec :

G : Irradiation globale calculé

G_{clear} : Irradiation globale par ciel clair, elle est calculée par le modèle ciel clair de LUI JORDAN [52].

F(n) Fonction empirique reliant l'indice d'ennuagement n à l'indice de clarté K_c [53].

D'après les figures ci-dessous, nous remarquons que le rayonnement solaire varie au cours de la journée. Il est bas dans le lever et le coucher du soleil et atteint son maximum en midi solaire (12 :00) si le ciel conserve le même état pour un jour. Par contre, si le ciel change d'un état à l'autre, des fluctuations importantes se produisent sur le rayonnement. Ces fluctuations sont principalement dues à la présence de nuages. Les variations de l'énergie solaire et l'irradiation est proportionnelle aux changements d'indice de clarté, mais les variations de l'indice de clarté ainsi que le rayonnement solaire globale sont observés à la **figure IV.13**. Ces variations sont dues au type des nuages, leur épaisseur et leur altitude.

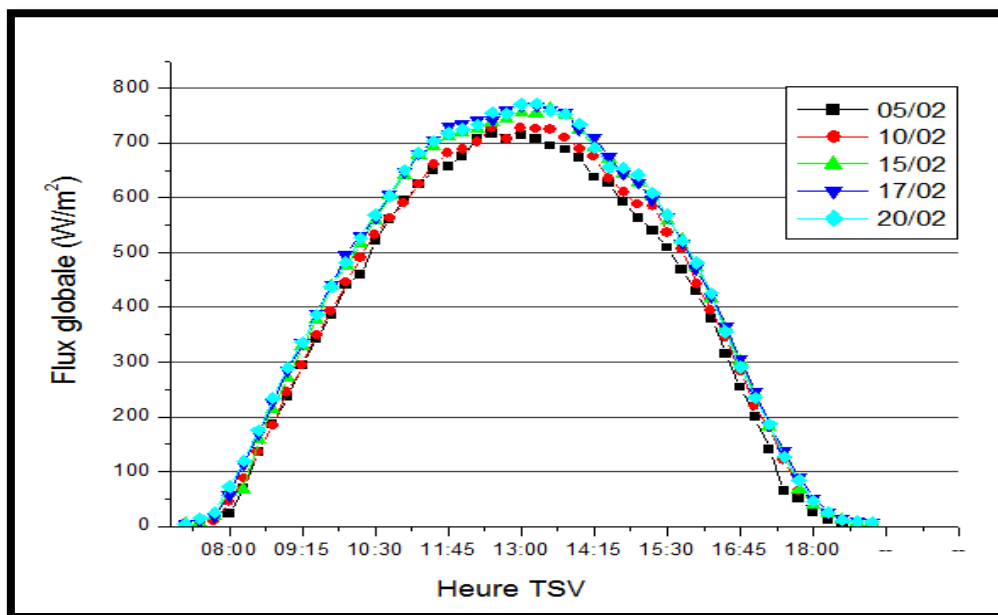


Figure. IV.11 : Estimation du rayonnement solaire global de la station d'Ain El Melh les 5, 10, 15,17 et 20 Février 2020(ciel clair).

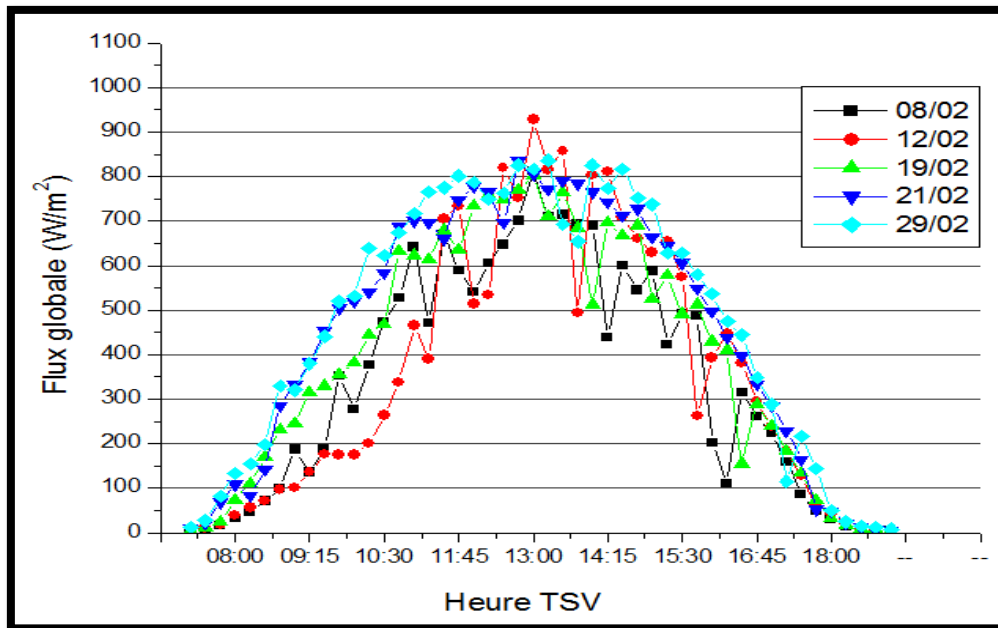


Figure IV.12 : Estimation du rayonnement solaire global de la station d’Ain El Melh les 8, 12,19, 21 et 29 Février 2020 (Ciel nuageux).

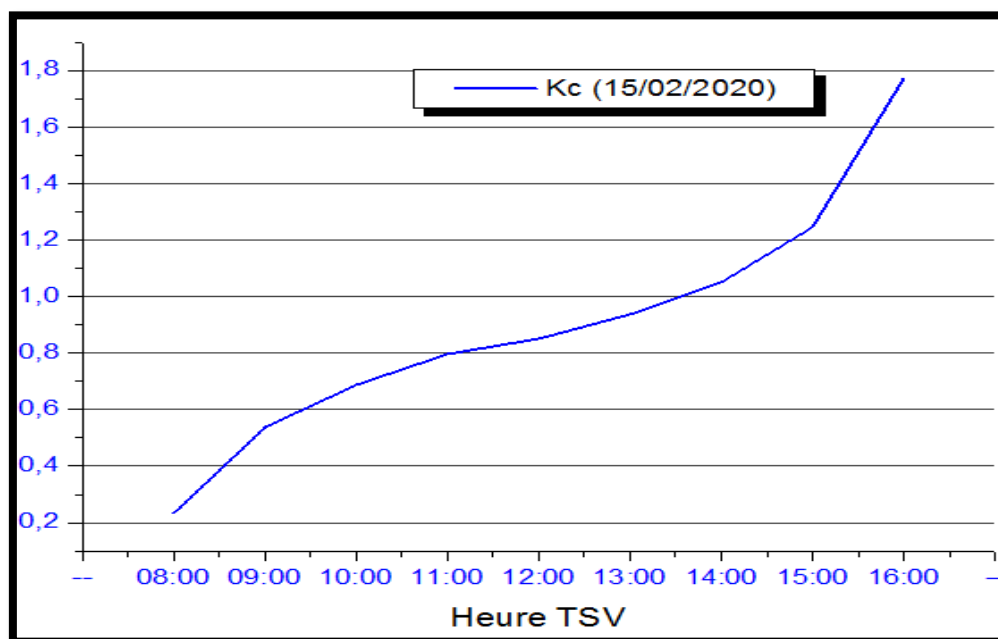


Figure IV.13 : Evolution de l’indice de clarté (15/02/2020).

IV.7.Comparaison des valeurs estimées aux mesures au sol

Les figures (IV.14) illustrent la comparaison des résultats entre les valeurs estimé et mesurées enregistrées dans la station d’Ain El Melh en cas ciel clair.les courbes ont la même allure avec des valeurs élevées pour la période diurne et des valeurs diminuées avec le coucher du soleil. C'est-à-dire l'évolution d'irradiation possède un comportement parabolique.

Le rayonnement solaire est varié au cours de la journée, atteignant son maximum à midi 12 :00h environ 850 w/m^2 pour l'irradiation calculé d'après le modèle Liu Jordan, et 750 tandis que le rayonnement solaire à la station, c'est-à-dire le rayonnement mesuré ou enregistré avec le temps l'égal, et il y a une différence entre les deux temps qui peut atteindre jusqu'à 45 minutes/m^2 pour l'irradiation mesurée dans la station. On constate qu'il y a une petite différence entre eux et est d'environ 100 w/m^2 , cela est dû à l'intervention de facteurs naturels tels que les nuages et l'Albédo d'une part, et d'autre part on remarque également une différence de pic entre les deux courbes, du fait que la mesure de rayonnement calculée est en temps solaire vrai.

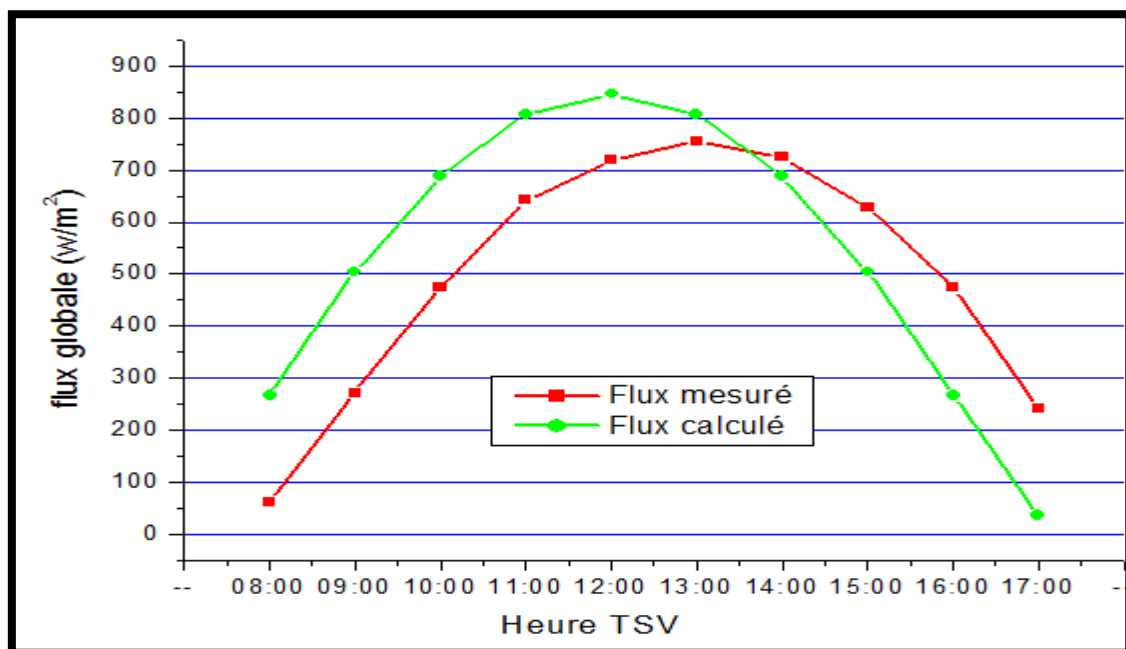


Figure IV.14 : Comparaison des valeurs du flux dû au rayonnement globale mesurées et estimées par le modèle d' LIU JORDAN.

IV.8.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tracé les courbes de paramètres météorologiques (les vents, température, humidité relative, pression) et les composantes de rayonnement solaire à partir de données expérimentales extraites de la station .Enfin, Nous avons constaté que le modèle r.sun donne une bonne estimation du rayonnement solaire.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'énergie solaire est renouvelable, propre, dispensée, à tous sans ségrégation autre que climatique. Toutes ces propriétés exigent l'estimation performante de l'irradiation solaire afin de développer des techniques de consommation (conversion) de l'énergie solaire (distillateurs et cellules solaires . . . etc.)

De nombreux travaux de recherche ont été développés sur l'estimation de l'irradiation solaire au sol pour faire le dimensionnement d'une installation solaire et prédire le rayonnement solaire, la connaissance du potentiel solaire pour faire des installations solaires ou pour la production l'électricité oblige le meilleur mesuré des différents paramètres de l'irradiation.

L'utilisation de l'énergie solaire est actuellement une réalité mondiale. L'Algérie est parmi les pays qui ont un grand nombre d'heure d'insolation. L'Algérie est un pays de soleil par excellence. Le nombre des heures d'insolation s'élève à presque 3300h/an. Le climat est très favorable pour l'exploitation de l'énergie solaire dans différents domaines, mais la distribution de l'irradiation solaire n'est pas bien connue et les stations de mesure sont rares et se trouvent uniquement à quelque région.

L'étude que nous venons de présenter, nous a permis d'approfondir et d'enrichir nos connaissances sur la donnée météorologique de station d'Ain El Melh, et précisément les flux solaires.

Le but de ce travail est d'appliquer un modèle d'estimation de la radiation solaire sur la base des données astronomiques et météorologiques. Et de faire une étude comparative entre les résultats obtenus.

Nous conclu que :

-Ain El Melh est une très bonne région pour le projet d'énergie photovoltaïque car elle a un climat adapté, Un flux important de rayonnement solaire. Alors, aujourd'hui, elle alimente de nombreuses régions en électricité.

-L'irradiation solaire dépend de plusieurs facteurs tels que l'ensoleillement, la température, le lieu géographique, l'instant considéré dans la journée.

- Les résultats obtenus montrent l'efficacité du modèle de **LIU & JORDAN** dans le domaine de l'énergie solaire en Algérie.

La différence entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées de la radiation solaire est acceptable, et donc le modèle proposé est recommandé pour l'évaluation de l'irradiation solaire pour les différents sites algériens.

Nous espérons que ce travail serait bénéfique pour tous ceux qui s'intéressent à l'énergie solaire et qui souhaitent aborder des recherches dans ce domaine.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **A. Lyes**, Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque, université mouloud Mammeri de tizi ousou Mémoire de Magister, (2011).
- [2] **A.MAAFI**, «A Survey on photovoltaïque activities in Alegria», *Renewable Energy* Vol.20, pp 09-17, (2000).
- [3] **M.CAPDEROUX**, «Atlas solaire de l'Algérie, Modèles théoriques et expérimentaux», tome1, Volume (1.2), Office des publications Universitaires, Alger (1987).
- [4] **K.MESSAIFA**, «Evaluation de l'Apport Quantitatif des inclinaisons d'un système de photovoltaïque», *Enersole'01- 30-31 Oct, ADRAR*, pp 255-272, (2001).
- [5] **F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi, and A. Gama**, Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie, *Revue des Energies Renouvelables.*, Vol. 12 (2), 331-346 (2009).
- [6] **F. Yettou**, Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude, Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique, Alger 2009.
- [7] **K. Bouchouicha**, "Modélisation multi spectrale des images satellitaire, application : quantification du bilan d'énergie sol-atmosphère, Thèse de Doctorat en science. Université Mohammed Boudiaf, Oran (2017).
- [8] **A, Mellit, M, Benghanem, A, Hadj Arab, A, Guessoum.**, An adaptative artificial neural network model for sizing stand-alone photovoltaic systems: application for isolated sites in Algeria. *Renewable Energy* 30 (10), 1501–1524(2005).
- [9] **M, Chegaar and A, Chibani**. Global solar radiation estimation in Algeria. *Energy conversion and management*, 42(8), 967-973(2001).
- [10] **M. S, Mecibah, T. E, Boukelia., R, Tahtah, K, Gairaa** Introducing the best model for estimation the monthly mean daily global solar radiation on a horizontal surface. (Case study: Algeria). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 194–202(2014).
- [11] **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°3 451 – 463(2012).
- [12] **M. R, Yaïche, and S. M. A. Bekkouche**. Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel. *Revue des énergies renouvelables* 13.4: 683-695(2010).
- [13] **A, Moummi**, Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra. *Une* 3.4 (2006).

- [14] **F, Yettou, A, Gama, K, Bouaraour, H, Baroud, H, Djekaoua**, Estimation de l'Ensoleillement par Deux Modèles Semi-Empiriques dans la Région de Ghardaïa.
- [15] **B. O., Bilal, V., Sambou, C. M. F., Kebe, M., Ndong, P. A Ndiaye.**, Etude et Modélisation du potentiel solaire du site de Nouakchott et de Dakar. *J, Sci*, 7(4),57-66(2007).
- [16] **J, Bernard**. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [17] **R, Bernard, G, menguy, M, Schwartz**. Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).
- [18] **J, A, Duffie, W, A, Beckman**. Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).
- [19] **A, Sfeir , G, Guarracino**. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [20] **Ch, Perrin de Brichambaut, C, Vauge**. Le gisement solaire, Technique et Documentation, Paris. (1982).
- [21] **Yassine Sahnoune**. Modélisation du rayonnement solaire sur quelques sites algériens. Mémoire de magister (2007), université de Sétif.
- [22] **P. Bessemoulin , J., Olivieri** Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette , La Météorologie 8e série - n° 31, (Septembre 2000).
- [23] **M, Ghassemi, A, Cota, R, Foster** «Solar Energy:Renewable Energy and the Environment» 2010.
- [24] **C., Delorme**, le rayonnement solaire utilisable , Université d'Avignon publication-France.
- [25] **Brochure**, Dimensionnement et installation des systèmes Solaires PV pour l'éclairage domestique , Centre de Développement des Energies Renouvelables Royaume du Maroc Marrakech édition l'UNESCO et l'IEPF Marrakech 29 juillet 2000.
- [26] **Francis Codron.**, Transfert radiatif bilan énergétique, Note du cours, Université. Pierre et Marie Curie-Paris 6, France, (2012).
- [27] **P. I. Cooper**, The absorption of solar radiation in solar stills, *Sol. Energy* 12 (3), 333-346, (1969).
- [28] **A. Ricaud Jan**, Gisement solaire et transferts énergétiques, Université de Cergy-Pontoise, (2011).
- [29] **A. Brahimi**, Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau, Mémoire de Master 2, Centre de Développement des Energies Renouvelable CDER de Bouzaréah (Alger), Février (2016).

- [30] **Géométrie solaire** sur site Internet, <http://www.outilssolaires.com/Glossaire/spin-geometrie.htm>. (Consulté le 22/05/2009).
- [31] **Viorel Badescu**. Modeling solar radiation at the earth's surface, Springer 2008.
- [32] **K. Kerkouche**, Evaluation de l'irradiation solaire globale sur une surface inclinée selon différents modèles pour le site de Bouzaréah, Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°2, 2013, pp.269 -284.
- [33] **A. Oudrane, B. Zeghmati, X. Chesneau and B. Aour**, Modeling the radiate and energy balance of a building located in the Adrar région, Recueil de Mécanique Vol.1, n°002, 2016, pp.079-087.
- [34] **D., Benatiallah, A. benatiallah**, Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-Adrar) (2019). .
- [35] **Y, JANNOT**, Solaire thermique , Octobre 2003.
- [36] **Portail Ministère de l'Energie**, www.energy.gov.dz, Consulté en Février 2018.
- [37] **A., Mefti, M.Y Bouroubi, H, Mimouni** Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N° 2, pp.12, Décembre 2002.
- [38] **J, Bonal; P, Rossetti**. Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).
- [39] **S. Benkaciali, K. Gairaa**, Techniques de modélisations de l'irradiation solaire sur un plan incliné, International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET), Vol.3-pp.102-108, (2001).
- [40] **S.M.A. Bekkouche**, Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires , thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2009.
- [41] **A. Louche, G. Peri and M. Iqbal**, An analysis of Linke Turbidity Factor, Solar Energy, Vol. 37, N°6, pp. 393 – 396, (1986).
- [42] **M. Hamdani**, Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa mémoire de magistère, université de Tlemcen 2011, Algérie.
- [43] **M.R. Yaïche**, Logiciel de Calcul des Paramètres Astronomiques à l'Usage des installations solaires, Congrès International sur les Energies Renouvelables et le Développement Durable, 'ICRESD_07, Tlemcen, Algérie, 21 – 24 (2007).
- [44] **D. Saheb-Koussa, M. Koussa et M. Belhamel**, Reconstitution du Rayonnement Solaire par Ciel Clair, Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°2 pp 91 – 97, (2006).

- [45] **M.R Yaïche et S.M.A Bekkouche**, Conception et Validation d'un Programme Sous Excel pour l'Estimation du Rayonnement Solaire Incident en Algérie. Cas d'un Ciel Totalement Clair, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, N°3, pp. 423 – 436, (2008).
- [46] **B, Dendib**, Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative. Université Ferhat Abbes-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique TS4/6338, (2007).
- [47] **S. Naoual**, Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur, Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique (2010).
- [48] **D, Mohamed**, contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique, université de batna Thèse de Doctorat en Science,(2008).
- [49] **B., Zerguine** modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque , mémoire de master, université badji mokhtar Annaba, (2010).
- [50] www.sktm.dz, consulté en Juillet 2020.
- [51] **Y, Sahnoune**, Modélisation du rayonnement solaire sur quelques sites aglériens (Doctoral dissertation) (2018). .
- [52] **R. E Bird, C, Riordan**, Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth Surface for Cloudless Atmospheres», *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(1), 87-97(1986).
- [53] **C., Rigollier, L., Wald**, Using Meteosat images to map the solar radiation: improvements of the Heliosat method», In Proceedings of the 9 th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Published by Eumetsat, Darmstadt, Germany, EUMP 22, pp. 432-433(1998).