

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement
/...../...../.....



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم: آلية والكتروميكانيك

Département de d'automatique et électromécanique

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Energies Renouvelables

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Thème

**Evaluation des modèles ciel-claire à des fins de prévision de
l'énergie photovoltaïque**

Soutenue publiquement le : 15/09/2022

Par

HADJ BRAHIM abdelmadjid et BENSELMA boulenouar

Devant le jury composé de :

FERKOUS Khaled	Maître de Conférences B	Examinateur
GUERMOUI Mawloud	Maitre de Recherche A	Examinateur
GAIRAA Kacem	Maitre de Recherche A	Encadrant

Année universitaire 2021 / 2022

Dédicace

Par-dessus tout, je remercie Dieu pour le compromis que j'ai fait.

Je dédie cet humble acte à tous ceux que j'aime.

Ce don particulier à mes parents, à qui je dois ce succès et qui se sont sacrifiés pour moi, au cours de ces longues années de scolarité, grâce à leur soutien et à leurs encouragements habilement calculés, m'a permis de vivre mes années scolaires tranquillement et efficacement.

A mon encadrant Dr. Kacem Gaïraa

À mes frères.

À tous mes amis qui m'ont soutenu quand j'en avais besoin

Hadj brahîm abdelmadjid

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

A mes frères et mes sœurs

A tous ma famille

A tous mes collègues et mes amis partout

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science

et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien

et la prospérité de l'humanité.

BENSELMA boulenouar

ملخص:

شهد استخدام الطاقات المتجددة نموًا كبيرًا في العالم وفي بلدنا، بسبب الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية بشكل أساسي لتلبية احتياجات المناطق النائية والصحراوية والجبلية. تستخدم الطاقة الشمسية الكهروضوئية بشكل متزايد في مختلف التطبيقات الأرضية مثل الإضاءة والاتصالات والتبريد والضخ.

يتكون الإشعاع الشمسي على مستوى الأرض بشكل أساسي من إشعاع مباشر وإشعاع منتشر. الإشعاع المباشر هو الإشعاع الذي تصل مباشرة إلى سطح الأرض بينما ينتج الإشعاع المنتشر عن انعراج الإشعاع بواسطة السحب والجزيئات المختلفة المعلقة في الغلاف الجوي وانكسارها عن طريق الأرض.

الغرض من هذه المذكرة هو تقييم وتقدير الإشعاع الشمسي تحت سماء صافية على مستوى الأرض. تم التحقق من صحة ستة نماذج (Solis model، Capdérrou model، Haurwitz model، Hotel_Liu & Jordan model) (الخ) من أجل اختيار النموذج الأنسب للتنبؤ بالطاقة الكهروضوئية في موقع غرداية.

كلمات مفتاحية: الطاقة الشمسية، الإشعاع الشمسي، تقييم، نماذج السماء الصافية، التنبؤ

Résumé :

L'utilisation des énergies renouvelables a connu une croissance significative dans le monde et dans notre pays et cela à cause de la demande croissante d'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées, désertiques, et montagneuses. L'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour diverses applications terrestres comme l'éclairage, la télécommunication, la réfrigération et le pompage.

L'éclairement solaire au niveau du sol est principalement composé d'éclairement direct et d'éclairement diffus. L'éclairement direct est l'éclairement atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Alors que l'éclairement solaire diffusé résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère et de sa réfraction par le sol.

Le but de ce mémoire c'est l'évaluation et l'estimation de rayonnement solaire sous un ciel clair au niveau du sol. Six modèles ont été validés (modèle Hottel_Liu & Jordan, modèle Haurwitz, modèle Capdérrou et modèle Solis....) afin de sélectionner le modèle le plus adéquat pour prévision de l'énergie photovoltaïque au niveau du site de Ghardaïa.

Mots-clés : Énergie solaire, rayonnement solaire, évaluation, modèles ciel-claire, prévision

Abstract:

The use of renewable energies has experienced significant growth in the world and in our country, due to the growing demand for electrical energy mainly for the needs of remote, desert and mountainous regions. Photovoltaic solar energy is increasingly used for various terrestrial applications such as lighting, telecommunications, refrigeration and pumping.

Solar irradiance at ground level is mainly composed of direct irradiance and diffuse irradiance. Direct illuminance is the illuminance directly reaching the earth's surface from the sun. While, diffused solar illumination results from the diffraction of light by clouds and various molecules suspended in the atmosphere and its refraction by the ground.

The purpose of this thesis is the evaluation and estimation of solar radiation under a clear sky at ground level. Six models were validated (Hotel_Liu & Jordan model, Haurwitz model, Capd rou model and Solis model, etc.) in order to select the most appropriate model for forecasting photovoltaic energy at the Ghardaia site.

Keywords: solar energy, solar radiation, evaluation, sky-clear models, forecasting

Liste des abréviations

λ	Longitude	(°)
φ	Latitude	(°)
δ	Déclinaison	(°)
ω	angle horaire solaire	(°)
h	hauteur angulaire	(°)
a	Azimut	(°)
I_{0n}	La valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue (1367)	w/m ²
P_{vs}	pression partielle de vapeur saturante	mbar
Pv	pression de vapeur	mbar
Rr	humidité relative	%
Ta	température ambiante	°C
I	Constant solaire	w/m ²
Tu	Temps universel	h
T _L	Temps local	h
TSM	Temps solaire moyen	h
TSV	Temps solaire vrai	h
ET	Equation du temps	min
DNI	Direct Normal Irradiance	w/m ²
DHI	Diffuse Horizontal Irradiance	w/m ²
GHI	Global Horizontal Irradiance	w/m ²
CSI	Clear sky Irradiance	
RMSE	racine de l'erreur quadratique moyenne	w/m ²
nRMSE	Erreur quadratique moyenne normalisée	%
MBE	l'erreur de biais moyenne	w/m ²
nMBE	l'erreur de biais moyenne normalisée	%
R ²	Coefficient de détermination	0<R ² ≤1
θ_z	l'angle zénithal	(°)
z	La distance zénithale	(°)
τ_{DNI}	La transmittance atmosphérique pour le rayonnement direct	w/m ²
ε	Variable d'écart	[-]
τ	profondeur optique atmosphérique totale	[-]
AM	masse d'air optique	[-]
δ_R	l'épaisseur optique de Rayleigh	[-]

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE-----	1
Chapitre 1 Notion de base sur le rayonnement solaire-----	4
1.1 Introduction -----	5
1.2 Repérage du soleil dans le ciel -----	5
1.2.1 Longitude (λ) -----	5
1.2.2 Latitude (φ) -----	5
1.2.3 La déclinaison (δ)-----	6
1.2.4 L'angle horaire solaire (ω) -----	7
1.2.5 Heures et temps -----	8
a) Le temps universel (T_U)-----	8
b) Le temps solaire moyen-----	8
c) Temps solaire vrai (TSV)-----	9
d) Le temps légal (TL) -----	9
1.2.6 Equation du temps (ET)-----	9
1.3 Mouvement apparent du soleil -----	10
1.3.1 Hauteur du soleil -----	11
1.3.2 La Hauteur angulaire (h)-----	11
1.3.3 L'Azimut (a)-----	11
1.3.4 La constante solaire-----	12
1.4 Conclusion-----	12
Chapitre 2 Potentiel solaire et instrumentations -----	13
2.1 Introduction -----	14
2.2 Le rayonnement solaire-----	14
2.2.1 Composantes du rayonnement solaire -----	15
a) Rayonnement direct à incidence normale (DNI) : -----	16
b) Rayonnement diffus sur un plan horizontal (Dh) :-----	16
c) Rayonnement global horizontal (Gh) : -----	16
d) Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :-----	16
2.3 Instrumentations radiométriques -----	17
2.3.1 Le pyréliomètre -----	17
2.3.2 Le pyranomètre-----	18
2.3.3 L'héliographe Campbell Stokes -----	19
2.4 Le potentiel solaire algérien -----	20
2.5 Cas d'étude-----	20
2.6 Variation du rayonnement global -----	21

2.7	Durée d'insolation-----	23
2.8	Evolution des paramètres météorologiques-----	23
2.8.1	Température ambiante-----	24
2.8.2	Humidité relative R_r -----	24
2.9	Conclusion-----	26
Chapitre 3 Modèles ciel-claire -----		27
3.1	Introduction -----	28
3.2	Modèles ciel-claire -----	28
3.2.1	Modèle Haurwitz -----	28
3.2.2	Modèle Hottel_Liu & Jordan :-----	29
3.2.3	Modèle de Capdérou (Modèle solaire Algérien) -----	29
3.2.4	Modèle de Solis -----	30
3.2.5	Modèle ESRA -----	31
3.2.6	Modèle Ineichen-Perez-----	32
3.2.7	Détermination des paramètres atmosphériques-----	32
3.3	Performance et évaluation des modèles -----	34
3.3.1	Racine de l'erreur moyenne quadratique (<i>RMSE</i>) -----	34
3.3.2	Erreur de Biais Moyen (<i>MBE</i>) -----	34
3.3.3	Coefficient de détermination (R^2) -----	35
Chapitre 4 Validation des modèles et discussion des résultats -----		36
4.1	Introduction -----	37
4.2	Résultats obtenus -----	37
Conclusion générale-----		43
Bibliographie-----		45

Liste des figures

Figure (1.1) : Les coordonnées terrestre-----	6
Figure (1.2) : déclinaison solaire-----	6
Figure (1.3) : Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année n-----	7
Figure (1.4) : Angle horaire du soleil-----	8
Figure (1.5) : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L -----	10
Figure (1.6) : Hauteur et azimut pour un observateur dans l'hémisphère Nord-----	11
Figure (1.7): Variation annuelle de la constante solaire -----	12
Figure (2.1) : Analyse spectrale du rayonnement solaire [5] -----	15
Figure (2.2) : rayonnement solaire-----	15
Figure (2.3) : Composantes de rayonnement solaire reçus au sol -----	17
Figure (2.4) : Photo d'un pyrhéliomètre monté sur un tracker solaire (photo du labo gisement solaire de l'URAER) -----	18
Figure (2.5) : Photo du pyranomètre -----	18
Figure (2.6) : Photo du pyranomètre mené d'une boule pare-soleil pour mesurer le diffus (photo du labo gisement solaire de l'URAER)-----	19
Figure (2.7): Héliographe de Campbell [1]. -----	19
Figure (2.8) : rayonnement global reçu sur une surface horizontale [22]-----	20
Figure (2.9) : rayonnement global reçu sur une surface inclinée à la latitude de lieu [22] -----	20
Figure (2.10) : Variation de l'éclairement global, direct et diffus pour des journées claires et perturbées (mois janvier, mars, juin, septembre) -----	22
Figure (2.11) : durée d'insolation (en heure) moyen mensuelle enregistré au site de Ghardaïa	23
Figure (2.12) : la température ambiante MAX et MIN (01-03-06-09/2020) -----	24
Figure (2.13) : humidité relative moyenne (01-03-06-09/2020)-----	25
Figure (2.14) : pressions atmosphérique moyenne de site Ghardaïa mois (01-03-06-09/2020)	25
Figure (3.1) : Réseau AERONET-----	33
Figure (3.2) : Réseau SoDa -----	33
Figure (4.1) : Exemple de détection visuelle d'une journée ciel-clair -----	37
Figure (4.2) : Organigramme général des étapes d'estimation de GHI_c -----	38
Figure (4.3) : Diagramme de nuage de points entre les modèles choisis et les mesures au sol -	39
Figure (4.4) : Comparaison entre le rayonnement global estimé par le Modèle Solis et les mesures eu sol -----	42

Liste des tableaux

Tableau (2.1) : Coefficients d'albédo usuels [1] -----	16
Tableau (2.2) : Répartition du potentiel solaire algérien-----	20
Tableau (3.1) : constantes a_0 , a_1 , a_2 chaque type de climat -----	29
Tableau (3.2) : Paramètres d'entrés pour chaque modèle -----	32
Tableau (4.1) : Performance des modèles ciel clairs validés -----	40
Tableau (4.2) : Scores d'appréciation selon Engerer et al. [19, 20] -----	41
Tableau (4.3) : Performance des modèles validés selon le score d'appréciation-----	41

INTRODUCTION GENERALE

Le changement climatique a entraîné une augmentation en continue des températures et des effets de serre de notre planète en raison de l'intensification de l'urbanisation et de l'utilisation abusive de l'énergie. Pour faire face à ces phénomènes, il est donc très important l'utilisation des énergies propres en particulier l'énergie solaire.

La production électrique à partir de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en net augmentation depuis de nombreuses années pour des raisons environnementales comme la réduction des gaz à effet de serre et les polluants locaux, la pérennisation des réserves fossiles pour des applications non énergétiques, la baisse du prix de l'électricité (les énergies renouvelables devenant aujourd'hui efficaces) et d'augmenter l'autonomie énergétique des territoires. A titre illustratif, un demi-million de mégawatts (627 GWc) étaient installés fin 2019 dans le monde avec environ 114,9 GWc de capacité nouvellement installée.

Sur le plan national, nous savons tous que le mix énergétique est tout de même dominé par le pétrole et le gaz naturel vu ses réserves importantes. Mais, nous ne pouvons ignorer l'importance du gisement solaire dont elle dispose et la place qu'il occupe mondialement. Cette source peut être intégrée d'une manière significative dans les réseaux de distribution déjà existants que ce soit pour répondre à la demande croissante de la consommation énergétique, pour réduire le cout du revient du Kilo Watt-heure, ou pour la minimisation des émissions de gaz à effet de serre qui reste un objectif primordial pour la sauvegarde de notre planète. Ainsi, l'énergie solaire en particulier le photovoltaïque (PV) présente un intérêt majeur pour booster le programme national des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique lancé par l'état algérien depuis 2011, étant donné que le gisement solaire est propice au développement de cette forme d'énergie et sa pénétration dans le réseau de distribution sera grimpé. Les centrales PV sont appropriées pour la génération de l'électricité à grande échelle où plusieurs centrales ont été installé et connectées au réseau électrique dans plusieurs sites du pays (grand-sud, sud-ouest, haut-plateaux, est, etc.) et avec différents types de climat (tempéré, aride, semi-aride, désertique, etc.). Au total, 21 centrales photovoltaïques sont opérationnelles depuis 2014.

Problématique

L'aspect intermittent et aléatoire de la source solaire est une contrainte sérieuse à l'injection de la production PV dans les réseaux électriques qui sont plus adaptée à des moyens de production stables et contrôlables. Lorsqu'une partie importante de l'énergie est fournie par des sources fluctuantes, il est très complexe de maintenir un équilibre production/consommation principalement à pas de temps court. D'où l'importance des outils

de prévision pour maintenir en équilibre la balance production/consommation et de stabiliser le réseau électrique. Donc, une prévision précise du rayonnement solaire et par conséquent de la production solaire PV est alors nécessaire pour que les gestionnaires de réseau en tiennent compte dans leur programme de planification, de distribution et de régulation.

Objectif

Les systèmes de conversion d'énergie PV dépendent étroitement du rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale (GHI). En effet, le rendement de ces systèmes est significativement lié aux changements des quantités du rayonnement global qui sont également sensibles aux processus d'atténuation, ayant une grande influence sur l'irradiation solaire au sol. Ces processus sont caractérisés par deux phénomènes : la diffusion et l'absorption.

Les méthodes de prévision de GHI sont basées sur la prédiction de la transmission des nuages à travers un facteur d'atténuation appelé indice de ciel clair (CSI). Il est défini comme le rapport entre l'irradiance solaire globale mesurée (GHI) et l'irradiance solaire globale estimée par ciel-clair (GHI_c). Cependant, si une incertitude significative est trouvée dans l'estimation de l'irradiance solaire globale par ciel clair (GHI_c), cela implique de grandes erreurs dans les prévisions GHI. C'est pourquoi une estimation précise de l'irradiance globale par ciel clair est primordiale. D'où l'objectif de notre travail qui s'articule autour de l'évaluation des modèles ciel-clair en vue de prévision de l'énergie photovoltaïque.

Chapitre 1 Notion de base sur le rayonnement solaire

1.1 Introduction

Le soleil est la source d'énergie, de chaleur et de lumière nécessaire à toutes les formes de vie, ainsi que la principale source de tous les rayonnements reçus par la terre, et à travers le mouvement et la trajectoire du soleil dans le ciel et la rotation de la terre autour du soleil et sa position à chaque point du ciel et la distance entre la terre et le soleil est nécessaire pour déterminer la quantité de rayonnement à l'extérieur de la terre et la durée du jour.

1.2 Repérage du soleil dans le ciel

1.2.1 Longitude (λ)

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude sera désignée ici par la lettre (λ).

La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre -180° et 180° ou respectivement de 180° ouest à 180° est, à tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'**EST** de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'**OUEST**. [8]

Pour la ville de Ghardaïa, la longitude est de 3.40 E.

1.2.2 Latitude (φ)

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée en tant que latitude de 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° .

Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude sera désignée ici par lettre (φ), et peut ainsi être comprise entre -90° et $+90^\circ$. [8]

Pour la ville de Ghardaïa la latitude est environ $32^\circ 29' N$.

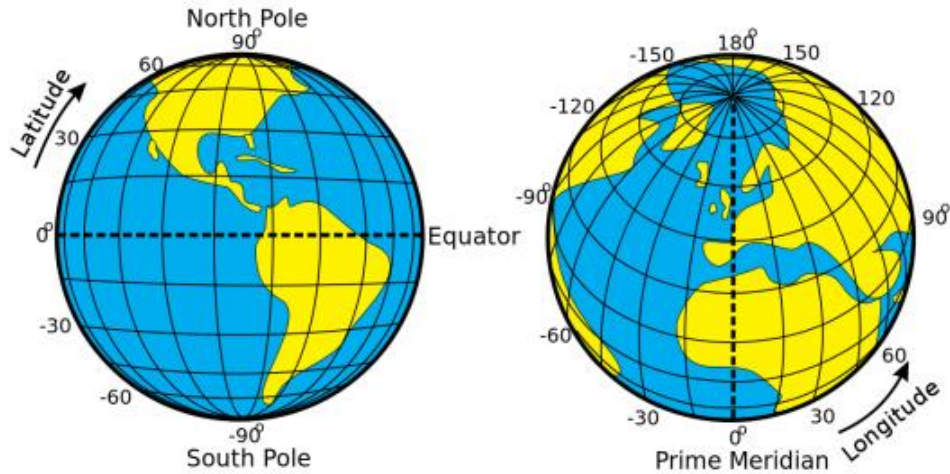


Figure (1.1) : Les coordonnées terrestres

1.2.3 La déclinaison (δ)

La déclinaison solaire (δ) est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie en fonction des saisons de $-23,45^\circ$ à $+23,45^\circ$.

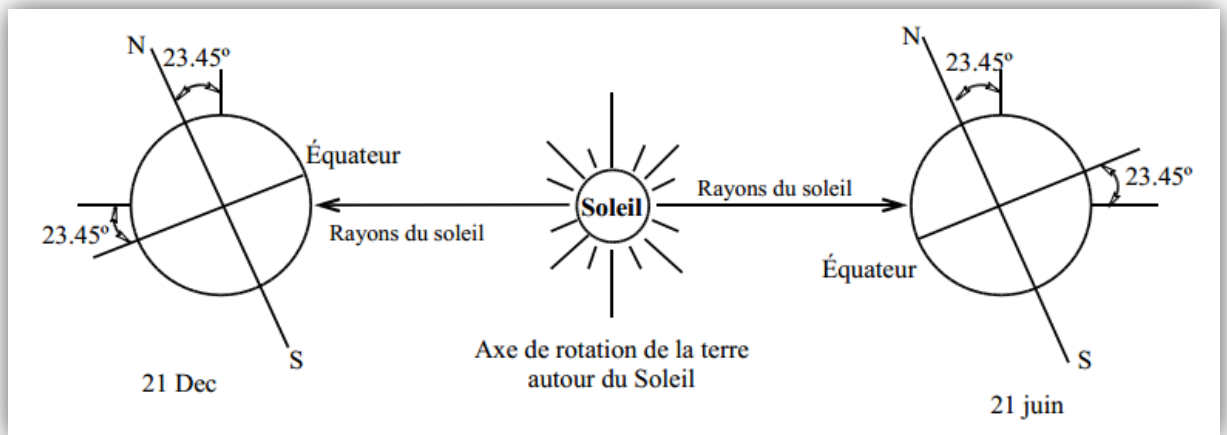


Figure (1.2) : déclinaison solaire

Equinoxe de printemps :	21 Mars $\delta = 0^\circ$
Solstice d'été :	22 Juin $\delta = +23,45^\circ$
Equinoxe d'automne :	23 Septembre $\delta = 0^\circ$
Solstice d'hiver :	22 Décembre $\delta = -23,45^\circ$

Entre ces 4 points remarquables, (δ) prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par les relations [1] :

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(284 + n)\right] \quad (1.1)$$

Ou bien

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(n - 81)\right] \quad (1.2)$$

n : numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier.

La déclinaison étant une fonction sinusoïdale, elle varie rapidement au voisinage des équinoxes (0.4 degré / jour) alors qu'elle est pratiquement stationnaire durant les périodes qui encadrent les solstices d'été et d'hiver [3].

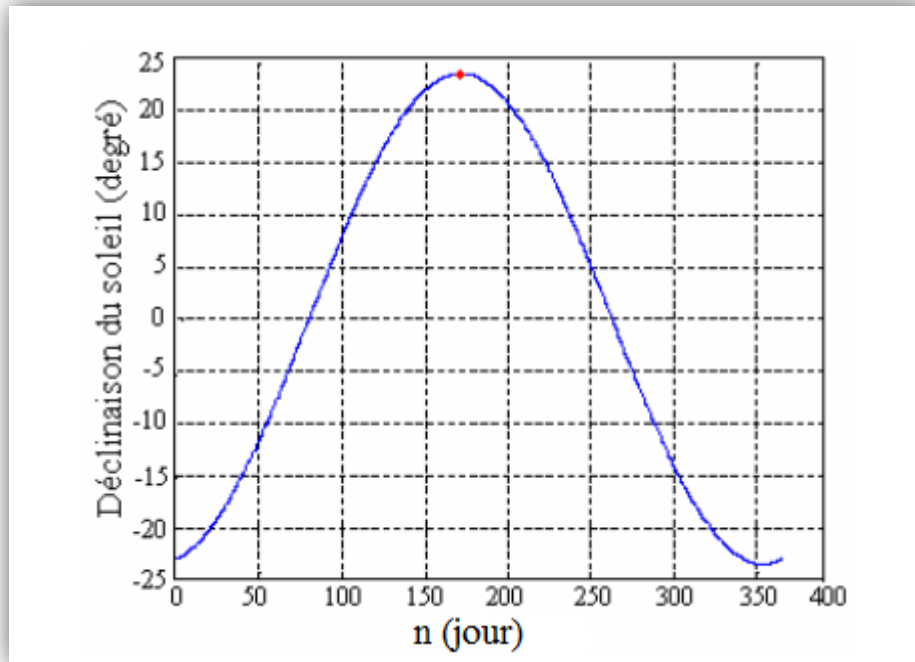


Figure (1.3) : Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année n

1.2.4 L'angle horaire solaire (ω)

L'angle horaire ω (encore noté AH) du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Exprimé en degrés.

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (1.3)$$

Où TSV est le temps solaire vrai exprimé en heures.

A chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de 15° , soit encore 4mn de temps par degré de longitude

A la latitude de 45° , une mn de temps représente environ 20 km, 11 km au cercle polaire et 28 km à l'équateur [3].

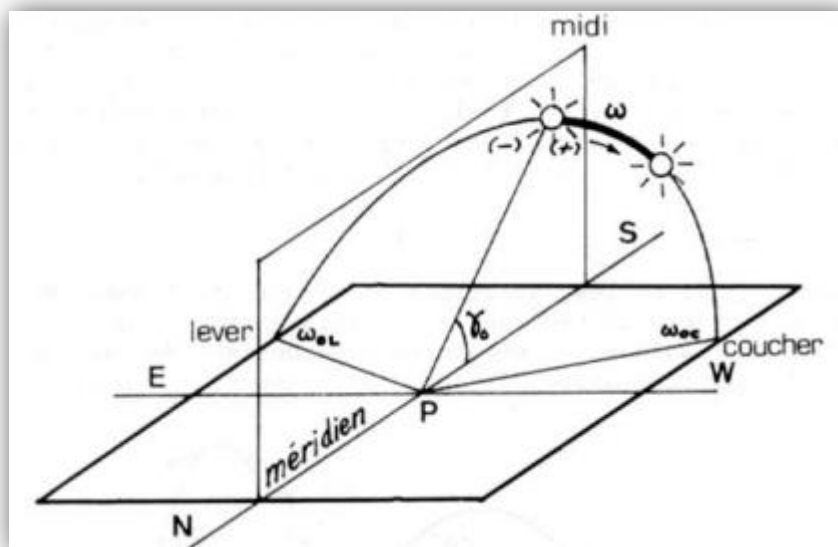


Figure (1.4) : Angle horaire du soleil

1.2.5 Heures et temps

La terre subit deux types de déplacement : la rotation de la terre autour de l'axe des pôles et sa révolution autour du soleil. Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notion de journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps, puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de 15° . La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai

a) Le temps universel (T_U)

C'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time) qui est le méridien central du fuseau horaire. Pour en déduire le temps légal ou local (TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire [8] :

$$T_L = T_U + \text{décalage} \quad (1.4)$$

Ce décalage vaut +1 pour l'Algérie donc décalage = +1.

b) Le temps solaire moyen

La rotation de la terre autour d'elle-même introduit la notion du temps solaire moyen (TM). On le définit comme étant le temps qui sépare en moyenne deux passages successifs par le méridien du lieu, Il se déduit de l'équation suivante [8] :

$$TSM = T_U \pm \frac{\lambda}{15} \quad (1.5)$$

Avec TSM en heure.

c) Temps solaire vrai (TSV)

C'est le temps solaire moyen (TSM) corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée donc à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil [1] :

$$TSV = TSM + \frac{ET}{60} \quad (1.6)$$

d) Le temps légal (TL)

Le temps légal (TL) est le temps officiel de l'Etat, il diffère par rapport au temps mondial de Greenwich par un décalage exprimé en heures.

$$T_L = T_U + \Delta H \quad (1.7)$$

ΔH étant le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'Etat considéré, ($\Delta H=1$ heure pour l'Algérie) [8].

1.2.6 Equation du temps (ET)

Jusqu'en 1964, la mesure du temps était basée sur la rotation de la terre : le jour était défini comme l'intervalle de temps entre deux passages du soleil par le même méridien. Toutefois, les jours solaires ne sont pas égaux, car l'angle ω que fait le soleil avec le méridien du lieu ne correspond pas exactement au temps solaire moyen bien que la terre tourne régulièrement sur elle-même ; en effet, l'expérience montre que les passages du soleil dans le méridien d'un lieu donné ne succèdent pas avec exactement 24h d'intervalles et le midi vrai peut atteindre une avance de 16mn ou un retard de 14mn par rapport à 12h.

Selon l'époque de l'année, deux facteurs interviennent dans cette variation :

- De l'excentricité de l'ellipse qui décrit la course de la terre autour du soleil, il résulte, d'après la loi de Kepler (loi des aires) que la vitesse orbitale au périhélie (Décembre) est plus grande qu'à l'aphélie (Juin). La Terre a donc une variation saisonnière de sa vitesse orbitale qui affecte l'heure de passage du soleil au méridien.
- D'autre part, l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport au plan de l'écliptique introduit une oscillation supplémentaire de la durée du jour solaire, un jour de Novembre étant plus long d'une demi-minute qu'un jour de Mars.

Cet écart entre le Temps Solaire Moyen (TSM) et le Temps Solaire Vrai (TSV) est désigné sous le terme équation du temps (ET).

Elle s'exprime par la relation suivante, dans laquelle ET est donnée en minutes [1] :

$$ET = -0.0002 + 0.4197 \cos(B) - 7.3509 \sin(B) - 3.2265 \cos(2B) - 9.3912 \sin(2B) - 0.0903 \cos(3B) - 0.3361 \sin(3B) \quad (1.8)$$

Dans la quelle B (en degrés) vaut : $B = 360 \frac{n}{365}$

n : Le numéro du jour de l'année.

1.3 Mouvement apparent du soleil

Le mouvement que paraît faire le Soleil en une journée vu par un observateur situé sur Terre est appelé « Le mouvement apparent du Soleil ». En dehors des régions polaires, de l'Equateur et des tropiques :

- Le matin ; le Soleil est à l'**Est**, bas sur l'horizon, c'est le « lever du Soleil »
- A midi ; le Soleil est positionné au **Sud** ou au **Nord**, et il est au plus haut de son trajet apparent ;
- Le soir ; le Soleil apparaît à l'**Ouest**, bas sur l'horizon, c'est le « coucher du Soleil »

Le mouvement apparent du Soleil observé par un homme fixe en un point de latitude L au Nord de l'Equateur est schématisé sur la figure (1.5).

L'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu au midi solaire est égal à $(L-\delta)$.

La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12 entre le 21 mars et le 21 septembre [9].

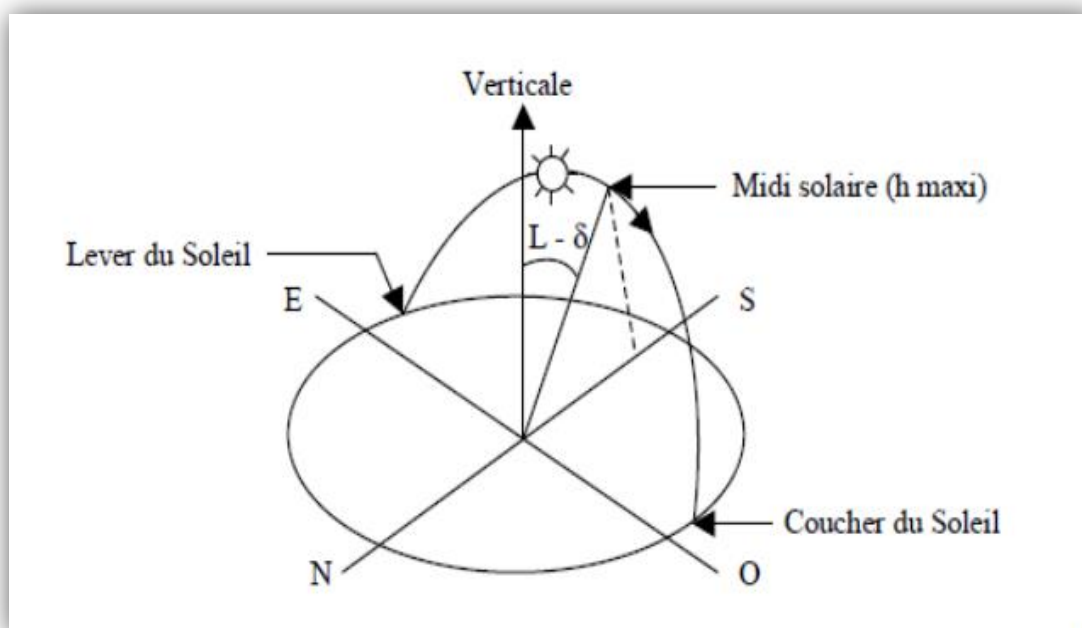


Figure (1.5) : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L

1.3.1 Hauteur du soleil

La position d'un astre dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies dans la sphère céleste. La sphère céleste est la sphère ayant pour centre la Terre et pour rayon la distance entre la Terre et l'astre étudié (le Soleil dans notre cas).

Ces coordonnées dépendent du lieu d'observation. Elles sont aussi appelées coordonnées locales.

1.3.2 La Hauteur angulaire (h)

La hauteur angulaire ou encore hauteur du soleil est l'angle formé par le plan horizontal du lieu d'observation et la direction de l'astre (voir Figure (1.5)). Il est donné par la relation trigonométrique

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \tag{1.9}$$

1.3.3 L'Azimut (a)

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. Il est compté positivement vers l'Ouest.

L'azimut est relié à l'angle horaire, la hauteur, la déclinaison par la relation [1].

$$\sin a = \sin \omega \cos \delta / \cos h \tag{1.10}$$

Et si l'on souhaite exprimer l'azimut indépendamment de la hauteur **h**, on peut utiliser la formule :

$$\tan a = \frac{\sin \omega}{\sin \varphi \cos \omega - \cos \varphi \tan \delta} \tag{1.11}$$

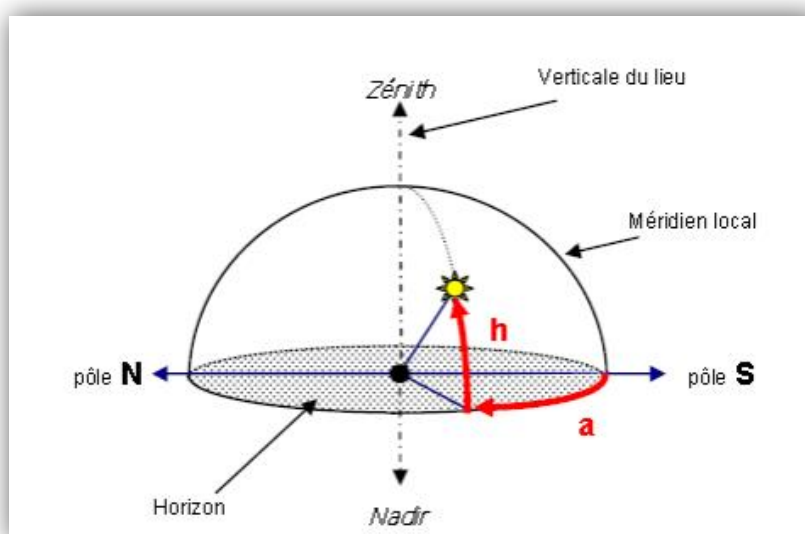


Figure (1.6) : Hauteur et azimut pour un observateur dans l'hémisphère Nord

1.3.4 La constante solaire

Le rayonnement solaire hors atmosphère est caractérisé par la constante solaire. Cette dernière est la puissance reçue par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires en dehors de l'atmosphère terrestre. Sa valeur approximative est égale à 1367 w/m^2 (la valeur adoptée pour notre étude). Suivant les variations de la distance terre soleil ($\pm 3,4\%$), elle varie cependant légèrement au cours de l'année. Elle passe par un maximum en janvier (environ 1423 w/m^2) et un minimum en juin (environ 1321 w/m^2) [9].

Ainsi, le calcul du flux du rayonnement solaire I reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires est assuré par la relation suivante :

$$I = I_{0n} * C(n) = I_{0n} * [1 + 0.033 * \cos(\frac{360}{365} * n)] \quad (1.12)$$

I_{0n} : La valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue (1367 w/m^2)

n : Le numéro du jour de l'année ($n = 1$ pour le 1^{er} janvier)

L'évolution annuelle est représentée par la figure (1.7) suivante :

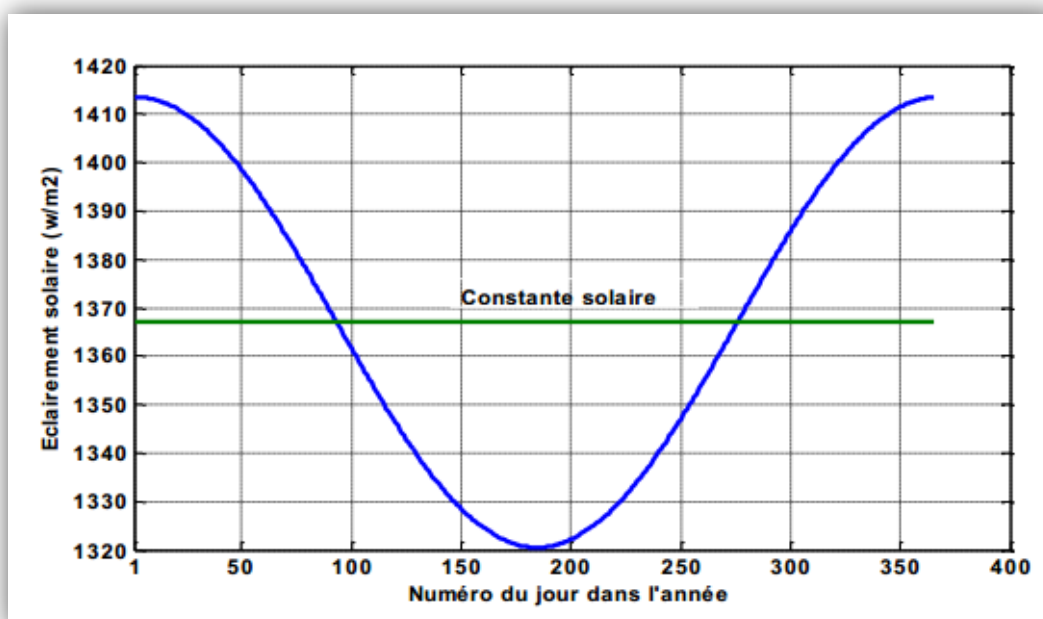


Figure (1.7) : Variation annuelle de la constante solaire

1.4 Conclusion

Pour l'estimation du rayonnement solaire il est nécessaire de bien préciser les paramètres géométriques du lieu et aussi des paramètres de position du capteur qui sont l'inclinaison et l'orientation. Le rayonnement dépend aussi des mouvements de la terre et le mouvement apparent du soleil dans le ciel qui est caractérisé par sa hauteur et sa déclinaison. La variation de ces paramètres influents sur le rayonnement incident sur la terre.

Chapitre 2 Potentiel solaire et instrumentations

2.1 Introduction

Les politiques exercées par les grandes puissances du monde en termes d'énergie depuis plus de trois décennies ont engendré des atteintes majeures vis-à-vis l'environnement de notre planète. En effet, le monde d'aujourd'hui est de plus en plus orienté vers une utilisation massive des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, comme solution alternative aux énergies conventionnelles. Cependant, l'énergie solaire aura sans doute une place plus importante dans le futur proche, car elle se développe un peu partout de nos jours. De plus, ce type d'énergie est propre, moins polluante et participe mieux à la protection de l'environnement.

Dans ce chapitre, nous aborderons des définitions détaillées relatives au rayonnement solaire, considéré comme source principale de l'énergie solaire.

2.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Ce dernier émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant entre 0.22 et 10 μm . La figure (2.1) représente la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre. L'énergie associée à ce rayonnement se décompose approximativement comme suit :

- ❖ 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$) ;
- ❖ 47 % dans la bande visible ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$) ;
- ❖ 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 kW/m² à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m². La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon **la latitude, l'heure et la saison** de l'année. Enfin, les nuages, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques contribuent à des variations horaires et quotidiennes, augmentant ou diminuant ainsi la quantité du rayonnement solaire et le rendent diffus [5].

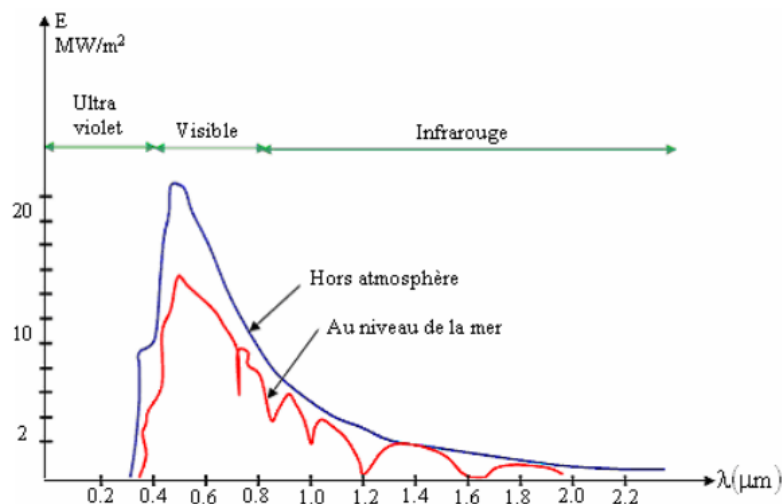


Figure (2.1) : Analyse spectrale du rayonnement solaire [5]

Une grande partie du rayonnement se situe dans le domaine de la lumière visible. Le reste se situe essentiellement dans le domaine des infrarouges et une faible partie dans les ultraviolets. En traversant l'atmosphère, une bonne partie du rayonnement est absorbée avant de parvenir à la surface de la terre comme l'indique la figure (2.2) suivante [4] :

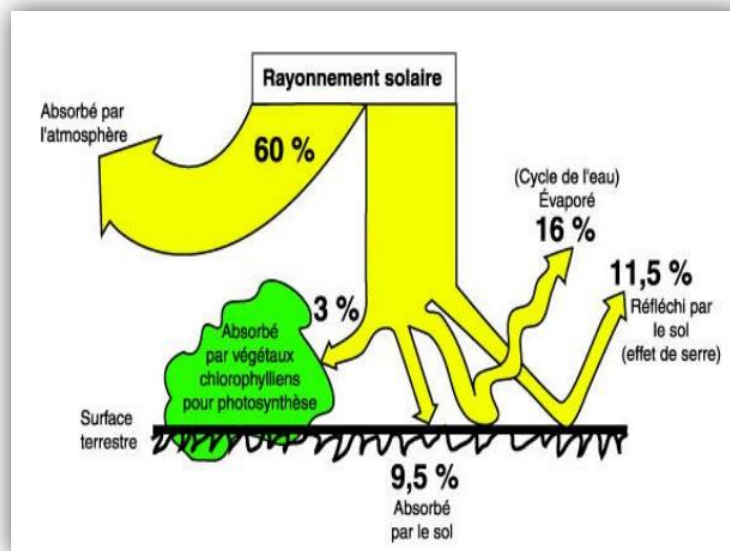


Figure (2.2) : rayonnement solaire

2.2.1 Composantes du rayonnement solaire

Trois composantes fondamentales du rayonnement solaire atteignant le sol sont intéressantes pour l'évaluation et la prédiction de l'énergie solaire disponible en un site donné :

a) Rayonnement direct à incidence normale (DNI) :

C'est le rayonnement qui provient directement du disque solaire avec un angle d'ouverture de 5.7° , sans qu'il soit atténué par la turbidité atmosphérique.

b) Rayonnement diffus sur un plan horizontal (Dh) :

C'est le rayonnement qui a été diffusé par les nuages, les aérosols et d'autres constituants atmosphériques reçu sur une surface horizontale.

c) Rayonnement global horizontal (Gh) :

Le rayonnement global c'est la somme algébrique du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Il est à noter que, le rayonnement direct doit être multiplié par le cosinus de l'angle zénithal solaire pour obtenir le rayonnement direct sur une surface horizontale.

En ajoutant une quatrième composantes pour une surface inclinée d'un angle d'inclinaison B par rapport à l'horizontal pour obtenir le rayonnement global sur une surface inclinée (G_i)

d) Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc...). Le tableau ci-dessous montre un exemple de surface et son coefficient d'albédo correspondant :

Type de surface	Albédo
Surface de lac	0.02 à 0.04
Forêt tropicale	0.05 à 0.15
Forêt de conifères	0.12
Herbe verte	0.25
Sable léger et sec	0.25 à 0.45
Sol sombre	0.05 à 0.15
Glace	0.3 à 0.4
Mer chaude	0.05
Mer froide	0.15
Neige tassée	0.6
Neige fraîche	0.85
Nuage	0.86
Verre à vitres	0.1

Tableau (2.1) : Coefficients d'albédo usuels [1]

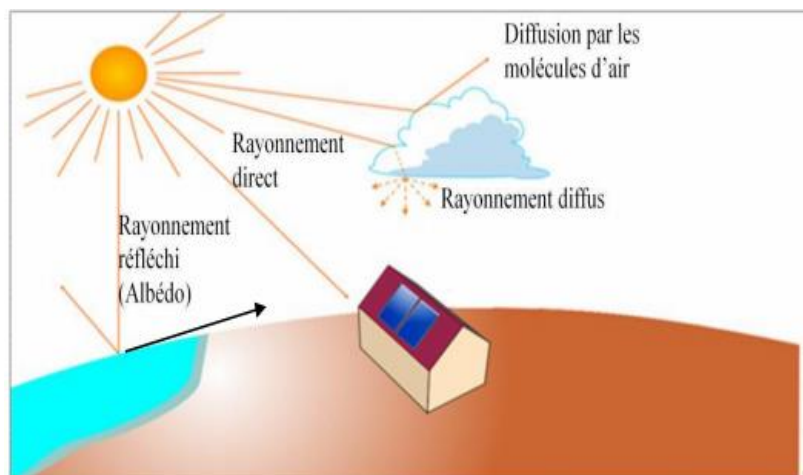


Figure (2.3) : Composantes de rayonnement solaire reçus au sol

2.3 Instrumentations radiométriques

La détection du rayonnement électromagnétique est principalement réalisée par conversion de l'énergie des photons en signaux électriques qui peuvent être par la suite mesurée par des techniques classiques.

La radiométrie est la science de la mesure du rayonnement solaire et l'instrument qui la dépend est nommé radiomètre. Chacune des composantes solaires définies dans la section précédente sont mesurées avec un dispositif spécifique ; les détails sur ces instruments seront présentés ci-après :

2.3.1 Le pyréliomètre

Le Pyréliomètre est un instrument qui mesure le rayonnement direct à incident normale D_n . Par conséquent, l'instrument doit être maintenu en permanence vers le disque solaire à l'aide d'un système de poursuite automatique à deux axes. La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à 5.7° (le diamètre apparent du soleil et de 0.5°). Le tube est fixé sur une monture équatoriale. On mesure la température du disque d'argent à intervalles réguliers en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil [1].



Figure (2.4) : Photo d'un pyrhéliomètre monté sur un tracker solaire (photo du labo gisement solaire de l'URAER)

2.3.2 Le pyranomètre

Le Pyranomètres est un instrument à large bande qui mesure le rayonnement solaire global G_h en provenance d'un angle solide de 2π , reçu sur une surface horizontale. Il se compose d'un disque blanc pour limiter l'angle d'acceptation à 180° et deux coupelles transparentes hémisphériques et concentriques, fabriqué en verre. Les deux coupelles a pour but de protéger l'instrument de la convection thermique, de risque météorologique (pluie, vent et poussière) et de limiter la sensibilité spectrale dans la gamme de longueur d'onde entre 0.29 et $2.8\mu\text{m}$. Une cartouche de gel de silice est placé à l'intérieur de la coupelle afin d'absorber l'humidité. La différence de température mesurée entre les deux anneaux par des thermocouples en contact thermique avec les surfaces intérieures des coupelles peut être enregistrée à raison d'une lecture instantanée sous forme d'une tension de sortie de l'ordre du mV.

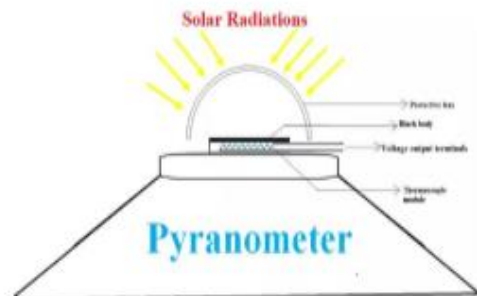


Figure (2.5) : Photo du pyranomètre

Le Pyranomètres peut également être utilisé pour mesurer la composante solaire diffuse G_d , à condition que la contribution du rayonnement directe est éliminé. Pour cela, une petite

boule d'ombrage peut être montée sur le système de poursuite solaire pour s'assurer que l'instrument est continuellement ombragé, comme est illustrée dans la figure suivante :



Figure (2.6) : Photo du pyranomètre mené d'une boule pare-soleil pour mesurer le diffus (photo du labo gisement solaire de l'URAER)

2.3.3 L'héliographe Campbell Stokes

Un autre paramètre important dans l'étude du rayonnement solaire est la durée d'insolation (ou d'ensoleillement). Elle est mesurable à l'aide d'un instrument appelé héliographe, et elle est définie comme la somme des intervalles de temps pour lesquels le rayonnement solaire direct dépasse le seuil de 120 W.m^{-2} . L'héliographe *Campbell-Stokes* est une sphère de verre qui sert à concentrer le rayonnement direct en un point, brûlant ainsi un papier spécial. En se déplaçant, le point brûlé décrit le mouvement apparent du soleil en traçant une courbe dont la longueur est proportionnelle à la durée d'insolation.

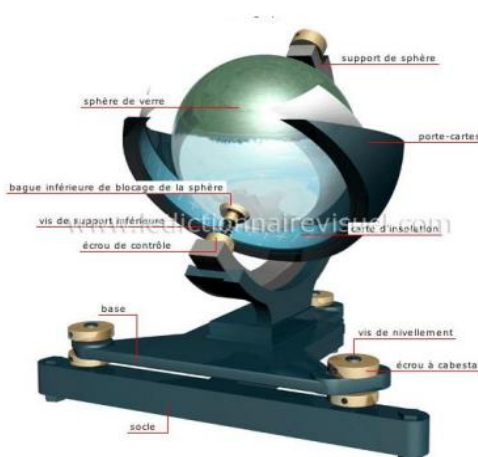


Figure (2.7) : Héliographe de Campbell [1].

2.4 Le potentiel solaire algérien

L’Algérie dispose d’un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d’insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L’énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l’ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays [21].

Le tableau (2.2) résume le potentiel solaire en Algérie [22].

Régions	Global horizontal (G _h) (kWh/m ²)	Global incliné (G _i) (kWh/m ²)	Durée moyenne d’ensoleillement (heures/an)	Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)
Région côtière	4.7	6.4	2650	1700
Hauts Plateaux	5.3	6.8	3000	1900
Sahara	7.7	7.2	3500	2650

Tableau (2.2) : Répartition du potentiel solaire algérien

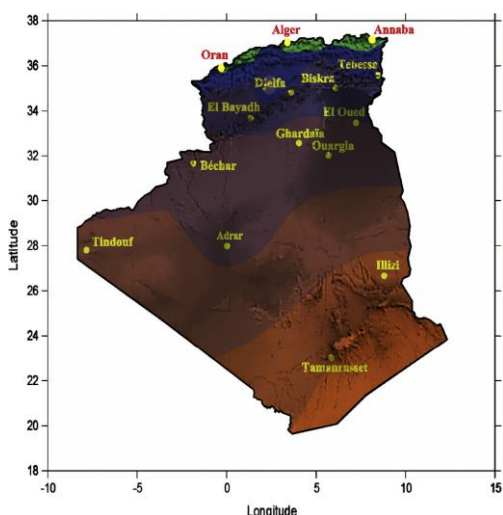


Figure (2.8) : rayonnement global reçu sur une surface horizontale [22]

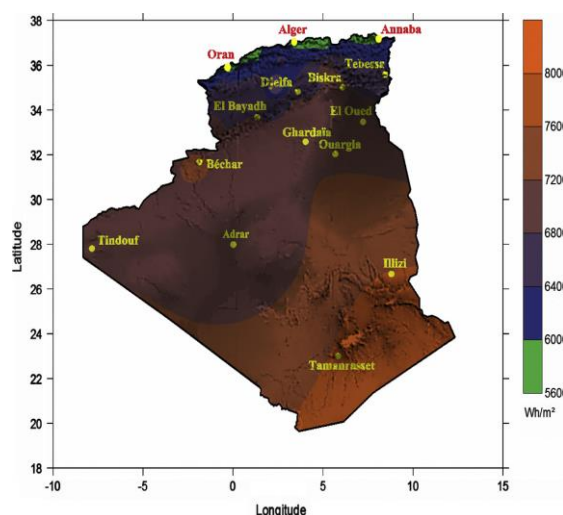


Figure (2.9) : rayonnement global reçu sur une surface inclinée à la latitude de lieu [22]

2.5 Cas d’étude

Il est très utile d’étudier et d’analyser le potentiel solaire des sites où les installations et les centrales solaires seront installées. En ce qui suit, nous analysons le potentiel solaire du site de Ghardaïa. Nous avons choisi cette l’étude de ce site sur la base de la disponibilité des données.

Donc, le site de Ghardaïa (Latitude : 32.6° N ; longitude : 3.8° E ; Altitude : 450 m), chef-lieu du M’zab, est un site désertique localisé au sud algérien à 600 Km de la capitale d’Alger. L’hiver est caractérisé par un froid intense dû au vent de neige soufflé des hauts

plateaux. La température élevée en été est relativement fraîche en hiver, avec une moyenne annuelle de 23 °C. La pluviométrie est de type saharien avec une moyenne annuelle de 67.3 mm ; les vitesses moyennes annuelles du vent sont de 3.1 à 4.4 m/s à 10 m du sol. D'une manière générale, le site de Ghardaïa est caractérisé par un ensoleillement exceptionnel où la moyenne annuelle de l'irradiation globale mesurée sur un plan horizontal dépasse les 6000 Wh/m² et la couverture solaire est de plus de 3000 heures/an.

2.6 Variation du rayonnement global

Nous avons représenté sur les graphes ci-dessus, la variation du rayonnement global au site de Ghardaïa, pour avoir une vision sur sa variation au cours de l'année. Nous avons travaillé sur les données de l'année 2020 ; ces données sont extraites des data logger permettant de visualiser et de stocker les valeurs des instruments radiométriques installés au niveau du laboratoire gisement solaire de l'URAER avant d'être traitées et analysées. Ensuite, les données de chaque composante solaire sont tracées pour chaque saison pour une journée avec un ciel clair et une autre journée perturbée (figure 2.10), afin d'observer le comportement des trois composantes radiométriques. D'après ces graphes, nous pouvons conclure les remarques suivantes :

- L'allure du rayonnement solaire prend la forme d'une courbe sous forme d'une cloche ; elle commence à grimper progressivement du lever du soleil pour atteindre son maximum à midi solaire avant de décroître jusqu'au coucher du soleil.
- Le rayonnement direct à incidence normal (DNI) est très fort pratiquement tout au long de l'année ; ses valeurs sont proches de 1000 W/m².
- Les valeurs de l'éclairement global varient selon les saisons de l'année ; elles atteignent le maximum le mois de juin.

La fréquence des journées à ciel clair est prépondérante ; elle représente 75% par rapport aux journées à ciel couvert ou perturbée.

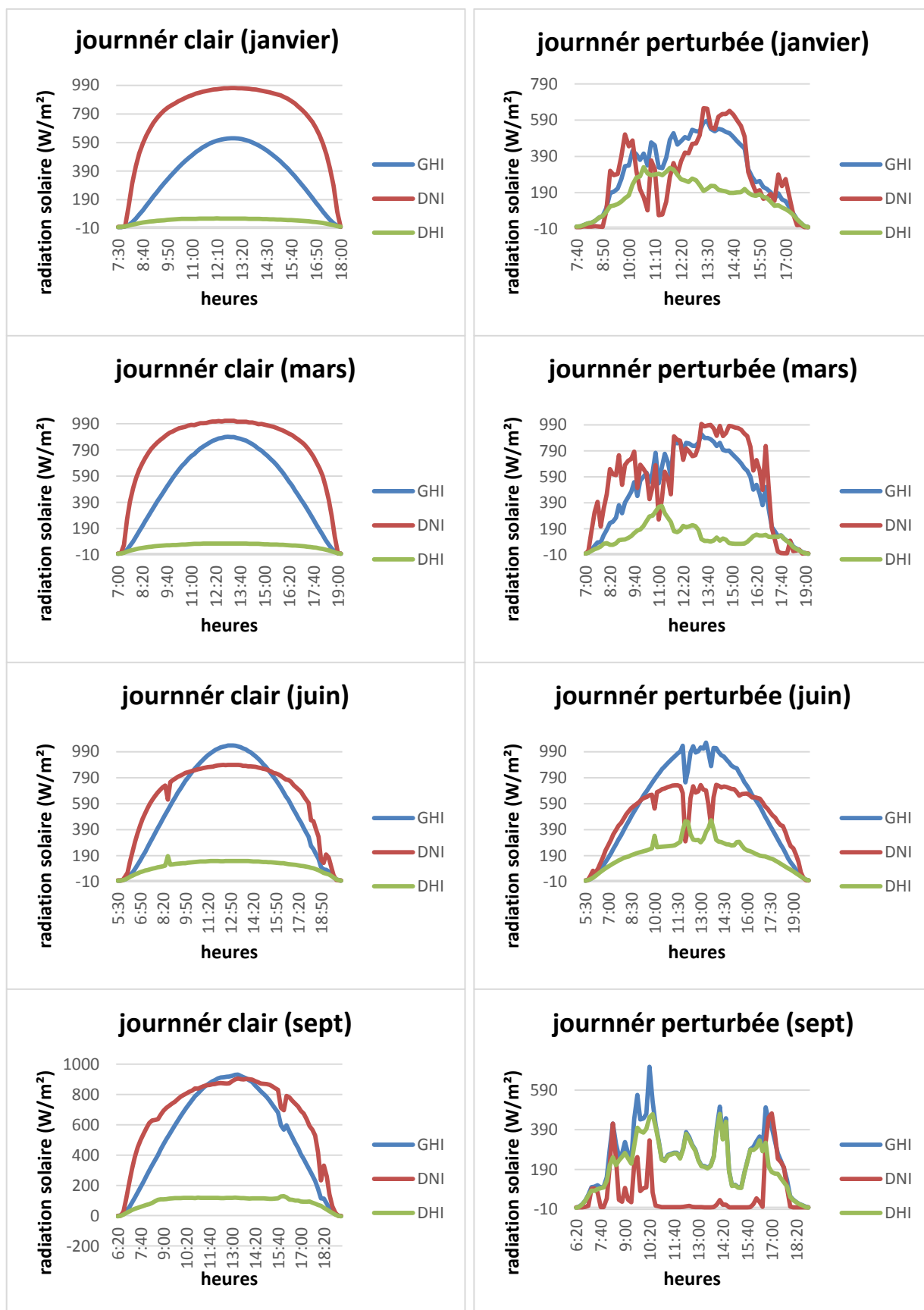


Figure (2.10) : Variation de l'éclairement global, direct et diffus pour des journées claires et perturbées (mois janvier, mars, juin, septembre)

2.7 Durée d'insolation

La durée d'insolation ou d'ensoleillement, c'est le temps pendant lequel le rayonnement solaire direct atteint le sol du lieu considéré (c'est-à-dire lorsque le soleil est visible et le rayonnement direct supérieur à un seuil d'environ 120 W/m^2).

Dans notre cas, la durée d'insolation est déterminée à travers les mesures du rayonnement solaire DNI, comptabilisant les seuils supérieurs à 120 W/m^2 . Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le DNI pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement. Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le Soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. Les distributions moyennes mensuelles de la durée d'insolation pour le site de Ghardaïa sont exposées dans la Figure (2.11). Ces distributions sont peu variables et importantes tout au long de l'année, avec un maximum de **12.8 heures** enregistré le mois de juillet et un minimum de **7.45 heures** le mois d'août.

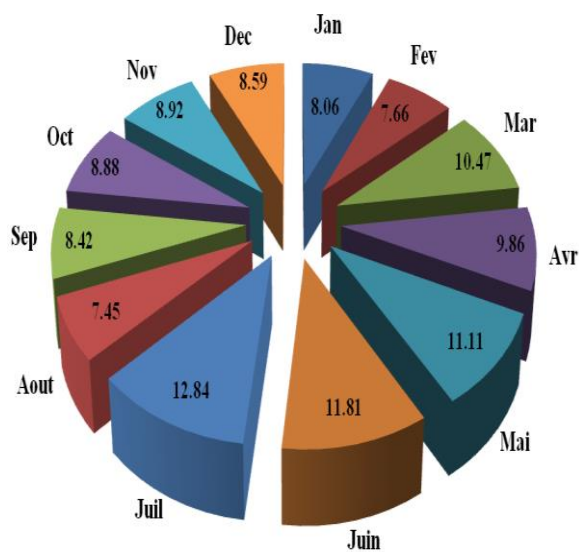


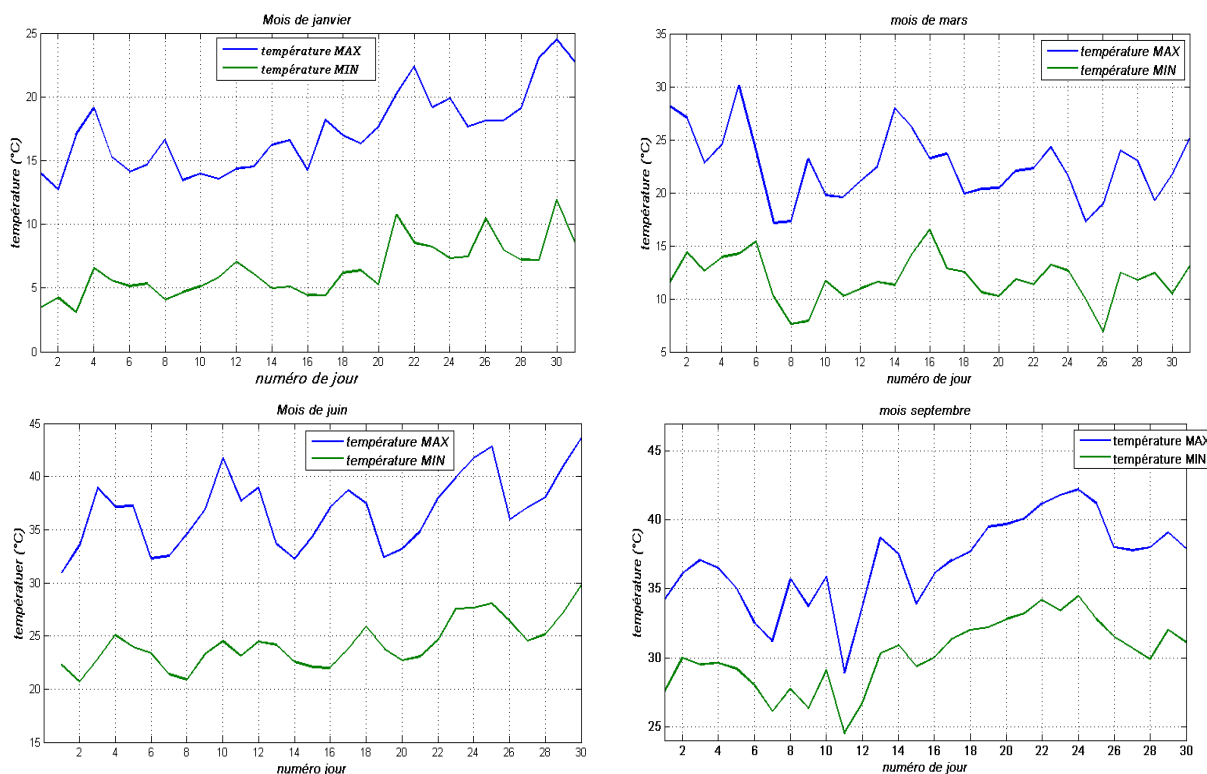
Figure (2.11) : durée d'insolation (en heure) moyen mensuelle enregistré au site de Ghardaïa

2.8 Evolution des paramètres météorologiques

Les paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité, la vitesse du vent, etc., jouent un rôle important dans la caractérisation et dans la qualification des sites pour des éventuelles applications solaires.

2.8.1 Température ambiant

La figure (2.12) illustre la variation des températures moyennes maximales mensuelles. Elles varient de 14.9 °C en janvier à 43.2°C en juillet (max 47 °C). La moyenne annuelle des maximums est de l'ordre de 28.5 °C. Les températures moyennes minimales mensuelles varient de 3.4 °C en janvier à 29.5 °C en Juillet. La moyenne annuelle des minimums est de l'ordre de 16.3 °C. Les températures moyennes mensuelles varient de 9 °C en janvier à 36.9 °C en juillet.



2.8.2 Humidité relative R_r

L'humidité relative de l'air, ou degré hygrométrique, correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur) à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions. Ce rapport changera si on change la température ou la pression bien que l'humidité absolue de l'air n'ait pas changée. Elle est mesurée à l'aide d'un hygromètre.

L'humidité relative R_r est donc liée à la température d'air et à la pression atmosphérique. Le taux hygrométrique de l'air oscille, en été entre 3.4 % et 32 % dans la région centrale, et entre 52.8 % et 81.4 % dans la région nord. En janvier, il oscille entre 32.8 % et 76.5 % dans la région centrale, et entre 61.6 % et 93.4 % dans la région nord.

L'humidité relative est généralement minimale vers 15 heures et maximale vers 6 heures, au lever du soleil. Les courbes des humidités moyennes relatives et des pressions atmosphériques et leurs principales variations sont présentées dans les figures (2.13) et (2.14) pour des journées représentatives de chaque saison.

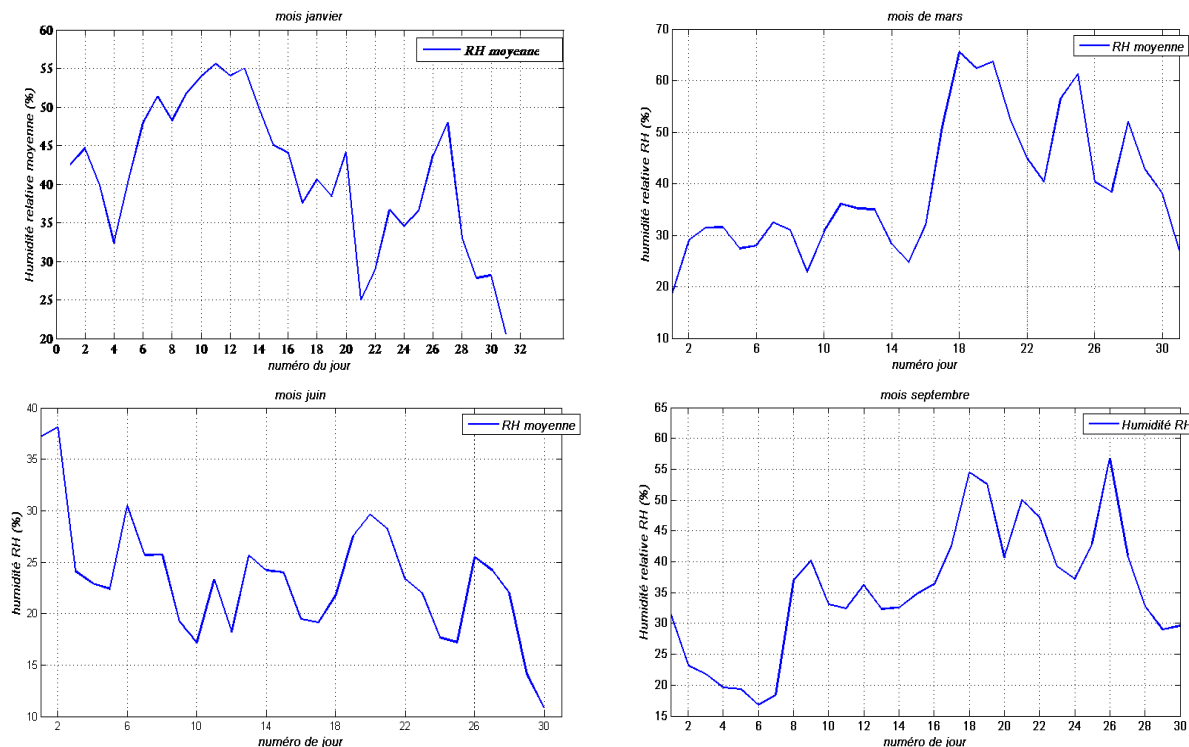


Figure (2.13) : humidité relative moyenne (01-03-06-09/2020)

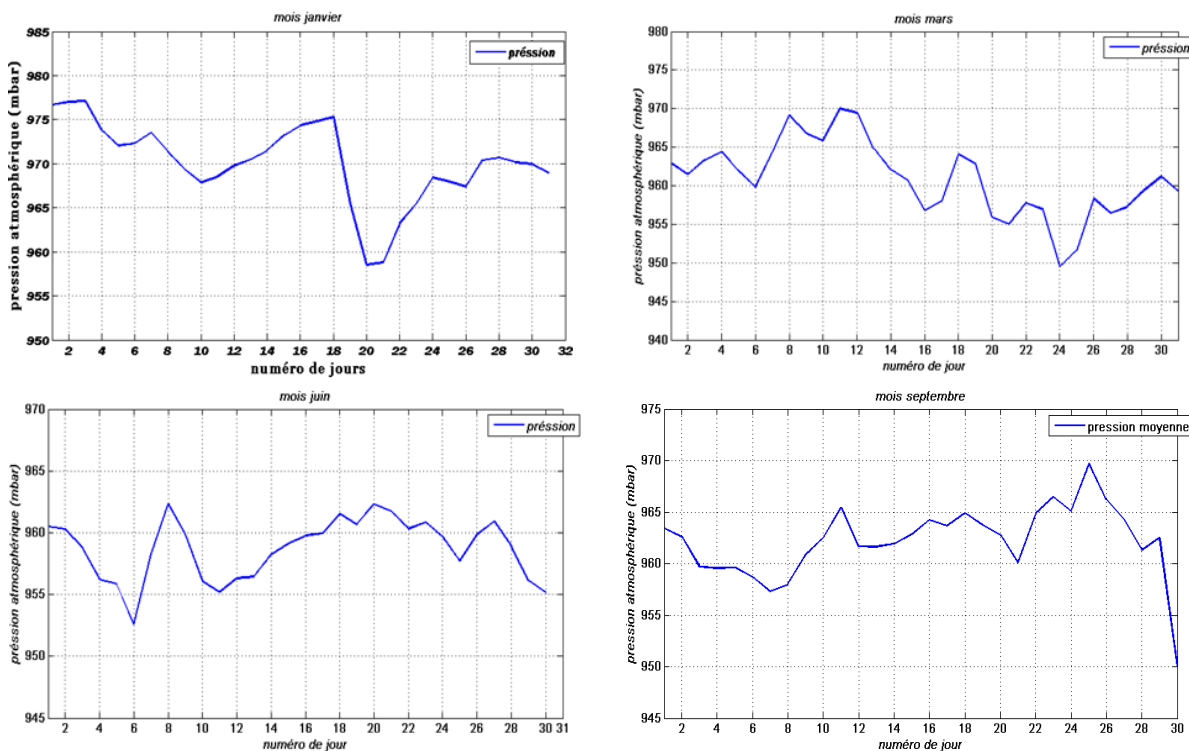


Figure (2.14) : pressions atmosphérique moyenne de site Ghardaïa mois (01-03-06-09/2020)

2.9 Conclusion

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se compose du rayonnement direct provenant directement du soleil et du rayonnement diffus, le rayonnement global est la résultante de la somme du direct et du diffus. Ces composantes peuvent être mesurées directement par différents instruments de mesure. Le potentiel algérien est important qui peut être exploité dans la conversion de l'énergie solaire en une autre forme d'énergie.

Chapitre 3 Modèles ciel-claire

3.1 Introduction

La modélisation du rayonnement solaire incident au sol est une tâche complexe, en raison de la variété des processus atmosphériques impliqués et de leurs variabilités spatio-temporelles. C'est notamment le cas de l'impact des nuages, qui peuvent modifier considérablement l'irradiance transmise sur des courtes ou longues périodes. Les nuages réfléchissent et diffusent certains rayons solaires dans l'espace et absorbent le reste.

Les systèmes de conversion de l'énergie solaire notamment les systèmes photovoltaïques sont dépendants du rayonnement solaire global (GHI) reçu au sol. En effet, le rendement de ces systèmes est significativement lié aux changements des grandeurs de GHI qui sont également sensibles aux processus d'atténuation. En conséquence, les approches de prévision du rayonnement global sont basées sur l'évaluation de la transmittance via la prédiction d'un facteur d'atténuation appelé : indice de ciel-clair (CSI). Il est défini par le rapport entre le rayonnement global mesuré sur une surface horizontale (GHI) et le rayonnement global estimé sous les conditions d'un ciel clair (GHI_c) :

$$CSI = \frac{GHI}{GHI_c} \quad (3.1)$$

Cependant, si une incertitude significative est trouvée dans l'estimation de GHI_c , cela implique de grosses erreurs dans les prévisions de GHI, en particulier lorsque l'indice CSI a des faibles valeurs. D'où l'importance d'une estimation précise du rayonnement global par ciel-claire (GHI_c).

3.2 Modèles ciel-claire

Divers modèles de ciel clair peuvent être trouvés dans la littérature analysant leurs performances par rapport aux données au sol. Chaque modèle a ses propres entrées qui les différencient des autres. Les modèles choisis dans cette campagne de validation prennent en compte les paramètres de base qui décrivent l'état de l'atmosphère tels que la profondeur optique des aérosols, la vapeur d'eau, la pression atmosphérique, etc.

3.2.1 Modèle Haurwitz

Ce modèle [10] est une simple formulation qui ne nécessite que l'angle zénithal θ_z du site où le rayonnement global est estimé. En effet, ce modèle s'est avéré avoir les meilleures performances parmi la classe des modèles qui ne requièrent que l'angle zénithal (θ_z).

L'estimation du rayonnement global par le modèle d'Haurwitz est donnée par la relation suivante :

$$GHI_c = 1098 \cos \theta_z e^{\frac{-0.057}{\cos \theta_z}} \tag{3.2}$$

3.2.2 Modèle Hottel_Liu &Jordan :

Ce modèle est une combinaison entre le modèle de Hottel [11] qui estime la transmission du rayonnement direct sous un ciel clair et du modèle de Liu & Jordan [12] évaluant la transmission du rayonnement diffus.

La composante normale directe de ce modèle est donnée par la formule suivante :

$$DNI = I_0 \varepsilon \tau_{DNI} \tag{3.3}$$

La transmission atmosphérique pour le rayonnement direct τ_{DNI} , qui dépend de l'angle zénithal, est illustrée sous la forme :

$$\tau_{DNI} = A_0 + A_1 \exp(-A_2 / \cos \theta_z) \tag{3.4}$$

Les constantes A_0 , A_1 et A_2 pour une atmosphère standard avec 23 km de visibilité sont calculées à partir des paramètres a_0 , a_1 et a_2 , qui peuvent être évaluées pour des altitudes inférieures à 2,5 km, comme suit :

$$A_0 = (0,4237 - 0,00821(6 - Z^2))a_0 \tag{3.5}$$

$$A_1 = (0,5055 - 0,00595 (6,5 - Z^2)) a_1 \tag{3.6}$$

$$A_2 = (0,2711 + 0,01858 (2,5 - Z^2)) a_2 \tag{3.7}$$

Les constantes a_0 , a_1 , a_2 , propres à chaque type de climat, sont reportées dans le suivant :

Type de climat	a_0	a_1	a_2
Tropical	0.95	0.98	1.02
Estival latitude moyenne	0.97	0.99	1.02
Subarctique	0.99	0.99	1.01
Hivernal latitude moyenne	1.03	1.01	1.00

Tableau (3.1) : constantes a_0 , a_1 , a_2 chaque type de climat

La composante diffuse est alors donnée par :

$$DHI = I_0 \varepsilon \tau_{DHI} \tag{3.8}$$

$$\tau_{DHI} = 0.271 - 0.294 \tau_{DNI} \tag{3.9}$$

En conséquence, le rayonnement global est donné par l'expression suivante :

$$GHI_c = DNI \cdot \cos \theta_z + DHI \tag{3.10}$$

3.2.3 Modèle de Capdérrou (Modèle solaire Algérien)

Ce modèle de Michel Capdérrou [13] est basé sur le modèle probabiliste de Perrin-Brichambaut qu'utilise la turbidité atmosphérique pour estimer les trois composantes du rayonnement solaire. Ainsi, les irradiances directes et diffuses par ciel clair sont exprimées en fonction des facteurs de turbidité correspondant à la diffusion et à l'absorption

atmosphériques. Le rayonnement direct à incidence normale (DNI) est exprimé par relation suivante :

$$DNI = I_0 \varepsilon \exp(-TL_c m_{AC} \delta_R) \quad (3.11)$$

Où : TL_c et m_{AC} sont respectivement, le facteur de turbidité atmosphérique de Linke et la masse d'air atmosphérique donnée par Capderou par :

$$TL_c = T_0 + T_1 + T_2 \quad (3.12)$$

T_0 est la turbidité atmosphérique due à l'absorption de vapeur d'eau donnée par :

$$T_0 = 2,4 - 0,9 \sin\phi + 0,1A_{he} (2 + \sin\phi) - 0,2 Z - (1,22 + 0,14A_{he})(1 - \cos \theta_z) \quad (3.13)$$

T_1 est la turbidité atmosphérique due à la diffusion moléculaire exprimé par :

$$T_1 = (0,89)^Z \quad (3.14)$$

T_2 est la turbidité atmosphérique relative à la diffusion des aérosols :

$$T_2 = (0,9 + 0,4A_{he})(0,63)^Z \quad (3.15)$$

$$\text{Où : } A_{he} = \sin\left(\frac{360}{365} (D - 121)\right) \quad (3.16)$$

D est le numéro du jour dans l'année.

La masse d'air atmosphérique est exprimé par la relation suivante :

$$m_{AC} = \frac{1}{\cos \theta_z + 9,4 \times 10^{-4} (\cos \theta_z + 0,0678)^{-1,253}} \quad (3.17)$$

La composante diffuse du rayonnement solaire est donnée par :

$$DHI = I_0 \varepsilon \exp(-1 + 1,06 \log(\cos \theta_z) + a - \sqrt{b^2 + a^2}) \quad (3.18)$$

Où : $a = 1,1$ et b est exprimé par l'équation suivante :

$$b = \log(T_1 + T_2) - 2,8 + 1,02 (1 - \cos \theta_z)^2 \quad (3.19)$$

Par conséquent, le rayonnement global estimé par le modèle de Capdérrou est illustré par la formule suivante :

$$GHI_c = DNI \cdot \cos \theta_z + DHI \quad (3.20)$$

3.2.4 Modèle de Solis

Le modèle de Solis est une approximation de calcul du transfert radiatif. Il est basé sur la relation de Lambert-Beer illustrée par la formulation suivante :

$$DNI = I_{0n} \cdot \exp(-AM \cdot \tau) \quad (3.21)$$

Où : DNI est l'irradiance directe atteignant le sol, AM est la masse d'air optique et τ est la profondeur optique atmosphérique totale. Cette relation est valable pour un rayonnement monochromatique (relative à une seule longueur d'onde). Pour le cas réel (polychromatique), ce modèle est modifié par l'ajout d'une constante d'ajustement (b) est donnée par la relation suivante :

$$DNI = I_{on} \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\cos^b(\theta_z)}\right) \quad (3.22)$$

D'autres chercheurs comme Mueller et al. [14] and Ineichen et al. [15] ont prouvé que ce modèle peut être employé pour l'estimation du rayonnement global. Cette estimation est donnée par :

$$GHI_c = I'_{on} \cdot \exp\left(-\frac{\tau_g}{\cos^g(\theta_z)}\right) \cdot \cos(\theta_z) \quad (3.23)$$

$$I'_{on} = I_{on} \cdot (0,12 * w^{0,56} * \tau^2 + 0,97 * w^{0,032} * \tau + 1,08 * w^{0,0051} + 0,017 * \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)) \quad (3.24)$$

Où : w est la vapeur d'eau, p est la pression du site considéré et p_0 est la pression au niveau de la mer.

3.2.5 Modèle ESRA

Le modèle ESRA (en anglais : European Solar Radiation Atlas) a été développé dans le cadre de l'atlas européen du rayonnement solaire. Ce modèle est décrit et analysé avec pour objectif principal d'être utilisé pour estimer le rayonnement solaire au niveau du sol à partir d'images satellites avec la méthode Heliosat-2. Il est basé essentiellement sur le trouble atmosphérique de Linke (TL) pour une masse d'air égale à 2 ($AM = 2$) et sur l'épaisseur optique de Rayleigh (δ_R). Les composantes directes et diffuses sont estimées comme suit :

$$DNI = I_{sc} \times \exp(-0,8662 \times T_L \times AM \times \delta_R) \quad (3.25)$$

$$DHI = I_{sc} \times T_{Rd}(T_L) \times F_d(\theta_z, T_L) \quad (3.26)$$

Où : T_{Rd} est la fonction de transmission diffuse au zénith (lorsque la hauteur du soleil est égale à 90°), modulé par un facteur angulaire F_d et dont les paramètres ($A0$, $A1$ et $A2$) sont estimés à partir des équations suivantes :

$$T_{Rd} = -1,5843 \times 10^{-2} + 3,0543 \cdot 10^{-2} \times T_L + 3,797 \times 10^{-4} \times T_L^2 \quad (3.27)$$

$$F_d = A0 + A1 \times \sin h + A2 \times \sin^2 h \quad (3.28)$$

$$A0 = 2,6463 \times 10^{-1} - 6,1581 \times 10^{-2} \times T_L + 3,1408 \times 10^{-3} \times T_L^2 \quad (3.29)$$

$$A1 = 2,0402 + 1,8945 \times 10^{-2} \times T_L - 1,1161 \times 10^{-2} \times T_L^2 \quad (3.30)$$

$$A2 = -1,305 + 3,9231 \times 10^{-2} \times T_L + 8,5079 \times 10^{-3} \times T_L^2 \quad (3.31)$$

L'éclairement énergétique global est donc la somme des deux composantes :

$$GHI_c = DNI \cdot \cos\theta_z + DHI \quad (3.32)$$

Les détails concernant ce modèle sont donnés par Rigollier et al. [16].

3.2.6 Modèle Ineichen-Perez

Ce modèle [15] contient un ajustement empirique du coefficient d'altitude de Kasten et inclut la turbidité atmosphérique via le coefficient de turbidité de Linke. A l'origine, ce modèle a été développé sur la base de la première approche d'Ineichen où 12 jours de ciel clair à Genève ont été utilisés à cette fin (une valeur de turbidité Linke fixe égale à 3 a été utilisée et un modèle de faisceau de ciel clair a été développé baser uniquement sur l'air valeur massique).

$$GHI_c = a_1 I_{on} \cos\theta_z \exp(-a_2 AM (f_{h1} + f_{h2}(T_L - 1))) \tag{3.33}$$

$$a_1 = 5,09 \times 10^{-5} \cdot Z + 0,868 \tag{3.34}$$

$$a_2 = 3,92 \times 10^{-5} \cdot Z + 0,0387 \tag{3.35}$$

$$f_{h1} = \exp\left(-\frac{Z}{8000}\right) \tag{3.36}$$

$$f_{h2} = \exp\left(-\frac{Z}{1250}\right) \tag{3.37}$$

Les paramètres d'entrés pour chaque modèle sont récapitulés au tableau suivant :

Modèle	θ_z	T_L	W	P	T
Haurwitz					
ESRA					
Ineichen-Perez					
Solis					
Capdérrou					
Hottel_Liu & Jordan					

Tableau (3.2) : Paramètres d'entrés pour chaque modèle

3.2.7 Détermination des paramètres atmosphériques

Les paramètres atmosphériques considérés comme inputs aux modèles étudiés sont extraits du réseau *AERONET* (AErosol RObotic NETwork) [17]. Il s'agit d'un réseau de stations de surveillance et de mesure en continue qui fournissent une banque de données de paramètres atmosphériques tel que la profondeur optique des aérosols, l'épaisseur de la vapeur d'eau, etc., à différentes longueurs d'onde plusieurs fois par jour. Les stations de mesure d'*AERONET* sont réparties à travers le monde entier mais sa densité n'est pas homogène, notamment dans les zones désertiques, comme est illustré dans la Figure (3.1).

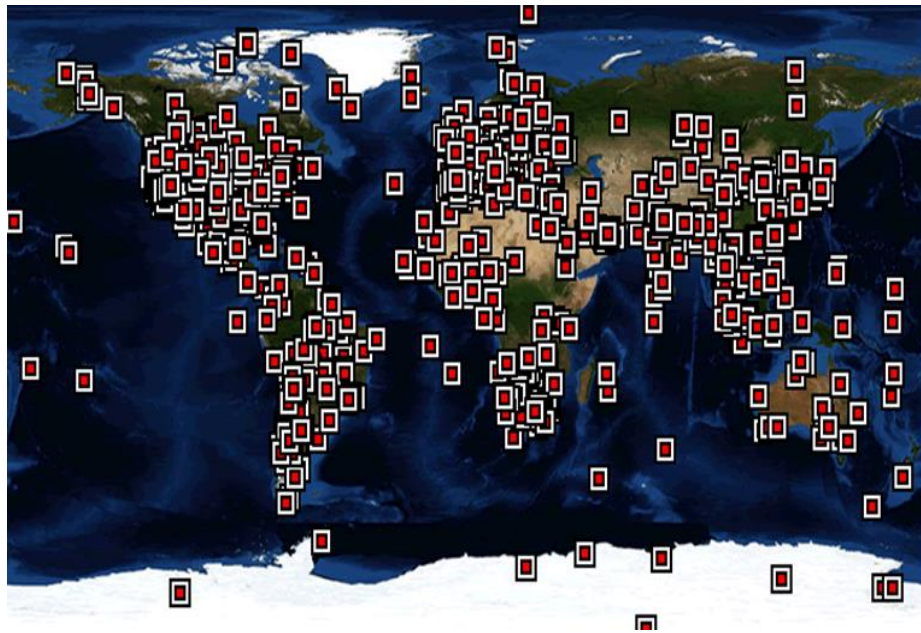


Figure (3.1) : Réseau AERONET

Parfois, nous devons faire des interpolations lorsque le site considéré n'est pas disponible. Néanmoins, plusieurs modèles de ciel-clair qui nécessitent des paramètres atmosphériques comme entrées ont été validés par les données *AERONET*.

En ce qui concerne le trouble de Linke (*TL*), ses valeurs ont été extraites à partir du service SoDa (Solar Radiation Data) [18] qui fournit des données relatives au rayonnement solaire reçu au sol, Figure (3.2). Ces données sont disponibles en libre accès depuis 2011 et comprend 21 années de mesures (1985 à 2005) sur l'Europe, l'Afrique et l'océan Atlantique.

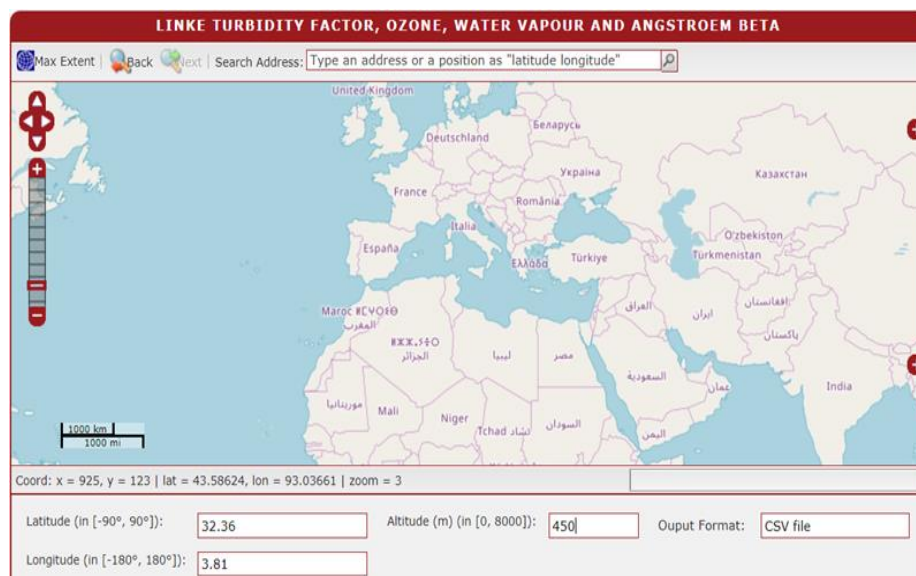


Figure (3.2) : Réseau SoDa

3.3 Performance et évaluation des modèles

Il existe de nombreux outils statistiques usités dans la littérature pour vérifier si un modèle est performant ou non. La précision des modèles sont jugées par des indicateurs statistiques tels que le coefficient de détermination (R^2), l'erreur de biais moyenne (MBE), la racine de l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$), l'erreur moyenne absolue (MAE), etc. Ces tests sont généralement appliqués dans la comparaison des modèles de rayonnement solaire. Ces outils sont exposés dans ce qui suit :

3.3.1 Racine de l'erreur moyenne quadratique ($RMSE$)

La racine de l'erreur moyenne quadratique fournit des informations sur la performance des modèles, en permettant la comparaison des écarts réels entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées. Plus la valeur du $RMSE$ est faible, plus la performance du modèle est meilleure. Cette erreur est donnée par la relation suivante :

$$RMSE = \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2]^{1/2} \quad (3.37)$$

La valeur normalisée de cette erreur est donnée par :

$$nRMSE = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - Y_i}{\bar{Y}_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.38)$$

3.3.2 Erreur de Biais Moyen (MBE)

L'erreur de biais moyen $L'MBE$ est définie comme étant la moyenne arithmétique des erreurs. Si sa valeur est égale à zéro, cela ne signifie pas que le modèle donne des estimations sans erreur. Donc, le MBE fournit une mesure de la tendance générale d'un estimateur donné, c'est-à-dire une surestimation (valeurs positives) ou une sous-estimation (valeurs négatives). Cependant, plus les valeurs du MBE sont petites, plus on a un meilleur résultat du modèle. Le MBE est donné par l'équation suivante :

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i) \quad (3.39)$$

La valeur normalisée de cette erreur est donnée par :

$$nMBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - Y_i}{\bar{Y}_i} \right) \quad (3.40)$$

3.3.3 Coefficient de détermination (R^2)

Le coefficient de détermination est une statistique qui donne des informations sur la qualité d'ajustement d'un modèle. En régression, le coefficient R^2 est une mesure statistique dans laquelle la droite de régression se rapproche des points de données réels. Un $R^2 = 1$ indique que la droite de régression correspond parfaitement aux données, contrairement, lorsque $R^2 = 0$ cela signifie qu'aucune corrélation n'est possible entre le modèle et les données réels. Il est défini par la relation suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (3.41)$$

Il est à noter que, y_i est les valeurs mesurées, Y_i représente les valeurs estimées et n est le nombre total de mesures.

Chapitre 4 Validation des modèles et discussion des résultats

4.1 Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre, les résultats obtenus de la validation de six modèles choisis pour l'estimation du rayonnement global sous un ciel clair. La confrontation de valeurs obtenues avec les mesures au sol permettra de sélectionner le ou les modèles le plus performants. Une comparaison de nos résultats avec les résultats existants dans la bibliographie aura lieu par la suite.

4.2 Résultats obtenus

Avant d'étudier le rayonnement solaire sous un ciel réel, la modélisation du rayonnement solaire dans des conditions de ciel clair est très importante. Cela peut fournir une estimation de l'énergie solaire maximale disponible pour la conversion pour une journée donnée.

Pour comparer les modèles ainsi validés et de déterminer le modèle le plus performant, la comparaison aux mesures au sol donc est primordiale. Pour cela, il est important de déterminer les périodes où le ciel est purement clair. Donc, nous avons sélectionné visuellement les journées où le ciel est totalement dégagé à travers l'examen des mesures des trois composantes radiométriques : l'éclairement diffus (DHI), l'éclairement direct normal (DNI) et l'éclairement global (GHI). En conséquence, et dans le cas d'une journée ciel-clair, la quantité énergétique de l'éclairement diffus est très faible ce qui signifie que les éclairements DNI et GHI sont très fortes. (Les journées non claires sont automatiquement éliminées). Nous avons travaillé sur une année de mesure pour sélectionner les journées claires (du 1^{er} janvier 2015 au 31 décembre 2015), ce qui en résulte 136 jours de ciel-clair (19584 échantillons inspectés) avec un taux de 37.26% de jours pour l'ensemble des données inspectées. La figure (4.1) montre un exemple de détection visuelle d'une journée ciel clair.

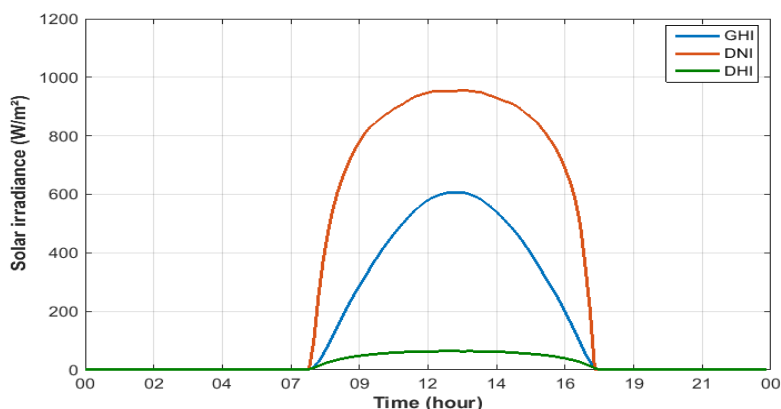


Figure (4.1) : Exemple de détection visuelle d'une journée ciel-clair

La figure (4.2) illustre l'organigramme général de différentes étapes adoptées pour estimer le rayonnement global sous un ciel clair (GHI_c).

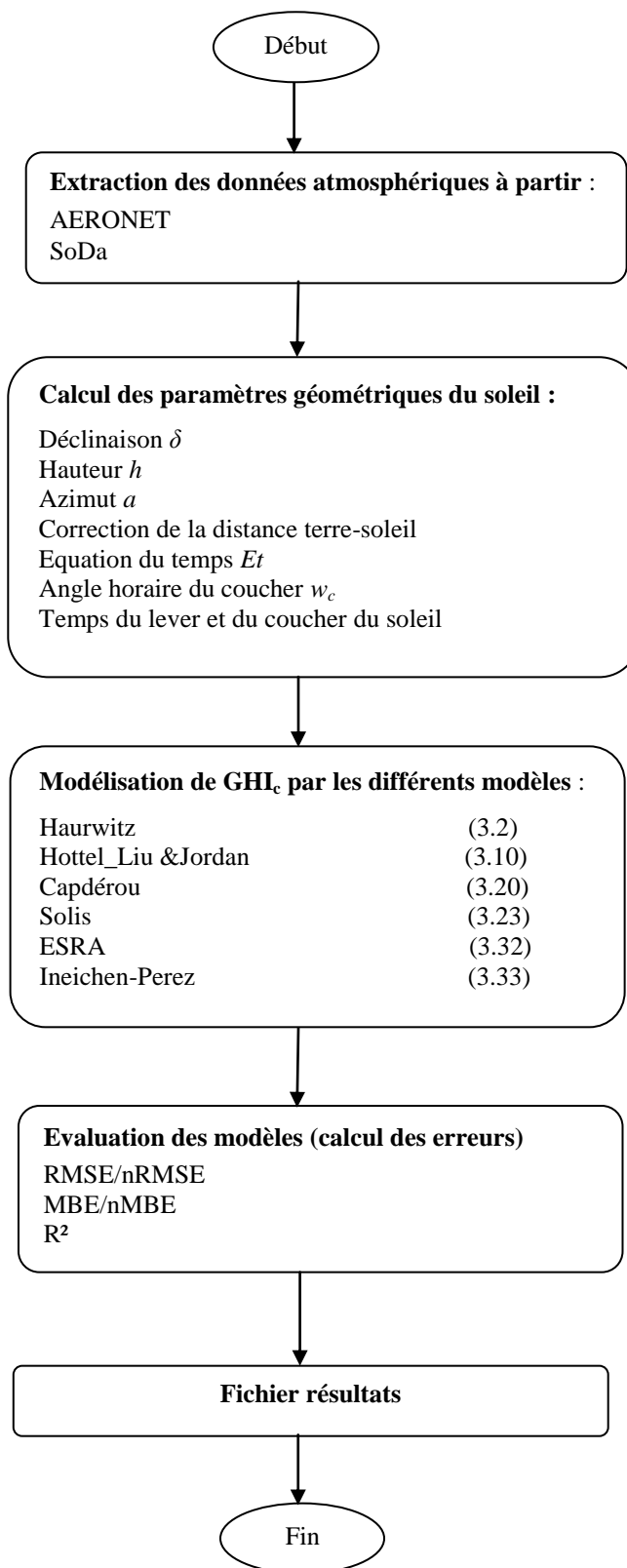


Figure (4.2) : Organigramme général des étapes d'estimation de GHI_c

Un programme écrit sous Matlab2014 permettant d'estimer GHI_c sur un plan horizontal et de sélectionner le meilleur modèle à travers l'exécution d'un test statistique.

Les résultats des modèles ainsi validés sont comparés aux données mesurées au sol. Ces résultats sont présentés sous forme des diagrammes de dispersion de nuages de points (en anglais : Scatter plot) comme est illustré dans la figure (4.3). Ces diagrammes de dispersion représentent un outil de contrôle et d'aide à la décision pour vérifier l'existence de corrélation ou d'une relation entre les variables de nature quantitative. La dispersion autour de la droite d'identité est forte dans le cas des modèles Hottel_Liu & Jordan, ESRA et Ineichen-Perez avec un écart ou un biais négatif. Pour le reste des trois modèles (Haurwitz, Capdéro et Solis) la dispersion du nuage de points autour de la droite d'identité est moins forte voire faible.

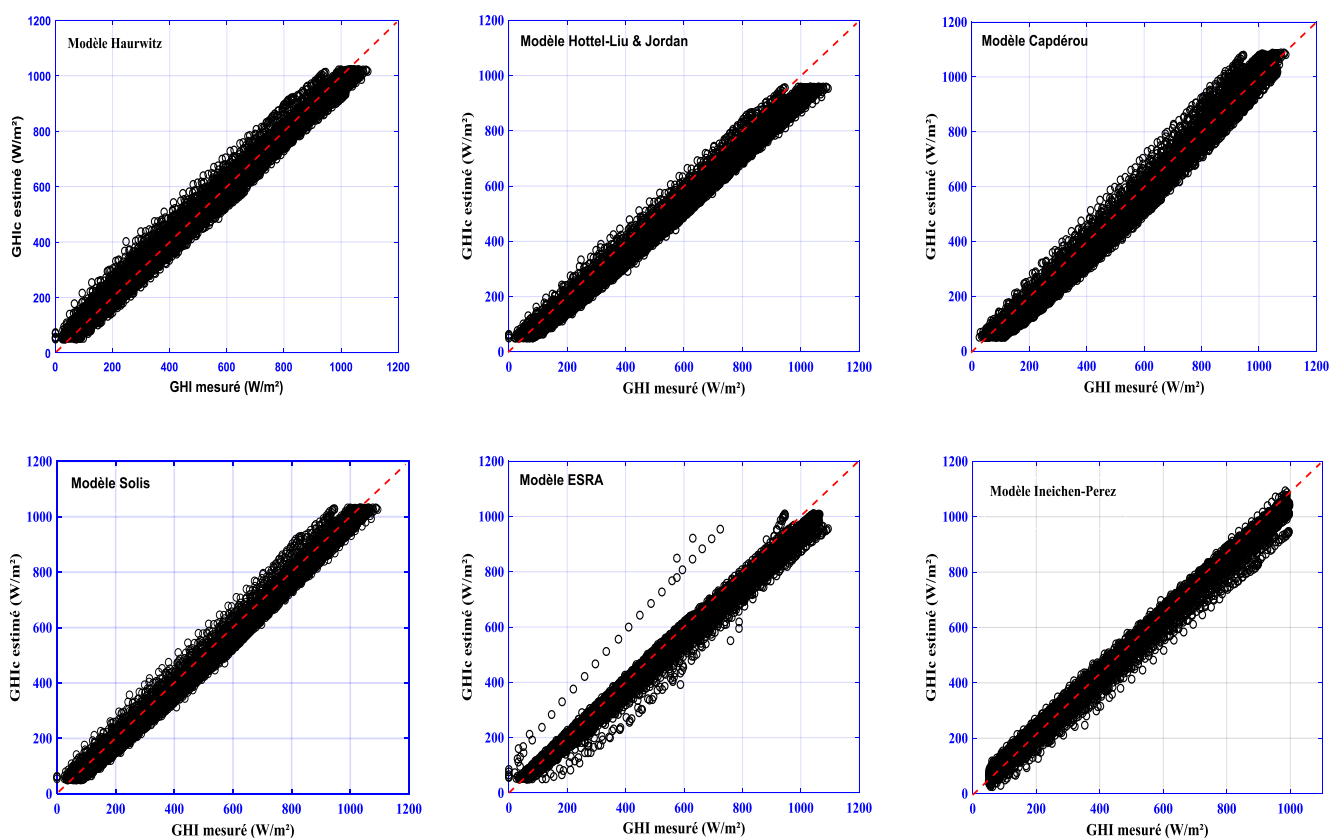


Figure (4.3) : Diagramme de nuage de points entre les modèles choisis et les mesures au sol

Afin d'évaluer les résultats obtenus, nous avons calculé les différents indicateurs statistiques ($RMSE$, MBE , R^2) dans le but de déterminer le modèle le plus performant. Le $RMSE$ fournit des informations sur les performances à court terme et représente une mesure de la variation des valeurs estimées autour des données mesurées. Le MBE donne une indication sur l'écart moyen des valeurs estimées à partir des données mesurées

correspondantes et peut fournir des informations sur la performance à long terme des modèles. Un *MBE* positive indique une surestimation des valeurs prédites et vice versa. Alors, le coefficient de détermination R^2 fournit une indication sur le rapprochement des valeurs estimées autour des valeurs réelles mesurées. Le tableau (4.1) résume le test statistique qui permet d'examiner les précisions des modèles testés.

	Indicateurs statistiques				
	RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	MBE (W/m ²)	nMBE (%)	R ²
Haurwitz	36.92	6.35	0.0096	1.65 10 ⁻⁵	0.9851
Hottel_Liu & Jordan	67.00	12.82	-0.107	-2.05 10 ⁻⁴	0.9889
Capdéro	47.85	8.24	0.0403	6.94 10 ⁻⁵	0.9820
Solis	36.54	6.29	0.0334	5.75 10⁻⁵	0.9910
ESRA	50.53	8.70	0.0538	9.26 10 ⁻⁵	0.9831
Ineichen-Perez	43.63	7.51	0.0536	9.24 10 ⁻⁵	0.9885

Tableau (4.1) : Performance des modèles ciel clairs validés

A partir de ce tableau, et en se basant sur l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) et sa valeur normalisée (*nRMSE*) entre les valeurs estimées et celles mesurées, le test statistique a donné les valeurs suivantes :

- ❖ Modèle Haurwitz : RMSE=36.92 W/m², nRMSE= 6.35%,
- ❖ Modèle Hottel_Liu & Jordan : RMSE=67.00 W/m², nRMSE= 12.82%,
- ❖ Modèle Capdéro : RMSE=47.85 W/m², nRMSE= 8.24%,
- ❖ Modèle Solis : RMSE=36.54 W/m², nRMSE= 6.29%,
- ❖ Modèle ESRA : RMSE=50.53 W/m², nRMSE= 8.70%,
- ❖ Modèle Ineichen-Perez : RMSE=46.63 W/m², nRMSE= 7.51%.

Sur la lumière de ces résultats, on remarque que le modèle **Solis** a exhibé une meilleure performance par rapport aux autres modèles. De plus, la comparaison entre les modèles et les mesures au sol en termes de *MBE* et *nMBE* a montré aussi de faibles valeurs pour le modèle **Solis** (*MBE*=0.034 W/m², *nMBE*= 5.75 10⁻⁵). En ce qui concerne la comparaison en termes de coefficient de détermination (R^2), le modèle **Solis** a donné également un coefficient qui se rapproche de l'unité ($R^2=0.9910$), et confirme les résultats évoqués ci-dessus.

Les performances des modèles ainsi validés sont comparées en fonction de leurs scores d'appréciation : "médiocre", "moyen", "bon" et "excellent". Nous nous sommes référés aux travaux d'Engere et al. [19] et Badusco et al. [20] où les modèles ciel clair ont été évalués selon leurs scores du *nRMSE* et du *nMBE*, comme est récapitulé au tableau (4.2).

En fait, les modèles qui ont un $|nMBE| < 5 \%$ et un $|nRMSE| < 15 \%$ sont classés comme "bons" et les modèles avec un $|nMBE| < 2 \%$ et un $|nRMSE| < 5 \%$ sont classés

comme "excellents". Les modèles dont les valeurs sont inférieures à ces valeurs sont soit "moyens", soit "médiocres".

	Indicateurs statistiques		
Score appreciation	nMBE	nRMSE	R ²
Médiocre	≥ 10%	≥ 15%	≤ 0.97
Moyen	≥ 5%, < 10%	≥ 10%, < 15%	≤ 0.98, > 0.97
Bon	0 ≥ 2%, < 5%	0 ≥ 5%, < 10%	0 ≤ 0.99, > 0.98
Excellent	< 2%	< 5%	> 0.99

Tableau (4.2) : Scores d'appréciation selon Engerer et al. [19,20]

En appliquant cette règle et à partir du tableau (4.3), nous pouvons remarquer que le modèle **Solis** est le plus performant qui a le score d'appréciation "excellent" et "bon" à la fois, suivi par les autres modèles à l'exception du modèle Hottel_Liu & Jordan qui a un score "moyen".

	Indicateurs statistiques		
Modèle	nRMSE (%)	nMBE (%)	R ²
Haurwitz	6.35	1.65 10 ⁻⁵	0.9851
Hottel_Liu & Jordan	12.82	-2.05 10 ⁻⁴	0.9889
Capdérrou	8.24	6.94 10 ⁻⁵	0.9820
Solis	6.29	5.75 10⁻⁵	0.9910
ESRA	8.70	9.26 10 ⁻⁵	0.9831
Ineichen-Perez	7.51	9.24 10 ⁻⁵	0.9885

Tableau (4.3) : Performance des modèles validés selon le score d'appréciation

Les valeurs de l'éclairement solaire global (GHI_c) obtenue par le meilleur modèle (**Solis**) sont aussi comparées avec des mesures au sol. A cet effet, un échantillon représentatif de quatre jours ciel-clair (21/03, 21/06, 16/09 et 21/12), couvrant les quatre saisons de l'année, est choisi pour illustrer cette comparaison, comme est montré dans la figure (4.4). En général, une meilleure concordance a été observée entre les valeurs estimées par le modèles Solis et l'éclairement solaire global mesuré sur un plan horizontal, à l'exception des moments du midi solaire ou de légères différences entre les deux valeurs comparées ont été observées.

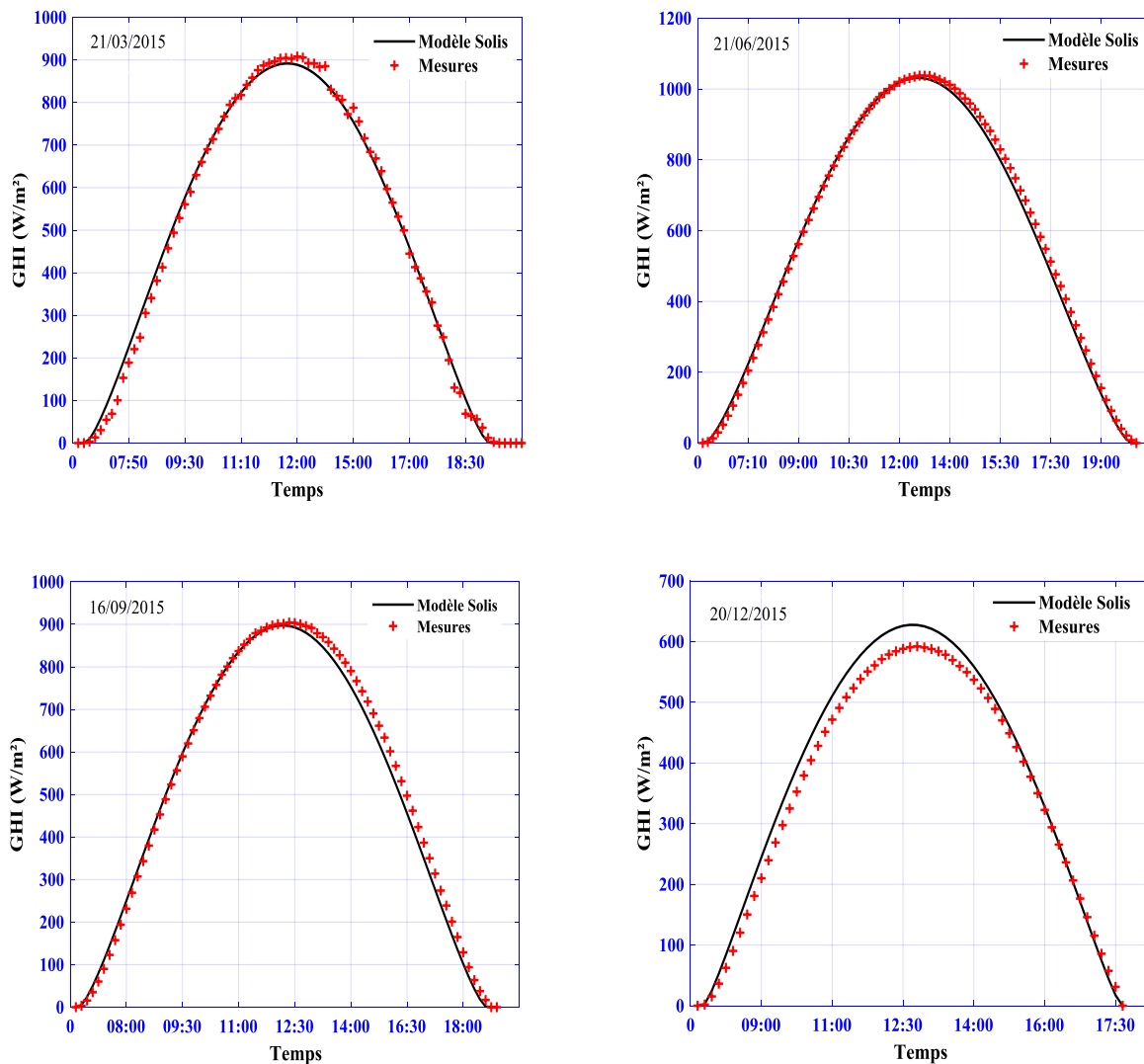


Figure (4.4) : Comparaison entre le rayonnement global estimé par le Modèle Solis et les mesures eu sol

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de notre travail c'était l'estimation de l'éclairement solaire global à travers la validation des modèles ciel clair. Comme nous l'avons mentionné auparavant, les systèmes de conversion solaire photovoltaïque (PV) sont étroitement liés aux changements de la quantité de l'éclairement global GHI. C'est pour cela, une bonne prédiction du rayonnement global sous un ciel clair est primordiale.

Nous avons utilisé les données du site de Ghardaïa pour valider les modèles ainsi choisis. Cependant, l'étude de gisement du site de Ghardaïa a dévoilé d'un énorme potentiel solaire où la moyenne mensuelle du rayonnement solaire global tombant sur une surface horizontale dépasse les 6000 (Wh/m²) et la durée d'insolation sur l'année est de l'ordre de 3200 (heures).

Une inspection visuelle de jeux de données a permis de sélectionner les journées ciel clair et cela à travers l'examinations des mesures des composantes solaires globales (GHI), directes normales (DNI) et la composante diffuse (DHI).

Le calcul de différentes erreurs statistiques (RMSE, nRMSE, MBE, nMBE, et R²) a prouvé que le modèle **Solis** est le meilleur modèle qui garantit des précisions performantes par rapport aux autres modèles étudiés, avec un *nRMSE* obtenu de l'ordre de 6.29% et un $R^2=0.9910$. Ainsi, une concordance a été observée entre les estimations de ce modèle et les mesures au sol pour les quatre journées ciel clair sélectionnées.

Pour les perspectives de ce travail, nous souhaiterons dans le futur :

- ❖ Tester d'autres modèles ciel clair avec autres paramètres climatiques comme inputs,
- ❖ Exploiter les données de plusieurs sites pour voir l'effet du climat sur la qualité de l'estimation,
- ❖ Utiliser les résultats obtenus dans ce travail pour la prévision de l'énergie solaire PV dans le site de Ghardaïa.

Bibliographie

- [1] : MERAD Faiza “ Conception d’un programme de calcul du rayonnement solaire, cas particulier de la région de Mostaganem ” Magister en physique option conversions photovoltaïques Université Mostaganem 2013.
- [2] : NIA Mohamed, “Etude comparative des méthodes d’estimation du rayonnement solaire” magister en physique option Energétique et Mécanique des Fluides, université Setif, 2010.
- [3] : S. MOUHOUS-CHAOUCHI “ Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné” Magister Energies Renouvelables option photothermique l’université de Tlemcen 2012.
- [4] : A. Ridha EL OUEDERNI “évaluation du gisement solaire au golfe de TUNIS – application à la faisabilité d’un mini concentrateur solaire parabolique” docteur en génie énergétique l’école nationale d’ingénieurs de Monastir, 2016.
- [5] : Y. Fatiha “Conception et réalisation d’un système de cuisson solaire destiné au site saharien (Ghardaïa, Algérie)” Thèse de Doctorat en Sciences, Université Batna 2015.
- [6] : Merdaoui ziad “caractérisation radiométrique des sites de Bouzareah et de Ghardaïa” Magister en contrôle, option signaux et systèmes, Université de Blida, 2007.
- [7] : Bouden Abdelmalek “Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque” Magister en électronique option instrumentation, Université Constantine, 2008.
- [8] : Mr BAILEK Nadiem “Étude et Modélisation du Flux Solaire globale sur surface inclinée dans la région de Touat” Doctorat en Physique, option Energétique et développement, Université sidi bel abbes, 2012.
- [9] : Aghilas BRAHIMI “Etude de performances d’un capteur solaire plan à eau” Master 2 en Mécanique et Energétique Université de LORRAINE, 2015 articles L 122. 4
- [10]: Mabasa Brighton et al “The performance assessment of six global horizontal irradiance clear sky models in six climatological regions in South Africa.” *Energies* 14.9 (2021): 2583.
- [11]: Liu B. Y. H. and R. C. Jordan “The Interrelationship and of Direct, Diffuse and Characteristic Distribution Total Solar Radiation.” *Solar Energy* 4.3 (1960): 1-19.
- [12]: Kasten F “The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness.” *Solar energy* 56.3 (1996) : 239-244.
- [13] : Perrin de Brichambaut C and C. Vauge “Le Gisement Solaire Lavoisier” (1982).
- [14]: Mueller R. W et al “Rethinking satellite-based solar irradiance modeling: The SOLIS clear-sky module” *Remote sensing of Environment* 91.2 (2004): 160-174.

- [15]: Ineichen Pierre "A broadband simplified version of the Solis clear sky model" *Solar Energy* 82.8 (2008): 758-762.
- [16]: Rigollier Christelle, Olivier Bauer, and Lucien Wald "On the clear sky model of the ESRA-European Solar Radiation Atlas-with respect to the Heliosat method" *Solar energy* 68.1 (2000): 33-48.
- [17]: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- [18]: <https://www.soda-pro.com/>
- [19]: Engerer, N. A and F. P. Mills "Validating nine clear sky radiation models in Australia" *Solar Energy* 120 (2015): 9-24.
- [20] Badescu, Viorel "Assessing the performance of solar radiation computing models and model selection procedures" *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 105 (2013): 119-134.
- [21] R. Abelhaitem et B. Oussama " Etude comparative de plusieurs modèles d'estimation de l'éclairement solaire par ciel clair en Algérie" master Energies Renouvelables université Ghardaïa 2020.
- [22] Yaiche MR, Bouhanik A, Bekkouche SMA, Malek A, Benouaz T. Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration. *Ener Conv and Mang.* 82. p114-123. 2014.