

N° d'ordre :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR & DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
SIDI BEL ABBES

Thèse de Doctorat

Présentée par

Mr BAILEK Nadiem

Spécialité : Physique

Option : Energétique et développement

Intitulé

**Étude et Modélisation du Flux Solaire globale
sur surface inclinée dans la région de Touat**

Soutenu le 27/06/2012

Devant le jury composé de :

Président :	<i>AMERI Mohammed</i>	<i>Professeur, U. SBA</i>
Examineurs:	<i>BENSTAALI Wissam</i>	<i>MCA, U. Mostaganem</i>
	<i>BOUADJEMI Bouabdellah</i>	<i>MCA, U. Mostaganem</i>
Encadreur :	<i>BOUHAFS Bachir</i>	<i>Professeur, U. SBA</i>
Co-Encadreur :	<i>BENATILLAH Ali</i>	<i>Professeur, U. ADRAR</i>

Année universitaire 2017-2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(١٠) وَجَعَلْنَا النَّهَارَ مَعَاشًا (١١) وَبَيْنَيْنَا فَوْقَكُمْ
سَبْعًا سُدَادًا (١٢) وَجَعَلْنَا سِرَاجًا وَهَاجًا (١٣)
وَأَنْزَلْنَا مِنْ الْمُعْصِرَاتِ مَاءً ثَجَّاجًا (١٤)
لِنُخْرِجَ بِهِ حَبًّا وَنَبَاتًا (١٥) وَجَنَاتٍ أَلْفَافًا

صدق الله العظيم

سورة النبأ

REMERCIEMENTS

Le travail que j'ai l'honneur de vous présenter, a été réalisé dans le Laboratoire de Modélisation et Simulation en Sciences des Matériaux (LMSSM) affilié au centre de recherche de l'Université (CRU) de l'Université de UNIVERSITE DJILLALI LIABES, sous la direction de Monsieur Bachir BOUHAFS, Professeur à l'université de DJILLALI LIABES. Je tiens à lui exprimer mes plus vifs remerciements pour sa disponibilité malgré un emploi du temps parfois surchargé, mais aussi pour son expérience et ses conseils scientifiques qu'il m'a prodigué tout au long de ce travail.

Je remercie vivement Monsieur BENATILLAH Ali, docteur à l'université Africane Ahmed Draia pour m'avoir dirigé au cours de ce travail et pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur AMERI Mohammed, Professeur à l'Université de DJILLALI LIABES, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie sincèrement Monsieur BENSTAAALI Wissam., docteur à l'Université de Mostaganem, et Monsieur BOUADJEMI Bouabdellah, Maître de Conférences à l'Université de Mostaganem et Monsieur, d'avoir accepté de faire partie du jury.

Dédicace

Je dédie ce rapport à tous ceux que j'aime.

Mes premières pensées vont tout particulièrement à mes Parents à qui je dois ce succès et pour qui le sens du sacrifice, au cours de ces longues années d'étude, ne s'est jamais tari et a été le plus précieux de leurs cadeaux. Grâce à leur soutien et à leurs encouragements subtilement dosés, ils m'ont permis de vivre mes années de scolarité avec sérénité et efficacité.

A mes sœurs que j'aime beaucoup.

A tous mes amis qui m'ont soutenu lorsque j'avais besoin d'eux.

À tous mes amis.

ملخص:

يشهد استغلال الطاقة الشمسية تطور مهم ملحوظ جدا في العالم مع نمو بنسبة 20 % ، واستخدام جهد أكثر من 100 جيغاواط. منطقة أدرار هي واحدة من الأكثر ملائمة لاستخدام هذه الطاقة بمتوسط تدفق أكثر من 7 كلواط/ساعة/اليوم و الإضاءة أكثر من 3500 ساعة في السنة. الهدف في عملنا هذا يركز على دراسة و نمذجة تدفق الاشعاع الشمسي الساقط على الاسطح المائلة الواقعة في منطقة توات بالاعتماد على القيم المقاسة من الاشعاع الشمسي الافقي الكلي والجزء المنتشر والبيانات المناخية المختلفة المقاسة لفترة طويلة في المنطقة قيد الدراسة لإنشاء بنك معلومات لتقدير تدفق الطاقة الشمسية في المنطقة .

الكلمات الرئيسية: تدفق ، الحقل، البياض ، البيانات المناخية.

Résumé :

L'énergie solaire connu un développement très important dans le monde avec une croissance 20%, l'utilisation de potentiel dépasse 100 GW. La région de Touat est l'un des sites les plus favorables à l'utilisation de cette énergie avec un flux moyenne qui dépasse 7 KWh/m²/j et d'ensellement de plus de 3500 h par ans. Dans de nombreuses applications solaires, la connaissance du rayonnement solaire globale sur la surface sur surface incliné représente une exigence importante. La mesure du rayonnement diffus est assez coûteuse, et à cause de cela, les mesures du rayonnement solaire ne sont pas facilement disponibles à divers endroits dans le monde. C'est pourquoi de nombreux chercheurs ont développé diverses corrélations empiriques pour prédire le rayonnement global à partir des données météorologiques disponibles. L'objectif principal de cette étude est donc d'évaluer et modélisation du flux solaire sur surface incliné pour la région du Touat, utilisant des mesures à long terme pour ce site.

Mots clé : flux, Données météorologiques, Bilan énergétique Solaire, Albédo.

Abstract:

Solar energy had a very important development in the world with a 20% growth, potential 100. The Touat region is one of the most favorable to the use of this energy with an average flow 7 KWh/m²/j and saddle over 3500 hours per year sites. Ca objective in our work focuses on the study and modeling of global solar flux falling on inclined planes over Saharan Medium at Touat, Algeria. In this work, global and diffuse solar irradiance on tilted surfaces at 28° and atmospheric data provided by a local research laboratory were measured for various seasons in Hot Subtropical Arid Climatic condition of Adrar, Algeria.

Keywords: flow, albedo, atmospheric data, potential

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
NOMENCLATURE.....	XI

Chapitre I : Généralités sur le rayonnement solaire

I.1 Introduction	7
I.2 Système solaire.....	8
I.2.1 Soleil	8
I.2.2 Caractéristiques physiques.....	9
I.2.2.1 Trajectoire terre – soleil	9
I.2.2.2 Spectre du rayonnement solaire.....	10
I.2.2.3 Facteur de correction de la distance terre-soleil.....	11
I.2.2.4 Quelques coordonnées géographiques.....	12
I.2.2.5 Les temps solaires	15
I.3 Atmosphère terrestre	17
I.3.1 Le rayonnement dans l'atmosphère	17
I.3.1.1 Structure de l'atmosphère.....	17
I.3.1.2 Composition de l'atmosphère	18
I.3.2 Effets atmosphériques.....	19
I.3.2.1 Absorption et transmission atmosphériques.....	19
I.3.2.2 Diffusion atmosphérique.....	20
I.4 Conclusion.....	22
I.5 Bibliographie.....	23

Chapitre II : Mesure et traitement des données brutes

II.1 Introduction.....	27
II.2 Principales mesures du rayonnement solaire.....	29

II.2.1 Rayonnement solaire direct	29
II.2.2 Rayonnement diffus	30
II.2.3 Rayonnement global.....	30
II.2.4 Albédo du sol.....	31
II.2.5 Durée d'insolation	32
II.3 Traitement des mesures du rayonnement	33
II.3.1 Les contrôles à l'aide de systèmes de mesures indépendantes	33
II.3.2 Tests de cohérence à l'aide des irradiations sur des surfaces horizontales observées.....	34
<i>II.3.1 Rayonnement solaire global (H_g).....</i>	<i>34</i>
<i>II.3.1 Rayonnement solaire diffus (H_d)</i>	<i>34</i>
II.3.3 Tests de cohérence à l'aide d'un rayonnement sur une surface inclinée mesurée .	34
II.4 Aperçu général de la zone d'étude et de collecte de données.....	35
II.4.1 Caractéristiques Climatique	36
II.4.2 Données de Radiation Solaires en Algérie	40
II.5 CONCLUSION.....	42
II.6 Bibliographie.....	43

Chapitre III : Corrélation de la Fraction Diffuse de l'Irradiation Solaire en Touat

III.1 Introduction.....	47
III.2 Méthode d'estimation	49
III.3 Source des données.....	51
III.4 Sélection et validation du modèle	52
III.5 Résultats et discussion	53
III.6 Conclusion.....	57
III.7 Bibliographies.....	58

Chapitre IV : Estimation du flux solaires sur un plan incliné

IV.1 Introduction	63
IV.2 Modélisation mathématique de l'irradiation globale inclinée.....	64
IV.2.1 Composante horizontale directe.....	65

IV.2.2	composante réfléchie	65
IV.2.3	Composante Diffuse Horizontale.....	66
	IV.2.3.1 Modèles isotropes.....	66
	IV.2.3.2 Modèles anisotropes.....	67
IV.3	Méthode de comparaison statistique	71
IV.4	Source des données	71
IV.5	Résultats et discussion	72
	Cas I : sondages du ciel.....	74
	A. Test annuel des modèles	75
	B. Test saisonnier des modèles.....	77
	Cas II : Performance du modèle dans des conditions climatiques	79
IV.6	Conclusions	82
IV.7	Bibliographies	84

Chapitre V : Déterminer l'angle d'inclinaison optimum pour maximiser l'énergie solaire

V.1	Introduction.....	89
V.2	Source de données	91
V.3	Modélisation mathématique de l'inclinaison optimale des panneaux solaires	92
V.4	Résultats et discussion	93
	V.4.1 Inclinaison optimale pour un rayonnement total maximal.....	93
	V.4.2 Le faisceau de rayonnement diffus global sur une surface inclinée de manière optimale et comparaison	98
	V.4.3 Le faisceau de rayonnement diffus global sur une surface fixée verticalement..	101
V.5	conclusion.....	102
V.6	Bibliographies.....	103
	<i>Conclusion General</i>	111

LISTE DES FIGURES

Fig. I. 1: Le mouvement de la terre autour du soleil.	10
Fig. I. 2: Distribution spectrale du rayonnement solaire	11
Fig. I. 3: Coordonnées terrestres	2
Fig. I. 4: Schéma représente la variation annuelle de la déclinaison du soleil.....	13
Fig. I. 5: Angle horaire ω du soleil.....	14
Fig. I. 6: Trajectoire du soleil à Adrar.....	15
Fig. I. 7: Processus de transmission, d'absorption, de diffusion et de réflexion dans l'atmosphère	21
Fig. II. 1: l'instrument pyrhéliomètre.	29
Fig. II. 2: l'instrument qui mesure le rayonnement diffus.....	30
Fig. II. 3: Un Pyranomètre, modèle SR11.	30
Fig. II. 4: l'Albédomètre.	31
Fig. II. 5: l'héliographe.	33
Fig. II. 6: Rayonnement solaire global mesuré pendant l'heure de la journée qui prend fin à 08h00 (heure locale apparente) le 11 juin 1980 à Vancouver, Canada. Les données des angles d'inclinaison et des orientations (E = Est, W = Ouest, S = Sud, N = Nord) donnés sous un ciel partiellement nuageux[9].	35
Fig. II. 7: Evolution moyennes mensuelle des températures dans la région sud	36
Fig. II. 8: Carte de la durée d'ensoleillement moyen annuel en Heure (1983-2012)[23].....	37
Fig. II. 9: Moyennes mensuelles des irradiances quotidiennes.....	37
Fig. II. 10: La variation de la moyenne mensuelle des durées d'insolation quotidienne de six régions[23].....	38
Fig. II. 11: Réseau d'Héliographe (1983-2012) [23].....	39
Fig. II. 12: Réseau pyranométrique (ONM et CDER).....	39
Fig. III. 1: Pyranomètre pour mesurer les données de irradiances diffuses sur le site de la cellule de test.	52
Fig. III. 2: Données expérimentales de la fraction diffuse horaire en fonction de l'indice de clarté k_t	53
Fig. III. 3: Valeurs du biais d'erreur moyenne MBE (%) des modèles nommés.....	54

Fig. III. 4: Comparaison du test de l'erreur statistique (TS) et critère d'information d'Akaike ($AIC \times 103$) des modèles A3 et A4.....	56
Fig. III. 5: L'estimation du meilleur modèle et des données expérimentales de la fraction diffuse horaire sur la région de Touat (2015).	57
Fig. IV. 1: The radiometric test station.	72
Fig. IV. 2: l'irradiation globale mesurée sur une surface inclinée, orientée au sud ($\beta = 28^\circ$ S) et des valeurs estimées par les modèles isotropes et anisotropes aux dates du : le 15 et le 16 janvier, février, mai et juin.....	73
Fig. IV. 3: MBE dans W2 et RMSE pour tous les modèles utilisés dans l'étude sur une longue période de l'année 2014.....	74
Fig. IV. 4: Comparaison des valeurs d'irradiation globales estimées sur une surface inclinée par le modèle de Willmot (W_i) avec les valeurs d'irradiation globales observées sur une surface inclinée, dans la région de Touat (2014).	77
Fig. IV. 5: Distribution de fréquence de la transmissivité atmosphérique modifiée du rayonnement solaire (kt').	79
Fig. IV. 6: Comparaison des performances du modèle statistique de diverses conditions du ciel: (a) ciel nuageux; (b) Ciel partiellement nuageux; (c) Ciel partiellement dégagé; (d) Ciel dégagé.....	82
Fig. V. 1: Touat's monthly variation of clearness index, ratio diffuse solar radiation, diffuse fraction and the ratio of sunshine hours.....	92
Fig. V. 2: Variation of monthly mean daily total solar radiation with tilt angle in Touat; (a) Jan–Jun, (b) Jul–Dec	94
Fig. V. 3: Angle d'inclinaison optimale quotidienne pour une surface orientée vers le Sud à Touat.	96

LISTE DES TABLEAUX

Table. II. 1. Valeurs typiques de l'albédo du sol.....	32
Table. II. 3. Les données géographiques et les valeurs moyennes des données expérimentales, les périodes d'enregistrement des données des stations étudiées.....	42
Table. III. 1: Résultats du modèle d'erreur pour les données hors-échantillon en 2014, à Touat.....	55
Table. III. 2: Résume les modèles proposés dans les deux catégories.....	70
Table. IV. 1. L'ensemble des coefficients de Perez	70
Table. IV. 2. Échantillons d'étude avec des modèles isotropes et anisotropes détaillés pour l'estimation du rayonnement solaire diffus.....	76
Table. IV. 3. Résumé décrit la distribution des indicateurs statistiques des modèles selon les saisons.	77
Table. V. 1. Optimal monthly tilt scheduling, and corresponding solar radiations based on ground measurements, PVGIS-based satellite estimates. The angles are in degrees while the solar radiation is in MJ/m ² .d.....	95
Table. V. 2. Angle d'inclinaison optimum du capteur (degré) dans la région de Touat....	97
Table. V. 3. La différence relative du gain d'énergie solaire moyenne mensuelle des surfaces inclinées de façon optimale (%) par rapport à celle de la surface horizontale.	98
Table. V. 4. Rayonnement solaire total annuel (GJ / m ²) reçu par des surfaces inclinées différemment et le gain d'énergie solaire supplémentaire annuel comparé à celui de la surface horizontale (%).	99
Table. V. 5. Rayonnement solaire total pour les surfaces exposées au sud à des angles d'inclinaison optimal mensuels, trimestriels et annuels.....	100
Table. V. 6. Le faisceau (F) et le rayonnement diffus (D) sur les surfaces horizontales (MJ / m ² .d) et les diverses surfaces inclinées dans la région de Touat.	101

NOMENCLATURE

ARM Atmospheric Radiation Measurement

OMM l'Organisation Météorologique Mondiale

BSRN Le réseau Baseline Surface Radiation Network

SURFRAD le Nationale Océanique et Atmosphérique Américaine, le réseau

O.N.M l'Office National de la Météorologie

URER/MS l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien

RSG rayonnement solaire global

PCD la station de conversion de la photovoltaïque météorologique

EST Estimation ou Estimée

GHI Global Horizontal Irradiation

MBE Mean Bias Error

RMSE Root Mean Square Error

MBE Mean bias error

RMSE Root mean square error

RRMSE Relative root mean square error

GPI Global performance indicator

TS t-statistic method

CDER Centre de développements énergie renouvelable

UTM Universal Transverse Mercator

Introduction Générale

Au fil des siècles, les scientifiques ont trouvé des moyens innovants pour exploiter la puissance du soleil. De même, l'augmentation de la conversion de l'énergie solaire en électricité figure de façon prioritaire sur l'ordre du jour politique dans de nombreux pays, dans le contexte des efforts pour trouver de sources d'énergie domestiques moins polluantes que les combustibles fossiles. Les technologies d'énergie solaire utilisent l'énergie et la lumière du soleil pour fournir du chauffage, de l'éclairage, de l'eau chaude, de l'électricité et même du refroidissement, pour les maisons, les entreprises et les industries. Ils sont généralement caractérisés soit comme d'énergie solaire passive ou active, selon la façon dont ils capturent, convertissent et distribuent l'énergie solaire. Les techniques solaires actives comprennent l'utilisation de panneaux photovoltaïques et de capteurs solaires thermiques pour exploiter l'énergie. Les techniques solaires passives comprennent l'orientation d'un bâtiment vers le soleil, la sélection de matériaux ayant une masse thermique favorable ou des propriétés de dispersion de la lumière, et la conception d'espaces qui peuvent, naturellement, permettre la circulation de l'air.

Les données de rayonnement solaire au niveau du sol sont importantes pour une large gamme d'applications en météorologie, génie et agronomie (notamment en physique des sols, hydrologie agricole, modélisation et estimation de l'évapotranspiration des cultures) ainsi que dans le secteur de la santé et de la recherche dans de nombreux domaines des sciences naturelles. Quelques exemples qui démontrent la diversité des applications peuvent inclure: l'architecture et la conception des bâtiments (par exemple, les systèmes de climatisation et de refroidissement); la conception et l'utilisation de systèmes solaire thermique; la production d'énergie solaire et les voitures de course alimentée par cette énergie; les modèles de prévisions météorologiques et climatiques; l'évaporation et l'irrigation; le calcul des besoins en eau des cultures; la surveillance de la

croissance des plantes et le contrôle des maladies et de la recherche sur le cancer de la peau.

Le rayonnement solaire atteignant la haute atmosphère terrestre est une quantité plutôt constante dans le temps. Mais le rayonnement atteignant un certain point sur la surface de la Terre est de nature aléatoire, en raison des gaz, des nuages et de la poussière dans l'atmosphère, qui absorbent et / ou diffusent le rayonnement à différentes longueurs d'onde. Ainsi que, l'obtention des données de rayonnement fiables au niveau du sol nécessite des mesures systématiques. Cependant, dans la plupart des pays, la densité spatiale des stations radiométriques est insuffisante. Par exemple, le ratio des stations météorologiques collectant des données du rayonnement solaire par rapport à celles qui recueillent des données Météorologiques en Algérie est d'environ 1 : 100, et dans le monde, l'estimation est d'environ 1 : 500. Même dans les pays développés, il y a une pénurie de mesures à long terme du rayonnement solaire. Cette situation a incité l'élaboration des procédures de calcul pour fournir des estimations de rayonnement pour les endroits où les mesures ne sont pas effectuées et pour les endroits où il y a des lacunes dans les enregistrements de mesure. En outre, l'utilité des ensembles de données météorologiques existants est considérablement élargie en incluant des informations sur le rayonnement solaire. Les estimations de rayonnement pour les conditions météorologiques historiques peuvent être obtenus en les prédisant à l'aide soit d'un modèle de rayonnement spécifique aux sites ou un modèle de prédiction mécaniste. Un modèle spécifique aux sites repose sur des relations empiriques du rayonnement solaire avec des variables de la station météorologique communément enregistrées. Bien qu'une équation spécifique au site nécessite un ensemble de données avec des données de rayonnement solaire réelles pour déterminer les coefficients appropriés, cette approche est souvent plus simple à calculer et peut être plus précise que des modèles mécanistes compliqués. Ces équations simples, spécifiques aux sites, peuvent donc être très utiles à ceux qui s'intéressent aux sites proches de l'endroit où ces modèles sont développés.

Le besoin de données de rayonnement solaire est devenu de plus en plus important, essentiellement, en raison du nombre croissant d'applications d'énergie solaire. Un grand nombre de modèles de calcul du rayonnement solaire ont été développés, allant de codes informatiques très compliqués aux relations empiriques. En plus, la sélection de l'un de

ces modèles tient généralement compte de deux caractéristiques : (1) la disponibilité des données météorologiques et d'autres types de données utilisées comme données d'entrée pour le modèle et (2) l'exactitude du modèle. Pour les utilisateurs, à toutes fins pratiques, le premier critère rend les programmes sophistiqués basés sur la solution de l'équation de transfert radiatif inutilisables. En conséquence, les autres modèles ont été considérablement testés.

Le type de données de rayonnement solaire requis dépend de l'application et de l'utilisateur. Par exemple, la moyenne mensuelle ou quotidienne des données sont nécessaires pour les études climatologiques ou pour les études de faisabilité des systèmes d'énergie solaire. Les données pour des périodes horaires (ou plus courtes) sont nécessaires pour simuler la performance des dispositifs solaires ou pendant les essais du capteurs et d'autres activités. Avec la prolifération des ordinateurs de bureau haute performance bon marché, il y a un besoin croissant dans diverses branches de la science et de l'ingénierie pour des données détaillées (horaires ou sub-horaires) sur le rayonnement solaire à utiliser pour la simulation de processus ou de la conception et le dimensionnement optimal du dispositif. Le meilleur exemple est celui de la dernière décennie, cette période a connu un essor dans la construction de bâtiments éco-énergétiques qui utilisent des caractéristiques architecturales solaires pour maximiser l'exploitation de la lumière naturelle.

En outre, Il faut réexaminer les méthodes existantes « simples » qui visent à estimer le rayonnement solaire sur des surfaces horizontales et inclinées. Le but de cette thèse est de rassembler un certain nombre d'existants, ainsi que de nouveaux modèles pour calculer le rayonnement solaire. Notre objectif est de classer différentes méthodes et modèles de calcul, afin de revoir les critères de performance statistique et de recommander des ensembles de données adaptés à la validation. La thèse couvre la plupart des aspects des modèles de calcul du rayonnement solaire à large bande. Les deux méthodes statistiques et déterministes sont envisagées. De plus, l'information systématique sur l'exactitude de chaque méthode est incluse. Cette information permet à l'utilisateur de choisir le meilleur modèle d'estimation disponible pour son/sa application lorsqu'il considère les données disponibles et les demandes d'exactitude. Le lecteur est implicitement doté d'une solide compréhension des principaux mécanismes qui déterminent le comportement du

rayonnement solaire sur la surface de la Terre et de la façon dont le rayonnement solaire est estimé, mesuré et interprété dans un monde appliqué.

La thèse est structurée selon les lignes logiques de la pensée progressive. Après un chapitre introductif présentant les progrès des mesures du rayonnement solaire, le chapitre 2 fait référence aux techniques fractales et statistiques utilisées pour quantifier les propriétés de l'irradiation globale.

Dans le chapitre 3, des modélisations mathématiques très précises pour l'estimation de la fraction solaire diffuse horaire sont présentés pour améliorer la prévisibilité de la ressource solaire dans la région de Touat, un désert situé au sud de l'Algérie. La modélisation présentée est basée sur des mesures d'indice de clarté. Le meilleur modèle trouvé pour le site considéré est le modèle empirique logistique et sigmoïde. Le chapitre 4 est pour prédire l'irradiation solaire globale tombant sur des plans inclinés sur le milieu saharien à Touat, en Algérie. Dans ce travail, l'irradiation solaire globale et diffuse sur des surfaces inclinées à 28° , fournie par un laboratoire de recherche local, a été mesurée pour différentes saisons dans des conditions climatiques arides subtropicales chaudes de Touat, en Algérie. Douze modèles empiriques incluant quatre modèles de ciel isotropes et huit modèles de ciel anisotropes sont utilisés pour estimer le rayonnement solaire sur la surface intitulée. L'objectif principal du chapitre 4 est d'évaluer les ressources d'énergie solaire en établissant des modèles de rayonnement solaire diffus et en obtenant un angle d'inclinaison optimum du capteur pour un emplacement éventuel dans la région de Touat.



***Généralités sur le rayonnement
solaire***

Chapitre I

Généralités sur le rayonnement solaire

I.1 Introduction

Le soleil donne une énergie électromagnétique qui est libérée par les réactions thermonucléaires au sein de lui-même. Ce sont des réactions de fusion transformant des noyaux d'hydrogène en noyau d'hélium avec une émission d'énergie qui donne naissance à un rayonnement électromagnétique centré sur la gamme du visible. Cette émission est assez proche de celle émise par un corps noir 1 porté à une température légèrement inférieure à 5800 Kelvins[1]. Malgré la distance entre le soleil et notre planète, l'impact du rayonnement solaire sur la terre représente un apport énergétique important. En effet, on peut estimer à 178.10^{15} kilowatts la puissance interceptée par l'hémisphère éclairé[2]. Sa répartition n'est pas uniforme, ni d'un point de vue géographique, ni temporellement. Hors atmosphère, ce rayonnement est parfaitement décrit par des équations mathématiques via les paramètres astronomiques. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée.

L'étude ou les applications de l'énergie solaire en un site donné, sont tributaires de données plus complètes et détaillées de l'ensoleillement de ce site [3, 4]. Ayant acquis des données sur le gisement solaire, soit par mesure, soit par estimation, il faut les présenter de telle façon qu'elles soient accessibles aux concepteurs de systèmes énergétiques solaires, qu'elles puissent servir pour un premier choix du type de système : à concentration ou non, autonome ou non et à stockage journalier ou saisonnier.

Le flux solaire reçu au niveau du sol dépend de plusieurs facteurs : l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre, la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude, la période de l'année, l'instant considéré dans la journée, et la nature des couches nuageuses[5, 6].

Dans ce chapitre, on désire connaître des notions essentielles sur le gisement solaire et les informations sur l'évaluation du potentiel énergétique solaire concernant l'Algérie, on veut voir du près les résultats réalistes obtenus sur la description du gisement solaire de ce pays, c'est-à-dire ce gisement est-il bien défini en tout point du territoire Algérien. On a commencé ce chapitre par une description de quelques notions utiles concernant la description du gisement solaire qui a été défini par une succession de flux d'énergie ou de puissance. Les composantes du rayonnement solaire incident au sol sont aussi traitées, le direct qui provient du disque solaire et le diffus qui provient de tous les éléments irradiés par le soleil, la constante solaire est aussi discutée. L'atmosphère, caractérisée par ses constituants fixes et variables, a été le sujet de l'atténuation des rayons incidents du disque solaire.

I.2 Système solaire

I.2.1 Soleil

Le soleil produit une énorme quantité d'énergie, qui quitte sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique d'un spectre allant de 0,2mm (ultra-violet) à 4mm (infrarouge). Cette énergie représente une source majeure d'énergie dans le futur. Malgré la distance considérable de la terre du soleil (150.106km), la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie de 180.106 Gw[7]. L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie.

Elle représente un potentiel considérable, en effet, le pays reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement[8].

- Diamètre de soleil $D_s=1.39 \times 10^9$ m.
- Diamètre de la terre $D_t=1.27 \times 10^7$ m.
- Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts}=1.5 \times 10^{11}$ m.

I.2.2 Caractéristiques physiques

I.2.2.1 Trajectoire terre – soleil

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi-circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique (voir fig. I.1).

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est le plus près du soleil avec 147 millions de Km de distance et au solstice d'été qu'elle en est le plus éloigné : avec 153 millions de Km, et la distance moyenne étant de 149,5 millions de Km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 Mars) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) à une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle avec la normale du plan de l'écliptique[9, 10].

L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné par rapport au plan de l'écliptique céleste. On appelle déclinaison δ l'angle formé par l'axe Terre -Soleil avec le plan équatorial. La déclinaison varie de $+23^\circ 27'$ solstice d'été (21 juin), à $-23^\circ 27'$ solstice d'hiver (23 décembre), elle s'annule deux fois par an les 21 mars et 23 septembre (ce sont les équinoxes) et elle est responsable des saisons. Les parties diurnes et nocturnes de la journée ont alors la même durée aux équinoxes la déclinaison passe par 0° ($-23^\circ 27' < \delta < +23^\circ 27'$)[11].

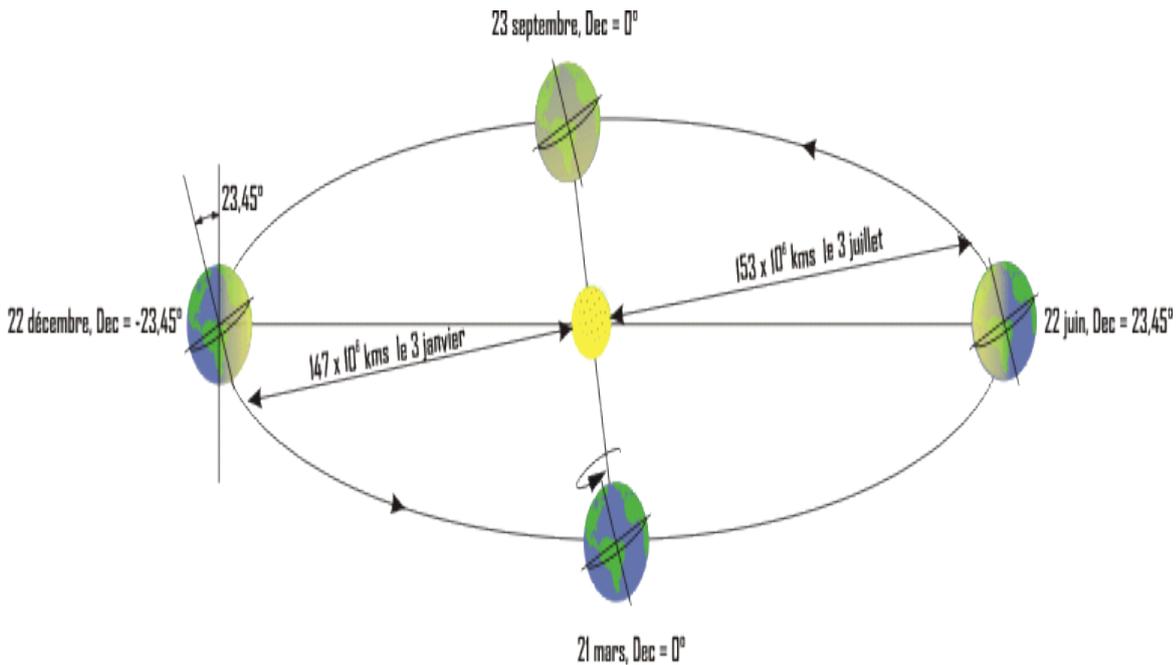


Fig. I. 1:Le mouvement de la terre autour du soleil[12].

I.2.2.2 Spectre du rayonnement solaire

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [11]:

- Ultraviolet **UV 0.20 < l < 0.38 mm 6.4%**
- Visible **0.38 < l < 0.78 mm 48.0%**
- Infrarouge **IR 0.78 < l < 10 mm 45.6%**

Le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère, dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci.

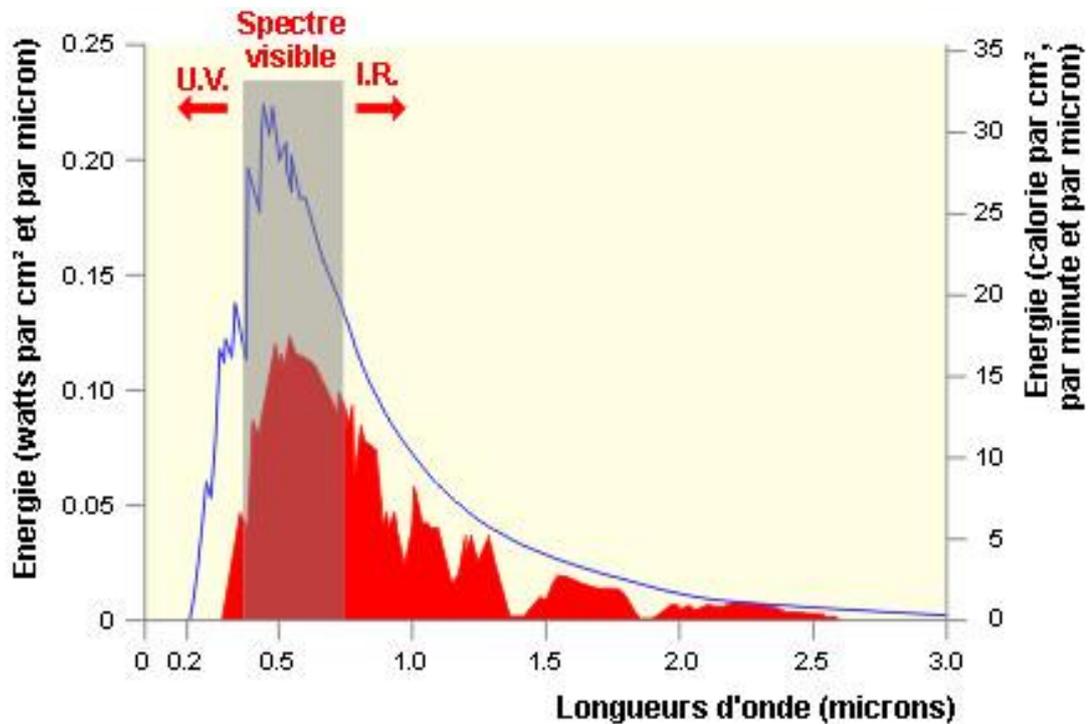


Fig. I. 2: Distribution spectrale du rayonnement solaire

I.2.2.3 Facteur de correction de la distance terre-soleil

Au cours d'une révolution, la distance entre la terre et le soleil varie sensiblement en raison de la trajectoire elliptique de la terre autour du soleil. Cette distance peut alors atteindre 153 millions de Km au maximum le 3 juillet, et 147 millions de Km au minimum le 3 janvier. Ce facteur dépend du numéro du jour de l'année j , qui est déterminé en utilisant le tableau I.2 ou I.3 et en connaissant le numéro du jour dans le mois, nous avons calculé le facteur correction de la distance terre-soleil (C_{t-s}) correspondant à l'aide de l'équation suivante [13, 14] :

$$C_{t-s} = 1 + 0.033 \cos \left[\frac{360 n}{365} \right] (I-1)$$

Avec:

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

I.2.2.4 Quelques coordonnées géographiques

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

a) Latitude et Longitude

La latitude φ 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.

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 $+90^\circ$.

La longitude c'est l'angle λ 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.

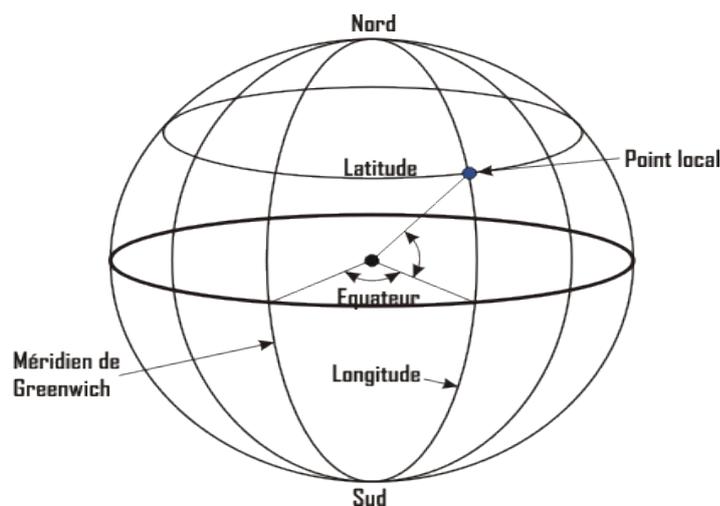


Fig. I. 3: Coordonnées terrestres[12]

b) La déclinaison et l'angle horaire

La déclinaison (δ), c'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial, elle est définie au paragraphe précédent « Mouvement de la Terre autour du Soleil ».

La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année. Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper [14, 15].

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n + 284) \right] \quad (\text{I- 2})$$

Où: n est le numéro du jour de l'année.

La figure suivant montre le changement de la déclinaison solaire en fonction du jour de l'année

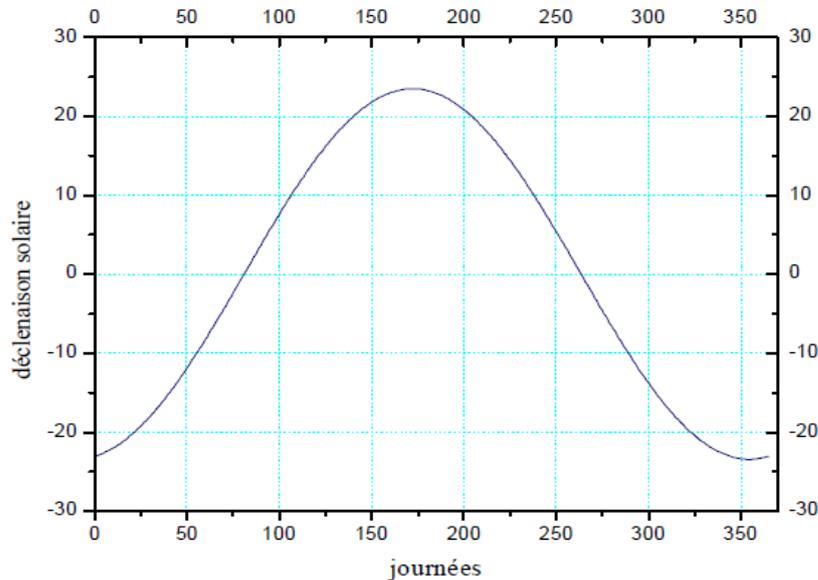


Fig. I. 4: Schéma représente la variation annuelle de la déclinaison du soleil

L'angle horaire ω , L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante[14]:

$$\omega = 15 (T_{SV} - 12) \tag{I- 3}$$

Où T_{SV} est le temps solaire vrai qui sera décrit dans l'équation (I- 8).

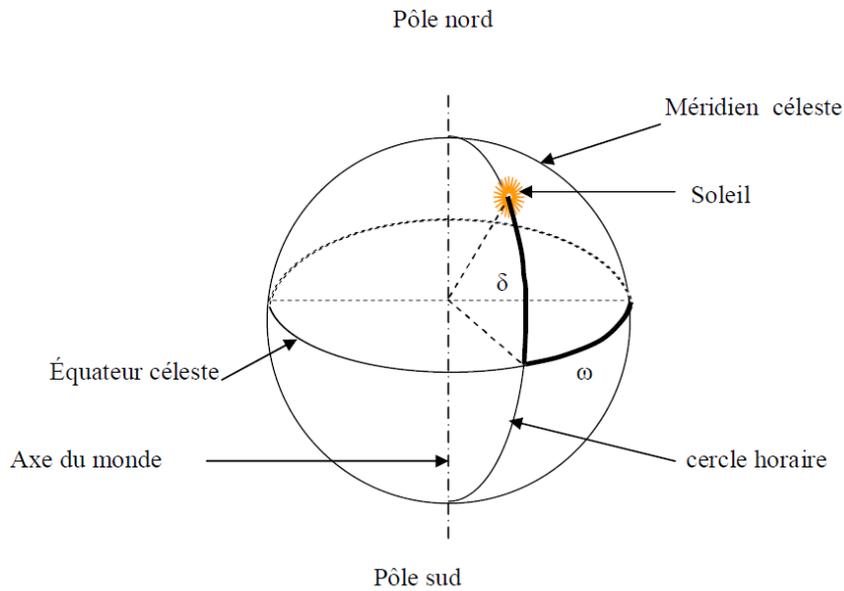


Fig. I. 5:Angle horaire ω du soleil.

c) L'azimut et la hauteur solaire

L'azimut ψ est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction sud. Il se compte de 0° à 360° à partir du sud dans le sens rétrograde. La relation qui donne L'azimut est donnée ci-dessous[14]:

$$\cos \psi = (\sin \gamma \sin \theta - \sin \delta) / \cos \gamma \cos \theta \tag{I- 4}$$

L'angle de la hauteur solaire (γ)c'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal. γ varie de 0° à 90° vers le zénith et de 0° vers $- 90^\circ$ vers le nadir. L'angle de la hauteur solaire est donné par[14].

$$\sin \gamma = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega \tag{I- 5}$$

La figure. I.5 représente les trajectoires apparentes du Soleil pour chacune de ces journées à Touat.

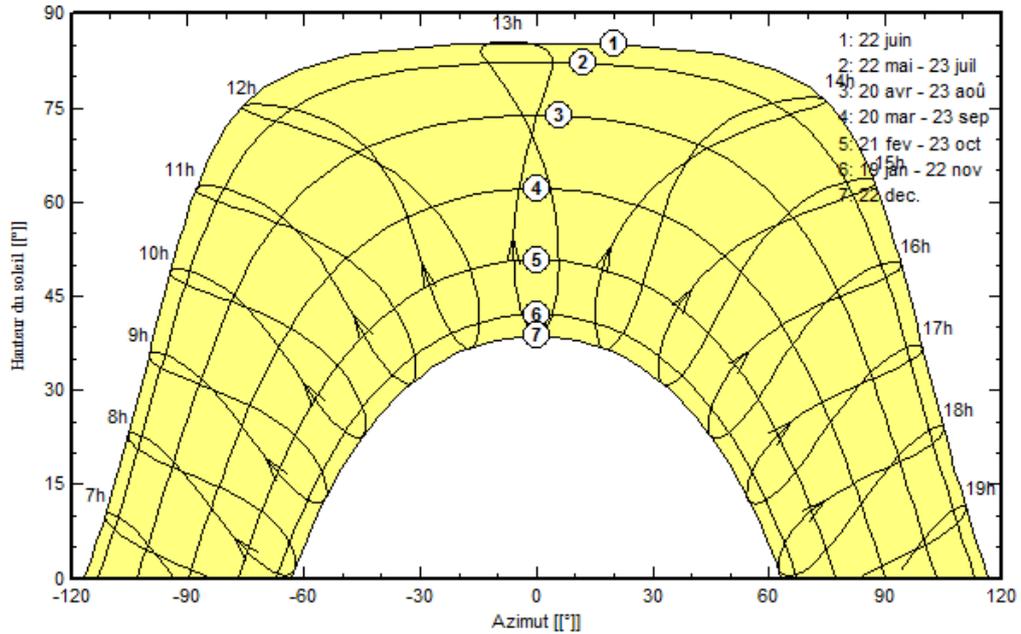


Fig. I. 6:Trajectoire du soleil àTouat.

I.2.2.5 Les temps solaires

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 (T_L), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire.

$$T_L = T_U + \text{décalage} \quad (\text{I- 6})$$

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 (T_M). 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 :

$$T_M = T_U \pm \varphi / 15 \quad (\text{I- 7})$$

Avec T_M en heure.

c) Le temps solaire vrai

Le temps solaire vrai (T_{SV}) C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil.

$$T_{SV} = T_M + E_t \quad (\text{I- 8})$$

Où E_t est l'équation du temps. Le temps E_t varie de -14,5 minutes (du 10 au 15 Février) à +16,5 minutes (du 25 au 30 Octobre). Une bonne approximation du temps E_t est donnée par l'équation suivante :

$$E_t = 9.9 \sin[2(0.986 n + 100)] - 7.7 \sin(0.986n - 2) \quad (\text{I- 9})$$

Où :

E_t est exprimé en minutes et n est le numéro du jour dans l'année à partir du 1^{er} Janvier.

d) Le temps légal

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

$$T_L = T_U + \Delta H \quad (\text{I- 10})$$

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

I.3 Atmosphère terrestre

hors atmosphère, la distribution spectrale de rayonnement est parfaitement définie, au voisinage de la planète Venus l'éclairement atteint 2600Wm^{-2} au fur et à mesure qu'on s'éloigne du soleil, sur Jupiter par exemple il n'est plus que de 50Wm^{-2} [16]. Avant d'arriver au niveau du sol, le rayonnement solaire subit des variations physiques en traversant l'atmosphère, il interagit avec les constituants gazeux et solides de la couche atmosphérique. L'atmosphère est la couche gazeuse qui entoure notre planète. Bien qu'elle est très mince en comparaison au rayon terrestre, son rôle de filtre du rayonnement solaire est essentiel à la présence de la vie sur Terre.

I.3.1 Le rayonnement dans l'atmosphère

Les couches atmosphériques, modifient profondément la distribution spectrale de rayonnement solaire. Il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge [17].

I.3.1.1 Structure de l'atmosphère

L'atmosphère qui entoure la terre joue un rôle très important vis-à-vis du rayonnement solaire tant par ses constituants fixes que par ses constituants variables. Les constituants fixes sont surtout l'azote, d'oxygène, d'argon et de dioxyde de carbone (CO_2), avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs. Parmi les constituants variables citons l'eau sous forme de vapeur, de gouttelettes ou de cristaux de glace et les poussières.

L'atmosphère est composée de couches superposées les unes sur les autres. Depuis le sol, on distingue la troposphère, la stratosphère, puis la mésosphère, suivi de la thermosphère. chaque une des 5 couches ayant des propriétés tout à différents et distinctement séparées [17].

- 1- La troposphère qui s'étend jusqu'à 15km d'altitude où la température décroît de $6,5^\circ\text{C}$ par km pour atteindre -70°C à la base de la couche suivante.

- 2- La stratosphère se situe entre 15 et 55 km d'altitude où la température décroît de -70°C à 10°C .
- 3- La mésosphère de 55 à 80 km, où la température décroît de $+10^{\circ}\text{C}$ à -80°C .
- 4- L'ionosphère où la température croît régulièrement pour atteindre 1500°C à l'altitude de 300 km.
- 5- L'exosphère au-delà de 700 km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidérale.

La moitié de la masse gazeuse est comprise entre 0 et 5 km. La quantité de chaque constituant de l'atmosphère est caractérisée par son épaisseur réduite, c'est-à-dire l'épaisseur de la couche homogène que formerait ce constituant seul à température et pression normalisées.

I.3.1.2 Composition de l'atmosphère

L'atmosphère est un mélange de gaz composé essentiellement de 78% d'azote, de 21% d'oxygène, de 1% d'argon et de 0.033% de dioxyde de carbone (CO_2), avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs [18, 19]. On rajoute à cela les aérosols qui sont des particules soit d'origine naturelle, tels que le sable, la suie, les cristaux de glace ou les poussières volcaniques, soit d'origine artificielle telle que celles produites par l'industrie, l'automobile ou le chauffage. La masse gazeuse totale traversée est de 10 tonnes / m^2 ; elle équivaut à 7.8 km d'atmosphère ramenée aux conditions de température et de pression dites normales : $T=0^{\circ}\text{C}$; $p=1013$ mbar. Si ces gaz étaient tous ramenés aux conditions normales, on aurait 6.2 km d'azote, 1.7 km d'oxygène, 74 m d'argon, 30 m de vapeur d'eau, 24 m de CO_2 , 14 cm de Néon, 4 cm d'Hélium, quelques mm de Krypton, de méthane de NO et de NO_2 et seulement 5 mm d'ozone.

I.3.2 Effets atmosphériques

Lorsqu'une radiation électromagnétique rencontre un milieu matériel, deux phénomènes se produisent : une diminution de son énergie et une modification de sa direction. A la sortie de chaque molécule rencontrée, outre la fraction absorbée, deux rayonnements sont identifiés :

Un rayonnement transmis et un rayonnement diffusé. Après la traversée d'un ensemble de particules (atmosphère, nuage), l'ensemble du rayonnement transmis devient le rayonnement direct, la partie diffusée dans le sens de propagation initiale est appelée rayonnement diffus (ou plus généralement l'éclairement diffus en ce qui concerne un observateur au sol) et la partie diffusée vers l'hémisphère d'incidence est dénommée rayonnement réfléchi.

I.3.2.1 Absorption et transmission atmosphériques

L'absorption par les gaz atmosphériques est dite sélective, car elle n'affecte que des radiations de longueurs bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau (H₂O), à l'ozone (O₃), à l'oxygène (O₂) et au gaz carbonique (CO₂).

La vapeur d'eau qui est le constituant le plus important après l'air, présente plusieurs bandes d'absorption situées à des longueurs d'ondes supérieures à 0,65 μm[11]. La bande allant de 2,4 à 2,8 μm est la plus large. De plus, à ce niveau, l'absorption est la plus forte. L'absorption propre à la vapeur d'eau est d'environ 10%.

L'ozone est le principal absorbant dans l'ultraviolet. Il est caractérisé par une forte bande d'absorption à des longueurs d'ondes inférieures à 0,3 μm et une faible absorption entre 0,45 et 0,7 μm.

L'oxygène a deux bandes étroites de faible atténuation dans le visible à 0,69 et 0,76 μm. Le gaz carbonique absorbe le rayonnement dans cinq bandes se trouvant respectivement à 1,46 ; 1,60 ; 2,04 ; 2,75 et 4,27 μm.

I.3.2.2 Diffusion atmosphérique

La diffusion est une redistribution du rayonnement solaire qui interagit avec les molécules gazeuses, les gouttelettes et les aérosols dans toutes les directions sans changement de longueur d'onde. Selon la taille des particules diffusantes par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, on distingue deux types de diffusion : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie.

La diffusion de Rayleigh affecte surtout les molécules d'air pur et sec comme l'azote et l'oxygène. C'est une diffusion sélective causée par les particules dont le diamètre est très inférieur à la longueur d'onde incidente. En moyenne, en prenant en compte la course du soleil et les différentes longueurs d'onde, environ 13% de rayonnement solaire incident subissent la diffusion de Rayleigh[20]. Le coefficient d'extinction caractérisant ce type de diffusion est donné par la relation suivante :

$$k_r(\rho) = 0.008735\rho^{-4} \quad (\text{I- 11})$$

La diffusion de Mie désigne la diffusion par les particules dont la taille est de même ordre de grandeur que les longueurs d'onde, comme pour la vapeur d'eau et les aérosols. Le coefficient d'extinction s'écrit [21] :

$$k_a(\rho) = \beta\rho^{-\alpha} \quad (\text{I- 12})$$

Où α est lié à la taille des particules et varie entre 0 (pour les grosses particules) et 4 (pour les petites particules). La valeur moyenne pour les aérosols étant $\alpha = 1,3$.

Et β , le coefficient de trouble atmosphérique établi par Angström. Il représente la quantité aérosols présente dans l'atmosphère. Il vaut 0.02 pour un ciel très pur (bleu profond) et 0.2 pour un ciel pollué.

Les phénomènes d'absorption et de diffusion par les nuages réduisent considérablement le rayonnement reçu au sol surtout pour les longueurs d'ondes supérieures à 1 μm . Les nuages sont constitués des particules dont les dimensions sont notablement supérieures aux longueurs d'ondes ultraviolets et visibles. C'est ainsi que dans ce domaine du spectre solaire, la diffusion par les nuages est indépendante de la longueur d'ondes[22]. Le taux d'atténuation par les nuages dépend essentiellement de leur épaisseur, leur nature et leur distribution dans le ciel. Une couche de nuages, aussi mince que possible peut renvoyer le rayonnement incident vers l'atmosphère. Quant à l'absorption du rayonnement par les nuages, elle est moins marquée. Les nuages les plus épais n'absorbent qu'environ 8 % de l'énergie incidente. La contribution de ces différents phénomènes est illustrée par la figure. I.6.

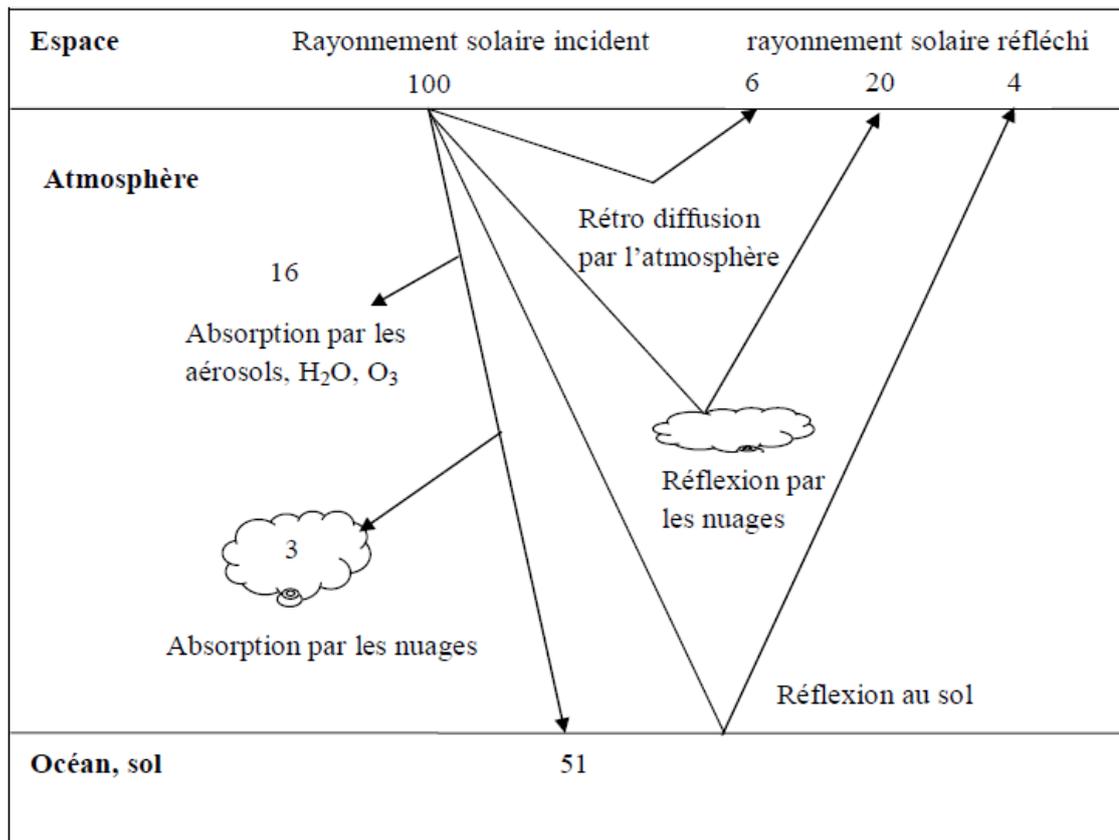


Fig. I. 7:Processus de transmission, d'absorption, de diffusion et de réflexion dans l'atmosphère [22].

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions importantes sur l'étude du gisement solaire comme les coordonnées terrestres et horaires, les temps de base et le mouvement de la terre autour de soleil. Ensuite nous avons présenté l'influence des divers constituants atmosphériques sur le rayonnement solaire et les différents phénomènes responsables de l'atténuation de l'irradiation solaire à savoir l'absorption et la diffusion. Une exploitation rigoureuse du gisement solaire permet l'orientation précise de n'importe quel capteur solaire en tout fait du globale. On peut dire enfin que, même si la connaissance du gisement solaire en Algérie n'est pas bien totale et réaliste, des études microclimatiques sur ce gisement s'avèrent nécessaires et indispensables avant toute installation d'un système énergétique solaire, afin d'affiner le choix final et optimal de l'endroit d'installation.



***Mesure et traitement des
données brutes***

Chapitre II

Mesure et traitement des données brutes

II.1 Introduction

Notre méthodologie de test de la qualité du rayonnement de surface utilise essentiellement des analyses climatologiques des mesures de rayonnement de surface afin de définir des limites raisonnables pour tester les données des valeurs inhabituelles. L'hypothèse principale ici est que la majorité des données climatologiques sont de «bonnes» données, ce qui pour les sites de terrain exploités avec une attention nominale tels que ceux du programme ARM (pour atmospheric radiation measurement) du Département de l'Énergie des États-Unis[1], le Nationale Océanique et Atmosphérique Américaine, le réseau SURFRAD [2], l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et Le réseau Baseline Surface Radiation Network (BSRN), réseau de référence global pour la mesure du rayonnement à la surface de la terre [3], semble une hypothèse raisonnable. Les données qui n'entraient pas dans la gamme normale d'occurrences sont étiquetées soit « indéterminée » (ce qui signifie que les mesures sont physiquement possibles, mais se produisent rarement, et nous pouvons donc pas dire si les valeurs sont « bonnes » ou « mauvaises ») ou « déterminée », selon jusqu'où les données particulières peuvent résider en dehors de la gamme normale. De ce fait, la validation et le contrôle de la qualité des

données sont conçues pour assurer que chaque valeur atteint un certain niveau de fiabilité et que les données sont aussi complètes que possible. Des aperçus, ainsi que des informations détaillées spécifiques sur la validation des données de rayonnement, sont indiqués dans [4-11]. Des directives pour le contrôle de la qualité des données météorologiques de surface en général, ont été préparés par Abbott [12]. Il inclut un certain nombre de références pertinentes ainsi que des informations détaillées sur des procédures statistiques telles que les tests d'homogénéité et d'interpolation.

Le contrôle de la qualité a de nombreuses facettes, celles-ci étant combinées en deux groupes principaux. Le premier concerne des aspects du contrôle technique et inclut des considérations telles que l'exposition des instruments, l'étalonnage et la maintenance, les procédures d'observation, les unités, l'identification des paramètres et le format des données.

Le deuxième groupe couvre le contrôle critique et les procédures de ce groupe concernent la validation des données (l'évaluation de l'exactitude des données en identifiant les erreurs de mesure, les dysfonctionnements des équipements et le manque d'homogénéité des séries chronologiques) et l'intégralité de l'enregistrement des données. Ce dernier pourrait nécessiter des actions telles que l'interpolation des données à l'aide des valeurs modélisées ou d'autres valeurs dérivées. La production des prévisions de rayonnement solaire de haute qualité (par opposition aux données historiques les plus souvent évoquées jusqu'à présent) devient un objectif de recherche important, en raison de la pénétration croissante des sources variables de production d'électricité (solaire et éolienne) dans les réseaux électriques. Une question légitime qui fait actuellement l'objet de vifs débats entre les experts est de savoir quels indicateurs statistiques devraient être utilisés pour évaluer la performance des prévisions solaires. Alors que, Hoff et al. [13] recommandent l'utilisation de MAD basée sur un raisonnement qualitatif, Marquez et Coimbra [14] proposent une nouvelle mesure de performance pour évaluer de quelle façon un modèle de prévision est capable de prédire efficacement la variabilité stochastique de l'irradiation. Étant donné que le domaine de la prévision solaire est en évolution rapide, il est prévu que le débat, sur laquelle mesure de performance devrait être utilisée, sera intensifié. Pour cette raison, le reste de ce rapport se concentrera exclusivement sur la validation des ensembles de données historiques modélisés.

Ce chapitre met l'accent sur les procédures de validation afin d'être utilisées dans des aspects du contrôle de la qualité critique des données de rayonnement solaire, ainsi, sur des publications de l'Organisation météorologique mondiale (telles que l'Organisation météorologique mondiale [15], Frohlich et Londres [16]) et de nombreux organismes météorologiques nationaux qui traitent des divers aspects du contrôle technique.

II.2 Principales mesures du rayonnement solaire

On distingue principalement selon sa provenance, sa constitution ou la méthode de mesure les paramètres suivant [17]:

II.2.1 Rayonnement solaire direct

On appelle rayonnement solaire direct celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion. Il se diffère de façon notable du rayonnement atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en particulier du fait de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère. Sa mesure s'effectue à l'aide d'un pyréliomètre (Fig. II. 1), appareil dont la surface sensible est toujours disposée perpendiculairement aux rayons solaires.



Fig. II. 1: l'instrument pyréliomètre.

II.2.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement en provenance de la voûte céleste, à l'exception

du disque solaire. C'est-à-dire la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Sa mesure est effectuée avec un pyranomètre muni d'une bande pare-soleil (anneau métallique cachant le disque solaire)(Fig. II. 2).



Fig. II. 2:l'instrument qui meure le rayonnement diffus.

II.2.3 Rayonnement global

Le rayonnement est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension dans l'atmosphère, c'est donc le rayonnement total mais excepté sa composante directe. Il est défini aussi comme le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. On le mesure avec un pyranomètre (Fig. II. 3).



Fig. II. 3:Un Pyranomètre, modèle SR11.

Un Pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement

solaire total en watts par mètre carré. Il est sensible dans un domaine spectral de 300 à 2500 nanomètres selon le filtre utilisé. L'unité du rayonnement est le watt par mètre carré (W/m^2). Il permet de mesurer un rayonnement de tout un hémisphère, dans une longueur d'onde allant de 0.3 à 3 μm . Il ne capte donc pas les rayonnements infrarouges de grandes longueurs d'onde (dépassant 3 μm) qui sont notamment émis par l'atmosphère et le sol.

II.2.4 Albédo du sol

L'albédo pour le rayonnement solaire est défini comme le rapport du rayonnement diffusé ou réfléchi par le sol au rayonnement global. En d'autres termes c'est la valeur moyenne et pondérée de la réflectance pour l'ensemble des radiations considérées et pour tous les angles d'incidences possibles. Il est mesuré par un Albédomètre (Fig. II. 4) qui se compose de deux pyranomètres montés en opposition, l'un regardant vers le sol et l'autre vers le ciel.



Fig. II. 4: l'Albédomètre.

L'énergie solaire est en partie réfléchie et en partie absorbée par la surface terrestre. La fraction d'énergie réfléchie par rapport à l'énergie incidente porte le nom d'albédo. Un corps noir, par exemple, absorbe toute radiation. Son albédo est théoriquement donc de 0%. Une neige blanche renvoie 84% environ de l'énergie qu'elle reçoit. Il y a quelques valeurs typiques d'albédo selon la surface du sol la nature de la surface :

Tableau. II. 1. Valeurs typiques de l'albédo du sol.

Nature dusol	Valeur	Valeur moyenne
Sable sec	0,1 à 0,4	0,25
Désert	0,2 à 0,4	0,30
Prairies, herbages	0,2 à 0,3	0,25
Forêt	0,1 à 0,2	0,15
Neige fraîche	0,7 à 0,8	0,80
Neige fondante	0,5 à 0,7	0,60
Habitat très dense	0,1 à 0,2	0,15
Habita	0,15 à 0,25	0,20

II.2.5 Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant (Fig. II. 5). Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle même dépend de la période de l'année considérée.

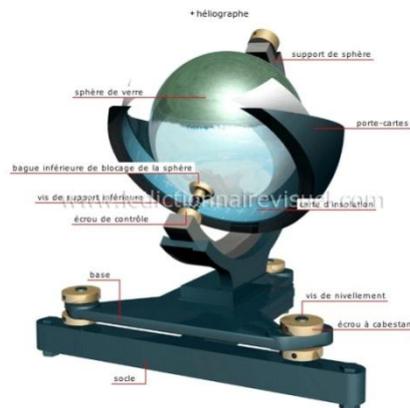


Fig. II. 5:l'héliographe.

II.3 Traitement des mesures du rayonnement

Des diverses approches peuvent être utilisées pour vérifier la qualité des données mesurées. En choisissant la méthode la plus appropriée, il faut tenir compte du degré de précision requis, des capacités du système de traitement des données et de la disponibilité des données à l'appui. Hay [9] a identifié plusieurs catégories de procédures pour le contrôle de qualité des données de rayonnement solaire. Ceux-ci fourniront la structure pour la discussion qui suit :

II.3.1 Les contrôles à l'aide de systèmes de mesures indépendantes

L'approche optimale consiste à utiliser des systèmes de détection et d'enregistrement entièrement indépendants pour effectuer des intercomparaisons à intervalles fréquents (au moins mensuels) et collecter des données dans des conditions qui se rapprochent d'un état stable (ciel dégagé, petit angle zénithal solaire et turbidité atmosphérique faible). Les écarts entre les deux systèmes indépendants ne doivent pas être supérieurs aux erreurs de mesure typiques, qui sont habituellement inférieures à 4% pour les mesures solaires [18, 19].

Abbott [20] note que, dans certaines conditions, les intercomparaisons ne doivent pas être limitées à l'utilisation de systèmes de mesures co-localisés. Il développe, plutôt,

le concept de contrôle de qualité aérien et de « vérification des contacts » pour les stations situées à proximité immédiate les unes des autres. Abbott présente une variété de procédures statistiques pertinentes à cette approche.

II.3.2 Tests de cohérence à l'aide des irradiances sur des surfaces horizontales observées

Une méthode convenable pour le contrôle de qualité consiste à vérifier la cohérence entre un certain nombre de variables de radiation enregistrées simultanément. À la suite des comparaisons, les valeurs aberrantes peuvent fréquemment être isolées.

II.3.1 Rayonnement solaire global (H_g)

La gamme de valeurs du rayonnement solaire global sous un ciel sans nuage est raisonnablement bien définie. Les valeurs appropriées peuvent être déterminées par référence aux valeurs publiées à l'endroit et au moment précis ou par référence à une longue série de données observées, dans lesquelles les valeurs quasi-maximales sont généralement liées à un ciel clair (voir par exemple Ritz[21]). Kondratyev[22] a compilé les valeurs représentatives du ciel clair du rayonnement solaire global, exprimant celles-ci en fonction de la latitude. Les valeurs d'échantillon sont incluses ici comme l'indique le tableau 1. D'après Berlyand et al. [10] un écart acceptable avec les valeurs figurant dans le tableau ne dépasse pas 20% en hiver et 15% en été, pour les terrains fiat.

II.3.1 Rayonnement solaire diffus (H_d)

Une méthode consiste à utiliser le fait que, avec un ciel clair, le rapport (H_g, H_d) qui sera généralement une fonction lisse de l'angle zénithal solaire, permet notamment de reconnaître rapidement « les mesures inhabituelles ». Si les données de rayonnement à incidence normale directe et globale sont disponibles, une approche préférable consiste à vérifier la cohérence des données en utilisant la relation où z est l'angle zénithal solaire.

II.3.3 Tests de cohérence à l'aide d'un rayonnement sur une surface inclinée mesurée

Souvent, dans les mesures du rayonnement de l'inclinaison, un certain nombre de capteurs seront positionnés à différentes angles de pentes et angles d'azimut. En procédant ainsi, il devrait y avoir une variation relativement douce entre les capteurs, car l'irradiation

répond aux changements de tels paramètres comme l'angle d'incidence du rayonnement direct et les facteurs de vue du ciel (skyview facteur) et de la surface sous-jacente.

Comme le montre la figure II. 6, les changements de pente et d'azimut peuvent être cohérents dans tout le réseau de capteurs, même si, comme dans ce cas, les conditions peuvent être partiellement nuageuses. Cependant, les valeurs aberrantes devraient être assez facilement isolées dans de telles situations.

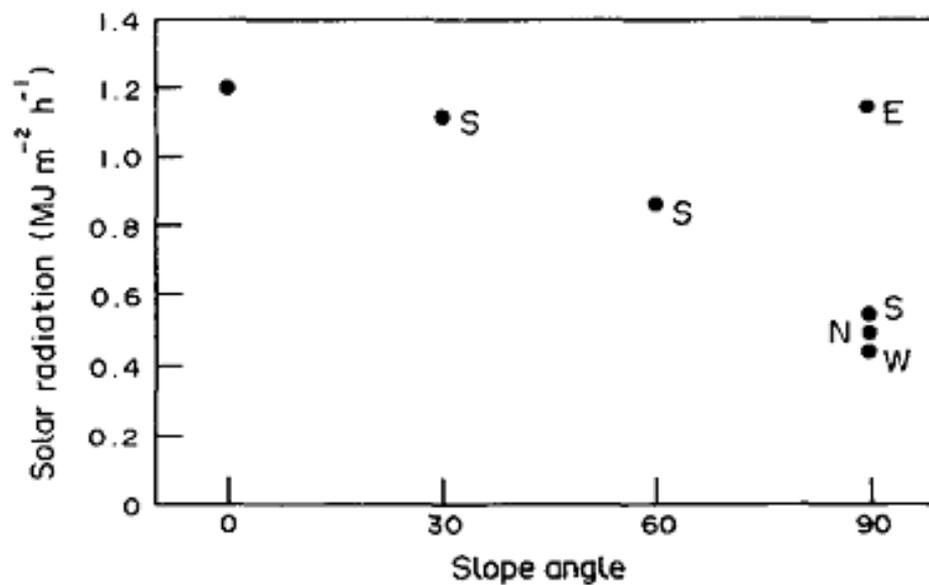


Fig. II. 6: Rayonnement solaire global mesuré pendant l'heure de la journée qui prend fin à 08h00 (heure locale apparente) le 11 juin 1980 à Vancouver, Canada. Les données des angles d'inclinaison et des orientations (E = Est, W = Ouest, S = Sud, N = Nord) donnés sous un ciel partiellement nuageux[9].

II.4 Aperçu général de la zone d'étude et de collecte de données

L'étude des différents paramètres qui régissent le climat (températures, vents, Précipitations, évaporation, humidité,) renseigne sur les caractéristiques climatiques du Site, elles interviennent dans le calcul de dimensionnement des systèmes solaire ainsi que dans l'estimation de l'apport quantitative et qualitative en matière d'énergie.

II.4.1 Caractéristiques Climatique

Le Sahara algérien est porteur d'une promesse nouvelle pour l'Algérie, elle deviendra sa source d'énergies renouvelables le soleil et le vent à l'horizon des quelques prochaines décennies. Le Sahara qui représente à lui seul 80 % du territoire de l'Algérie soit environ 2 millions de km². Un climat désertique règne sur le Sahara. Les amplitudes thermiques sont généralement considérables à cause des variations de températures et aussi extrêmement élevées pendant le jour et très basses durant la nuit. La variation des moyennes mensuelle de la température sur quelque site dans le désert algérien régions est données sur la figure II.7, qui montre des valeurs relativement élevées au cours de la saison estivale surtout au mois d'août.

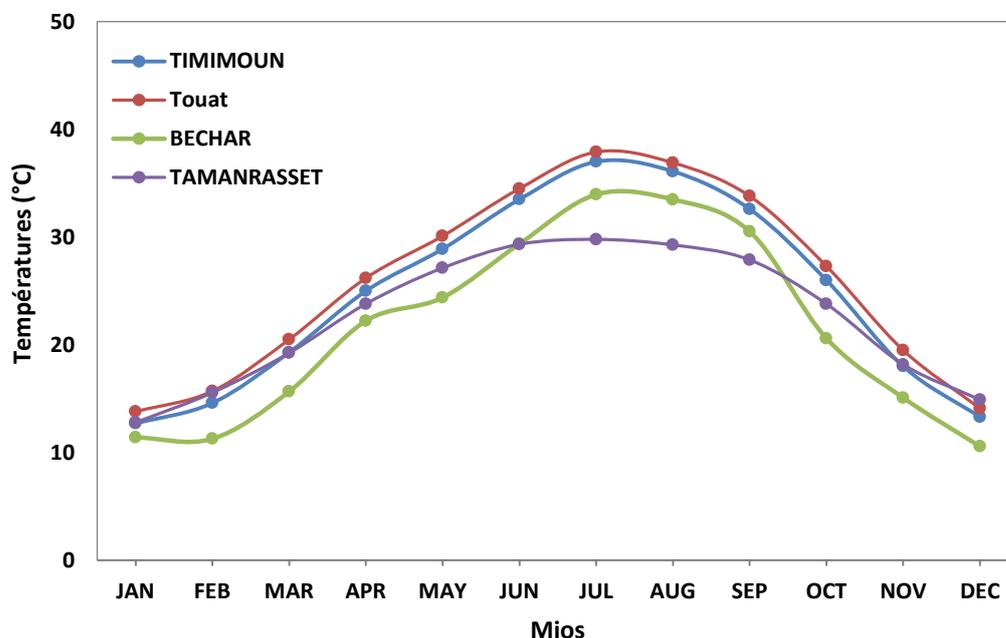


Fig. II. 7: Evolution moyennes mensuelle des températures dans la région sud .

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.8).

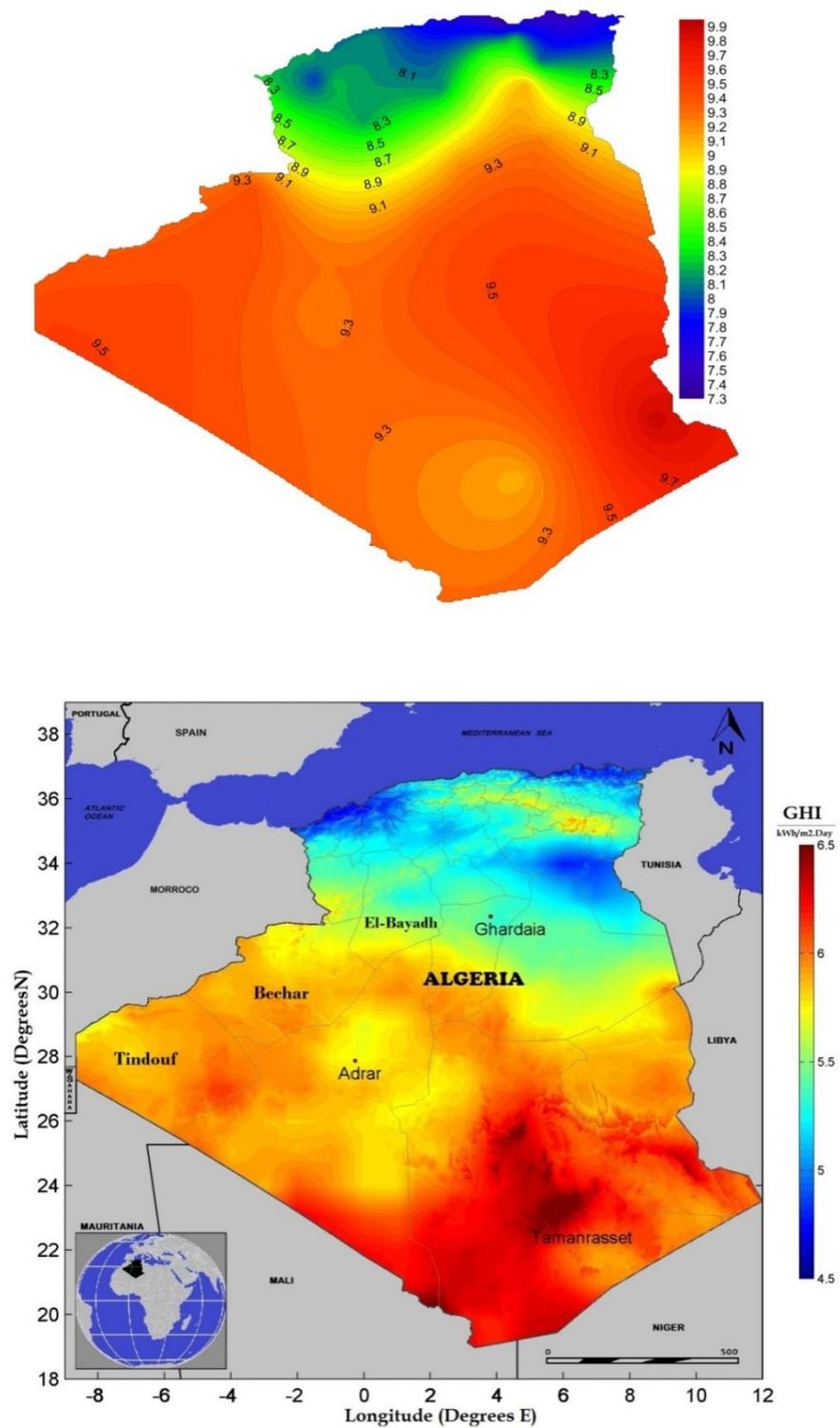


Fig. II. 8: Carte de la durée d'enseillent moyen annuel en Heure (1983-2012)[23].

Adrar est l'une des cinq wilayas du Grand Sud algérien, situé dans la région sud-ouest de l'Algérie. W. Adrarest bordée par Ghardaïa et Tamanrasset à l'est, Tindouf à l'ouest, Bechar et El Bayadh au nord, et la Mauritanie et le Mali au sud. Dans ce contexte, il convient de noter qu'W. Adrar est localisée dans la région de la « ceinture solaire », qui bénéficie d'un ensoleillement abondant de plus de 3000 heures de soleil par an, avec une moyenne quotidienne du rayonnement solaire supérieure à $6 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{jour}$ (figure II.9) [24]. En outre, Le Touat possède un climat désertique chaud. Ce climat est considéré comme étant de type BWh (selon la classification climatique de Köppen-Geiger), avec de longs étés chauds et des hivers courts et chauds, et les moyennes à 15 millimètres (0,59 po) de précipitations par an. Les températures estivales sont toujours élevées à mesure qu'ils approchent souvent 40°C . Les températures minimales nocturnes sont encore chaudes à environ 27°C . Même au début du mois de mai ou à la fin du mois de Septembre, les températures diurnes peuvent atteindre 45°C .

La région de Touat se caractérise par unedurée d'insolation importante, elle atteintune moyenne de 10heures par jour pour l'année ; avec un minimum automnal et un maximum estival. Cette Insolation influe sur la croissance et le développement des plantes. Mais elle est très bénéfique pour les systèmes énergétiques solaires (Pompape solaire aux fils du soleil). La Figure suivante représente la moyenne mensuelle de la durée d'insolation de l'année(1983-2012)et celle de l'insolation potentielle (la durée maximale d'insolation) :

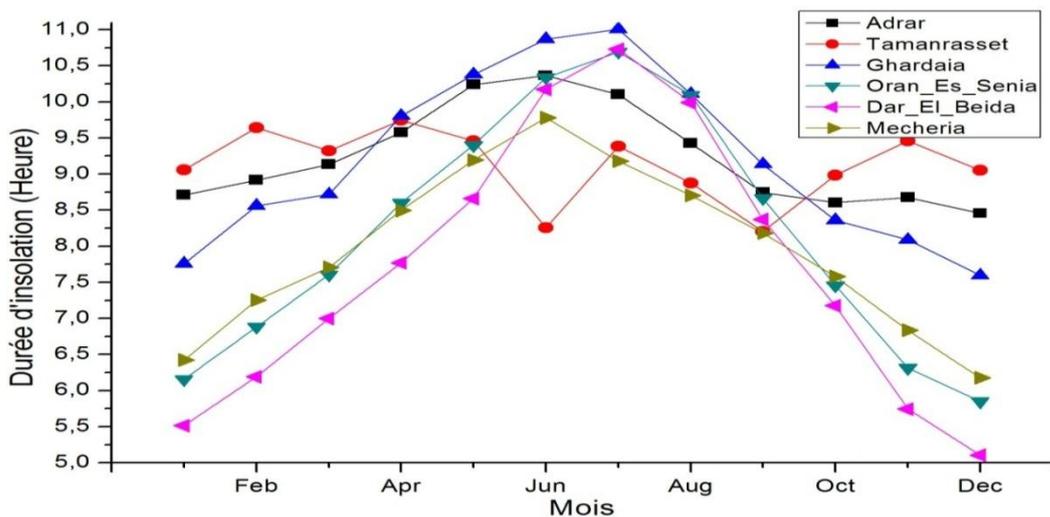


Fig. II. 9: La variation de la moyenne mensuelle des durées d'insolation quotidienne de six régions[23].

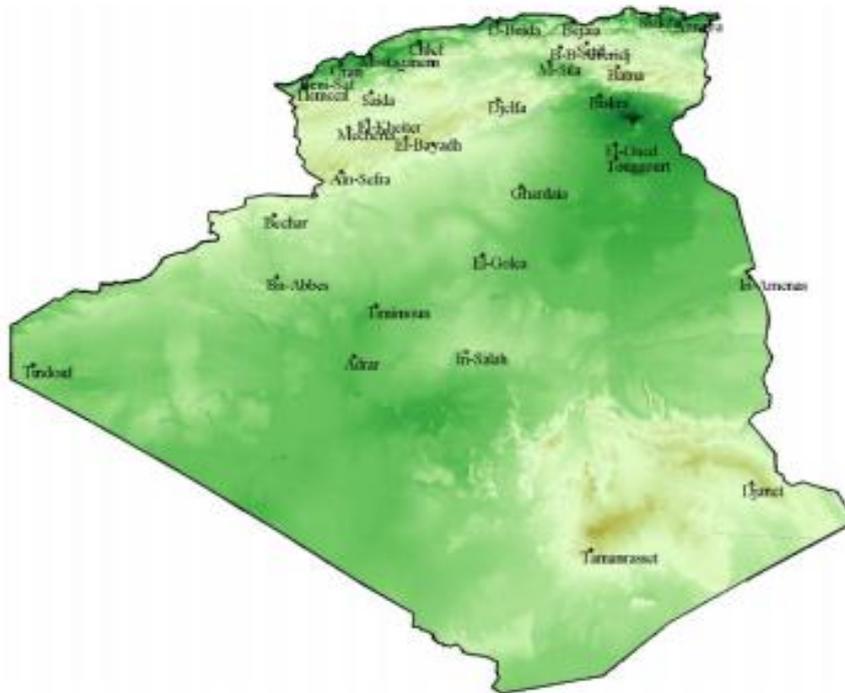


Fig. II. 10: Réseau d'Héliographe (1983-2012)[23].

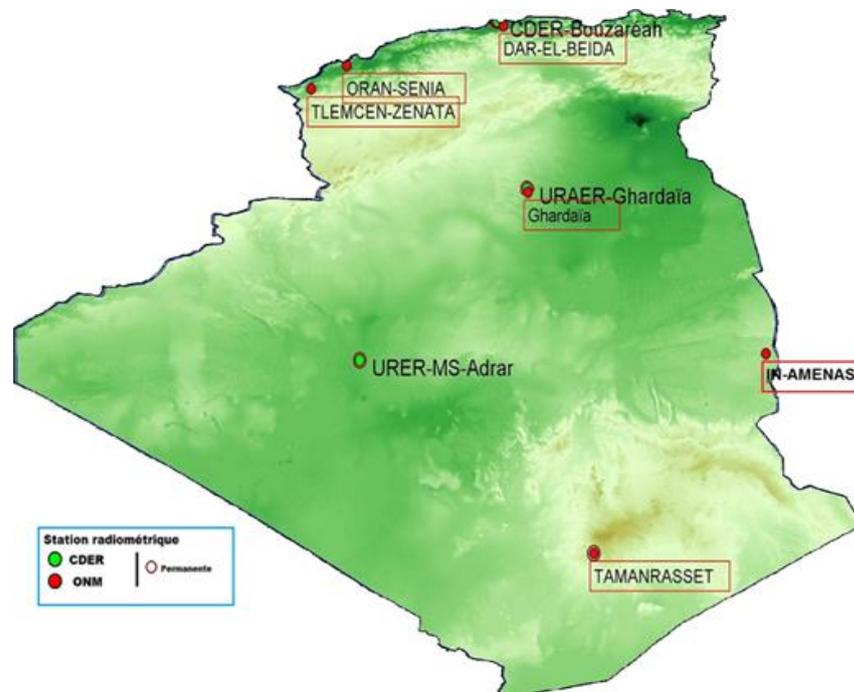


Fig. II. 11: Réseau pyranométrique (ONM et CDER).

II.4. 2 Données de Radiation Solaires en Algérie

Le centre de climatologie de l'Algérie est sous la responsabilité de l'Office national de météorologie. La mesure du rayonnement solaire en Algérie est réalisée par l'Office National de la Météorologie (O.N.M) à travers son réseau constitué de quatre-vingt et une (81) stations météorologiques mesurant la durée d'insolation. La Figure. II.11 présente la distribution géographique des stations. Parmi celles-ci, seules sept (07) stations équipées de pyranomètres et servant donc à mesurer les composantes diffuses et globales reçues sur le plan horizontal, alors que deux stations seulement sont équipées de pyréliomètres mesurant le rayonnement direct, auquel s'ajoutent quelques compagnes de mesures du rayonnement global réalisée par des universités ou des centres de recherche. De plus, ces séries de mesures comportent des données manquantes causées par des périodes plus ou moins longues de non fonctionnement des appareils de mesure. La répartition géographique de l'ensemble des stations équipées de pyranomètres est donnée par la Figure. II.12.

Les données utilisées dans cette étude sont celles de la recherche réalisée pendant six années complètes (2010-2015). Le site étudié est celui de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER/MS) à Touat, situé dans le sud de l'Algérie avec les coordonnées géographiques suivantes $27^{\circ} 53'$ Nord et $0^{\circ} 11'$ Ouest. Notre travail consiste à comparer le rayonnement diffus sur un plan horizontal calculé par ces modèles parallèlement à ceux mesurés sur le site de Touat. Les mesures du rayonnement solaire (global et diffus) sont effectuées par le pyranomètre K & Z CMP21 (Figure 1). Le dernier étalonnage de l'instrument a été effectué en février 2011. De plus, la durée de l'ensoleillement, qui est l'un des paramètres les plus importants, a été mesurée dans toutes les stations avec l'héliographe Campbell-Stokes.

Les techniques de contrôle de la qualité de l'information sont importantes pour une application ou une analyse, qui vise à aider à atténuer les erreurs. Les conditions de traitement des mesures de contrôle de la qualité lors de la collecte des données sont les suivantes [24, 25]:

- **La condition d'angle Zenith ($Z < 85$)**

- $I_g < 1.50 E_0 \cos^{1.2} Z + 100$

- $I_d < 0.95 E_0 \cos^{1.2} Z + 50$

- $I_b < 1100 + 0.03Elev$ and $I_b < E_0$
- $Abs(Closr) < 5\%$

where $Elev$ is the elevation (m) and $Closr = 100 [(I_b \cos Z + I_d - I_g) / I_g]$.

- **La condition de la fraction diffuse (F_d)**
 - Case I: $Z < 75$ $F_d < 1.05$ for $I_g > 50$
 - Case II: $Z > 1.10$ $F_d < 1.05$ for $I_g > 50$

Après le traitement des données, les valeurs manquantes pour les séquences globales et diffuses ont été remplacées par des valeurs interpolées en utilisant des techniques de l'analyse des séries temporelles grâce à des programmes automatisés. De manière plus générale, cette technique prévoit que s'il y a certains jours qui ont, soit une valeur manquante, soit des données erronées du lever au du coucher du soleil. Dans ce cas, la valeur sera remplacée par la moyenne des deux valeurs disponibles les plus proches (les données mesurées précédentes et suivantes les plus proches). Les mesures manquantes représentent environ 11% de l'ensemble de la base de données pour la région de Touat. Les mesures de l'irradiation horizontale globale et diffuse de ces stations ont été transformées en données de rayonnement solaire quotidien au moyen d'une intégration trapézoïdale, et afin de développer et de tester des modèles empiriques utilisés dans cette étude, les ensembles de données mentionnés ci-dessus sont moyennés pour chaque mois en vue d'obtenir la moyenne mensuelle des données quotidiennes. Les informations fournies par ces stations comprennent la température de l'air (°C) et l'humidité relative (%). Ces données ont été vérifiées à partir des méthodes simples des contrôles de la qualité proposée par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) [26].

Dans notre étude, une qualité optimale des données disponibles a été choisie à la station. En ce qui concerne les données utilisées dans le site de Touat, il faut souligner que ces données ont également été divisés en une estimation des paramètres et des jeux de données d'essai. Le premier ensemble de données couvre la période de 2010 à 2012, tandis que le deuxième ensemble de données couvre une période de trois ans entre 2013 et 2015. En effet, le premier ensemble de données est utilisé pour la construction du modèles et

d'analyse de performance statistique, tandis que le second ensemble de données est utilisé pour évaluer les précisions des modèles sélectionnés (Tableau II. 3).

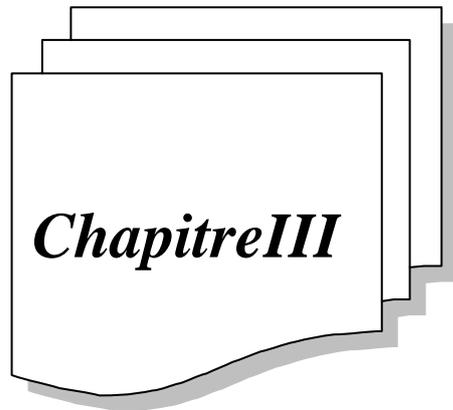
Tableau. II. 2. Les données géographiques et les valeurs moyennes des données expérimentales, les périodes d'enregistrement des données des stations étudiées.

Station	Touat	Capteur	Kipp&Zonen CMP21
Lat (°N)	27.88	M. irradiance opérationnelle	4000 W/m ²
Lon (°E)	-0.27	Bande spectrale	270 to 3000 nm
Ele (m)	269	Sensibilité	7 to 14 μV/W/m ²
Période de données	2010-2015	Réponse directionnelle	<±10 W/m ²
GH (MJ/m ² .day)	6.89	Non-stabilité (Changement/Année)	< 0.5%
S (Hour)	9.27	Réponse de température	<1 % (-20 °C to 50 °C)
T° (°C)	25.9	Temps de réponse	< 5 s
RH (%)	23	Non-linéarité	<±0.2 %

I.9 CONCLUSION

Dans le présent chapitre, les divers dispositifs et instruments nécessaires pour réaliser les différentes données mesures et à différentes échelles du temps ont été présentées, avec contrôle de la qualité des données de rayonnement solaire. Les caractéristiques principales du site de Touat étaient les suivantes ; le site de Touat est caractérisé par une durée astronomique du jour relativement longue (varie entre 10,26 et 13,74 heures), un taux d'ensellement très élevé (plus de 80% annuellement) et une hauteur max du soleil varie entre 38,67° et 85,57°. Le site de Touat, du point de vue climat, il est caractérisé par un climat purement saharien chaud, sec et ensoleillé presque durant toute l'année. Cet aspect favorise fortement les applications de l'énergie solaire et beaucoup d'autres types d'énergies renouvelables (éolienne, thermique.). Pour connaître l'effet des fluctuations,

notamment annuelles sur les différents paramètres radiométriques et météorologique, il nécessaire d'effectuer des analyses approfondies sur les séries statistiques.



***Corrélation de la Fraction
Diffuse de l'Irradiation Solaire
en Touat***

Chapitre III

Corrélation de la Fraction Diffuse de l'Irradiation Solaire en Touat

III.1 Introduction

L'énergie solaire reçue sur la terre est, en chiffres ronds, autour de 10.000 fois la quantité totale d'énergie consommée par l'humanité tout entière. En d'autres termes, capturant 0,01% de cette énergie nous permettrait de se passer du pétrole, du gaz, du charbon et de l'uranium. Les informations sur les flux solaires sont devenues un enjeu important pour les questions relatives aux énergies renouvelables découlant des crises pétrolières et d'autres problèmes écologiques, d'où la nécessité de mesures fiables du rayonnement solaire de surface. La quantité de rayonnement solaire qui frappe une surface repose sur divers facteurs affectant, comme la position du soleil dans le ciel et la clarté de l'atmosphère, ainsi que sur la nature et l'orientation de la surface de frappe.

Prévoyant, la quantité de fraction diffuse horaire (F_d), est la plus haute importance dans la construction de systèmes d'énergie ainsi qu'une évaluation précise de l'environnement thermique dans les bâtiments et plusieurs applications d'ingénierie sur la terre, avec environ 20% de réflexion moyenne au sol de l'irradiation globale [1]. Malheureusement,

les mesures de données sont quasiment inexistantes dans les zones rurales. Par conséquent, il est nécessaire de trouver un modèle de fraction diffuse, corrélant le rayonnement diffus au rayonnement global, qui est habituellement disponible dans les rapports des stations météorologiques. le rayonnement solaire global sur un plan horizontal (I_g) comprend deux sections [2]: le rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal (I_d) et le rayonnement direct sur un plan horizontal (I_b).

Dans ce cadre, on peut définir l'indice de clarté horaire k_t comme étant le rapport entre le rayonnement global horaire observé et le rayonnement extraterrestre horaire calculé sur un plan horizontal [2]:

$$k_t = \frac{I_g}{I_0} \text{ (III- 1)}$$

La fraction diffuse horaire (F_d) prend la forme,

$$F_d = \frac{I_d}{I_g} \text{ (III- 2)}$$

La valeur du rayonnement solaire horaire hors l'atmosphère de la terre (extraterrestre) dans l'unité (W/m^2) est définie par l'équation suivante :

$$I_0 = (12/\pi) \cdot I_{sc} \cdot E_0 \int_{\omega_2}^{\omega_1} (\cos \delta \cos \varphi \sin \omega + \sin \delta \sin \varphi) d\omega \text{ (III- 3)}$$

Où,

I_{sc} : est la constante solaire égale à 1367 W / m^2 ,

φ : Latitude du lieu,

E_0 : facteur de correction d'excentricité,

δ : est la déclinaison solaire en degrés,

ω_2 et ω_1 : Sont respectivement, le temps solaire du coucher et de lever du soleil en degrés.

La première corrélation pour prédire les modèles de la fraction diffuse de l'irradiation solaire horaire est construite par Liu et Jordan [3]. L'objectif de nombreuses distributions de décider de l'irradiation diffuse horaire par la méthode des connexions qui relie la

fraction diffuse horaire (F_d) avec l'indice de clarté horaire (k_t) en prenant en compte les polynômes de différentes demandes. Parmi les modèles existants dans la littérature, y compris, mais sans s'y limiter : l'élaboration de Reindl, Beckman et Duffie (1990) [4], de Khalil et Shaffie (2013) [5].

Le but principal de cette étude est de développer un nouveau modèle pour identifier le modèle de la fraction radiométrique diffuse le plus approprié pour caractériser la région de Touat, au grand désert de sud d'Algérie. Les 16 modèles d'estimation radiométrique réalisés, sont testés et validés, tout le ciel, sur une période de deux ans. Plusieurs indicateurs statistiques sont employés pour évaluer la précision des différents modèles.

III.2 Méthode d'estimation

De nombreux modèles sont disponibles pour estimer la fraction diffuse horaire de l'irradiation sur un plan horizontal. Mais, ils nécessitent des informations sur le rayonnement global conjointement sur une surface horizontale. Après un bref résumé, plusieurs études ont été identifiées, qui offrent des modèles computationnels de la fraction diffuse horaire à n'importe quel site pendant une période indiquée. Parmi les modèles existants dans la littérature, nous avons sélectionné quelques modèles pour notre étude (cf. Tableau. III. 1). En général, les modèles empiriques de la fraction diffuse horaire sont classés en deux catégories; les modèles multizone, la plupart des modèles existants divisent le domaine de l'indice de clarté horaire (k_t), dans au plus trois sous-domaines (entre deux et trois zones différentes), ils ont été utilisés pour calculer la fraction diffuse horaire en fonction de l'indice de clarté horaire (k_t), et de plusieurs variables climatiques, y compris la température ambiante et l'humidité relative (HR), $F_d = f(k_t)$, et les modèles à zone unique, ces modèles sont relativement nouveaux. Pour l'estimation de la fraction diffuse horaire, les modèles à zone unique sont liés à l'indice de clarté horaire (k_t) et, $F_d = f(k_t)$.

La recherche à ce jour, a eu tendance à mettre surtout l'accent sur les modèles à zone unique plutôt que sur les modèles aux zones combinées, nous avons sélectionné quelques modèles pour notre étude inclus dans le Tableau. III. 1.

III.3 Source des données

Les données utilisées dans cette étude sont celles de l'ensemble des deux années 2014 et 2015. Le site étudié est celui de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS), de la wilaya d'Adrar, situé dans le sud de l'Algérie avec les données géographiques suivantes : 27 ° 53° Nord et 0 ° 11° Ouest. Notre travail signifie que, nous devons comparer un rayonnement diffus sur un plan horizontal calculé par ces modèles avec ceux mesurés sur le site de Touat[6]. Les mesures d'irradiation diffuse sont effectuées par le pyranomètre K & Z CMP21 (Fig. III. 1). Les techniques de contrôle de la qualité de l'information sont importantes pour une application ou une analyse, qui vise à aider à atténuer les erreurs. Les conditions de traitement des mesures de contrôle de la qualité lors de la collecte des données sont les suivantes[7, 8]:

- **Condition d'angle Zenith ($Z < 85$)**

1. $I_g < 1.50E_0 \cos^{1.2} Z + 100$
2. $I_d < 0.95E_0 \cos^{1.2} Z + 50$
3. $I_b < 1100 + 0.03Elev$ and $I_b < E_0$
4. $Abs(Closr) < 5\%$

where $Elev$ is the elevation (m) and $Closr = 100 [(I_b \cos Z + I_d - I_g) / I_g]$.

- **Fraction diffuse (F_d)**

5. Case I: $Z < 75$ $F_d < 1.05$ for $I_g > 50$
6. Case II: $Z > 1.10$ $F_d < 1.05$ for $I_g > 50$

III.4 Sélection et validation du modèle

Afin de vérifier de chaque modèle est statistiquement évalué à travers six indicateurs statistiques, biais d'erreur moyenne (MBE), Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), Racine carrée de différence quadratique moyenne (RMSD), coefficient de détermination (R), Nash-Sutcliffe (NSE) et test de l'erreur statistique (TS). Le meilleur modèle pour le site considéré est sélectionné en fonction de la supériorité des valeurs des indices statistiques par rapport aux autres modèles. Les équations de ces indicateurs statistiques sont [19-24]:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_n (H_{i,m} - H_{i,c}) \quad (\text{III- 4})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (H_{i,m} - H_{i,c})^2} \quad (\text{III- 5})$$

$$RMSD = \frac{100}{\bar{H}_{i,m}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (H_{i,m} - H_{i,c})^2} \quad (\text{III- 6})$$

$$R = \frac{\sum_n (H_{i,c} - \bar{H}_c)(H_{i,m} - \bar{H}_m)}{\sqrt{\sum_n (H_{i,c} - \bar{H}_c)^2 \sum_n (H_{i,m} - \bar{H}_m)^2}} \quad (\text{III- 7})$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_n (H_{i,m} - H_{i,c})^2}{\sum_n (H_{i,m} - H_{i,c})^2} \quad (\text{III- 8})$$

$$TS = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (\text{III- 9})$$



Fig. III. 1: Pyranomètre pour mesurer les données de irradiations diffuses sur le site de la cellule de test.

III.5 Résultats et discussion :

Dans cette section, nous présentons une analyse des données statistiques des examens de différents modèles en utilisant l'ensemble des données mesurées au sol de l'irradiation horizontale globale et diffuse sur une période de deux ans à Touat. Dans un premier temps, un test de contrôle de la qualité est appliqué à nos ensembles de données basés sur la méthodologie Gueymard [8]. De plus, en appliquant ces critères aux données en Touat, le nombre de points valides a été réduit de 74,6% par rapport aux données originaux, en prenant également en compte les heures de nuit aussi. Il a adopté une correction

supplémentaire pour limiter les valeurs minimales et maximales de la fraction diffuse estimée aux valeurs de 0 et 1, respectivement, afin d'éviter les résultats non naturels. Et enfin, la valeur maximale admissible de l'indice de clarté horaire (k_t), a été forcée à 1 comme le montre la figure III.2. Après avoir appliqué un processus de filtrage décrit ci-dessus, l'ensemble de données de fraction diffuse par opposition à (k_t).

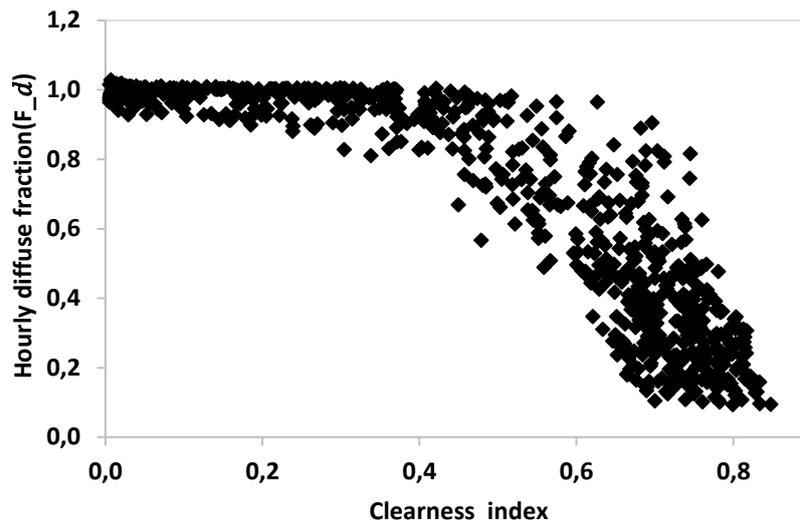


Fig. III. 2:Données expérimentales de la fraction diffuse horaire en fonction de l'indice de clarté (k_t).

La figure III.3 donne un exemple d'un des indicateurs statistiques, MBE(%). Le premier ensemble d'analyses a examiné l'impact du biais d'erreur moyenne MBE(%), où les valeurs de MBE (%) sont élevées dans le premier groupe (Modèles multi-zones) comprise entre 6% à 67%, alors qu'il a changé entre 1,2% à 9% dans le deuxième groupe (modèles à zone unique).

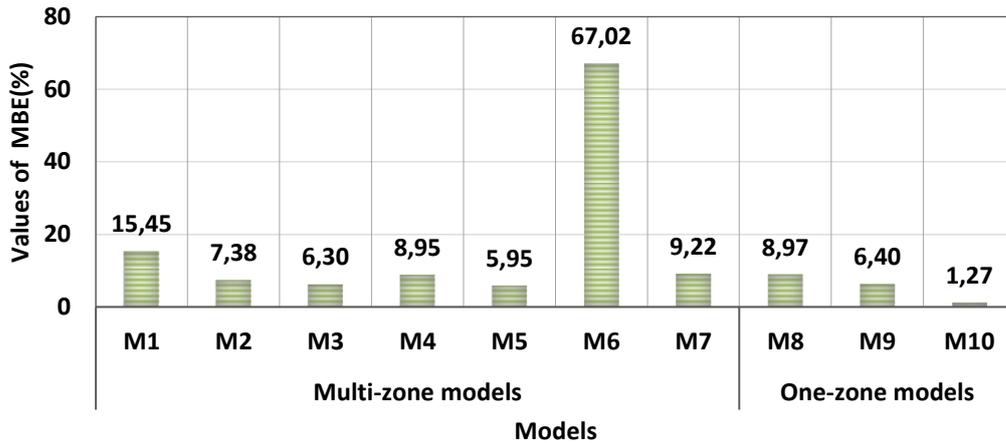


Fig. III. 3: Valeurs du biais d'erreur moyenne MBE (%) des modèles nommés.

Selon les résultats filtrés, nous allons adopter une fonction à un seul paramètre, c'est-à-dire, une fonction en termes de l'indice de clarté (k_t), seulement dans le travail de modélisation. Cependant, les deux catégories utilisent le modèle linéaire par morceaux, le deuxième et le troisième ordre ainsi que la formule logistique sigmoïde, pour déterminer le modèle de la fraction diffuse dans la région de Touat. Les résultats des coefficients de régression sont donnés par les expressions suivantes:

$$A\# 1. F_d = \begin{cases} 0.955 - 0.099k_t & \text{for } k_t \leq 0.35 \\ 11.87k_t^3 - 22.116k_t^2 + 11.485k_t - 0.866 & \text{for } k_t > 0.35 \end{cases} \quad (\text{III- 10})$$

$$A\# 2. F_d = \begin{cases} 0.996 - 0.130k_t & \text{for } k_t \leq 0.40 \\ 1.800 - 2.212k_t + 0.194k_t^2 & \text{for } 0.40 < k_t \leq 0.80 \\ 0.140 & \text{for } k_t > 0.80 \end{cases} \quad (\text{III- 11})$$

$$A\# 3. F_d = 1 / (1 + \exp(-5.979 + 9.101k_t)) \quad (\text{III- 12})$$

$$A\# 4. F_d = 0.142 + 0.847 / (1 + \exp(-7.121 + 11.428k_t)) \quad (\text{III- 13})$$

Tableau. III. 1: Résultats du modèle d'erreur pour les données hors-échantillon en 2014, à Touat.

Models	MBE	RMSE	RMSD%	R	NSE
M10	0.013	0.125	19.963	0.931	0.825
M5	0.059	0.145	23.188	0.924	0.826
M3	0.063	0.145	23.107	0.926	0.825
M9	0.064	0.143	22.808	0.931	0.836
A1	0.006	0.125	19.920	0.930	0.834
A2	0.016	0.121	19.321	0.935	0.863
A3	-0.021	0.120	19.184	0.937	0.845
A4	-0.021	0.120	19.202	0.937	0.842

Le tableau.III. 2 donne des erreurs dans les différents modèles d'estimation. Les rayonnements estimées par les modèles empiriques et celles mesurées sur le site de Touat sont pratiquement identiques. Par conséquent, les erreurs commises sont faibles pour les huit modèles testés en dessous de MBE (%) <2,1% et (R%), les Nash-Sutcliffe (NSE%) dépassant 92%, et 80%, respectivement. Sur la base de l'évaluation des fonctions du modèle proposé, les modèles Ad3 et Ad4 donnent plus de précision quelles que soient les conditions climatiques.

Lors de l'ajustement d'une variété de modèles aux mêmes données, certains critères objectifs sont requis pour déterminer le meilleur ajustement. En utilisant la méthode critère d'information d'Akaike (AIC), définie comme avec RSS, p est la somme résiduelle des carrés et le nombre de paramètres du modèle.

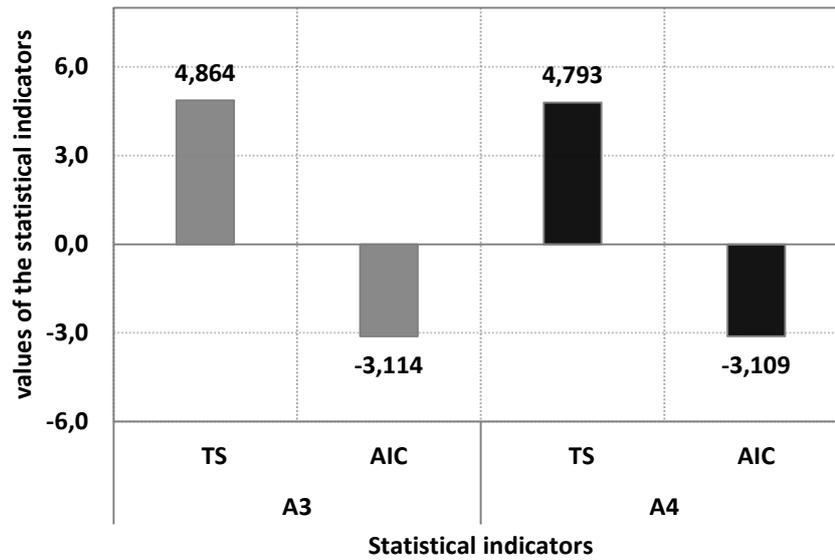


Fig. III. 4: Comparaison du test de l'erreur statistique (TS) et critère d'information d'Akaike ($AIC \times 10^3$) des modèles A3 et A4.

Comme illustré à la figure III.4, la comparaison du test de l'erreur statistique (TS) et le critère d'information d'Akaike (AIC) pour les meilleurs modèles A3 et A4. La meilleure régression est choisie via le test AIC et la valeur inférieure de TS. En conséquence, le modèle A4 a une meilleure performance que le modèle A3. Comme l'indique la figure III.5, les résultats qui ont été estimés à l'aide des meilleurs modèles (A4) pour évaluer la fraction diffuse horaire en Touat.

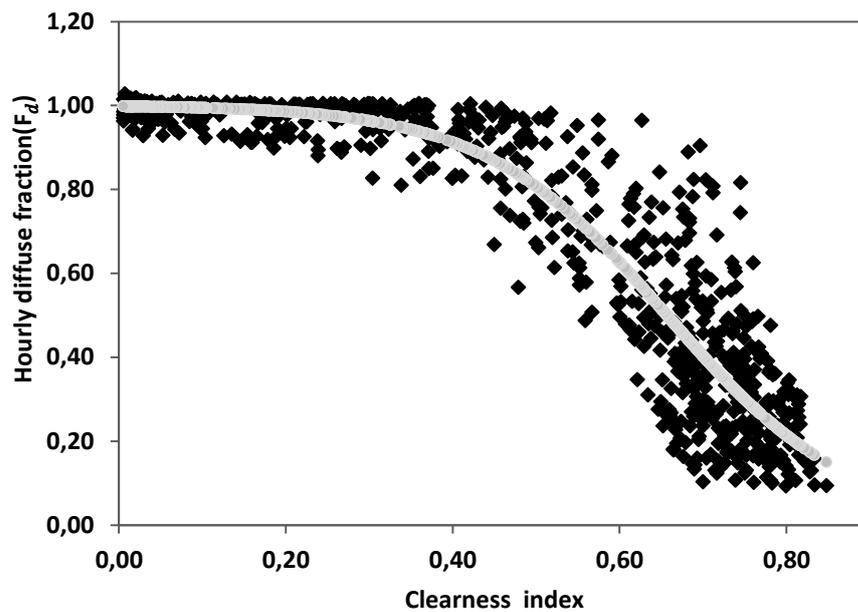


Fig. III. 5: L'estimation du meilleur modèle et des données expérimentales de la fraction diffuse horaire sur la région de Touat (2015).

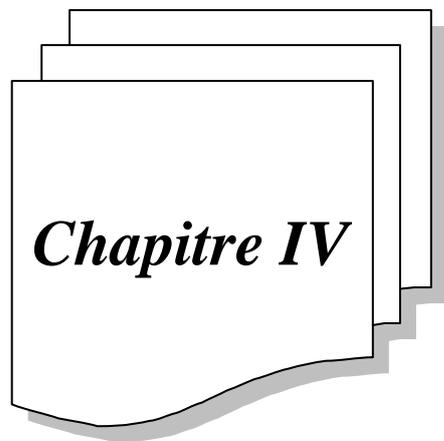
III.6 Conclusion

L'objectif principal de la présente étude était de développer un nouveau modèle de corrélation pour estimer la Fraction Diffuse de l'Irradiation Solaire dans la région de Touat. Dans la littérature, il y a dix corrélations de la fraction diffuse de l'irradiation solaire choisies et neuf modèles établis, puis classés en deux catégories: modèle à zone unique et modèle multizones. En outre, le modèle logistique sigmoïde, c'est-à-dire ; $F_d = 1 / (1 + \exp(-5.979 + 9.101k_t))$ sur la base des évaluations des six indicateurs statistiques, a la meilleure performance au cours de tous les modèles testés. Les résultats de cette étude serviront à élaborer les activités du projet d'énergie solaire dans la région de Touat, dans le Désert sud-algérien.

Tableau. III. 2: Résume les modèles proposés dans les deux catégories.

Modèle	Année	Réf	La fraction diffuse (d)		
			intervalle (I)	intervalle (II)	intervalle (III)
<i>Les modèles multizone</i>					
M1	1977	[9]	0.94	$\frac{1.29 - 1.19k_t}{1.00} - 0.33k_t$	-
M2	2003	[10]	$0.9995 - 0.05k_t - 2.4156k_t^2 + 1.4926k_t^3$		-
M3	1977	[11]	$1 - 0.249k_t$	$1.557 - 1.84k_t$	0.177
M4	1984	[12]	0.915	$1.135 - 0.9422k_t - 0.3878k_t^2$	0.215
M5	2001	[13]	$0.995 - 0.081k_t$	$0.724 + 2.738k_t - 8.32k_t^2 + 4.967k_t^3$	0.180
M6	1994	[14]	$1.0086 - 0.78k_t$	$0.9995 - 0.05k_t - 2.4156k_t^2 + 1.49263k_t^3$	0.215
M7	2006	[15]	0.987	$0.94 + 0.937k_t - 5.01k_t^2 + 3.20k_t^3$	0.177
<i>les modèles à zone unique</i>					
M8	2001	[16]		$\frac{1}{1 + \exp(-4.90 + 8.78k_t)}$	
M9	2008	[17]		$\frac{1}{1 + \exp(-5.003 + 8.602k_t)}$	
M10	2016	[18]		$0.13 + 0.86 \frac{1}{1 + \exp(-6.29 + 8.78k_t)}$	

..



***Estimation du flux solaires sur
un plan inclinée***

Chapitre IV

Estimation du Flux Solaires sur un Plan Incliné

IV.1 Introduction

La performance des systèmes de conversion d'énergie qu'elle soit photovoltaïque ou thermique dépendra fortement de l'orientation et de l'angle d'inclinaison de leurs plant domaines de collecte par rapport à l'horizon. Généralement, (pour des considérations techniques et économiques), ces systèmes sont installés dans une direction fixe selon l'emplacement du site considéré pour une collecte d'une l'énergie solaire maximale. Afin d'augmenter l'efficacité énergétique de ces systèmes au cours d'une période donnée, il est nécessaire dès le départ de réaliser une bonne étude qui prend en considération la variation de l'irradiation en fonction de la valeur de l'angle d'orientation. En outre, le fait de connaître l'irradiation solaire diffuse et son contribution au rayonnement solaire global (RSG) est très importante, car une surface inclinée reçoit à la fois irradiation solaire diffuse et la composante direct du rayonnement solaire[1-4]. Malheureusement, ce type de données n'étant pas disponibles dans la plupart des pays en développement.

La couverture très limitée des réseaux de mesure de rayonnement exige le recours au développement des modèles empiriques dans le but d'estimer les différentes composantes du rayonnement solaire. En dépit de la disponibilité de grandes quantités de données pour les surfaces horizontales et sa prédominance, les données des surfaces inclinées sont plus adéquates et préférables à l'évaluation de l'énergie solaire. De nombreuses tentatives ont été faites pour fournir des modèles mathématiques en tant qu'instrument d'observation pour réaliser une base de données avec des valeurs calculées [5, 6].

Un nombre relativement considérable de modèles de radiations inclinées a été proposé et qui incluait des modèles isotropes [7]. Comme ceux de Tian et al. [8], et des modèles anisotropes comme ceux de Klucher [9]. Perez et al. [10] ont élaboré deux modèles d'irradiation diffuse qui sont des versions plus simples de l'original de Perez qui a été largement utilisé pour évaluer l'irradiation inclinée globale à court terme, basée sur des données mesurées de l'irradiation horizontale globale et directe [11, 12].

Les objectifs principaux de ce document sont les suivants :

1. Évaluation du potentiel du rayonnement solaire à Touat, basée sur des mesures au sol.
2. Estimation du rayonnement solaire global sur une surface inclinée dans la région de Touat en utilisant des différents modèles empiriques.
3. Comparer les résultats des modèles avec des données mesurées basées sur des paramètres statistiques, y compris MBE, RMSE et NSE.

IV.2 Modélisation mathématique de l'irradiation globale inclinée

Dans la littérature, le rayonnement solaire global incident sur un plan incliné de l'angle (β) est la somme des trois composants [13]:

(i) la composante de faisceau de l'irradiation directe, B_B , (ii) le D_B diffus, (iii) La composante réfléchie, R_B , i.e.,

$$I_{\beta} = B_{\beta} + D_{\beta} + R_{\beta} \quad (\text{IV-1})$$

Qui change d'un modèle à l'autre (en fonction de l'isotropie et de l'anisotropie). Il existe de nombreux modèles de prédiction qui ont été développés pour prédire le rayonnement solaire sur une surface inclinée, en fonction de variables, telles que la latitude et la longitude.

IV.2.1 Composante horizontale directe

L'irradiation directe sur des surfaces inclinées est donnée comme [14, 15]:

$$B_{\beta} = B_n \cos(\theta) = B r_b \quad (\text{IV-2})$$

Où B est le rayonnement direct horizontal et r_b est un facteur de conversion du faisceau de rayonnement reçu sur un plan horizontal, [16]:

(IV-3)

L'angle d'incidence i peut être dérivé par [17]:

(IV-4)

Où δ est l'angle de déclinaison du soleil, ϕ est la latitude du lieu, ω : est L'angle horaire. L'angle zénithal θ est calculé comme suit :

(IV-5)

IV.2.2 composante réfléchie

La partie réfléchie de l'irradiation solaire est donnée par [18]:

$$R_b = G r (1 - \cos b) / 2 \quad (\text{IV-6})$$

Où G, ρ : Sont l'Irradiation horizontale globale et le coefficient de réflexion de la lumière diffuse du sol (adopté 0,30 pour le site de Touat).

IV.2.3 Composante Diffuse Horizontale

De nombreuses approches ont été proposées pour tenter de quantifier la composante réfléchie du rayonnement solaire calculer le rayonnement diffus sur un collecteur pour toute inclinaison, en supposant que les rayons réfléchis sont diffusés, ainsi que les coefficients de réflexion du faisceau et des rayons diffus sont identiques [15]. L'évaluation du rayonnement diffus et réfléchi vers le soleil par conséquent soumise au facteur de transposition de la réflexion au sol, r_d peut être écrit :

$$D_{\beta} = D r_d \quad (\text{IV-7})$$

IV.2.3.1 Modèles isotropes

Le modèle de ciel isotrope est le modèle le plus courant et le plus simple. Il suppose une distribution uniforme de l'irradiation solaire diffuse sur la voûte céleste. Les parties circumsolaire et brillance de l'horizon sont supposées égales à zéro. Une composante diffuse de tout le ciel qui est uniformément rayonnée sur la voûte céleste.

A. Modèle de Badescu (Ba)

La relation de Badescu pour calculer le rayonnement global sur un plan incliné d'angle (β) est donnée comme suit [19]:

$$r_d = (3 + \cos 2\beta) / 4 \quad (\text{IV-8})$$

B. Modèle de Tian (Ti)

Tian et al. (2001) présenté le modèle ci-dessous pour prédire GRS [8] :

$$r_d = (1 + \beta / 180) \quad (\text{IV-9})$$

C. Modèle de Korokanis (Ko)

Le modèle proposé par Korokanis (1986) [23] basé sur l'hypothèse a été interrogé à Hamilton et Jackson [24] a changé le modèle de Liu et Jordan comme suit :

$$r_d = (2 + \cos \beta) / 3 \quad (\text{IV-10})$$

D. Modèle de Liu et Jordan (LJ)

Ce modèle suppose que le rayonnement diffus du ciel est isotrope, ce modèle est proposé par Liu et Jordan [25]

$$r_d = (1 + \cos \beta) / 2 \quad (\text{IV-11})$$

IV.2.3.2 Modèles anisotropes

Ce modèle suppose que le rayonnement diffus du ciel est composé de deux composantes, isotropes et circumsolaire (ciel près du disque solaire) [20, 21]. Les anisotropes (is-cs) sont développés qui prennent en compte les composantes circumolaires diffuses et / ou brillance de l'horizon sur des surfaces inclinées pour estimer l'effet anisotrope et calculer une valeur plus précise de R_d [17]. Les anisotropes (is-cs-hb) sont divisés la partie du ciel diffusée dans les trois éléments suivants (iso -cs-cs)[5] : la partie coupole isotrope, la partie brillance de circumsolaire et la partie brillance de l'horizon. Pour cette raison, nous avons sélectionné Huit modèles sont les plus largement utilisés.

A. Modèle de Muneer (Mu)

Le modèle de Muneer[22] estime l'intensité du rayonnement diffus comme suit:

$$r_d = F_M r_b + (1 - F_M) T_M \quad (\text{IV-12})$$

Où F_M est une fonction de clarté composite selon les conditions particulières du ciel et de l'azimut. Pour les surfaces ombragées et les surfaces orientées vers le soleil dans des conditions de ciel couvert, F_M est nul, alors que $F_M.F_H$ pour un ciel dégagé et un ciel partiellement nuageux, le facteur d'inclinaison est donné par la relation :

$$T_M = \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \frac{2b}{\pi(3 + 2b)} \left(\sin \beta - \beta \cos \beta - \pi \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)$$

B. Modèle de Ma-Iqbal (MI)

Ma-Iqbal [23] a proposé un modèle divisant le rayonnement diffus en rayonnement émis par la région circumsolaire et le rayonnement émis par le reste du ciel. La nébulosité est déterminée sur la base de l'indice de clarté de l'atmosphère k_t ,

$$r_d = k_t r_b + (1 - k_t) \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{IV-13})$$

Où :

$k_t = G/G_{\text{ext}}$ est l'indice de clarté ordinaire (c'est-à-dire, la surface globale du rayonnement solaire, G , normalisé par le rayonnement atmosphérique extra- correspondant, G_{ext}). r_b est le facteur de conversion de direct rayonnement.

Une alternative au modèle original de Ma-Iqbal (ci-après, référé comme le modèle modifié de Ma-Iqbal) considère l'indice de clarté modifié, k'_t , celle proposée par Perez et al. au lieu de l'indice de clarté standard, k_t , dans la formulation du modèle. L'indice de clarté modifié, k'_t , présente l'avantage d'être indépendant de l'angle zénithal solaire [17] :

$$k'_t = \frac{k_t}{0.1 + 1.031 e^{(-1.4 / (0.9 + 9.4 / m))}} \quad (\text{IV-14})$$

Où, m , est la masse d'air optique.

C. Modèle de Willmot (Wi)

Willmot [24] a introduit un facteur de réduction anisotrope pour la surface inclinée C_β ,

$$r_d = f_w r_b + (1 - f_w) C_\beta \quad (\text{IV-15})$$

Où :

$$C_\beta = 1.0115 - 0.20293\beta - 0.080823\beta^2$$

$$f_w = B_N / G_{sc}$$

D. Modèle de Bugler (Bu)

Bugler [25] a modifié le modèle isotrope (Eq. (IV-11)) en ajoutant des termes pour le rayonnement diffus provenant du disque du Soleil et pour le rayonnement du reste de la voûte céleste qui dépend de la hauteur angulaire du Soleil sur l'horizon,

$$r_d = \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + 0.05 \sqrt{\frac{B}{G}} \left(\cos i - \frac{1}{\cos \theta_z} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right) \quad (\text{IV-16})$$

E. Modèle de Reindel (Re)

Reindel[7] a ajouté au modèle de Hay un module pour le rayonnement diffus provenant de la région près de la ligne d'horizon. Il a été constaté que l'intensité du rayonnement diffus provenant de cette région diminue à mesure que la couverture du ciel augmente.

Le modèle Reindel se lit comme suit :

$$r_d = A_i r_b + (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + f_R \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \quad (\text{IV-17})$$

Où, f_R est une fonction modulant l'intensité du rayonnement diffus provenant de la région près de la ligne d'horizon. Dans des conditions entièrement couvertes, f_R est égal à zéro, c'est-à-dire que le modèle suppose un rayonnement diffus isotrope dans la région près de la ligne d'horizon.

F. Modèle de Perez (Pe)

Comparé aux modèles précédemment décrits, le modèle proposé par Perez et al.[10] représente une analyse plus détaillée des rayonnement diffus isotrope, circumsolaire et brillance de l'horizon en utilisant des coefficients dérivés empiriquement. Selon ce modèle,

$$r_d = F_1 \frac{a}{b} + (1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_2 \sin \beta \quad (\text{IV-18})$$

Où, F_1 et F_2 sont des coefficients de brillance du ciel pour la région circumsolaire et la région au-dessus de la ligne d'horizon, respectivement. Notez que si $F_1 = F_2 = 0$, il réduit au modèle Liu-Jordan (Eq. (IV-11)). Les coefficients a et b prennent en compte l'angle d'incidence du soleil sur la surface inclinée. Plus spécifiquement, la position angulaire de la région circumsolaire est déterminée par le rapport a / b . Ils sont calculés à partir des équations de la géométrie solaire :

$$a = \max(0; \cos i) ; b = \max(\cos 85; \sin \theta)$$

Les coefficients de brillance F_1 et F_2 sont dérivés des coefficients dits de Perez :

$$F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon)\Delta + F_{13}(\varepsilon)\theta ; F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon)\Delta + F_{23}(\varepsilon)\theta$$

Où les coefficients de Perez F_{ij} sont fonction du paramètre de clarté du ciel ε et du paramètre de brillance du ciel D. Ces facteurs sont définis par :

$$\varepsilon_1 = \left(1 + \frac{B}{D} + 1.041\theta^3\right) (1 + 1.041\theta^3)^{-1}$$

De nombreux ensembles de valeurs de coefficients de Perez ont été déterminés par différentes études. Dans cet article, nous avons appliqué l'ensemble des coefficients de Perez [17] comme indiqué dans le Table. IV.1.

Table. IV. 1. L'ensemble des coefficients de Perez

ε	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1.000-1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
1.065-1.230	0.130	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
1.230-1.500	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
1.500- 1.950	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
1.950 -2.800	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
2.800 -4.500	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
4.500 -6.200	1.060	-1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
>6.200	0.678	-0.327	-0.250	1.156	-1.377	0.251

G. Modèle de Baltas (Ba)

Baltas [26] a proposé de calculer le rayonnement d'un ciel partiellement nuageux comme une somme pondérée du rayonnement du ciel clair et couvert:

$$r_d = \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \left[1 - \frac{D}{G} \right] \sin^3 \frac{\beta}{2} \right) \left(\frac{1 + \left[1 - \frac{D}{G} \right] \cos^2 i \sin^3 \theta_z}{1 + \left[1 - \frac{D}{G} \right] \cos^2 \theta_z \sin^3 \theta_z} \right) \quad (\text{IV-19})$$

H. Modèle de Klucher (Kl)

Klucher[9] a révélé que le modèle isotrope (Eq . (IV-11)) a donné de bons résultats pour le ciel couvert mais sous-estimait l'irradiation dans des conditions de ciel clair et partiellement couvert, caractérisées par une intensité accrue près de l'horizon et à proximité de la région de ciel circumsolaire. Face à une telle contrainte, il a proposé de refinir le modèle Temps-Coulson en introduisant une fonction $f_k = 1 - (D/G)^2$ déterminer le degré de la couverture nuageuse:

$$r_d = r \left(1 + f_k \cos^2 i \cos^3 \beta \right) \left[1 - f_k \cos^3(\beta/2) \right] \quad (\text{IV-20})$$

IV.3 Méthode de comparaison statistique :

L'évaluation des modèles est une étape très importante afin de tester la précision de chaque modèle. Cette étape a été réalisé utilisé les score statistiques suivants ; L'erreur de biais moyen (MBE) en W/m^2 , l'erreur relative de biais moyen (MBE [%]), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) en W/m^2 , la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne relative (RMSE), le coefficient de corrélation (R) et le Nash-Sutcliffe (NSE) [15, 27-30]:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_1^n I_{i,c} - I_{i,m} \quad (\text{IV-21})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{i,c} - I_{i,m})^2} \quad (\text{IV-22})$$

$$MBE [\%] = \frac{100}{I_m} \left(\frac{1}{n} \sum_1^n I_{i,c} - I_{i,m} \right) \quad (\text{IV-23})$$

$$RMSD = \frac{100}{I_m} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{i,c} - I_{i,m})^2} \quad (\text{IV-24})$$

$$R = \frac{\sum_I^n (I_{i,c} - \bar{I}_c) (I_{i,m} - \bar{I}_m)}{\sqrt{\sum_I^n (I_{i,c} - \bar{I}_c)^2} \sqrt{\sum_I^n (I_{i,m} - \bar{I}_m)^2}} \quad (\text{IV-25})$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (I_{i,c} - I_{i,m})^2}{\sum_{i=1}^n (I_{i,c} - \bar{I}_{i,m})^2} \quad (\text{IV-26})$$

IV.4 Source des données

Le présent examen est fondé sur la base de données radiométrique collectées au niveau du site situé dans l'unité de recherche en énergies renouvelables en Milieu Saharien à Touat (Algérie) [27] (latitude de 27,88 ° N, longitude de -0,27 ° E et altitude: 269 m).

Les données de rayonnement solaire sont mesurées avec précision à l'aide d'un pyranomètre CMP21 de K&Z (réponse directionnelle $\leq \pm 10$) pour chaque intervalle de 5 minutes. Les ensembles de données d'irradiation globale et diffuse sur les surfaces horizontales et sur une surface orientée au Sud, inclinée à 28° ont été collectés. Les données ont été collectées tout au long de l'année 2014, voir Fig. IV. 1.

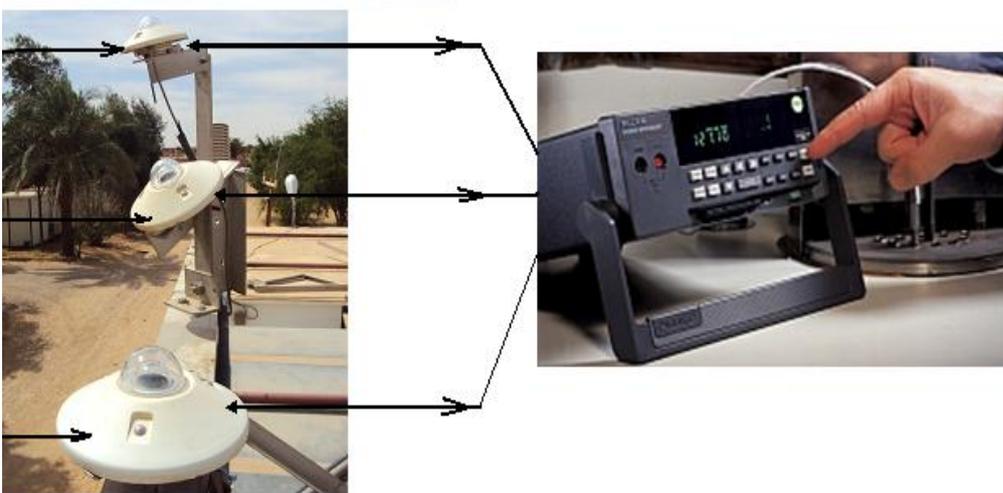
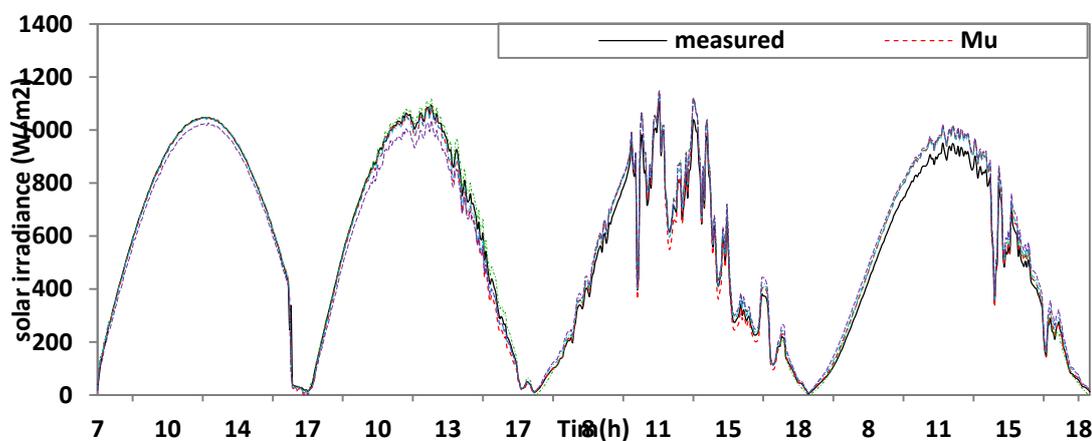
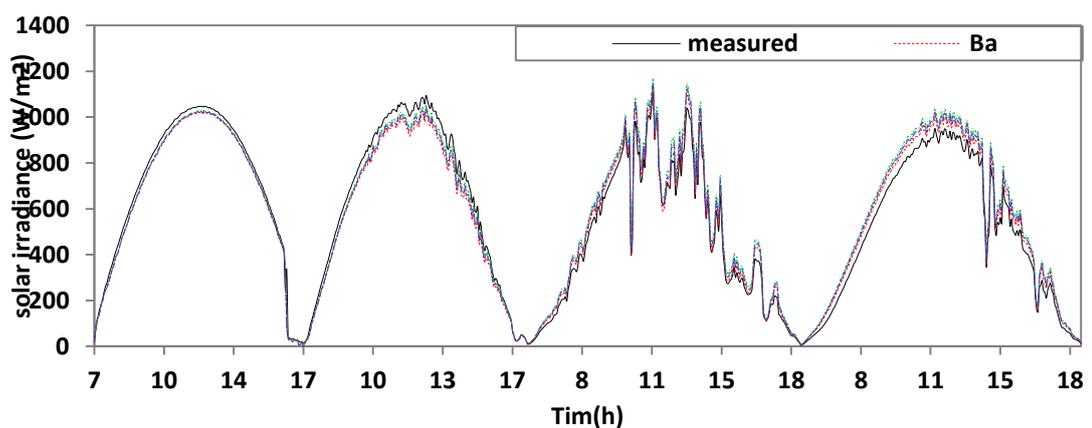


Fig. IV.1:The radiometric test station.

IV.5 Résultats et discussion :

Cette section présente les résultats de l'évaluation en appliquant les méthodes décrites dans la section précédente. Ces méthodes proposées sont testées à différentes conditions climatiques (météorologiques) pendant quinze jours de chaque mois de Janvier à Décembre (2014 et 2015), et évaluées à un angle d'inclinaison de 28° ; la composante inclinée du rayonnement globale (de l'angle d'inclinaison de surface de 28°). La qualité des données radiométrique est vérifiée utilisant les différents tests de contrôle de qualité existents dans la littérature [31]. Dans notre cas, le climat de la région de Touat est classé par le système de Köppen-Geiger en tant que BWh puisque cette région est caractérisée par un climat désertique.



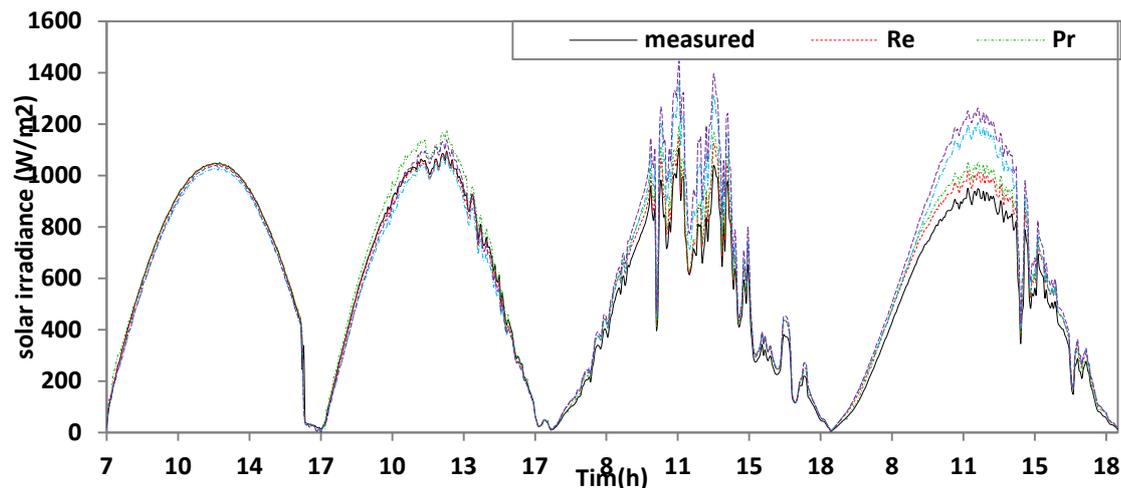


Fig. IV. 2: l'irradiation globale mesurée sur une surface inclinée, orientée au sud ($\beta = 28^\circ$ S) et des valeurs estimées par les modèles isotropes et anisotropes aux dates du : le 15 et le 16 janvier, février, mai et juin.

Cas I : sondages du ciel

Les paramètres d'erreurs statistiques qui sont amenés à partir de l'un de chaque modèle de régression sont calculés par l'utilisation de MATLAB. Un résumé statistique est discuté précédemment et révèle la performance globale de la combinaison des différents indicateurs de test tels que ; le MBE, le RMSE, le NSE et les coefficients de corrélation (R). Une simulation graphique avec des données mesurées permet de découvrir les modèles étudiés et leurs comparaisons pour certains jours sélectionnés (conditions climatiques différentes). En outre, les mesures instantanées des valeurs d'irradiation solaire qui sont exprimées en W / m^2 , sont transformées en données d'énergie d'irradiation solaire horaire et journalière (en Wh/m^2) au moyen d'une intégration trapézoïdale. Ainsi, les valeurs mensuelles représentent la moyenne des valeurs quotidiennes par mois, tandis que le taux moyen mensuel est $6.53 \text{ kWh}/m^2$.

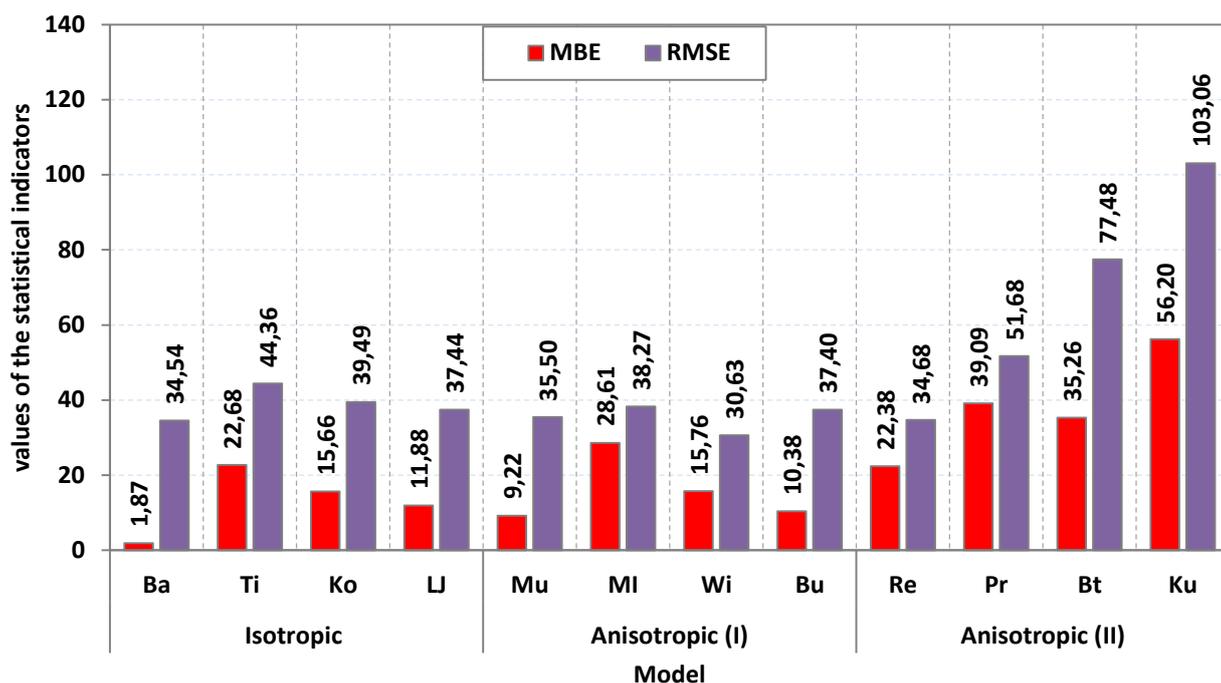


Fig. IV. 3: MBE dans W2 et RMSE pour tous les modèles utilisés dans l'étude sur une longue période de l'année 2014.

Fig. IV. 3 nous donnent les résultats MBE et RMSE pour différents groupes pendant une longue période de l'année 2014, où la paire (MBE, RMSE) varie respectivement dans les intervalles de [1.87, 56.20] et de [30.63, 103.06]. On peut observer à partir de la figure IV.3 que les modèles sont isotropes. Les premiers modèles anisotropes et le modèle (Re) sont approximativement identiques les uns aux autres, sauf au niveau des trois modèles (Pr, Bt et Ku) en raison de RMSD élevé ($MBE > 35$ et $RMSE > 51$), et ils sont donc exclus de l'étude. De plus, nous soulignons qu'il est également important de comprendre l'autre performance des indicateurs ; le MBE%, le RMSD, le R et le NSE.

A. Test annuel des modèles

D'autres résultats obtenus à partir de l'application de neuf modèles à la station sont montrés dans le tableau. IV.2 après l'écartement de tous les modèles divergents présentés dans le tableau (IV.1) supra, en raison des valeurs élevées de MBE et RMSE. Pour nous, il est clair que, les paramètres statistiques ; le MBE [%], le RMSD, le R et le NSE, varient d'un modèle à l'autre. Cela implique que, les coefficients de la corrélation et de l'NSE

[supérieur à 98%] sont les plus élevés pour tous les modèles. Pour conclure, le meilleur modèle basé sur l'analyse statistique est utilisé ci-dessus, un critère objectif est requis pour déterminer le meilleur ajustement.

Pour comparer précisément les modèles développés, un ordre de classement des modèles a été mis au point (tableau IV.2). En utilisant la formule d'indicateur de performance globale (GPI) développée par Despotovic et al. [29] qui est la somme de tous les indicateurs statistiques mis à l'échelle, définis comme :

$$GPI_i = \sum_j a_j (\bar{x}_j - \bar{x}_{i,j}) \quad (IV-27)$$

Où

a_j est égal à 1 pour trois indicateurs (MBE, RMSD), et les indicateurs R et NSE est égal à -1. \bar{x}_j est la médiane des valeurs mises à l'échelle de l'indicateur j . $\bar{x}_{i,j}$ est la valeur mise à l'échelle de l'indicateur j pour le modèle i^{th} . Une valeur plus élevée de GPI entraîne une meilleure précision du modèle.

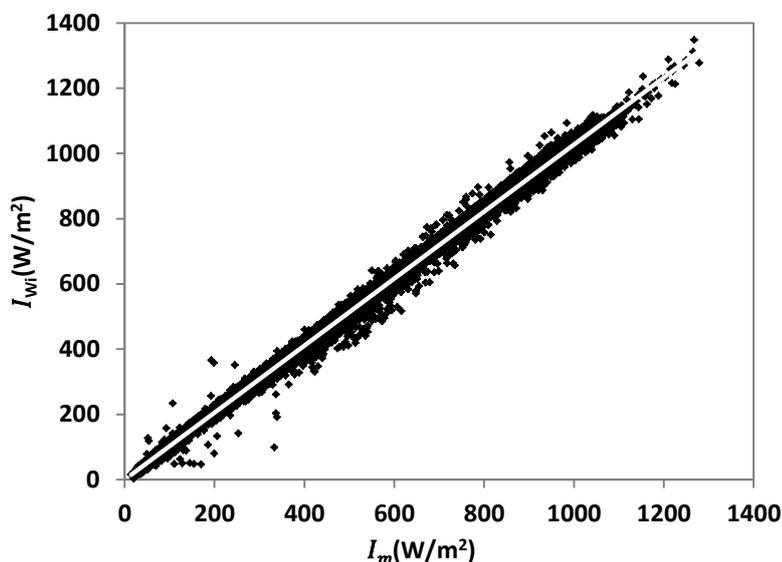
Table. IV. 2. Échantillons d'étude avec des modèles isotropes et anisotropes détaillés pour l'estimation du rayonnement solaire diffus.

Models	MBE [%]	RMSD	R	NSE	GPI	Rank
<i>Isotropic models</i>						
Ba	0.313	5.790	0.994	0.989	0.725	1
Ti	3.803	7.437	0.993	0.982	-1.669	4
Ko	2.625	6.621	0.994	0.985	-0.552	3
LJ	1.992	6.278	0.994	0.987	-0.062	2
<i>Anisotropic models</i>						
Mu	1.546	5.951	0.996	0.989	0.780	2

MI	4.797	6.416	0.998	0.992	0.553	5
Wi	2.642	5.135	0.997	0.992	1.390	1
Bu	1.741	6.271	0.994	0.987	-0.003	4
Re	3.752	5.815	0.997	0.989	0.547	3

Dans les modèles isotropes : Comme le montre le tableau IV.2, les paramètres d'erreur sont observés à varier d'un modèle à l'autre. Pour le MBE [%] est mentionné de 0,313 à 3,803, le RMSD varie entre 5,790 à 7,437, avec un NSE% dépassé jusqu'à 98% et le GPI des modèles isotropes se situe dans la gamme de -0,330 à 0,725. Sur les bases de cet indicateur de performance globale, il est constaté que le modèle Badescu (Ba) montre les meilleurs résultats parmi tous les modèles isotropes.

The Anisotropic models: selon les résultats de performance figurant dans le tableau IV.2, on note évidemment que tous les modèles anisotropes donnent de très bons résultats. Le RMSD est considéré comme un excellent indicateur afin de déterminer la capacité relative



des modèles, alors que le RMSD est embelli entre 5,135 à 6,416. En outre, le MBE [%] varie de [1,546, 4,797] et le GPI des modèles anisotropes se situe dans la gamme de -0,109 à 0,849. L'analyse minutieuse du tableau 2 révèle clairement que les corrélations de Willmot prédiraient également une irradiation globale inclinée avec un bon niveau de confiance puisque les valeurs des paramètres statistiques sont meilleures que toutes les autres corrélations. Comme le montre la figure IV. 4, les valeurs d'irradiation globale estimées et mesurées sur une surface inclinée peuvent être se rapprocher une relation linéaire qui prend la forme suivante :

$$I_{wi} \cong 1.026I_m + 0.011 \quad (19)$$

Fig. IV. 4: Comparaison des valeurs d'irradiation globales estimées sur une surface inclinée par le modèle de Willmot (Wi) avec les valeurs d'irradiation globales observées sur une surface inclinée, dans la région de Touat pour la longue période de l'année 2014.

B. Test saisonnier des modèles

Les détails des divers indicateurs statistiques pour les quatre saisons de 2014 sont décrits et inclus également le classement des modèles dans le tableau suivant :

Table. IV. 3. Résumé décrit la distribution des indicateurs statistiques des modèles selon les saisons.

Models	MBE [%]	RMSD	R	NSE	GPI	Rank
Winter						
Ba	-4.993	6.786	0.998	0.988	-0.476	7
Ti	-2.707	4.964	0.998	0.993	0.360	3
Ko	-3.479	5.458	0.998	0.992	0.191	4
LJ	-3.893	5.782	0.998	0.991	0.031	5
Mu	-2.055	5.775	0.997	0.992	-1.079	8
MI	3.232	5.961	0.997	0.996	-1.335	9
Wi	-0.857	3.978	0.998	0.996	0.770	2
Bu	-4.187	6.051	0.998	0.990	-0.127	6
Re	-0.177	3.522	0.998	0.997	0.938	1
Spring						
Ba	-0.740	4.884	0.997	0.993	0.347	4
Ti	2.392	5.290	0.997	0.992	-0.768	8
Ko	1.335	4.813	0.997	0.993	0.000	7
LJ	0.767	4.692	0.997	0.994	0.438	3
Mu	0.878	5.626	0.997	0.991	-0.954	9
MI	4.524	5.790	0.999	0.995	0.244	5
Wi	1.880	4.287	0.998	0.995	1.246	1
Bu	0.518	4.730	0.997	0.993	0.210	6
Re	2.860	4.613	0.999	0.994	1.093	2
Summer						
Ba	6.852	7.746	0.999	0.986	0.766	3
Ti	11.714	12.783	0.999	0.964	-2.219	9
Ko	10.073	10.994	0.999	0.973	-0.974	8
LJ	9.191	10.061	0.999	0.977	-0.400	7
Mu	5.249	7.736	0.998	0.987	0.280	4
MI	6.438	8.465	0.999	0.986	0.899	2
Wi	6.750	7.849	0.999	0.986	0.996	1
Bu	8.971	9.879	0.999	0.978	-0.248	6
Re	8.364	9.399	0.999	0.980	0.176	5
Autumn						
Ba	-0.391	4.173	0.998	0.995	0.482	1
Ti	3.496	5.412	0.998	0.992	-1.495	8
Ko	2.184	4.523	0.998	0.994	-0.130	5

LJ	1.479	4.211	0.998	0.995	0.327	4
Mu	1.315	5.522	0.997	0.992	-1.513	9
MI	5.445	6.624	0.999	0.995	-0.812	7
Wi	2.418	4.415	0.999	0.995	0.455	2
Bu	1.221	4.174	0.998	0.995	0.389	3
Re	3.707	5.102	0.999	0.993	-0.422	6

Les résultats indiquent qu'il existe une performance convergente entre neuf modèles, où le R et NSE dépassaient 99%. Comme on peut remarquer, la plupart des neuf modèles atteignent une valeur positive de GPI en toutes saisons. La valeur la plus élevée est atteinte par le modèle Willmot (Wi) au printemps et en été. Ceci est ensuite suivi par le modèle de Renidl (Re), et le modèle de Badescu (Ba) en hiver et en automne, respectivement. Enfin, Les résultats dérivés des deux cas révèlent en général que le modèle isotrope et le modèle circumsolaire sont des facteurs clés pour l'évaluation du rayonnement diffus dans la région de Touat et dans des régions similaires.

Cas II : Performance du modèle dans des conditions climatiques

La procédure de validation de tout autre modèle est basée sur une analyse statistique qui révèle qu'aucun des modèles considérés ne peut réussir dans tous les types de conditions météorologiques. L'évaluation a révélé la classification des nuages (les conditions du ciel) à la lumière de la méthodologie proposée, qui est présentée par Colienne et al. [15]. Pour la Belgique à Uccle, les conditions du ciel sont classées en 5 types en fonction de l'indice de clarté modifié (k_t');

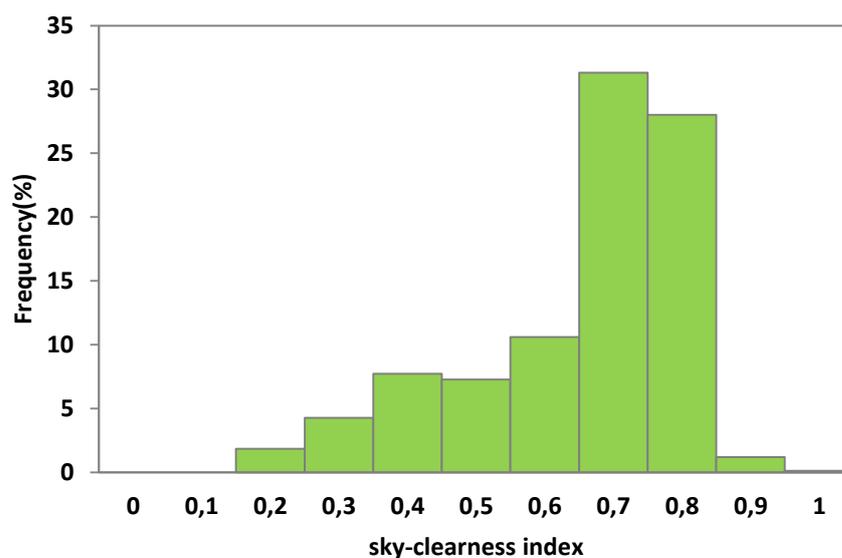
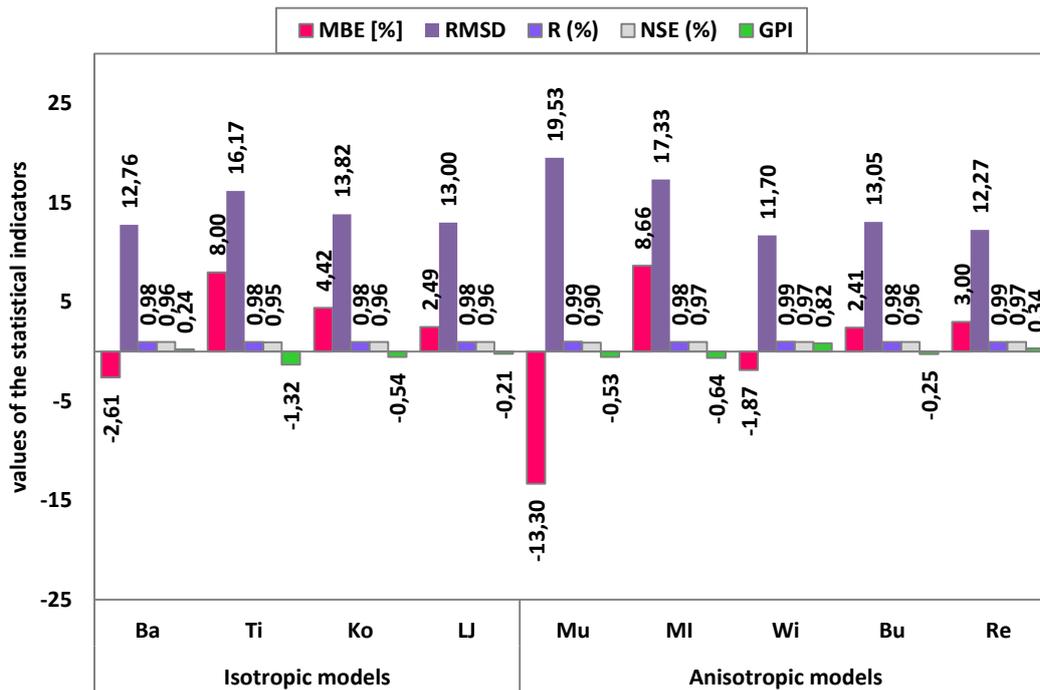


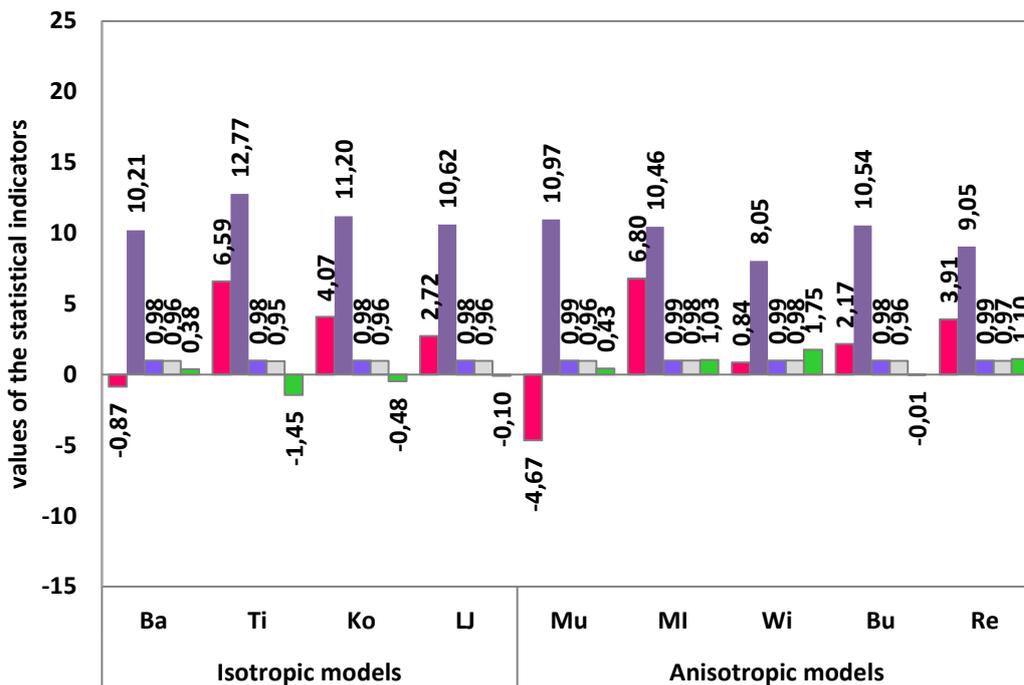
Fig. IV. 5: Distribution de fréquence de la transmissivité atmosphérique modifiée du rayonnement solaire (kt').

La figure IV. 5 montre la distribution de fréquence de l'indice de clarté du ciel (kt') qui est basée sur les données de test pour la longue période de l'année 2014 à Touat. Dans les cas où les valeurs n'excèdent pas 13.82% la fréquence des intervalles est $[0,0,0,4]$. Par conséquent, nous pouvons conclure qu'il y a une prédominance du ciel partiellement nuageux, partiellement obscurci et dégagé à Touat, d'une part, parce que les pourcentages les plus élevés de $kt' \geq 0.4$ et que, d'autre part, la fréquence du ciel couvert est autour de zéro. En conséquence, ce type de ciel est exclu de la discussion.

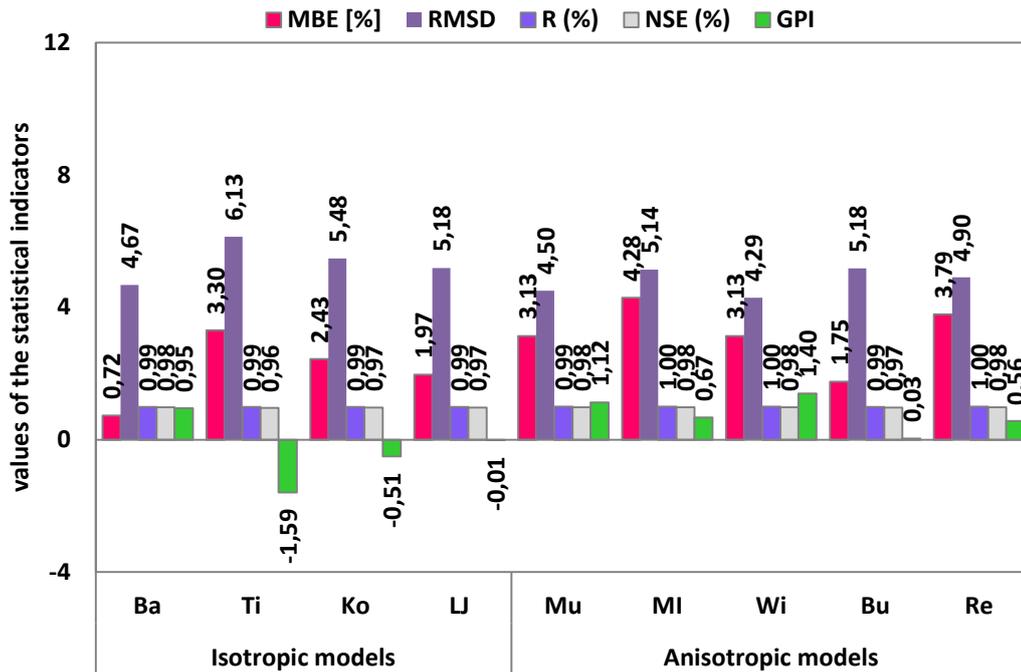
L'étude des neuf meilleurs modèles a utilisé trois ensembles complètement différents des méthodes de la correction du rayonnement diffus comme la performance des cinq conditions du ciel divers. De plus, nous avons utilisé les résultats obtenus (Fig IV. 6) pour rationaliser la présentation de nos informations examinées. Les différents modèles de correction du rayonnement diffus, ainsi que l'état du ciel correspondant., sont tel qu'indiqué ci-dessous :



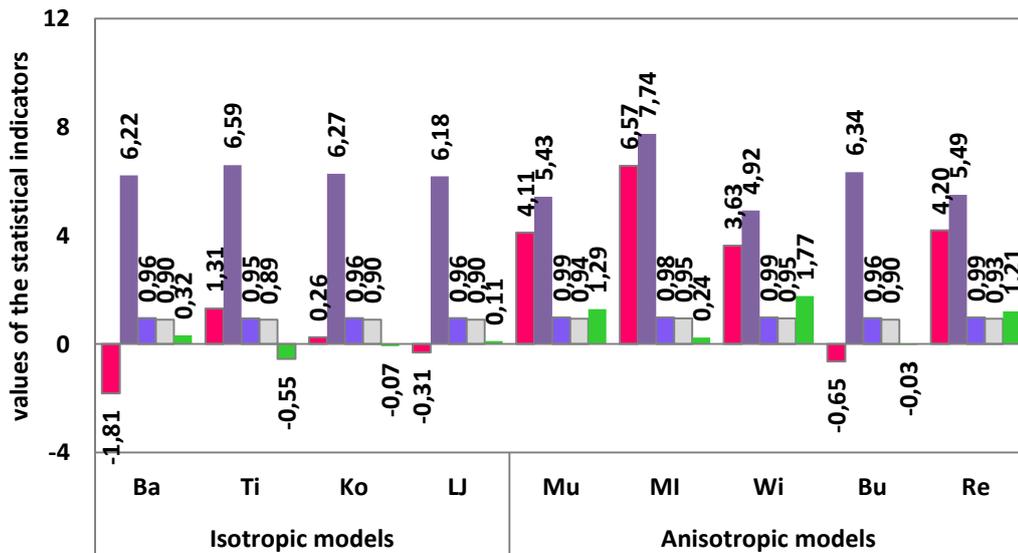
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. IV. 6: Comparaison des performances du modèle statistique de diverses conditions du ciel: (a) ciel nuageux; (b) Ciel partiellement nuageux; (c) Ciel partiellement dégagé; (d) Ciel dégagé.

Les valeurs des quatre indicateurs statistiques, le MBE%, le RMSD, le R et le NSE, et les quatre différentes conditions de ciel sont montrées à la Fig.IV.6.incontestablement, la performance du modèle n'est pas très variable par rapport aux conditions du ciel, où le classement des modèles est toujours le même.

Le groupe anisotrope montre une bonne performance pour toutes les conditions de ciel, où les valeurs de Nash-Sutcliffe (NSE%) dépassent 90%, et la Racine carrée de différence quadratique moyenne (RMSD) est inférieure à 21%. De plus, le modèle Willmot (Wi) a des valeurs très élevées du GPI.

S'appuyant sur des conclusions tirées des toutes les conditions du ciel, le meilleur modèle est le modèle de Willmot (Wi) dans les modèles *Anisotropic* pour la comptabilisation de l'irradiation globale mesurée sur une surface inclinée dans toutes les conditions du ciel en milieu Saharien.

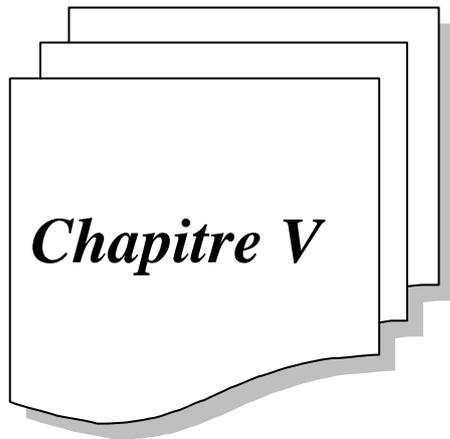
IV.6 Conclusions

Le but de cette étude est de tester différents modèles d'estimation du rayonnement solaire global sur un plan incliné, elle est basée sur douze modèles les plus largement utilisés pour l'estimation de rayonnements sur des surfaces inclinées, l'étude a été réalisée sur le site de Touat (région soumise à un climat subtropical chaud), avec une base de données de mesure sur différent plan de collecte. Une analyse détaillée de la performance statistique des différents modèles testés sur site de Touat et quelques sites du Grand Sud algérien. Les conclusions suivantes peuvent être tirées de l'évaluation des différents modèles de l'irradiation solaire estimée sur une surface inclinée :

- Le rayonnement solaire sur la surface inclinée varie en fonction des conditions du ciel. Et par conséquent, il n'y a pas de relation significative entre les radiations dans diverses saisons / conditions météorologiques.
- Le modèle isotrope de Badescu remplace d'autres modèles en raison de sa simplicité pour estimer le rayonnement solaire global sur des surfaces inclinées pendant une courte période de temps.
- Le modèle Renidl montre une bonne performance pour le modèle de la catégorie anisotrope en hiver.

- Les modèles anisotropes montrent de meilleurs résultats pour les conditions de ciel restantes, y compris nuageux, partiellement nuageux, partiellement obscurci et dégagé.
- Le modèle de Willmot, couramment, montre un meilleur accord avec les données mesurées sur une surface inclinée.

En résumé, il est évident que cette étude révèle en principe des résultats importants. Ainsi, les résultats proposés de cette étude peuvent être facilement utilisés pour un certain nombre d'applications de systèmes solaires dans le Grand Sud de l'Algérie.



***Déterminer l'angle d'inclinaison
pour maximiser l'énergie solaire***

Chapitre V

Déterminer l'angle d'inclinaison pour maximiser l'énergie solaire

V.1 Introduction

La demande énergétique croissante dans les processus domestiques et industriels a grevé les ressources énergétiques à consommer facilement en libérant d'énormes quantités de polluants qui affectent l'environnement. L'énergie solaire est considérée comme la solution idéale à la dépendance du monde à l'égard des combustibles conventionnels. Les radiations solaires à la surface de la terre n'ont aucun coût absolu qui en fait la solution idéale pour résoudre la crise énergétique. L'inclinaison d'une surface b est l'un des facteurs importants qui affectent considérablement la disponibilité d'un rayonnement solaire sur une surface horizontale. L'optimisation de la performance des dispositifs solaires nécessite une option comme un système de poursuite solaire qui suit les trajectoires du mouvement solaire afin d'améliorer le rayonnement incident [1-3]. Cependant, ces options ne sont pas toujours économiques. Selon l'estimation de Vermaak [4], le système de suivi de piste inclinée nécessite 6,94 ha (550% et plus) et le système de suivi biaxial nécessite 4,81 ha (près de 350% et plus) par rapport à une installation équipée de panneaux photovoltaïques statiques (qui nécessite superficie de 1,07 ha). En outre, les traqueurs ont besoin d'un

entretien et d'un calibrage périodiques, ils nécessitent une énergie d'entrée pour leur fonctionnement qui est de l'ordre de 5 à 10% de l'énergie produite[5]. De plus, les traqueurs sont constitués de pièces mécaniques sophistiquées qui ajoutent au capital un coût et une augmentation du coût de l'énergie absolue produite à partir de panneaux solaires photovoltaïques[6]. Une autre méthode facilement suggérée par les chercheurs est celle utilisée pour optimiser l'orientation des surfaces planes à l'angle d'inclinaison optimum du capteur (β_{opt})[7]. Vieira et al. [8] ont réalisé une étude expérimentale qui suggérerait que le panneau photovoltaïque à poursuite du soleil présentait un gain moyen faible de l'énergie générée par rapport au panneau fixe. Dans une autre étude réalisée par Sinha & Chandel[6], elle a été rapportée que les systèmes de poursuite de l'ajustement hebdomadaire de l'axe horizontal et de l'ajustement continu de l'axe vertical produisaient annuellement moins d'énergie que le système photovoltaïque existant à l'inclinaison fixe. l'angle d'inclinaison optimum du capteur peut être ajustée quotidiennement, mensuellement, saisonnièrement, semestriellement ou annuellement pour optimiser les performances de l'appareil en cours d'utilisation[9]. Il est évident que, pour une région de l'hémisphère nord, l'orientation de la surface doit être orientée face au sud, c'est-à-dire $c = 0$, où c est l'angle d'azimut de surface. Il a été facilement rapporté que la relation de l'angle d'inclinaison optimum du capteur, c'est-à-dire β_{opt} , est purement avec la latitude et l'azimut[10, 11].

Dans le scénario d'indisponibilité de l'information sur l'optimisation de l'inclinaison, diverses règles empiriques sont généralement adoptées[12]. D'après ceux-ci, le maximum d'intensité du rayonnement solaire est obtenu en faisant des changements dans les angles d'azimut dans la gamme de 10-20 ° et égalisant l'angle d'inclinaison à la latitude de la région[7]. Toutefois, ces règles ne sont pas fiables que les estimations peuvent être différentes des valeurs réelles. Différents auteurs ont suggéré une vaste gamme de corrélations d'angle d'inclinaison optimum du capteur dans la littérature.

L'optimisation de l'angle d'inclinaison a été effectuée pour divers emplacements dans les pays européens comme : Bakirci[13] et Ertekin[14] pour la Turquie, Stanciu et al. [15] pour la Roumanie, Hartner et al.[16] pour l'Autriche et l'Allemagne, Calabrò[17] pour l'Italie, et Mehleri et al. [18] pour la Grèce. Pour divers emplacements dans les pays du

Moyen-Orient : Kazem et al. [19]pour Oman, Jafari et Javaran[20], Jafarkazemi et al. [21]etMoghadam et al. [22]pour l'Iran, Jafarkazemi et Saadabadi[23]pour Abu Dhabi ; EAU, Tamimi et Sowayan[24]pour Riyad ; Arabie Saoudite , Benghanem[25]pour Madinah ; Arabie Saoudite, Elminir et al. [26]pour l'Egypte, Altarawneh et al. [27]etShariah et al. [28]pour la Jordanie, et Kamal Skeiker[29]pour la Syrie. Pour différents sites dans les pays asiatiques : Khahro et al. [30]pour le Pakistan, Krishna et al. [31]pour Bangkok, Handoyo et al. [32]pour l'Indonésie, Li &Lam[33] pour Hong Kong, et Tang et Wu [34]pour la Chine. Pour le Nigeria, Akachukwu Ben Eke[35] et pour le Canada, Siraki&Pillay[36].

Le présent travail vise à explorer la disponibilité du rayonnement solaire sur des surfaces planes inclinées orientées au sud (non concentrées) dans une région, dans le Grand Sud algérien, caractérisée par des conditions climatiques arides. Des mesures de rayonnement solaire horizontal ont été effectuées pour la ville de Touat. La procédure d'estimation est basée sur le modèle (isotrope) de Liu et Jordan. De surcroit, les valeurs optimales pour les angles d'inclinaison et la disponibilité du rayonnement solaire pour la région de Touat ont également été rapportées et comparées aux estimations PVGIS.

Des angles optimaux d'inclinaison mensuels, saisonniers et annuels ont été suggérés pour les deux emplacements. Les gains d'énergie solaire correspondent à la disponibilité du rayonnement à l'angle d'inclinaison optimale mensuel, saisonnier et annuel par rapport à la surface horizontale ont été déclarés. De plus, des pertes d'énergie solaire à des angles optimaux d'inclinaison saisonniers et annuels par rapport à une surface à l'angle d'inclinaison optimum mensuel ont été rapportées.

V.2 Source de données

La Wilaya d'Adrar est située dans le sud-ouest de l'Algérie, avec des étés longs et chauds, et des hivers courts et froids. Les données sur le rayonnement solaire et la durée d'ensoleillement sont obtenues auprès de la station de conversion de la photovoltaïque météorologique (PCD) située dans L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien. Les données DSR ont été obtenues à l'aide d'un pyranomètreKipp&Zonen CMP21[37].La station est située à Touat (latitude: 27,88 ° N,

longitude: -0,27 ° E et altitude: 269 m). De surcroit, Les données moyennes recueillies au cours des six années de mesures de 2010 à 2015 sont présentées à la figure 1.

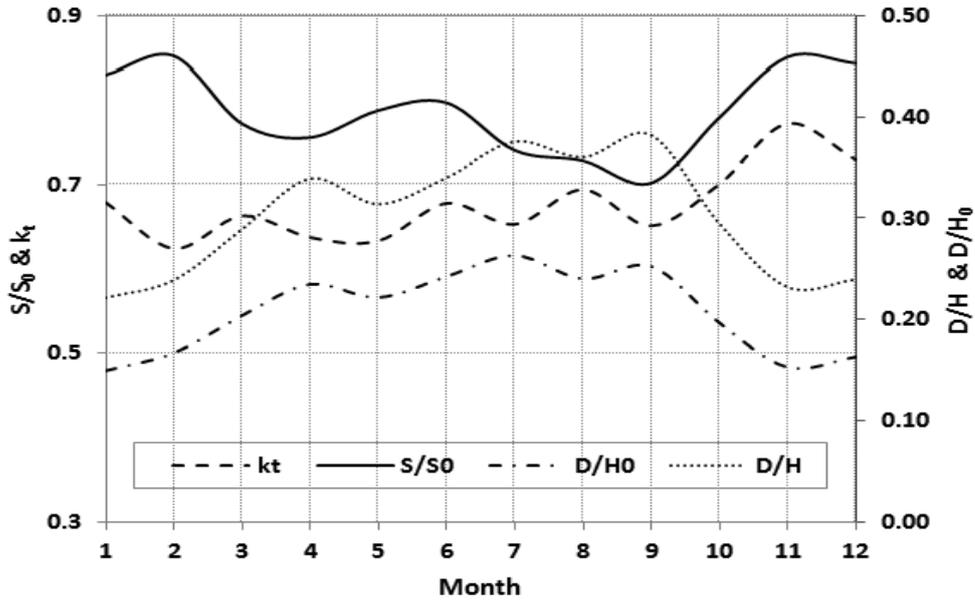


Fig. V. 1: Touat's monthly variation of clearness index, ratio diffuse solar radiation, diffuse fraction and the ratio of sunshine hours.

V.3 Modélisation mathématique de l'inclinaison optimale des panneaux solaires

Le rayonnement solaire global incident sur la surface inclinée de l'endroit étudié est estimé en utilisant les composantes correspondantes mesurées pour la surface horizontale, où le rayonnement solaire global moyen mensuelle sur une surface inclinée (H_{opt}) est la somme de trois parties ; la moyenne mensuelle quotidienne du rayonnement diffus (D_{opt}), la partie du faisceau de rayonnement direct (B_{opt}), et la partie réfléchie (R_{opt}), c'est-à-dire ;

$$H_{opt} = D_{opt} + B_{opt} + R_{opt} = B \cdot R_b + D \cdot R_d + H \cdot \rho \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos \beta) (V - 1)$$

Où

B est le faisceau de rayonnement solaire, D est le rayonnement solaire diffus, H le rayonnement solaire global sur une surface horizontale, ρ est la réflectivité du sol, β est l'angle d'inclinaison du capteur, \bar{R}_d est le facteur de conversion du rayonnement diffus, et \bar{R}_b est le rapport d'un faisceau de rayonnement incliné au rayonnement sur l'horizontale, et peut être calculé comme [38]:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + (\pi/180) \omega \sin(\varphi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega_s) + (\pi/180) \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta)} \quad (V- 2)$$

Où, δ est l'angle de déclinaison, φ est la latitude de localisation et ω est l'angle horaire du levé du soleil sur une surface inclinée qui peut être déterminé comme [39]:

$$\omega = \min \left\{ -\arccos[\tan(\varphi - \beta) \tan \delta] \right\} \quad (V- 3)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left\{ \frac{360(n_d + 284)}{365} \right\} \quad (V- 4)$$

Bouchouicha et al. [40] ont examiné le rayonnement sur les données de surface horizontales pour 30 villes algériennes, et après avoir mené des études approfondies pour évaluer le rayonnement solaire global incident sur un plan incliné et le rayonnement diffus sur une surface horizontale, en fonction des données mesurées dans la région de Touat, ils ont proposé la relation de Badescu[41] pour l'estimation du rayonnement global sur les surfaces inclinées et le rayonnement diffus sur une surface horizontale à Touat[37, 42, 43], que l'on présente ci-après :

$$\bar{R}_d = \frac{(3 + \cos 2\beta)}{4} \quad (V- 5)$$

$$\frac{D}{H} = 0.137 + 1.193 \left(\frac{S}{S_0} \right) - 1.244 \quad (V- 6)$$

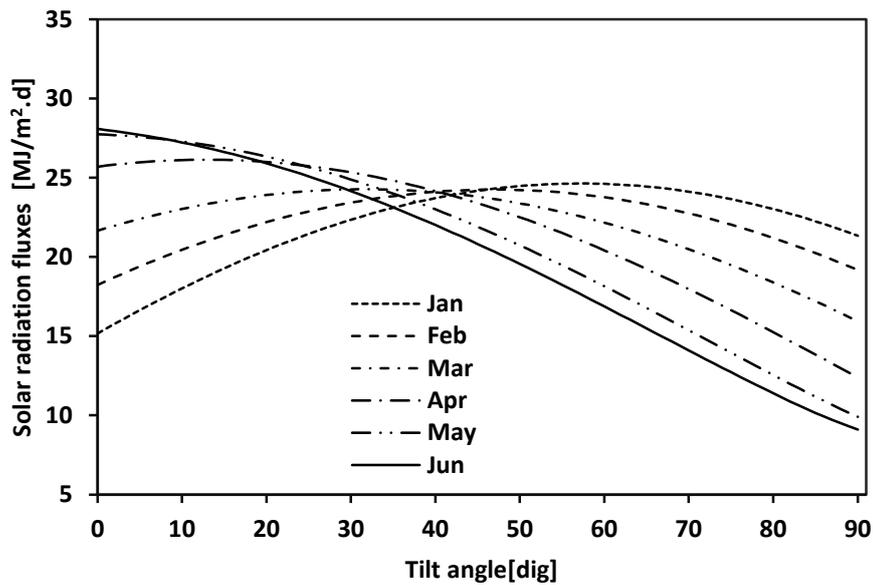
Où, S est la moyenne mensuelle d'ensoleillement pendant l'heure de la journée (h) et S_0 est la durée journalière d'ensoleillement pendant l'heure de la journée (h). qui peut être calculé à partir de[40]:

$$S_0 = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\tan \varphi \tan \delta] \quad (V- 7)$$

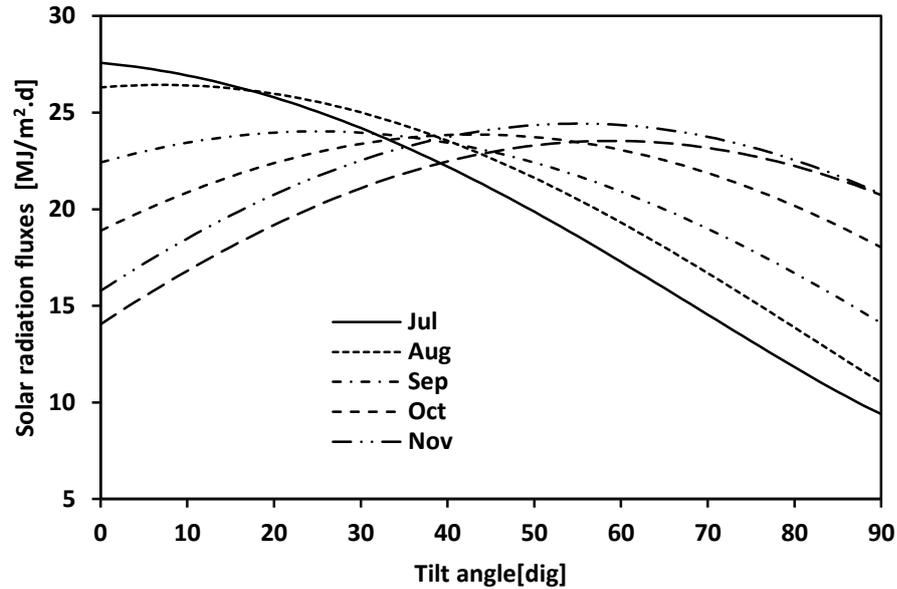
V.4 Résultats et discussion

V.4.1 Inclinaison optimale pour un rayonnement total maximal

Pour tous les mois et les différents angles d'inclinaison, les moyennes mensuelles des irradiations solaires globales ont été calculées en utilisant les équations (V-1). Les résultats ont été tracés et sont représentés sur la Fig. V.2, pour la ville de Touat où l'angle d'inclinaison a été varié dans la gamme de 0° à 90° (par de 10°).



(a)



(b)

Fig. V. 2: Variation of monthly mean daily total solar radiation with tilt angle in Touat; (a) Jan–Jun, (b) Jul–Dec.

La Fig. V.2 (a) montre le rayonnement solaire total comparativement à l'angle d'inclinaison pour les mois de janvier à juin, tandis que, la Fig. V.2 (b) montre le rayonnement solaire total pour les mois de Juillet à Décembre. Il ressort des figures que le rayonnement solaire est une fonction intensive de l'angle d'inclinaison. Le rayonnement solaire incident calculé sur la surface plane est passée de la position horizontale de 0° à un certain angle d'inclinaison, après quoi, une augmentation supplémentaire de l'angle d'inclinaison de la surface plane a entraîné une diminution du taux de rayonnement d'énergie solaire reçu. Le résultat indique également que l'angle optimal de réception du rayonnement solaire maximum sur une surface plane varie en fonction des mois de l'année. Le rayonnement solaire maximal est atteint pour chaque mois avec une valeur unique d'un angle d'inclinaison optimal. L'angle d'inclinaison optimal augmente pendant les mois d'hiver et diminue jusqu'à la valeur minimale en été et en automne.

Comme le montre le Table. V.1, une comparaison entre le système d'information géographique photovoltaïque (PVGIS) [44], les estimations du rayonnement solaire sur un plan incliné de façon optimale et une inclinaison optimale, et les valeurs basées sur des

mesures au sol déterminent en Touat (latitude : 27.88 ° N, longitude : -0,27 ° E et altitude : 269 m). Pour plus d'informations sur la méthode et les sources de données utilisées par le PVGIS, voir la référence [45]. Les différences entre les estimations PVGIS du rayonnement solaire diffus et l'angle d'inclinaison optimal sont attribuées à l'incapacité des satellites afin de mesurer correctement l'irradiation de surface. Ils détectent le rayonnement réfléchi de l'atmosphère. La plupart des modèles dérivent l'irradiation globale, qui doit ensuite être empiriquement séparée en ses composantes directes et diffuses qui introduisent des erreurs.

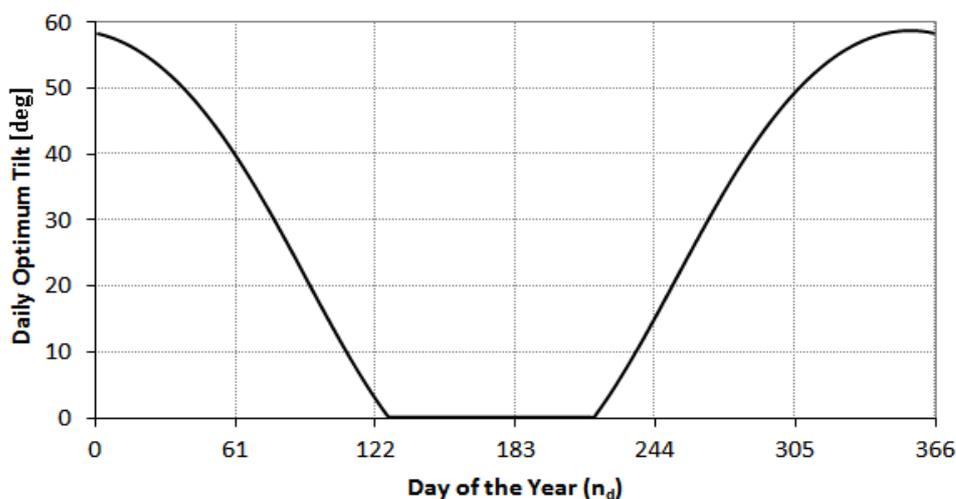


Fig. V. 3: Angle d'inclinaison optimale quotidienne pour une surface orientée vers le Sud à Touat.

En outre, l'estimation des angles d'inclinaison optimum pour la région de Touat est effectuée. La figure.V. 3 montre la variation de l'angle d'inclinaison optimum quotidienne (β_{opt}) pour une surface exposée au sud dans la ville de Touat. L'angle d'inclinaison optimum varie de 58,32 ° le 1^{er} jour de l'année (1er janvier) à 0,25 ° le 127^e jour de l'année (mai 07). Entre le 132^e et le 216^e jour de l'année, les valeurs calculées des angles d'inclinaison optimaum étaient négatives. Cependant, une valeur nulle est suggérée pour ces jours puisque l'inclinaison négative n'a aucune signification. Au 217^{ème} jour jusqu'à la fin de l'année, les variations d'angle d'inclinaison sont comprises entre 0,01 ° et 58,40 °. L'angle d'inclinaison maximal a été observé du 20 au 21 décembre à 58,79 °.

Table. V. 1. Angle d'inclinaison optimum du capteur (degré) dans la région de Touat.

Mois	β_{opt}	Saisonnier	β_{opt}	Semestriel	β_{opt}	Annuel	β_{opt}	
Janvier	57	Hiver	57					
Février	47							
Mars	32	Printemps	30	Avr-Sep	4			
Avril	13							
Mai	0							
Juin	0	Été	0			An	28	
Juillet	0							
Aout	7							
Septembre	25	L'automne	25	Oct-Mar	49			
Octobre	43							
Novembre	55							
Décembre	59	Hiver	57					

Les valeurs d'angle d'inclinaison optimale mensuelle, saisonnière, semestrielles et annuelles obtenues pour la région de Touat sont présentées dans le tableau V. 2. L'angle d'inclinaison optimum moyenne pour différentes saisons a été évaluée en prenant la moyenne de valeur de l'angle d'inclinaison optimale pour chaque mois, en diminuant au

cours d'une saison particulière. Par conséquent, quatre angles d'inclinaison optimale saisonniers ont été obtenus (correspondant à chaque saison) : 57° pour l'hiver, 30° pour le printemps, 0° pour l'été et 25° pour l'automne. Ainsi, l'hiver a une valeur supérieure de l'angle d'inclinaison optimal tandis que l'été observé une valeur d'angle d'inclinaison inférieure. L'inclinaison optimale semestrielle a été estimée à 4 ° pour la période d'Avril à Septembre, alors qu'elle a été estimée à 49 ° pour les mois restants d'Octobre à Mars. L'angle d'inclinaison optimal annuel a été calculé à 28° pour la région de Touat. Cette valeur de l'angle d'inclinaison est suffisamment proche de la latitude de la région considérée (28°). A cette valeur d'inclinaison, les surfaces resteront fixes tout au long de l'année.

V.4.2 Le faisceau de rayonnement diffus global sur une surface inclinée de manière optimale et comparaison

Un compte rendu du pourcentage de profit (ou de perte) d'énergie sur une surface inclinée de façon optimale (mensuelle, saisonnière, semestrielle et annuelle fixe) par rapport à une surface horizontale est présenté au tableau V. 3. Nous obtenons la valeur du gain d'énergie solaire relative en divisant la différence entre les quantités de rayonnement solaire obtenues par l'inclinaison optimale et les surfaces horizontales sur la quantité de rayonnement solaire reçue par la surface horizontale.

Table. V. 2. La différence relative du gain d'énergie solaire moyenne mensuelle des surfaces inclinées de façon optimale (%) par rapport à celle de la surface horizontale.

Mois	<i>Mensuellement ajusté</i>	<i>Saisonnière ajusté</i>	<i>Semi-annuelle ajusté</i>	<i>Fixe annuelle ajusté</i>
Janvier	57.63	51.19	51.19	40.12
Février	29.29	47.60	49.15	38.81
Mars	10.94	25.64	25.33	23.08
Avril	4.65	6.63	3.25	9.57
Mai	0.00	0.00	1.17	-1.73

Juin	0.00	0.00	-0.37	-9.45
Juillet	0.00	0.00	-1.67	-15.19
Aout	4.48	-0.66	-0.84	-7.55
Septembre	7.74	0.11	0.12	-2.83
Octobre	23.90	2.52	1.54	8.57
Novembre	49.05	33.63	33.63	29.65
Décembre	59.57	68.35	68.35	52.27
Annuel	20.61	19.58	19.24	13.78

Les résultats ont montré avec évidence que l'ajustement mensuel de l'angle d'inclinaison fournit le gain énergétique annuel moyen le plus élevé suivi des ajustements saisonniers, puis des ajustements semestriels par rapport aux systèmes fixés annuellement. Il est également clair que les systèmes ajustés du gain moyen mensuel, saisonnier et semestriel sont comparables entre eux et qu'ils sont élevés par rapport aux systèmes fixés annuellement. Par conséquent, l'ajustement semestriel est adopté dans le présent document pour réduire les changements d'inclinaison requis, alors que le gain d'énergie est pratiquement la valeur maximale possible selon le schéma d'orientation considéré. Des recherches supplémentaires de l'exactitude de ce choix est présentée dans l'analyse suivante. En conséquence, nous abordons les résultats de l'ajustement mensuel présentés dans le tableau V. 3 pour démontrer l'effet de l'ajustement de l'inclinaison optimale sur les gains d'énergie solaire globale. Nous constatons que la différence relative est égale à zéro correspondant aux mois que leur d'angle d'inclinaison optimal est nul, car il est très faible en Avril, Septembre et Octobre, respectivement. Cependant, les autres mois restants nous procurent des gains d'ajustement d'inclinaison supplémentaires significatifs de plus de 25%. Cela n'affecte donc pas les gains d'énergie solaire totale pour maintenir la surface horizontale pendant la période d'Avril à Octobre.

Table. V. 3. Rayonnement solaire total annuel (GJ / m²) reçu par des surfaces inclinées différemment et le gain d'énergie solaire supplémentaire annuel comparé à celui de la surface horizontale (%).

Période d'ajustement	Gain annuel	Différence relative (%)
<i>Horizontale fixe</i>	7.95	0.00
<i>Mensuellement ajusté</i>	9.24	16.16
<i>Saisonnnière</i>	9.16	15.26
<i>Semi-annuelle ajusté</i>	9.13	14.84
<i>Fixe annuelle ajusté</i>	8.72	9.69

Pour mieux comprendre les résultats, on calcule le rayonnement solaire total annuel, qui est estimée à (GJ / m²) et reçu par divers systèmes de conversion solaire oblique, ainsi que les différences relatives à l'énergie solaire obtenue par rapport à la surface horizontale que nous proposons dans le tableau 4. Sur la base des résultats présentés dans le tableau V. 4, il s'avère que le gain d'énergie le plus élevé correspond à l'ajustement mensuel de la surface. En comparant avec d'autres cas, nous avons constaté que les pertes d'énergie solaire totale reçue par une surface inclinée et qui ont été ajustées trimestriellement, semestriellement et annuellement sont de 1,34%, 1,76% et 6,91%, respectivement. Encore une fois, ces résultats indiquent également que l'angle d'inclinaison changé deux fois par an est économiquement plus bénéfique. En effet, il est recommandé pour le site d'investigation où il fournit une quantité suffisante d'énergie solaire avec des besoins en matière de ressources humaines minimum et de la réduction des coûts associés. En outre, les concepteurs et les praticiens de capteurs solaires et de panneaux photovoltaïques sur la zone d'étude (Touat) peuvent tirer parti des taux mensuels du rayonnement diffus global, qui sont calculés dans le tableau V. 5.

Table. V. 4. Rayonnement solaire total pour les surfaces exposées au sud à des angles d'inclinaison optimal mensuels, trimestriels et annuels.

Mois	H(MJ/m ² .d)	H _{opt} (MJ/m ² .d)			
		<i>Monthly</i>	<i>Seasonal</i>	<i>Half-yearly</i>	<i>Yearly</i>
Janvier	15.63	24.64	23.63	23.42	21.90
Février	18.76	24.25	27.69	27.76	26.04
Mars	21.88	24.27	27.49	27.49	26.93
Avril	24.98	26.14	26.64	25.79	27.37
Mai	27.20	27.20	27.35	27.52	26.73
Juin	27.94	27.94	27.92	27.84	25.30
Juillet	26.93	26.93	26.76	26.48	22.84
Aout	25.30	26.43	25.13	25.09	23.39
Septembre	22.30	24.03	22.32	22.33	21.67
Octobre	19.26	23.86	19.75	20.00	20.91
Novembre	16.39	24.43	21.90	21.94	21.25
Décembre	14.75	23.54	24.83	24.53	22.46

Table. V. 5. Le faisceau (F) et le rayonnement diffus (D) sur les surfaces horizontales (MJ / m².d) et les diverses surfaces inclinées dans la région de Touat.

Mois	<i>Horizontal</i>		<i>Mensuellement</i>		<i>Saisonnière</i>		<i>Semi-annuelle</i>		<i>Fixe annuelle</i>	
	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>D_{opt}</i>	<i>B_{opt}</i>	<i>D_{opt}</i>	<i>B_{opt}</i>	<i>D_{opt}</i>	<i>B_{opt}</i>	<i>D_{opt}</i>	<i>B_{opt}</i>
Janvier										
Février	5.49	10.14	3.60	19.16	3.60	19.16	3.97	18.88	4.84	16.76
Mars	6.43	12.33	4.71	22.33	5.63	20.20	4.65	22.40	5.67	20.01
Avril	9.04	12.84	7.77	18.88	7.91	18.66	6.54	19.79	7.98	18.54
Mai	10.36	14.62	10.14	16.43	9.07	17.78	10.28	15.76	9.14	17.75
Juin	10.90	16.30	10.90	16.30	10.90	16.30	10.82	16.75	9.62	16.60
Juillet	11.05	16.89	11.05	16.89	11.05	16.89	10.97	16.75	9.75	15.02
Aout	11.57	15.36	11.57	15.36	11.57	15.36	11.27	14.97	9.60	12.74
Septembre	10.66	14.64	10.65	14.37	10.64	12.88	10.65	14.31	10.63	12.29
Octobre	9.77	12.53	9.75	11.81	9.75	11.88	9.76	12.53	9.74	11.51
Novembre	7.39	11.87	7.46	11.98	7.94	12.75	7.14	11.46	7.88	12.66
Décembre	5.30	11.09	6.68	13.97	6.62	13.84	6.82	14.27	6.77	14.17
Mois	5.02	9.73	8.19	15.87	8.21	15.91	8.20	15.90	7.55	14.63

V.4.3 Le faisceau de rayonnement diffus global sur une surface fixée verticalement

Une comparaison du moyen mensuel de rayonnement solaire quotidien et de ses composants sur les surfaces horizontales et verticales est présentée au tableau V. 6 avec la différence relative de l'énergie incidente. Comme observé, le rayonnement solaire diffus sur une surface verticale est inférieur par rapport à la surface horizontale pour tous les mois à l'exception du mois de Décembre où une valeur plus élevée est estimée. Cependant, pour les faisceaux de rayonnement, les mois d'hiver de Décembre à Mars montrent une valeur inférieure du faisceau incident de rayonnement par rapport à une surface horizontale, de sorte qu'une perte du rayonnement incident est anticipée, alors que les autres mois révèlent une valeur plus élevée du faisceau de rayonnement solaire sur une surface verticale par rapport à une surface horizontale. En outre, une tendance similaire est observée, pour le rayonnement solaire total, lorsque la différence totale relative varie de -23,26% à -1,89% pendant la période d'Avril à Novembre, indiquant une perte d'énergie

sur une surface verticale par rapport à une surface horizontale. Alors que pendant les mois de Décembre à Mars, un gain énergétique est connu avec des valeurs se situent entre 44,81% à 4,52%. Cela est attribué au fait que l'altitude solaire est inférieure au cours des mois d'hiver que l'été, ce qui entraîne, ainsi, une augmentation de l'énergie solaire incidente pendant les mois d'hiver et une perte de l'énergie solaire incidente pendant la période estivale.

V.5 conclusion

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les ressources d'énergie solaire dans le district de Touat à partir des données disponibles dans la zone pour obtenir l'angle d'inclinaison optimal correspondant aux surfaces exposées au sud de la région de Touat et ses endroits adjacents du sud où aucune donnée de rayonnement solaire n'est disponible.

Les principales conclusions peuvent être tirées, sont les suivantes :

- La détermination des angles d'inclinaison optimaux des capteurs solaires et des panneaux orientés vers le sud dans la ville de Touat a été obtenue pour des ajustements mensuels, trimestriels, semestriels et annuels afin de maximiser la quantité de rayonnement solaire.
- D'après les résultats, l'angle d'inclinaison optimum annuel a été calculé à 28° pour Touat. Cette valeur de l'angle d'inclinaison est suffisamment proche de la latitude de la région considérée (27.88°). Les surfaces à cette valeur d'inclinaison resteront fixes tout au long de l'année.
- Les résultats indiquent également que le gain énergétique le plus élevé correspondait à l'ajustement mensuel de la surface par quantité de 9,27 GJ / m².
- L'ajustement des angles d'inclinaison seulement deux fois par an est pratiquement suffisant pour l'emplacement considéré.

De surcroit, la précision des angles d'inclinaison obtenus à l'aide de simulations en utilisant le PVGIS (Système d'Information Géographique Photovoltaïque) a été évaluée. Des différences significatives entre les estimations PVGIS des angles d'inclinaison et les valeurs basées sur les mesures au sol sont trouvées. Ces différences sont attribuées à l'incapacité des satellites afin de mesurer correctement l'irradiation de surface.

Conclusion Générale

Lors de mon étude du gisement solaire, j'ai été surpris, que beaucoup de stations météorologiques ne sont pas équipées d'instruments de mesures de rayonnement ; ce qui handicape les travaux de recherches et les éventuelles installations. L'appareillage chargé de ces mesures est tout à fait au point et les saisies sont automatisées (par ordinateur). Ces possibilités confèrent aux mesures la fiabilité, la précision et la quantité (au fil des ans) nécessaires aux traitements statistiques ; en vue de développer des modèles mathématiques ou fournir aux utilisateurs des informations sûres.

Afin de caractériser la variabilité spatio-temporelle des ressources solaires dans le milieu saharien, une méthode des géostatistiques a été appliquée aux données historiques du rayonnement global et météorologique, pour la période 2010-2015. A l'issue de ce travail, nous disposons des caractéristiques générales représentatives vers le site :

- Le site de Touat est caractérisé par une durée astronomique du jour relativement longue (varie entre 10,26 et 13,74 heures), un taux d'ensellement très élevé (plus de 80% annuellement) et une hauteur max du soleil varie entre $38,67^\circ$ et $85,57^\circ$.
- La caractérisation radiométrique solaire du site de Touat sur plan horizontal et incliné a permis de comprendre, de décrire et d'optimiser les composantes de la radiation solaire (directe, diffuse et globale). L'étude a montré aussi l'intérêt de l'orientation du plan de captation sur l'énergie solaire récoltée au cours de l'année.
- On recommande l'utilisation de deux orientations au cours de l'année afin de maximiser la collecte énergétique de la radiation solaire.

- Le site de Touat, du point de vue climat, il est caractérisé par un climat purement saharien chaud (température maximale annuelle varie entre 20° et 46°), sec (humidité annuelle varie entre 14 et 45% et pluviométrie très faible) et ensoleillé presque durant toute l'année. Cet aspect favorise fortement les applications de l'énergie solaire thermique.

Le développement des modèles de flux solaire sur le plan horizontal et incliné, un projet qui permet la création d'une base de données dynamique pour une gestion durable des ressources naturelles renouvelables dans un milieu saharien, et permet pour les utilisateurs et chercheur pour voir une idée simple et rapide sur le flux solaire de la région. Ajoutons cependant que cette étude nous a permis de franchir un pas franc et sûr dans la modélisation du rayonnement solaire pour affirmer qu'il n'existe pas de technique théorique universelle épousant les résultats expérimentaux.

Nous souhaitons que ce travail puisse contribuer à lancer la recherche et les études de gisement solaire et le potentiel à d'autres sources d'énergie renouvelable, éolienne, biomasse, géothermie.

