



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electronique
Laboratoire des Dispositifs de Communication
et de Conversion Photovoltaïque



Thèse de Doctorat en Electronique

Option : Electricité Solaire

Présentée par :

BENKACIALI Saïd

Master en physique des rayonnements

Intitulé

**Prédiction du DNI en Algérie : cas
des modèles hybrides**

Soutenue publiquement le **06/10/2019** Devant le jury composé de:

Président :	Mr. AIT-CHEIKH Med Salah	Professeur	ENP
Rapporteur/Promoteur	Mr. HADDADI Mourad	Professeur	ENP
Rapporteur/Co-Promoteur	Mr. KHELLAF Abdallah	Directeur de recherches	CDER
Examineur	Mr. LARBES Chérif	Professeur	ENP
Examineur	Mr. TOUAFEK Khaled	Directeur de recherches	URAER, CDER
Examineur	Mr. HANINI Salah	Professeur	Yahia Farés

ENP 2019



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electronique
Laboratoire des Dispositifs de Communication
et de Conversion Photovoltaïque



Thèse de Doctorat en Electronique

Option : Electricité Solaire

Présentée par :

BENKACIALI Saïd

Master en physique des rayonnements

Intitulé

**Prédiction du DNI en Algérie : cas
des modèles hybrides**

Soutenue publiquement le **06/10/2019** Devant le jury composé de:

Président :	Mr. AIT-CHEIKH Med Salah	Professeur	ENP
Rapporteur/Promoteur	Mr. HADDADI Mourad	Professeur	ENP
Rapporteur/Co-Promoteur	Mr. KHELLAF Abdallah	Directeur de recherches	CDER
Examineur	Mr. LARBES Chérif	Professeur	ENP
Examineur	Mr. TOUAFEK Khaled	Directeur de recherches	URAER, CDER
Examineur	Mr. HANINI Salah	Professeur	Yahia Farés

ENP 2019

DEDICACE

Je dédie ce rapport de thèse à mes deux chers parents, qui n'ont jamais cessés de me soutenir, m'encourage. "Merci d'avoir toujours été là pour moi, que dieu vous protège et vous accorde une longue vie".

Je tiens à présenter mes reconnaissances et mes remerciements à ma femme qui m'a soutenu et supporté durant cette dernière période d'une manière indéfectible. Sans oublier mes deux filles Inas et Ouiza.

Je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes qui me sont chères, ma grande famille en particulier mes frères et sœurs.

Sans oublier de remercier mes chers collègues de l'URAER, plus particulièrement Kacem Gairaa et Azzédine Boutelvik, qui m'ont apporté leur soutien moral pendant la période de thèse, je les en remercie sincèrement.

REMERCIEMENT

JE REMERCIE ALLAH LE TOUT-PUISSANT DE M'AVOIR
DONNE LE COURAGE, LA VOLONTE ET LA PATIENCE DE
MENER A TERME CETTE THESE DE DOCTORAT.

En premier lieu, j'aimerais remercier vivement, mon directeur de thèse, Mr Mourad Haddadi, Professeur à l'ENP d'avoir accepté de diriger mes travaux de thèse. Je voudrais lui exprimer toute ma gratitude pour la grande confiance qu'il m'a accordée durant ces années.

Monsieur Salah Med AIT-CHEIKH, Professeur à l'école polytechnique d'Alger pour le grand plaisir qu'il me fait en présidant le jury.

Monsieur Abdallah. Khellaf, Directeur de recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables, d'avoir consenti à être co-Directeur de thèse.

Je remercie Monsieur Salah Hanini, Professeur à la faculté de science et de la technologie de l'université Yahia Farés de Médéa, d'avoir bien voulu juger ce travail.

Je remercie Monsieur Chérif Larbes, Professeur à l'école polytechnique d'Alger pour le grand plaisir qu'il me fait en acceptant d'avoir fait partie de ce jury.

Je remercie Monsieur Khaled. Touafek, Directeur de recherche à l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables de Ghardaïa, en acceptant d'avoir fait partie de ce jury.

ملخص: إن التحديد الدقيق لمكونات الطاقة الشمسية، في الخصوص الإشعاع الشمسي المباشر (DNI) ضروري لتطبيقات الطاقة الشمسية المختلفة، خاصة تلك المتعلقة بتكنولوجيات التركيز الشمسي (CSP). لقد أظهرت الدراسات الحديثة أن أي خطأ، مهما كان حجمه في تقدير DNI، ينعكس مباشرة على دقة تكنولوجيا الأنظمة الشمسية. لذلك يستوجب وجود قياسات دقيقة لـ DNI، قياسات على سطح الأرض. بسبب عدم توفر أجهزة القياس، يتم استخدام تقنيات النماذج النظرية. في هذه الرسالة، تم استعمال ثمانية عشر نموذجًا للنطاق العريض عندما تكون السماء صافية. في هذه الرسالة، تم تسجيل البيانات الشمسية حول موقعين في ظل الظروف الجوية المختلفة؛ موقع Bouzareah (الجزائر)، وتقع على ساحل البحر الأبيض المتوسط، وعلى موقع Ghardaïa، جنوب الجزائر، في المنطقة الصحراوية. من ناحية أخرى، تم قياس ثلاثة معاملات إدخال بواسطة جهازين للأرصاد الجوية التالية: thermo hygromètre لقياس درجة الحرارة والرطوبة النسبية و manomètre لقياس الضغط الجوي. بالإضافة، تم استخدام ثلاثة مؤشرات إحصائية لمقارنة نتائج التنبؤ ومقاييس DNI، كما يلي: متوسط الخطأ النسب، خطأ مربع متوسط نسبي و معامل التحديد. وأظهرت النتائج أن نماذج MAC، Yang، Dogniaux و ESRA أكثر ملاءمة لاستخدامها في التطبيقات الطاقة الشمسية.

الكلمات الدالة: الإشعاع الشمسي المباشر (DNI)، نماذج النطاق العريض، متغيرات الأرصاد الجوية، عوامل التعكر الجوي، الصيغ الإحصائية.

ABSTRACT: An accurate determination of solar radiation components, particularly the direct normal irradiance (DNI), is essential for various solar applications, especially those related to concentrated solar powers technology. Recent studies have shown that an error, whatever its size, for solar DNI assessment, influences directly the quality of the solar systems. For this, the DNI accurate is required for any solar applications, by using a high quality measurements instruments. However, due to the unavailability of measuring devices, solar modeling techniques are used. This thesis focuses on study of eighteen broadband models for clear sky conditions, to predict the DNI in Algeria. Thus, solar data were recorded about two sites under the different weather conditions; Bouzarèah site (Algiers), located on the Mediterranean coast, and Ghardaïa site, south of Algeria. In more, three input parameters were measured by two meteorological devices: the thermos-hygrograph for the temperature and relative humidity, and manometer for the atmospheric pressure. Three statistical indicators were used to compare the estimated and measured DNI, It is found that, the MAC, Yang, Dogniaux and ESRA models are more suitable to be used for solar applications.

Keywords: Direct solar irradiance (DNI), broadband models, meteorological variables, Atmospheric Turbidity Factors, statistical formulas.

Résumé : Une détermination précise des composantes énergétiques du rayonnement solaire, plus particulièrement l'éclairement normal direct DNI, est essentielle pour diverses applications solaires, surtout celles liées aux technologies de concentrations solaires (CSP). De récentes études ont montré qu'une erreur, aussi minime soit-elle, dans l'évaluation de DNI, met à risque la fiabilité technologique des systèmes solaires. Pour cela, la précision DNI est requise pour toutes les applications solaires, en utilisant des instruments de mesure de haute qualité. En raison de l'indisponibilité des appareils de mesures on a recours à des techniques de modélisation du rayonnement solaire. L'objectif de cette thèse, consiste à étudier dix-huit modèles large bande pour prédire le DNI. Les données solaires ont été enregistrées sur deux sites soumis à des conditions météorologiques différentes; Site de Bouzarèah (Alger), situé sur la côte méditerranéenne et sur le site de Ghardaïa, au sud Algérien. En plus, trois paramètres d'entrées ont été mesurés par deux dispositifs météorologiques: le thermo-hygromètre pour la température et l'humidité relative, et un manomètre pour la pression atmosphérique. Aussi, trois indicateurs statistiques ont été employés afin de comparer les prédictions les mesures du DNI. Les résultats ont montré que les modèles MAC, Yang, Dogniaux et ESRA sont plus appropriés pour être utilisés dans des applications solaires.

Mots clés : Eclairement solaire direct (DNI), modèles large bande, les variables météorologiques, les facteurs de turbidité atmosphérique, formules statistiques.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

RESUME

TABLE DE MATIERES

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

INTRODUCTION.....	12
Chapitre 1 : L'énergie dans le monde : état des lieux et perspectives.....	17
1.1 : Introduction.....	17
1.2 : Aperçu général sur les énergies dans le monde.....	17
1.2.1 : La distribution mondiale des énergies primaires.....	17
1.2.2 : Aperçu sur l'électricité dans le monde.....	20
1.2.3 : Les énergies renouvelables dans le monde.....	21
1.2.3.1 : Capacité d'installation électrique renouvelable.....	21
1.2.3.2 : Production électrique renouvelable dans le monde.....	21
1.2.3.3 : Perspectives de productions d'électricité renouvelable.....	22
1.3 : Les émissions de gaz à effet de serre.....	23
1.3.1 : Les principaux gaz à effet de serre.....	23
1.3.2 : Origine anthropique des gaz à effet de serre.....	25
1.3.3 : Les projections climatiques du cinquième rapport des GIEC.....	25
1.4 : Perspectives et applications des énergies renouvelables en Algérie.....	27
1.4.1 : Aperçu global sur les énergies fossiles en Algérie.....	27
1.4.2 : Les énergies renouvelables en Algérie.....	28
1.4.2.1 : Le potentiel solaire.....	28
1.4.2.2 : Le potentiel éolien.....	28
1.4.2.3 : La biomasse.....	29
1.4.2.4 : Le potentiel géothermique.....	29
1.4.3 : Le programme national des énergies renouvelables.....	30
1.5 : Conclusion.....	31
Chapitre 2 : Généralité sur le gisement solaire.....	33
2.1 : Introduction.....	33
2.2 : Le rayonnement solaire.....	33
2.2.1 : Le soleil.....	33
2.2.2 : Aspect géométrique et astronomique.....	35
2.2.2.1 : La constante solaire.....	36
2.2.2.2 : Le mouvement de la terre autour du soleil.....	37

2.2.2.3	: Les coordonnées terrestres.....	38
2.2.2.4	: Les coordonnées solaires.....	38
2.2.3	: Aspect énergétique.....	43
2.2.3.1	: Le spectre solaire.....	43
2.2.3.2	: Le rayonnement solaire à travers l’atmosphère terrestre.....	46
2.2.3.2.1	: Cas de la diffusion.....	47
2.2.3.2.2	: Cas de l’absorption.....	48
2.3	: Les composantes du rayonnement solaire.....	50
2.3.1	: Etude théorique.....	50
2.3.1.1	: Modèle de Bird-Hulstrom.....	50
2.3.1.2	: Modèle de Brine.....	52
2.3.2	: Mesures du rayonnement solaire.....	53
2.3.2.1	: Les mesures satellitaires.....	54
2.3.2.2	: Mesures au sol.....	55
2.4	: Conclusion.....	57
Chapitre 3 : Modèles de prédictions du rayonnement solaire.....		59
3.1	: Introduction.....	59
3.2	: Les modèles de prédiction.....	59
3.2.1	: Les modèles empiriques.....	59
3.2.1.1	: Les formules de régressions	59
3.2.1.1.1	: Modèle d’Angstrom.....	60
3.2.1.1.2	: Modèle d’Ogelman.....	60
3.2.1.1.3	: Modèle de Samuel.....	61
3.2.1.1.4	: Modèle de Liu-Jordan et de Collares-Pereira.....	61
3.2.1.1.5	: Modèle d’Elagib et Mansell.....	61
3.2.1.1.6	: Modèle d’Hargreaves.....	62
3.2.1.1.7	: Modèle de Swartman et Ogunlade.....	62
3.2.1.1.8	: Modèle d’H. Garg et S. Garg.....	62
3.2.1.1.9	: Modèle de Togrul et Onat.....	63
3.2.1.2	: Les formules du rayonnement solaire sur un plan incliné.....	63
3.2.1.2.1	: Le modèle de Liu et Jordan.....	64
3.2.1.2.2	: Le modèle de Hay et Davies.....	64
3.2.1.2.3	: Le modèle de Temps et Coulson.....	65
3.2.1.2.4	: Le modèle de Klucher.....	65
3.2.1.2.5	: Le modèle de Reindl.....	65
3.2.1.2.6	: Le modèle de Perez.....	65
3.2.2	: Les techniques de l’intelligence artificielle.....	67
3.2.2.1	: Les réseaux de neurones artificiels.....	67

3.2.2.2	: La logique floue.....	70
3.2.2.2.1	: Les caractéristiques des ensembles flous.....	71
3.2.2.2.2	: Les opérateurs sur les ensembles flous.....	72
3.2.2.2.3	: Le raisonnement en logique floue.....	73
3.2.2.2.4	: Les applications de la logique floue.....	74
3.2.2.3	: Systèmes neuro-flous (ANFIS-Adaptive neuro fuzzy inference system.....	75
3.2.2.3.1	: La structure Hybride d’ANFIS.....	76
3.2.2.3.2	: Algorithme d’apprentissage d’ANFIS.....	78
3.2.3	: Les méthodes stochastiques.....	79
3.2.3.1	: Les formules de la composante périodique et de la tendance.....	80
3.2.3.2	: Le modèle additif.....	81
3.2.3.3	: Le modèle multiplicatif.....	81
3.2.3.4	: Les caractéristiques des séries temporelles.....	81
3.2.3.5	: Les modèles aléatoires des séries temporelles.....	82
3.2.3.5.1	: Présentation des modèles.....	82
3.2.3.5.2	: Modèle Auto régressif (AR(p)).....	83
3.2.3.5.3	: Modèle Moyenne Mobile (MA (q)).....	83
3.2.3.5.4	: Modèle Auto Régressif Moyenne Mobile (ARMA (p,q)).....	83
3.2.3.5.5	: Modèle Auto régressif intégré Moyenne Mobile (ARIMA (p,d,q)).....	84
3.2.3.5.6	: Cas de la prévision.....	84
3.2.3.5.6.1	: La prévision des processus AR.....	84
3.2.3.5.6.2	: La prévision des processus ARMA.....	84
3.2.3.5.6.3	: Approche de Box et Jenkins.....	85
3.3	: Conclusion.....	86
Chapitre 4 : Prédiction du DNI à partir des modèles large bande.....		88
4.1	: Introduction.....	88
4.2	: Les modèles atmosphériques et météorologiques.....	89
4.2.1	: Les facteurs de turbidité de Linke et d’Angstrom.....	89
4.2.2	: Epaisseur optique corrigée de la vapeur d’eau.....	90
4.2.3	: Epaisseur optique corrigée de l’ozone.....	91
4.3	: Les modèles de prédictions du DNI.....	91
4.3.1	: Modèle Ashrae.....	93
4.3.2	: Modèle de Kumar.....	93
4.3.3	: Modèle Daneshyar-Paltridge-Proctor (DPP).....	93
4.3.4	: Modèle Meinel.....	94
4.3.5	: Modèle Majumdar.....	94
4.3.6	: Modèle de Dogniaux.....	94
4.3.7	: Ineichen-Perez.....	94

4.3.8	: Modèle ESRA.....	95
4.3.9	: Modèle Héliodat-1.....	95
4.3.10	: Modèle EEC.....	95
4.3.11	: Modèle Perrin de Brichambaut.....	95
4.3.12	: Modèle Atwater.....	96
4.3.13	: Modèle MAC.....	97
4.3.14	: Modèle de Bird et Hulstrom.....	97
4.3.15	: Modèle de Yang.....	98
4.3.16	: Modèle METSTAT.....	99
4.3.17	: Modèle de Rodgers.....	99
4.3.18	: Modèle de Solis.....	100
4.4	: Analyse des résultats de simulations.....	100
4.4.1	: Performance des modèles.....	101
4.4.2	: Sélection des modèles les plus performants.....	103
4.4.3	: Comparaison avec la littérature.....	108
4.5	: Conclusion.....	109
CONCLUSION GENERALE.....		111
BIBLIOGRAPHIE.....		112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Les phases du programme d'installation des filières renouvelables en Algérie, durant 2015- 2030 (en MW).....	31
Tableau 3.1	Coefficients de luminosité pour le modèle anisotrope de Perez.....	67
Tableau 3.2	Diverses agrégations les plus couramment utilisées	72
Tableau 3.3	Différentes règles d'inférence de la logique floue.....	73
Tableau 3.4	Méthodes d'apprentissage pour l'ANFIS.....	79
Tableau 4.1	Résultats statistiques (en %) de la performance de chaque modèle proposé.....	102
Tableau 4.2	Comparaison entre certains modèles cités avec ceux existants dans la littérature.....	109

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1a	Taux de production mondiale des énergies primaires en 2015.....	18
Fig. 1.1b	Taux de consommation mondiale des énergies primaires en 2015.....	18
Fig. 1.2	Consommation énergétique mondiale (qBtu).....	19
Fig. 1.3	Consommation énergétique mondiale pour chaque région (qBtu).....	19
Fig. 1.4	Consommation d'énergie par fuel dans le monde (qBtu).....	20
Fig. 1.5	Production mondiale d'énergie électrique par fuel en 2015 et 2030.....	21
Fig. 1.6	La part de production électrique pour chaque source d'EP en 2015.....	22
Fig. 1.7	La part de production électrique pour chaque source d'EP en 2030.....	22
Fig. 1.8	La part de production électrique pour chaque source d'ER en 2015.....	23
Fig. 1.9	La part de production électrique pour chaque source d'ER en 2030.....	23
Fig. 1.10	Evolution des concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre au cours du temps.....	24
Fig. 1.11	Parts des différents GES anthropiques dans les émissions totales en 2004.....	24
Fig. 1.12	Variation de la température moyenne à la surface du globe entre 1850-2012.....	26
Fig. 1.13	Emission anthropique du CO ₂ (par rapport à 1986-2005) entre 2081 et 2100, selon les scénarios.....	26
Fig. 1.14	Consommation et production annuelle de l'électricité en Algérie en TWh.....	27
Fig. 1.15	Carte annuelle de l'irradiation solaire en Algérie.....	28
Fig. 1.16	La distribution en moyennes annuelles des vents à 10m du sol en m/s.....	29
Fig. 2.1	Structure interne du soleil.....	35
Fig. 2.2	La géométrie du système terre-soleil.....	36
Fig. 2.3	Mouvement annuel du système terre-soleil.....	37
Fig. 2.4	Déclinaison, latitude et angle horaire.....	42
Fig. 2.5	Les paramètres géométriques du système capteur-soleil.....	42
Fig. 2.6	Spectre du rayonnement solaire extraterrestre (masse d'air AM=0) et terrestre (masse atmosphérique AM=1.5), ainsi que celui du corps noir parfait à 5900 K.	44
Fig. 2.7	Puissance émissive spectrale ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) d'un corps noir à diverses températures dans la gamme de longueur d'onde 0-100 μm	45

Fig. 2.8	Atténuation du rayonnement solaire dans l'atmosphère terrestre, au niveau de la mer ($AM = 1$).....	49
Fig. 2.9	Station radiométrique de l'URAER.....	56
Fig. 2.10	Image d'un Héliographe Campbell-Stokes.....	56
Fig. 3.1	Les différentes composantes du rayonnement solaire.....	66
Fig. 3.2	Schéma d'un neurone associé à deux vecteurs entrés, deux poids synaptiques.	68
Fig. 3.3	architecture feed-forward : (a) réseau multicouche, (b) réseau à connexions locales.....	69
Fig. 3.4	réseaux récurrent: (a) synchrone, (b) asynchrone.....	69
Fig. 3.5	Exemple concernant les caractéristiques d'un ensemble floue.....	71
Fig. 3.6	Architecture ANFIS (cas de 2 entrées).....	76
Fig. 4.1	Histogramme des erreurs statistiques (r_b , $rRMSE$) pour les deux sites.....	103
Fig. 4.2	Comparaison entre les DNI estimé et mesuré, pour Alger.....	105
Fig. 4.3	Comparaison entre les DNI estimé et mesuré, pour Ghardaïa.....	106
Fig. 4.4	Erreurs relatives des modèles #6, #13, #15 pour le site d'Alger.....	107
Fig. 4.5	Erreurs relatives des modèles #6, #13, #15 pour le site d'Alger.....	108

INTRODUCTION

L'énergie est la base de tout développement économique et social pour tous les pays du monde. Sa disponibilité et son exploitation améliore la qualité de vie des êtres humains par la satisfaction aux besoins fondamentaux, comme l'eau, l'alimentation, la santé, l'éducation, le logement, etc. Les énergies mises en jeu sont réparties en énergies renouvelables (soleil, eau, vent, biomasse...), et en énergies non renouvelables, telles que les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) et l'énergie nucléaire (fission des noyaux d'uranium et de plutonium). D'autre part, depuis l'avènement de l'ère industrielle au milieu du XXI^e siècle, l'humanité ne cesse d'accroître sa consommation d'énergie sous des formes multiples (industrie, transports, chauffage, électricité, etc.). Cette croissance n'a pu se produire que grâce à l'utilisation massive des combustibles dits fossiles, essentiellement le charbon et le pétrole.

D'autre part, nous savons maintenant que la combustion de ceux-ci nous détruit le climat, la montée du niveau de la mer, la perte de la biodiversité, un réchauffement planétaire, etc. Afin de limiter ce problème, les scientifiques multidisciplinaires, ont élaboré des modèles de prévisions qui ont pour objectifs de limiter le réchauffement climatique avec des actions ambitieuses en allant vers la transition énergétique, en particulier l'utilisation des sources d'énergies renouvelables, qui sont respectueuses de l'environnement et de la nature.

Parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire est l'une des technologies d'énergie verte qui a une croissance la plus rapide au monde. En outre, l'énergie solaire est la source d'énergie propre, abondante, renouvelable et durable qui atteint la terre sous forme de lumière et de chaleur et pourrait jouer un rôle clé dans la réduction de la carbonisation.

Cependant, une utilisation efficace de la production d'énergie solaire nécessite des informations de prévisions fiables. De plus, la maîtrise du caractère aléatoire du rayonnement solaire peut offrir une meilleure qualité de service et pourrait permettre, notamment aux utilisateurs des réseaux électriques et des systèmes solaires de mieux les intégrer. Cette maîtrise n'est possible qu'avec une prédiction de grande précision, c'est-à-dire le recours aux modèles de prédictions ou de prévisions. Ce rayonnement solaire est également important dans de nombreuses autres disciplines, comme la télédétection, la physique atmosphérique, l'agriculture et la recherche scientifique.

Le rayonnement solaire est enregistré au niveau du sol par différentes stations météorologiques afin de fournir des données fiables pour l'évaluation de la ressource solaire, et pour une adaptation performante aux différentes applications industrielles. Les données enregistrées seront ensuite utilisées pour la validation des modèles de prévisions (forecasting) et de prédictions (estimating), et aussi pour les comparer avec des données satellitaires, qui

deviennent des options les plus utilisées pour obtenir des estimations spatiales du rayonnement solaire. Par conséquent, la précision des estimations du rayonnement solaire est primordiale pour garantir des évaluations correctes des performances des systèmes solaires. Par exemple, l'incertitude globale du rendement énergétique sur la durée de vie des systèmes photovoltaïques (PV) est directement affectée par la précision des données sur les ressources solaires, ainsi que pour l'évaluation des performances des systèmes solaire, tels que les panneaux photovoltaïques, les systèmes à concentration solaire, etc...).

Par conséquent, la disponibilité et la précision des données, et les progrès de la modélisation sont des critères fondamentaux pour la prévision ou la prédiction du rayonnement solaire. Cependant, le meilleur moyen de déterminer la quantité de rayonnement solaire sur un site, consiste à installer des instruments radiométriques qui permettent de mesurer les composantes énergétiques, telles que le diffus, le direct et le global. Il s'agit, par exemple des pyranomètres et pyréliomètres.

Afin de construire une base de données (data-base) fiable et précise, des enregistrements quotidiens, ainsi que l'étalonnage régulier des appareils doivent être à jour afin de fournir à l'utilisateur, des données lui permettant de bien gérer ses installations solaire et d'optimiser (minimiser) ainsi les erreurs systématiques provenant des mesures. En outre, les appareils de mesures radiométriques coûtent très cher, et sont donc moins abondants.

En raison du coût élevé des équipements de mesure et de leurs exigences en matière de maintenance et de fonctionnement, de nombreuses recherches ont été menées dans le but d'élaborer et de développer des modèles permettant de prédire les trois composantes du rayonnement solaire. Alors, un certain nombre de corrélations et de méthodes ont été développées pour estimer le rayonnement solaire instantané, quotidien ou mensuel sur la base de données, plus facilement disponibles dans la majorité des stations météorologiques, comme la température de l'air, la pression et l'humidité de l'air.

Les modèles utilisés dans notre travail consistent à prédire le rayonnement solaire direct (DNI) reçu sur un plan horizontal qui sont généralement basés sur des ensembles de variables d'entrées qui sont soit estimées, soit mesurées où bien la combinaison des deux ensembles (mesurées plus estimées), telles que les facteurs astronomiques (constante solaire, distance terre-soleil, déclinaison solaire et l'angle horaire), géographiques (latitude et longitude et l'altitude), géométriques (angle azimutal, angle d'inclinaison d'un capteur, la hauteur du soleil et l'angle zénithal du soleil) et météorologiques (durée d'insolation, température de l'air, humidité relative, température de rosée, albédo, effet des nuages,

l'épaisseur d'ozone, et de la vapeur d'eau, le trouble atmosphérique, etc...), c'est le but du [chapitre 4](#).

Cependant, avant de nous pencher sur l'étude précédente, nous avons présenté au cours du [chapitre 1](#), une analyse détaillée sur les perspectives énergétiques mondiales, en particulier en Algérie où le défis du secteur de l'énergie joue un rôle primordial dans le développement économique et social du pays, notamment dans le domaine des hydrocarbures. Par ailleurs, dans le cadre de la politique de la transition énergétique mondiale, en vue de réduire la dépendance aux énergies fossiles (charbon, gaz et pétrole), l'Algérie tend à promouvoir d'autres types d'énergies inépuisables, telles que l'énergie éolienne, le solaire et la géothermie. Dans ce contexte, le gouvernement a adopté un ambitieux programme de développement des énergies renouvelables à l'horizon 2030. Il porte sur l'installation d'une capacité de 22 000 MW de production d'électricité d'origine renouvelable dont 10 000 MW seraient dédiés pour l'exportation.

Dans le [chapitre 2](#), nous avons abordé la notion du gisement solaire qui est défini comme étant l'étude du rayonnement solaire reçu par la surface de la Terre, pouvant être mesuré au sol ou dérivé des modèles de prédiction, et ce pour une connaissance précise des composantes du rayonnement solaire. Afin d'aborder les chapitres concernant les modèles de prédictions, nous avons présenté quelques généralités sur le rayonnement solaire, telles que les formules astronomiques et météorologiques qui constituent les bases fondamentales du gisement solaire. En outre, nous avons décrit les formules permettant de calculer les paramètres influençant le rayonnement solaire, telles que le mouvement du système terre-soleil, les coordonnées terrestres, les coordonnées solaire, le spectre solaire et les dispositifs expérimentaux qui servent à mesurer les différentes composantes du rayonnement solaire (diffus, direct, global). Enfin, le [chapitre 3](#), présente les divers techniques de modélisations du rayonnement solaire incident sur un plan incliné ou horizontal. Ces modèles consistent en la prédiction des composantes énergétiques du rayonnement solaire, en utilisant des approches empiriques, stochastiques et intelligentes.

Partie 1

Chapitre 1

L'énergie dans le monde : état des lieux et perspectives

1.1 INTRODUCTION

En mettant l'accent sur l'état de connaissance des scénarios énergétiques projetés, liés à la consommation, et à la production des énergies fossiles et renouvelables, il est essentiel de présenter dans ce chapitre quelques informations liées au changement climatique et à ses conséquences, en se référant aux rapports d'évaluations publiés par des experts, par exemple le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Ces publications constituent les principales apports scientifiques au profit des négociations internationales sur le climat qui se déroulent notamment, sous l'égide de la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du Protocole de Kyoto, en proposant ainsi un calendrier de réduction des émissions des gaz à effet de serre, considérés comme la principale cause du réchauffement climatique. Ensuite, nous avons mis en évidence un aperçu global sur la stratégie algérienne de développement des énergies renouvelables et son programme ambitieux des énergies renouvelables à l'horizon de l'an 2030, où les différentes phases du programme d'installation des filières renouvelables, ont été abordées durant 2015-2030.

1.2 APERÇU GENERAL SUR LES ENERGIES DANS LE MONDE

1.2.1 La distribution mondiale des énergies primaires

En raison de la croissance démographique, la consommation mondiale en énergétiques conventionnelles évolue rapidement. Si cette augmentation continue sans avoir recours aux autres types d'énergies, il y'aurait des crises socio-économiques et environnementales sans précédents. Entre 2015-2030, la population mondiale devrait augmenter de 7.24 à 8.33 billion, c'est-à-dire environ 1.1 milliards de personnes devraient être ajoutées à la population mondiale durant la période, dont 0.49 milliard de personnes seront ajoutées en Asie, 0,46 milliard de personnes en Afrique, suivies par l'Amérique latine et l'Amérique du nord, qui devraient avoir des augmentations beaucoup plus faibles [1-3]. En conséquence, la demande d'énergie devrait être augmentée par rapport à la population et aux besoins industriels. Selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) [4], la production mondiale d'énergie primaire en 2015 est de 13647 Mtep (541.1 qBtu) [4,5], tandis que la consommation est d'environ 13105 Mtep (519.6 qBtu). Les taux de production et de consommation pour le pétrole, gaz naturel, charbon, Energie nucléaire, hydroélectricité et les énergies renouvelables sont visualisés respectivement dans les figures ci-dessous (Figs. 1.1a et 1.1b). Il ressort de ces graphes que plus de 80 % de la production et de la consommation mondiale d'énergie a été basée en 2015 sur les énergies fossiles.

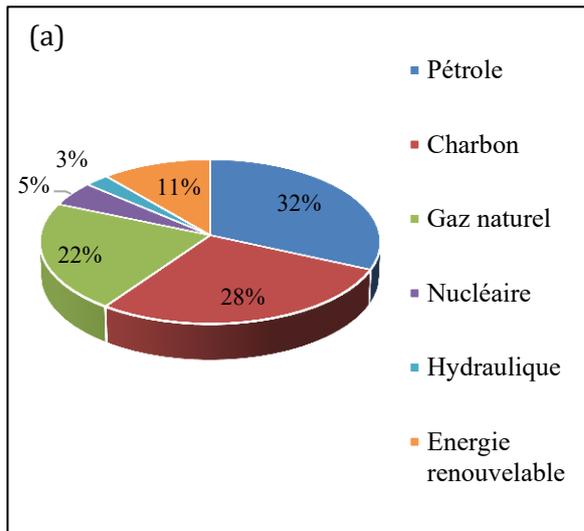


Fig. 1.1a : Taux de production mondiale des énergies primaires en 2015 [4]

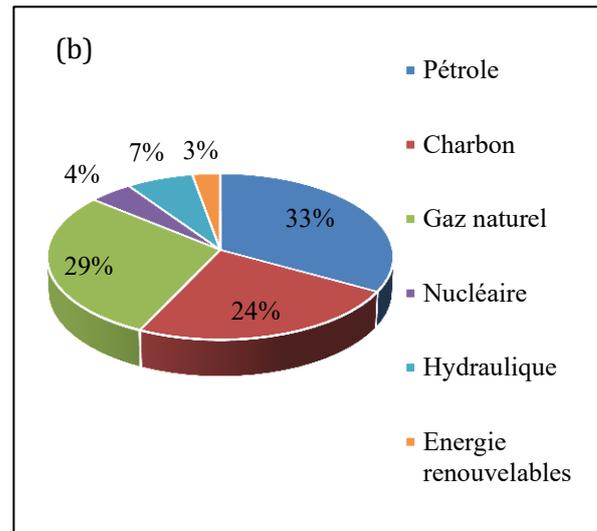


Fig. 1.1b : Taux de consommation mondiale des énergies primaires en 2015 [4]

L'AIE, présente des rapports complets sur les perspectives énergétiques mondiales dans le but de suivre le futur énergétique dans le monde en se guidant par les quatre domaines principaux: la sécurité énergétique, le développement économique, la sensibilisation à l'environnement et l'engagement dans le monde entier. Par ailleurs elle publie chaque année des études dont les plus connues sont le « World Energy Outlook » (WEO) [5], « International Energy Outlook » (IEO) [6] et « Key World Energy Statistics » (KWES) [7], dans lesquels elle dresse un état des lieux du secteur énergétique et émet des hypothèses sur les perspectives énergétiques en établissant des projections énergétiques globales fondées sur différents scénarios tels que le scénario central ou scénario des nouvelles politiques (new policies scenario) et le scénario 450 (decarbonization scenarios). Ces scénarios prennent en compte les efforts à fournir pour réduire les émissions de dioxyde de carbone, en exploitant différentes voies scientifiques pour parvenir à une réduction des émissions par rapport au scénario de référence dans lequel aucun effort n'est accompli [8].

Selon ces scénarios, et aussi le rapport publié par l'Agence Centrale du Renseignement [9], la consommation de l'énergie primaire au niveau mondiale augmente de 14511.0 Mtep (575.4 qBtu) à 16725 Mtep (663.2 qBtu) durant la période 2015-2030, et à 18571 Mtep (736.4 qBtu) à l'horizon 2040 (Fig. 1.2), d'où un taux d'augmentation de la consommation de 28 %. Alors que, selon le rapport des perspectives énergétiques mondiales (WEO) [5], le taux d'augmentation de la consommation est d'environ 30% durant la période 2015-2040. Selon le rapport publié par l'IEO [6], le taux de croissance de l'énergie primaire pour les pays appartenant à l'organisation de coopération et de développement économique (OCDE)

diminue de 41.7 % en 2015 à 37.7% en 2030. Pour les pays hors-OCDE, la consommation augmente de 58.4% à 62.3%. Par conséquent, la majeure partie de l'augmentation se produisant dans des pays hors-OCDE. Notamment, pour l'Afrique, la consommation des énergies primaires augmentera de +23 % pour la période 2015-2030 et 51 % durant les périodes 2015-2040. La plus grande augmentation est prévue pour l'Asie, qui est de 30% durant les périodes 2015-2030 et 51% durant 2015-2040 (Fig. 1.3). Par ailleurs, durant la période 2015-2040, cette consommation énergétique mondiale est en hausse pour tous les combustibles autres que le charbon (Fig. 1.4). Durant 2000-2015, la consommation en charbon a augmenté de 64%, alors qu'entre 2015 et 2024, nous avons seulement une légère augmentation de 2.8%. Pour les produits liquides, le gaz naturel, le nucléaire et le renouvelable, la référence indique respectivement des augmentations de 9%, 20%, 29% et 37%, durant 2015-2030. Par conséquent, le charbon sera de plus en plus remplacé par le gaz naturel, le nucléaire et le renouvelable.

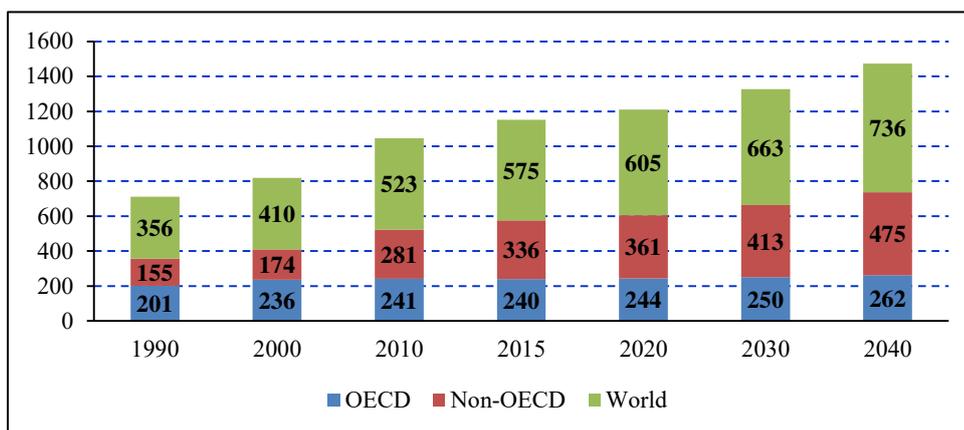


Fig. 1.2 : Consommation énergétique mondiale (qBtu) [IEO 2017]

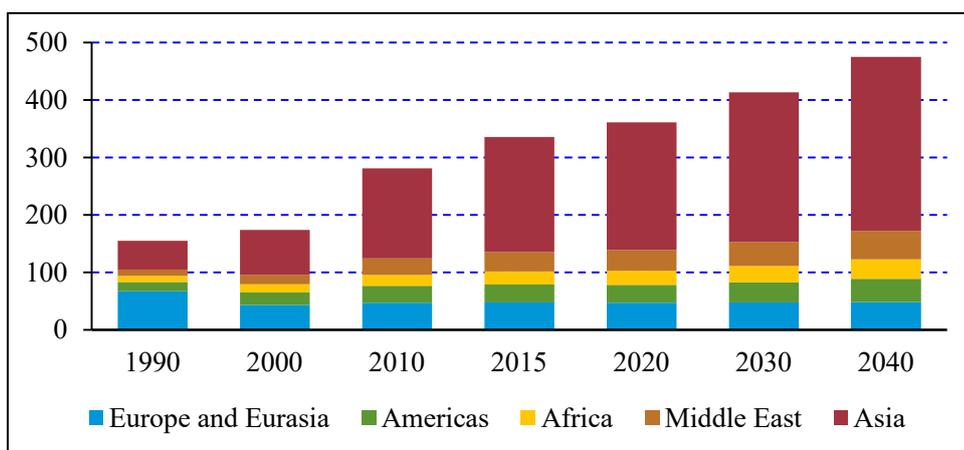


Fig. 1.3 : Consommation énergétique mondiale pour chaque région (qBtu) [IEO 2017]

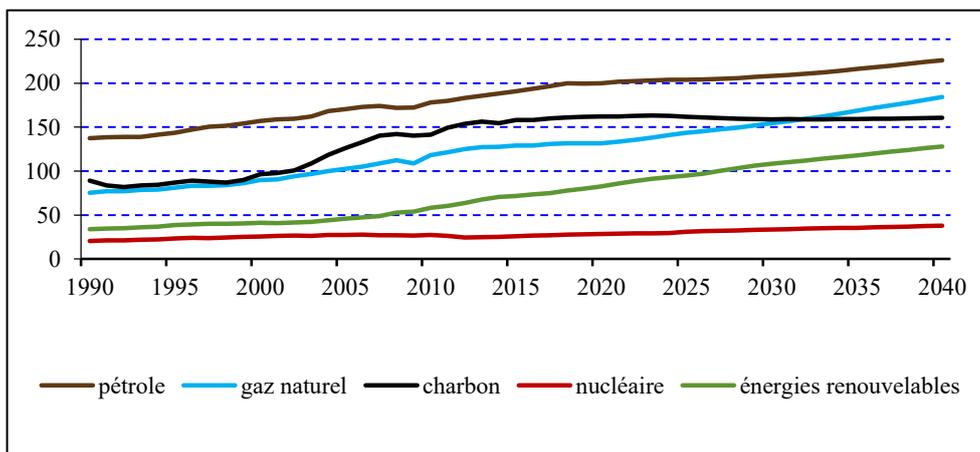


Fig. 1.4 : Consommation d'énergie par fuel dans le monde (qBtu) [IEO 2017]

1.2.2 Aperçu sur l'électricité dans le monde

La production de l'énergie électrique dans le monde a connu depuis 2006 jusqu'à 2015 une croissance de 19.13 à 24.21 TWh, i.e., un taux d'augmentation de 26.5% [5,9]. Par ailleurs, selon le rapport IEO 2017 [6], la production totale d'électricité dans le monde devrait passer de 23.43 TWh en 2015 à 29.36 TWh en 2030, et à 34.048 TWh en 2040, ce qui équivaut à des taux d'augmentation d'environ 23.4 % et 25.30 %, respectivement. Selon WEO 2017, les parts des sources d'énergie primaire pour la production électrique sont de 39% pour le charbon, 23% pour le gaz naturel, 11% pour le nucléaire, 4% pour le pétrole et 23 % pour le renouvelable pour l'année 2015 (Fig. 1.5a). A l'horizon 2030, et selon le rapport, la contribution du charbon diminue sensiblement de 39.33 % jusqu'à 30.06 %, malgré l'augmentation d'énergie électrique produite (Fig. 1.5b). Les parts de l'hydroélectricité et le nucléaire restent quasi-constants. Alors que les parts du gaz naturel et des énergies renouvelables augmenteront de 22.77% à 23.07% pour le gaz et de 7.04 % à 18.25% pour le renouvelable pendant la période 2015-2030. Par conséquent, les énergies renouvelables sont des sources de production d'électricité à plus forte croissance sur la période 2015-2030. Ce qui va inciter les politiques dans le monde de déployer plus d'efforts afin de promouvoir mondialement les énergies renouvelables (ER), en les plaçant comme un domaine prioritaire et stratégique pour la sécurité énergétique, dans le contexte des défis de la transition énergétique et du nouvel ordre économique mondiale.

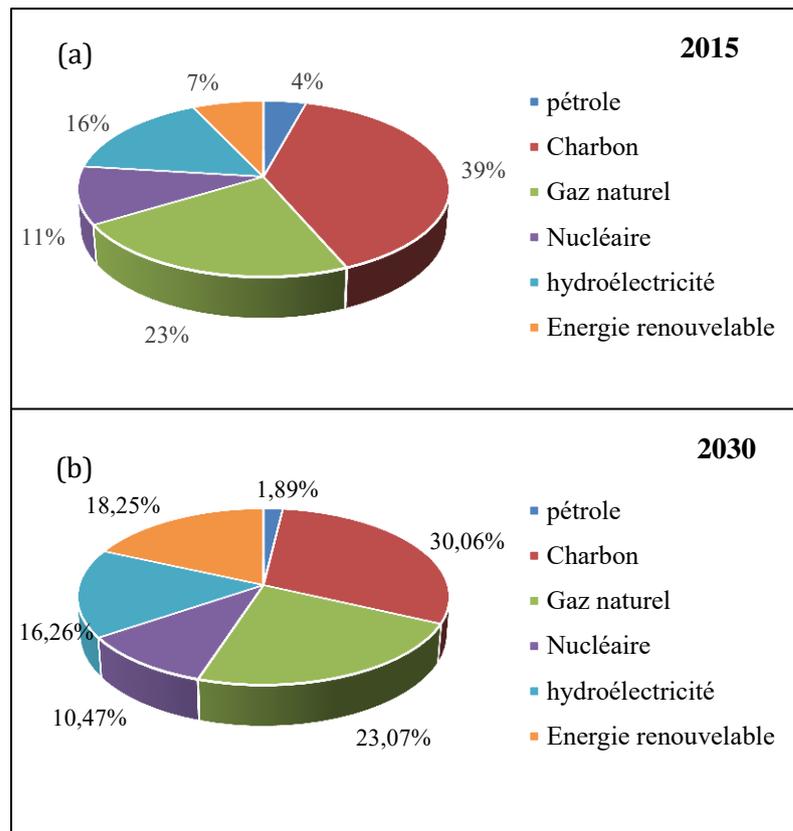


Fig. 1.5 : Production mondiale d'énergie électrique par fuel en 2015 et 2030 [WEO 2017]

1.2.3 Les énergies renouvelables dans le monde

1.2.3.1 Capacité d'installation électrique renouvelable

L'Agence Internationale des Energies Renouvelables (IRENA) [10], indique que la capacité des énergies renouvelables installée dans le monde atteint 1849 GW en 2015 et 2011 GW en 2016. L'Afrique a installé une capacité de 34.11 GW et 38.30 GW en 2015 et 2016, où l'Egypte prend une place prépondérante par rapport à tous les pays d'Afrique jusqu'à l'année 2015 avec une capacité de 3.646 GW. Alors que l'Ethiopie domine l'Egypte en installant 4.22 GW en 2016. Pour l'Asie, la capacité passe de 723.3 à 817.1 GW, pendant 2015 - 2016. La meilleure capacité d'installation est consacrée à la chine variant de 481.7 à 545.9 GW durant 2015-2016, ensuite l'Inde dont les capacités passent de 77.66 à 90.74 GW durant 2015-2016, ensuite le Japon avec une capacité qui varie de 66.50 à 75.12 GW durant la période.

1.2.3.2 Production électrique renouvelable dans le monde

La production d'électricité renouvelable dans le monde est de 5537.1 TWh en 2015 [10]. Pour le Mozambique et l'Egypte, la génération de l'électricité est estimée respectivement à environ 16.30 TWh et 15.33 TWh en 2015, tandis que l'Ethiopie vient en troisième position avec 9.626 TWh de d'énergie de production. D'après le rapport, le Mozambique et l'Egypte sont les meilleurs producteurs d'électricité renouvelables en Afrique. Pour l'Asie, la

production électrique renouvelable estimée à 2069 TWh. La plus importante production est de 1371TWh pour la chine, 210.5 TWh pour l’Inde et 166.7 TWh pour le Japon.

1.2.3.3 Perspectives de productions d’électricité renouvelable

Dans le scénario des perspectives énergétiques mondiales, la production d’énergie renouvelable dans le monde croitra de 1986 à 4349 GW durant la période 2015-2040 [7,11]. Selon rapport international sur les perspectives énergétiques [6], par rapport aux énergies primaires (EP), la contribution des ER pour la production de l’électricité devrait passer de 23 % (5.386 TWh) à 30 % (8.948) TWh, durant la période 2015-2030 (Figs. 1.6 et 1.7). Les figures (Figs. 1.8 et 1.9) montrent l’évolution de la part de contribution de chaque source d’ER pour d’électricité entre 2015 et 2030. Nous avons remarqué que la part de l’hydroélectricité diminue de 72 % en 2015 jusqu’à 57 % en 2030. Alors que pour l’énergie éolienne et le solaire, la production croit de 14 à 22 % et de 4 à 11 %, respectivement. Ainsi, l’énergie éolienne et les sources solaires deviendront de plus en plus concurrentielles par rapport à l’hydroélectricité et la géothermie au cours de la période 2015-2030.

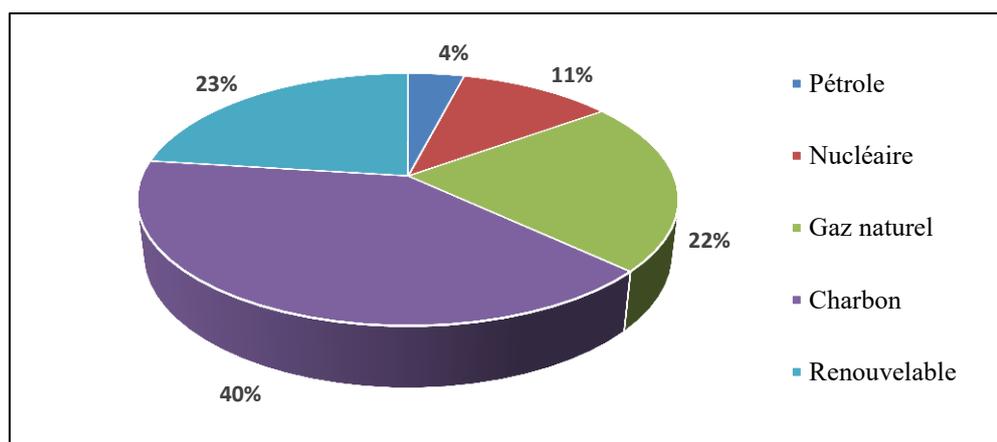


Fig. 1.6 : La part de production électrique pour chaque source d’EP en 2015 [IEO 2017]

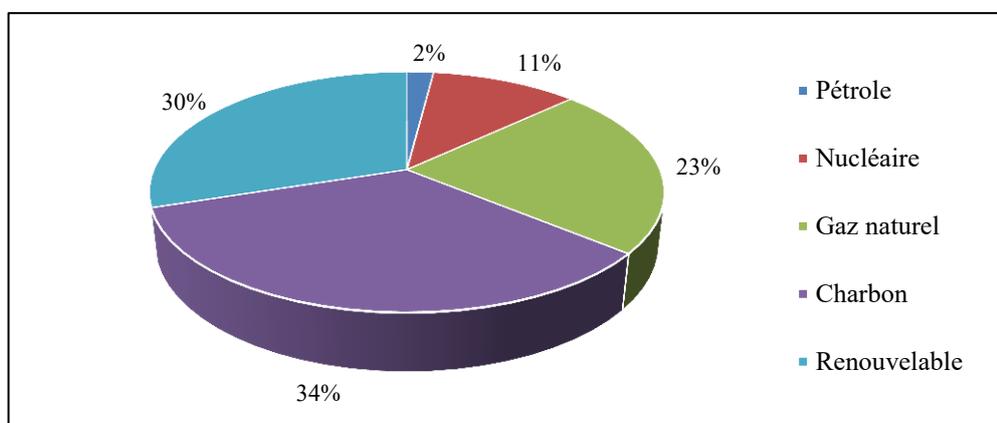


Fig. 1.7 : La part de production électrique pour chaque source d’EP en 2030 [IEO 2017]

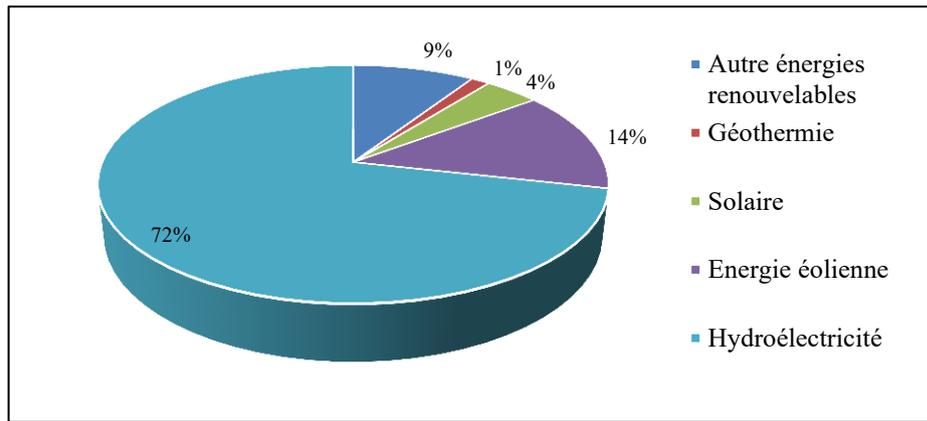


Fig. 1.8 : La part de production électrique pour chaque source d'ER en 2015 [IEO 2017]

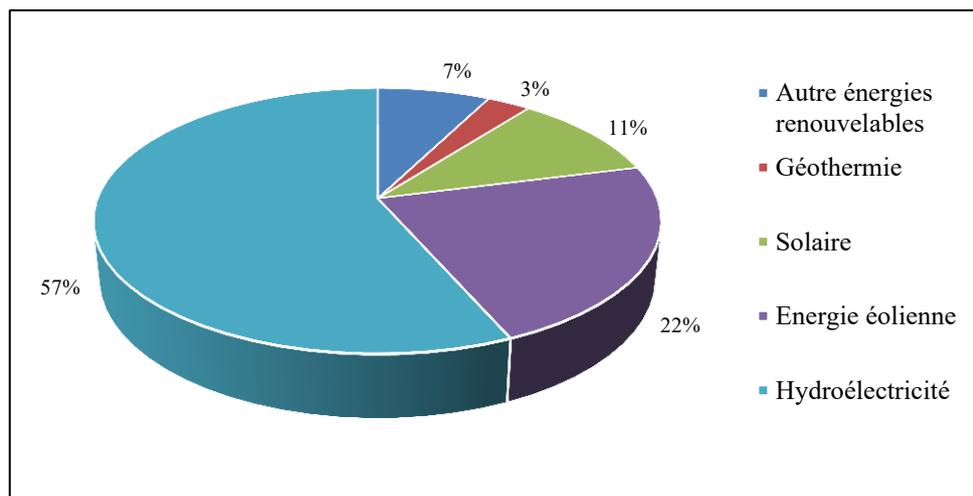


Fig. 1.9 : La part de production électrique pour chaque source d'ER en 2030 [IEO 2017]

1.3 LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

1.3.1 Les principaux gaz à effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel essentiel pour la survie de la planète. Il permet notamment d'avoir une température moyenne sur Terre conforme avec la présence de la vie. Par ailleurs, au cours de dernières décennies, des études ont été menées sur la relation entre les niveaux de carbone et les températures. Il a été conclu que l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) des combustibles fossiles et de leurs industries (GES anthropique) se traduit par un réchauffement climatique avec une température de surface et de la troposphère qui augmente. Certains gaz contenus dans l'atmosphère terrestre absorbent une partie des rayonnements infrarouges émis par le sol. En piégeant une partie des rayons infrarouges, il permet à la Terre d'avoir une température moyenne de 15°C et non de -18°C si celui-ci n'opérait pas. Les plus importants sont la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄), et les gaz issus des activités de l'homme, comme l'oxyde nitreux (N₂O), hydrofluorocarbures (HFC), et hexafluorure de soufre (SF₆) [12]. Chaque gaz est

caractérisé par un pouvoir de réchauffement global (ou PRG) qui lui est propre. Celui-ci, calculé sur un siècle et pour une quantité donnée de gaz, est exprimé en valeur relative par rapport au CO₂ : le PRG du CH₄ et de N₂O sont nettement plus importants que ceux du CO₂. Ainsi, à 100 ans, 1 Kg de CH₄ et de N₂O produisent un effet de serre 25 et 298 fois plus fort que celui du CO₂. Cependant, comme le CO₂ est beaucoup plus abondant dans l'atmosphère que les autres GES (Fig.1.10), il est à lui seul responsable de plus de 50 % de l'augmentation de l'effet de serre (Fig.1.11), selon les analyses du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). De plus, c'est un effet à long terme car il s'accumule dans l'atmosphère et avec une durée de vie de plusieurs siècles (forçage radiatif du système climatique).

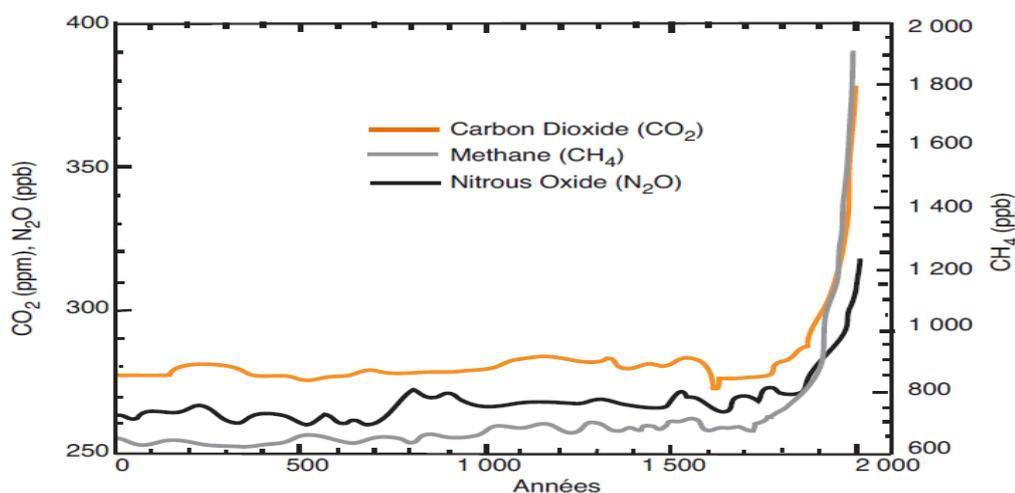


Fig. 1.10 : Evolution des concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre [GIEC 2007].

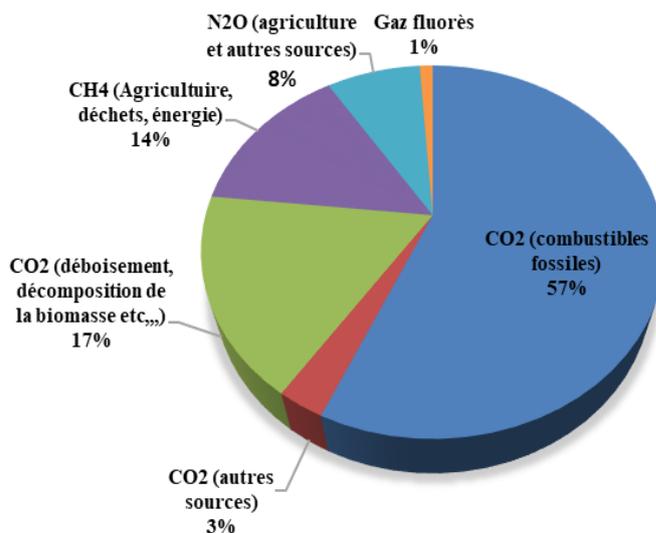


Fig. 1.11 : Parts des différents GES anthropiques dans les émissions totales en 2004 [GIEC 2007]

1.3.2 Origine anthropique des GES

Avec un degré de confiance de 95 % (extrêmement probable), le cinquième rapport publié des groupes d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [13-15], confirme que l'influence de l'homme sur le système climatique est de plus en plus manifeste, et que les émissions anthropiques de GES ont eu de larges répercussions sur les systèmes humains et naturels, et que l'atmosphère et les océans se sont réchauffés, la taille des calottes glaciaires a diminué, le niveau des mers s'est élevé, et l'augmentation des fréquences des tempêtes augmenteront, ainsi que la sécheresse, et l'instabilité des saisons [16,17]. En outre, et selon des études sur les modèles de projections climatiques, le changement climatique se traduira par des risques accrus pour les populations, les biens, les économies et les écosystèmes.

1.3.3 Les projections climatiques du cinquième rapport des GIEC

Selon le rapport du GIEC (5^{ème} rapport du groupe de travail GTIII), depuis 1850 jusqu'à 2012, la température de la surface du globe ne cesse d'augmenter, particulièrement au cours de la période 1880-1950, pour laquelle il existe plusieurs jeux de données indépendants, et où la tendance linéaire globale des données de température indique un réchauffement moyen de 0.85 °C (Fig. 1.12).

En outre, d'après le 4^{ème} rapport du GIEC, l'augmentation de la variation des températures moyennes à la surface de la planète pourrait atteindre 4,8°C à l'horizon 2100 par rapport à la période 1986-2005 selon le scénario de référence.

Les facteurs déterminants des émissions anthropiques de GES principalement le CO₂, sont la taille de la population, l'activité économique, le mode de vie, la consommation d'énergie, le mode d'utilisation des terres, la technologie et la politique climatique. Par ailleurs, selon l'évolution des émissions de CO₂, et afin d'avoir un aperçu plus précis des conséquences du changement climatique, le Groupes de Travail (GTIII), pour son cinquième rapport (AR5), a élaboré quatre scénarios (notés RCP) dans le cinquième rapport du GIEC pour modéliser l'évolution du climat.

Les scénarios RCP (Profiles représentatifs d'évolution de concentration) décrivant quatre voies de développements pour le XXI^e siècle. Ils traduisent la modification des bilans radiatifs sous l'effet de l'augmentation de gaz à effet de serre à travers la troposphère terrestre. Ces scénarios prennent en compte les différentes trajectoires représentatifs de l'évolution du forçage radiative (émissions anthropiques des GES) [18-21].

Les RCP comprennent un scénario d'atténuation (RCP2,6) qui implique une forte réduction des émissions de GES (scénario optimiste), deux scénarios intermédiaire (RCP4,5 et RCP6,0)

et un scénario d'émissions très élevées de GES (RCP8,5) (scénario pessimiste) (Fig. 1.13) impliquant une faible réduction d'émission de GES. Les scénarios ne prévoyant aucun effort destiné à limiter les émissions (scénarios de référence) conduisent à des scénarios se situant entre le RCP6,0 et le RCP8,5. Par conséquent, selon le rapport du GIEC, l'objectif « 2 °C » ne pourra être atteint que si l'on suit les trajectoires du scénario le plus ambitieux (RCP2,6). Pour atteindre cet objectif, les émissions totales cumulées ne devront pas dépasser une fourchette de 1000 à 1300 gigatonnes de carbone d'ici 2100 (environ) [14].

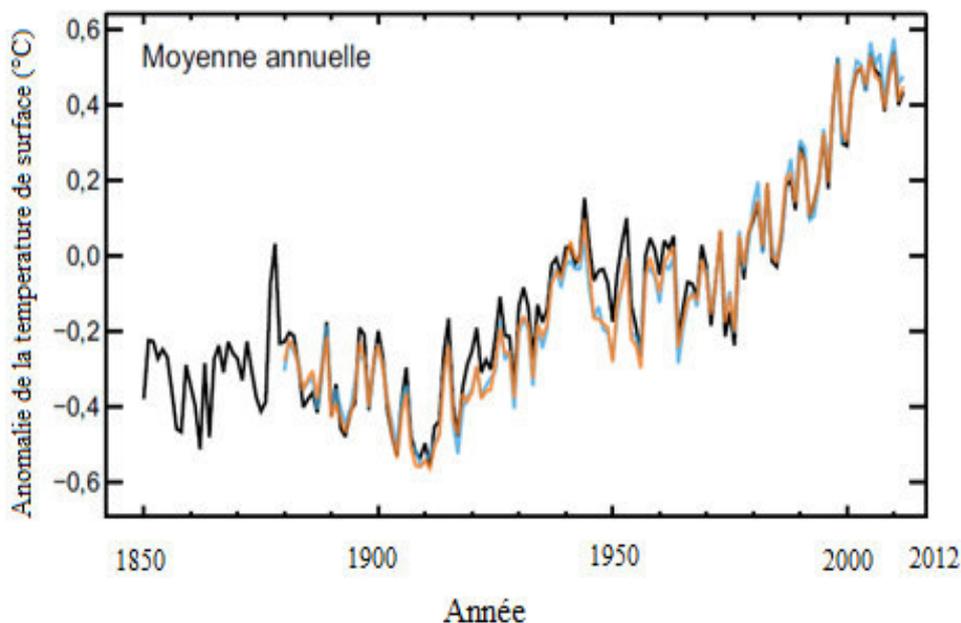


Fig.1.12 : Variation de la température moyenne à la surface du globe entre 1850-2012 [GIEC 2014]

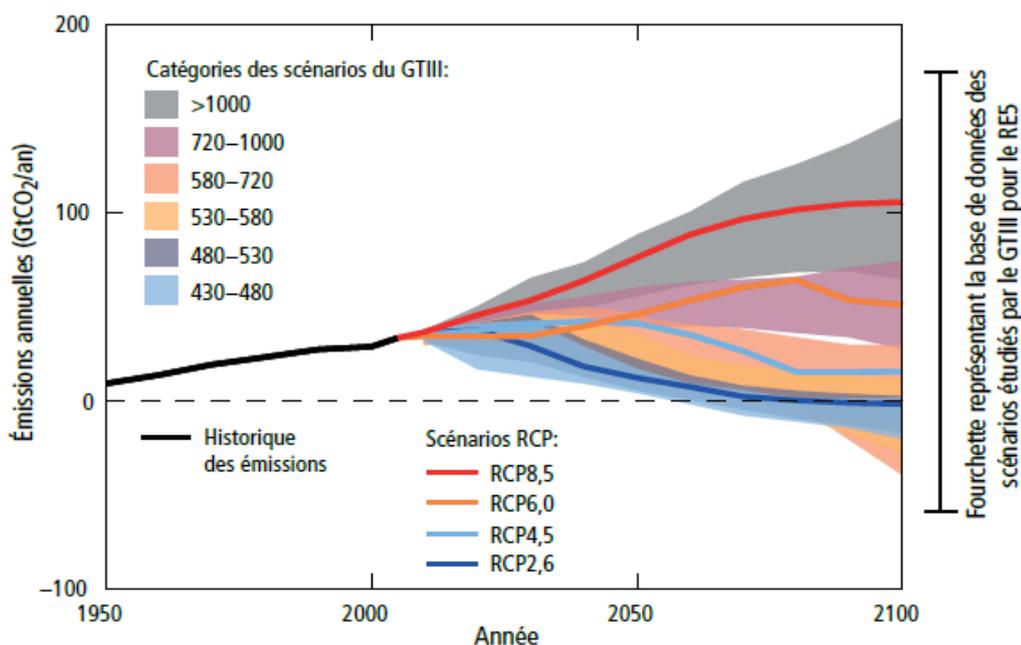


Fig. 1.13 : Emissions anthropiques annuelles du CO₂ (par rapport à 1986-2005) entre 1950 et 2100 [GIEC 2014]

1.4 PERSPECTIVES ET APPLICATIONS DES ENERGIES RENOUVELABLES EN ALGERIE

1.4.1 Aperçu global sur les énergies fossiles en Algérie

L'Algérie située au nord de l'Afrique entre 22°46'59'' (Tamanrasset) et 36°53'59'' (Annaba) de latitude nord et 5°31'22'' à 7°46'00'' de longitude Est, a une superficie de 2381741 km², dont 85% de désert, et possède une population de 40, 969.443 en 2017 [22-23]. L'économie Algérienne repose exclusivement sur les hydrocarbures, principalement le gaz naturel et le pétrole. D'autre part, l'Algérie détenait environ 12,2 milliards de barils (billions-bbl) de réserves prouvées de pétrole brute, une estimation inchangée depuis de nombreuses années et elle est placée 16^{ème} dans le monde [9,24,25]. Par ailleurs, la production diminue de 86.2 à 68.5 Mt (1979 à 1579 kbbl/jour) durant la période 2006-2016. Cependant, l'Algérie occupe la 11^{ème} place dans le monde de réserve de gaz naturel détenant environ 4.5 Terra-m³, en 2016 [24]. La production du gaz naturel a augmenté de 84.5 à 91.3 Billion-m³ (76.1 à 82.2 Mtep) durant la période. Durant cette période, en raison de la croissance démographique de l'Algérie, la population aura tendance à consommer de plus en plus l'énergie, notamment le gaz naturel, où la consommation passe de 39.4 à 44.3 Billion-m³ et une augmentation de la consommation de 258 à 412 kbbl/j (11.5 à 18.9 Mt) est estimée pour le pétrole, durant cette période, mais une diminution est enregistrée entre 2015 et 2016. En outre, la consommation de l'énergie électrique est en croissance depuis plusieurs années, elle est estimée à 53.4 TWh en 2018 et à 24.9 TWh en 2006. Alors que la production de l'énergie électrique croit de 27.0 à 64.67 TWh durant la période 2006-2018 (Fig.1.14).

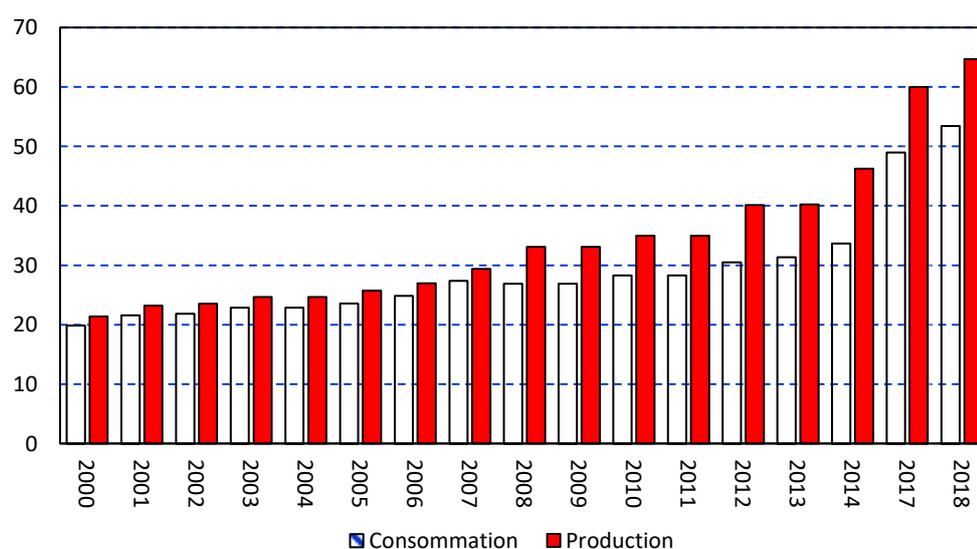


Fig. 1.14 : Consommation et production annuelle de l'électricité en Algérie en TWh [24]

1.4.2 Les énergies renouvelables en Algérie

1.4.2.1 Le potentiel solaire

Vue sa localisation géographique, l'Algérie est parmi les pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 3000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et Sahara [26]. L'énergie journalière globale obtenue sur une surface horizontale de 1 m² dépasse 5 000 Wh en moyenne annuelle sur la majeure partie du territoire national, et dépassant 5700 Wh au Sud du pays (Fig. 1.15) [27]. Soit un cumule compris entre 1800 et 1900 kWh /m²/an pour le nord et entre 2000 et 2200 kWh / m² / an pour le sud du pays [28].

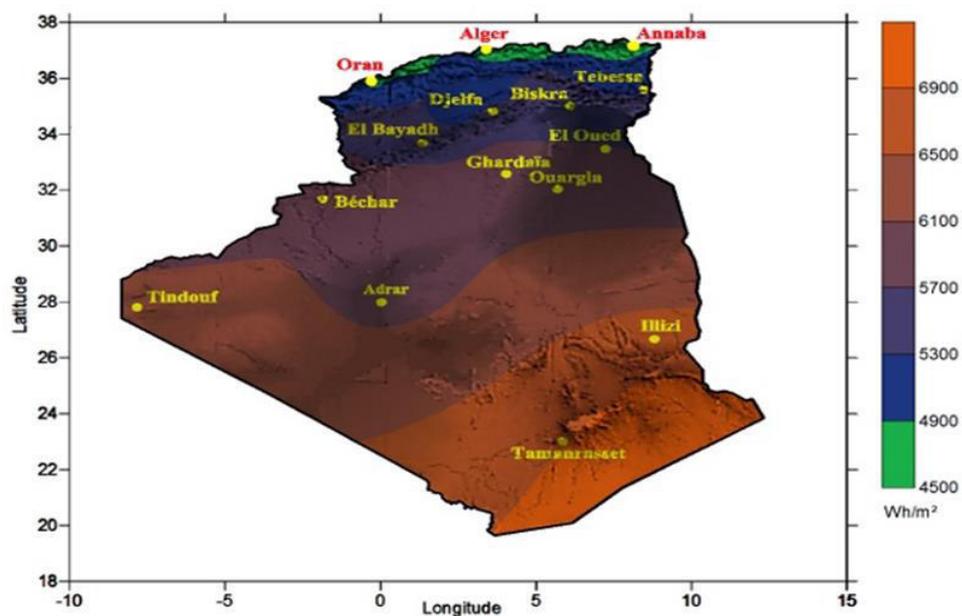


Fig. 1.15 : Carte annuelle de l'irradiation solaire en Algérie [27]

1.4.2.2 Le potentiel éolien

Le potentiel éolien en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre et une connaissance détaillée de l'énergie éolienne sur site est nécessaire pour estimer la performance d'un projet d'énergie éolienne. Par conséquent, une évaluation générale du potentiel d'énergie éolienne à l'échelle nationale est nécessaire. D'autre part, l'énergie d'origine éolienne constitue le deuxième axe de développement, avec une production qui devrait avoisiner 1GW à l'horizon 2020 et 4 GW en 2030 [29]. Néanmoins, avant l'installation d'un parc éolien, il est impératif de procéder à la connaissance approfondie de l'accumulation locale du vent susceptible d'être exploitée. Cette phase est connue comme étant l'étude du gisement éolien, l'une des plus importantes étapes avant l'installation d'un parc éolien.

Ainsi, la carte des vents représentée par la Fig. 1.16, visualise la vitesse annuelle moyenne du vent à 10 mètre du sol variant entre 1,4 et 6,3 m / s. cette carte montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que celles du nord. La région d'Adrar maintient sa dominance en termes de vitesse maximale du vent avec 6,3 m / s. Suivie par la région de Hassi R'mel avec 6,1 m / s. La région de Tindouf à l'extrême ouest du pays prend la troisième place avec une vitesse moyenne annuelle du vent de 6 m/s [30-34].

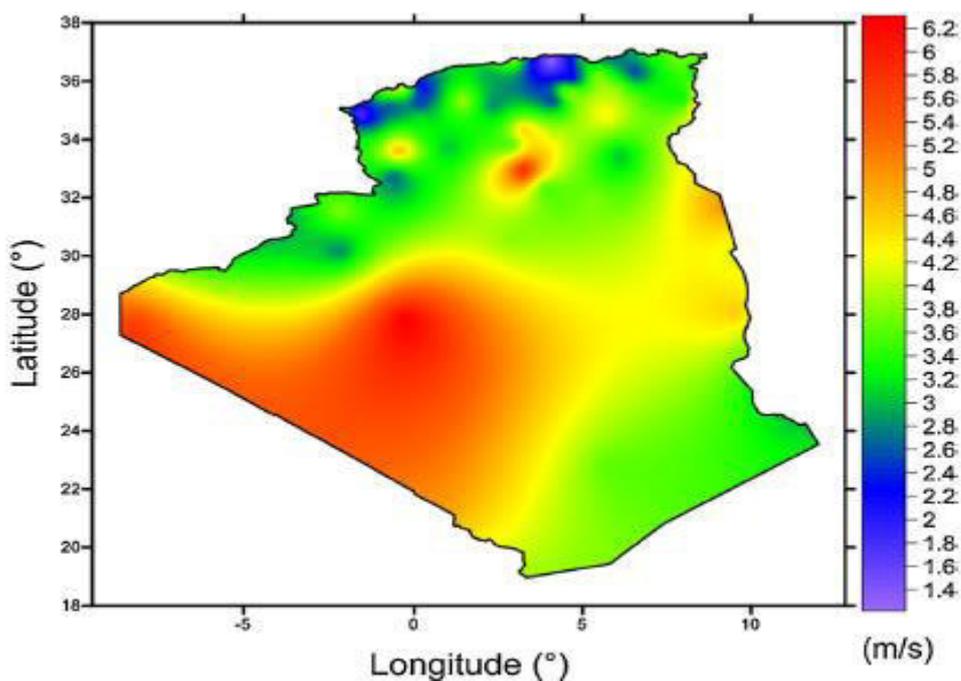


Fig. 1.16 : La distribution en moyennes annuelles des vents (m/s) à 10m du sol [31]

1.4.2.3 La biomasse

La manière la plus ancienne et la plus simple d'utiliser l'énergie est de brûler la biomasse. La combustion de la biomasse est un moyen efficace d'éliminer les déchets publics qui sont collectés en grande quantité quotidiennement dans les villes et des pays. Dans le cas de l'Algérie, la biomasse offre un potentiel important pour le recyclage des déchets agricoles et urbains. Le potentiel actuel des forêts est évalué à 37 Mtep dont un taux de 10 % récupérable et 1.33 Mtep des déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés.

1.4.2.4 Le potentiel géothermique

L'Algérie étant le plus grand pays d'Afrique en superficie, elle dispose d'un important potentiel en énergie géothermique. Plus de 200 sources ont été recensées dans la partie nord-Est et Nord-Ouest de l'Algérie. 33 % de ces sources se trouvent à des températures dépassant les températures de 45 °C, la plus chaude se trouvant à Hammam Maskhoutin dans la wilaya

de Guelma qui se trouve à une température de 98 °C et à Hammam Bouhanifia (Mascara) avec une température de 66 °C [35,36]. Le sud de l'Algérie renferme des réserves d'eau thermale connus par la nappe Albienne, dont la température moyenne avoisine 57 °C. Ces sources chaudes sont nombreuses mais malheureusement pas exploitées industriellement.

1.4.3 Le programme national des énergies renouvelables

Le ministère Algérien de l'énergie et des mines s'est fixé des objectifs ambitieux en matière de la production d'électricité, visant à générer 40 % de l'électricité à partir des ER sur la période 2015-2030. Le programme Algérien des ER vise à installer 22 GW à l'horizon 2030 [29,33]. Parmi les grands axes contenus dans ce programme, le développement du photovoltaïque et de l'éolien, en plus de l'introduction des filières de biomasses, de la cogénération et de la géothermie. La contribution du solaire photovoltaïque est de 13575 MW, l'éolien à 5010 MW, la biomasse à 1000 MW, la cogénération à 400 MW et la géothermie à 15 MW (voir le Tableau 1.1). Ainsi, une puissance de 4010 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 515 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie seront réalisés durant 2015-2020.

Durant 2021-2030, le développement de l'interconnexion électrique et leur intégration dans le réseau électrique permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables, notamment dans la région de Tamanrasset, où une centrale photovoltaïque de 13 MW est mise en service en 2015. Une centrale photovoltaïque de 3 MW est aussi mise en service à Djanet en 2015. Une puissance de 10 MW produite par la ferme éolienne par la Société Algérienne de Production de l'électricité (SPE) est mise en service en 2014 dans la région d'Adrar, ainsi qu'à Hassi R'Mel où une centrale solaire à concentration hybride (CSP) de 150 MW est mise en service en 2011.

Tableau 1.1: Les phases du programme d'installation des filières renouvelables en Algérie, durant 2015- 2030 (en MW) [29]

Filières des ER	Phase 2015-2020	Phase 2021-2030	Total
Solar PV	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP (centrale solaire thermodynamique)	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	5	10	15
Total	4525	17475	22000

1.5 CONCLUSION

Ce chapitre s'est focalisé sur l'état de connaissance et des perspectives énergétiques dans le monde et en Algérie, tant pour la consommation que pour la production des ressources fossiles et renouvelables. Ainsi, des rapports et des scénarios ont été publiés par les scientifiques pour les dirigeants du monde entier, notamment pour les pays développés et les pays émergents, dans le but de mettre en œuvre une politique efficace et durable en promulguant des lois concernant la transition énergétique. Ceux-ci, permettra d'aller vers le mix énergétique en créant un état de complémentarité entre les énergies fossiles les énergies nouvelles.

Dans ce contexte, afin de préserver les ressources fossiles et d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux, l'Algérie se lance sur la voie de la transition énergétique en adoptant le choix de l'efficacité énergétique qui est appelé à jouer un rôle important dans le contexte énergétique national, caractérisé par une forte croissance de la consommation tirée, notamment, par la construction de nouveaux logements, la réalisation d'infrastructures d'utilité publique et la relance de l'industrie etc... .

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant des programmes ambitieux de développement des énergies renouvelables. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Á cet effet, le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national.

Chapitre 2

Généralités sur le gisement solaire

2.1 INTRODUCTION

Le gisement solaire est l'ensemble des données relatives à l'évolution spatio-temporelle du rayonnement solaire. Ainsi, la connaissance détaillée sur la distribution du rayonnement solaire, nécessite des études qualitatives et quantitatives précises de ses composantes, à savoir, le rayonnement direct, diffus et global. Pour cela, une connaissance au préalable de ces composantes est donc primordiale. Par conséquent, l'existence d'une base de données solide et fiable est essentielle pour divers domaines solaires, tels que l'agriculture, la météorologie, la recherche scientifique et le dimensionnement des capteurs solaires (photovoltaïques, thermiques).

Néanmoins, le nombre de stations de mesure radiométriques est très limité en raison du coût élevé des appareils, pour cela, divers modèles ont été proposés pour prédire le gisement solaire à une échelle locale ou régionale. Alors, de nombreuses recherches se sont concentrées principalement sur l'étude de prédiction des composantes du rayonnement solaire par des méthodes empiriques et stochastiques ou par des techniques de l'intelligence artificielle.

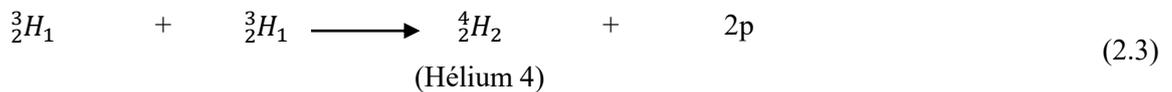
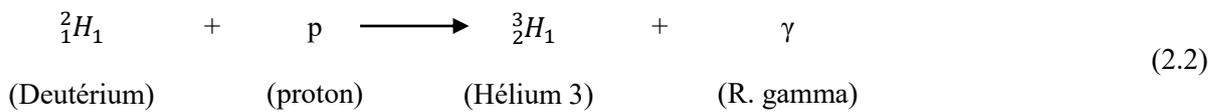
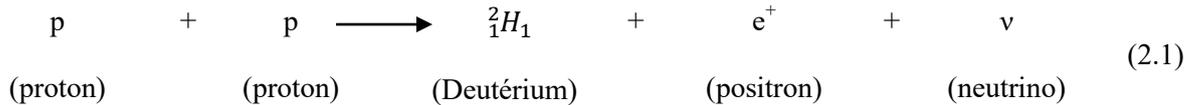
Afin d'aborder les chapitres concernant les modèles de prédictions, il est essentiel de présenter quelques généralités sur le rayonnement solaire, les formules astronomiques et météorologiques qui constituent des bases fondamentales de la modélisation, c'est le but du chapitre.

2.2 LE RAYONNEMENT SOLAIRE

2.2.1 Le soleil

Le Soleil est une étoile, c'est une énorme boule de gaz chaude qui produit de l'énergie et qui rayonne des ondes électromagnétiques et particulaires. Le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre (150 millions de kilomètres) parmi des milliards d'autres qui appartiennent à la Voie lactée, notre Galaxie, et qui sont distantes de plusieurs années lumières. Son diamètre est de $1.4 \cdot 10^9$ m (environ 200 fois le rayon terrestre) et sa masse 330 000 fois plus importante que celle de la Terre. Au cœur du soleil (noyau), il règne une température de 15 millions de degrés Celsius, puis elle décroît jusqu'à atteindre environ 5778 °C à la surface [37,38], cela engendre un flux thermique passant à travers la surface solaire puis se dilue dans l'espace ; le rayonnement se propage sous forme de photons de haute énergie qui diminue au cours du voyage. Les photons qui finalement quittent la surface du soleil sont majoritairement des photons de lumière visible, d'où la brillance du Soleil.

Le soleil est un gigantesque réacteur nucléaire, c'est une boule de gaz plasmas (électrons-protons), dans lequel des réactions de fusion thermonucléaires se produisent, au cours desquelles quatre noyaux d'hydrogène (protons) se transforment en un noyau d'hélium ${}^4\text{He}$, élément qui est particulièrement stable. La réaction libère une énergie (réaction exo-énergétique) [12]. Cette énergie est émise et transportée sous la forme de photons qui sont des particules fondamentales sans masse ni charge électrique et de neutrinos (particules de masse très faible et de charge nulle) (Eqs. (2.1) à (2.3)).



De la même façon que la sismologie qui a permis, par l'étude des ondes produites par les tremblements de terre, de déterminer la structure interne de la Terre, l'hélio-sismologie utilise les pulsations solaires pour mesurer et visualiser indirectement la structure interne du Soleil [39]. La structure interne du soleil comprend la photosphère, qui est la surface visible du soleil. Elle contribue pour 99% au rayonnement. Sa température est d'environ 6 000 °K. Cette surface de quelques centaines de kilomètres est une frontière entre l'intérieur du Soleil (zone radiative avec son cœur et zone convective) et son atmosphère (chromosphère et couronne) [12] (Fig. 2.1). La zone « radiative » où les réactions nucléaires transforment les protons en hélium au niveau du cœur représente 98% de la masse du soleil. La zone « convective » représente 2% de la masse du soleil et qui s'étend entre 480 000 et 690 000 km, où le transfert d'énergie est assuré par de turbulents mouvements de plasma vers l'extérieur.

Le soleil est constitué aussi d'une fine couche, nommée « chromosphère » qui contribue très peu au rayonnement du soleil et elle est non visible. Elle est d'une épaisseur de 2000 à 3000 km. Celle-ci, est seulement visible dans le cas des éclipses totales. Au-delà de la chromosphère baigne une couche plasma complètement ionisé et qui s'étend de plusieurs millions de kilomètres qu'on appelle la « couronne solaire ». A l'intérieure de la couronne, baigne une structure visible et dense dans l'atmosphère du soleil « la protubérance » qui est constituée d'un gaz de plasmas froids. La Fig. 2.1, montre aussi des régions dans la photosphère nommées les « taches solaires ». Ce sont des zones qui sont marquées par

d'intenses activités magnétiques, formant des zones, où la température de surface est inférieure à son environnement. En outre, leurs observations permettent de mesurer la rotation superficielle du Soleil.

La gamme de spectre de rayonnement dans le noyau du soleil est essentiellement constituée des hautes fréquences, c'est-à-dire de faibles longueurs d'ondes (rayons X et celle des rayons gamma), qui augmentent suivant la diminution de la température à de grandes distances. Le rayonnement qui parvient à la Terre n'est donc pas celui provenant directement de l'activité solaire (noyau). Son énergie diminue grandement, dû aux multiples collisions dans cette zone. Par ailleurs, parmi tous les rayonnements émis par le Soleil, l'atmosphère terrestre ne laisse passer que le visible (avec un peu d'infrarouge et d'UV) et les ondes radio. Il est cependant nécessaire, pour mesurer les autres rayonnements (en particulier rayons X et gamma), d'aller au-delà de l'atmosphère terrestre : on utilise alors des instruments embarqués sur des satellites.

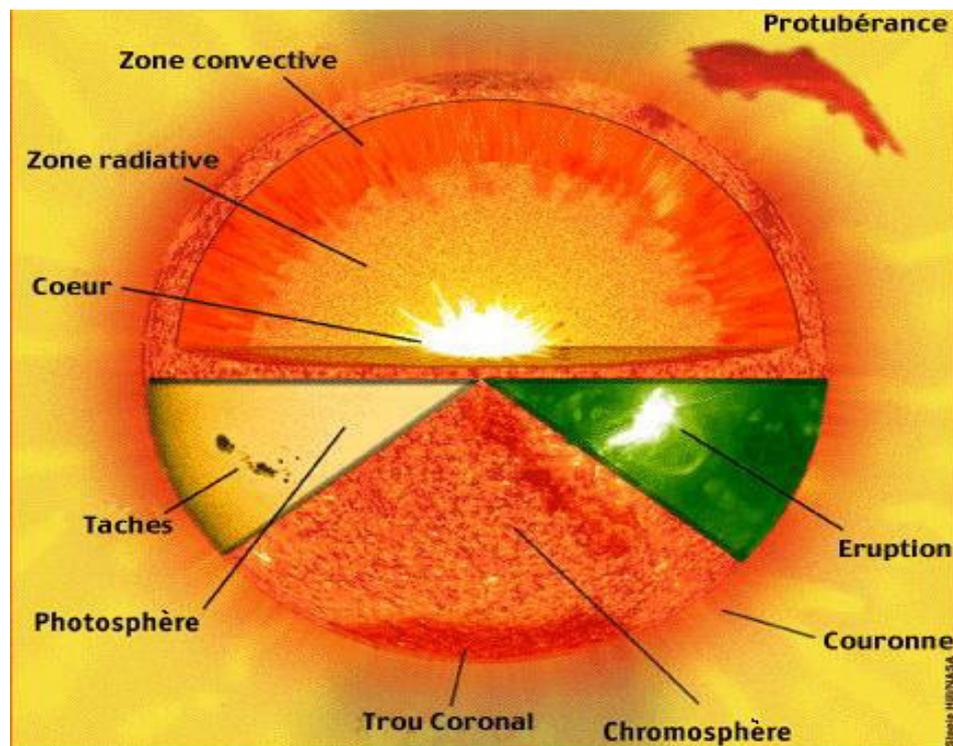


Fig. 2.1: Structure interne du soleil [12]

2.2.2 Aspect géométrique et astronomique

La connaissance des mouvements et positions du soleil pour un observateur terrestre, permet de mettre à jour les principales spécificités d'ensoleillement et de ressources solaires d'un site, ceux-ci impliquent une caractérisation efficace du site, autant du point de vue énergétique que météorologique. A cet effet, quelques principaux paramètres astronomique et géométrique ont

été introduits et définis dans ce chapitre afin de les utiliser dans le but de quantification et de prédiction du rayonnement solaire pour un site quelconque.

2.2.2.1 La constante solaire

La constante solaire I_{oc} est définie comme la moyenne annuelle du rayonnement solaire extraterrestre, ou flux solaire par unité de surface (appelé aussi éclairement) reçu par une surface normale à la direction terre-soleil. Une surface plane, d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire, située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance de rayonnement qui varie faiblement en fonction de la distance terre-soleil (149597870 km). Cette distance a une faible variation au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre qui est d'environ 1,7%. La valeur $I_{oc} = 1367 \text{ W/m}^2$ a été adopté par le centre de radiation mondial (World Radiation Center-WRC) avec une précision de l'ordre de 1%.

En outre, selon la Fig. 2.2, nous apercevons que la taille angulaire apparente du disque solaire (la photosphère) peut être calculée à partir du diamètre de la distance terre-soleil. Il s'agit de 0,0093 rad (0,553 degrés ou 32'), c'est-à-dire, à une distance d'une unité astronomique, distance moyenne terre-soleil, le soleil sous-tend un angle de 32 [37,38,40].

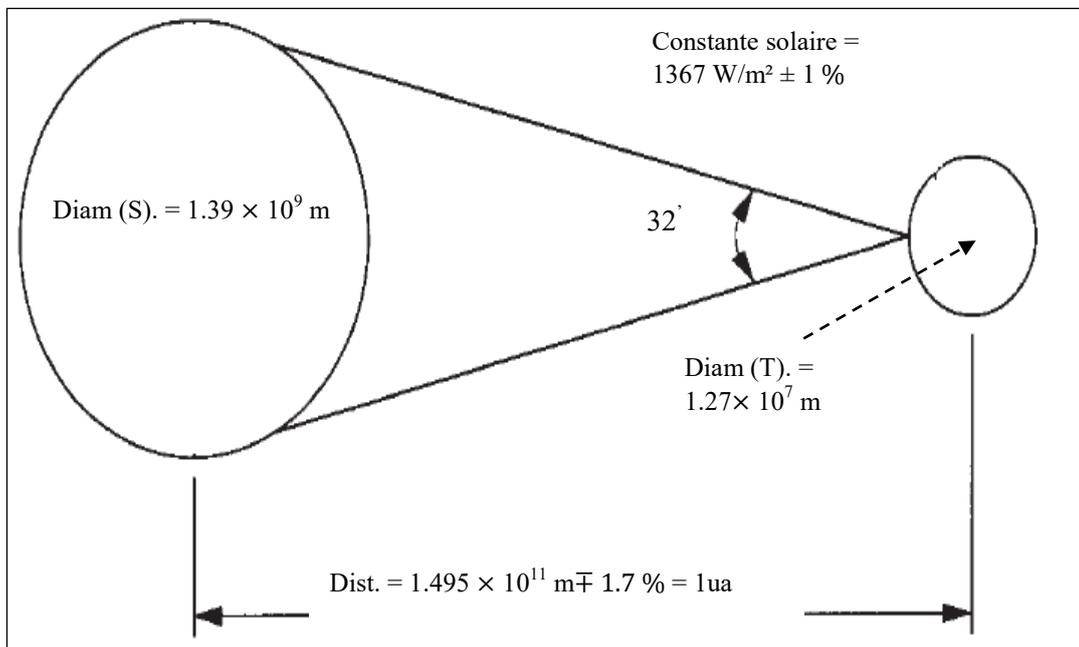


Fig. 2.2 : La géométrie du système terre-soleil [37]

Les mesures par satellite ont permis d'établir une formule empirique, d'une précision acceptable ($\pm 0.01\%$), donnant l'intensité de l'éclairement au sommet de l'atmosphère I_{on} en fonction du numéro du jour (j), et de la constante solaire I_{oc} [41] :

$$I_{on} = I_{oc} \cdot \left(1.000110 + 0.034221 \cos \left[\frac{2\pi}{365} (j - 1) \right] + 0.001280 \sin \left[\frac{2\pi}{365} (j - 1) \right] + 0.000719 \cos 2 \left[\frac{2\pi}{365} (j - 1) \right] + 0.000077 \sin 2 \left[\frac{2\pi}{365} (j - 1) \right] \right) \quad (2.4)$$

2.2.2.2 Le mouvement de la terre autour du soleil

La terre fait une révolution autour du soleil dans une période d'environ 365.25 jours avec une trajectoire elliptique, et tourne au tour de son axe toute les 24 h [42]. La Fig. 2.3 montre l'orbite de la Terre avec les deux équinoxes, les deux solstices, et les positions de la plus petite distance et la plus grande distance entre le Soleil et la Terre, situées au Périhélie et à l'Aphélie, qui correspondent respectivement, au 2 Janvier et 3 Juillet.

L'équinoxe est la position de la Terre sur son orbite lorsque la durée du jour est égale à celle de la nuit. Cela se produit les 20-21 Mars (Equinoxe du printemps) et 22-23 Septembre (Equinoxe d'automne). Le solstice est le point sur l'orbite terrestre lorsque la journée est la plus longue (solstice d'été, 20-21 juin) ou la plus courte (solstice d'hiver, 21-22 décembre).

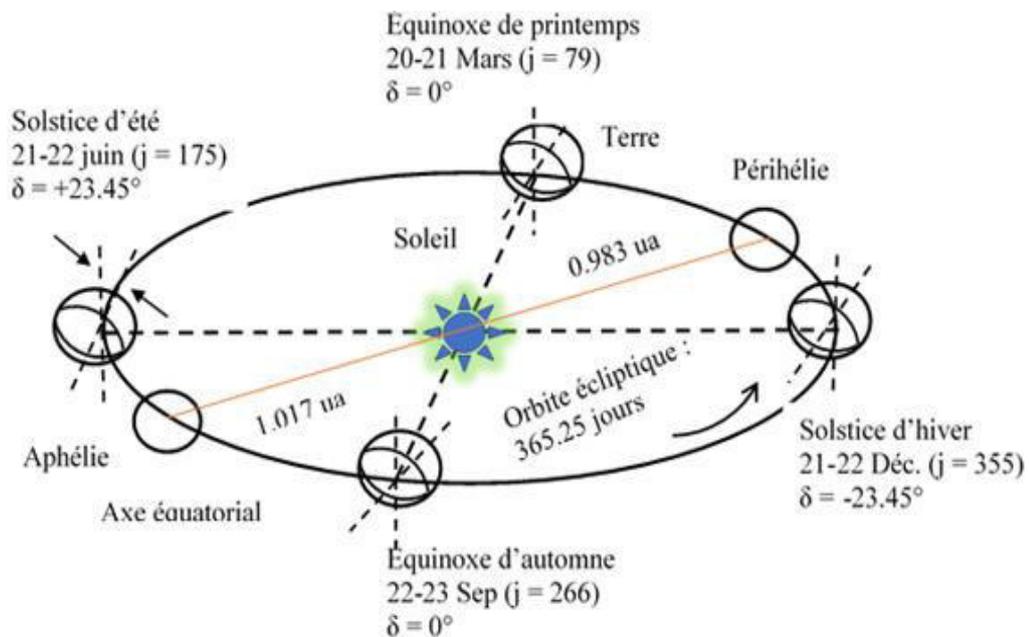


Fig. 2.3 : Mouvement annuel du système terre-soleil [42,52]

2.2.2.3 Les coordonnées terrestres

Les coordonnées terrestres sont données par rapport au pôle terrestre et le plan de l'équateur terrestre. Ce système constitue un référentiel terrestre. Les coordonnées polaires terrestres portent les noms de latitude (notée φ) et longitude (notée λ) terrestres.

✓ La latitude (φ)

C'est parmi l'une des coordonnées terrestres d'un point de la terre, qui est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord, et est négative dans l'hémisphère sud, $-90^\circ > \varphi > +90^\circ$ [37,43].

✓ La longitude (λ)

C'est l'angle que fait le méridien local passant par un point de la terre avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est négative vers l'Ouest et est positive vers l'Est par rapport au méridien d'origine, variant de -180° vers l'Ouest à $+180^\circ$ vers l'Est [43,44].

✓ Le méridien

C'est le grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude. Le méridien pris pour origine (0°) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles.

2.2.2.4 Les coordonnées solaires

Les relations géométriques entre un plan d'orientation quelconque par rapport à la terre (que ce plan soit fixe ou mobile) et le rayonnement solaire incident, c'est-à-dire la position du soleil par rapport à ce plan, peut être décrite en termes de plusieurs angles :

✓ La déclinaison solaire (δ)

La déclinaison représente l'angle entre la direction terre-soleil et le plan équatorial de la terre (Fig. 2.4). Cet angle varie entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Ces valeurs correspondent respectivement à l'hiver et l'été (21 Déc. et 21 Juin), elle s'annule au 21 Mars.

Une formule plus précise pour calculer la déclinaison, en degré, est donnée par [41], et citée par Iqbal [38] :

$$\delta = \frac{180}{\pi} (0.006918 - 0.399912 \cos D + 0.070257 \sin D - 0.006758 \cos 2D + 0.000907 \sin 2D - 0.002697 \cos 3D + 0.00148 \sin 3D) \quad (2.5)$$

Une formule simple mais moins précise, est donnée par [45], et elle est citée dans [37,38,46] :

$$\delta = 23.45 \sin \frac{2\pi}{365} \left(\frac{2\pi}{365} (j + 284) \right) \quad (2.6)$$

✓ Angle horaire (ω)

C'est le déplacement angulaire du soleil de l'est à l'ouest du méridien local à cause de la rotation de la terre sur son axe de 15° par heure. Il s'agit de la distance angulaire entre le méridien de l'observateur et le méridien dont le plan qui contient le soleil (cercle horaire) (Fig. 2.4) ; le matin négatif, après-midi positif. L'angle horaire est défini comme étant égal à zéro, lorsque le soleil est haut dans le ciel à midi-solaire (point de culmination supérieur).

Son expression s'écrit en fonction du temps solaire vrai, de la manière suivante [37,38] :

$$\omega = 15(tsv - 12) \quad (2.7)$$

Le temps solaire vrai est une mesure du temps, basée sur le déplacement apparent du soleil dans le ciel au cours de la journée. Le temps solaire vrai est basé sur le jour solaire apparent, qui est la durée entre deux retours successifs du Soleil au méridien local. C'est-à-dire que le temps solaire vrai en un lieu et à un moment donnés est l'angle horaire du soleil en ce lieu et à ce moment. Cette durée varie tout au long de l'année pour deux raisons :

- L'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de l'écliptique
- L'excentricité de l'orbite de la Terre.

Le temps solaire vrai s'écrit en fonction de la différence entre la longitude d'un lieu (λ), le méridien standard pour le fuseau horaire local ou longitude standard (λ_s), le temps local standard (tls), et l'équation du temps (E_t). Cette dernière est due à la variation de la vitesse de rotation de la terre autour du soleil (3^{ème} loi de Kepler) [37,38] :

$$tsv(h) = tls + \frac{(\lambda_s - \lambda)}{15} + \frac{E_t(mn)}{60} \quad (2.8)$$

Avec l'équation du temps qui s'écrit par [38,41] :

$$E_t = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos D - 0.032077 \sin D - 0.014615 \cos 2D - 0.04089 \sin 2D) \quad (2.9)$$

✓ Angle azimutal solaire (γ_s)

C'est l'angle formé par la projection d'un point du méridien local (position du soleil sur le méridien) sur un plan horizontal (plan du site) et la direction sud ($-180 \geq \gamma \geq 180$) [37,38].

✓ Angle azimutal surfacique (a_z)

C'est l'angle formé par la projection sur un plan horizontal de la normale à la surface du plan du capteur à partir du méridien local, qui s'annule au sud, négatif à l'ouest et positif à l'est, - $180^\circ \leq a_z \leq 180^\circ$ [37] (Fig.2.5).

✓ Angle zénithal (θ_z)

C'est l'angle entre la verticale et la ligne vers le soleil, c'est-à-dire l'angle d'incidence du rayonnement du faisceau sur une surface horizontale d'un lieu, qui s'écrit comme suit [37,38] :

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \sin \varphi \sin \omega \cos \delta \quad (2.10)$$

✓ La hauteur du soleil (h)

C'est l'angle entre l'horizontale du lieu et la ligne vers le soleil (Fig. 2.5), c'est-à-dire le complément de l'angle zénithal [37,38].

$$h = \theta_z - 90^\circ \quad (2.11)$$

✓ Angle d'incidence (θ)

Il s'agit de l'angle entre le rayonnement solaire sur une surface inclinée d'un angle β , d'orientation quelconque a_z , et la normale à cette surface [37,38,47] :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta \\ & - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos a_z \\ & + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos a_z \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin a_z \sin \omega \end{aligned} \quad (2.12)$$

L'angle d'incidence peut aussi s'écrire, comme suit [37,46,48] :

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - a_z) \quad (2.13)$$

✓ Cas particuliers

Il y'a plusieurs cas pour lesquels nous devons prendre considération, surtout pour des raisons pratiques :

❖ Pour une surface d'inclinaison β d'orientation sud (i.e., $a_z = 0^\circ$) (capteur solaire fixe) :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta \\ & - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \omega \end{aligned} \quad (2.14)$$

Cette équation peut être simplifiée (pour l'hémisphère nord du globe), comme suit :

$$\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta \quad (2.15)$$

- ❖ Pour une surface verticale ($\beta = 90^\circ$) d'orientation quelconque

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \varphi \cos a_z + \cos \delta \sin \varphi \cos a_z \cos \omega + \cos \delta \sin a_z \sin \omega \quad (2.16)$$

- ❖ Pour une surface horizontale ($\beta = 0^\circ$) et avec une orientation sud, l'angle d'incidence devient l'angle zénithal :

$$\cos \theta = \cos \theta_z \quad (2.17)$$

La hauteur du soleil s'écrit en fonction de l'angle azimutal [38] :

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (2.18)$$

- ❖ A midi temps solaire vrai, le soleil est exactement sur le méridien, et par conséquent, l'angle azimutal est nul. Donc, l'altitude solaire est égale à :

$$h_m = 90^\circ - \varphi - \delta \quad (2.19)$$

- ❖ Pour un site donné, l'heure du lever et du coucher du soleil correspondent à une hauteur du soleil nulle. En vertu de l'Eq. (2.1), les expressions des angles horaires du coucher (ω_c) et du lever (ω_l) sont :

$$\omega_c(\text{heure}) = -\omega_l = \frac{1}{15} \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \varphi) \quad (2.20)$$

- ❖ Pour un plan qui est quotidiennement face au soleil ($\theta = 0^\circ$), c'est le cas, du système de poursuite solaire tridimensionnel, et à partir des Eqs. (2.18) et (2.22), l'Eq. (2.11) devient :

$$\cos \theta = 0^\circ \quad (2.21)$$

Avec :

$$h = 90^\circ - \beta \quad (2.22)$$

Avec $\beta = \theta_z$ et $a_z = \gamma_s$

- ❖ Pour une rotation du plan par rapport à l'axe horizontal est-ouest, avec ajustement continu pour minimiser l'angle d'incidence, le cosinus de l'angle θ est donné par [37,42,48] :

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \delta \sin^2 \omega} \quad (2.23)$$

Avec :

$$\tan \theta = \tan \theta_z |\cos \gamma_s| \quad (2.24)$$

Et que :

Si l'azimut solaire $|\gamma_S| < 90^\circ \Rightarrow$ l'azimut surfacique $a_z = 0$, si non $a_z = 180^\circ$.

❖ Pour une rotation du plan autour de l'axe horizontal nord-sud, avec ajustement continu pour minimiser l'angle d'incidence, le cosinus de l'angle θ est donné par [37,42,48] :

$$\cos \theta = \sqrt{\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \sin^2 \omega} \quad (2.25)$$

L'angle d'inclinaison s'écrit comme :

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos(a_z - \gamma_S)| \quad (2.26)$$

Si l'azimut solaire $\gamma_S > 0^\circ \Rightarrow$ l'azimut surfacique $a_z = 90^\circ$, si non $a_z = 90^\circ$

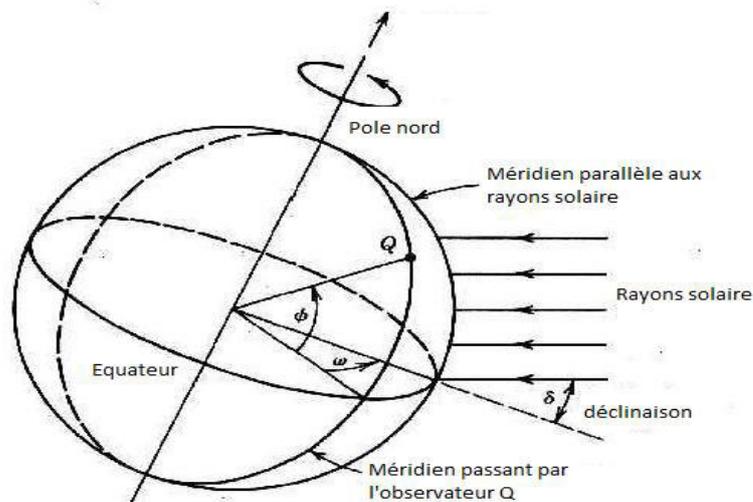


Fig. 2.4: Déclinaison, latitude et angle horaire [49]

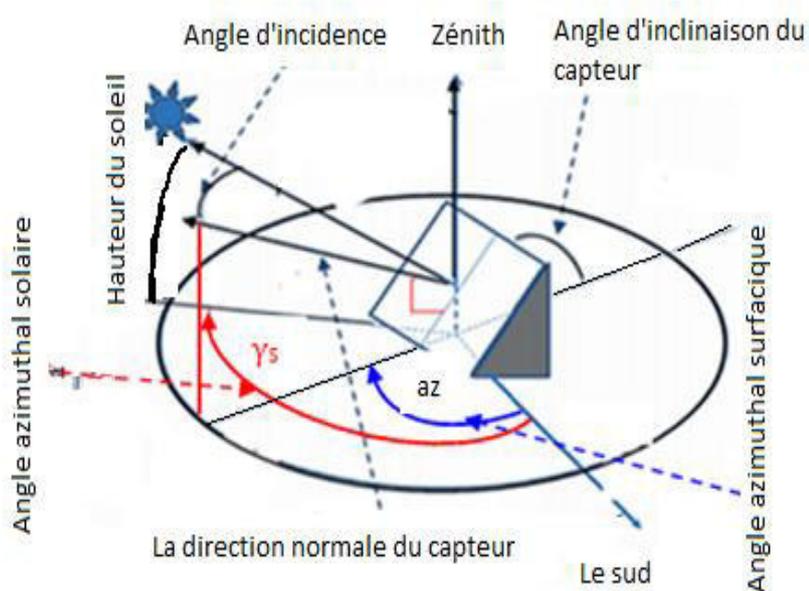


Fig. 2.5: Les paramètres géométriques du système capteur-soleil [50]

2.2.3 Aspect énergétique

2.2.3.1 Le spectre solaire

Les ondes de radiation solaire (ondes électromagnétiques, EM) se propagent à travers l'espace à la vitesse de la lumière ($c = 2.998 \times 10^8$ m/sec), en parcourant la distance soleil-terre en 8 min. La radiation EM solaire est transportée par des particules sans masse « les photons », sous la forme d'une énergie qui s'écrit en fonction de la longueur d'onde (λ) et de la fréquence (ν), comme suit [38,40,48] :

$$E_\nu = h \times \nu \quad (2.27)$$

La fréquence est définie en fonction de la longueur d'onde:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{v}{\lambda_m} \quad (2.28)$$

Où λ , λ_m sont les longueurs d'onde dans le vide et dans un milieu donné, c étant la vitesse de la lumière dans le vide, v est la vitesse de la lumière dans le milieu. h est la constante de Planck (6.625×10^{-34} J.s) [51].

En 1814, le physicien allemand Joseph Von Fraunhofer (1787-1826), fondateur de la spectroscopie, étudiait le spectre du Soleil et y découvrit la présence de raies sombres superposées à un spectre continu ; chacune des raies correspondait à une longueur d'onde particulière. Ce sont des raies d'absorptions dû aux éléments présents dans les couches extérieures de l'atmosphère du soleil [12]. Le spectre solaire présente des domaines de longueurs d'onde qui sont invisibles à l'œil nu ; l'ultraviolet et l'infrarouge, dont les valeurs se situent dans les gammes, $0.25-0.40 \mu\text{m}$ et $0.770-10^3 \mu\text{m}$. Le spectre visible est considéré dans l'intervalle $0.39-0.77 \mu\text{m}$. Ces résultats sont clairement visualisés dans la figure ci-dessous (Fig. 2.6), où nous avons présenté trois cas : le rayonnement du corps noir parfait à la température de surface du soleil, environ 5900 K, le spectre solaire à la limite de l'atmosphère, où la masse atmosphérique est nulle (AM0), ainsi que le rayonnement solaire terrestre au niveau de la mer et dans des conditions ciel clair et pour une inclinaison du capteur de 42° (AM1.5) (la masse atmosphérique est présentée dans la prochaine section). Nous constatons que sur le fond continue du rayonnement solaire extraterrestre, il y'a des raies spectrales discontinues, ce sont des raies d'absorption de Fraunhofer. Au niveau de la terre, nous constatons des raies spectrales qui correspondent à l'absorption du rayonnement solaire par les molécules de l'atmosphère ainsi qu'une bande de longueurs d'onde dans le visible. D'autre part, la figure montre qu'à la température de 5900 °K, le rayonnement solaire peut être approximé à un corps noir.

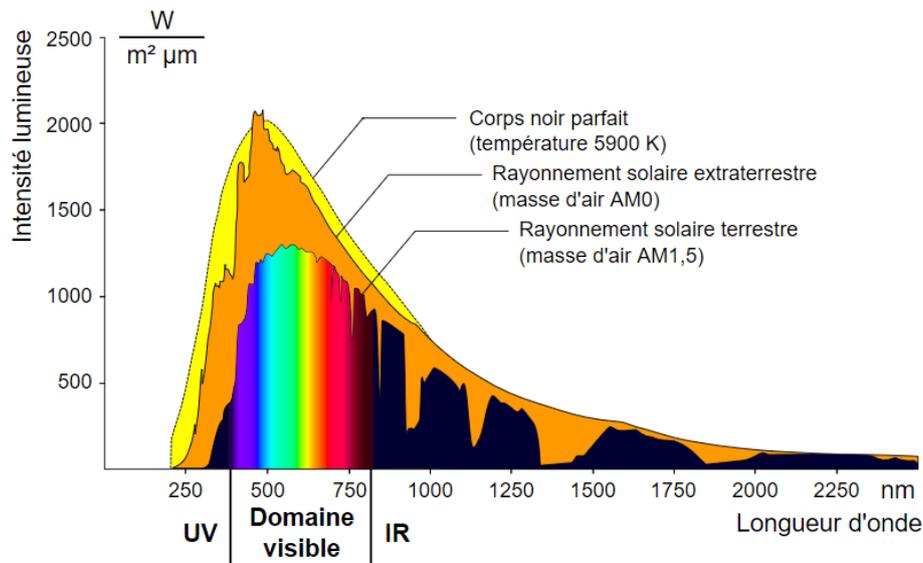


Fig. 2.6: Spectre du rayonnement solaire : corps noir, extraterrestre et terrestre [40]

Un corps est appelé corps noir si, à une température donnée, il émet le maximum d'énergie à chaque longueur d'onde et dans toutes les directions, et absorbe parfaitement toute l'énergie électromagnétique (toute la lumière quelle que soit sa longueur d'onde) qu'il reçoit. Cette absorption se traduit par une agitation thermique qui provoque l'émission d'un rayonnement thermique.

L'émission d'un corps noir obéit aux lois et aux propriétés fondamentales de l'émission de corps noir [38,40,52] :

✓ Loi de Planck

La loi de Planck donne l'émittance spectrale d'un corps noir, $M_\lambda(T)$, en $W/m^2/\mu m$, à la température T , en Kelvin, et pour une longueur d'onde λ (Fig. 2.7).

$$M_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)} \quad (2.29)$$

C_1, C_2 des constantes radiatives, qui valent $3.7427 \cdot 10^8 W \cdot \mu m^4/m^2$ et $14388 \mu m K$

T est la température en Kelvin du corps noir.

✓ Loi de déplacement de Wien

La Figure 2.7, montre que lorsque la température du corps noir diminue, l'émittance diminue pour chaque longueur d'onde et le maximum est déplacé vers les grandes longueurs d'onde. Ceci est connu comme la loi de déplacement de Wien. Par conséquent, la loi de Wien, est une loi selon laquelle la longueur d'onde maximale à laquelle un corps noir émet le plus de flux

lumineux énergétique, λ_{max} , et est inversement proportionnelle à sa température (Eq. (2.30) et Eq. (2.31)) [38].

$$\lambda_{max}T = 2897.8 \mu m K \quad (2.30)$$

$$\lambda_{max}(\mu m) = \frac{hc}{4.9651 kT} \quad (2.31)$$

Avec :

h , k et c , sont les constantes de Planck et de Boltzmann et la célérité de la lumière. Elles sont égales à 6.625×10^{-34} J.s, $1.38064852 \times 10^{-23}$ J K⁻¹² et 2.998×10^8 m/sec.

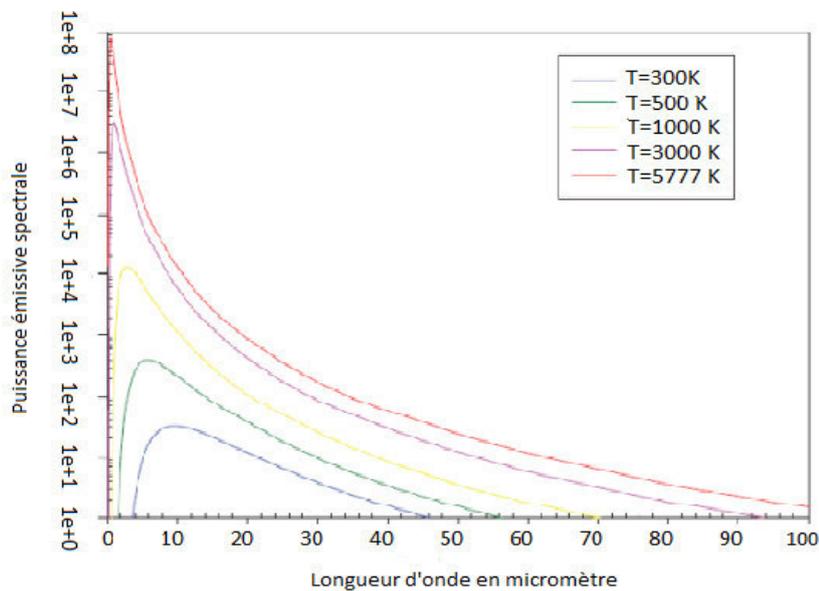


Fig. 2.7: Puissance émissive spectrale ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) d'un corps noir à [47]

✓ Loi de Stefan-Boltzmann

En intégrant l'équation de l'émissance spectrale (Eq. (2.27)) pour toutes les longueurs d'onde, on obtient la puissance totale émise (émissance hémisphérique) par un corps noir à la température T [52] :

$$\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} M_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.32)$$

σ est la constante de Stefan-Boltzmann qui est égale à $5.6697 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$.

✓ Propriétés du corps réel

Le concept du corps noir sert de standard pour la comparaison entre une surface réelle et une surface idéale. Une surface réelle (solide ou fluide) réfléchit partiellement et absorbe

partiellement le rayonnement d'incidence et une partie est transmise à travers le corps. Les différentes propriétés associées à ce phénomène sont les fractions de rayonnement monochromatique réfléchi (ρ_λ), absorbée (α_λ) et transmise (τ_λ). Ces coefficients sont donnés par l'équation ci-dessous [38] :

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (2.33)$$

Dans le cas des coefficients intégrés par rapport à toutes les longueurs d'onde, nous avons :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.34)$$

Cas particuliers :

- La plupart des corps solides sont opaques (surface terrestre), de sorte que $\tau = 0$ et $\alpha + \rho = 1$.
- Si un corps absorbe tout le rayonnement thermique incident de telle sorte que $\tau = 0$, $\rho = 0$, et $\alpha = 1$, quel que soit le caractère spectral ou la direction du rayonnement d'incidence, il est appelé corps noir.

2.2.3.2 Le rayonnement solaire à travers l'atmosphère terrestre

La terre est entourée d'une atmosphère, contenant divers constituants gazeux, des poussières en suspension et d'autres matières particulaires solides et liquides et des nuages de divers types, l'atténuation du rayonnement solaire se produit lors de son passage à la surface de la terre. Dans une atmosphère quelconque, l'atténuation se produit par trois processus physiques distincts fonctionnant simultanément : absorption, diffusion et réflexion [53]. Lors de sa traversée dans l'atmosphère, plusieurs éléments contribuent soit à l'absorption sélective par la vapeur d'eau, les molécules d'oxygènes, le dioxyde de carbone, soit à la diffusion de la radiation solaire des molécules d'air, les aérosols, les nuages et les divers gaz atmosphériques, soit à la réflexion par les couches nuageuses et la surface terrestre (albédo). En fait, l'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère est causée en grande partie à l'ozone dans l'ultraviolet et à la vapeur d'eau dans la région infrarouge. Cette atténuation est représentée par le coefficient de transmission (ou la transmittance) monochromatique, qui est définie par la loi de Bouguer, comme étant le rapport entre l'intensité du rayonnement solaire (éclairage direct) reçue perpendiculairement sur la surface de la terre ($I_{bn\lambda}$) et le rayonnement extraterrestre ($I_{0n\lambda}$), pour plusieurs phénomènes d'atténuations, p (diffusions, absorption), et à une longueur d'onde, λ (Eq. (2.35)).

$$\tau_{\lambda} = \frac{I_{bn\lambda}}{I_{0n\lambda}} = \prod_p \tau_{p\lambda} \quad (2.35)$$

2.2.3.2.1 Cas de la diffusion

Lorsque la taille des particules est très petite par rapport aux longueurs d'onde du rayonnement solaire, il s'agit de la diffusion de Rayleigh qui est représentée conformément à la théorie de Rayleigh, selon laquelle l'intensité de la lumière est inversement proportionnelle à la puissance quatre de la longueur d'onde. Selon P. Moon [54], le facteur de transmission monochromatique pour la diffusion de Rayleigh, peut s'écrire comme :

$$\tau_{r\lambda} = 10^{-0.00380 \lambda^{-4}} \quad (2.36)$$

λ est la longueur d'onde en μm .

D'autre part, P. Moon [54] a suggéré deux différentes formes de facteurs de transmittance monochromatique pour la diffusion de Mie causées par la vapeur d'eau et aux particules de poussières, qui sont données respectivement, avec [38,55] :

$$\tau_{ve\lambda} = 10^{-0.0075 \lambda^{-2}} \quad (2.37)$$

$$\tau_{p\lambda} = 10^{-0.0353 \lambda^{-0.75}} \quad (2.38)$$

L'effet total de la diffusion par l'atmosphère sans nuage, pour une épaisseur de vapeur d'eau w et une concentration de particules de poussières d , et sous la pression atmosphérique, p , s'écrit sous la forme de la relation de Bouguer [56] :

$$\tau_{d\lambda} = \left[(\tau_{r\lambda})^{p/760} (\tau_{ve\lambda})^{w/20} (\tau_{p\lambda})^{d/800} \right]^{AM} \quad (2.39)$$

Les Eqs. (2.36) à (2.38), caractérisent en fait, les contributions à la diffusion pour une atmosphère standard ($p=760$ mm Hg, $w = 20$ mm, $d = 800$ particule/cm³) et avec le soleil au zénith ($AM = 1$).

AM étant la masse d'air optique (ou masse atmosphérique), qui est théoriquement décrit par Kasten [57] et citée dans le livre d'Iqbal [38] :

$$AM = \frac{\text{chemin parcouru par le rayonnement}}{\text{profondeur verticale de l'atmosphère}} \quad (2.40)$$

Si on néglige la courbure de la terre et les phénomènes de réflexions atmosphériques (atmosphère standard), l'équation précédente devient :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} = \sec \theta_z \quad (2.41)$$

Si au contraire, l'atmosphère n'est pas standard, l'équation précédente doit être changée en masse atmosphérique absolue, de la façon suivante [38] :

$$AM_a = AM \frac{p}{p_0} \quad (2.42)$$

Où, p , p_0 sont les pressions local (non standard) et la pression standard au niveau de la mer (1013.5 mbar).

Et si on tient compte de la courbure de la terre, la masse atmosphérique est alors [57,58] :

$$AM = \frac{1}{[\cos \theta_z + 0.15 (93.885 - \theta_z)^{-1.253}]} \quad (2.43)$$

Plusieurs publications traitant du calcul de la masse d'air par rapport au zénith ont été étudiées, lesquels seront traités en détail dans les prochains chapitres. Par ailleurs, une formule plus générale a été développée par Angstrom [59], afin de prendre en compte la dimension particulière des aérosols sur l'atténuation de la radiation, dans la formule précédente [38]. Les coefficients d'atténuation (ou épaisseur optique des aérosols) et de transmission monochromatique s'écrivent, selon les Eqs. (2.44) et (2.45) :

$$k_{a\lambda} = \beta (\lambda)^{-\alpha} \quad (2.44)$$

$$\tau_{a\lambda} = \exp(\beta \lambda^{-\alpha}) \quad (2.45)$$

Pour une masse atmosphérique AM quelconque, la dernière expression (Eq. (2.45)), s'écrira :

$$\tau_{a\lambda} = \exp(\beta \lambda^{-\alpha} AM) \quad (2.46)$$

Où, β , α sont les coefficients de turbidité atmosphériques (coefficient d'Angstrom, β) et l'exposant d'Angstrom (α), caractérisant respectivement, la quantité d'aérosols contenue dans l'atmosphère et leurs dimensions. λ , désigne la longueur d'onde de la radiation solaire (en μm). L'Eq. (2.46), se nomme aussi la transmittance spectral, l'expression à l'intérieure de l'exponentielle est l'épaisseur optique d'extinction monochromatique (sans dimension). De nombreuses investigations expérimentales ont confirmé l'Eq. (2.44) avec un exposant α entre 0.0 et 4, et un coefficient d'Angstrom qui varie entre 0.0 et 0.5 [60-62].

2.2.3.2.2 Cas de la d'absorption :

Bien que la diffusion du rayonnement solaire par les molécules d'air et les particules soit une fonction continue de la longueur d'onde, l'absorption du rayonnement solaire par les

gaz atmosphériques est un processus sélectif. Cela signifie que ces gaz absorbent l'énergie solaire dans des bandes spectrales étroites sélectives et non sur tout le spectre solaire. C'est-à-dire, le processus d'absorption se produit seulement aux longueurs d'onde discrètes, nommée « absorption sélective ». D'autre part, l'absorption du rayonnement solaire se manifeste principalement par les gaz atmosphériques tels que l'oxygène (O₂), ozone (O₃), la vapeur d'eau (H₂O), dioxyde de carbone (CO₂), oxyde de carbone (CO), méthane (CH₄), oxyde nitreux (N₂O) et l'azote (N₂). Alors que les absorbants mineurs sont ; ammoniac (NH₃), oxyde nitrique (NO), dioxyde d'azote (NO₂) et le gaz sulfureux (H₂S). Les molécules diatomiques (O₂, N₂) et la molécule d'ozone (O₃) ainsi que H₂O, sont en fait les principaux absorbeurs du rayonnement solaire dans la gamme de l'ultraviolet et du spectre visible [47].

D'après la figure ci-dessous (Fig. 2.8), O₃ est extrêmement absorbant dans l'UV, se situant dans la bande 0.25-0.35 µm contenant les gammes d'Hartley et de Huggins, et modérément dans le visible [63]. On observe que la principale absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau se produit dans l'infrarouge. L'oxygène et le nitrogène absorbent la radiation solaire dans les bandes centrées sur 0.63, 0.69, et 0.76 µm. Par conséquent, la transmittance totale après l'absorption par l'ozone, les gaz atmosphériques (CO₂, NO₂, O₂, etc.), et la vapeur d'eau, peut donc s'écrire [38] :

$$\tau_{ab\lambda} = \tau_{ab\lambda} \tau_{abg\lambda} \tau_{abw\lambda} \quad (2.47)$$

La transmittance monochromatique globale dû à l'absorption de la radiation solaire par toutes les molécules et les aérosols est donc :

$$\tau_{\lambda} = \tau_{ab\lambda} \tau_{d\lambda} = \tau_{ab\lambda} \tau_{r\lambda} \tau_{a\lambda} \quad (2.48)$$

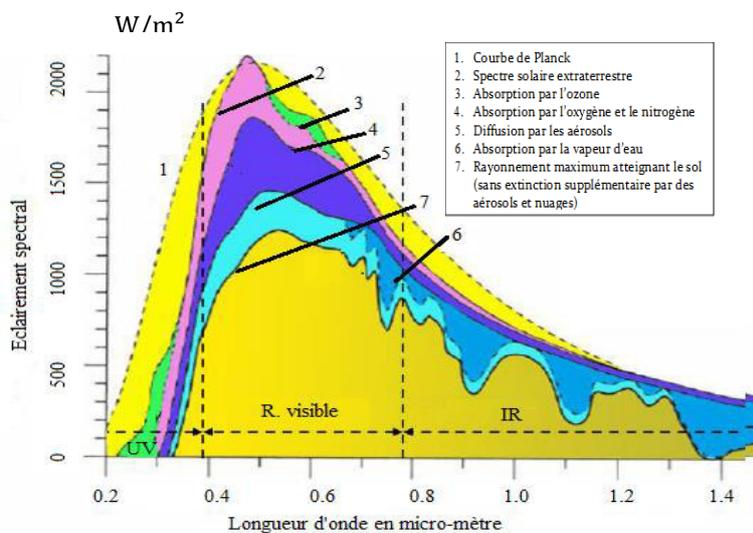


Fig. 2.8: Contribution des différents constituants de l'atmosphère à l'atténuation du rayonnement solaire [64]

2.3 LES COMPOSANTES ENERGETIQUES DU RAYONNEMENT SOLAIRE

2.3.1 Etude théorique

À la suite de son passage dans l'atmosphère, le rayonnement solaire est séparé en différents composants ; la composante directe, la composante diffuse et la composante réfléchie. La composante du faisceau qui atteint directement la surface de la Terre et ne subissant pas de diffusion se nomme l'éclairement direct incident sur un plan normal à la direction de la radiation ou irradiation normale direct (DNI), dont l'expression monochromatique est donnée par l'Eq. (2-49). En tenant compte de la contribution de tous les processus de l'atténuation du rayonnement solaire, sont expression en fonction des coefficients de transmissions est [65] :

$$I_{bn\lambda} = I_{0n\lambda} \tau_{r\lambda} \tau_{a\lambda} \tau_{abo\lambda} \tau_{abg\lambda} \tau_{abw\lambda} \quad (2.49)$$

Sur un plan horizontal, l'expression précédente devient :

$$I_{b\lambda} = I_{0n\lambda} \sin h \tau_{r\lambda} \tau_{a\lambda} \tau_{abo\lambda} \tau_{abg\lambda} \tau_{abw\lambda} \quad (2.50)$$

L'expression de l'éclairement direct reçue sur une surface inclinée, d'inclinaison β , s'écrit en fonction de l'angle θ (Eq. (2.12)), comme suit :

$$I_{b\lambda}(\theta) = I_{bn\lambda} \cos \theta \quad (2.51)$$

Comme nous l'avons déjà mentionné, le rayonnement diffus provient de la voûte céleste qui est due à la diffusion et la réflexion du rayonnement solaire. L'éclairement diffus représente la densité de flux d'énergie du rayonnement solaire entrant dans toute la voûte du ciel sur une surface horizontale, à l'exclusion du faisceau direct provenant du disque solaire. La radiation diffuse est générée principalement par l'effet de la diffusion des molécules d'air (diffusion de Rayleigh), des aérosols et les réflexions multiples. Plusieurs modèles spectraux ont été développé afin de calcules les composantes diffuses du rayonnement solaire atteignant le sol [66,67]:

2.3.1.1 Modèle de Bird-Hulstrom

Selon le modèle de Bird-Hulstrom [65], les différentes équations conduisant à l'évaluation des éclaircements de diffusion de Rayleigh, des aérosols et de réflexions multiples par rapport au plan horizontal sont présentées ci-après., comme suit :

$$I_{dr\lambda} = I_{0n\lambda} \cos \theta_z \tau_{abo\lambda} \tau_{abg\lambda} \tau_{abw\lambda} [0.5(1 - \tau_{r\lambda}^{0.95}) \tau_{aba\lambda}] \quad (2.52)$$

$$I_{da\lambda} = I_{0n\lambda} \cos \theta_z \tau_{abo\lambda} \tau_{abg\lambda} \tau_{abw\lambda} \tau_{aba\lambda} \tau_{r\lambda}^{1.5} [(1 - \tau_{da\lambda}) F_s] \quad (2.53)$$

$$I_{mr\lambda} = \frac{(I_{0n\lambda} \cos \theta_z + I_{dr\lambda} + I_{da\lambda}) \rho_{t\lambda} \rho_{a\lambda}}{1 - \rho_{t\lambda} \rho_{a\lambda}} \quad (2.54)$$

$\tau_{aba\lambda}$ et $\tau_{da\lambda}$ sont les coefficients de transmissions monochromatiques liés respectivement à l'absorption et à la diffusion des aérosols.

$$\tau_{aba\lambda} = \exp(-(1 - \omega_\lambda)k_{a\lambda}AM_a) \quad (2.55)$$

$$\tau_{da\lambda} = \exp(-\omega_\lambda k_{a\lambda}AM_a) \quad (2.56)$$

Avec, $k_{a\lambda}$, AM_a sont définis par les Eqs. (2.44) et (2.42). Les autres équations des transmittances introduites dans les équations ci-dessus, sont définies dans [67].

ω_λ est appelé albédo de simple diffusion. Il dépend de la composition chimique des aérosols, de leur taille et de leur distribution dans l'atmosphère, en plus de la longueur d'onde. F_s est le facteur de diffusion directionnel d'aérosol. Il dépend de l'angle zénithal. Leurs expressions sont données par :

$$\omega_\lambda = \omega_{\lambda=0.4} \cdot \exp\left\{-\omega' \left(\log\left(\frac{\lambda}{0.4}\right)\right)^2\right\} \quad (2.57)$$

$$F_s = 1 - 0.5 \exp((F_{11} + F_{12} \cos \theta_z) \cos \theta_z) \quad (2.58)$$

$$F_{11} = G_a |1.459 + G_a(0.1595 + 0.4129 G_a)| \quad (2.59)$$

$$F_{12} = G_a |0.0783 + G_a(-0.3824 - 0.5874 G_a)| \quad (2.60)$$

$$G_a = \log(1 - \overline{\cos \theta}) \quad (2.61)$$

$$\omega' = \frac{k_{aba\lambda}}{k_{aba\lambda} + k_{da\lambda}} = \frac{k_{aba\lambda}}{k_{a\lambda}} \quad (2.62)$$

Les différents coefficients inclus dans les expressions ci-dessus (Eqs. (2.57) à (2.62)), sont donnés dans des tables présentées par Shuttle [68].

$\rho_{i\lambda}$ est l'albédo du sol qui est fonction de la longueur d'onde. $\rho_{a\lambda}$ est le coefficient de réflexion atmosphérique qui est calculé par l'équation suivante (Eq. (2.63)) :

$$\rho_{a\lambda} = \tau_{abo\lambda}^p \tau_{aba\lambda}^p \tau_{abw\lambda}^p |0.5 (1 - \tau_{r\lambda}^p) + (1 - F_s^p) \tau_{r\lambda}^p (1 - \tau_{da}^p)| \quad (2.63)$$

Tous les paramètres indexés par « p », correspondent aux mêmes coefficients de transmission décrits précédemment mais calculés pour une masse d'air $AM_a = 1.8$.

Avec :

$$F_s^p = 1 - 0.5 \exp\left(\frac{\left(F_{11} + \frac{F_{12}}{1.8}\right)}{1.8}\right) \quad (2.64)$$

Par conséquent, l'éclairement diffus total sur un plan horizontal est la somme des trois composantes :

$$I_{d\lambda} = I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_{mr\lambda} \quad (2.65)$$

De même, l'éclairement global est la somme des éclairagements direct et diffus (la somme de l'Eqs. (2.50) et (2.65)). Celui-ci est donné par:

$$I_{\lambda} = I_{b\lambda} + I_{d\lambda} \quad (2.66)$$

Par ailleurs, par rapport à une surface inclinée, plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature pour l'évaluation des de l'éclairement solaire diffus sur une surface inclinée, parmi lesquels ceux proposés par Hotel et al. [69], Klucher [70], Temp et Coulson [71], Perez et al. [72], et Baltas et al. [73]. Ces modèles seront présentés dans le chapitre 3.

2.3.1.2 Modèle de Brine

Dans leur modèle, Brine et al. [66] ont considéré que le rayonnement diffus est également constitué de trois composantes, comme cela a été décrit précédemment, c'est-à-dire, diffusion de Rayleigh, diffusion des aérosols et multiples réflexions. D'autre part, les coefficients de transmission individuels de l'éclairement solaire directe présentés dans les sous-sections ci-dessus sont utilisés pour développer des équations pour chacun des phénomènes de diffusion du rayonnement solaire. Donc, par rapport à une surface horizontale, les expressions des composantes diffuses s'écrivent alors :

$$I_{dr\lambda} = I_{0n\lambda} \cos \theta_z \tau_{abo\lambda} \tau_{abg\lambda} \tau_{abw\lambda} \tau_{a\lambda} [0.5(1 - \tau_{r\lambda})] \quad (2.67)$$

$$I_{da\lambda} = I_{0n\lambda} \cos \theta_z \tau_{abo\lambda} \tau_{abg\lambda} \tau_{abw\lambda} \tau_{r\lambda} [(1 - \tau_{a\lambda}) \omega_0 F_c] \quad (2.68)$$

$$I_{mr\lambda} = \frac{(I_{0n\lambda} \cos \theta_z + I_{dr\lambda} + I_{da\lambda}) \rho_{t\lambda} \rho_{a\lambda}}{1 - \rho_{t\lambda} \rho_{a\lambda}} \quad (2.69)$$

Pour ce modèle, l'albédo des aérosols est donnée par :

$$\rho_{a\lambda} = \tau_{abo\lambda}^p \tau_{aba\lambda}^p \tau_{abw\lambda}^p 0.5 (1 - \tau_{r\lambda}^p) \tau_{a\lambda}^p + (1 - F_c) \omega_0 \tau_{r\lambda}^p \quad (2.70)$$

Les différents termes avec un indice p sont évalués pour une masse d'air de 1.9. Le terme F_c est le rapport de diffusion effectif qui est fonction de l'angle zénithal, qui est défini comme, le rapport entre le rayonnement solaire diffusé vers l'avant et le rayonnement solaire total diffusé. ω_0 est l'albédo de simple diffusion, qui représente la proportion d'énergie atténuées en

raison de la diffusion et de l'absorption. Des valeurs expérimentales de F_c et ω_0 ont été rapportées par Robinson [74] et tabulées dans Iqbal [38].

D'autre part, le rayonnement sur l'ensemble du spectre solaire ou par ce que l'on pourrait appeler une approche large bande est généralement utilisée dans plusieurs applications de l'énergie solaire tels que le solaire thermique, la climatisation solaire et le photovoltaïque. Il est alors nécessaire de développer des méthodes de calcul pour le rayonnement solaire, en introduisant les éclairiments diffus, direct et global intégrés. De telles méthodes sont appelées méthodes de paramétrisations. Plusieurs méthodes seront abordées dans le chapitre 4, où divers modèle à large bandes sont utilisés.

Dans ces méthodes, l'éclairiment et la transmittance intégrée pour chaque constituant atmosphérique est employée pour calculer la transmittance totale de l'atmosphère. Par conséquent, nous définissons l'éclairiment normal direct (ou Direct Normal Irradiance, DNI) qui est donné par les deux équations ci-dessous :

$$DNI_{\lambda_1, \lambda_2} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{0n\lambda} \tau_{\lambda} \Delta\lambda \quad (2.71)$$

$$I_n = DNI = \int_{\lambda=0}^{\lambda} I_{0n\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda \quad (2.72)$$

De même, l'éclairiment diffus au sol est défini :

$$I_{d, \lambda_1, \lambda_2} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{d\lambda} \Delta\lambda \quad (2.73)$$

$$I_d = \int_{\lambda=0}^{\lambda} I_{d\lambda} d\lambda \quad (2.74)$$

Le rayonnement global reçu sur un plan d'inclinaison β , s'écrit :

$$I_g = I_n \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_{d/\beta} \quad (2.75)$$

En outre, la transmittance intégrée pour chaque constituant atmosphérique en fonction de la constante solaire I_0 ((Eq. (2.4)), s'écrit :

$$\tau = \frac{\int_{\lambda=0}^{\lambda} I_{d\lambda} d\lambda}{I_0} \quad (2.76)$$

2.3.2 Mesures du rayonnement solaire

Obtenir des mesures précises pour le rayonnement solaire est important pour les chercheurs en environnement, en énergies renouvelables et en climatologie, car il peut avoir un impact

significatif, par exemple, sur les modèles développés et les diverses applications pouvant être réalisées. Pour cela, il est impératif de choisir des appareils de mesures très précis, conçus pour des mesures précises de diverses composantes du rayonnement solaire (direct, diffus global). Le domaine qui s'occupe des mesures au sol est la « radiométrie » et les instruments correspondant sont « les radiomètres ». Cependant, le rayonnement peut être mesuré soit par des mesures au sol ou par des mesures satellitaires.

2.3.2.1 Les mesures satellitaires

Contrairement aux mesures au sol qui sont locales, les mesures satellitaires couvrent généralement de grandes régions permettant ainsi d'acquérir des mesures précises de rayonnement solaire pour plusieurs sites et avec les mêmes instruments. En effet, cette technique permet de suivre l'évolution spatio-temporelle de la couverture nuageuse et l'étude du bilan énergétique terrestre. Actuellement, les satellites géostationnaires collectent des données toutes les 15 minutes avec une résolution spatiale de moyenne à faible valeurs (~ 1 km), tandis que les satellites à défilement fournissent une résolution spatiale plus élevée mais avec deux prises quotidiennes d'images. Les satellites météorologiques sont disponibles en trois configurations orbitales principales : équatoriale, polaire et géostationnaire. Les satellites équatoriaux sont des satellites en orbite basse (~ 600 km d'altitude) qui tournent généralement en orbite autour de la Terre dans une direction sinusoïdale qui traverse l'équateur au moins deux fois par orbite. Les satellites polaires sont également des satellites en orbite basse qui tournent autour de la Terre du Pôle Nord au Pôle Sud. Alors qu'un satellite géostationnaire orbite de telle sorte qu'il se trouve toujours au même point sur la surface de la Terre. Les satellites géostationnaires ont des altitudes très élevées (environ 36 000 km) et peuvent fournir des images à haute résolution temporelle sur une grande partie de la surface de la Terre.

Afin d'établir ses mesures à distance, le satellite météorologique utilise des capteurs passifs (par exemple les radiomètres), qui se contentent de fixer un milieu en recueillant les ondes qu'il émet : c'est la télédétection passive [77], ou alors, il peut utiliser des capteurs actifs par exemple les radars (lidars, interféromètres, diffusiomètres). Les capteurs actifs produisent leur propre énergie pour éclairer la cible. Le capteur émet un rayonnement dirigé vers la cible observée, puis il capte et mesure le rayonnement réfléchi par la cible. Il offre donc l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison. Cependant, ils doivent cependant produire une quantité considérable d'énergie pour bien éclairer une cible: c'est la télédétection active [78,79]. Un satellite n'emporte pas qu'un radiomètre mais dispose, le plus souvent de plusieurs instruments de mesure qui opèrent dans

différents domaines (différentes bandes spectrales, différentes résolutions spatiale et temporelle...).

Au cours des dernières décennies, plusieurs méthodes d'estimation du rayonnement solaire à partir de données satellitaires ont été mises au point et la plupart des méthodes utilisent des images satellites géostationnaires [80-85].

2.3.2.2 Mesures au sol

Il y a différents types d'instruments pour les mesures au sol, l'instrument dépend de la composante solaire à mesurer et de l'application correspondante. Le pyréliomètre sert essentiellement pour mesurer le rayonnement direct (DNI). C'est un appareil dont la surface sensible est toujours disposée perpendiculairement au rayon solaire. Il est en permanence orienté vers le Soleil de façon à ce qu'il ne mesure que le rayonnement provenant du disque solaire. La surface sensible du capteur est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant son angle d'ouverture à 5° . Pour pouvoir mesurer le rayonnement direct de façon continue, le pyréliomètre est muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le Soleil (Sun-tracker).

L'instrument qui permet la mesure du rayonnement global et pour tout l'hémisphère au-dessus du point de mesure (angle de vue 180°) est nommé « Pyranomètre ». En outre, si on place une boule ou un disque au travers le rayonnement direct, l'instrument mesurerait le diffus (Fig. 2-9). D'autre part, afin d'effectuer des mesures précises et fiables des composantes du rayonnement solaire, les instruments doivent être étalonnés et entretenus régulièrement. Une discussion détaillée des normes d'instrumentation et d'étalonnage est donnée par Iqbal et Zerlaut [38,75].

Un autre paramètre couramment utilisé est la durée d'ensoleillement qui est mesuré par un enregistreur Campbell-Stokes (héliographe). Il utilise une sphère de verre solide et transparente comme lentille pour concentrer le DNI sur le côté opposé de la sphère. Une bande de papier traité standard marquée avec des graduations de temps est montée sur le côté opposé de la sphère où le rayonnement solaire est concentré (Fig. 2-10). Chaque fois que le rayonnement solaire dépasse un seuil de 120 Wm^{-2} , le faisceau concentré brûle le papier. La longueur de la partie brûlée de la bande donne la durée d'ensoleillement. On note que la durée de l'ensoleillement est le temps au bout duquel le DNI dépasse 120 Wm^{-2} [55, 56,75].

Certaines applications de l'énergie solaire nécessitent des données de rayonnement solaire dans des plages de longueurs d'onde, à savoir le visible, l'ultraviolet et l'infrarouge plutôt que des données intégrées (composantes large bande). Ce sont des instruments tels que les

pyranomètre et pyréliomètre munis de filtres et qui peuvent être adaptés pour des mesures spectrales.

Un autre paramètre important pour des applications solaires est l'albédo de surface. Il est défini comme le rapport du rayonnement solaire diffusé ou réfléchi par le sol au rayonnement global. Il est mesuré par un albédomètre. C'est un instrument composé de deux pyranomètres montés en opposition, l'un captant le rayonnement solaire incident global et l'autre le rayonnement solaire réfléchi par la surface.

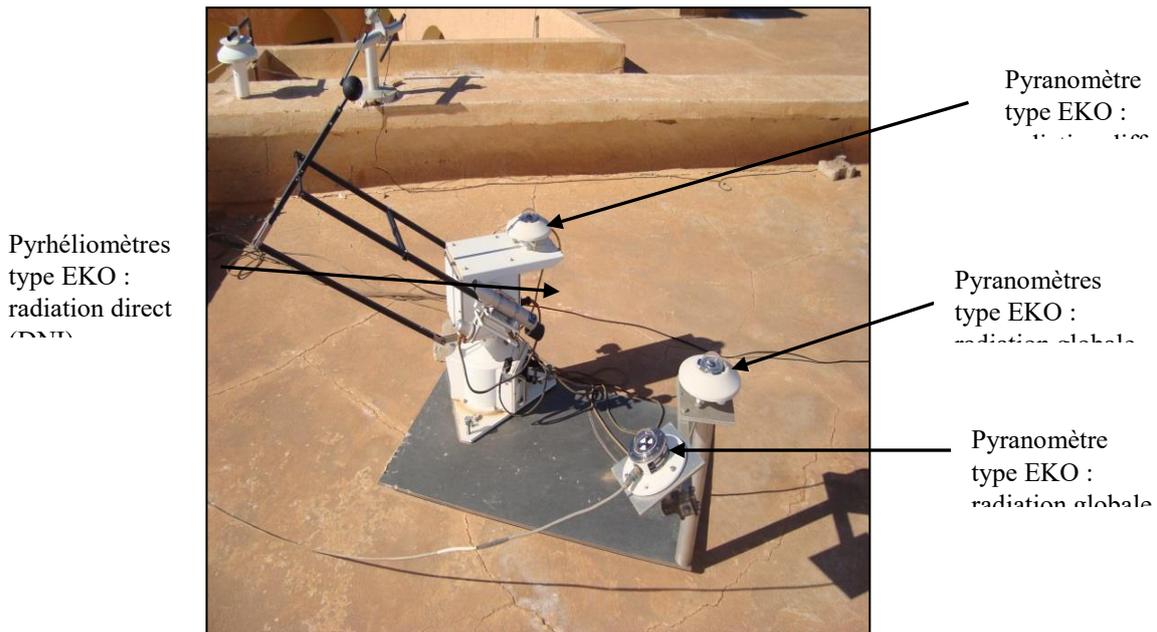


Fig. 2.9 : Station radiométrique de l'URAER [76].



Fig. 2.10: Image d'un Héliographe Campbell-Stokes [86]

2.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description générale sur les aspects géométriques et météorologiques du gisement solaire en s'appuyant sur le calcul de la position du soleil, ainsi que les dispositifs de mesure au sol des différentes composantes du rayonnement solaire, à savoir le direct, le diffus et le global, et d'autres dispositifs pour des paramètres liés à l'intensité du rayonnement tel que la durée d'insolation. Une brève discussion sur les méthodes satellitaires a été aussi présentée afin de montrer l'importance et la fiabilité de ces dernières pour l'estimation des composantes du rayonnement solaire en utilisant les satellites géostationnaires.

Dans ce chapitre, deux modèles basés sur plusieurs coefficients de transmission monochromatiques liés à l'absorption et à la diffusion du rayonnement solaire par les principaux constituants de l'atmosphère sont présentés. Ces modèles permettent d'évaluer la distribution spectrale des différentes composantes du rayonnement solaire, à savoir le direct normal (DNI), la diffusion horizontale et l'éclairement solaire globale horizontale, pour des conditions de ciel clair, sachant que leur composantes à large bande (non spectrales) seront traitées au chapitre 4, avec quelques modèles large bandes basés sur des transmittances intégrées sur toutes les longueurs d'ondes du rayonnement solaire.

Un programme MATLAB est développé, afin de calculer les distributions monochromatiques des différentes composantes du rayonnement solaire, Cela a permis également d'évaluer les valeurs instantanées de certain paramètres météorologiques introduit dans les chapitres suivants, tels que la formule de l'épaisseur de vapeur d'eau, de la couche d'ozone, la turbidité de Linke et d'Angstrom, de l'épaisseur de la couche d'eau, etc.

Chapitre 3

Modèles de prédiction du rayonnement solaire

3.1 INTRODUCTION

Notre pays, notamment le sud Algérien est caractérisée par un potentiel énergétique important, qui favorise le développement et l'utilisation de l'énergie solaire. Les besoins et les possibilités d'exploitation de cette source d'énergie sont directement liés aux conditions climatiques et météorologiques qui sont déterminées, soit par des méthodes satellitaires, soit par des mesures sur site soit par des modèles (empirique, statistique, et intelligentes), impliquant quelques paramètres d'entrés tels que la température, l'humidité, la température de rosée, la vitesse du vent, la durée d'ensoleillement, le trouble de Link, l'épaisseur de la vapeur d'eau et de l'ozone, etc.

Par ailleurs, avant d'entreprendre toute action ou programme de valorisation d'un projet solaire, une parfaite connaissance du gisement solaire est alors nécessaire. Cependant, l'énergie solaire par sa disponibilité aléatoire et intermittente dans le temps et dans l'espace, pose de vrais problèmes de dimensionnement et d'exploitation des systèmes solaire. D'où le recours à des équipements importants, impliquant souvent des investissements lourds et chers. Pour cela, le recours à la modélisation est primordial. De nombreuses études et travaux de recherches se sont fixés comme objectif la prédiction du rayonnement solaire, et divers modèles ont été développés pour diverses conditions météorologiques et géographiques.

Le travail que nous entreprenons dans ce chapitre consiste essentiellement à une présentation détaillée de quelques techniques de modélisation permettant la prédiction du rayonnement solaire, en utilisant des formules déduites dans les littératures. En effet, il existe de nombreux modèles de prédictions du rayonnement solaire pouvant être simples ou bien relativement compliqués. Dans cette section nous présentons brièvement quelques méthodes regroupant les modèles empiriques, les modèles intelligentes ainsi que les modèles stochastiques.

3.2 LES MODELES DE PREDICTIONS

3.2.1 Les modèles empiriques

3.2.1.1 Les formules de régressions

Le chapitre précédent nous a fourni quelques formules déterministes concernant les variables astronomiques et météorologiques de base utilisées pour le calcul de certains paramètres du potentiel solaire (durée d'ensoleillement, le rayonnement extraterrestre, etc...). Dans ce chapitre, nous présentons les modèles mathématiques basés sur des données expérimentales, ou validés par l'expérience, dont on ne connaît pas la base théorique, ou qu'on ne peut pas démontrer, il s'agit des modèles empiriques. En particulier, les modèles qui permettent

l'estimation des composantes énergétiques du rayonnement solaire, telles que le diffus, le direct et le global, et qui reposent sur des corrélations ou des relations (fonctions) dérivées, généralement par une analyse de régression linéaire ou non-linéaire (courbes d'ajustements).

Cette approche suppose donc que les données de rayonnement solaire mesurées peuvent être décrites qualitativement et quantitativement en fonction d'autres variables ou paramètres mesurés indépendamment, en utilisant le principe de prédiction. Ces variables indépendantes peuvent aller de simples variables telles que la déclinaison solaire, la hauteur du soleil, la température, l'humidité relative, la durée du jour, la couverture nuageuse, durée d'ensoleillement, etc..., à des combinaisons plus complexes de ces paramètres.

Cependant, diverses régressions ont été développées afin de prédire en particulier, le rayonnement global et diffus en fonction des paramètres météorologiques, pour une surface horizontale et dans différents lieux. Ces travaux se basent sur des équations de régressions numériques, linéaires et non linéaires [47,87-89]. Nous proposons ci-dessous quelques modèles de régressions qui ont été développés et employé par des travaux de recherches.

3.2.1.1.1 *Modèle d'Angstrom*

La formule linéaire d'Angström modifiée par Page [60,90], et qui est citée par J.A. Duffie et M. Iqbal [37,38], associe l'irradiation globale sur une surface horizontale en fonction de la durée d'ensoleillement. L'équation s'écrit comme suit :

$$\frac{G}{G_0} = a + b \frac{S}{S_0} \quad (3.1)$$

Où G et G₀ sont les moyennes mensuelles ou journalières des irradiances journalières globale et extraterrestre par rapport à un plan horizontal, obtenues par l'intégrale numérique en fonction du temps de l'Eq. (2.75), pour les éclairissements global et extraterrestre définis au chapitre précédent. Le terme $\frac{G}{G_0}$ est appelé indice de clarté (noté K_t). Le terme $\frac{S}{S_0}$ est la fraction d'insolation (noté σ). Il s'agit du rapport entre la durée d'insolation ou d'ensoleillement (S), qui est définie comme étant la durée pendant laquelle le rayonnement direct (DNI) excède les 120 W/m² durant la période mesurée par un héliographe (voir chapitre 2), avec la durée du jour S₀ [91]. Nous notons aussi que, a et b sont des constantes d'ajustement. Ils dépendent du climat d'un lieu donné.

3.2.1.1.2 *Modèle d'Ogelman*

Ogelman et al. [92] ont observé qu'une bonne performance était obtenue pour les régressions non-linéaires de forme quadratiques. Ces modèles décrivent l'évolution de l'irradiation

globale journalière en fonction de la fraction d'insolation. La forme générale de ce modèle est donnée ci-dessous [38,91]:

$$\frac{G}{G_0} = a + b \frac{S}{S_0} + c \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \quad (3.2)$$

3.2.1.1.3 Modèle de Samuel

Samuel a obtenu une corrélation entre $\frac{G}{G_0}$ et $\frac{S}{S_0}$ sous la forme non linéaire d'un polynôme de 3^{ème} degré, qui est donné par l'Eq. (3.3). Certains chercheurs ont utilisé ce modèle pour estimer l'irradiation solaire globale dans différents endroits du monde et pour différents types de climat [91,94-96].

$$\frac{G}{G_0} = a + b \frac{S}{S_0} + c \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 + d \left(\frac{S}{S_0} \right)^3 \quad (3.3)$$

3.2.1.1.4 Modèle de Liu - Jordan et de Collares-Pereira - Rabl

Pour l'estimation de l'irradiation diffuse journalière sur un plan horizontal, un certain nombre de corrélations entre l'indice de clarté et la fraction diffuse K_d (diffus/global) sur un plan horizontal ont été développés, incluant le modèle de Liu & Jordan [97], cité par Iqbal [38], et le modèle de Collares-Pereira & Rabl [98], cité par [37]. Les corrélations originales de Liu & Jordan et Collares-Pereira & Rabl s'écrivent respectivement, comme suit (Eqs. (3.4) et (3.5)):

$$K_d = 1.39 - 4.027K_t + 5.531K_t^2 - 3.108K_t^3 \quad 0.3 < K_t < 0.7 \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} 0.99, & K_d \leq 0.17, \\ K_d = 1.118 - 2.272K_t + 9.473K_t^2 - 21.856K_t^3 + 14.648K_t^4 \end{cases} \quad (3.5)$$

3.2.1.1.5 Modèle d'Elagib et Mansell

En se basant sur certains paramètres météorologiques, comme l'altitude (z) et la latitude du lieu (φ), Elagib & Mansell [99] ont développé des nouvelles formules linéaire et non linéaire pour estimer l'irradiation journalière globale sur un plan horizontal, comme en témoignent les travaux de certains auteurs [96,100,101]. Les équations générales s'écrivent comme :

$$\frac{G}{G_0} = a \exp\left(b \frac{S}{S_0}\right) \quad (3.6)$$

$$\frac{G}{G_0} = a + b\varphi + cz + d \frac{S}{S_0} \quad (3.7)$$

$$\frac{G}{G_0} = a + b\varphi + d \frac{S}{S_0} \quad (3.8)$$

$$\frac{G}{G_o} = a + cz + d \frac{S}{S_o} \quad (3.9)$$

3.2.1.1.6 *Modèle d'Hargreaves*

Développer des modèles précis de rayonnement solaire utilisant des paramètres mesurés couramment disponibles, tels que la température de l'air, est nécessaire afin de prédire le rayonnement global sur un plan horizontal. Le modèle d'Hargreaves basé sur la température suppose que la différence de température maximale et minimale est directement liée à l'indice de clarté. Ainsi, Hargreaves et Samani [102] ont recommandé une équation simple pour estimer le rayonnement solaire en utilisant uniquement les températures maximales et minimales (Eq. 3.10).

$$\frac{G}{G_o} = a(T_{mac} - T_{min})^{0.5} \quad (3.10)$$

L'une des applications de ce modèle pour l'estimation du rayonnement solaire global quotidien est décrite par Bayat and Mirlatifi [103], où le coefficient « a » a été pris à 0.16, pour la région de Shiraz, en Iran.

3.2.1.1.7 *Modèle de Swartman et Ogunlade*

De nombreux chercheurs ont tenté d'utiliser divers paramètres météorologiques disponibles, tels que les précipitations, humidité relative, température du point de rosée, la température de l'air et la nébulosité pour prédire la quantité de rayonnement solaire global. C'est le cas de Swartman et Ogunlade qui ont affirmé que le rayonnement global peut s'exprimer en fonction de la fraction d'insolation et de l'humidité relative (η) [104] :

$$\frac{G}{G_o} = a + b \frac{S}{S_o} + c \eta \quad (3.11)$$

3.2.1.1.8 *Modèle de H. Garg et S. Garg*

H. Garg & S. Garg [105], ont proposé une relation linéaire pour obtenir le rayonnement solaire global mensuel moyen comme suit:

$$\frac{G}{G_o} = a + b \frac{S}{S_o} + c w \quad (3.12)$$

Avec :

$$w = 0.0049 \eta \frac{\exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right)}{T} \quad (3.13)$$

La lettre w (en cm) est la hauteur de la vapeur d'eau précipitable dans l'atmosphère par unité de volume d'air, calculée selon Leckner [106], et citée par Iqbal [43]. T est la température de l'air (en °K).

3.2.1.1.9 *Modèle de Togrul et Onat*

Togrul & Onat [107], ont étudié l'effet des paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques, tels que la déclinaison solaire (δ) et l'irradiation extraterrestre (G_0) sur le rayonnement solaire global, et ont établi les corrélations suivantes:

$$H = a + b \sin \delta \quad (3.14)$$

$$H = a + b G_0 \quad (3.15)$$

$$G = a + b G_0 + c \frac{S}{S_0} \quad (3.16)$$

3.2.1.2 *Les formules du rayonnement solaire sur un plan incliné*

En vue de faire la conception des systèmes solaires (CSP, PV) et de déterminer leur performance, il est primordiale de calculer le rayonnement solaire sur une surface inclinée d'un capteur à partir de mesures ou des modèles de prédictions, notamment pour évaluer la performance d'un système de conversion du rayonnement solaire qui est dépendant de son orientation et de son angle d'inclinaison par rapport au plan horizontal. Nous nous tournons alors vers le problème général de l'estimation (ou prédiction) des composantes du rayonnement sur des surfaces inclinées lorsque seul le rayonnement sur une surface horizontale est connu. Alors, afin d'estimer le rayonnement solaire global sur une surface inclinée, à partir des composantes direct et diffuses mesurées sur un plan horizontal, des facteurs sont considérés : un facteur de forme qui prend en considération l'isotropie et l'anisotropie du ciel pour le calcul du diffus et un facteur de conversion pour le direct incliné calculé géométriquement (1^{er} terme du 2^{ème} membre de l'Eq. (3.17)).

Pour le rayonnement diffus, plusieurs modèles ont été développés par divers auteurs, tels que le modèle de Liu & Jordan (diffus pour un ciel isotrope) [108], le modèle de Hay & Davies [109-111], le modèle Temps & Coulson [71], le modèle de Klucher [70], le modèle de Reindl et al. [112], et le modèle de Perez [113].

Alors, le rayonnement global s'écrit sous la forme de deux composantes (voir le chapitre 2): (1) la composante du faisceau provenant de l'irradiation directe sur la surface inclinée et (2) la composante diffuse. La somme de ces composantes correspond à l'éclairement énergétique total (ou global) sur la surface inclinée, et est décrite par l'Eq. (3.17).

$$I_{\beta} = I_n \cos \theta + I_{d/\beta} \quad (3.17)$$

Une version plus complète de l'Eq. (3.17) est donnée sous la forme de tous les termes issus de la composantes diffuse (Fig. 3.1) [37,38] : (1) une composante diffuse isotrope (éclairage uniforme dans l'hémisphère du ciel) $I_{di/\beta}$, (2) une composante circumsolaire (résultant de la diffusion en avant du rayonnement solaire et concentrées dans une zone proche du soleil) $I_{dc/\beta}$, (3) la composante de l'horizon issue de la diffusion dans une bande près de l'horizon $I_{dh/\beta}$ et (4) la composante réfléchié par le sol sur la surface inclinée $I_{dr/\beta}$. L'équation s'exprimera comme suit :

$$I_{\beta} = I_n \cos \theta + I_{di/\beta} + I_{dc/\beta} + I_{dh/\beta} + I_{dr/\beta} \quad (3.18)$$

Les modèles formules cités dans les sous-paragraphes suivants, sont basés sur la contribution isotrope (Modèle de Liu & Jordan) et sur la contribution anisotrope du ciel (les modèles anisotropes) au rayonnement diffus. Ils sont déterminés en fonction de l'éclairage global et diffus reçus sur un plan horizontal et en fonction des paramètres géométriques (angle d'incidence (θ), angle d'inclinaison (β)), ainsi que de l'albédo moyen du lieu (ρ) [38]. Ces modèles sont décrits brièvement au cours de cette section :

3.2.1.2.1 *Le modèle de Liu et Jordan*

Dans ce modèle l'éclairage solaire global reçu sur un plan incliné contient trois composantes : (1) le direct, le diffus isotrope, le réfléchi. L'Eq. (3.18), devient :

$$I_{\beta} = I_n \cos \theta + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_g \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.19)$$

3.2.1.2.2 *Le modèle de Hay et Davies*

Ce modèle utilise la transmittance atmosphérique pour l'éclairage solaire direct (I_n/I_{on}) en tant qu'indice d'anisotropie qui définit la partie diffuse circumsolaire. Il prend aussi en considération la contribution du ciel uniforme (diffus isotrope), comme ça été décrit par certains auteurs [38, 114]. Par conséquent, le rayonnement global incident sur un plan incliné est défini par quatre composantes : (1) la composante directe, (2) le diffus circumsolaire, (3) la partie isotrope, (4) le réfléchi.

$$I_{\beta} = I_n \cos \theta + I_d \frac{I_n \cos \theta}{I_{on} \cos \theta_z} + I_d 0.5 \left(1 - \frac{I_n}{I_{on}} \right) (1 + \cos \beta) + I_g \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.20)$$

3.2.1.2.3 Le modèle de Temps et Coulson

Temps & Coulson ont montré que pour un ciel clair (ciel anisotrope) le rayonnement global reçu sur un plan incliné est représenté par l'Eq. (3.19) modifiée, en ajoutant un terme de modulation dans la partie isotrope qui est en fonction de l'inclinaison β , et un terme correspondant au diffus de l'horizon (anisotrope) :

$$I_{\beta} = I_n \cos \theta + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) (1 + \sin^3(\beta/2))(1 + \cos^2(\theta) \sin^3(\theta_z)) + I_g \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.21)$$

3.2.1.2.4 Le modèle de Klucher

Le modèle de Klucher est basé sur une étude de l'état du ciel clair défini par le modèle de Temps & Coulson, en introduisant un facteur de modulation « f » correspondant à tous types de ciel (du clair à couvert). Ce modèle anisotrope prend donc la forme:

$$I_{\beta} = I_n \cos \theta + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) (1 + f \sin^3(\beta/2))(1 + f \cos^2(\theta) \sin^3(\theta_z)) + I_g \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.22)$$

Où

$$f = 1 - \left(\frac{I_d}{I_g} \right)^2 \quad (3.23)$$

3.2.1.2.5 Le modèle de Reindl

Reindl a modifié le modèle de Hay-and-Davies en ajoutant un terme d'anisotropie f' . Le rayonnement global sur la surface inclinée devient alors:

$$I_{\beta} = I_n \cos \theta + I_d \frac{I_n \cos \theta}{I_{on} \cos \theta_z} + I_d 0.5 \left(1 - \frac{I_n}{I_{on}} \right) (1 + \cos \beta) f' + I_g \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.24)$$

$$f' = 1 + \sqrt{\frac{I_n}{I_g}} \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (3.25)$$

3.2.1.2.6 Le modèle de Perez

Par rapport aux modèles décrits précédemment, le modèle de Perez est basé sur une analyse plus détaillée des trois composantes diffuses du rayonnement solaire (diffus isotrope, circumsolaire et terme de l'horizon) en utilisant les coefficients empiriques de Perez, comme indiqué par Duffie & Beckman [37]. Ce modèle de ciel a été validé empiriquement en

plusieurs emplacements [115-117]. L'expression mathématique du modèle sur un plan incliné est :

$$I_{\beta} = I_n \cos \theta + I_d \left[(1 - f_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + f_1 \frac{a}{b} + f_2 \sin \beta \right] + I_g \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.26)$$

Où f_1 et f_2 sont des coefficients de luminosité représentant respectivement les degrés d'anisotropies des composantes circumsolaire et de l'horizon, a et b sont des termes qui prennent en compte l'angle d'incidence du cône du rayonnement circumsolaire. Ces coefficients sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} a &= \max(0, \cos \theta) \\ b &= \max(0, \cos \theta_z) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Les coefficients de luminosité f_1 et f_2 sont des fonctions de trois paramètres ; l'angle zénithal θ_z , la clarté ϵ et la luminosité Δ , où ϵ est fonction du rayonnement diffus et du rayonnement du faisceau à incidence normale DNI qu'on notera ici par I_n . Les paramètres de clarté et de luminosité sont donnés par :

$$\epsilon = \frac{\frac{I_d + I_n}{I_d} + 5.535 \times 10^{-6}}{1 + 5.535 \times 10^{-6} \theta_z^3} \quad (3.28)$$

Les coefficients de luminosité f_1 et f_2 sont des fonctions des coefficients calculés statistiquement pour des plages de valeurs de ϵ ; un ensemble recommandé de ces coefficients est présenté dans le Tableau 3.1. Les équations pour calculer f_1 et f_2 sont :

$$f_1 = \max \left[0, f_{11} + f_{12} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{13} \right] \quad (3.29)$$

$$f_2 = \left(f_{21} + f_{22} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{23} \right) \quad (3.30)$$

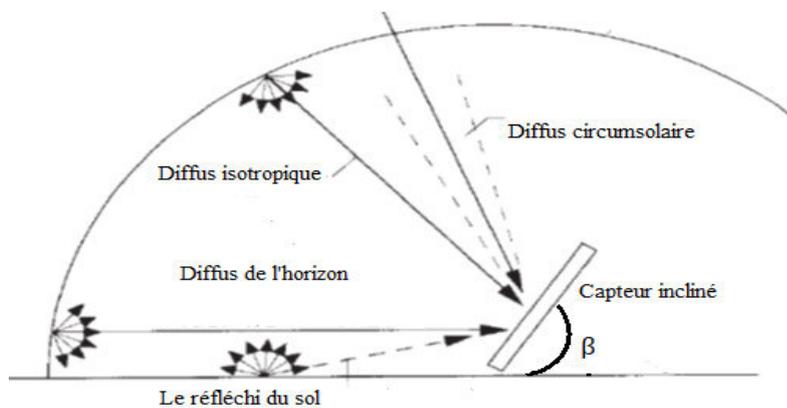


Fig. 3.1: Les différentes composantes du rayonnement solaire

Tableau 3.1: Coefficients de luminosité pour le modèle anisotrope de Perez [37]

gamme de ε	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{21}	f_{21}
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	0.156	-1.377	0.251

3.2.2 Les techniques de l'intelligence artificielle

Récemment, des approches sur l'intelligence artificielle ont été développées et utilisées comme techniques très efficaces pour modéliser le rayonnement solaire global, diffus et direct dans de nombreuses régions du globe et par plusieurs chercheurs [118-123]. Les calculs de ces techniques peuvent reconnaître efficacement les relations entre les variables dépendantes (les entrées) et indépendantes (les sorties) même pour des processus non linéaires. Dans cette partie de la section, nous présentons brièvement quelques techniques concernant l'intelligence artificiel, qui sont introduites par la plupart des travaux scientifiques, comme les réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN), la logique floue, le système d'inférence neuro flou (ANFIS).

3.2.2.1 Les réseaux de neurones artificiels

Ce sont des fonctions mathématiques à plusieurs paramètres, ajustables par les poids synaptiques. Les RNA ont été inventées par Warren Mc Culloch et Walter Pitts en 1943 [124]. La technique de réseaux de neurones artificiels (ou neurones formels) est largement considérée comme une alternative pour la résolution de problèmes physique et mathématique complexes. Ils peuvent apprendre à partir d'exemples d'entrées pour donner une sortie qui pourrait être comparée à une sortie connue au préalable. La technique RNA a été appliquée à la modélisation, l'identification, l'optimisation, la prévision, et au contrôle de systèmes complexes. Dans la modélisation et la prévision du rayonnement solaire, de nombreuses études ont été réalisées avec les RNA. La plupart d'entre elles utilisent les coordonnées géographiques et les données météorologiques citées précédemment, telles que l'humidité relative, la température de l'air, la pression, la durée d'ensoleillement, etc.

Les réseaux de neurones sont constitués par les éléments inspirés par les systèmes nerveux biologiques. Ces approches reposent sur notre compréhension du système nerveux biologique par l'intermédiaire des neurones, qui sont l'unité structurelle de base du système nerveux

[125]. Ils sont essentiellement déterminés par des connexions entre les éléments du réseau et sont en général constitués de plusieurs couches : la couche d'entrée, la ou les couches cachées et la couche de sortie. Ce sont des modèles dans lesquels les paramètres de sortie sont calculés à partir des entrées via des connexions ou les poids, nommés aussi les weights (w_{ji}) entre un neurone i et un neurone j de deux couches successives, Fig. 3.2.

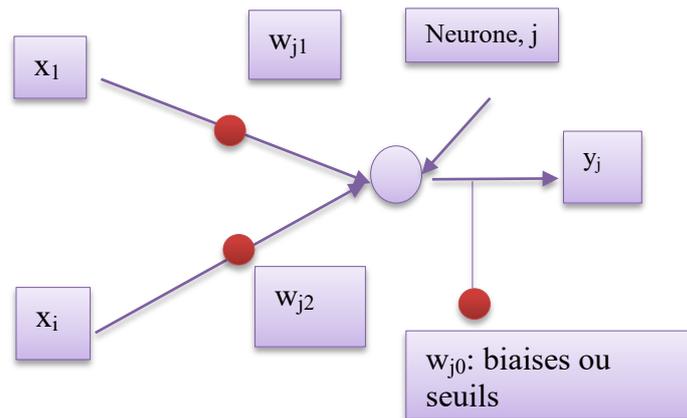


Fig. 3.2: Schéma d'un neurone associé à deux entrées et deux poids synaptiques

Chaque connexion est associée à deux valeurs, une valeur d'entrée et un poids. La sortie de chaque unité (y_j), est obtenue à partir d'une la fonction de la somme pondérée des termes d'activation, comme indiquée par l'Eq. (3.31).

$$y_j = f \left(\sum_{i=1}^p w_{ji} x_{ji} + w_{j0} \right) \quad (3.31)$$

En fait, il existe plusieurs architectures (ou structures d'interconnexion) de réseaux de neurones [126] : les réseaux multicouches, les réseaux à connexions locales où le signal se propage vers l'avant (feed-forward network) (Figs. 3.3a et 3.3b), les modèles récurrents (feedback network) dans lesquels la propagation est de type synchrone (toutes les unités sont mises à jour simultanément) ou asynchrone (les unités sont mises à jour séquentiellement) (Fig. 3.4a et 3.4b).

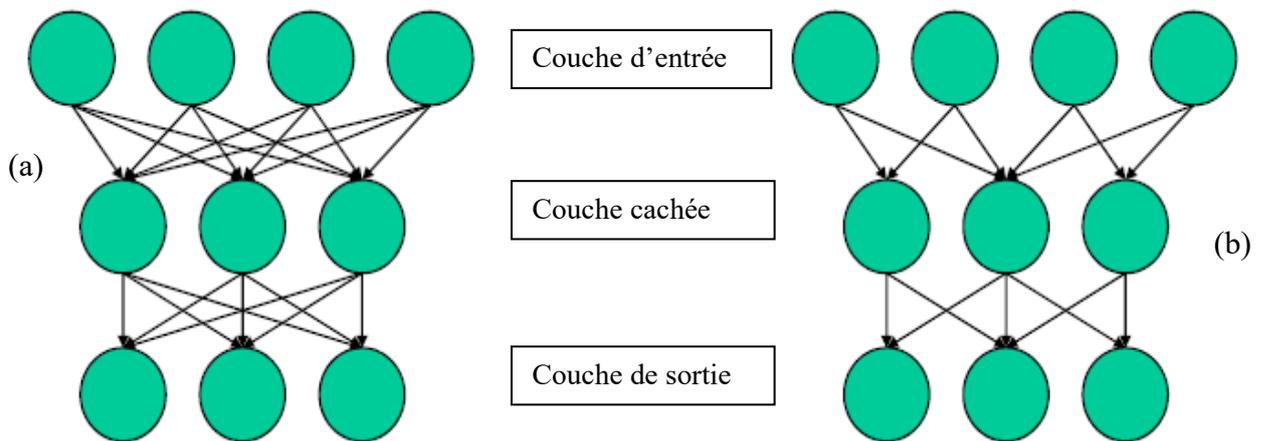


Fig. 3.3: architecture feed-forward : (a) réseau multicouche, (b) réseau à connexions locales

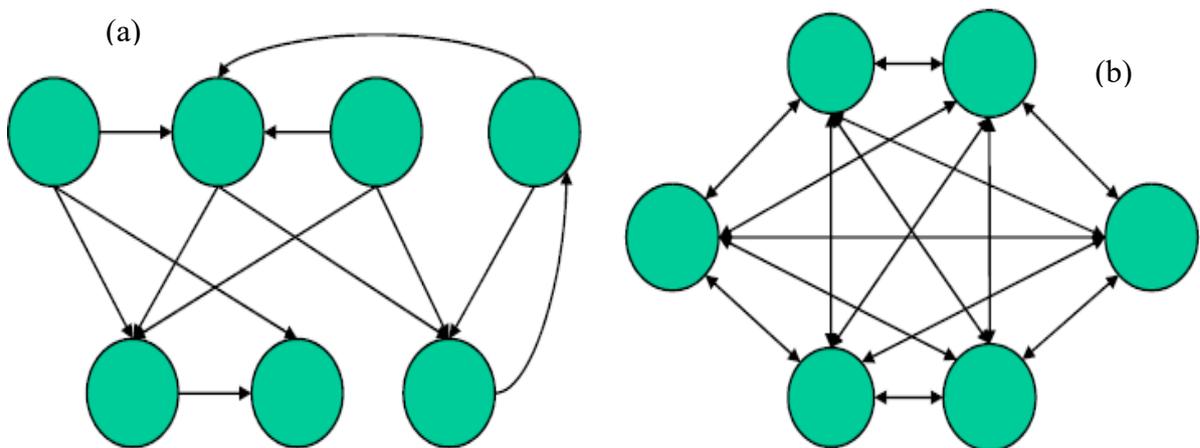


Fig. 3.4: réseaux récurrents: (a) synchrone, (b) asynchrone

Cependant, les réseaux de neurones que nous rencontrons souvent dans divers travaux, sont les réseaux « feed-forward », notamment les Multilayer Perceptron (MLP), où chaque neurone est connecté aux autres neurones d'une couche précédente par l'intermédiaire de poids synaptiques adaptables via un processus d'apprentissage (Training). Les poids sont ajustés, jusqu'à ce que la sortie désirée soit obtenue.

Celui-ci correspond à un algorithme intelligent, capable de mieux adapter les poids du réseau, selon la loi de Hebb [127]. Par ailleurs, l'étape d'apprentissage, sert à la prédiction des paramètres du réseau par minimisation de la fonction quadratique (fonction coût), qui s'écrit pour tous les neurones du réseau, comme suit :

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (y_j(x_i) - t_j^i)^2 \quad (3.32)$$

Où t_j^i est la valeur cible pour l'unité de sortie j lorsque le réseau est présenté avec le vecteur d'entrée x_i . Les poids sont alors déterminés par la formule d'itération suivante :

$$w_{ij}^{p+1} = w_{ij}^p + \mu \times a_i a_j \quad (3.33)$$

Où a_i et a_j sont respectivement les valeurs d'activation des neurones i et j qui sont en coactivité. μ est le taux d'apprentissage. p étant l'ordre de l'itération.

Cependant, il existe plusieurs autres règles d'apprentissage, notamment l'algorithme d'apprentissage fréquemment utilisé pendant le processus d'apprentissage d'un MLP, qui est la « rétro propagation », à savoir, la méthode Levenberg – Marquardt [129], qui a été appliqué dans de nombreux travaux [125-128]. L'algorithme s'écrit comme suit :

$$w^{p+1} = w^p - [H(w_p) + \mu I]^{-1} G(w_p) \quad (3.34)$$

$$H(w_p) = J^T(w_p) J(w_p) \quad (3.35)$$

$$G(w_p) = J^T(w_p) E(w_p) \quad (3.36)$$

Où I , J , H sont des matrices identité, Jacobienne et Hessienne. G et E étant des matrices contenant les termes de gradient et d'erreurs.

3.2.2.2 La logique floue

La logique floue (FL) a été introduite en 1965 par Zadeh [130]. C'est une forme de logique probabiliste qui est approximative et utilisant un raisonnement linguistique. Par rapport aux ensembles binaires traditionnels, les variables FL peuvent avoir une valeur de vérité (degré d'appartenance) qui varie entre 0 et 1. Un ensemble flou attribue un degré d'appartenance, à des éléments d'un univers (univers de discours, U), où 0 représente une proposition totalement fausse et 1 totalement vrai. Les ensembles flous sont alors décrits par leur fonction d'appartenance « μ_A » ($\mu_A \in [0,1]$), où A un sous-ensemble flou de U . Les fonctions d'appartenance peuvent avoir diverses formes : Gaussienne, sigmoïdes, triangulaire et trapézoïdale. Cependant, les caractéristiques suivantes sont couramment utilisées dans la théorie des ensembles flous.

3.2.2.2.1 Les caractéristiques des ensembles flous

Un sous-ensemble flou est complètement défini par la donnée de sa fonction d'appartenance. A partir d'une telle fonction, un certain nombre de caractéristiques du sous-ensemble flou peuvent être étudiées, un exemple est donné dans la Fig. 3.5:

✓ La hauteur de A, noté $h(A)$, correspond à la borne supérieure de l'ensemble d'arrivée de sa fonction d'appartenance :

$$h(A) = \sup\{\mu_A(x) | x \in U\} \quad (3.37)$$

✓ Le support de A est l'ensemble des éléments de X appartenant au moins partiellement à A :

$$\text{supp}(A) = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\} \quad (3.38)$$

✓ Le noyau de A est l'ensemble des éléments de U appartenant totalement à A :

$$\text{noy}(A) = \{x \in U | \mu_A(x) = 1\} \quad (3.39)$$

✓ Une α -coupe de A est le sous-ensemble de A des éléments ayant un degré d'appartenance supérieur ou égal à α :

$$\alpha\text{-coupe}(A) = \{x \in U | \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (3.40)$$

✓ La cardinalité d'un sous-ensemble flou A de X, notée $|A|$, est le nombre d'éléments appartenant à A pondéré par leur degré d'appartenance. Formellement, nous avons :

$$|A| = \sum_{x \in A} \mu_A(x) \quad (3.41)$$

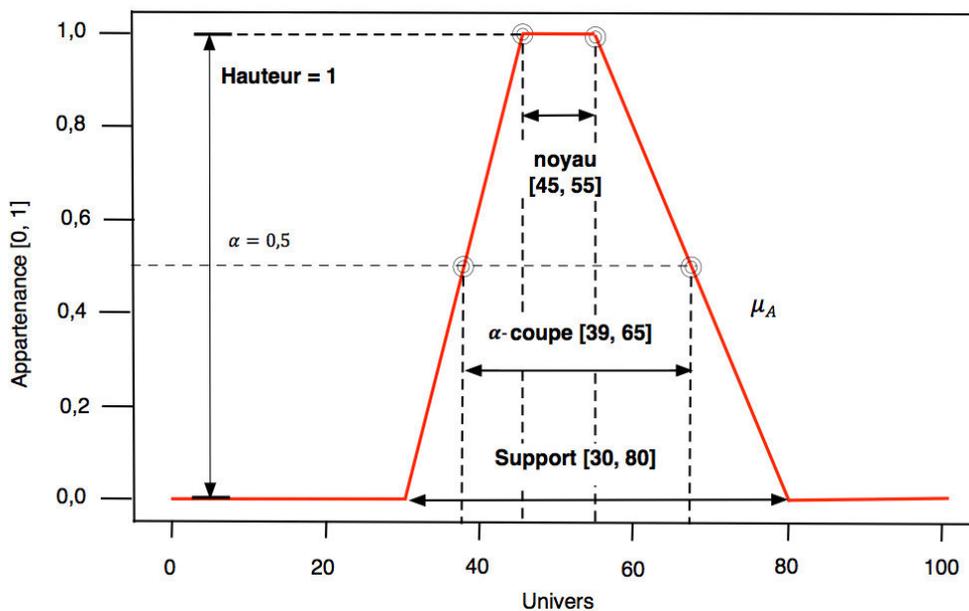


Fig. 3.5 : Exemple concernant les caractéristiques d'un ensemble

3.2.2.2.2 Les opérateurs sur les ensembles flous

Etant donné que le concept de sous-ensemble flou peut être vu comme une généralisation du concept d'ensemble classique, on est conduit alors à introduire des opérations sur les sous-ensembles flous qui sont équivalentes aux opérations classiques de la théorie des ensembles. On présente ici, les opérations les plus couramment utilisées (Tableau 3.2), c'est-à-dire, quelques opérateurs qui sont intégrées dans diverses agrégations des propositions floues (voir la section 3.2.2.2.3).

✓ Egalité

Deux sous-ensembles flous A et B de U sont égaux, si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tous les éléments x, de, U. Formellement, Nous avons :

$$A = B \Leftrightarrow \forall x \in U, \mu_A = \mu_B \quad (3.42)$$

✓ Inclusion

On dit que le sous ensemble A est inclus dans le sous ensemble B, si et seulement si leur fonction d'appartenance vérifie la proposition suivante :

$$A \subset B \Leftrightarrow \forall x \in U, \mu_A \leq \mu_B \quad (3.43)$$

✓ L'intersection et l'union

Les opérations intersection et union sont définies par la fonction d'appartenance suivante :

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A, \mu_B) \quad (3.44)$$

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A, \mu_B) \quad (3.45)$$

✓ Le complémentaire

Le complémentaire de A est défini par la fonction d'appartenance suivante :

$$C_A = 1 - \mu_A(x) \quad (3.46)$$

Tableau 3.2 : les diverses agrégations les plus couramment utilisées

Méthode	Intersection (ET)	Union (OU)	Complément (NON)
Zadeh	$\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$1 - \mu_A(x)$
Probabiliste	$\mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$1 - \mu_A(x)$

3.2.2.2.3 Le raisonnement en logique floue

Les règles floues sont énoncées en langage naturel. Ils font intervenir des variables linguistiques, qui varient selon une plage de valeurs. Ces variables appartiennent ou non à des sous-ensembles flous. Alors, on appelle variable linguistique un triplé (N, U, X) tel que :

- ✓ N est le nom de la variable linguistique (taille, poids, température,...) ;
- ✓ U est l'univers de valeurs, pouvant être, éventuellement, prises par N ;
- ✓ X est un ensemble de sous-ensembles flous de U qui caractérisent N.

En outre, on définit les prémisses et la conclusion d'une règle à partir des propositions suivantes :

- On appelle proposition floue élémentaire la qualification d'une variable linguistique : N est A, où A est un sous-ensemble de U.
- On appelle proposition floue générale la composition de plusieurs propositions floues élémentaires :
N1 est A et N2 est B.
- On peut associer à chaque proposition floue élémentaire une valeur de vérité. La valeur de vérité d'une proposition donnée est définie par une fonction d'appartenance.
- La valeur de vérité d'une proposition floue générale est obtenue par l'agrégation des valeurs de vérités de propositions simples qui la composent.
- Les règles floues (inférence floue) sont exprimées de la manière suivante :

Si [prémisses] alors [conclusion].

Mathématiquement, on a :

(x est A) => (y est B) ou bien,

Si $x \in A$ et $y \in B \Rightarrow z \in C$, avec A, B et C des ensembles flous

En fait, il existe plusieurs systèmes d'inférence floue, les plus couramment utilisés sont répertoriés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3: les différentes règles d'inférence de la logique floue

Nom de la règle floue	La règle floue
Kleene Dienes	$\max(\mu_{CA}(x), \mu_B(y))$
Willmot	$\max(\mu_{CA}(x), \min(\mu_A(x), \mu_B(y)))$
Larsen	$\mu_A(x) \times \mu_B(y)$
Mamdani	$\min(\mu_A(x), \mu_B(y))$

Cependant, une règle floue comporte les étapes suivantes:

- ❖ Fuzzification : consiste à transformer les variables linguistiques en variables floues.
- ❖ Degré d'activation : C'est l'évaluation du degré d'appartenance global du prédicat de chaque règle par combinaison logique des propositions floues générales (Tableau 3.2).
- ❖ Implication : Elle permet de déterminer la conclusion floue de la règle.
- ❖ Agrégation : C'est l'ensemble flou global de sortie construit par agrégation des ensembles flous obtenus par chacune des règles (Tableau 3.3).
- ❖ Défuzzification : C'est l'opération qui consiste à passer du système final flou au système réel. Les méthodes de « défuzzification » les plus utilisées étant, le calcul du centre de gravité et la moyenne des maxima du système flou [131]. Ces méthodes sont les suivantes :

- Le centre de gravité

Cette méthode consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la surface (S_μ) formée par l'intersection de la courbe caractéristique de la fonction d'appartenance caractérisant l'ensemble flou et l'axe des abscisses. C'est cette valeur (l'abscisse) qui sera alors évaluée comme solution. Dans les cas continu et discret, On a donc :

$$CG = \frac{\int_{S_\mu} y \mu(x, y) dy}{\int_{S_\mu} \mu(x, y) dy} \quad (3.47)$$

$$CG = \frac{\sum_{ymin}^{ymax} y \mu(y)}{\sum_{ymin}^{ymax} \mu(y)} \quad (3.48)$$

- La méthode de la moyenne des maxima

Il s'agit de calculer l'abscisse du maximum de la fonction d'appartenance obtenue. S'il y'a plusieurs maxima on évalue la moyenne (MM). En posant N étant le nombre de points de S, nous avons :

$$MM = \frac{\int_{S_\mu} y dy}{\int_{S_\mu} dy} \quad (3.49)$$

$$MM = \frac{\sum_{ymin}^{ymax} y}{N} \quad (3.50)$$

3.2.2.2.4 Les applications de la logique floue

Il convient de noter que l'approche ou la logique floue permet de caractériser divers problèmes, tant en physique, mathématique qu'en d'autres disciplines. Par ailleurs, il existe de nombreuses applications dans divers domaines, telles que,

- électroménagers (lave-linge, aspirateur, autocuiseur,...),
- systèmes audio-visuels (appareil photo auto focus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieur,...),
- systèmes automobiles embarqués (ABS, suspension, climatisation,...etc.),
- systèmes de transport (train, métro, ascenseur,...),
- systèmes de décision, diagnostic (médical, assurance)
- systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production, traitement de produits et déchets, etc.

Par exemple, le rayonnement solaire, révèle un certain degré d'incertitude et d'imprécision causé par son caractère aléatoire dû à la présence des nuages. Ce qui rend difficile d'appliquer la théorie des ensembles flous qui ne présente pas à elle seule une solution suffisante pour ce genre application. Pour cela, il a été montré que la modélisation des composantes du rayonnement solaire (diffus, direct et global) [131-134], est plus aisée, lorsque la logique floue est associée à d'autres techniques de l'intelligence artificielles, notamment celle de la méthode hybride "adaptive neuro fuzzy inference system" (voir section ci-dessous).

3.2.2.3 Systèmes neuro-flous (ANFIS - adaptive neuro fuzzy inference system)

Chaque technique intelligente a des propriétés particulières (par exemple capacité d'apprentissage, explication de décisions) et convient à résoudre certains problèmes particuliers. En effet, les réseaux neuronaux sont par exemple utilisés pour la reconnaissance des modèles. Cependant, ils sont incapables d'expliquer comment ils atteignent leurs décisions. Aussi pour les systèmes de la logique floue qui peuvent raisonner avec l'information imprécise et expliquer leurs décisions mais ne peuvent cependant pas acquérir automatiquement les règles qu'ils utilisent pour prendre ces décisions.

Ces limites ont été une raison derrière la création de systèmes hybrides intelligents où, deux ou plus de techniques sont combinées afin de vaincre les limitations d'une seule technique. Ces systèmes prouvent leur efficacité dans une variété d'applications, telles que la modélisation du rayonnement solaire. Par exemple, A. Sfetsos and A. H. Coonick [135], ont introduit une nouvelle approche pour la prévision du rayonnement solaire global horaire reçu par une surface horizontale. Dans leur article, outre les méthodes classiques, plusieurs techniques basées sur l'intelligence artificielle sont étudiées. Ceux-ci comprennent les réseaux de neurones feed-forward (RNA) type récurrent, base radiale (RBF), ainsi que l'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS). Les résultats indiquent que les modèles d'intelligence artificielle développés ont permis de prédire la série chronologique du rayonnement solaire plus efficacement que les procédures classiques. Olatomiwa et al. [136] ont étudié la

technique ANFIS pour prédire le rayonnement solaire. Ils ont considéré un réseau ANFIS comportant trois neurones dans la couche d'entrée et un neurone dans la couche de sortie. Les entrées sont la température maximale moyenne mensuelle, la température minimale moyenne mensuelle et la durée d'insolation. Les résultats déterminés par ANFIS ont été comparé aux résultats expérimentaux en utilisant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination. Les résultats indiquent une amélioration de la précision prédictive et de la capacité d'ANFIS à estimer le rayonnement solaire.

Il existe différentes manières de combiner FIS et ANN, où toutes les formes de combinaisons sont appelées systèmes neuro-flous: systèmes neuro-fuzzy coopératifs, concurrents et intégrés (hybrides). Dans les systèmes neuro-flous intégrés, il existe une synergie entre LF et ANN contrairement aux systèmes coopératifs et concurrents. Les systèmes neuro-fuzzy intégrés, également appelés systèmes hybrides neuro-fuzzy, peuvent être décrits comme un système flou qui utilise le mécanisme d'apprentissage fourni par ANN pour déterminer ses paramètres (fonctions d'appartenances et règles floues). Les sections suivantes se concentrent sur l'un des plus anciens et les plus couramment utilisés, les systèmes neuro-fuzzy hybrides (ANFIS). Dans cette section, nous définissons brièvement la structure hybride et l'algorithme d'apprentissage hybride d'ANFIS.

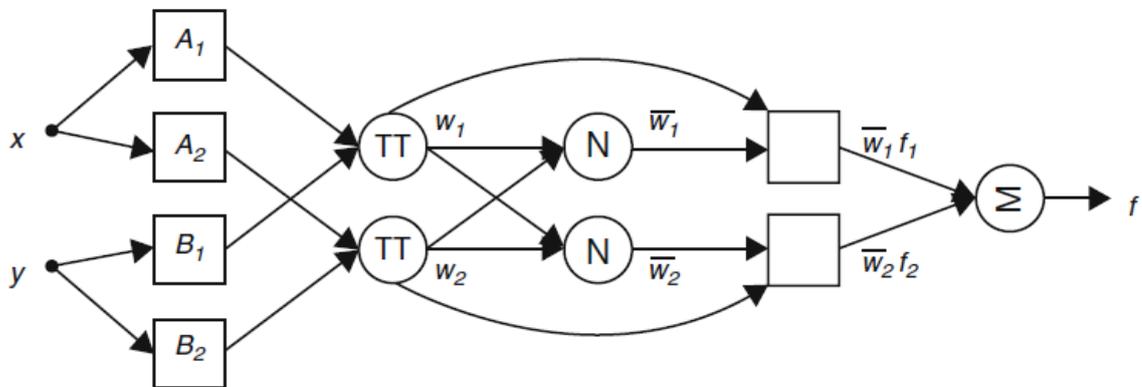


Fig. 3.6 : Architecture ANFIS (cas de 2 entrées) [137]

3.2.2.3.1 La structure hybride d'ANFIS

L'architecture d'ANFIS est un réseau à feedforward composé de 5 couches, comme illustré à la Fig. 366 [138]. La figure illustre l'architecture ANFIS équivalente pour un système d'inférence floue de type Takagi et Sugeno [139,140]. Le résultat de chaque règle est une combinaison linéaire de variables d'entrée plus un terme constant, et le résultat final est la moyenne pondérée du résultat de chaque règle. Cette technique rend la modélisation par ANFIS plus systématique, moins dépendante des connaissances des experts et ne nécessite

pas de processus de défuzzification. Il est donc couramment utilisé dans la modélisation floue des problèmes non linéaires.

Par exemple, nous supposons que le système d'inférence floue a deux entrées x et y et une sortie, f . Supposons aussi que la base contient deux règles d'inférence :

$$\text{Règle 1} \quad \text{Si } x \text{ est } A_1 \text{ et } y \text{ est } B_1 \Rightarrow f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (3.51)$$

$$\text{Règle 2} \quad \text{Si } x \text{ est } A_2 \text{ et } y \text{ est } B_2 \Rightarrow f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (3.52)$$

Où A_i ou B_{i-2} est un terme linguistique (ensemble flou) associé aux entrées (par exemple, petite, grande,...). Les f_i ($i, = 1, 2$) sont les sorties (combinaisons linéaires des entrées). Les p_i , q_i , et r_i sont des paramètres de Takagi et Sugeno qui sont déterminés au cours du processus d'apprentissage. La description de chaque couche est définie comme suit :

✓ La première couche comprend des fonctions d'appartenance correspondantes aux variables d'entrée et fournit les valeurs d'entrée à la couche suivante (indiquée par un carré). La sortie de chaque nœud « i » de cette couche admet un degré de vérité $O_{1,i}$ correspondant à la fonction d'appartenance $\mu_{A_i}(x)$ de la variable floue A_i pour l'entrée x , ou $\mu_{B_{i-2}}(y)$ de B_{i-2} pour la variable de l'entrée y . La fonction d'appartenance peut être une fonction gaussienne (Eq. (3.53)), une fonction triangulaire (Eq. (3.54)), trapézoïdal (Eq. (3.55)) et une fonction en cloche généralisée (Eq. (3.56)) [141], avec le maximum égal à 1 et le minimum égal à 0. Ces équation s'écrivent pour un nœud « i » et l'entrée « x » comme suit :

$$\mu_{A_i}(x) = \exp \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \quad (3.53)$$

$$\mu_{A_i}(x) = \max \left[\min \left(\frac{x - a_i}{b_i - c_i}, \frac{c_i - x}{c_i - b_i} \right), 0 \right] \quad (3.54)$$

$$\mu_{A_i}(x) = \max \left[\min \left(\frac{x - a_i}{b_i - a_i}, 1, \frac{d_i - x}{d_i - c_i} \right), 0 \right] \quad (3.55)$$

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^{2b_i}} \quad (3.56)$$

Avec, a_i , b_i , c_i , d_i sont les paramètres pouvant modifier la forme de la fonction d'appartenance (nommés paramètres de prémisse). Les variables de la première couche sont appelées variables de la prémisse.

✓ Chaque nœud de la deuxième couche est étiqueté « Π », de sorte que la valeur de sortie, correspond au produit des fonctions d'appartenance (signaux entrants) nommée fonction d'activation (ou poids), s'écrit dans un cas général comme suit :

$$O_{2i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad (3.57)$$

✓ Dans la troisième couche chaque nœud est étiqueté par « N ». Le nœud évalue le rapport entre la fonction d'activation w_i est la somme des poids de toutes les règles qui sont données par l'Eq. (3.58). Ce résultat est connu sous le nom de poids normalisés. L'expression s'écrit dans un cas général comme suit :

$$O_{3i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_i w_i} \quad (3.58)$$

Dans le cas choisi, nous avons :

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (3.59)$$

✓ Chaque nœud de la quatrième couche est un nœud représenté par un carré. Dans le cas général, la fonction nodale est définie comme suit:

$$O_{4i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (3.60)$$

Les paramètres de cette couche sont appelés paramètres conséquences.

✓ La couche de sortie contient un seul neurone, qui est représenté par un cercle noté Σ qui calcule la sortie globale comme addition de tous les signaux entrants, pondérée par les fonctions conséquences (f_1 et f_2), c'est-à-dire :

$$O_5 = \sum_i \bar{w}_i f_i \quad (3.61)$$

3.2.2.3.2 Algorithme d'apprentissage d'ANFIS

Le but de l'algorithme d'apprentissage est d'apprendre ou de régler tous les paramètres modifiables à partir des données d'apprentissage entrée-sortie, de telle sorte que l'ANFIS soit capable de faire des inférences à partir de nouveaux ensembles d'entrées. Ainsi, le système ANFIS applique le mécanisme d'apprentissage des réseaux de neurones sur des techniques d'inférence floues, dans lequel les paramètres des fonctions d'appartenances (prémisse) et ceux de la conclusion, sont ajustés à l'aide des algorithmes bien adaptés pour cette technique. Cependant, la méthode fréquemment utilisée dans de nombreuses recherches est l'algorithme d'apprentissage hybride permettant une identification rapide des paramètres ANFIS.

C'est un système d'inférence floue dont les paramètres des fonctions d'appartenances sont ajustés en utilisant l'algorithme d'apprentissage rétro- propagation, ou en combinaison avec un autre type d'algorithmes comme le moindre carré. D'après l'architecture de type proposée (Fig. 3.6), il est noté que, la sortie globale peut être exprimée sous forme de combinaisons linéaires des paramètres conséquences (p_i, q_i, r_i). En posons r comme nombre de règles d'ANFIS et $1 \leq i \leq r$, le résultat f de la figure peut s'écrire comme suit:

$$f = \sum_{i=1}^{i=r} (\bar{w}_i x) p_i + (\bar{w}_i y) q_i + (\bar{w}_i) r_i \quad (3.62)$$

Dans l'architecture ANFIS, la première couche et la quatrième couche contiennent les paramètres pouvant être modifiés au fil du temps. La première couche, contient un paramètre non linéaire (fonctions d'activations), tandis que la quatrième couche contient des paramètres conséquents linéaires. Pour mettre à jour ces deux paramètres, il a fallu une méthode d'apprentissage capable de les entraîner et de les adapter à son environnement. Nous pouvons utiliser un algorithme hybride proposé par J.S.R. Jang [138] afin d'entraîner ces paramètres. Le signal effectue un cycle d'apprentissage de deux passages. Lors du passage en avant, les signaux avancent jusqu'à la couche 4 et les paramètres conséquents sont identifiés par l'utilisation des moindres carrés alors que les paramètres de prémisse sont fixés. Lors du passage en arrière, les erreurs se propagent en arrière et les paramètres prémisse sont mis à jour par la méthode de descente du gradient alors que les paramètres conséquences restent fixes. Le Tableau 3.4, résume les activités de chaque passage.

Tableau 3.4 : les méthodes d'apprentissage pour l'ANFIS [138].

Méthode d'apprentissage Paramètre	Passage vers l'avant	Passage en arrière
Paramètres des fonctions d'appartenances ou prémisses (a_i, b_i, c_i, \dots)	Fixe	Rétro propagation (Gradient décente)
Paramètres conséquents (p_i, q_i, r_i),	Moindres carrés	Fixe
Signal	Signal nodal	propagation des erreurs

3.2.3 Les processus stochastiques

On définit un processus stochastique comme étant un phénomène aléatoire dépendant du temps, issu des études probabiliste où chaque résultat possible (ou épreuve) est mesuré par un nombre, ce qui conduit à la notion de variable aléatoire. Ainsi, un processus stochastique ou

processus aléatoire représente une évolution, à temps discret ou à temps continu, d'une variable aléatoire. On le définit comme une famille de variables $\{X(t)\}_{t \in T}$ associées à toutes les valeurs du temps t appartenant à un ensemble T . L'ensemble des observations disponibles $x(t)$ constitue une réalisation du processus. Les situations réelles pouvant être modélisées par des processus stochastiques sont nombreuses. A savoir, le problème de la ruine des joueurs, problème de l'extinction d'une population, files d'attente, séries temporelles ou chronologiques, processus de Markov,...

Le processus stochastique que nous définissons dans cette section est la série chronologique qui est une succession d'observations $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ au cours du temps et indexées par le temps. L'indice temps peut être selon les cas la minute, l'heure, le jour, l'année etc....

Une règle générale en stochastique consiste à commencer par regarder ses données, avant d'effectuer le moindre calcul. En abscisse le temps, en ordonnée la valeur de l'observation à chaque instant $(x_i, 1 \leq i \leq n, n$ est la longueur de la série temporelle). Dans un premier temps, l'examen graphique d'une série à étudier permet de dégager, lorsqu'on envisage une période de temps suffisamment longue, un certain nombre de composantes fondamentales de l'évolution de la grandeur étudiée, que nous avons résumé dans les sous chapitres suivants :

3.2.3.1 Les formules de la composante périodique et de la tendance

La tendance, représente l'évolution régulière à long terme de la série (linéaire, exponentielle, etc...). Elle peut s'écrire, à une erreur d'ajustement près, e_t , comme une combinaison linéaire de m fonctions du temps, choisies a priori (par exemple fonction puissance, exponentielle, logarithmique...) (Eq. (3.63))

$$X_t = \sum_{j=1}^m f_j(t) + e_t \quad (3.63)$$

On parle de tendance linéaire lorsque la série X_t se décompose à une erreur d'ajustement près e_t en :

$$X_t = a_1 t + a_2 + e_t \quad (3.64)$$

On dit qu'une série temporelle a une tendance polynomiale lorsqu'on a :

$$X_t = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_1 t + a_0 + e_t \quad (3.65)$$

On parle de la composante périodique lorsque la série $(s_t)_{1 \leq t \leq n}$ peut se décomposer en :

$$X_t = S_t + e_t \quad (3.66)$$

Où S_t est périodique (ou saisonnière), c'est à dire $S_{t+T} = S_t$, avec T la période.

3.2.3.2 Le modèle additif

Les trois composantes, saisonnières (ou périodiques), tendance et résidu peuvent se décomposer sous la forme combinée :

$$Y_t = X_t + S_t + e_t \quad (3.67)$$

3.2.3.3 Le modèle multiplicatif

La variable Y_t s'écrit au terme d'erreur près comme le produit de la tendance et d'une composante de la saisonnalité :

$$Y_t = X_t(1 + S_t)(1 + e_t) \quad (3.68)$$

3.2.3.4 Les caractéristiques des séries temporelles

✓ Indices de tendance centrale : Ce sont, classiquement, la moyenne et la médiane, dont les expressions sont définies comme suit :

$$\mu_n = E(Y_t) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t \quad (3.69)$$

$$\begin{cases} m_n = E\left(Y_{\frac{n}{2}+1}, Y_{\frac{n}{2}}\right) & \text{si } n \text{ est pair} \\ m_n = Y_{\frac{n+1}{2}} & \text{si } n \text{ est impair} \end{cases} \quad (3.70)$$

✓ Indices de dispersion : Généralement, nous utilisons comme indices de dispersion, la variance, l'écart type et la covariance.

$$Var(Y_t) = E[(Y_t - \mu_n)^2] = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \mu_n)^2 \quad (3.71)$$

$$\sigma_n = \sqrt{E[(Y_t - \mu_n)^2]} \quad (3.72)$$

$$Cov(Y_t, Z_t) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - E(Y_t)) \times (z_t - E(Z_t)) \quad (3.73)$$

✓ Indice de dépendance : Ces notions, plus spécifiques à l'étude de série temporelle, renseignent sur la dépendance entre les données Y_t ou avec d'autres variables Z_t . Il s'agit de la fonction simple corrélation (Corr), des fonctions d'auto-covariance (γ_k), d'auto-corrélation (ACF) et d'auto-corrélation partielle (PACF) d'ordre k.

$$\text{Corr}(Y_t, Z_t) = \frac{\text{Cov}(Y_t, Z_t)}{\sqrt{E(Y_t^2) \times E(Z_t^2)}} \quad (3.74)$$

$$\gamma_k = \text{Cov}(Y_t, Y_{t-k}) = E[(Y_t - \mu_n)(Y_{t-k} - \mu_n)] \quad (3.75)$$

$$\text{ACF}(Y_t, Y_{t-k}) = \frac{\gamma_k}{\sqrt{E(Y_t^2) \times E(Y_{t-k}^2)}} \quad (3.76)$$

$$\text{PACF}(Y_t, Y_{t-k}) = \frac{\text{Cov}(Y_t - Y'_t, Y_{t-k} - Y'_{t-k})}{\sqrt{\text{Var}(Y_t - Y'_t) \times E(Y_{t-k} - Y'_{t-k})}} \quad (3.77)$$

$$Y'_t = \sum_{j=1}^k a_j Y_{t-j} \quad (3.78)$$

$$Y'_{t-k} = \sum_{j=1}^{k-1} a_{k-j} Y_{t-j} \quad (3.79)$$

✓ Processus stationnaire : Un processus est dit stationnaire, si ses propriétés statistiques caractérisées par des espérances mathématiques sont indépendantes du temps. C'est-à-dire que ses fonctions, moyenne et covariance sont constantes et ne dépendent que de la longueur de la période qui les sépare.

$$E[Y_t] = \mu_n \quad (3.80)$$

$$\text{Cov}(Y_t, Y_s) = \text{Cov}(Y_{t+k}, Y_{s+k}); \forall t, s, k \in \mathbb{Z}^3 \quad (3.81)$$

✓ Bruit blanc: On dira que le processus e_t est un bruit blanc s'il forme une suite de variables indépendantes et identiquement distribuées (*iid*). Nous écrivons alors :

$$E[e_t] = 0 \quad (3.82)$$

$$\text{Cov}(e_t, e_s) = 0 \quad (3.83)$$

$$\text{Var}(e_t) = \text{constante} \quad (3.84)$$

3.2.3.5 Les modèles aléatoires des séries temporelles

3.2.3.5.1 Présentation des modèles

Pour étudier les processus aléatoires (et donc les séries chronologiques), on définit des opérateurs retard B et de différenciation Δ . L'opérateur B décale le processus d'une unité de temps vers le passé, alors que L'opérateur Δ fait la différence entre le processus et sa version décalée d'une unité de temps. Ces opérateurs se construisent de la façon suivante (Eqs. (3.85) et (3.86)):

$$B(Y_t) = Y_{t-1} \quad (3.85)$$

$$\Delta(Y_t) = Y_t - Y_{t-1} = Y_t - B(Y_t) \quad (3.86)$$

Dans ce paragraphe, nous entamons brièvement quelques modèles aléatoires des séries temporelles, à savoir, les processus Autorégressifs (AR), les processus à moyennes mobiles (MA) ainsi que les processus ARMA et ARIMA, puis une description concernant la prévision est entamée.

3.2.3.5.2 Modèle autorégressif (AR(p))

Un processus autorégressif est un modèle de régression pour séries temporelles dans lequel la série est expliquée par ses valeurs passées plutôt que par d'autres variables. En d'autres termes, c'est un processus où l'on écrit une observation au temps t comme une combinaison linéaire des observations passées plus un certain bruit blanc (résidu). Son expression mathématique est donnée, comme suit [142]

$$Y_t = \sum_{j=1}^p \varphi_j Y_{t-j} + e_t \Leftrightarrow e_t = \Phi(B) Y_t \quad (3.86)$$

Où $\{e_t\}$ est un bruit blanc de variance constante, $\{\varphi_j\}$ est l'ensemble des paramètres du modèle. Φ est le polynôme de degré p dont les coefficients sont $(1, -\varphi_1, -\varphi_2, \dots, -\varphi_p)$, nommé opérateur des retards.

Avec

$$\Phi(B) = 1 - \sum_{j=1}^p \varphi_j B^j \quad (3.87)$$

3.2.3.5.3 Modèle moyenne mobile (MA(q))

On dit que la suite $\{Y_t\}_{t>0}$ est un processus à moyenne mobile d'ordre q ($q > 0$) si celui-ci peut s'écrire sous la forme suivante [143]:

$$Y_t = \sum_{j=0}^q \theta_j e_{t-j} \Leftrightarrow Y_t = \Theta(B) e_t \quad (3.88)$$

$$\Phi(B) = 1 - \sum_{j=1}^q \theta_j B^j \quad (3.89)$$

3.2.3.5.4 Modèle Autorégressif moyenne mobile (ARMA (p, q))

On appelle processus ARMA (p, q) un processus stationnaire Y_t vérifiant la relation de récurrence :

$$Y_t = \sum_{j=1}^p \varphi_j Y_{t-j} + \sum_{j=0}^q \theta_j e_{t-j} \Leftrightarrow \Theta(B)e_t = \Phi(B)Y_t \quad (3.90)$$

3.2.3.5.5 Modèle autorégressif intégré moyenne mobile (ARIMA (p, d, q))

On appelle processus ARIMA (p,d,q) un processus non stationnaire Y_t pour lequel le processus différencié d'ordre d, $Z_t = (1 - B)^d Y_t$, $t \in Z$ est stationnaire, et vérifie une relation de récurrence suivante (Eq. (3-89)) :

$$Z_t = \Phi(B)(1 - B)Y_t = \Theta(B)e_t \quad (3.91)$$

3.2.3.5.6 Cas de la prévision

L'un des objectifs principaux de l'étude d'une série chronologique est la prévision des valeurs futures de cette série. Pour cela, on a besoin de connaître ou de modéliser le mécanisme de production de la série chronologique, en particulier la détermination des paramètres canoniques et donc les prévisions optimales \hat{Y}_t d'un processus Y_t . Nous s'intéressons ici à la prévision du modèle AR (p) et du processus ARMA (p,q) qui sont bien adaptés aux problèmes de prévisions.

3.2.3.5.6.1 Prévision des processus AR

Soit un AR(p) le processus Y_t , de bruit blanc e_t , de polynômes canoniques, $1 - \sum_{j=1}^p \varphi_j B^j$. Les prévisions optimales $\hat{Y}_{t+p}(h)$ (avec, h est l'écart de prévision ou horizon, $h > 0$) sont des combinaisons linéaires de $Y_t, Y_{t-1}, \dots, Y_{t-p+1}$:

$$\hat{Y}_t(h) = \sum_{0 \leq i \leq p-1} a_i(h) Y_{t-i} \quad (3.92)$$

Qui s'obtient par récurrence, selon :

$$\hat{Y}_t(h) = \sum_{1 \leq k \leq p} \varphi_k \hat{Y}_t(h - k) \quad (3.93)$$

Avec les conditions initiales :

$$\hat{Y}_t(-i) = Y_{t-1} \quad (3.92)$$

3.2.3.5.6.2 Prévision des processus ARMA

Supposons que l'on dispose d'un grand nombre d'observations consécutives de Y_t jusqu'à l'instant T. Une fois le modèle choisi et ses paramètres estimés, il va être possible de faire de la prévision. Les combinaisons linéaires s'expriment comme :

$$\widehat{Y}_T(h) = \sum_{j \geq 0} \alpha_j(h) Y_{T-j} \quad (3.94)$$

Les prévisions s'expriment par récurrence, selon :

$$\widehat{Y}_T(h) = - \sum_{j \geq 1} \pi_j \widehat{Y}_T(h-j) \quad (3.95)$$

Où :

$$\frac{\Phi(B)}{\Theta(B)} Y_t = \sum_{i \in \mathbb{Z}} \pi_i Y_{t-i} \quad (3.96)$$

Avec les conditions initiales pour $t \leq T$:

$$\widehat{Y}_t(i-T) = Y_t \quad (3.97)$$

3.2.3.5.6.3 Approche Box et Jenkins

Box and Jenkins (1976) ont développé une méthodologie consistant à modéliser les séries temporelles uni-variées au moyen des processus ARMA. Ces processus sont parcimonieux et constituent une bonne approximation de processus plus généraux pourvu que l'on se restreigne au cadre linéaire. De ce fait, l'objet de cette méthodologie est de modéliser une série temporelle en fonction de ses valeurs passées et présentes afin de déterminer le processus ARMA ou ARIMA adéquat.

La méthodologie de Box et Jenkins comporte essentiellement les étapes suivantes :

- Transformation des données afin de stabiliser la variance et différentiation des données pour les rendre stationnaires.
- Visualisation des ACF et des PACF empiriques pour identifier les ordres p et q.
- Estimation des paramètres des modèles sélectionnés.
- Diagnostique et tests d'adéquation du modèle retenu, en comparant les modèles par des critères, tels que Aitken Information Criterion (AIC), Bayesian Information Criterion (BIC).
- La prévision des valeurs futures à travers le modèle retenu.

3.3 CONCLUSION

Ce chapitre présente des approches différentes présentant des méthodes de modélisations permettant d'estimer la quantité de rayonnement solaire arrivant au sol. Les méthodes exploitent les progrès réalisés dans le développement des modèles plus ou moins performants pour la prédiction et la prévision des composantes énergétiques du rayonnement solaire (global, diffus et directe). Plusieurs modèles empiriques ont été brièvement présentés soit pour le calcul des rayonnements global et diffus reçus sur un plan horizontal (modèles de régressions) à partir de la fraction d'ensoleillement, la température, l'humidité relative, la vitesse du vent, la déclinaison solaire et d'autres paramètres météorologiques, soit pour l'estimation de ces composantes par rapport à un plan incliné à partir des composantes mesurées sur un plan horizontal en utilisant les facteurs de conversions.

Les sujets qui commencent récemment à faire l'objet de recherches approfondies et ont toujours un potentiel de recherche énorme sont des techniques intelligentes, telles que les réseaux de neurones artificiels, la logique floue, les systèmes d'inférences floues adaptatifs. D'autres méthodes statistiques qui sont présentes dans de nombreux domaines d'application et qui permettent la modélisation de l'évolution dans le temps du rayonnement solaire sont présentées dans ce chapitre, à savoir les processus AR (p), MA (q), ARMA (p,q) et ARIMA (p,d,q).

Cependant, d'autres modèles empiriques pour le calcul de l'éclairement solaire direct reçu sur un plan normal (DNI) peuvent être envisagés. Ces modèles basés sur la physique atmosphérique et astronomiques, s'appuient dans une certaine mesure sur la physique de l'interaction de l'éclairement énergétique et des constituants de l'atmosphère (traitée plus en détail au chapitre 4 sur la prédiction du DNI).

Chapitre 4

Prédiction du DNI en Algérie : cas des modèles hybrides

4.1 INTRODUCTION

Le rayonnement solaire est l'une des sources d'énergie durable les plus importantes. Il peut être transformé en chaleur ou en courant électrique. La conversion du rayonnement solaire est actuellement adoptée par de nombreuses applications dans différents domaines, telles que la construction solaire, le chauffage solaire, les pompes à chaleur, la climatisation, l'agriculture, etc. Cependant, le monde se concentre sur l'utilisation de sources renouvelables, en particulier le potentiel solaire, car il est gratuit, écologique et abondant. Dans cette optique, de nombreux pays ont adopté des perspectives différentes dans des programmes à court et à long terme pour développer et promouvoir l'énergie solaire. D'autre part, afin de mieux exploiter cette ressource, il est impératif d'estimer le rayonnement solaire autant du point de vue quantitatif que qualitatif, en particulier, par des études fiables des composantes énergétiques du rayonnement solaire, et ce, par l'évaluation de l'éclairement direct, diffus et global en utilisant des modèles sophistiqués qui ont été validés par des chercheurs du monde entier.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la prédiction de l'éclairement direct en incidence normale (DNI), qui est principalement utilisé à la fois dans la technologie CSP et dans les systèmes photovoltaïques à concentration (CPV ou HCPV) [144-151]. Nous avons étudié des modèles empiriques qui calculent, dans des conditions d'atmosphères sans nuages, le DNI reçu sur un plan horizontal, en faisant une étude comparative entre la simulation numérique de ces modèles et les données mesurées à l'aide de deux stations radiométriques situées dans deux sites de l'Algérie, à savoir le site de Bouzareah (Alger) et le site de l'URAER (Ghardaïa), où nous avons sélectionné 11 et 22 journées totalement claires, respectivement. Ces sites sont situés, respectivement au nord et au sud de l'Algérie. Les deux régions ont un important potentiel solaire, les irradiations solaires globales et directes cumulées annuellement se situant entre 1800 - 1850 kWh / m² et 2000 - 2100 kWh / m² pour Alger, 2100 - 2200 kWh / m², 2000 - 2100 kWh / m² et 2000 - 2100 kWh/m² à Ghardaïa. En termes d'éclairement énergétique, les maximums journaliers des éclairements direct et global sont comprises entre, 850 W / m² et 1000 W / m² pour Alger et 950 W / m² et 1100 W / m² pour Ghardaïa.

Par ailleurs, les mesures du DNI ont été effectuées par des capteurs pyréliométriques DR01 et Kipp & Zonen dont l'erreur de calibration est généralement inférieure à 2% [58]. De plus, la pression, la température et l'humidité relative ont été mesurées à l'aide d'un manomètre et d'un thermo-hygromètre.

Toutes les mesures ont été effectuées avec un intervalle de 5 min pour Alger et 10 min pour le site de Ghardaïa. Les paramètres non disponibles sont évalués selon des formules empiriques, telles que l'épaisseur de la vapeur d'eau, le trouble d'Angstrom, l'épaisseur de l'ozone et le facteur de turbidité de Linke. Ces paramètres sont présentés dans la section suivante :

4.2 LES MODELES ATMOSPHERIQUES ET METEOROLOGIQUES

Tout au long de cette section, les paramètres astronomiques et météorologiques utilisés sont brièvement décrits. Ils sont utilisés comme entrées dans les modèles empiriques que nous avons décrits dans la section 4.3. Il s'agit, des facteurs de turbidité de Linke T_L (sans dimension), coefficient de turbidité d'Angstrom β (sans dimension), l'épaisseur de la vapeur d'eau dans l'atmosphère w (en cm), l'épaisseur de la couche d'ozone l_{oz} (en atm-cm), l'angle d'élévation du soleil h (en degrés), la constante solaire I_{oc} (en W/m²), la déclinaison solaire (en degré), et l'angle horaire (en heure) et qui sont calculés empiriquement ou géométriquement (voir le chapitre 2). Par ailleurs, d'autres facteurs, sont enregistrés par les stations de mesures, tels que l'humidité relative et la température de l'air.

4.2.1 Les coefficients de turbidité de Linke et d'Angstrom

Le facteur de turbidité de Linke [152], sert à comparer une atmosphère idéales (sans aérosols ni nuage) à une atmosphère réelle, décrit par S. Benkacali et Gairaa [153]. En d'autres termes, l'atténuation du rayonnement solaire est causée par la diffusion de Rayleigh, l'absorption par la vapeur d'eau et l'ozone, la diffusion et l'absorption par les aérosols atmosphériques [154-157]. L'expression mathématique du facteur de turbidité de Linke peut être exprimé en fonction de l'éclairement solaire extraterrestre, de l'éclairement normale directe, de la masse d'air corrigée en altitude (M_a) ou masse atmosphérique, de l'épaisseur optique totale de Rayleigh (δ_R) qui est due à la diffusion des gaz atmosphériques (O₂, CO₂, H₂O, etc.) et à l'absorption par l'ozone, comme suit [158-164]:

$$T_L = \frac{1}{\delta_R M_a} \log \frac{I_o}{DNI} \quad (4.1)$$

Avec :

$$M_a = M_r \frac{p}{1013.25} \quad (4.2)$$

$$\delta_R = (6.5567 + 1.7513M_a - 0.1202M_a^2 + 0.0065M_a^3 - 0.00013M_a^4)^{-1} \quad (4.3)$$

$$M_r = \frac{1}{\sinh + 0.5052 (6.07995 + h)^{-1.6354}} \quad (4.4)$$

M_r , p , et h sont la masse atmosphérique relative [38], la pression atmosphérique mesurée (en mbar), et la hauteur du soleil, ou angle d'élevation solaire (voir le chapitre 2).

Un autre facteur de turbidité important affectant le DNI est la turbidité d'Angstrom (β). Il définit la quantité d'aérosols atmosphériques, qui est défini par la formule d'Angstrom [60,165,166]. La détermination expérimentale du facteur de turbidité nécessite des mesures spectrales du DNI pour deux longueurs d'onde en utilisant des photomètres spectraux solaire [38]. Cependant, les systèmes de mesure n'étant pas disponibles, alors, nous avons recours aux résultats d'évaluations qui peuvent être obtenus avec le facteur de turbidité de Linke en fonction de la vapeur d'eau et du facteur de turbidité d'Angström, tels qu'adoptés dans les réfs. [167-170]. Pour notre cas, les valeurs du coefficient d'Angström peuvent être obtenus, en combinant l'Eq. (4.1) avec l'équation ci-dessous (Eq. (4.5)), comme cela a été décrit par Gueymard [171].

$$T_L = 0.8662 \times [(1.8494 + 0.2425 w - 0.0203 w^2) + (15.427 + 0.3153 w - 0.0254 w^2)\beta] \quad (4.5)$$

4.2.2 Epaisseur optique corrigée de la vapeur d'eau

L'épaisseur optique corrigée de la vapeur d'eau (U_{vp}), est définie comme étant le produit de l'épaisseur de la vapeur d'eau (non corrigée) par la masse d'air relative (sans faire intervenir la pression atmosphérique) (M_r) [38], comme suit :

$$U_{vp} = w \times M_r \quad (4.6)$$

Cependant, l'épaisseur de la vapeur d'eau est calculée à partir de l'humidité relative (η , en %), de la température de l'air (t , en °C), de la pression atmosphérique (p , en mbar) mesurées, ainsi que de la température de rosée calculée (t_d , en °C) [172]. Le dernier paramètre est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau en suspension dans l'air est condensée pour former des gouttelettes d'eau [173]. Ces deux paramètres peuvent être évalués par les expressions suivantes:

$$w = 0.1 \left(\frac{100p}{1013.25} \right)^{3/4} \sqrt{\frac{273}{t + 273}} \exp(2.2573 + 0.054t_d) \quad (4.7)$$

$$t_d = \left(t - \frac{100 - \eta}{5} \right) \left(\frac{t + 273}{300} \right)^2 - 0.00135(\eta - 84)^2 + 0.35 \quad (4.8)$$

4.2.3 Epaisseur optique corrigée de l'ozone

La longueur du chemin optique relatif de l'ozone est définie à partir de l'épaisseur verticale de la couche d'ozone (l_{oz} , en atm-cm) et de la masse atmosphérique relative [38,174].

$$U_{oz} = l_{oz} \times M_r \quad (4.9)$$

Quel que soit le lieu situé au nord du globe terrestre, l'épaisseur verticale l_{oz} peut être obtenue à l'aide de la formule suivante [175] :

$$l_{oz} = \frac{1}{1000} \left\{ 235 + \left[150 + 40 \sin(0.9856 (n_j - 30)) + 20 \sin(3(\lambda + 20)) \right] \sin^2 1.28 \varphi \right\} \quad (4.10)$$

Où : λ , φ , n_j sont la longitude, la latitude du lieu et le numéro du jour dans l'année.

4.3 LES MODELES DE PREDICTIONS DU DNI

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 2, le rayonnement solaire est atténué lors de son passage dans l'atmosphère, comme cela a été décrit par Iqbal et Goody & Young [38,176]. Les principaux processus d'extinction sont la diffusion de Rayleigh, l'absorption par l'ozone, l'oxyde d'azote, la vapeur d'eau et le dioxyde de soufre, ainsi que l'absorption et la diffusion par les aérosols (la diffusion de Mie). D'autres molécules contenues dans l'atmosphère peuvent être aussi responsables de l'absorption de l'éclairement solaire dans les régions spectrales UV et VIS [177]. D'autre part, nous avons vu que le paramètre utilisé pour quantifier l'atténuation du rayonnement solaire est connu sous le nom de transmittance atmosphérique (chapitre 2). La transmittance à travers l'atmosphère est définie comme le rapport entre l'éclairement transmis et celui incident. Ce paramètre est fondamentalement important dans la conception et la mise en œuvre d'installations solaire à grande échelle et aussi dans la mise en œuvre des modèles ciel clair, notamment pour la prédiction du rayonnement direct (DNI), dont fait l'objet ce chapitre.

Par ailleurs, pour la quantification du rayonnement solaire, trois techniques permettent de calculer son intensité: au moyen d'instruments au sol; avec des images satellites, et à l'aide de modèles d'éclairement physiques et empiriques; ainsi que des combinaisons de ceux-ci (modèles hybrides). Bien que l'utilisation d'instruments est une technique fiable, mais cela, nécessite l'installation d'équipements pour enregistrer des mesures couvrant de vastes zones et de longues périodes de temps, ceux-ci est très fastidieux et très chère [178, 179].

Récemment, de nombreux travaux correspondant à des estimations des composantes du rayonnement solaire par des modèles ciel clair, notamment lorsque ces modèles sont fournis avec des entrées atmosphériques précises, principalement la profondeur optique des aérosols

et le coefficient d'Angstrom. Par exemple, Gueymard [171] a étudié 18 modèles à large bande par ciel clair. Ces modèles ont été évalués et comparés aux ensembles de données de cinq sites sous différents climats. Il a montré que parmi les modèles testés, un modèle qui offre la meilleure performance, est celui de REST2. D'autre part, 21 modèles permettant de prédire le DNI à ciel dégagé ont été évalués par Gueymard [180], en utilisant plusieurs valeurs de transmittance et d'éclairement énergétique fournies par le code SMARTS [181-183]. Il a été prouvé que le modèle de transmittance multicouche pondéré (MLWT2) développé par Gueymard [184-186], fourni la meilleure précision.

Engerer et Mills [187] ont testé onze modèles de ciel dégagé en utilisant les données collectées sur 20 sites en Australie. Ils ont montré que pour l'éclairement globale, les modèles Solis [188], ESRA [167] et REST2 [189] fonctionnent mieux, alors que les modèles Iqbal, ESRA et REST2 sont plus performants pour l'estimation du DNI. Ineichen [190] a utilisé trois tests statistiques, tels que l'erreur MBE (moyenne), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart type (SD), pour évaluer la performance de trois composantes de rayonnement (diffus, direct et global) à partir de huit modèles ciel clair. Ils ont conclu que les modèles, Solis, Molineaux [191] et ESRA présentaient les meilleures performances. Davis et McKay [192] ont évalué la performance de deux modèles à large bande, notamment une version du modèle MAC utilisant les informations relatives au nuage et le modèle d'ensoleillement de Rietveld. En utilisant les données de six stations canadiennes, ils ont montré que le modèle de Rietveld offre une précision inférieure à celle du modèle MAC.

Younes et Muneer [193] ont employé des données horaires, mesurées sur six sites en Espagne, en Inde et au Royaume-Uni. Suite à l'interprétation des résultats obtenus, ils ont prouvé que les modèles MRM, REST2 et Yang (dans l'ordre de performance) possèdent les meilleures performances statistiques. Badescu et al. [194], ont estimé le rayonnement solaire global, avec 54 modèles, sur deux mesures de site roumaines. Ils ont conclu que les modèles Ineichen-Perez [195], ESRA, REST2 et METSTAT [196] donnent les meilleurs résultats.

Le présent chapitre traite de la performance de dix-huit modèles de paramétrage dans l'estimation du DNI par temps de ciel dégagé, sur la base des paramètres d'entrée mesurés et calculés, tels que l'angle d'élévation solaire, la pression locale, la vapeur d'eau, la température, les coefficients de transmittance, ainsi que les facteurs de turbidité atmosphérique. Les mesures ont été effectuées à l'aide de deux stations radiométriques, installées au centre de développement des énergies renouvelables (Alger) et à l'unité de recherche appliquée aux énergies renouvelables (Ghardaïa). Ensuite, la précision des modèles obtenus a été évaluée graphiquement et statistiquement par rapport aux mesures, Ces modèles sont classés en deux

groupes: les modèles simples et les modèles complexes. Les modèles simples ne sont basés que sur des entrées astronomiques, à savoir l'irradiation extraterrestre, l'élévation du soleil et les autres paramètres mesurés (c'est-à-dire la température, l'humidité relative et la pression locale). Alors que les modèles complexes, sont aussi basés sur les coefficients de turbidité atmosphériques et les facteurs de transmittances.

4.3.1 Le modèle Ashrae

Le modèle Ashrae (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) est un modèle simple qui est largement utilisé par la communauté des chercheurs afin d'évaluer les gains de chaleur solaire et les charges de refroidissement dans les bâtiments. Ce modèle peut être testé dans le but de modéliser les composants solaires (c'est-à-dire directs, diffus et globaux) par temps clair. Il a été développé par Stephenson [197,198] et également décrit dans d'autres travaux [58,199]. Pour prédire le DNI, le modèle est présenté, comme suit:

$$DNI = A \cdot \sin h \cdot \exp\left(-\frac{B}{\sin h}\right) \quad (4.11)$$

Où A, le rayonnement apparent extraterrestre sans masse atmosphérique [38]. B est la valeur large bande du coefficient d'extinction atmosphérique [38,200].

4.3.2 Le modèle de Kumar

C'est aussi un modèle simple, qui ne peut être déduit que par deux paramètres d'entrées [201], et qui est examiné par divers hauteurs [171,202]. Basé sur la loi de Bouger, le modèle de Kumar s'écrit par l'équation empirique (Eq. (4.12)), par rapport à la masse d'air M_a (Eq. (4.2)) et au rayonnement solaire extraterrestre ou constante solaire I_{0n} (Eq. (2.4)):

$$DNI = 0.56 I_{0n} \sin h [\exp(-0.65 M_a) + \exp(-0.095 M_a)] \quad (4.12)$$

4.3.3 Le modèle Daneshyar-Paltridge-Proctor (DPP)

Basé uniquement sur l'angle d'élévation solaire (h), ce modèle a été développé à l'origine par Paltridge et Proctor et corrigé par Daneshyar [203,204]. Il a été examiné par V. Badescu [205] et également testé dans des travaux scientifiques [206,207]. Ainsi, pour des conditions de ciel dégagé, le modèle DNI s'exprime par:

$$DNI = 950 \sin h [1 - \exp(-0.075h)] \quad (4.13)$$

4.3.4 Le modèle Meinel

C'est aussi un modèle simple qui a été développé par Meinel (1976) [208], dans des conditions sans nuages en utilisant les données solaires collectées dans le désert de Mojave, en Californie. Le modèle a été étudié dans la publication [202]. Il est donné en fonction d'altitude locale (en km) et de la hauteur du soleil (en degré angulaire).

$$DNI = I_{on} \sin h [0.14z + (1 - 0.14z) \exp(-0.357 (\sin h)^{-0.678})] \quad (4.14)$$

4.3.5 Le modèle Majumdar

Basé sur la loi de Beer, Majumdar (1972) [209] a développé, pour des conditions atmosphériques de faible turbidité, l'objectif est d'estimer le DNI en utilisant trois paramètres météorologiques, tels que la pression locale (en mbar), la masse d'air relative (Mr) et l'épaisseur de la vapeur d'eau (en cm). Le modèle a été testé par quelques hauteurs [202,210]. Ainsi, l'équation peut être écrite sous la forme:

$$DNI = I_{on} \sin h \left(0.8644 \frac{pMr}{1000} \cdot 0.8507^{(wMr)^{0.25}} \right) \quad (4.15)$$

4.3.6 Le modèle Dogniaux

Pour prédire le DNI, trois paramètres météorologiques ont été introduits dans le modèle de Dogniaux [211,212], à savoir, le facteur de turbidité de Linke (Eqs. (4.1) et (4.5)), la masse d'air relative et un paramètre appelé profondeur optique de l'atmosphère propre et sèche, τ_c (Eq. (4.17)). Ce modèle a été étudié dans plusieurs travaux [180,213]. C'est un modèle complexe, dont l'expression est :

$$DNI = I_{on} \sin h \exp(-M_r \tau_c T_L) \quad (4.16)$$

Avec :

$$\tau_c = 0.124 - 0.0285 \log M_a \quad (4.17)$$

4.3.7 Le modèle Ineichen-Perez

Il s'agit d'un modèle pour un ciel clair développé par Ineichen et Perez (2002) [154] pour le rayonnement direct qui repose sur l'approche adoptée par le premier modèle initial d'Ineichen [214], et qui est étudié par certains auteurs [187,202,210]. Cependant, la nouvelles formule inclus le coefficient d'ajustement empirique (b) qui dépend de l'altitude (en mètres), la masse d'air et le coefficient de turbidité de Linke, qui sont conçus comme paramètres d'entrée. Alors le DNI est exprimé sous la forme:

$$DNI = b I_{on} \sin h \exp(-0.09 M_a(T_L - 1)) \quad (4.18)$$

Où :

$$b = 0.664 + [0.163 \cdot \exp(+z/8000)] \quad (4.19)$$

4.3.8 Le modèle ESRA

Ce modèle a été développé dans le cadre du nouvel Atlas européen de la radiation solaire [215,216], et est présenté par R. Rigollier (2000) [27] et étudié par V. Badescu (2012) [205]. Il est conçu pour un ciel clair, il est basé sur le facteur de turbidité de Linke pour une masse d'air, est égale à 2, T_{L2} [171, 217, 218], et la profondeur optique de Rayleigh δ_R (Eq. (4.3)) comme des coefficients essentiels pour la prédiction du DNI.

$$DNI = I_{on} \sin h \exp(-0.8662 M_a(T_{L2} \delta_R)) \quad (4.20)$$

Avec :

$$T_{L2} = \frac{T_L}{0.8662} \quad (4.21)$$

4.3.9 Le modèle Héliosat-1

Ce modèle a été développé dans le cadre du projet européen Héliosat. Il est dérivé de ressources de données satellitaires, telles que SoDa [219]. Certains chercheurs ont détaillé la méthodologie [171,220]. Pour un ciel clair, le DNI est estimé en fonction de la profondeur optique de Rayleigh (Eq. (4.3)), et du facteur de turbidité de Linke, comme suit.

$$DNI = I_{on} \sin h \exp(-M_a(T_L \delta_R)) \quad (4.22)$$

4.3.10 Le modèle EEC

Ce modèle de ciel clair a été développé à partir des efforts conjoints des participants des pays européens (membre des pays économiques européens). Il est basé sur la formule utilisant le facteur de turbidité de Linke et la masse d'air relative (M_r), examiné dans le travail de C.A. Gueymard (1993) [221]. Il s'écrit de la façon suivante:

$$DNI = I_{on} \sin h \exp\left(-M_r \frac{T_L}{0.9M_r + 9.1}\right) \quad (4.23)$$

4.3.11 Le modèle Perrin de Brichambaut

Le modèle développé par Perrin de Brichambaut [222] est introduit par C.A. Gueymard (2003) [180]. Il prédit le DNI, qui est basé sur les expressions de transmittance et d'absorption intégrées (non spectrales) (voir le Chapitre 2, Eq. (2.77)), résultant de différents processus

d'atténuation du rayonnement solaire, telles que la diffusion de Rayleigh et des aérosols (τ_r , τ_{ae}), ainsi que l'absorption par l'ozone, la vapeur d'eau et les gaz atmosphériques (a_{oz} , a_{vp} , a_g). L'expression du DNI et les coefficients correspondants sont donnés, ci-dessous:

$$DNI = I_{on} \sin h \tau_r \cdot \tau_{ae} \cdot (1 - a_{oz} - a_{vp} - a_g) \quad (4.24)$$

Avec :

$$\tau_{ae} = \exp(-1.4327 M_r \beta) \quad (4.25)$$

$$\tau_r = \exp(-0.031411 - 0.064331 M_a) \quad (4.26)$$

$$a_{oz} = 0.015 + 0.024 M_r l_{oz} \quad (4.27)$$

$$a_{vp} = 0.1 + 0.03 \cdot \log(M_r w) + 0.002 \cdot (\log(M_r w))^2 \quad (4.28)$$

$$a_g = 0.013 - 0.064331 \log(M_r w) \quad (4.29)$$

Où, M_a , β , w et l_{oz} sont respectivement la masse optique, le coefficient de turbidité d'Angström, l'épaisseur de la vapeur d'eau et l'épaisseur verticale de la couche d'ozone (voir la section 4.2.1).

4.3.12 Le modèle Atwater

C'est un modèle complexe qui convient à toutes les conditions de ciel (ciel sans nuages ou nuageux). Il a été développé et publié dans plusieurs travaux, tels que [223,224], et est rapporté dans les travaux de Bird et Hulstrom [225,226]. Trois transmittances et un paramètre d'absorbance sont introduits en tant qu'entrées pour la prédiction du DNI, tels que τ_g , τ_r , τ_{ae} et a_{vp} . Ces paramètres sont appelés la transmittance après l'absorption de gaz permanents, la transmittance après diffusion de Rayleigh, la transmittance après la diffusion des aérosols et l'absorption due à la vapeur d'eau. Dans notre cas, le terme impliquant le ciel nuageux est omis, le coefficient d'Atwater et Ball est donc égal à 1 [224]. L'expression du DNI s'écrira alors:

$$DNI = I_{on} \sin h \cdot \tau_{ae} \cdot (\tau_g \tau_r - a_{vp}) \quad (4.30)$$

Les différents paramètres d'entrée sont calculés par:

$$\tau_{ae} = \exp(-k_a M_r) \quad (4.31)$$

$$\tau_{vp} = 0.077 \cdot \left(\frac{w}{M_a}\right)^{0.3} \quad (4.32)$$

$$\tau_g \tau_r = 1.041 - 0.15 \cdot \sqrt{\frac{0.00949 \cdot p + 0.051}{M_a}} \quad (4.33)$$

Le paramètre k_a est appelée épaisseur optique totale des aérosols. Il est défini à partir des épaisseurs optiques spectrales $k_{a,0.38}$ et $k_{a,0.5}$ aux longueurs d'on 0.38 et 0.5 μm (Eq. (2.44)), de la manière suivante [38, 180, 227]:

$$k_a = 0.2758k_{a,0.38} + 0.0.35k_{a,0.5} \quad (4.34)$$

A partir de l'Eq. (4-34) et la valeur de l'exposant α introduit dans le chapitre 2, ainsi que le coefficient d'Angstrom (β) (Eq. 4.5), l'expression précédente (Eq. (4.34)), devient:

$$k_a = 1.832 \beta \quad (4.35)$$

4.3.13 Le modèle MAC

Ce modèle a été suggéré par Davis et McKay [228,229]. Il est introduit dans plusieurs références [38,180,187,220,221]. Il est basé sur plusieurs coefficients de transmittances et d'absorptions, comme indiqué ci-dessous :

$$DNI = I_{on} \sin h (\tau_{oz} \cdot \tau_r - a_{vp}) \cdot \tau_{ae} \quad (4.36)$$

Avec :

$$a_{vp} = \frac{2.9U_{vp}}{(1 + 141.5U_{vp})^{0.635} + 5.925U_{vp}} \quad (4.37)$$

$$a_{oz} = 1 - \left[\frac{0.02118U_{oz}}{(1 + 0.042U_{oz} + 3.23 \times 10^{-4}U_{oz}^2)} + \frac{1.082U_{oz}}{(1 + 138.6U_{oz})^{0.805}} + \frac{0.0658U_{oz}}{1 + (103.6U_{oz})^3} \right] \quad (4.38)$$

$$\tau_{ae} = (0.1245 \alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.125 \alpha) \exp\{-\beta M_a (1.089 \alpha + 0.5123)\} \quad (4.39)$$

Où, M_a , α , β , U_{vp} et U_{oz} , sont donnés par les équations citées dans la section 4.2.1.

4.3.14 Le modèle de Bird et Hulström

C'est un modèle qui est basé sur le produit de cinq coefficients de transmittance, à savoir: la transmittance après absorption des gaz permanents (τ_g), la transmittance après diffusion Rayleigh (τ_r), la transmittance après absorption de la vapeur d'eau (τ_{vp}), la transmittance après la diffusion des aérosols, (τ_{ae}). Il a été examiné dans des travaux, comme [190,171,210,230].

Ce modèle a été proposé par Bird et Hulstrom [225,231] pour estimer le rayonnement solaire par temps clair. Son expression pour le DNI est la suivante :

$$DNI = 0.9662 I_{on} \sin h \tau_{oz} \tau_r \tau_g \tau_{vp} \tau_{ae} \quad (4.40)$$

Les transmittances sont exprimées, comme suit:

$$\tau_r = \exp[-0.0903 M_a^{0.84} (1.0 + M_a - M_a^{1.01})] \quad (4.41)$$

$$\tau_{oz} = 1 - [0.1611 U_{oz} (1.0 + 139.48 U_{oz})^{-0.3035} - 0.002715 U_{oz} (1.0 + 0.044 U_{oz} + 0.0003 U_{oz}^2)^{-1}] \quad (4.42)$$

$$\tau_{ae} = \exp[-k_a^{0.873} (1.0 + k_a - k_a^{0.7088}) M_a^{1.01}] \quad (4.43)$$

$$\tau_g = \exp[-0.0127 M_a^{0.26}] \quad (4.44)$$

$$\tau_{vp} = 1 - 2.4959 U_{vp} \left[(1.0 + 79.03 U_{vp})^{0.6828} + 6.385 U_{vp} \right]^{-1} \quad (4.45)$$

4.3.15 Le modèle de Yang

C'est un modèle récent conçu pour des conditions de ciel dégagé. Il est basé sur la corrélation d'Angstrom impliquant la relation entre l'irradiation solaire directe et diffuse avec la durée d'ensoleillement [232,233,234]. Le modèle de Yang a été examiné par différents auteurs, comme indiqué dans [180,220]. L'atténuation du rayonnement solaire à travers l'atmosphère est modélisée sous la forme de l'Eq. (4.40), mais avec des expressions différentes des cinq coefficients de transmittances précédentes. Ainsi, la nouvelle expression de vient:

$$DNI = 0.9662 I_{on} \sin h \tau_{oz} \tau_r \tau_g \tau_{vp} \tau_{ae} \quad (4.41)$$

Avec :

$$\tau_r = \exp[-0.008735 M_a b_r^{-4.08}] \quad (4.42)$$

$$\tau_{oz} = \exp[-0.036 l_{oz} (M_r l_{oz})^{-0.2864}] \quad (4.43)$$

$$\tau_{ae} = \exp[-\beta M_r b_{ae}^{-1.3}] \quad (4.44)$$

$$\tau_g = \exp[-0.0117 M_r^{0.3139}] \quad (4.45)$$

$$\tau_{vp} = \exp(-b_{vp}) \quad (4.46)$$

Les coefficients contenus dans les paramètres précédents s'écrivent, comme suit :

$$\tau_{vp} = -\log (0.909 - 0.036 \log (M_r w)) \quad (4.47)$$

$$b_{ae} = 0.6777 + 0.1464 (M_r \beta) - 0.00626 (M_r \beta)^2 \quad (4.48)$$

$$b_r = 0.547 + 0.014 M_a - 0.00038 M_a^2 + 4.6 \times 10^{-6} M_a^3 \quad (4.49)$$

4.3.16 Le modèle METSTAT

Ce modèle a été développé par le Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) situé à Colorado aux États-Unis. Il est inspiré de la référence [225] avec quelques modifications des transmittances formulés par Maxwell [235] qui apparaissent dans la formule de Bird (Eq. (4.40)), tels que les coefficients de transmittance pour les aérosols atmosphériques et la vapeur d'eau. Ainsi, le DNI est donné par:

$$DNI = 0.9751 I_{on} \sin h \tau_{oz} \tau_r \tau_g \tau_{vp} \tau_{ae} \quad (4.50)$$

Avec :

$$\tau_{ae} = \exp[-k_a M_r] \quad (4.51)$$

$$\tau_{vp} = 1.0 - 1.668 U_{vp} \left[(1.0 + 54.6 U_{vp})^{0.637} + 4.042 U_{vp} \right]^{-1} \quad (4.52)$$

4.3.17 Le modèle de Rodgers

Ce modèle a été évalué à partir de l'épaisseur optique totale des aérosols (k_a) et de la transmittance après absorption de la vapeur d'eau (P_{vp}). Le modèle est développé par Rodgers et al. (1978) [236]. C'est un modèle qui est aussi introduit dans divers travaux scientifiques, tels que [180,205]. Le DNI est exprimé de la manière suivante:

$$DNI = \tau_{ae} P_{vp} \quad (4.53)$$

Avec :

$$\tau_{ae} = \exp[-k_a M_r] \quad (4.54)$$

$$P_{vp} = I_o \sin h \exp\{w_0 + w_1 M_a + w_2 M_r^2 + w_3 M_r^3\} \quad (4.55)$$

Où

$$w_0 = -0.129641 + 0.04112828w - 0.0112096w^2 \quad (4.56)$$

$$w_1 = -0.0642111 - 0.0801046w - 0.0143069w^2 \quad (4.57)$$

$$w_2 = -0.0046883 + 0.022041w - 0.00429818w^2 \quad (4.58)$$

$$w_2 = -0.000844097 - 0.00191442w + 0.000374176w^2 \quad (4.59)$$

4.3.18 Le modèle de Solis

Il s'agit d'un modèle de rayonnement solaire à large bande basé sur la relation de Lambert et Beer et du modèle de transfert radiatif (RTM), étudié par R.W. Mueller (2006) [237]. Le modèle simplifié a été développé par Ineichen [161,162] et est exprimé en termes d'une certaine épaisseur optique totale de l'atmosphère, τ (différente de k_a), de l'épaisseur optique de vapeur d'eau, de l'épaisseur optique des aérosols à 0.7 μm ($k_{a, 0.7}$), d'éclairement énergétique extraterrestre modifié I_b (différent de I_{on}) et d'angle d'élévation solaire (h). Avec b le paramètre d'ajustement obtenu à partir des calculs RTM. Le DNI est déterminé selon :

$$DNI = I_b \sin h \exp\left(-\tau / \sin^b h\right) \quad (4.60)$$

Les coefficients introduits dans l'équation précédente sont les suivants:

$$I_b = I_{0n} \{I_{02} \cdot k_{a,0.7}^2 + I_{01} \cdot k_{a,0.7} + I_{00} + 0.071 \log (p/p_0)\} \quad (4.61)$$

$$\tau_b = t_{b1} k_{a,0.7} + t_{b0} + t_{bp} \cdot \log (p/p_0) \quad (4.62)$$

$$I_{02} = 0.12 \cdot w^{0.56} \quad (4.63)$$

$$I_{01} = 0.97 \cdot w^{0.032} \quad (4.64)$$

$$I_{00} = 1.08 \cdot w^{0.0051} \quad (4.65)$$

$$t_{b1} = 1.82 + 0.056 \cdot \log w + 0.0071 \cdot \log^2 w \quad (4.66)$$

$$t_{b0} = 0.33 + 0.045 \cdot \log w + 0.0096 \cdot \log^2 w \quad (4.67)$$

$$t_{bp} = 0.0089 \cdot w + 0.13 \quad (4.68)$$

$$b = b_1 \cdot \log w + b_0 \quad (4.69)$$

$$b_1 = 0.00925 k_{a,0.7}^2 + 0.0148 \cdot k_{a,0.7} - 0.0172 \quad (4.70)$$

$$b_0 = -0.7565 k_{a,0.7}^2 + 0.5057 \cdot k_{a,0.7} + 0.4557 \quad (4.71)$$

4.4 ANALYSE DES RESULTATS DE SIMULATIONS

Cette section est consacrée à l'application des différentes formules vues dans la section précédente, pour les sites du CDER (Alger) et de l'URAER (Ghardaïa), cela en utilisant le logiciel Matlab qui permet de programmer les résultats de simulation afin de déterminer la

performance des modèles en utilisant une étude comparative (statistique et graphique). En effet, Tout au long de l'étude, les performances des modèles adoptés ont été estimées en utilisant les formules suivantes: le biais erreur (rb), l'erreur quadratique moyenne normalisée (rRMSE), le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur relative (re). Ces indicateurs sont généralement utilisés par plusieurs auteurs afin de comparer les modèles de prédiction du rayonnement solaire par rapport aux mesures [157,187,210,238-241].

Ainsi, on dit qu'un modèle est performant quand la valeur de rRMSE est très inférieure à 1, et que R^2 est proche de 1. De plus, un modèle surestimé ou sous-estimé est indiqué par l'erreur rb. En conséquence, une valeur de rb positive ou négative indique que le modèle est surestimé ou sous-estimé, respectivement. Si nous posons N, DNI_{est} , DNI_{mes} étant le nombre total d'observations, les éclaircissements estimés et mesurés, ces indicateurs peuvent s'écrire comme suit:

$$rb = \frac{1}{\overline{DNI}_{mes}} \sum_1^N \frac{1}{N} (DNI_{est} - DNI_{mes}) \quad (4.72)$$

$$rRMSE = \frac{1}{\overline{DNI}_{mes}} \sqrt{\sum_1^N \frac{1}{N} (DNI_{est} - DNI_{mes})^2} \quad (4.73)$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_1^N \frac{1}{N} (DNI_{est} - DNI_{mes})^2}{\sum_1^N \frac{1}{N} (DNI_{est} - \overline{DNI}_{mes})^2} \quad (4.74)$$

En ce qui concerne l'étude statistique de chaque modèle, des critères de performances (ou précision) ont été entrepris, notamment pour le rRMSE, comme cela a été indiqué par Badescu et al. (2012) [242]. C'est-à-dire, la précision d'un modèle est noté par «médiocre» si le rRMSE > 10%, elle est excellente si le rRMSE ≤ 2%. Si le rRMSE est compris entre les valeurs mentionnées, le modèle présente une performance «moyenne».

4.4.1 Performance des modèles

L'analyse comparative entre les valeurs prédites et les données mesurées constitue la meilleure technique d'évaluation de la performance des modèles du rayonnement solaire. À cette fin, les prédicteurs indiqués précédemment ont été appliqués pour chaque modèle : les modèles Ashrae, Kumar, DPP, Meinel, Dogniaux, Majumdar, Ineichen-Perez, ESRA, Heliosat-1, EEC, Perrin-Brichambaut, Atwater, MAC, Bird et Hullström, Yang, METSTAT, Solis et Rodgers (étiquetés de #1 à #18). Les dix-huit modèles ont été testés pendant 11 et 22 jours par jour clair, observés respectivement sur les sites d'Alger et de Ghardaïa.

D'autre part, cette étude n'inclut aucune limitation concernant les mesures d'éclairement directe et l'élévation solaire ($0 < h < 90$), sauf pour Ghardaïa, où tous les tests ont été employés pour la valeur minimale de 50 W / m² du DNI. En effet, pour chaque site, les indicateurs de précision (rb, rRMSE et r²) sont résumés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1: Résultats statistiques (en %) de la performance des modèles proposés

N°	Modèle	Alger			Ghardaïa		
		rb	rRMSE	r ²	rb	rRMSE	r ²
1	Ashrae	9.400	15.92	92.24	5.511	10.76	91.12
2	Kumar	18.56	25.00	80.90	13.33	22.42	61.50
3	DPP	10.73	15.12	93.00	5.200	14.10	84.76
4	Meinel	7.618	13.07	94.77	3.600	13.00	87.00
5	Majumdar	11.15	15.84	92.31	6.110	12.64	87.75
6	Dogniaux	-0.990	1.066	99.96	-0.980	1.100	99.90
7	Ineichen-Perez	3.910	4.705	99.32	4.015	4.716	98.30
8	ESRA	0.380	0.443	99.99	0.360	0.390	99.99
9	Heliosat-1	1.640	1.837	99.90	2.045	2.260	99.61
10	EEC	8.730	10.00	96.80	8.094	9.083	93.74
11	Perrin de Brichambaut	1.732	2.360	99.83	2.700	2.811	99.39
12	Atwater	1.338	2.934	99.73	3.831	4.732	98.28
13	MAC	-0.746	1.237	99.95	0.606	1.223	99.88
14	Bird-Hulstrom	-5.130	6.000	99.00	-2.880	4.188	98.65
15	Yang	-0.823	1.283	99.95	0.445	1.444	99.84
16	METSTAT	-4.120	4.974	99.24	-2.000	3.740	98.93
17	Solis	-4.970	6.432	98.73	-3.811	5.362	97.80
18	Rodgers	0.325	1.953	99.88	2.741	3.366	99.13

Le tableau ci-dessus montre que pour les grandes et faibles valeurs des rRMSE et r² impliquent une mauvaise performance des modèles simples (# 1 à # 5), de sorte que ces modèles sont très «médiocres», et ce pour les deux sites. Les indicateurs de test donnent : rRMSE > 13%, r² < 92% pour Alger, et rRMSE > 10%, r² < 91% pour Ghardaïa. Cependant, pour Ghardaïa, le modèle Ashrae présente la meilleure performance par rapport aux autres modèles simples, où les valeurs rRMSE et r² sont égales, respectivement à 11% et 91%. Tandis que pour Alger le modèle de Meinel est plus performant que les autres modèles simples, avec des valeurs statistiques de 13% et 94%. Nous constatons aussi que les modèles (#7, #10, #11, #12, #14, #16 et #17) ont des performances "moyennes" (2,36% < rRMSE < 10%) pour les deux sites.

D'autre part, pour Alger, les résultats statistiques ont montré que les valeurs des rRMSE et r² sont contenues respectivement dans les intervalles, 0,44 - 1,95% et 99,88 - 99,99%, ce qui correspond aux modèles (#6, #8, #9, #13, #15, #18). Par conséquent, leur performance est excellente, car rRMSE < 2%. Alors que pour Ghardaïa, ils s'agit des modèles #6, #8, #13 et

#15 qui donnent d'excellentes performances, avec les valeurs des rRMSE comprises entre 0,39 et 1,44% et des r^2 entre 99.84 et 99.99%.

Sur les Figs. 4.1a et 1b, nous avons visualisé des histogrammes de valeurs des rRMSE et rb de chaque modèle considéré. Il apparaît sur la Fig. 4.1a que les valeurs élevées de rRMSE (supérieures à 10% pour Alger et Ghardaïa) impliquent des résultats «médiocres» pour l'estimation du DNI, en particulier pour les modèles simples #1 à #5. Il semble aussi que ces modèles présentent des erreurs plus importantes à Alger qu'à pour Ghardaïa. Il apparaît que les rRMSE des modèles Ineichen-Perez et MAC (#7 et #13), sont identiques pour les deux sites. Il est aussi constaté que les modèles #6, #8, #13 et #15 présentent « d'excellentes » performances, comparé aux autres modèles.

D'après la Fig. 4.1b, les modèles simples surestiment considérablement l'intensité du DNI pour les deux sites ($rb > 0$). La surestimation concerne aussi les modèles complexes #7, #9, #10, #11, #12, mais avec un faible écart par rapport aux modèle simples. Par contre, les modèles #14, #16 et #17 sous-estiment le DNI ($rb < 0$) avec des écarts moyens entre les prévisions et les mesures. En outre, d'après les résultats des deux histogrammes, il est apparait clairement que les trois modèles #6 #13, #15, ont des performances identiques. Alors que le modèle ESRA (#8), fournit les plus bas taux de rb et rRMSE par rapport aux modèles restants.

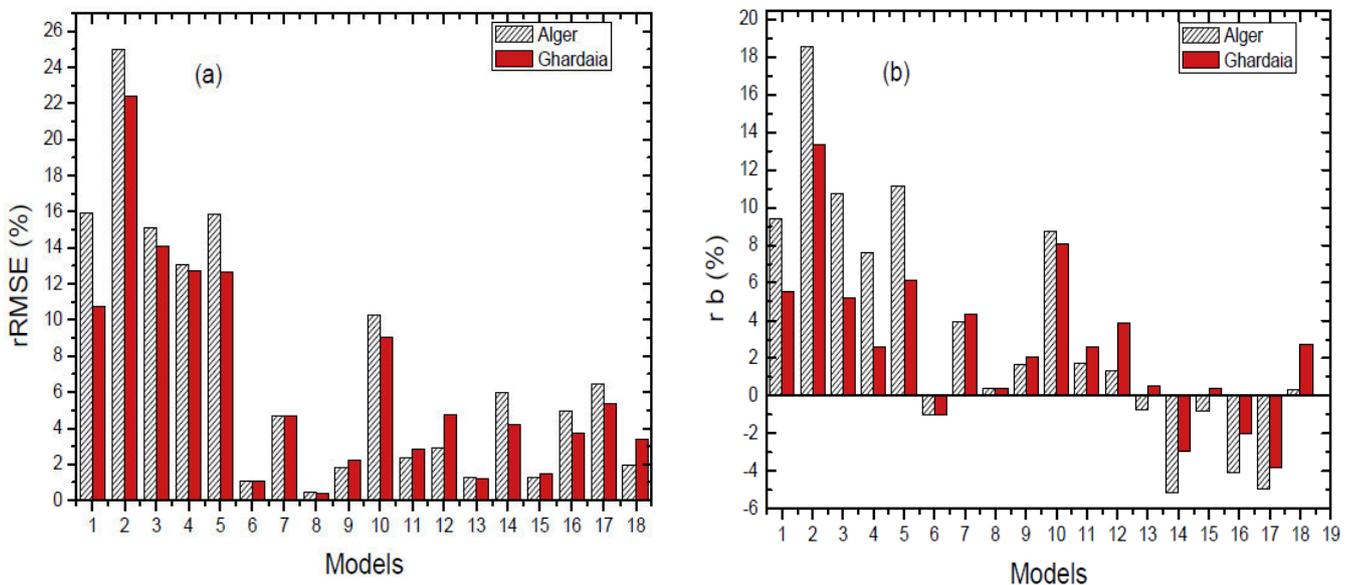


Fig. 4.1: Histogramme des erreurs statistiques (rb, rRMSE) pour les deux sites

4.4.2 Sélection des modèles les plus performants

Une autre façon d'étudier le DNI consiste en l'introduction de courbes de régressions, c'est-à-dire le tracé de nuages de points entre le DNI estimé avec celui mesuré. Cela permettrait d'inspecter la précision de différents modèles par rapport aux mesures, comme ça été

visualisé dans les Figs. 4.2a-r et 3a-r, pour Alger et Ghardaïa respectivement. A partir des Fig. 4.2g, h, i, p, q et Fig. 4.3g, h, i, p, q, il est noté que les modèles #1 à #5 présentent des performances «médiocres» quelles que soient les valeurs mesurées du DNI, pour les deux sites. En effet, la majorité des points apparaissent au-dessus et éloignés de la ligne identité (diagonale du carré), d'où une surestimation importante du DNI.

Les Fig. 4.2a, r et Fig. 4.3a, r montrent que pour les valeurs de DNI supérieures à 600 W/m^2 , les modèles #14 et #17 sous-estiment les mesures du DNI, tant pour Alger que pour Ghardaïa. D'autre part, pour Alger, le modèle #16 surestime le DNI à partir de 600 W/m^2 , alors que le nuage de valeurs du modèle #14 est nettement plus proche de la ligne d'identité que les modèles #7, #12, #16, #17. En conséquence, le modèle #14 semble plus approprié par rapport aux modèles cités précédemment (#7, #12, #16, #17), tandis que les modèles MAC et Yang semblent avoir de meilleures performances que les modèles #14, #16, #17. D'autre part, pour Ghardaïa, les modèles #14, #16, #17 ont des corrélations identiques.

Les Figs. 4.2l et 4.3l, montrent que le DNI estimé à partir du modèle 11 (Perrin de Brichambaut) surestime faiblement le DNI quelles que soit les valeurs mesurées. Entre 200 et 600 W/m^2 , une faible surestimation du modèle #7, est clairement lisible sur les Fig. 4.2f et 4-3f, pour les deux sites. A partir de 200 W/m^2 , le modèle #10 (EEC) le DNI est largement surestimé, pour les deux sites, car le nuage de points sont éloignés et au-dessus de la ligne identité, comme cela est montré sur les Figs. 4.2d et 4.3d.

Les Figs. 4.2b,k et 4.3b,k, présentent la courbe de dispersion du DNI pour les modèles #12 et #18. La dispersion autour de la ligne identité est plus symétrique (présence de surestimation et sous-estimation) pour Alger et pour Ghardaïa.

En vertu des remarques précédentes, les modèles #7, #11, #12, #18 ont des performances «moyennes» quelle que soit la valeur mesurée de DNI. En outre, en raison de très faibles dispersions des nuages de points observées dans les Figs. 4-2e, j, m, n, o et 4-3e, j, m, n, o, les modèles #6, #8, #9, #13 et #15, possèdent les meilleures corrélations. Par conséquent, ces derniers modèles apparaissent clairement comme «d'excellents» candidats pour la prédiction du DNI sur les deux sites. Par ailleurs, selon l'étude précédente, les modèles de Dogniaux, MAC et Yang (#6, #13, #15) semblent avoir des performances identiques. Pour cela, un traitement approprié doit donc être effectué pour sélectionner parmi les trois modèles, le meilleur modèle offrant la meilleure performance pour les deux sites. Il s'agit donc de choisir une méthode permettant d'examiner la variation des erreurs relatives fournies par chaque modèle en fonction de l'angle d'élévation solaire (h) pour chaque site (voir les Fig. 4.4a-c et 4.5a-c), comme cela a été fait dans Engerer et Mills (2015) [187].

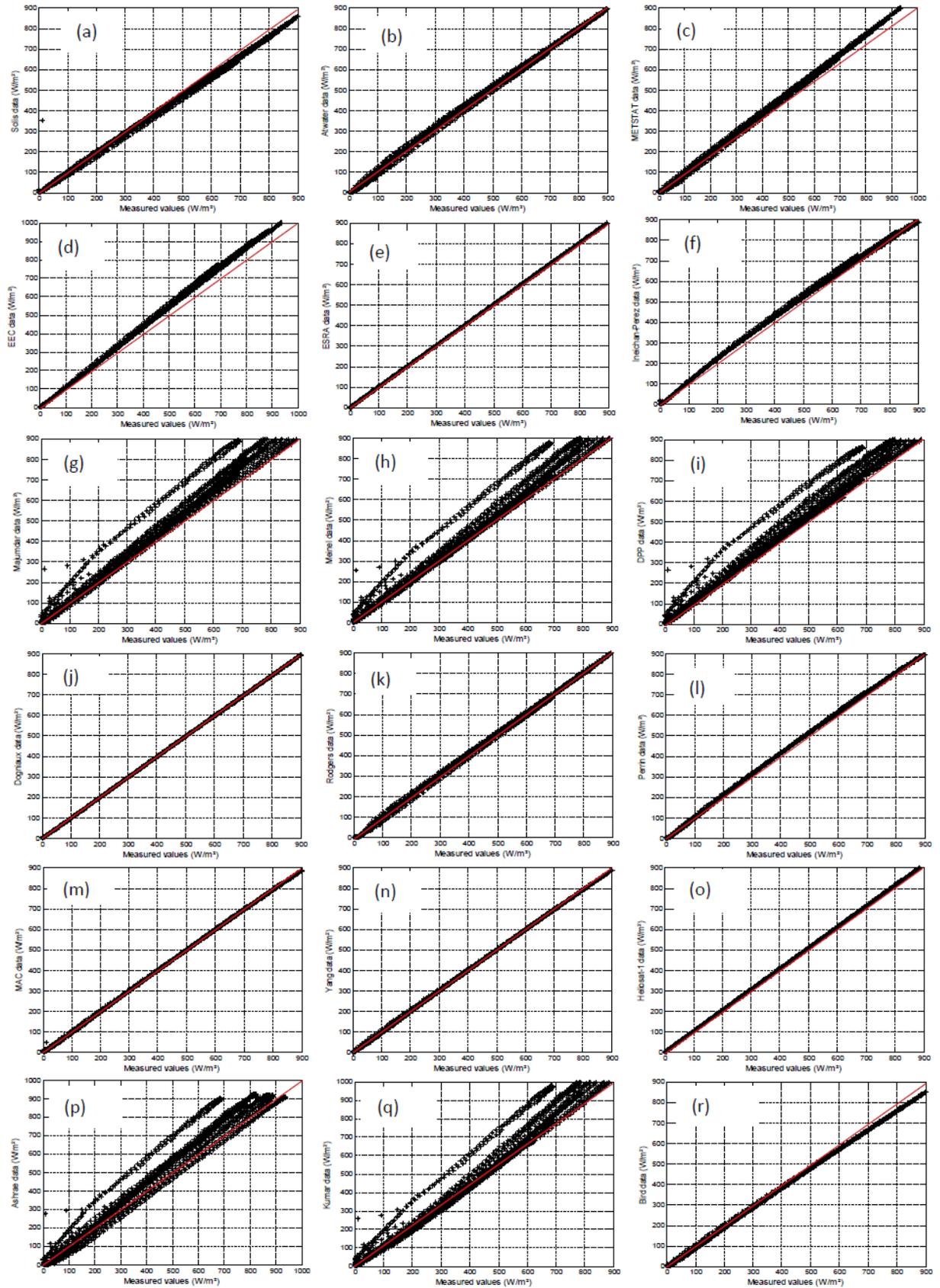


Fig.4.2: Comparaison entre les DNI estimé et mesuré, pour Alger

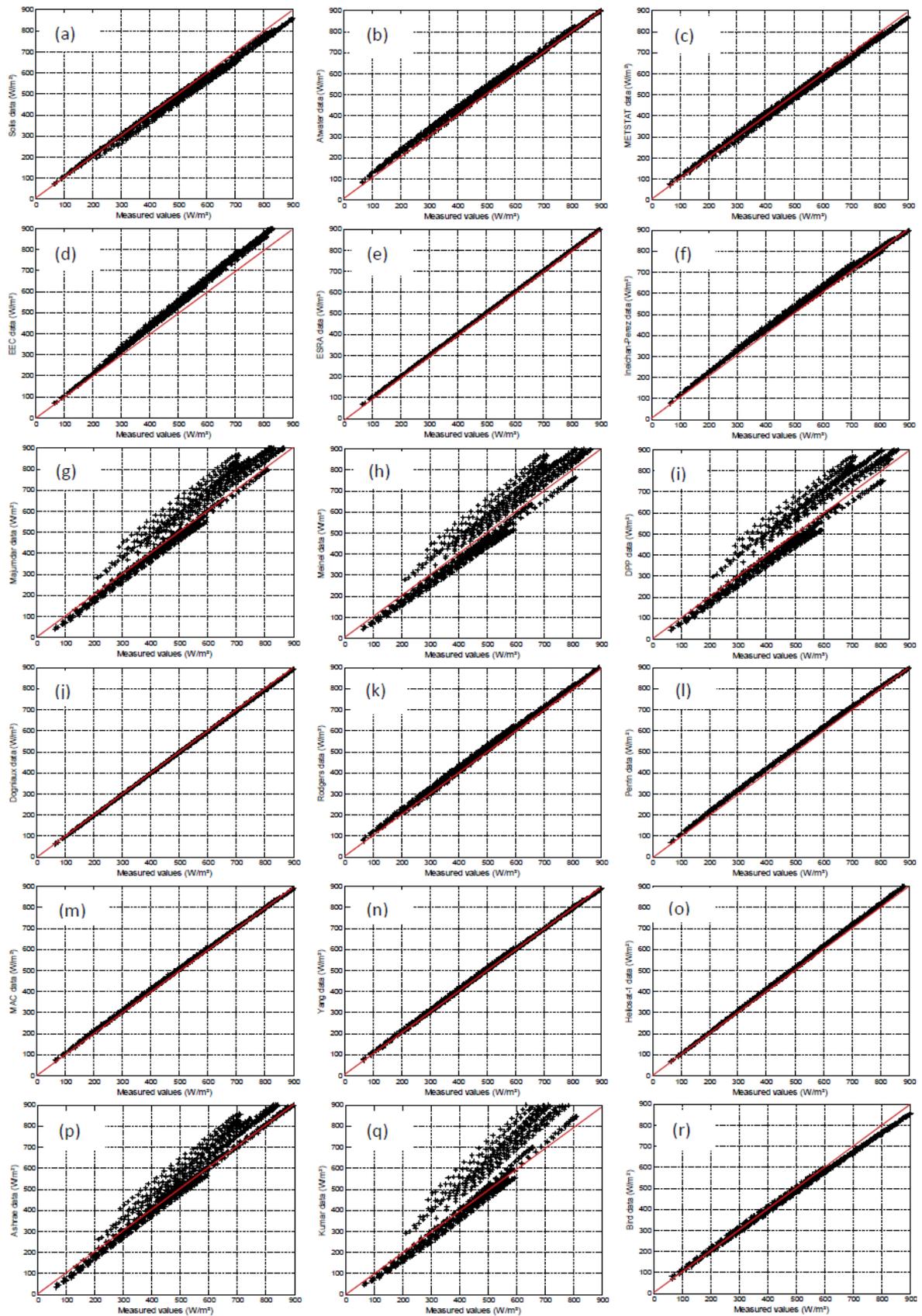


Fig.4.3: Comparaison entre les DNI estimé et mesuré, pour Ghardaia

Les Figs. 4.4a-b et 4.5a-b, montrent que pour les deux sites, les erreurs relatives des modèles MAC et Yang diminuent notablement avec les angles d'élévation solaire jusqu'à 30°, et augmentent légèrement à partir de 50°, en passant par le nuage de points concentrés sur l'axe zéro, où le nuage de points des erreurs sont faibles et elles appartiennent à l'intervalle $[-2,+2]$. Par ailleurs, le modèle Dogniaux (#6) offre plus de performances que les modèles MAC et Yang, car toutes les erreurs relatives deviennent rapidement stationnaires et plus proches de zéro à partir de 30°. En outre, la majorité des points tracés sont largement proche de l'axe zéro et très éloignés des limites de la bande $\pm 2\%$, comme cela est visualisé dans les Figs. 4.4c et 4.5c.

Par conséquent, pour les deux sites, la majorité des erreurs sont comprises entre -2% et 2% pour les modèles Dogniaux et ESRA. Donc, les deux modèles sont alors considérés comme des modèles «excellents», avec une erreur relative moyenne inférieure à $0,5\%$.

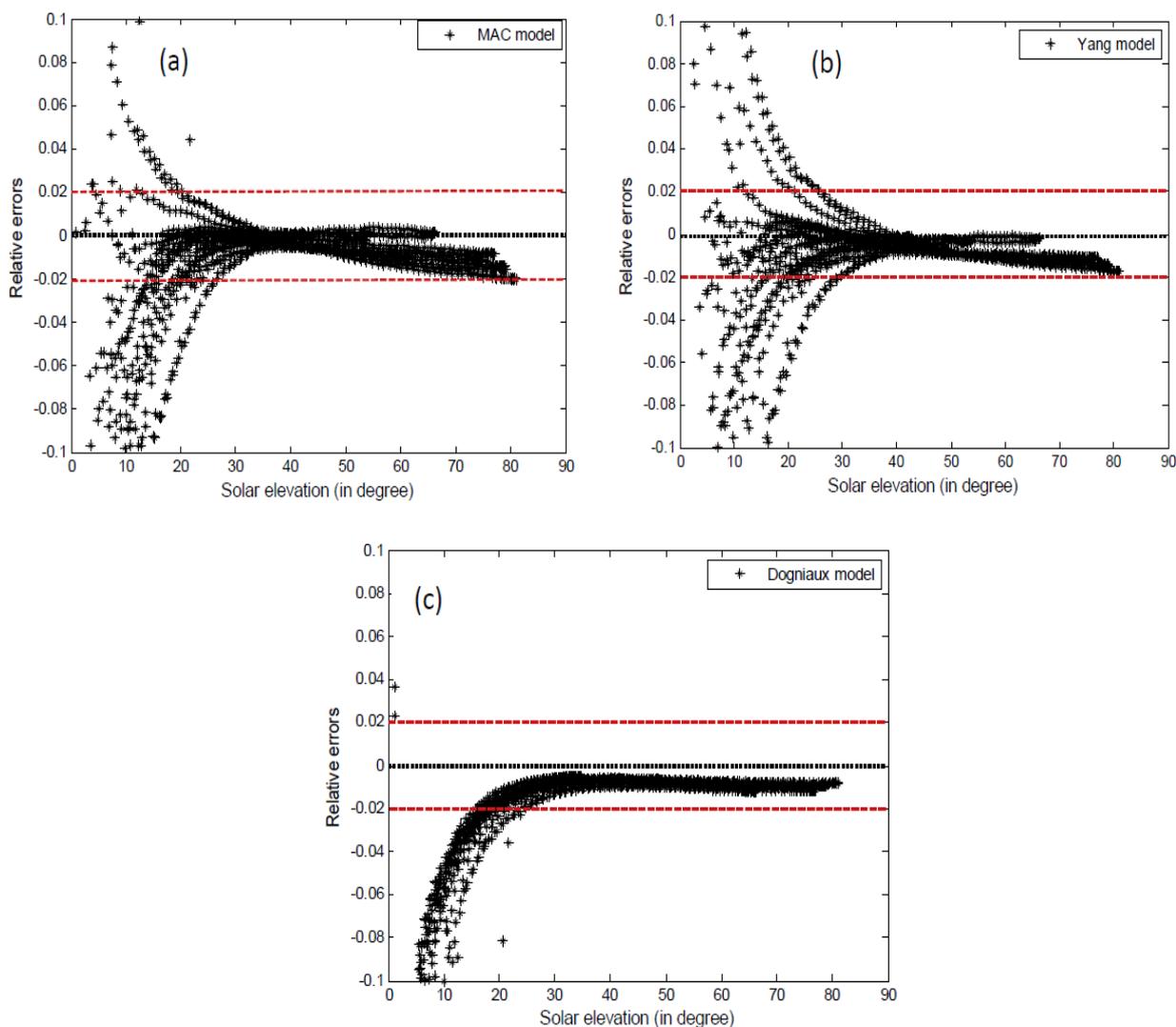


Fig.4.4 : Erreurs relatives des modèles, #6, #13, #15 pour le site d'Alger

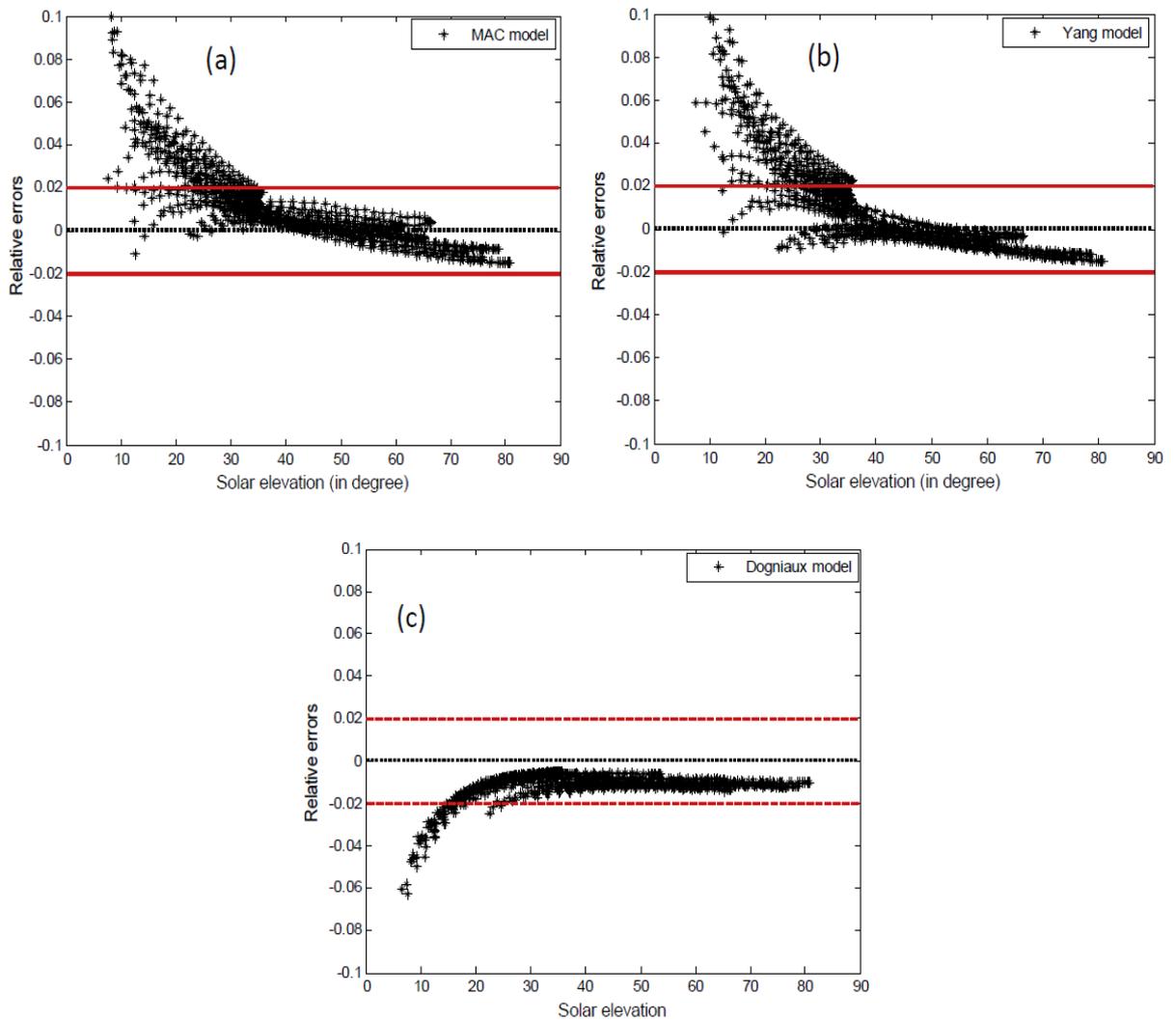


Fig.4.5 : Erreurs relatives des modèles, #6, #13, #15 pour le site de Ghardaïa

4.4.3 Comparaison avec la littérature

Les différentes précisions des meilleurs modèles que nous avons déterminés dans les paragraphes précédents ont été comparées à celles déduites des travaux de quelques hauteurs utilisant la prédiction du DNI par les modèles ciel clair, comme l'illustre le Tableau 4.2. La comparaison est effectuée sur la base des erreurs rRMSE et r_b et du coefficient de détermination (r^2). Nous avons remarqué que les meilleurs modèles ainsi trouvés (#6, #8, #13, #15) assurent de meilleures ou au moins les mêmes précisions parmi les modèles de la littérature.

Tableau 4.2: Comparaison entre certains modèles cités avec ceux existants dans la littérature.

Références	modèles	rb (%)	rRMSE (%)	r ² (%)
[157]	Bird & Hulstrom	0.77	1.52	99.9
[213]	✓ Yang ✓ Dogniaux ✓ Rodgers	✓ 1.20 ✓ -2.00 ✓ -0.90	✓ 2.80 ✓ 2.90 ✓ 4.40	✓ 98.8 ✓ 98.9 ✓ 98.9
[187]	✓ Bird & Hulstrom ✓ MAC ✓ ESRA ✓ Ineichen & Perez ✓ Solis	✓ 1.20 - 8.09 ✓ 0.07 - 5.86 ✓ 2.35 - 8.75 ✓ (-5.65) - 1.11 ✓ (-5.01) - 2.17	✓ 3.45 - 7.57 ✓ 3.21 - 7.33 ✓ 3.65 - 8.13 ✓ 3.62 - 5.84 ✓ 3.98 - 7.14	✓ 98.4 - 99.6 ✓ 98.8 - 99.7 ✓ 98.4 - 99.6 ✓ 99.0 - 99.7 ✓ 98.7 - 99.7
[171]	✓ Héliosat-1 ✓ ESRA ✓ Yang ✓ MAC ✓ Bird & Hulstrom	✓ (-1.0) - 7.8 ✓ (-1.0) - 7.8 ✓ (-5.6) - 4.7 ✓ (-2.7) - 23.9 ✓ (-3.3) - 3.2	✓ 3.2 - 8.5 ✓ 3.2 - 8.5 ✓ 3.2 - 7.5 ✓ 3.2 - 25.9 ✓ 2.3 - 5.2	
Notre cas	✓ Dogniaux ✓ ESRA ✓ MAC ✓ Yang ✓ Solis ✓ Bird & Hulstrom ✓ Rodgers	✓ - 0.98 ✓ 0.36 ✓ 0.60 ✓ - 0.82 ✓ - 4.97 ✓ - 2.88 ✓ 0.32	✓ 1.06 ✓ 0.39 ✓ 1.22 ✓ 1.44 ✓ 5.36 ✓ 4.18 ✓ 1.95	✓ 99.9 ✓ 99.9 ✓ 99.9 ✓ 99.9 ✓ 98.7 ✓ 99.0 ✓ 99.8

4.5 CONCLUSION

Dans ce travail des modèles basés sur quelques paramètres astronomiques et météorologiques, ainsi que sur plusieurs coefficients de transmission liés à l'absorption et à la diffusion du rayonnement solaire par les principaux constituants de l'atmosphère sont présentés. Ces modèles permettent d'évaluer la composante directe du rayonnement solaire reçue sur un plan horizontal (DNI), afin de faciliter la sélection des meilleurs emplacements pour les futurs projets solaires à concentration en Algérie. Ceci est particulièrement important dans les endroits où les stations météorologiques ne sont pas disponibles. À cette fin, des paramètres d'entrée théoriques et expérimentaux ont été utilisés. L'objectif était d'évaluer la performance des modèles en comparant les résultats avec les mesures enregistrées sur les sites de Ghardaïa et d'Alger, en choisissant convenablement quelques journées totalement claires.

Pour ce faire, six indicateurs statistiques ont été appliqués pour tester les performances à court et à long terme, la corrélation et la qualité de la prédiction de chaque modèle: erreur relative moyenne (mean bias error), erreur quadratique moyenne (root mean square error) et coefficient de détermination. Afin de mieux classer les modèles par leur ordre de performance. Nous avons utilisé des corrélations (courbes d'ajustements), ainsi que la

variation de l'erreur relative (à ne pas confondre avec l'erreur relative moyenne) entre les DNI mesurés avec ceux prédits, en fonction de la hauteur du soleil.

Nous avons constaté que, les paramètres de turbidité (turbidité de Linke, profondeur optique des aérosols, turbidité d'Angstrom) ont la plus grande influence sur la précision des modèles par rapport aux autres paramètres, comme l'épaisseur de la vapeur d'eau, l'épaisseur de la couche d'ozone, la température, l'humidité relative et la hauteur du soleil considérés seuls paramètres d'entrées. En effet, les modèles de Dogniaux, Ineichen-Perez, ESRA, Heliosat-1 et EEC offrent de bonnes performances, avec la turbidité de Linke, comme paramètre d'entrée, par rapport aux modèles simple, tels qu'Ashrae, Kumar, DPP, Meinel et Majumdar. En outre, ces derniers donnent de moins bons résultats que ceux basés sur le coefficient de transmittances tels que Bird, Perrin, de Blichambaut, Solis, Yang et Rodgers et MAC.

D'autre part, les quatre modèles (MAC, Yang, Dogniaux et ESRA, par ordre de précision) peuvent être recommandés pour la prédiction du DNI, en raison de leurs performances élevées, pour les deux sites. De plus, le modèle Heliosat-1 est ajouté aux quatre modèles, dans le cas d'Alger. Par ailleurs, les modèles MAC, Yang, Dogniaux et Heliosat-1 ont montré une performance médiocre pour un angle d'élévation solaire inférieur à 30° , mais ils donnent de bonnes performances au-dessus de cette valeur.

Il convient de noter que les données décrivant la plupart des conditions atmosphériques ne sont généralement pas disponibles en Algérie, tels que le coefficient de trouble atmosphérique d'Angstrom, l'épaisseur de la vapeur d'eau et l'épaisseur d'ozone. Pour cela, le présent travail consiste à se baser sur l'évaluation de ces paramètres par des formules théoriques. Cependant, l'utilisation d'entrées théoriques pourrait induire une propagation de l'incertitude. Cependant, il reste la seule alternative pour évaluer le DNI lorsque les paramètres d'entrée mesurés ne sont pas disponibles. Par conséquent, la présente étude pourrait être très utile pour servir à la sélection des sites pour de futures centrales solaires à concentration dans le désert du Sahara.

Des études futures seront menées pour valider certains modèles plus sophistiqué de ciel clair permettant de prédire le DNI dans plusieurs sites en Algérie. Tels que les modèles multi-bandes, MLWT2 et REST2, avec l'utilisation des paramètres d'entrées plus précis. Une autre perspective, qui consiste à utiliser les enregistrements de données d'éclairements par ciel clair, appartenant au service de surveillance de l'atmosphère de Copernicus (CAM5). En utilisant l'observation du CAM5, une comparaison sera faite avec les mesures au sol. Enfin, un modèle récemment développé (modèle McClear) sera confronté aux modèles les plus sophistiqués de prédictions de la composante directe et aussi avec des mesures au sol.

CONCLUSION GENERALE

Notre étude s'est focalisée sur la modélisation du rayonnement solaire en fonction des variables météorologiques et astronomiques enregistrées au niveau du sol dans des conditions de ciel clair. Plus particulièrement, la détermination des performances de dix-huit modèles à large bande dans le but de prédire le DNI dans deux sites appartenant à deux régions de l'Algérie, qui ont des climats spécifiquement quasi-différents, à savoir les régions saharienne et rurale qui sont respectivement caractérisées par des climats aride (Ghardaïa) et tempérée (Alger).

Des simulations graphiques ont été menées, pour chaque modèle où plusieurs journées claires ont été choisies, ensuite des évaluations statistiques pour chaque modèle ont été faites. Ces évaluations ont été effectuées en utilisant des formules statistiques qui sont employées dans divers travaux scientifiques pour la validation du rayonnement solaire. Cela nous a permis de déduire par ordre de performance les modèles qui sont capables de prédire le DNI avec des erreurs statistiques très satisfaisantes, et ce pour des installations efficaces de l'énergie solaire en Algérie, à savoir l'intégration de grand projets pilotes de centrales thermiques à concentration solaire plus connu sous le nom de «Concentrateurs solaire (CSP)».

En outre, les modèles étudiés sont divisés en deux classes: les modèles simples qui s'expriment en fonction des variables astronomiques ou géométriques, les modèles compliqués se basant sur des variables qui caractérisent l'état de l'atmosphère, ainsi que sur la combinaison de facteurs de transmittances qui caractérisent l'atténuation du rayonnement solaire direct (DNI). Ces variables sont soit estimées par des modèles issus des observations satellitaires ou des mesures au sol.

Nous pouvons conclure que les modèles qui s'expriment uniquement en fonction des paramètres astronomiques et météorologiques ne peuvent pas être utilisés à prédire le DNI, notamment pour les deux sites, c'est-à-dire Alger et Ghardaïa. Par conséquent, ces modèles ne sont pas adaptés pour être utilisés dans des applications solaires.

Par ailleurs, nous avons montré que les modèles large bande que nous avons validé, tels que ESRA-Dogniaux-MAC-Yang pour prédire le DNI sont très pertinents, plus généralisés, c'est-à-dire, valables pour n'importe quel site considéré (Alger ou Ghardaïa). En outre, l'étude graphique des erreurs relatives en fonction de l'élévation solaire nous a montré que le modèle de Dogniaux donne une précision adéquate par rapport aux modèles de MAC et Yang, et ce, pour les deux sites. À condition d'avoir la hauteur du soleil supérieure à 30°.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] US International Data Base. www.census.gov
- [2] Exxon Mobil Perspectives Energétiques à l'horizon 2040, 2017.
- [3] World Population Prospects 2017 : UN DESA. www.esa.un.org.
- [4] U.S. Energy Information Administration. Agence Internationale de l'Énergie (AIE). www.eia.gov/ieo.
- [5] World Energy Outlook 2017. www.worldenergyoutlook.org
- [6] International Energy Outlook. IEO 2017.
- [7] Key World Energy Statistics. AIE 2017. <http://www.iea.org/statistics/>
- [8] World Energy Outlook 2016.
- [9] BP Statistical Review of World Energy 2017.
- [10] Agence Internationale des Energies Renouvelable (IRENA). www.irena.org/remap
- [11] World Energy Outlook 2013.
- [12] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. [www.cea.fr](http://www cea.fr)
- [13] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 5^{ème} rapport, 2014.
- [14] Conférence du groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. CDER, Algérie. www.cder.dz.
- [15] Convention-CADRE DES Nations Unies sur les changements climatiques. Vingt-troisième session de la conférence des parties, Allemagne, Novembre 2017.
- [16] A. Cazenave, P. Gaufre, D. Idier, G, Le Gozannet. Evolution du niveau de la mer. MEDTL, 2012.
- [17] A. Cazenave. La Terre et l'Environnement observés depuis l'espace. Océan, glaces, niveau de la mer et climat.
- [18] A.D. Dalmedico, H. Guillemot. Changement climatique : Dynamiques scientifiques, expertise, enjeux géopolitiques. Sociologie du Travail, 48, 2006, p. 412-432.
- [19] D. Benjamin, L. Bernard. Forçage radiative et PRG du méthane dans le rapport AR5 du GIEC. Les cahiers Global Chance, 35, 2014.
- [20] R.H. Moss, J.A. Edmonds, K.A. Hibbard. The next generation of scenarios for climate change research and assessment, Nature, 463, 2010, p.747-756.
- [21] R.H. Moss, M. Babiker, S. Brikman, E. Calvo. Towards New Scenarios for Analysis of Emission, Climate Change, Impact, and Response Strategies. IPCC Expert Meeting Report, Geneva, 2008.

- [22] Perspective Economique en Afrique, Groupe de la banque Africaine de développement, 2017.
- [23] The world Factbook, Agence Central de renseignement (CIA), 2017.
- [24] L'Afrique tribune, Index Mundi. <https://www.indexmundi.com/fr/algerie/>
- [25] H. Othieno, J. Awange. Energy Resources in Africa, Springer 1^{ère} éd. 344, 2016.
- [26] K. Gairaa. Valorisation du gisement solaire de Ghardaïa. Bulletin des énergies renouvelables, CDER, N°17, 2010.
- [27] R. Yaiche, A. Bouhanik. Atlas Solaire Algérien, portail des énergies renouvelable, CDER, 2014.
- [28] S. Benkaciali, M. Haddadi, A. Khellaf, K. Gairaa, M. Guermoui. Evaluation of the global solar irradiation from the artificial neural network technique. Revue des énergies renouvelables, 19, N°4, 2016, p. 617-631.
- [29] Ministère de l'énergie et des mines. République Algérienne Démocratique et Populaire.
- [30] S.M. Boudia. Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie. Thèse de Doctorat: Physique Energies Renouvelables, Université de Tlemcen, 2013.
- [31] F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani, A. Recioui. A contribution in the actualization of wind map of Algeria. Renewable and Sustainable Energy Review, 15, 2011, p. 993-1002.
- [32] A.B. Stambouli. Algerian renewable energy assessment: The challenge of sustainability. Energy Policy, 39, 2011, p. 4507-4519.
- [33] A.B. Stambouli, Z. Khiat, S. Flazi, Y. Kitamura. A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective; energy scenario and sustainability issues. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2012, p 4445-4460.
- [34] H.D. Nedjari, S.K. Haddouche, A. Balehouane, O. Guerri. Optimal windy sites in Algeria: Potential and perspectives. Energy, 147, 2017, p. 1240-1255.
- [35] S. Ouali. Eléments de l'Atlas géothermique d'Algérie. Bulletin des Energies Renouvelables, CDER, N°44, 2018.
- [36] S. Ouali. A. Khellaf, K. Baddari. Etude des ressources géothermiques du sud Algérien d'Algérie. Revue des Energies Renouvelables, CDER, 10 N°3, 2007, p. 407-414.

- [37] J.A. Duffie, W.A. Beckman. Solar Energy Thermal Processes. Wiley Interscience, New Jersey, 1974.
- [38] M., Iqbal. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press, Toronto, 1983.
- [39] Odysseespace : L'astronomie sous toutes ces formes. <http://www.odysseespace.fr>.
- [40] Z. Sen. Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques. Springer-Verlag, London, 2008.
- [41] J.W. Spencer. Fourier series representation of the position of the sun. Search, Vol. 2, No. 5, 1971, p. 172.
- [42] S.A. Kalogirou. Solar Energy Engineering. Elsevier, 1^{ère} édition, Cyprus of University Technology, 2009, 778 p, ISBN 9780123745019.
- [43] C.P. Brichaumbaut, C. Vauge. Le gisement solaire. Ed. Tech. & Doc. Paris, 1982.
- [44] J. Bernard. Energie solaire Calculs et optimisation. Edition ellipses, 2004.
- [45] P.I. Cooper. The absorption of solar radiation in solar stills. Solar Energy 12(3), 1969, p. 333–346.
- [46] J.E. Braun, J.C. Mitchell. Solar geometry for fixed and tracking surface. Solar Energy, 31, (5), 1983, p: 439-444.
- [47] T. Muneer, C. Gueymard, H. Kambesidis. Solar Radiation and Daylight Models. Elsevier, 2004.
- [48] D. Y. Goswami. Principle of solar Engineering. CRC Press, Taylor & Francis Group, Third Ed. 2015
- [49] M. Geyer, W. B. Stine. Power from the Sun. J.T. Lyle Center, 2001.
- [50] D.R. Myers. Solar Radiation Resource Assessment for Renewable Energy Conversion National Renewable Energy Laboratory, USA, Elsevier, 2012.
- [51] T. Matthieu. Détermination de la constante de Planck au moyen d'une balance du watt. Thèse de doctorat, 2016.
- [52] M. Santamouris, D. Asimakopoulos. Passive Cooling of Buildings. Edition Sc. Publisher, 2001.
- [53] E. Kevin, J. T. Fasullo, and J. Kiehl. Earth's global energy budget. American Meteorol. Soc. 2009, p. 311-324.
- [54] P. Moon. Proposed standard solar radiation curves for engineering use. J. Francklin Inst., 230, 1940, p. 583,607.
- [55] H.P. Garg, J. Prakash. Solar Energy fundamentals and Applications. Tata McGraw-Hill, 2000.
- [56] P. Bouguer. Essai d'Optique sur la graduation de la lumière. Paris, 1729.

- [57] F. Kasten. A new table and approximation formula for the relative optical air mass. *Archive Météorologie, Géophysique et Bioclimatologie*, 14, (2), 1965, p. 206-223.
- [58] S. Benkacali, M. Haddadi, A. Khéllaf. Evaluation of direct solar irradiance from 18 broadband parametric models: Case of Algeria. *Renewable Energy*, 125, 2018, p. 694-711.
- [59] A. Angstrom. Solar and terrestrial radiation. *Q.J.R. Meteorol.* 50, 1924, p. 121-125.
- [60] A. Angstrom. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Journal, Geographical Annaler*, 11, 1929, p. 156-166.
- [61] A. Angstrom. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, 16, 1964, p. 64-75.
- [62] H.A. Mc Cartney, M.H. Unsworth. Spectral distribution of solar radiation. I: direct radiation. *Quart. J. R. Met. Soc.* 104, 1978, p. 699-718.
- [63] L. T. Molina, M. J. Molina. Absolute Absorption Cross Sections of Ozone in the 185- to 350-nm Wavelength Range. *J. Geoph. Res.* 91, 1986, p. 501-508.
- [64] M. Gunther. *Advanced CSP Teaching Materials. EnerMENA, Chapter 2, Solar Radiation*, 2011.
- [65] R.E. Bird, C. Riordan. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Climate and applied meteorology*, 25, 1986, p. 87-97.
- [66] D.T. Brine, M. Iqbal. Diffuse and global solar spectral irradiance under cloudless Skies. *Solar Energy*, 30, 1983, p. 447-453.
- [67] C.G. Justus, M.V. Paris. A model for solar spectral irradiance and radiance at the bottom and top of a cloudless atmosphere. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 24(3), 1985, p. 193-205.
- [68] E.P. Shettle, R.W. Fenn. Models for the aerosols for the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties. *AFGL-TR-79-0214, Env. Res.* 1979.
- [69] H.C. Hotel, B.B. Woertz. Evaluation of flat plate solar heating collector. *Trans. ASME* 1942, p. 64-91.
- [70] T.M. Klucher. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Sol Energy*, 23(2), 1979, p. 111-114.
- [71] R.C. Temps, K.L. Coulson. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Sol Energy*, 19(2), 1977, p. 179-84.

- [72] R. Perez, R. Stewart, C. Arbogast, R. Seals, J. Scott. An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation. *Solar Energy*, 36(6), 1986, p. 481-497.
- [73] P. Baltas, M. Tortoreli, P.E. Russell. Evaluation of power output for fixed and step tracking photovoltaic arrays. *Solar Energy*, 37(2), 1986, p. 147-163.
- [74] G. D. Robinson. Absorption of solar radiation by atmospheric aerosol, as revealed by measurements from the ground. *Arch. Met. Geophys. Bioklim. B12*, 19, 1962.
- [75] G. Zerlaut. Solar radiation instrumentation. In *Solar Resources*. R.L. Hulstromed., MIT Press, Cambridge, MA, 1989.
- [76] S. Benkaciali, M. Adouane. Etude du rayonnement solaire en Ghardaïa. 1er séminaire international sur les énergies nouvelles et renouvelables, URAER/CDER, Ghardaïa, octobre 2010.
- [77] M.N. Bellouin. Estimation de l'effet direct des aérosols à partir de la modélisation et de la télédétection passive. Thèse, Univ. De Lille 1, 2003.
- [78] P.H. Flamant. Atmospheric and meteorological Lidar: from pioneers to space applications. *C. R. Physique*, 6, 2005, p. 864–875.
- [79] C.A. Gueymard, D.R. Myers. *Solar radiation measurement: progress in radiometry for improved modeling solar radiation*. Springer, Berlin, 2008.
- [80] R. Perez, P. Ineichen, K. Moore, C. Chain, M. Kmiecik, R. George, F. Vignola. A new operational for satellite-derived irradiances: description and validation. *Solar Energy* 73, 2002, p. 307–317.
- [81] C. Schillings, H. Mannstein, R. Meyer. Operational method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data. *Solar Energy*, 2004, 76, p. 475–484.
- [82] C. Rigollier, M. Lefèvre, L. Wald. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77, 2004, p. 159–169.
- [83] S. Janjai, J. Laksanaboonsong, M. Nunez, A. Thongsathitya. Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment. *Solar Energy*, 78, 2005, p. 739–751
- [84] F.R. Martins, E.B. Pereira, S.L. Abreu. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. *Solar Energy*, 81, 2007, p. 517–528.
- [85] S. Janjai. A method for estimating direct normal solar irradiation from satellite data for a tropical environment. *Solar Energy*, 84(9), 2010, p. 1685–1695.
- [86] M. Paulescu et al. *Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation*. Green Energy and Technology, Springer-Verlag London, 2013.

- [87] J.R.S. Doorga, S.D.D.V. Rughooputh, R. Boojhawon. Modelling the global solar radiation climate of Mauritius using regression techniques. *Renewable Energy*, 131, 2019, p. 861-878.
- [88] K. Kaba, M. Sarigul, M. Avci, M. Kandirmaz. Estimation of daily global solar radiation using deep learning model. *Energy*, 162, 2018, p. 126-135.
- [89] C. M. Dos Santos, J.L. De Souza, R. A. Ferreira Junior, et al. On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil. *Energy*, 71, 2014, p. 388-398.
- [90] J.K. Page. The Estimation of Monthly Mean Values of Daily Total Short-Wave Radiation of Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Records for Latitudes 40°N—40°S. *Proc. UN Conf. New Sources of Energy*, 4, 1964, p. 378.
- [91] S. Benkaciali, K. Gairaa. Modélisation numérique des irradiations globale et diffuse au site de Ghardaïa. *Revue des Energies Renouvelables*, 11, N°1, 2008 p. 129 – 136.
- [92] H. Ögelman, A. Ecevit, E. Tasdemiroglu. A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. *Solar Energy*, 33 (6), 1984, p. 619-625.
- [93] R. Yacef, M. Belghanem, A. Mellit. Prediction of daily global solar irradiation data using Bayesian neural network: Acomparision study. *Renewable Energy*, 48, 2012, p. 148-154.
- [94] J. Almorox, C. Hontoria (2004). Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management* 45, 1529–1535.
- [95] K. Ulgen, A. Hepbasli. Comparison of solar radiation correlations for Izmir, Turkey. *International Journal of Energy Research*, 26, 2002, p. 413-430.
- [96] C. Rensheng, S. Lyu, K. Ersi, Y. Jianping. Estimating daily global radiation using two types of revised models in China. *Energy Conversion and Management* 47, 2006, p. 865–878
- [97] B.Y.H. Liu, R.C. Jordan. Daily Insolation on Surfaces Tilted Toward the Equator. *Trans. ASHRAE*, 67, 1961, p. 526–541.
- [98] M. Collares-Pereira, A. Rabl. The Average distribution of solar radiation correlation between diffuse and hemispherical. *Solar Energy*, 22, 1979, p. 155–166.
- [99] N.A, Elagib, M.G. Mansell. New approaches for estimating global solar radiation across Sudan. *Energy Conversion & Management*, 41, 2000, p. 419-434.
- [100] I.T Togrul, H. Togrul. Global solar radiation over Turkey: comparisonof predicted and measured data. *Renewable Energy*, 25, 2002, p. 55–67.

- [101] Z. Jin, W. Yezheng, Y. Gang. General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in china. *Energy Conversion and Management*, 46, 2005, p. 257-268.
- [102] G.H. Hargreaves, Z.A. Samani. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108, 1982, p. 223–230.
- [103] K. Bayat, S.M. Mirlatifi. Estimation of daily global solar radiation using regression models and artificial neural network. *Agriculture's Science and Natural Resources Magazine*, 16, 2009, p. 3.
- [104] R.K. Swartman, O. Ogunlade. Solar radiation estimates from common parameters. *Solar Energy*, 11, 1967, p. 170–172.
- [105] H.P. Garg, S.T. Garg. Prediction of global solar radiation from bright sunshine hours and other meteorological parameters. *Solar-India, proceedings on national solar energy convention*. New Delhi: Allied Publishers, 23, 1982, p.113-118.
- [106] B. Leckner. The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface elements of a model. *Solar Energy*, 20, 1978, p.143–150.
- [107] I.T. Togrul, E. Onat. A study for estimating solar radiation in Elazig using geographical and meteorological data. *Energy Conversion and Management*, 40, 1999, p.1577–1584.
- [108] B. Liu, R. Jordan. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *Trans. ASHRAE*, 1962, p.67.
- [109] J. Hay. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and tilted surfaces. *Solar Energy*, 23, 1979, p. 301-307.
- [110] J. Hay. Calculation of solar irradiances for inclined surface: Validation of selected hourly and daily models. *Atmosphere Ocean*, 1986, p.16-41.
- [111] J.E. Hay, J.A. Davies. Calculations of the solar radiation incident on an inclined surface. In: *Proceedings of First Canadian Solar Radiation Data Workshop Canadian Atmospheric Environment Service, Canada*, 1980, p. 59-72.
- [112] D.T. Reindl, W.A. Beckman, J.A. Duffie. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*, 45, 1990, p. 9–17.
- [113] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals. Modeling daylight and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44, 1990, p. 271-289.
- [114] A.M. Noorian, I. Moradi, G.A. Kamali. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. *Renewable Energy*, 33, 2008, p.1406-1412.

- [115] P.G. Loutzenhiser, H. Manz, C. Feltsmann et al. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surface for building energy simulation. *Solar Energy*, 81, 2007, p. 254-267.
- [116] A.K. Yadav, S.S. Chandel. Tilt and optimization to maximize incident solar radiation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 23, 2013, p.503-513.
- [117] H.R. Ghosh. Yadav, N.C. Bhowmik, M. Hussain. Determining seasonal optimum tilt angles, solar radiations on variously oriented, single and double axis tracking surfaces at Dhaka. *Renewable Energy*, 35, 2010, p.1292-1297.
- [118] F.S. Tymvios, C.P. Jacovides, S.C. Michaelides, C. Scouteli. Comparative study of Angström's and artificial neural networks' methodologies in estimating global solar radiation. *Solar Energy*, 78, 2005, p.752–762.
- [119] M. Benghanem, A. Mellit, S.N. Alamri. ANN-based modelling and estimation of daily global solar radiation data: a case study. *Energy Conversion Management*, 50, 2009, p.1644–1655.
- [120] E.S. Mostafavi, S.S. Ramiyani, R. Sarvar et al. A hybrid computational approach to estimate solar global radiation: an empirical evidence from Iran. *Energy*, 49, 2013, p. 204–210.
- [121] A. Will, J. Bustos, M. Bocco. On the use of niching genetic algorithms for variable selection in solar radiation estimation. *Renewable Energy*, 50, 2013, p. 168–176.
- [122] K. Mohammadi, S. Shamsirband, D. Petkovic, H. Khorasanizadeh. Determining the most important variables for diffuse solar radiation prediction using adaptive neuro-fuzzy methodology; case study: city of Kerman, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 53, 2016, p.1570–1579.
- [123] S. Benkacali, M. Haddadi, A. Khellaf, M. Guermoui. Evaluation of the global solar irradiation from the artificial neural network technique. *Revue des Energies Renouvelables*, 19, N°4, 2016, p. 617 – 631.
- [124] W.S. McCulloch, W. Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 1943, p.115–133.
- [125] D. Kriesel. *A Brief Introduction to Neural Networks*. Bonn, Germany: dkriesel.com, 2005.
- [126] L. Cherroun. *Les réseaux de neurons artificiel*. Department de mathématique et informatique, cours: apprentissage automatique, Université de Djelfa, 2011-2012.
- [127] D. O. Hebb. *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. New York, USA: Wiley, 1949.

- [128] V. Sivamadhavi, R.S. Selvaraj. Prediction of monthly mean daily global solar radiation using Artificial Neural. *Earth System Science*, 121, 2012, p.1501-1510.
- [129] M. T. Hagan, M. B. Menhaj. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6), 1994, p.989–993.
- [130] L. A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*. 8(3), 1965, p. 338–353.
- [131] W.V. Leekwijck, E.E. Kerre. Defuzzification: criteria and classification. *Fuzzy Sets and Systems*, 108(2), 1999, p.159 – 178.
- [132] M. Paulescu, P. Gravila, E.T. Paulescu. Fuzzy logic algorithms for atmospheric transmittances of use in solar energy estimation. *Energy Conversion and Management*, 49, 2008, p. 3691-3697.
- [133] Z. Ramedani, M. Omid, A. Keyhani. Comparative Study of Fuzzy System and Artificial Neural Networks in Predicting Solar Radiation in Tehran Province. *Journal of énergi trends in computing and information sciences*, 4, 2013, p.3691-3697.
- [134] M. Rizwan, M. Jamil, S. Kirmani, D.P. Kothari. Fuzzy logic based modeling and estimation of global solar energy using meteorological parameters. *Energy*, 2014, p.1-7.
- [135] A. Sfetsos, A.H. Coonick. Univariate and multivariate forecasting of hourly Solar radiation with artificial intelligence techniques. *Solar Energy*, 68,2000, p.169–78.
- [136] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, S. Shamsirband, D. Petkovic. Adaptive neuro-fuzzy approach for solar radiation prediction in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51,2015, p.1784–1791.
- [137] S.. Sumathi, L. A. Kumar, P. Surekha. *Solar PV and wind energy conversion systems*. Springer, 2015, p. 145.
- [138] J. S. R. Jang, ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet*. 23, 1993, p. 665–685.
- [139] T. Takagi, M. Sugeno. Derivation of fuzzy control rules from human operator’s control actions in Proc. IFAC Symp. Fuzzy Inform. Knowledge Representation and Decision Analysis, 1983, p. 55-60.
- [140] T. Takagi and M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern*, 15, 1985, p. 116 – 132.
- [141] G. Landeras, J.J. López, O. Kisi, J. Shiri. Comparison of Gene Expression Programming with neuro-fuzzy and neural network computing techniques in estimating daily incoming solar radiation in the Basque Country (NorthernSpain). *Energy Conversion and Management*, 62, 2012, p.1–13.

- [142] U. Yule. On a method of investigating periodicities in disturbed series, with special reference to wolfer's sunspot numbers. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1927, p. 226.
- [143] E. Slutsky. The summation of random causes as the source of cyclic processes. *Econometrica*, 5, 1927, p.105-146.
- [144] T.S. Viana, R. Rütther, F.R. Martins, E.B. Pereira. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. *Solar Energy*, 85, 2011, p. 486-495.
- [145] K. Lovegrove, J. Pye (2012). *Fundamental principles of concentrating solar power (CSP) systems. Principles*. Developments and Applications, Chapter, 2, 2012, p. 68-90.
- [146] R. Meyer, M. Schlecht, K. Chhatbar. Solar Resources for Concentrating Solar Power (CSP). *Concentrating Solar Power Technology, Principles, Developments and Applications*, Chapter 3, 2012, p. 68-90.
- [147] R. Marquez, C.F.M. Coimbra. Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis. *Solar Energy* 91, 2013, p. 327-336.
- [148] K.H. Ho, B.D. Iverson. Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power. *Renewable and Sustainable Energy*, 29, 2014, p. 835-846.
- [149] O. Behar, A. Kellaf, K. Mohammedi, M. Belhamel. Instantaneous performance of the first integrated solar combined cycle system in Algeria. *Energy Procedia*, 6, 2011, p.185-193.
- [150] O. Behar, A. Kellaf, K. Mohammedi. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 2013, p. 12-39.
- [151] O. Behar, A. Kellaf, K. Mohammedi, S. Ait-Kaci. A review of integrated solar combined cycle system (ISCCS) with a parabolic trough technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 2014, p. 223-250.
- [152] F. Linke. Transmissions-Koeffizient und Trübungs factor, *Beitr. Phys. Fr. Atmos.* 10, 1922, p. 91-103.
- [153] S. Benkaciali and K. Gairaa. Etude expérimentale du trouble atmosphérique au site de Ghardaïa. *Revue des Energies Renouvelables*.12, N°4, 2009, p. 649-654.
- [154] P. Ineichen, R. Perez. A new air mass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy*, 73, 2002, p. 51-157.
- [155] A. Hammer, D. Heinemann, C. Hoyer, et al. Solar energy assessment using remote sensing technologies. *Remote Sensing of Environment*, 86, 2003, p. 423-432.

- [156] M.J. Reno, C.W. Hansen, J.S. Stein. Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis. Sandia National Laboratory, New Mexico: Sandia report, California, 2012.
- [157] M. Koussa, D.S. Koussa, S. Hadji. Experimental investigation of simple solar radiation spectral model performances under a Mediterranean Algerian's climate, *Energy*, 70, 2016, p. 374-381.
- [158] F. Kasten. A simple parameterization of two pyr heliometric formulae for determining the Linke turbidity factor. *Meteorological Rundschau*, 33, 1980, p. 124-127.
- [159] J.D. Fox. Calculated Angstrom's turbidity coefficients for Fairbanks, Alaska. *J. Clim.* 7, 1994, p.1506-1512.
- [160] M. El-Metwally. Indirect Determination of Broadband Turbidity Coefficients over Egypt. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 119, Springer, 2013, p.71-90.
- [161] F. Kasten. T. Young. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl. Optic*, 28. 1989, p. 4735-4738.
- [162] A. Louche, M. Maurel, G. Simonnot, G. Peri, M. Iqbal. Determination of Angstrom's turbidity coefficient from direct total solar irradiance measurements, *Solar Energy*, 38, 1987, p. 89-96.
- [163] J.C. Grenier, C.A. De La Casiniere, T. Cabot. A spectral model of Linke's turbidity factor and its experimental implications. *Solar Energy* 52, 1994, p. 303-314.
- [164] J.C. Grenier, A. De La Casiniere, T. Cabot. Atmospheric turbidity analyzed by means of standardized Linke's turbidity factor. *American Meteorological Society*, 34, 1994, p.1449-1458.
- [165] A. Angstrom. Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus*, 13, 1961, p. 214-223.
- [166] A. Angstrom. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, 16, 1964, p. 64-75.
- [167] R. Rigollier, O. Bauer, L. Wald. On the clear sky model of the ESRA-European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, 68, 2000, p. 33-48.
- [168] J.C. Grenier, C.A. De La Casiniere, T. Cabot. A spectral model of Linke's turbidity factor and its experimental implications. *Solar Energy*, 52, 1994, p. 303-314.
- [169] J. Remund, L. Wald, M. Lefevre, T. Ranchin, J. Page. Worldwide Linke Turbidity Information. *Proceedings of the ISES Solar World Congress, Goeteborg, Sweden, 2003*, p. 16-19.
- [170] M. Saad, A. Trabelsi, M. Masmoudi, S.C. Alfaro. Spatial and temporal variability of the atmospheric turbidity in Tunisia. *Meteorol. Atmos. Phys.* 149, 2016, p. 93-99.

- [171] C.A. Gueymard. Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy*, 86, 2012, p. 2145-2169.
- [172] G.W. Paltridge, C.M.R. Platt. *Radiative Processes in Meteorological and Climatology*, Elsevier, New York, 1976, 318p, ISBN 9780444414441.
- [173] B.Y. Mark, G. Lawrence. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air; a simple conversion and applications. *American Meteorological Society*, 2005, Consulter: <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>.
- [174] M.M. Merad, I. Rougab, A. Cheknane, N.I. Bachari. Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques. *Revue des Energies Renouvelable*, 15, 2010, p. 451-463.
- [175] T.K. Van Heuklon. Estimating atmospheric ozone for solar radiation models, *Solar Energy*, 22, 1978, p. 63-68.
- [176] R.M. Goody, Y.L. Yung. *Atmospheric Radiation, Theoretical Basis*. 2nd edition. Oxford University. Press, 1989.
- [177] H.D. Kambezidis, A.D. Adamopoulos, D. Zevgolis. Case studies of spectral atmospheric transmittance in the ultraviolet and visible regions in Athens, Greece. I. total transmittance. *Atmospheric Research*, 54, 2000, p. 223-232.
- [178] J. Antonio, G. Trashorras, E.V. Ortiz et al. Attenuation processes of solar radiation. Application to the quantification of direct and diffuse solar irradiances on horizontal surfaces in Mexico by means of an overall atmospheric transmittance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2018, p. 93-106.
- [179] J. Polo. Solar global horizontal and direct normal irradiation maps in Spain derived from geostationary satellites. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 130, 2015, p. 81-88.
- [180] C.A. Gueymard. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detail theoretical performance assessment, *Solar Energy*, 74, 2003, p. 355-379.
- [181] C.A. Gueymard. SMARTS2, a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithm and performance assessment. in: Rep. FSECPF-270-295. Florida Solar Energy Center, Cocoa, 321, 1995, p. 638-1000.
- [182] C.A. Gueymard. Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 7, 2001, p. 325-346.

- [183] C. Gueymard, D. Myers, K. Emery. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing, *Solar Energy*, 73, 2002, p. 443-467.
- [184] C. Gueymard. Multilayer-weighted transmittance functions for use in broadband irradiance and turbidity calculations, in: R. Campbell-Howe, B. Wilkins-Crowder (Eds.), *Proceedings of Solar'96, Annual. Conference of the American Solar Energy Society, ASES, Asheville, 1996*, p. 281-288.
- [185] C. Gueymard. Turbidity determination from broadband irradiance measurements: a detailed multicoefficient approach, *J. Appl. Meteorol.* 37, 1997, p. 414-435.
- [186] C.A. Gueymard, J.D. Garrison. Critical evaluation of precipitable water and atmospheric turbidity in Canada using measured hourly solar irradiance. *Solar Energy*, 62, 1998, p. 291-307.
- [187] N.A. Engerer, F.P. Mills. Validating nine clear sky radiation models in Australia. *Solar Energy*, 120, 2015, p. 9-24.
- [188] P. Ineichen. A broadband simplified version of the Solis clear sky model. *Solar Energy*, 82, 2008, p.758-762.
- [189] C.A. Gueymard. REST2: high-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation validation with benchmark dataset. *Solar Energy*, 82, 2008, p. 272-285.
- [190] P. Ineichen. Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. *Solar Energy* 73, 2006, p. 468-478.
- [191] B. Molineaux, P. Ineichen, O. Neil. Equivalence of pyrheliometric and monochromatic aerosol optical depths at a single key wavelength. *Appl. Optic.* 37, 1996, p. 7008-7018.
- [192] J.A. Davies, D.C. McKay. Estimating solar irradiance and components, *Solar Energy*, 29, 1982, p. 55-64.
- [193] S. Younes, T. Muneer. Clear-sky classification procedures and models using a world-wide data base, *Applied Energy* 84, 2007, p. 623-645.
- [194] V. Badescu, C.A. Gueymard, S. Cheval, et al. Accuracy analysis for fifty-four clear sky solar radiation models using routine hourly global irradiance measurements in Romania. *Renewable Energy*, 55, 2013, p. 85-103.
- [195] P. Ineichen, R. Perez. A new air mass independent formulation for the Linke turbidity coefficient, *Solar Energy*, 73, 2002, p.151-157.
- [196] E.L. Maxwell. METSTAT-the solar radiation model used in the production of the National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Solar Energy*, 62, 1998, p. 263-279.

- [197] D.G. Stephenson. Equation for solar heat gain through windows. *Solar Energy*, 9, 1965, p. 81-86.
- [198] D.G. Stephenson. Tables of Solar Altitude, Azimuth, Intensity and Heat Gain Factors for Latitudes from 43 to 55 Degrees North. Tech. Paper N 243, National Research Council of Canada, Ottawa, National Research Council of Canada, 1967, 27p.
- [199] ASHRAE, ASHRAE Handbook Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York, 1972.
- [200] S. Barbaro, G. Cannistraro, C. Giaconia, A. Orioli. The ASHRAE clean sky model. An evaluation in the Mediterranean zone. *Sol. Wind Technol.* 5, 1988, p.111-116.
- [201] L. Kumar, A.K. Skidmore, E. Knowles. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 11, 1997, p. 475-497.
- [202] C.A. Gueymard, J.A. Ruiz-Arias. Validation of direct normal irradiance predictions under arid conditions: a review of radiative models and their turbidity-dependent performance, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 45, 2015, p. 379-396.
- [203] M. Daneshyar . Solar radiation statistics for Iran. *Solar Energy*, 21, 1978, p. 345-349.
- [204] G.W. Paltridge, D. Proctor. Monthly mean solar radiation statistics for Australia, *Solar Energy*, 18, 1976, p. 235-243.
- [205] V. Badescu, C.A. Gueymard, S. Cheval, et al. Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, p. 1636-1656.
- [206] A. Shavalipour, M.H. Hakemzadeh, K. Sopian, S.M. Haris. New formulation for the estimation of monthly average daily solar irradiation for the Tropics: a Case Study of Peninsular Malaysia. *Int. J. Photoenergy*, 13, 2013, p. 1-6.
- [207] V. Badescu. Verification of some very simple clear and cloudy sky models to evaluate global solar irradiance. *Solar Energy*, 16, 1997, p. 251-264.
- [208] A.B. Meinel, M.P. Meinel. *Applied Solar Energy, an Introduction*. Addison-Wesley, Reading, 2nd Ed., MA, 1976, 667p.
- [209] N.C. Majumdar, B.L. Mathur, S.B. Kaushik. Prediction of direct solar radiation for low atmospheric turbidity. *Solar Energy* 13, 1972, p. 383-394.
- [210] C.A. Gueymard. A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: towards a better bankability of solar projects. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 39, 2014, p. 1024-1034.

- [211] R. Dogniaux. Standardization of methods of measurement and calculation of climatological data for thermal and daylight applications. in: Proceedings of the Symposium on Solar Radiation. Smithsonian Institution, Washington, 1973, p. 50-60.
- [212] R. Dogniaux, M. Lemoine. Programme de calcul des éclairagements solaire énergétiques et lumineux de surfaces orientées et inclinées, in: Report C14, Institut Royal Météorologique de Belgique, Uccle, Brussels, 1976.
- [213] M.A. Madkour, M. El-Metwally, A.B. Hamed. Comparative study on different models for estimation of direct normal irradiance (DNI) over Egypt atmosphere. *Renewable Energy*, 31, 2006, p. 361-382.
- [214] P. Ineichen. Quatre Années de Mesures D'enseilllements à Genève. 256p. Thèse de doctorat : Physique : Université de Genève, 1983.
- [215] J.K. Page, M. Albuissou, L. Wald. The european solar radiation Atlas: a valuable digital tool. *Solar Energy* 71, 2001, p. 81-83.
- [216] K. Scharmer, J. Greif. The european solar radiation Atlas, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2000.
- [217] F. Kasten. The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. *Solar Energy*, 56, 1996, p. 239-244.
- [218] H.I. Rich, G.E. James, F.M. Carlos. Impact of local broadband turbidity estimation on forecasting of clear sky direct normal irradiance. *Solar Energy*, 117, 2015, p. 125-138.
- [219] SoDa : Solar radiation Data. Le centre d'Observation Impact Energie, Mines ParisTech
- [220] Q. Dai, X. Fang. A simple model to predict solar radiation under clear sky conditions, *Adv. Space Res.* 53, 2014, p. 1239-1245.
- [221] C. Gueymard. Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. *Solar Energy*, 51, 1993, p. 121-138.
- [222] C.P. de Brichambaut, C. Vauge. Le Gisement Solaire : évaluation de la ressource énergétique. Lavoisier, Paris, 230 p, 1982.
- [223] M.A. Atwater, J.T. Ball. A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations. *Solar Energy*, 21, 1978, p. 163-170.
- [224] M.A. Atwater, J.T. Ball (1981). Effects of clouds on insolation models. *Solar Energy*, 27, 1981, p. 37-44.
- [225] R.E. Bird, R.L. Hulstrom. A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. Solar Energy Research Institute (now NREL), Golden, CO, 1981, p. 642-761.

- [226] R.E. Bird, R.L. Hulstrom. Direct insolation models. *Transaction ASME Journal, Solar Energy Engineering*, 103, 1980, p. 182-192.
- [227] O. Behar, A. Kellaf, K. Mohammedi. Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate- the case of direct irradiance. *Energy Conversion and Management*, 98, 2015, p. 236-251.
- [228] J.A. Davies, D.C. McKay. Estimating solar irradiance and components. *Solar Energy*, 29, 1982, p. 55-64.
- [229] J.A. Davies, D.C. McKay, G. Luciani. M. Abdel-Wahab. Validation of models for estimating solar radiation on horizontal (B.23) surfaces. in: *IEA Task IX Final Report, Atmospheric Environment Service, Downsview, OT, 1988.*
- [230] R.E. Bird. A Simple solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. *Solar Energy* 32, 1982, p. 461-471.
- [231] Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, Z. Choulli, T. Ajzoul. Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 2016, p. 87-99.
- [232] K. Yang, G.W. Huang, N. Tamai. A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy*, 70, 2001, p. 13-22.
- [233] K. Yang, T. Koike, B.Ye. Improving estimation of hourly, daily, and monthly downward shortwave radiation by importing global data sets. *Agriculture and Forest Meteorology* 137, 2006, p. 43-55.
- [234] K. Yang, J. He, W. Tang, Q. Jun, C.K. Cheng. On downward shortwave and long-wave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau. *Agric. For. Meteorol.* 150, 2010, p. 38-46.
- [235] E.L. Maxwell. METSTAT d the solar radiation model used in the production of the National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Solar Energy*, 62, 1998, p. 263-279.
- [236] G.G. Rodgers, C.G. Souster, J.K. Page. The development of an interactive computer program SUN1 for the calculation solar irradiances and daily irradiations on horizontal surfaces on cloudless days for given conditions of sky clarity and atmospheric water content. In: *Report BS 28, Department of Building Science, University of Sheffield, UK, 1978.*
- [237] R.W. Mueller, K.F. Dagestad, P. Ineichen, M. Schroedter, et al. Rethinking satellite based solar irradiance modelling--the SOLIS clear sky module, *Remote Sens. Environ.* 91, 2006, p. 160-174.

- [238] K. Gairaa, A. Khellaf, Y. Messlem, F. Chellali. Estimation of the daily global solar radiation based on Boxe Jenkins and ANN models: a combined approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 2016, p. 238-249.
- [239] K. Dahmani, R. Dizene, G. Notton, et al. Estimating of 5 Min time: step data of tilted solar global irradiation using ANN (Artificial Neural Network) model. *Energy*, 70, 2014, p. 374-381.
- [240] V. Bahel, R. Srinivasan, H. Bakhsh. Statistical comparison of correlation for estimation of global horizontal solar radiation. *Energy*, 12, 1987, p. 1309-1316.
- [241] K. Bakirsi. Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. *Energy*, 34, 2009, p. 485-501.
- [242] V. Badescu, C.A. Gueymard, S. Cheval. Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, p. 1636-1656.



Evaluation of direct solar irradiance from 18 broadband parametric models: Case of Algeria

Saïd Benkaciali ^{a, b, *}, Mourad Haddadi ^a, Abdellah Khellaf ^c

^a Département d'électronique, Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque, LDCCP, Ecole Nationale Polytechnique, B.P. 182, El Harrach, Algiers, Algeria

^b Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria

^c Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 16340, Algiers, Algeria

ARTICLE INFO

Article history:

Available online 23 February 2018

Keywords:

Clear sky
Weather parameters
Turbidity formulas
Broadband direct solar irradiance models

ABSTRACT

In this work, eighteen clear sky broadband models for estimating the direct irradiance at normal incidence (DNI) have been investigated. The used solar data has been recorded from two sites of different weather conditions; Bouzaréah site (Algiers), located on Mediterranean coast and Ghardaïa site, about 600 km, southern of Algiers in the desert region. Three input parameters were measured by two weather devices, namely; hygrometer and manometer systems for calculating the temperature, relative humidity and local pressure. In addition, two Pyrheliometer devices were fixed on the sun-tracker system for measuring the DNI. Moreover, three statistical indicators were used, in the goal to make comparison between the estimated and measured DNI results. Accordingly, the relative bias (rb), the relative root mean square error (rRMSE), the coefficient of determination (r^2), and the relative error (re) have been calculated. Results obtained from both sites, show that the rb and rRMSE of MAC, Yang, Dogniaux, and ESRA models are typically smaller than 2%. In other hand, a further consideration has been taken to select the best model by evaluating the relative error between the measured and estimated DNI versus the solar elevation angle. The results averred that the ESRA, Dogniaux, MAC and Yang models (in decreasing of performance) performed better than the remaining models, with the rRMSE of 0.443, 1.066, 1.237 and 1.283 for Algiers, and 0.390, 1.100, 1.223 and 1.443 for Ghardaïa. This fact is important to take into account, in the case where measured data are not available, for the selection of the most suitable locations for the installation of the future concentrating solar power plants in Algeria.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Solar radiation is one of the most important sustainable energy sources. It can be transformed into heat or electric current. The solar radiation conversion is currently being adopted by many applications in different fields, like solar building, solar heating, heat pumps, air conditioning, agriculture, space ... etc. Nowadays, the world is focused towards the application of renewable source, in particular the solar potential because it is free and environmental friendly. In this view, many countries adopted different perspective in short and long-term programs to develop and promote the solar erections. Accordingly, Algeria has launched an ambitious program

for the period extending from 2015 until 2030, in the goal to profit from its renewable energy sources, especially the solar energy [1]. Within the first phase, between 2011 and 2013, pilot projects were carried out, on renewable energy field, whereas, a total power nexus 110 MW has been installed. In the period from 2014 to 2015, has been reserved to the deployment of the national program at industrial level. Hence, by the year 2015, a total capacity of nearly 650 MW has been installed. The following phase, between 2016 and 2020, should be the phase of a large-scale deployment. Thus, a future goal has been set up to install a total power of approximately 2600 MW. In accordance, about 22000 MW of renewable energy power plants will be installed by the end of year 2030. Consequently, Algeria is expected to produce about 40% of its electric needed power from renewable energy, by the year 2030, where, the most quantity will be generated from Concentrating Solar Power [2–4]. In this view, the evaluation of direct, diffuse and global solar irradiances components is considered the main way for solar

* Corresponding author. Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, BP 62 Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Algiers, Algeria.

E-mail address: sbenkaciali@gmail.com (S. Benkaciali).

engineering applications. Thus, the precise acquired solar data are necessary for an optimal exploitation. In this work, we interested on the direct irradiance at normal incidence (DNI), which is mainly used in both CSP technology and High Concentrating Photovoltaic Systems (HCPV) [5–12]. However, three known methods to determine the DNI, by either the ground measurements, satellite imagery, or by the combination of the both methods. Nevertheless, the number of the ground solar measurement stations is very limited due to the high cost of the measuring devices. Within this frame, many researchers were focused on the prediction study of the solar radiation components through empirical methods [13–21]. As well as on evaluation of spectral and broadband solar irradiance models through simple or complex available astronomical and meteorological parameters, namely: the sun elevation angle, temperature, relative humidity, water vapor content, ozone layer thickness, Linke and Angstrom turbidity factors, the different transmittance and absorptance coefficients, are commonly studied. Therefore, several researchers brought predictive solar radiation models, based on different measured and calculated meteorological data. For this end, and according to various transmittance and absorptance coefficients, recorded from different atmospheric scanning, three Iqbal models called A, B, and C have been used to predict the solar irradiance components (e.g., direct, diffuse, and global) [22]. Following the comparison of these models and the measured data from Carpentras, authors shown that model B has a better performance in predicting the diffuse and global irradiance. Accordingly, it was concluded that the model A appears more appropriate for direct irradiance. Through statistical analysis of broadband global, and DNI, Engerer and Mills [23] tested eleven clear sky models using the datasets collected in 20 sites at Australia. They concluded that for the global irradiance, the Solis [20], ESRA [21] and REST2 [24] models perform best, while the Iqbal, ESRA and REST2 are more performers for estimating the DNI. To predict three radiation components (diffuse, direct, and global), from clear sky eight models, Ineichen [19] used three statistical tests, such as Mean Bias Error (MBE), Root Mean Square Error (RMSE), and Standard Deviation (SD). They concluded that Solis [20], Molineaux [13], and ESRA [21] models, presented the best estimating capacities. Davis and McKay assessed the performance of two broadband models, such as a version of the MAC model which uses total cloud information and Rietveld's sunshine model, using data for six Canadian stations. They showed that the Rietveld's model gives lower accuracy than the MAC model [25]. Eighteen broadband clear sky solar radiation models were assessed and compared to the datasets from five sites in different climates [26]. They used the following evaluating models: Mean Bias Difference (MBD) and Root Mean Square Difference (RMSD). Additionally, uncertainty measurements of the 95% confidence level were included. It was shown that among the tested models, five models offer most accuracy, such as REST2, Solis, Hoyt, and Iqbal-C, with 4% and 5% or less, corresponding to MBD and RMSD, respectively. An investigation on the performance of 21 broadband clear sky solar DNI models, were assessed by Gueymard [27], by using several transmittance and irradiance values, provided from SMARTS code [28–30]. It has been averred that Multilayer-weighted transmittance model (MLWT2) developed by Gueymard [31–33], provided best performance. To estimate direct solar irradiance, seven broadband models were investigated and compared upon ground direct irradiance measurements, collected from four sites in Egypt [34]. The obtained results provided good accuracy of the MLT1, LW2, REST, and Yang models, whereas, the determination coefficient was nearly 1.0. In order to test four models, namely: the meteorological radiation model (MRM) [35], ESRA model, Yang [36], and REST2 [24], Younes and Muneer [37] used hourly data, measured from six sites in Spain, India and United Kingdom. Following the interpretation of the obtained results, it has been

averred that the clear sky MRM, REST2 and Yang models (in order performance) have the best performances. The global solar irradiance has also been put into prediction study, where, 54 models have been examined by Ref. [38], upon two Romanian site measurements, by mean of a ranking method of performance. They concluded that Ineichen-Perez [39], ESRA, REST2 and METSTAT [40] models yielded the best results. The model that has recently been developed to predict the broadband irradiance (GHI) and direct irradiance at normal surface (DNI), and diffuse horizontal irradiance (DHI) at ground level for cloud-free skies, is the McClear model [41]. Exploiting the atmospheric properties provided by the EU-funded Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), the model McClear has been validated by Lefèvre [42] in desert conditions with three stations (BEE, SBO, and YOT) from Israel Meteorological Service (IMS). It has been also validated in the Australian desert [41]. The authors were showed the robustness of the McClear model.

Adding to the recited works, the present work deals with the performance of eighteen parameterization models in estimating the DNI under cloudless sky conditions, based on the measured and calculated input parameters, such as the solar elevation angle, local pressure, water vapor, temperature, different transmittance coefficients, and atmospheric turbidity factors recorded from two radiometric stations, installed at the Renewable Energy Development Center (Algiers) and the Applied Research Unit for Renewable Energies (Ghardaïa). Then, the accuracy of achieved models has been evaluated in comparison with ground measurements, using four statistical indicators. The best models are also compared them with the reference model (Gueymard code).

This paper is organized as follows: section 2 presents a description of datasets and locations. Section 3 provides astronomical and weather formulas adopted. All models are briefly described in the fourth section. Results and discussions were reported in section 5. Finally, the last section was devoted to the conclusion of the work.

2. Characteristics of sites and datasets overview

As it is mentioned previously, the used solar datasets were assembled from two different climatic sites: The Development Center on Renewable Energies (CDER), Algiers and Applied Research Unit for Renewable Energies (URAER), Ghardaïa. The measurements were recorded by two device stations, within the coordinates (36°47'54" N, 3°1'59" E, 345 m and 32°23'10.23" N, 3°46'49.52" E, 463 m), respectively. Algiers, the lieu of the first experimental field is located on the Mediterranean coast, northern part of the country and is characterized by a moderate climate. However, Ghardaïa is a desert region, located in the southern part, about 600 km from the coast and is characterized by semi-arid climate. Furthermore, both the two regions have an astonish solar potential, where the recorded yearly accumulated DNI and global solar irradiations range from 2000 to 2100 kWh/m², 1800–1850 kWh/m² in Algiers, and 2100–2200 kWh/m², 2000–2100 kWh/m² in Ghardaïa. In terms of irradiance, the maximum for each day of Direct Normal Irradiance (DNI) and maximum of global horizontal irradiance around 850 W/m² and 1000 W/m² for Algiers, as shown in Fig. 1. For Ghardaïa, the maximum of direct and global irradiances, received on normal and on horizontal surfaces were about 950 W/m² and 1100 W/m², respectively, which is clearly noticed in Fig. 2. Moreover, for Ghardaïa site, due to the high intensity of the DNI and the high frequency of clear days, it has been observed that the DNI signal is almost stationary, as it is illustrated in the Fig. 1a. In addition, it can be seen that the rate of cloudy days is more important in Algiers than the Ghardaïa, as it is confirmed by the

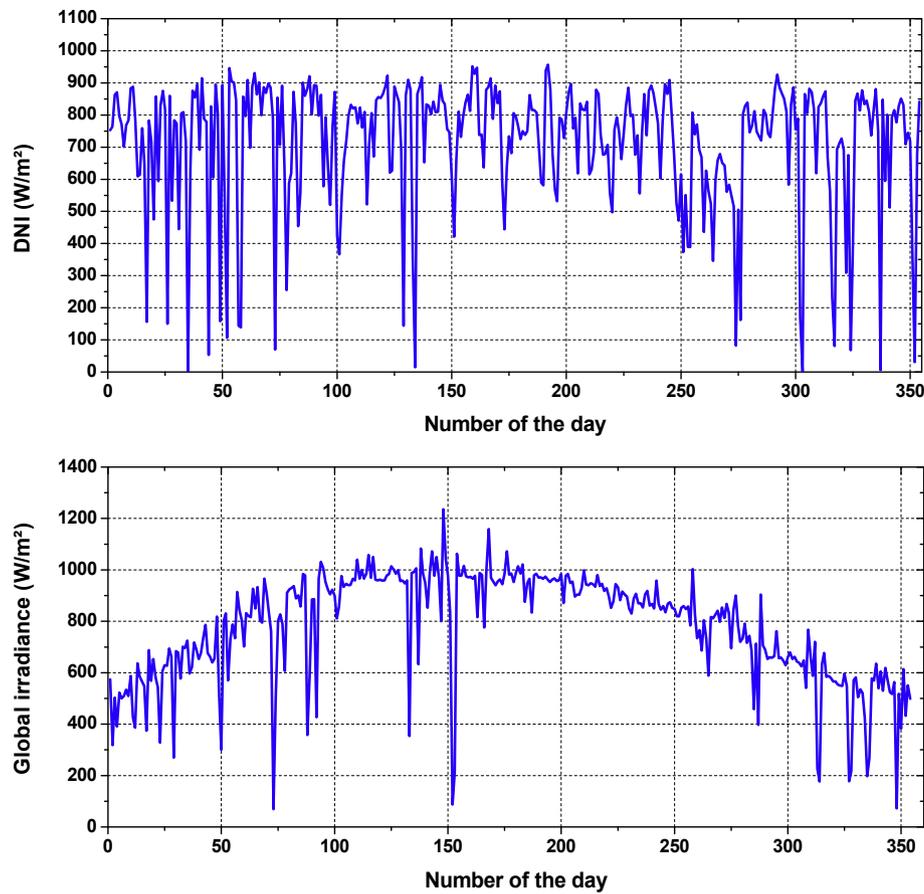


Fig. 1. a) The daily maximum DNI, recorded in Algiers site. b. The daily maximum global irradiance, recorded in Algiers site.

Figs. 1b and 2b. Fig. 3 visualizes the histogram of monthly average of daily sunshine duration for each site. Knowing that the sunshine duration which is defined as the period during which direct solar irradiance exceeds 120 W/m^2 according to World Meteorological Organization (WMO), and expressed in hours (h).

Regarding Fig. 3, Ghardaïa presents the more important sunshine duration with a monthly daily average varies from 5 h (h) until 14 h, while in Algiers, it is between 4 h and 10 h. It is noted that in both sites, the maximum of sunshine duration corresponds to the months of June and July, about 9.71 h and 10.5 h for Algiers and 11.81 h and 12.84 h for Ghardaïa. Furthermore, it seems that the sunshine duration drops suddenly from 12.84 h in June to 7.45 h in August at Ghardaïa, because at this time of the year, the frequencies of overcast skies are very important.

Following the investigation of two-year solar ray measurements, recorded from Algiers and Ghardaïa sites, during the years 2014 and 2015, about 1576 and 638 DNI values have been selected, respectively. Accordingly, the best values were chosen from 11 to 22 clear sky days, selected from the two sites respectively. Thus, the typical sunny days have been taken upon the real visual follow up of the daily solar irradiation plots.

Otherwise, the DNI measurements were carried out by the DR01 and Kipp-Zonen pyr heliometric sensors. The calibration is typically less than 2%, as shown in Table 1. Additionally, the pressure, temperature and relative humidity have been measured by mean manometer and hygrometer. For Algiers, the weather data are measured with the devices type EKO, for more precision, see Ref. [49], while in Ghardaïa, these parameters have been measured from Campbell Scientific CS 100 barometric pressure sensor and Campbell CS 215 hygrometer. All measurements have been made

with an interval of 5 min for Algiers and 10 min for Ghardaïa site. The unavailable parameters have been evaluated by empirical formulas, as the water vapor, Angström turbidity, ozone thickness, broadband atmospheric optical depth and the Linke turbidity factor, which are presented in the following section.

3. Astronomical and weather models

Throughout this section, some astronomical and weather expressions are presented. They were used as inputs, such as solar constant I_{oc} (in W/m^2), sun elevation angle h (in degree), Linke turbidity factor T_L (dimensionless), Angstrom's turbidity coefficient β (dimensionless), precipitable water in vertical column w (in cm), and vertical ozone layer thickness I_{oz} (in atm-cm).

3.1. Astronomical input parameters

3.1.1. Solar constant

The solar constant is defined as the yearly mean of the solar extraterrestrial radiation received by a normal surface to the sun rays, I_{oc} (called also energy flux). The value 1367 W/m^2 was adopted by World Radiation Center (WRC), as indicated by several publications [43,44]. However, the variation the earth-sun distance, which is influenced by the earth's orbital eccentricity [43–45]. Thus, based on the mentioned correction, the solar constant equation is then rectified as a function of the day number (n_j), as follows:

However, the effect of earth's orbital eccentricity allows to introduce the solar extraterrestrial radiation, received by a normal surface to the sun rays, I_0 [43–45], as presented below

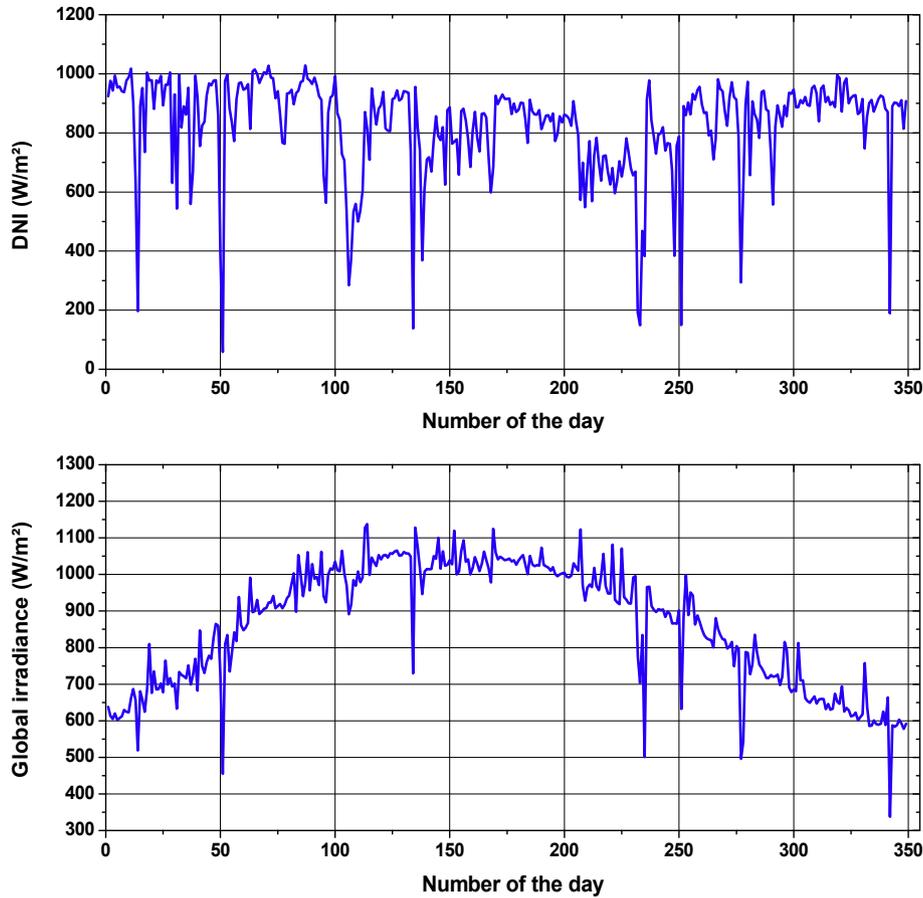


Fig. 2. aThe daily maximum DNI, recorded in Ghardaïa site. b. The daily maximum global irradiance, recorded in Ghardaïa site.

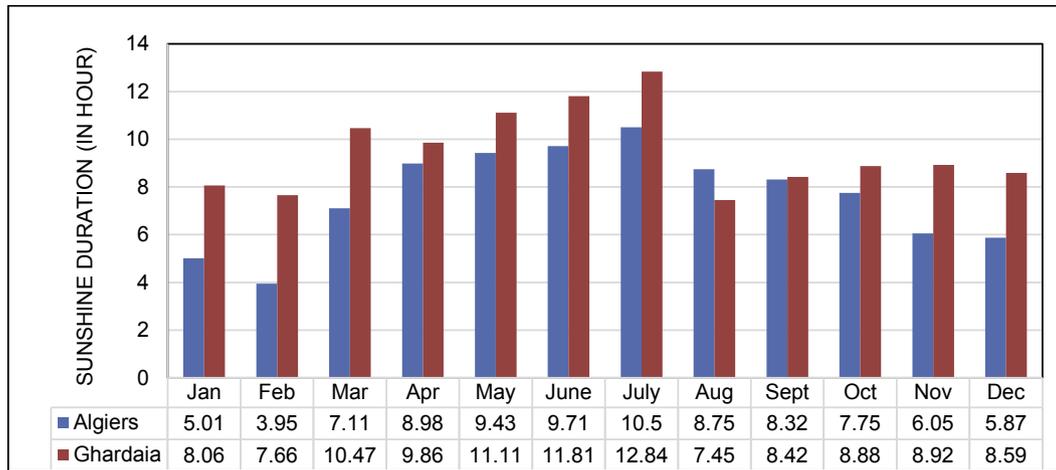


Fig. 3. Histograms of monthly average sunshine duration for each site.

$$I_o = I_{oc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n_j}{365} \right) \right)$$

(1)

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

(2)

3.1.2. Solar declination

The solar declination (δ) is the angle between the sun incident radiation and the equatorial plane of the earth, which is comprised between $-23.45 \leq \delta \leq 23.45$. It can be calculated by the simple following equation [43,44].

3.1.3. Hour angle

The hour angle ($\Delta\omega$) is the angle between the meridian plane passing through the sun center and the vertical plane on the site. The angle is given versus true solar time (TST) [44,45] by Eq. (3).

Table 1
Technical specifications for Kipp & Zonen (CHP1) and Hukseflux Pyrheliometer (DR01).

Pyrheliometer	Kipp & Zonen CHP1	Hukseflux DR01
ISO classification	First Class	First Class
Response time (95%)	5 s	18 s
Non-stability (change/year in percentage of full scale)	±0.5%	<1%
Temperature dependence of sensitivity	±0.5%	<0.1%/°C
Full opening view angle	5° ± 0.2°	5°
Slope angle	1° ± 0.2°	1°
Temperature range	−40 °C to +80 °C	−40 °C to +80 °C
Spectral range	200 to 4000 nm	200 to 4000 nm
Sensitivity	7.82 μV/W/m ²	10 μV/W/m ²
Irradiance range	0 to 4000 W/m ²	0 to 2000 W/m ²

$$TST = t_l - 1 + \lambda/15 + \Delta T/60 \quad (3)$$

$$\Delta\omega = 15(12 - t\nu) \quad (4)$$

where t_l , ΔT and λ are: the local time, equation of time and local longitude, respectively.

3.1.4. Solar elevation

The solar elevation is the angle formed by the horizontal surface with the sun-earth direction [44,45]. In particular, the value of $h = 0$, is at sunrise and sunset, and it varies between 90° (zenith) and −90° (nadir). Its expression is a function of latitude (φ), declination (δ), and hour angle ($\Delta\omega$), as follows:

$$\sinh = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\Delta\omega \quad (5)$$

3.1.5. Weather formulas

3.1.5.1. Linke turbidity factor and Angstrom coefficient turbidity. The Linke turbidity factor, T_L [46], is defined as the number of clean dry atmosphere (without aerosols particles) reproducing the attenuation of extraterrestrial radiation caused by real atmosphere layers, i.e., Rayleigh scattering, absorption by the water vapor and the absorption and scattering by the aerosol particles, and ozone absorption, as cited in Refs. [39,47–49].

However, the Linke turbidity factor can be expressed versus solar extraterrestrial irradiance, direct normal irradiance, altitude corrected air mass, (M_a) and broadband actual optical thickness (δ_R), as it is shown by Eqs. (6)–(8) [18,50–55].

$$T_L = \frac{1}{\delta_R M_a} \log \frac{I_0}{D_m} \quad (6)$$

$$M_a = M_r \left(\frac{p}{1013.25} \right) \quad (7)$$

$$\delta_R = \left(6.5567 + 1.7513 M_a - 0.1202 M_a^2 + 0.0065 M_a^3 - 0.00013 M_a^4 \right)^{-1} \quad (8)$$

where, M_r , the relative air mass [41]. D_m is the measured DNI

$$M_r = \frac{1}{\sinh + 0.5052(6.07995 + h)^{-1.6354}} \quad (9)$$

Another important turbidity factor affecting the DNI is the Angström turbidity (β). It defines, the amount of atmospheric aerosols which is expressed by Angström formulas [56–58]. The experimental determination of turbidity factor requires spectral direct normal irradiance measurements, through two wavelengths

by using a sun photometric station [43]. Since the measurement systems are not available, evaluated results can be obtained by the Linke turbidity versus the water vapor and Angström turbidity factor, as adopted in Refs. [21,54,59,60]. Through this contribution, the empirical formulas have been used following the form presented by Eq. (10) considering that the water vapor has been evaluated according to Eq. (12) [61]. Moreover, the Angström coefficient turbidity (β) can be obtained by combining Eq. (6) and Eq. (10), presented in below [26].

$$T_L = 0.8662 \times \left[\left(1.8494 + 0.2425 w - 0.0203 w^2 \right) + \left(15.427 + 0.3153 w - 0.0254 w^2 \right) \beta \right] \quad (10)$$

3.1.5.2. Precipitable water relative optical-path length. The pressure corrected relative optical path length of precipitable water (U_w) is defined as the product of two parameters; precipitable water and relative optical air mass [43], as follows:

$$U_w = w \cdot M_r \quad (11)$$

The precipitable water vapor measurements were not recorded on-site, due to deprived device, but they are evaluated from the measured relative humidity (η), measured atmospheric pressure (p), measured temperature (t), and estimated dew temperature (t_d) [61]. The latter parameter is the temperature at which airborne water vapor is condensed to form liquid dew [62]. Thus, the precipitable water can be evaluated by below expressions:

$$w = 0.1 \left(\frac{100 p}{1013.25} \right)^{3/4} \sqrt{\frac{273}{t + 273}} \exp(2.2573 + 0.05454 \cdot t_d) \quad (12)$$

$$t_d = \left(t - \frac{100 - \eta}{5} \right) \left(\frac{t + 273}{300} \right)^2 - 0.00135(\eta - 84)^2 + 0.35 \quad (13)$$

t , p , η and t_d are given in °C, Pa, %, and °C, respectively.

3.1.5.3. Ozone relative optical path length. The ozone relative optical path length is defined from the vertical ozone layer thickness (in atm-cm), and relative optical air mass [43,63]:

$$U_{oz} = I_{oz} \cdot M_r \quad (14)$$

For any location, throughout the earth's northern hemisphere, the vertical ozone layer thickness [64] can be obtained by mean of Eq. (15):

$$I_{oz} = \frac{1}{1000} \left\{ 235 + [150 + 40 \sin(0.9856 (n_j - 30)) + 20 \sin(3 (\lambda + 20))] \sin^2(1.28 \varphi) \right\} \quad (15)$$

where, λ is the local longitude.

4. Broadband irradiance models

Eighteen broadband solar radiation models under clear sky have been reviewed, in the literature. The majority of these models have been used to estimate the DNI, diffuse and global solar irradiances from different parameters, similar to the previously mentioned models [26,65–67].

In our case study, we pay more attention to DNI model [3,27]. Nevertheless, they are classified into two groups: simple and complex models. The simple models include only the astronomical inputs, such as extraterrestrial irradiation, solar elevation, and the other measured parameters (i.e., temperature, relative humidity and local pressure). The complex models are based on the turbidity and transmittance coefficients. For convenience, the required input parameters are assembled in Table 2.

4.1. Ashrae model

It is a mathematical model widely used by the researcher's community in order to evaluate solar heat gains and cooling loads in buildings. This model can be exploited for the purpose of modeling solar components (i.e., direct, diffuse, and global) under clear sky conditions. Historically, the model has been appeared in the literature, during the decades 1950 and 1960 [43,68], and then examined by different authors [26,38,66,67]. Then after, it has been developed by Stephenson [69,70] and also described in Ref. [71]. For predicting the DNI, the model is presented, below:

$$D = A \cdot \sin h \cdot \exp\left(-\frac{B}{\sin h}\right) \quad (16)$$

where A, the apparent extraterrestrial irradiance without atmospheric mass [43]. B is the broadband value of the atmospheric extinction coefficient [43,72].

Table 2

involves the main considered input parameters, used by the different models are namely; Solar elevation h , local altitude z , Linke turbidity T_L , water vapor w , atmospheric ozone content I_{oz} , measured local pressure p , Angstrom turbidity β , measured temperature t , and total broadband aerosol optical depth k_a .

N°	Models	h	z	T_L	β	k_a	w	I_{oz}	p	t
1	Ashrae	•								
2	Kumar	•								
3	DPP	•								
4	Meinel	•	•							
5	Majumdar	•					•		•	•
6	Dogniaux	•		•	•					
7	Ineichen-Perez	•	•	•	•					
8	ESRA	•		•	•					
9	Heliosat-1	•		•	•					
10	EEC	•		•	•					
11	Perrin de Brichambaut	•		•			•			
12	Atwater	•				•	•	•		•
13	MAC	•			•		•		•	•
14	Bird & Hulstrom	•			•	•	•	•	•	•
15	Yang	•			•		•	•		•
16	METSTAT					•	•			•
17	Solis	•			•	•	•		•	•
18	Rodgers	•				•	•		•	•

4.2. Kumar model

It is also a simple model, which can be deduced only from two input parameters [73], and reviewed by Refs. [26,66].

Based on the Bouger's low, the Kumar model is presented by the empirical equation (Eq. (17)), versus the absolute air mass M_a (Eq. (7)) and solar extraterrestrial radiation I_o (Eq. (1)).

$$D = 0.56 \cdot I_o \cdot \sin h \cdot [\exp(-0.65M_a) + \exp(-0.095M_a)] \quad (17)$$

4.3. Daneshyar –Paltridge-Proctor (DPP)

$$D = 950 \sinh \cdot [1 - \exp(-0.075h)] \quad (18)$$

Based only on solar elevation angle (h), the model was originally developed by Paltridge and Proctor and corrected by Daneshyar [74,75]. It has been reviewed by Badescu [67], and also tested in Refs. [76,77]. For clear sky conditions, the DNI model is then expressed, as follows:

4.4. Meinel model

The DNI model has been developed by Meinel [78], under cloudless conditions by using solar data collected in the Mojave Desert, California. The model has been investigated by Ref. [66]. The model is written as function of local altitude and solar elevation parameters, and is illustrated by the following expression (19).

$$D = I_o \sin h \cdot \left[0.14z + (1 - 0.14z) \exp\left(-0.357(\sinh)^{-0.678}\right) \right] \quad (19)$$

where, z is local altitude (in km).

4.5. Majumdar model

Based on the Beer's law, this model has been developed by Majumdar [79] for low turbidity atmospheric conditions, in the goal to estimate the solar DNI upon three weather parameters, such as local pressure (in mbar), relative air mass (M_r), and precipitable weather (in cm). The model has been reviewed by Refs. [66,80]. The equation can be written as:

$$D = I_o \sinh \left(0.8644^{pM_r/1000} \cdot 0.8507^{(wM_r)^{0.25}} \right) \quad (20)$$

4.6. Dogniaux model

$$D = I_o \exp(-M_r \tau_c T_L) \quad (21)$$

To predict the DNI, three weather parameters have been introduced into the Dogniaux model [81,82]. It consists of the Linke turbidity factor, relative air mass and one parameter called the clean-dry atmosphere optical depth, τ_c . It is reviewed by Refs. [27,34]. Thus, the DNI is given by Eq. (21)

The clean-dry atmosphere optical depth is given by:

$$\tau_c = 0.124 - 0.0285 \log M_a \quad (22)$$

4.7. Ineichen-Perez model

It is also a clear sky model, which are developed by Ineichen and Perez [39], and reviewed by some authors [23,66,80]. For the model, the altitude (in meter), air mass, and Linke turbidity coefficient are designed as input parameters. DNI is expressed as:

$$D = b I_0 \sinh \exp(-0.09 M_a (T_L - 1)) \quad (23)$$

Where

$$b = 0.664 + [0.163/\exp(z/800)] \quad (24)$$

4.8. ESRA model

$$D = I_0 \sinh \exp(-0.8662(T_{L2} M_a \delta_R)) \quad (25)$$

The complex clear-sky model has been developed in the framework of the new digital European Solar Radiation Atlas [83,84], and presented by Ref. [21], which has been reviewed by Ref. [67]. It considers the Linke turbidity factor at air mass 2, T_{L2} [26,85,86], and the Rayleigh optical depth δ_R (Eq. (8)) as essential coefficients for predicting the solar DNI on horizontal surface

$$T_{L2} = T_L/0.8662 \quad (26)$$

4.9. Heliosat-1 model

This complex model has been developed within the framework of the European Heliosat project. The Heliosat-1 model is derived from satellite data resources, such as SoDa (<http://www.soda-pro.com>). Some researchers have detailed the methodology [26,87]. Hence, the DNI is estimated as a function of optical depth of a clean atmosphere parameter (σ), and the Linke turbidity factors, as follows:

$$D = I_0 \sinh \exp(-M_a \sigma T_L) \quad (27)$$

Where,

$$\sigma = (6.62960 + 1.7513 M_a - 0.1202 M_a^2 + 0.0065 M_a^3 - 0.00013 M_a^4)^{-1} \quad (28)$$

4.10. EEC model

$$D = I_0 \sinh \exp(-M_r T_L / (0.9 M_r + 9.4)) \quad (29)$$

This clear sky model has been developed by joint efforts of participants of the European countries (member of the European Economic Countries). It is based on the formulation applying the Linke turbidity factor and the relative air mass (M_r), as studied by Ref. [17], which is written as follows:

4.11. Perrin de Brichambaut model

The model has been developed by Ref. [88], and reviewed by Ref. [27]. It provides the estimated DNI, based on the transmittance and absorptance expressions resulting of different attenuation processes of DNI: The Rayleigh (τ_r) and aerosol (τ_{ae}) transmittances, as well as the ozone (a_{oz}), water vapor (a_w) and the absorptance of atmospheric gases, (a_g). The DNI and the input coefficients are given as follows:

$$D = I_0 \sinh \tau_r \tau_{ae} (1 - a_{oz} - a_w - a_g) \quad (30)$$

It can be presented as in below

$$\tau_{ae} = \exp(-1.4327 M_r \beta) \quad (31)$$

$$a_{oz} = 0.015 + 0.024 M_r I_{oz} \quad (32)$$

$$a_w = 0.1 + 0.03 \log(M_r w) + 0.002 \log^2(M_r w) \quad (33)$$

$$a_g = 0.013 - 0.0015 \log(M_r w) \quad (34)$$

$$\tau_r = \exp(-0.031411 - 0.064331 M_a) \quad (35)$$

where, M_a , β , w , and I_{oz} are the relative optical mass, Angström's turbidity coefficient, precipitable water, and vertical ozone layer thickness, respectively (section 3).

4.12. Atwater model

It is a complex model which is suitable for overall sky conditions (cloudless or overcast sky). It was developed and published by Refs. [89,90], and reported in the Bird and Hulstrom works [14,91]. Three transmittances and one absorptance parameters are introduced as inputs for estimating the DNI, such as τ_g , τ_r , τ_{ae} , and a_w , which are called the transmittance after the absorption of permanent gases, transmittance after scattering Rayleigh, transmittance after aerosol attenuations, and absorptance due to the water vapor. In our case, the term implying the cloudy sky is omitted, so the coefficient expressed by Atwater and Ball is made equal to 1 [90]. The DNI becomes

$$D = I_0 \sinh (\tau_g \tau_r - a_w) \tau_{ae} \quad (36)$$

The different input parameters are computed by:

$$\tau_{ae} = \exp(-k_a M_r) \quad (37)$$

$$a_w = 0.077 \left(w/M_a \right)^{0.3} \quad (38)$$

$$\tau_r \tau_g = 1.041 - 0.15 \sqrt{\frac{949 \cdot 10^{-5} p + 0.051}{M_a}} \quad (39)$$

k_a is called average broadband aerosol optical depth. It is specifically defined from the spectral optical depths ($k_{a\lambda}$) at 0.38 and 0.5 μm of the wavelength [3,27,43], as follows:

$$k_a = 0.2758 k_{a\lambda=0.38} + 0.35 k_{a\lambda=0.5} \quad (40)$$

Expression of the spectral optical depth is expressed from the Angstrom law [58] by:

$$k_{a\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (41)$$

Upon the average of the wavelength exponent (α) suggested by Angstrom about 1.3 and using the both Eq. (40) and Eq. (41), the total broadband aerosol optical depth is given by the following equation:

$$k_a = 1.832 \beta \quad (42)$$

4.13. MAC model

It has been suggested by Refs. [25,92] and described by Ref. [43], and after tested in Refs. [3,17,23,27,87], in order to evaluate the solar irradiance, in particularly the DNI. It can be related to several coefficients, as indicated below:

$$D = I_0 \sinh(\tau_{oz}\tau_r - a_w)\tau_{ae} \tag{43}$$

$$a_w = \frac{2.9U_w}{(1 + 141.5U_w)^{0.635} + 5.925U_w} \tag{44}$$

$$\tau_{oz} = 1 - \left[\frac{0.02118U_{oz}}{1 + 0.042U_{oz} + 3.23 \times 10^{-4}U_{oz}^2} + \frac{1.082U_{oz}}{(1 + 138.6U_{oz})^{0.805}} + \frac{0.0658U_{oz}}{1 + (103.6U_{oz})^3} \right] \tag{45}$$

$$\tau_{ae} = (0.1245 \alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.125 \alpha)\exp\{-\beta M_a(1.089 \alpha + 0.5123)\} \tag{46}$$

where, M_a , β , U_w and U_{oz} , are given by the equations cited in previous section.

4.14. Bird and Hulstrom model

Bird and Hulstrom [14,93] have been proposed to estimate the solar radiation under clear sky. It is based on the product of five transmittance coefficients, namely; the transmittance after absorption of permanent gases (τ_g), transmittance after scattering Rayleigh (τ_r), transmittance after absorption of water vapor (τ_w), transmittance after aerosol attenuations, (τ_{ae}). It has reviewed by Refs. [19,26,80,94]. The Bird and Hulstrom model is based on Eq. (47) reported below for the prediction the DNI:

$$D = 0.9662 I_0 \sinh \tau_{oz}\tau_r\tau_g\tau_w\tau_{ae} \tag{47}$$

All input variables are expressed as follows:

$$\tau_r = \exp\left[-0.0903 M_a^{0.84} (1.0 + M_a - M_a^{1.01})\right] \tag{48}$$

$$\tau_{oz} = 1 - \left[0.1611U_{oz}(1.0 + 139.48U_{oz})^{-0.3035} - 0.002715U_{oz} \left(1.0 + 0.044U_{oz} + 0.0003U_{oz}^2\right)^{-1} \right] \tag{49}$$

$$\tau_g = \exp\left(-0.0127M_a^{0.26}\right) \tag{50}$$

$$\tau_w = 1 - 2.4959U_w \left[(1.0 + 79.034U_w)^{0.6828} + 6.385U_w \right]^{-1} \tag{51}$$

$$\tau_{ae} = \exp\left(-k_a^{0.873} \left(1.0 + k_a - k_a^{0.7088}\right) M_a^{1.01}\right) \tag{52}$$

4.15. Yang model

It is a recent solar radiation model designed for clear sky conditions. It is based on the Angstrom correlation implying the relationship between direct and diffuse solar irradiation with sunshine duration [36,95,96]. The Yang model has been examined by different authors, as [26,27,87]. The attenuation of solar radiation through the atmosphere is modeled by five transmittance coefficients, as cited in previous subsections 4.14, but with different expressions. The relations associated with this model are given below:

$$D = I_0 \sinh \tau_{oz}\tau_r\tau_w\tau_g\tau_{ae} \tag{53}$$

$$\tau_{oz} = \exp\left(-0.0365 I_{oz}(M_r I_{oz})^{-0.2864}\right) \tag{54}$$

Wherein

$$\tau_r = \exp\left(-0.008735 M_a b_r^{-4.08}\right) \tag{55}$$

$$\tau_g = \exp\left(-0.0117 M_r^{0.3139}\right) \tag{56}$$

$$\tau_w = \exp(-b_w) \tag{57}$$

$$\tau_{ae} = \exp\left(-\beta M_r b_{ae}^{-1.3}\right) \tag{58}$$

$$b_r = 0.547 + 0.014 M_a - 0.00038M_a^2 + 4.6 \times 10^{-6}M_a^3 \tag{59}$$

$$b_w = -\log(0.909 - 0.036\log(M_r w)) \tag{60}$$

$$b_{ae} = 0.6777 + 0.1464(m_r \beta) - 0.00626(m_r \beta)^2 \tag{61}$$

4.16. METSTAT model

This model has been developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL). It is inspired from Ref. [14] with some modifications of the transmittances [40] that appear in the Bird's formula (section 4.14), such as transmittance coefficients caused by the atmospheric aerosols and the water vapor contributions. Thus, the DNI can be written as:

These transmittances are evaluated through the relations

$$D = 0.9751 I_0 \sinh \tau_{oz}\tau_r\tau_g\tau_w\tau_{ae} \tag{62}$$

$$\tau_w = 1.0 - 1.668U_w \left[(1.0 + 54.6U_w)^{0.637} + 4.042U_w \right]^{-1} \tag{63}$$

$$\tau_{ae} = \exp(-k_a M_r) \tag{64}$$

4.17. Rodgers model

The clear sky model was evaluated from the aerosol optical depth (k_a) and water vapor transmittance parameters (P_w). The model is developed by Ref. [97], and reviewed in Refs. [27,67]. Hence, the DNI is presented as follows:

$$D = \tau_{ae} \cdot P_w \tag{65}$$

Where,

$$\tau_{ae} = \exp(-M_r k_a) \tag{66}$$

$$P_w = I_0 \sinh \exp\left\{w_0 + w_1 M_a + w_2 M_r^2 + w_3 M_r^3\right\} \tag{67}$$

$$w_0 = -0.129641 + 0.04112828w - 0.0112096w^2 \tag{68}$$

$$w_1 = -0.0642111 - 0.0801046w + 0.0143069w^2 \tag{69}$$

$$w_2 = -0.0046883 + 0.0220414w - 0.00429818w^2 \quad (70)$$

$$w_3 = 0.000844097 - 0.00191442w + 0.000374176w^2 \quad (71)$$

4.18. Solis model

This is broadband solar radiation model which is based on the Lambert-Beer relation and Radiative Transfer Model (RTM), and presented by Ref. [98]. A simplified model was developed by Ineichen [19,20], expressed in terms of total atmospheric optical depth (τ), water vapor, aerosol optical depth, modified extraterrestrial irradiance (I_b), and solar elevation angle. Considering that the b is the fitting parameter obtained from (RTM) calculations. The DNI model is determined using Eq. (72).

$$D = I_b \sinh \exp(-\mu/\sin^b h) \quad (72)$$

Whereas, the coefficients are expressed as follows:

$$\mu = aod \cdot t_1 + t_2 + t_3 \ln(p/p_0) \quad (73)$$

$$I_b = I_0 \cdot \{I_{01} \cdot k_a^2 + I_{02} \cdot k_a + I_{03} + 0.071 \ln(p/p_0)\} \quad (74)$$

$$b = b_0 \ln(w) + b_1 \quad (75)$$

$$I_{01} = 0.12 w^{0.56} \quad (76)$$

$$I_{02} = 0.97 w^{0.032} \quad (77)$$

$$I_{03} = 1.08 w^{0.0051} \quad (78)$$

$$t_1 = 1.82 + 0.056 \ln(w) + 0.0071 \ln^2(w) \quad (79)$$

$$t_2 = 0.33 + 0.045 \ln(w) + 0.0096 \ln^2(w) \quad (80)$$

$$t_3 = 0.0089 w + 0.13 \quad (81)$$

$$b_0 = 0.00925 k_a^2 + 0.0148 k_a - 0.0172 \quad (82)$$

$$b_1 = -0.7565 k_a^2 + 0.5057 k_a + 0.4557 \quad (83)$$

5. Results and discussion

This section presents different statistical methods, for the solar DNI assessment as a function of some weather parameters that have been evaluated by using the “MATLAB” software. Then after, the recorded results were discussed upon different curves, generated by both Origin and MATAB.

5.1. Comparison indicators

Throughout the current study, the adopted model performances were performed by the following formulas: The relative bias (rb), relative root mean square error (rRMSE), coefficient of determination (r^2), and relative error (re). These indicators are usually applied in the comparison of solar radiation estimation models, as e.g., [23,49,80,99–102]. Thus, any decision about the DNI performance quality is taken; when, its rb and rRMSE provide lowest percentage rates and its r^2 rate tendency are closed to 1. Moreover, an over-

estimated or under-estimated model is indicated by its rb. Accordingly, a positive or negative rb value informed that the model is over-estimated or under-estimated, respectively. Additionally, it can be mentioned that the relative error (re) was used in discussing the relative error variation versus the solar elevation angle. These indicators are computed as:

$$rb = \frac{1}{D_{mes}} \sum_{1}^N \frac{1}{N} (D - D_m) \quad (84)$$

$$rRMSE = \frac{1}{D_{mes}} \sqrt{\sum_{1}^N \frac{1}{N} (D - D_m)^2} \quad (85)$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{1}^N \frac{1}{N} (D - D_m)^2}{\sum_{1}^N \frac{1}{N} (D - \bar{D}_m)^2} \quad (86)$$

$$re = \frac{D - D_m}{D_m} \quad (87)$$

Where N , D_m , D are the total number of observations, measured and estimated DNI.

Statistical test examination has been undertaken in the way to investigate each model performances. In this view, accuracy criterions have been adopted from the rRMSE test for each model [67]. We have evaluated accuracy of a model under label form, i.e., “poor”, “medium” and “excellent”. That means highlighting that if $rRMSE > 10\%$ then the model is poor, else, if $rRMSE \leq 2\%$ the model is then excellent. Within the mentioned interval values, the model has a “medium” performance.

5.2. Comparative analysis

Comparative analysis between the predicted values to the measured data has generally been the best technique for assessing solar radiation. To this end, the predictors used herein have been applied for each model, like for the Ashrae, Kumar, DPP, Meinel, Dogniaux, Majumdar, Ineichen-Perez, ESRA, Heliosat-1, EEC, Perrin-Brichambaut, Atwater, MAC, Bird and Hulstrom, Yang, METSTAT, Solis, Rodgers (labeled, #1 to #18). The eighteen models have been tested for 11 and 22 days over clear sky conditions, observed in Algiers and Ghardaïa sites, respectively. Indeed, this study does not include any limitations concerning the direct irradiance measurements and the solar elevation ($0 < h < 90^\circ$), excepted in Ghardaïa, where all tests have considered the minimum DNI value of 50 W/m².

For each site, the accuracy indicators (rb, rRMSE, and the r^2) are summarized in Table 3. It seems that the high and low values of rRMSE and r^2 imply a bad performance of each simple model (#1 to #5), so these models are very “poor”. It has been shown that the test indicators provide about ($rRMSE > 13\%$, $r^2 < 92\%$) and ($rRMSE > 10\%$, $r^2 < 91\%$) for both Algiers and Ghardaïa, respectively. However, for Ghardaïa the Ashrae model has the best performance compared to the other simple models, where the rRMSE and r^2 are approximately 11% and 91%, while in Algiers the Meinel model perform better against to other simple models, about 13% and 94%.

It has also been found that the models (Ineichen-Perez, EEC, Brichambaut, Atwater, Bird, METSTAT, and Solis) provide the “medium” performances ($2.36\% < rRMSE < 10\%$) at Algiers. At Ghardaïa, in addition to the previous models, the Heliosat-1 and Rodgers models can also be considered as “medium” ($2.26\% < rRMSE < 9\%$).

At Algiers, the statistical results have shown that the rRMSE and r^2 are between 0.44 to 1.95% and 99.88–99.99%, corresponding to

Table 3
Statistical results (in %) for all models with clear sky in Algiers and Ghardaïa sites.

N°	Models	Algiers			Ghardaïa		
		rb	rRMSE	r ²	rb	rRMSE	r ²
1	Ashrae	9.400	15.92	92.24	5.511	10.76	91.12
2	Kumar	18.56	25.00	80.90	13.33	22.42	61.50
3	DPP	10.73	15.12	93.00	5.200	14.10	84.76
4	Meinel	7.618	13.07	94.77	3.600	13.00	87.00
5	Majumdar	11.15	15.84	92.31	6.110	12.64	87.75
6	Dogniaux	-0.990	1.066	99.96	-0.980	1.100	99.90
7	Ineichen-Perez	3.910	4.705	99.32	4.015	4.716	98.30
8	ESRA	0.380	0.443	99.99	0.360	0.390	99.99
9	Heliosat-1	1.640	1.837	99.90	2.045	2.260	99.61
10	EEC	8.730	10.00	96.80	8.094	9.038	93.74
11	Perrin de Brichambaut	1.732	2.360	99.83	2.700	2.811	99.39
12	Atwater	1.338	2.934	99.73	3.831	4.732	98.28
13	MAC	-0.746	1.237	99.95	0.606	1.223	99.88
14	Bird and Hulstrom	-5.130	6.000	99.00	-2.880	4.188	98.65
15	Yang	-0.823	1.283	99.95	0.445	1.444	99.84
16	METSTAT	-4.120	4.974	99.24	-2.000	3.740	98.93
17	Solis	-4.970	6.432	98.73	-3.811	5.362	97.80
18	Rodgers	0.325	1.953	99.88	2.741	3.366	99.13

the Dogniaux, ESRA, MAC, Yang, Heliosat-1, and Rodgers models.

At Ghardaïa, it has been found that the Dogniaux, ESRA, MAC, and Yang provide the best performance than the other models, where the values of the rRMSE are between 0.39 and 1.44%. However, the Heliosat-1, Rodgers, MAC, and Yang models are widely dominated by ESRA and Dogniaux models, for both sites. Accordingly, in both sites, the Dogniaux, ESRA, MAC, Yang models provide “excellent” performance.

The rRMSE and rb of each considered model are visualized in Fig. 4a and b. It appears in Fig. 4a that the high values of rRMSE (exceed 10% for Algiers and Ghardaïa), imply a “poor” results for estimating DNI, especially for the simple models (i.e., the Ashrae, Kumar, DPP, Meinel, and Majumdar models). Hence, it seems that the simple models present large errors for Algiers than for Ghardaïa site, as well as the rRMSE corresponding to the Ineichen-Perez and MAC models have same values for both sites. It has also been observed that the Dogniaux, ESRA, MAC, Yang models have an “excellent” performance compared to other models.

As it is shown in Fig. 4b, the simple models over-estimated dramatically the DNI intensity for both sites. In the both sites, the over-estimation affects the Ineichen-Perez, Atwater, Heliosat-1, EEC, Brichambaut, and Atwater models. By against, the Bird-Hulstrom, METSTAT, and Solis models underestimated the measured DNI with a large difference between predictions and measurements. These last models can be ranked among those that present medium performances. Accordingly, from histogram results, it is clear that the three models (Yang, Dogniaux, and MAC) perform identically. While the ESRA model, provides lowest rb and rRMSE compared to the remaining models.

Another way to compare between estimated and measured DNI for each model is to introduce the plot regressions. That is will allow inspecting the accuracy of different models against to the measurements, as summarized in Figs. 5 and 6a–r, at Algiers and Ghardaïa sites, respectively. From Figs. 5 and 6g, h, i, p, q, it is noted that the Ashrae, DPP, Meinel, and Majumdar models presented “poorest” performance whatever the DNI measurements for both

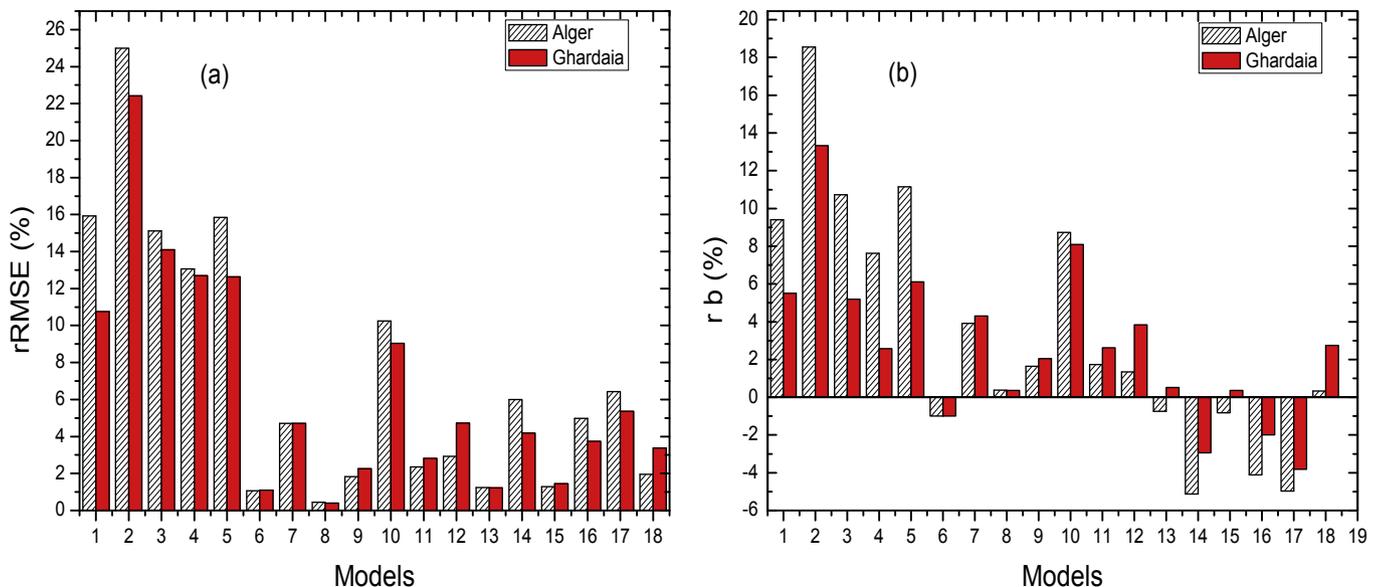


Fig. 4. Histogram of statistical errors (rb, rRMSE) and for Algiers and Ghardaïa cities.

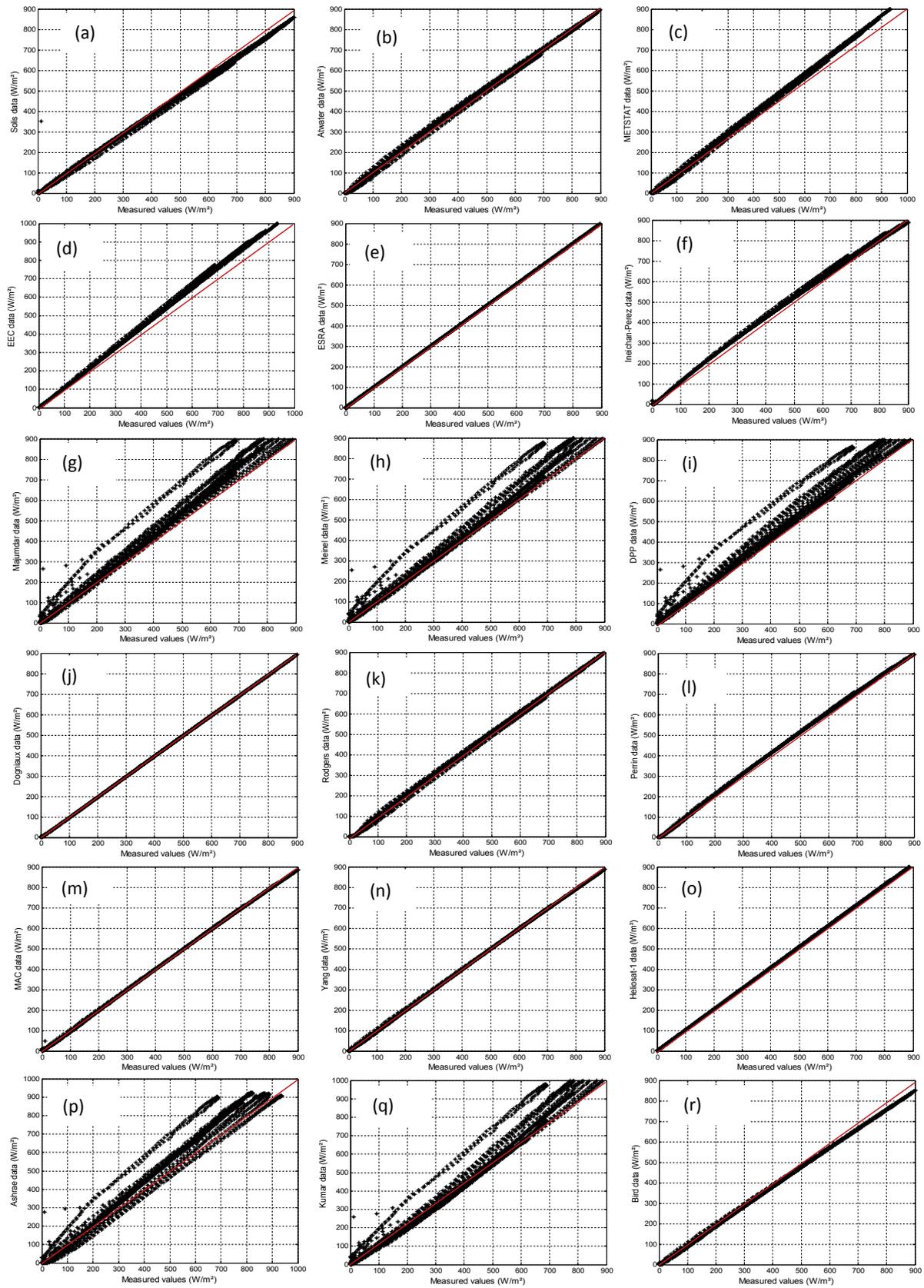


Fig. 5. Comparison between estimated and measured direct solar irradiance, in Algiers site.

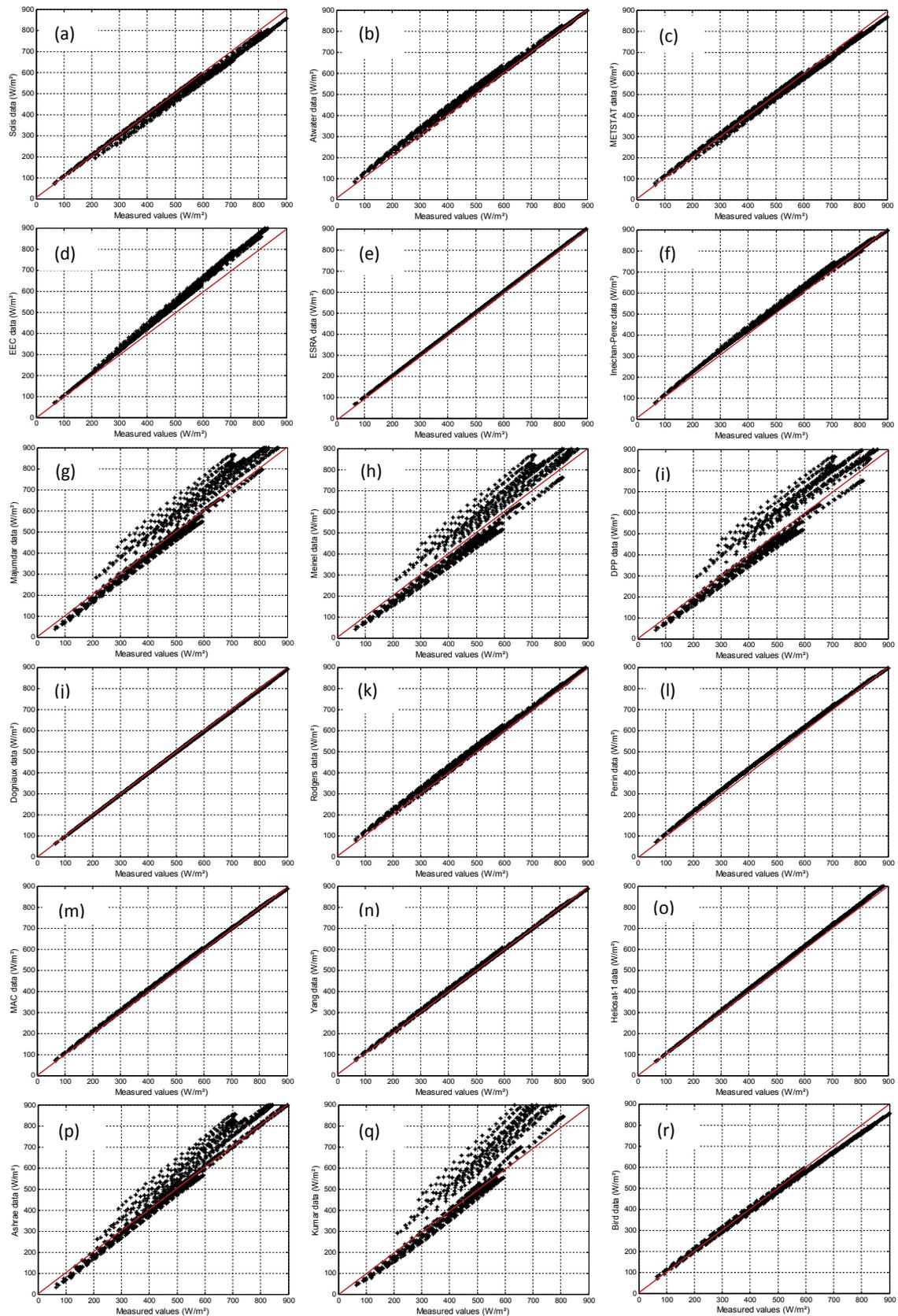


Fig. 6. Comparison between estimated and measured direct solar irradiance, in Ghardaia site.

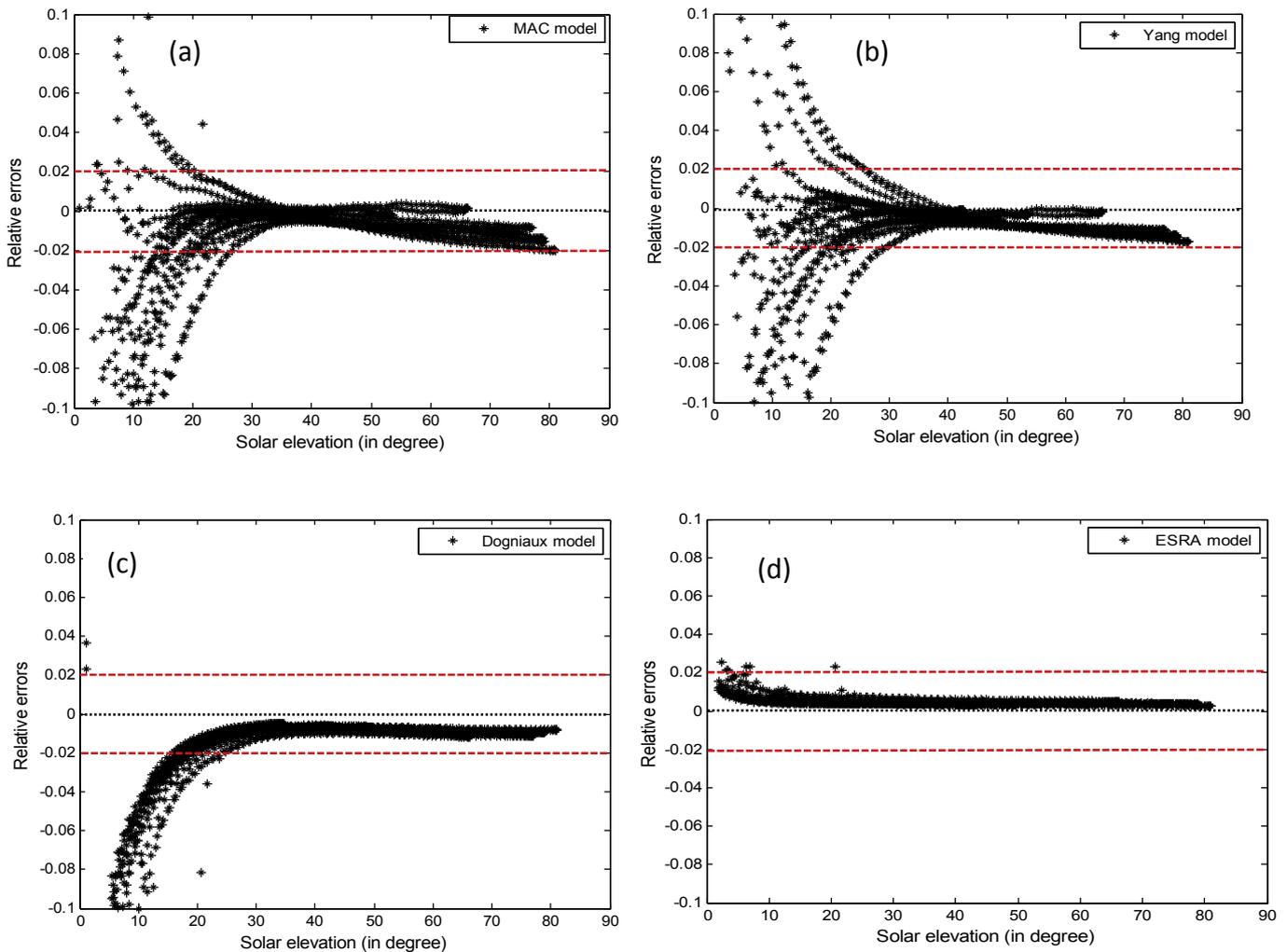


Fig. 7. Relative errors from the four most proficient models (Dogniaux, MAC, Yang, and ESRA) against the solar elevation angle for Algiers site.

sites. In these figures, there are a large difference between the measurements and the estimated values, where the majority of plotted points appear above the identity line. Also, from these figures, important overestimations of DNI are recorded.

As it is highlighted in Fig. 5 and 6a, r, for values of DNI greater than 600 W/m^2 , the Solis and Bird models under-estimate the DNI measurements, for both Algiers and Ghardaïa. For Algiers, the METSTAT model over-estimates the DNI from 600 W/m^2 for Algiers, but the scatter plot of measured and predicted DNI for the Bird model are clearly closer to the identity line than model than the METSTAT and Solis models. Accordingly, the Bird model appears to performs better, while the MAC, and Yang models appear to offer modeling improvements than the METSTAT, Bird and Solis models. For Ghardaïa, the Bird, Solis and METSTAT models perform identically, while the MAC, and Yang perform better.

The scatter plot of the DNI estimated from Ineichen & Perez versus the measured DNI is shown in Figs. 5f and 6f. In this case there is an overestimation for both low and high values.

From 200 W/m^2 , the EEC model appears over-estimated against to the DNI for both sites, the plotted points are above the identity line, as shown in Figs. 5d and 6d. Between 200 and 600 W/m^2 , a low overestimation of Perrin-Brichambaut model, clearly legible in Figs. 5f and 6f, for both sites.

Figs. 5b, k and 6b, k presents the scatter plot of the DNI estimated from Atwater and Rodgers models. The scatter around the

line is more symmetrical for Algiers than for Ghardaïa. In addition to this symmetry, a medium dispersion with respect to the diagonal line is noted for Algiers site. Whereas for Ghardaïa, a medium overestimation is clearly observed.

Accordingly, from the previous remarks, with regards to the Rodgers, Ineichen & Perez, Perrin-Brichambaut, and Atwater models for which the “medium” performances have been noted whatever the measured value of DNI.

Furthermore, for any DNI, due to the very low dispersion of the scatter plot, “excellent” accuracies are noted for ESRA, Dogniaux, MAC, Yang, and Heliosat-1. Thus, the best correlation between the measured and estimated DNI values is observed from Figs. 5e, j, m, n, o and 6e, j, m, n, o. Consequently, the five models appear clearly as “excellent” candidates for estimating the solar DNI in the both sites.

According to the previous study, the Dogniaux, MAC, Yang models seem to have identical performance, but the ESRA model appears to have best performance. So, appropriate treatments should be carried out for selecting among the three models, the best model which gives most performance, and, have also been compared to the ESRA model. For these purposes, it is therefore to choose a method with which we can examine the variation of relative errors provided by each model (Dogniaux, MAC, Yang, and ESRA) as a function of solar elevation angle, as inspired in Engerer and Mills [23]. For each site, Fig. 7 and 8(a–d) presents the variation

of the relative errors as a function of solar elevation angle. On the one hand, it has been observed that for both sites, the relative errors of the MAC and Yang models decrease notably with the solar elevation angles up to the solar angle 30°, and nearly increased from 50°, passing by plotted points which are concentrated on the null axis, as observed in Fig. 7a and b and 8a, b. On the other side, the Dogniaux model offers more performance than the MAC and Yang models, where the relative errors become stationary rapidly and closer to zero from the angle of 30°. Furthermore, the majority of plotted points exceeds largely 2%, mainly for the angle less than 30°, as detailed in Figs. 7c and 8c. By against, the relative errors corresponding to the ESRA model seem to be very closer of the zero for the majority of scatter points, as shown in Figs. 7d and 8d. Therefore, for both site, the majority of error values are between -2% and 2% for the Dogniaux and ESRA models. Thus, the two models are so considered as “excellent” models, with the average relative error less than 0.5%.

5.3. Comparison with SMARTS code

The SMART code (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) is one model permitting to simulate the spectral or broadband direct, diffuse, and global solar irradiation on inclined or horizontal surface under clear sky conditions. Many

versions were developed by Christian Gueymard, as in Refs. [28,29,103]. This approach was tested and investigated in different works [34,87,104,105]. In addition, for estimating solar radiation components, many parameters can be introduced into the model, for instance the temperature, local pressure, air mass, relative humidity, water vapor, ozone contents, geometrical and geographical parameters, and transmittance functions for all atmospheric extinction processes (<http://www.nrel.gov/rredc/smarts/>).

In this study, the SMARTS model is used to simulate the broadband DNI, in both Algiers and Ghardaïa. In this context, many parameters have been employed as inputs, i.e., the local pressure, temperature, and relative humidity measured with our station. Others input parameters, such as ozone vertical column, precipitable water, Angstrom turbidity coefficient and relative air mass are evaluated from previous formulas. Due to the good conformity of the SMART code, it is accordingly interesting to take it as reference to compare it with other models, as it is presented in Refs. [34,86,103,104]. Within this context, by comparing between the SMARTS model with the measured data and the best models (ESRA, Dogniaux) three indicators (rb, rRMSE and r²) have been used. To do this, one clear sky day for each site has been undertaken.

Table 4, summarizes the statistical results obtained from the

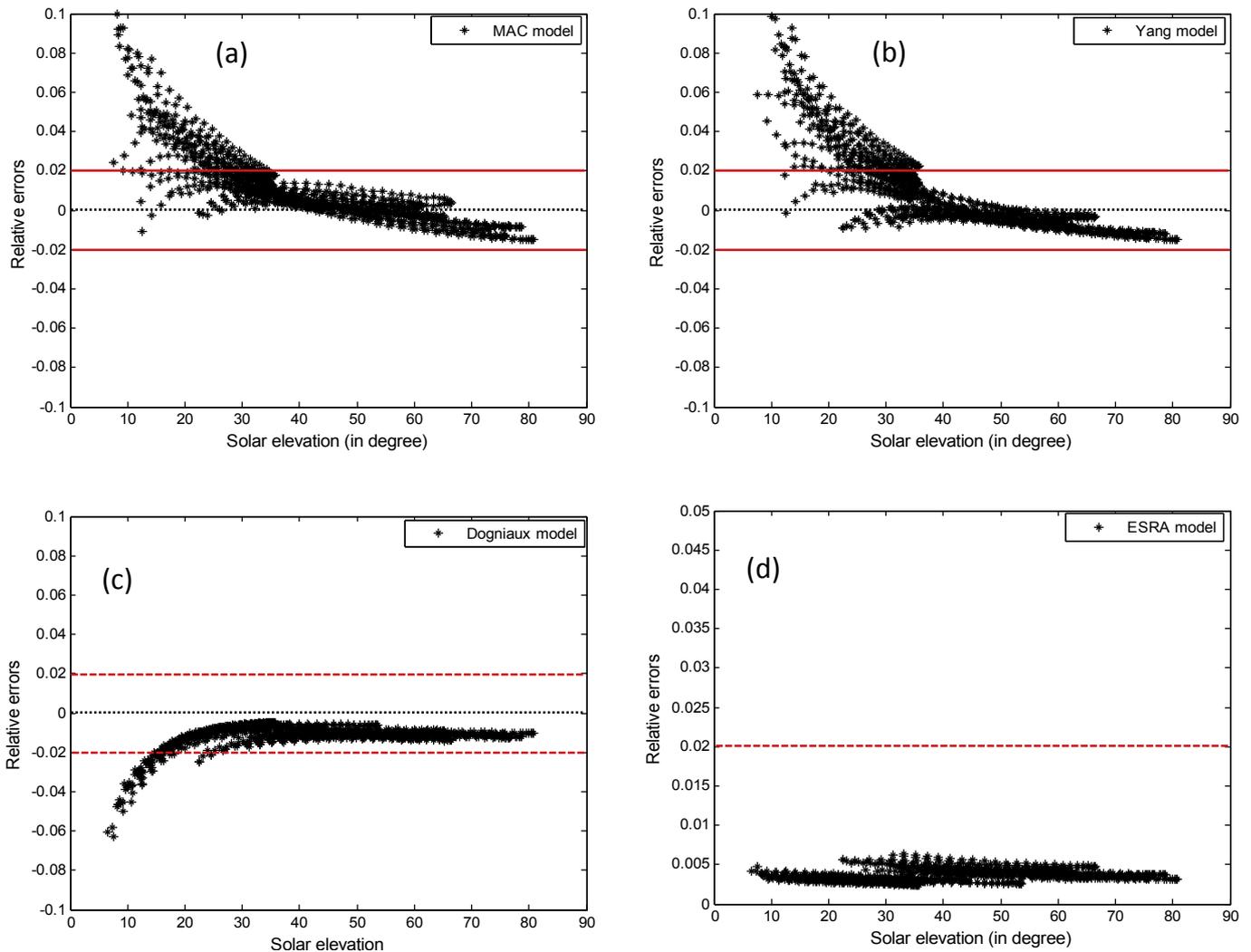


Fig. 8. Relative errors from the four most proficient models (Dogniaux, MAC, Yang, and ESRA) against the solar elevation angle for Ghardaïa site.

Table 4
SMARTS results compared to the measured data, Dogniaux, and ESRA models (for both sites).

N°	Models	Algiers			Ghardaïa		
		rb	rRMSE	r ²	rb	rRMSE	r ²
5	Dogniaux	-1.330	3.310	99.93	0.690	2.240	99.98
8	ESRA	-2.480	4.320	99.88	-0.540	2.060	99.99
18	Measures	-1.690	2.860	99.95	-0.300	1.950	99.98

comparison between the measurements and the two best models versus code SMARTS. At Algiers site, the rb, rRMSE, and r² are about -1.69, 2.86, and 99.95%. For Ghardaïa, we found, -0.3, 1.95, and 99.98%. Consequently, it is clear that the SMARTS model agree with the measurements, especially for Ghardaïa. the DNI values predicted by both models fit well with those of SMARTS very well. The rb, rRMSE, and r² are evaluated to -1.33, 3.31, and 99.93%, for Dogniaux, and -0.54, 2.06, and 99.99%, for ESRA model, in Algiers and Ghardaïa, respectively. Additionally, for Algiers, it seems that the results of DNI from Dogniaux model are very close to the

SMART values than those given ESRA. While for Ghardaïa, the ESRA model provides a good consistency with the SMARTS values.

For each site, we have visualized three figures for comparing between the SMARTS code with the measured data and the best models (Dogniaux and ESRA), in function of the local time, as indicated in Fig. 9a–f. At Algiers, excellent consistency is obtained for both models and measurements data against the SMARTS model, whatever the local time, except that there is a slight difference at the solar noon and sunset, about 15 W/m² and 80 W/m², respectively, as shown in Fig. 9b and c. In the case of Ghardaïa, Fig. 9d, e, f confirms that the both models and the measured data have a good consistency with the SMARTS code, whatever local time.

5.4. Comparison with literature

The accuracy of the achieved method is compared with some direct solar irradiance models, under clear sky conditions introduced in the literature, as illustrated in Table 5. The comparison is carried out based on the rRMSE, the relative bias rb and the

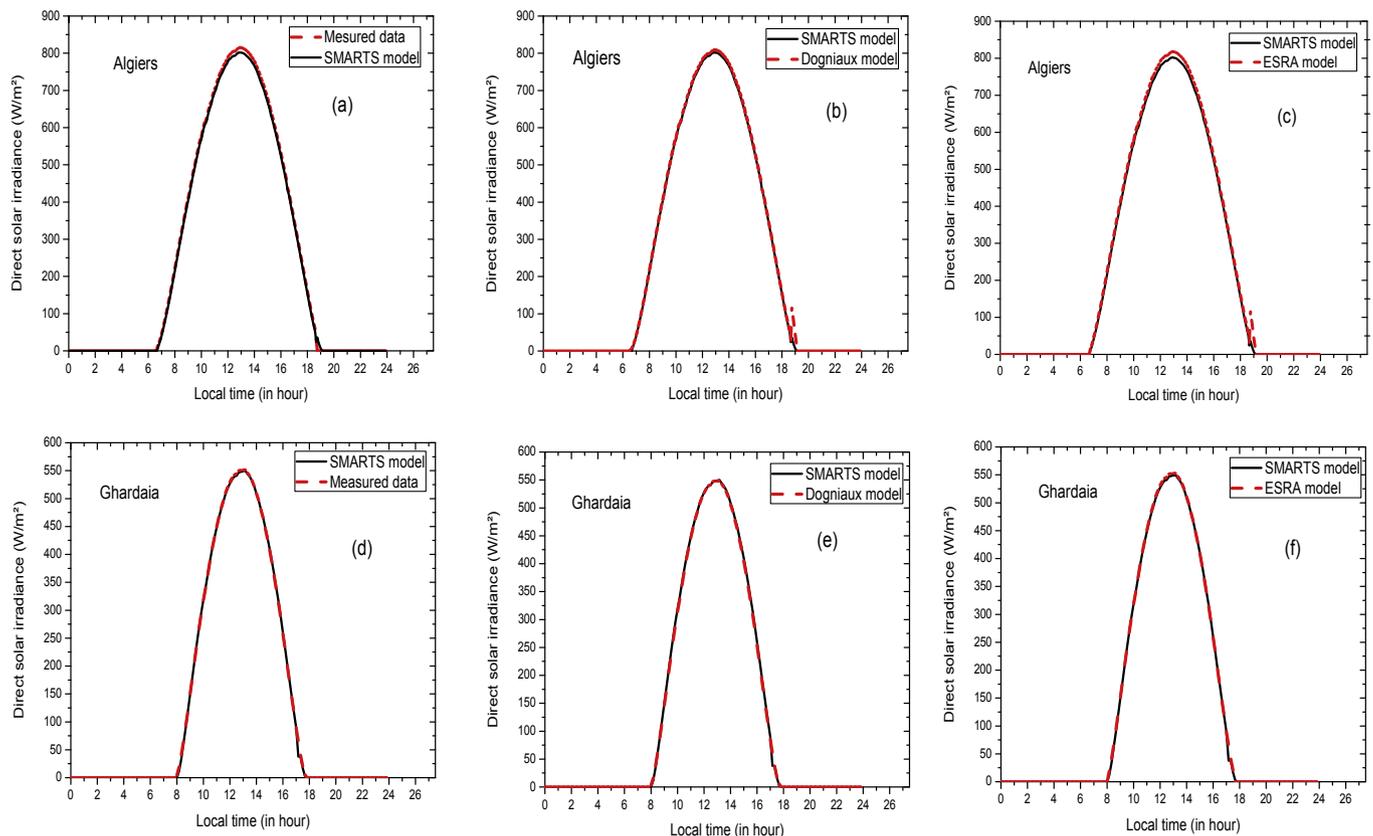


Fig. 9. Comparison between SMARTS with the measured data, Dogniaux, and ESRA models in Algiers and Ghardaïa sites.

Table 5
Comparison between the best models and some existing models, in the literature.

Reference number	model	rb (%)	rRMSE (%)	r ²
[49]	Bird & Hulstrom	0.77	1.52	0.999
[23]	ESRA	-0.34	4.98	0.982
[27]	MLWT2	0.70	3.90	0.999
[34]	Spectral Models, MLWT1, MLWT2, Yang	(0.0) - (+1.2)	2.0–3.0	~1
[41]	McClear	(-7.0) - (+6)	5.0–10	084–0.98
[106]	McClear	(-8.0) - (+1)	9–13	0.830–0.863
Present study	ESRA	0.36	0.44	0.999

coefficient of determination (r^2). It is clearly seen that, the best clear sky model thus found ensure a best precision, among the compared models.

6. Conclusion

Eighteen clear sky broadband irradiance models were investigated for predicting DNI from weather and astronomical parameters. The aim was to evaluate the performance of the models by comparing the findings to the measurements, recorded from Ghardaïa and Algiers sites. For each site, the statistical tests have been achieved through four indicators: normalized mean bias error, normalized root mean square error, coefficient of determination, and relative error. Furthermore, a spectral radiative model, SMARTS code, has been selected, in order to compare it with the estimated models (Dogniaux and ESRA) and DNI measurements.

The first conclusion is that the turbidity parameters (Linke turbidity, aerosol optical depth, Angstrom turbidity) have highest influence on the accuracy of models. Effectively, the Dogniaux, Ineichen-Perez, ESRA, Heliosat-1, and EEC models provide a good performance, with the Linke's turbidity as essential input parameter. However, the model selection criteria should be based upon either the experimental values of the input parameters (i.e., input parameter availability) or the theoretical formulas deduced in literature which are validated and tested in several works. In the work, the second criterion has been considered. Other complex models (Perrin de Brichambaut, Atwater, MAC, Bird-Hulstrom, Yang, METSTAT, Solis, and Rodgers) that rely on transmittance calculations to simulate the different extinction processes in the atmosphere, provide also good accuracies compared to the simple models (Ashrae, Kumar, DPP, Meinel, and Majumdar).

Secondly, four models (MAC, Yang, Dogniaux and ESRA, in accuracy order) can be recommended, because of their high performance, for both sites. Furthermore, the Heliosat-1 model is added to the four models, in the case of Algiers. However, The MAC, Yang, Dogniaux, and Heliosat-1 models showed a poor performance for the solar elevation angle below 30° , but they give good performance above this value. We can also conclude that the performance of these models increases with the solar elevation ($h > 30^\circ$). Overall, the ESRA model, provides excellent performance whatever the solar elevation value and for both sites. Next, come to the Dogniaux model.

Thirdly, a comparison between the measurements DNI with SMARTS model has been achieved. Results have shown that the SMARTS values agree with those of measurements. Furthermore, the best models (Dogniaux and ESRA) and the measured data have been compared with SMARTS code values. It has been found that the measurements and estimated values are consistent well with the SMARTS results, especially Dogniaux model for Algiers, and ESRA in the case of Ghardaïa. Finally, the ESRA and Dogniaux models can be employed for estimating the DNI, either for the CSP applications or to perform a solar map of Algeria.

As perspectives, other studies are underway which consider other sites of Algeria, in order to predict the DNI. In addition, studies will be carried out to confront some clear sky models existing in the literature models with the data measurements, such as the Multilayer-weighted transmittance (MLWT2) and Reference Evaluation of Solar Transmittance, 2 bands (REST2), which are considered as the high-performance models. Another perspective, which consists to use the data records of clear sky irradiances, from the European Union in the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). According to CAMS observation, a comparison will be made against to the ground measurements. Finally, a recently developed model (McClear model) will be confronted to the models of DNI predictions.

Nomenclature

loc	solar constant (W/m^2)
ΔT	equation of time (min)
lo	extraterrestrial radiation (W/m^2)
nj	number of the day in a year
loz	vertical ozone layer thickness (atm-cm)
TL	Linke turbidity factor
h	Solar elevation ($^\circ$)
tsv	True solar time (hour)
Ma	altitude corrected air mass
Mr	relative air mass
Dm	measured solar irradiance (W/m^2)
Uw	optical path length of precipitable water (cm)
p	measured atmospheric pressure (Pa)
z	Local altitude (km)
td	estimated dew temperature ($^\circ C$)
t	measured temperature ($^\circ C$)
Uoz	ozone's relative optical path length
D	estimated solar irradiance
aoz	absorptance of ozone
aw	absorptance of water vapor
ag	absorptance of permanent gases
ka	broadband aerosol optical depth
ka λ	aerosol optical depth at fixed wavelength
TL2	Linke turbidity at air mass 2
Pw	water vapor transmittance introduced in Rodgers model
r^2	coefficient of determination

Greek symbols

δ	solar declination ($^\circ$)
$\Delta\omega$	hour angle (hour)
φ	latitude ($^\circ$)
λ	longitude ($^\circ$)
β	Angstrom turbidity coefficient
α	Angstrom exponent
w	precipitable water-vapor thickness (cm)
η	measured relative humidity (%)
δR	broadband actual optical thickness
τc	clean dry atmosphere optical depth
τr	Rayleigh transmittance
τae	aerosol transmittance
τg	transmittance after permanent gases
τw	transmittance after water vapor
τoz	transmittance after ozone
μ	total atmospheric optical depth

Abbreviations

TST	true solar time (hour)
DNI	direct normal irradiance (W/m^2)
rRMSE	relative root mean square error (%)
rb	relative bias (%)
re	Relative error (%)

References

- [1] Renewable Energy Algerian Ministry of Energy and Mines, March 2011.
- [2] S. Boudaoud, A. Khellaf, K. Mohammedi, O. Behar, Thermal performance prediction and sensitivity analysis for future deployment of molten salt cavity receiver solar power plants in Algeria, *Energy Convers. Manag.* 89 (2015) 655–664.
- [3] O. Behar, A. Kellaf, K. Mohammedi, Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate- the case of direct irradiance, *Energy Convers. Manag.* 98 (2015) 236–251.
- [4] A.B. Stambouli, Promotion of renewable energies in Algeria: strategies and perspectives, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 1169–1181.
- [5] T.S. Viana, R. R  ther, F.R. Martins, E.B. Pereira, Assessing the potential of

- concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation, *Sol. Energy* 85 (2011) 486–495.
- [6] K. Lovegrov, J. Pye, Fundamental principles of concentrating solar power (CSP) systems. Principles, Developments and Applications, Chapter 3 (2012) 68–90.
 - [7] R. Meyer, M. Schlecht, K. Chhatbar, Solar Resources for Concentrating Solar Power (CSP). Concentrating Solar Power Technology, Principles, Developments and Applications, Chapter 3, 2012, pp. 68–90.
 - [8] R. Marquez, C.F.M. Coimbra, Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis, *Sol. Energy* 91 (2013) 327–336.
 - [9] K.H. Ho, B.D. Iverson, Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power, *Renewable and Sustainable Energy* 29 (2014) 835–846.
 - [10] O. Behar, A. Kellaf, K. Mohammadi, M. Belhamel, Instantaneous performance of the first integrated solar combined cycle system in Algeria, *Energy Procedia* 6 (2011) 185–193.
 - [11] O. Behar, A. Kellaf, K. Mohammadi, A review of studies on central receiver solar thermal power plants, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 23 (2013) 12–39.
 - [12] O. Behar, A. Kellaf, K. Mohammadi, S. Ait-Kaci, A review of integrated solar combined cycle system (ISCCS) with a parabolic trough technology, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39 (2014) 223–250.
 - [13] B. Molineaux, P. Ineichen, O. Neil, Equivalence of pyrheliometric and monochromatic aerosol optical depths at a single key wavelength, *Appl. Opt.* 37 (1996) 7008–7018.
 - [14] R.E. Bird, R.L. Hulstrom, A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces, Solar Energy Research Institute (now NREL), Golden, CO, 1981, pp. 642–761. SERI/TR.
 - [15] M. Geiger, L. Diabate, L. Menard, L. Wald, A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation, *Sol. Energy* 73 (2002) 475–480.
 - [16] C.A. Gueymard, A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance and photosynthetically active radiation at the earth surface, *Sol. Energy* 43 (1989) 252–265.
 - [17] C. Gueymard, Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data, *Sol. Energy* 51 (1993) 121–138.
 - [18] F. Kasten, A simple parameterization of two pyrheliometric formulae for determining the Linke turbidity factor, *Meteorological Rundschau* 33 (1980) 124–127.
 - [19] P. Ineichen, Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks, *Sol. Energy* 73 (2006) 468–478.
 - [20] P. Ineichen, A broadband simplified version of the Solis clear sky model, *Sol. Energy* 82 (2008) 758–762.
 - [21] R. Rigollier, O. Bauer, L. Wald, On the clear sky model of the ESRA-European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method, *Sol. Energy* 68 (2000) 33–48.
 - [22] A. Louche, G. Simonnot, M. Iqbal, Experimental verification of some clear-sky insolation models, *Sol. Energy* 41 (1988) 273–279.
 - [23] N.A. Engerer, F.P. Mills, Validating nine clear sky radiation models in Australia, *Sol. Energy* 120 (2015) 9–24.
 - [24] C.A. Gueymard, REST2: high-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation — validation with benchmark dataset, *Sol. Energy* 82 (2008) 272–285.
 - [25] J.A. Davies, D.C. McKay, Estimating solar irradiance and components, *Sol. Energy* 29 (1982) 55–64.
 - [26] C.A. Gueymard, Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models, *Sol. Energy* 86 (2012) 2145–2169.
 - [27] C.A. Gueymard, Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detail theoretical performance assessment, *Sol. Energy* 74 (2003) 355–379.
 - [28] C.A. Gueymard, SMARTS2, a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithm and performance assessment, in: Rep. FSEC-PF-270–295. Florida Solar Energy Center, Cocoa, 1995.
 - [29] C.A. Gueymard, Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance, *Sol. Energy* 71 (2001) 325–346.
 - [30] C. Gueymard, D. Myers, K. Emery, Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing, *Sol. Energy* 73 (2002) 443–467.
 - [31] C. Gueymard, Multilayer-weighted transmittance functions for use in broadband irradiance and turbidity calculations, in: R. Campbell-Howe, B. Wilkins-Crowder (Eds.), Proceedings of Solar'96, Annual. Conference of the American Solar Energy Society, ASES, Asheville, NC, 1996, pp. 281–288.
 - [32] C. Gueymard, Turbidity determination from broadband irradiance measurements: a detailed multicoefficient approach, *J. Appl. Meteorol.* 37 (1997) 414–435.
 - [33] C.A. Gueymard, J.D. Garrison, Critical evaluation of precipitable water and atmospheric turbidity in Canada using measured hourly solar irradiance, *Sol. Energy* 62 (1998) 291–307.
 - [34] M.A. Madkour, M. El-Metwally, A.B. Hamed, Comparative study on different models for estimation of direct normal irradiance (DNI) over Egypt atmosphere, *Renew. Energy* 31 (2006) 361–382.
 - [35] T. Muneer, M. Gul, H. Kambezidis, Evaluation of an all-sky meteorological radiation model against long-term measured hourly data, *Energy Convers. Manag.* 39 (3) (1998) 303–317.
 - [36] K. Yang, G.W. Huang, N. Tamai, A hybrid model for estimating global solar radiation, *Sol. Energy* 70 (2001) 13–22.
 - [37] S. Younes, T. Muneer, Clear-sky classification procedures and models using a world-wide data base, *Appl. Energy* 84 (2007) 623–645.
 - [38] V. Badescu, C.A. Gueymard, S. Cheval, C. Opera, M. Baciu, A. Dumitrescu, F. Iacobescu, I. Milos, C. Rada, Accuracy analysis for fifty-four clear sky solar radiation models using routine hourly global irradiance measurements in Romania, *Renew. Energy* 55 (2013) 85–103.
 - [39] P. Ineichen, R. Perez, A new air mass independent formulation for the Linke turbidity coefficient, *Sol. Energy* 73 (2002) 151–157.
 - [40] E.L. Maxwell, METSTAT — the solar radiation model used in the production of the National Solar Radiation Data Base (NSRDB), *Sol. Energy* 62 (1998) 263–279.
 - [41] M. Lefevre, A. Oumbe, P. Blanc, B. Espinar, B. Gschwind, Z. Qu, L. Wald, M. Schroeder-Homscheidt, C. Hoyer-Klick, A. Arola, A. Benedetti, J.W. Kaiser, J.-J. Morcrette, McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions, *Atmospheric Measurement Techniques* 6 (2013) 2403–2418.
 - [42] M. Lefevre, L. Wald, Validation of the McClear clear-sky model in desert conditions with three stations in Israel, *Adv. Sci. Res.* 13 (2016) 21–26.
 - [43] M. Iqbal, An Introduction to Solar Radiation, second ed., Canada: Academic Press, Toronto, 1983.
 - [44] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 4th ed., John Wiley and Sons, New York, 2013.
 - [45] Z. Şen, Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, Springer-Verlag, London, 2008.
 - [46] F. Linke, Transmissions-Koeffizient und Trübungs factor, *Beitr. Phys. Fr. Atmos* 10 (1922) 91–103.
 - [47] A. Hammer, D. Heinemann, C. Hoyer, R. Kuhlemann, E. Lorenz, R. Müller, H.G. Beyer, Solar energy assessment using remote sensing technologies, *Remote Sensing of Environment* 86 (2003) 423–432.
 - [48] M.J. Reno, C.W. Hansen, J.S. Stein, Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis. Sandia National Laboratory, New Mexico: Sandia report, California, 2012.
 - [49] M. Koussa, D.S. Koussa, S. Hadji, Experimental investigation of simple solar radiation spectral model performances under a Mediterranean Algerian's climate, *Energy* 70 (2016) 374–381.
 - [50] J.D. Fox, Calculated Angström's turbidity coefficients for Fairbanks, Alaska, *J. Clim.* 7 (1994) 1506–1512.
 - [51] M. El-Metwally, INdirect Determination of Broadband Turbidity Coefficients over Egypt. *Meteorology and Atmospheric Physics* vol. 119, Springer, 2013, pp. 71–90.
 - [52] F. Kasten, T. Young, Revised optical air mass tables and approximation formula, *Appl. Opt.* 28 (1989) 4735–4738.
 - [53] A. Louche, M. Maurel, G. Simonnot, G. Peri, M. Iqbal, Determination of Angstrom's turbidity coefficient from direct total solar irradiance measurements, *Sol. Energy* 38 (1987) 89–96.
 - [54] J.C. Grenier, C.A. De La Casiniere, T. Cabot, A spectral model of Linke's turbidity factor and its experimental implications, *Sol. Energy* 52 (1994) 303–314.
 - [55] J.C. Grenier, A. De La Casiniere, T. Cabot, Atmospheric turbidity analyzed by means of standardized Linke's turbidity factor, *American Meteorological Society* 34 (1995) 1449–1458.
 - [56] A. Angstrom, On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air, *Geografis. Annaler* 11 (1929) 156–166.
 - [57] A. Angstrom, Techniques of determining the turbidity of the atmosphere, *Tellus* 13 (1961) 214–223.
 - [58] A. Angstrom, The parameters of atmospheric turbidity, *Tellus* 16 (1964) 64–75.
 - [59] J. Remund, L. Wald, M. Lefevre, T. Ranchin, J. Page, Worldwide Linke Turbidity Information, Proceedings of the ISES Solar World Congress, Goeteborg, Sweden, 2003, pp. 16–19.
 - [60] M. Saad, A. Trabelsi, M. Masmoudi, S.C. Alfaro, Spatial and temporal variability of the atmospheric turbidity in Tunisia, *Meteorol. Atmos. Phys.* 149 (2016) 93–99.
 - [61] G.W. Paltridge, C.M.R. Platt, Radiative Processes in Meteorological and Climatology, Elsevier, New York, 1976.
 - [62] B.Y. Mark, G. Lawrence, The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air; a simple conversion and applications, *American Meteorological Society* (2004). To consult also: <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>.
 - [63] M.M. Merad, I. Rougab, A. Chekneane, N.I. Bachari, Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques, *Revue des Energies Renouvelables* 15 (3) (2010) 451–463.
 - [64] T.K. Van Heuklon, Estimating atmospheric ozone for solar radiation models, *Sol. Energy* 22 (1978) 63–68.
 - [65] X. Zhong, J. Kleissl, Clear sky irradiances using REST2 and MODIS, *Sol. Energy* 116 (2015) 144–164.
 - [66] C.A. Gueymard, J.A. Ruiz-Arias, Validation of direct normal irradiance predictions under arid conditions: a review of radiative models and their turbidity-dependent performance, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45 (2015) 379–396.
 - [67] V. Badescu, C.A. Gueymard, S. Cheval, C. Opera, M. Baciu, A. Dumitrescu, F. Iacobescu, I. Milos, C. Rada, Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models, *Renew. Sustain.*

- Energy Rev. 16 (2012) 1636–1656.
- [68] G.L. Powell, Comparative evaluation of SOLMET clear sky global solar radiation model, *Sol. Energy* 32 (1984) 453–460.
- [69] D.G. Stephenson, Equation for solar heat gain through windows, *Sol. Energy* 9 (1965) 81–86.
- [70] D.G. Stephenson, Tables of Solar Altitude, Azimuth, Intensity and Heat Gain Factors for Latitudes from 43 to 55 Degrees North. Tech. Paper N° 243, National Research Council of Canada, Ottawa, 1967.
- [71] ASHRAE, ASHRAE Handbook Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York, 1972.
- [72] S. Barbaro, G. Cannistraro, C. Giaconia, A. Orioli, The ASHRAE clean sky model. An evaluation in the Mediterranean zone, *Sol. Wind Technol.* 5 (1988) 111–116.
- [73] L. Kumar, A.K. Skidmore, E. Knowles, Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment, *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 11 (1997) 475–497.
- [74] M. Daneshyar, Solar radiation statistics for Iran, *Sol. Energy* 21 (1978) 345–349.
- [75] G.W. Paltridge, D. Proctor, Monthly mean solar radiation statistics for Australia, *Sol. Energy* 18 (1976) 235–243.
- [76] A. Shavali-pour, M.H. Hakemzadeh, K. Sopian, S.M. Haris, S.H. Zaidi, New formulation for the estimation of monthly average daily solar irradiation for the Tropics: a Case Study of Peninsular Malaysia. Hindawi Publishing Corporation, *Int. J. Photoenergy* 2013 (1997).
- [77] V. Badescu, Verification of some very simple clear and cloudy sky models to evaluate global solar irradiance, *Sol. Energy* 16 (1997) 251–264.
- [78] A.B. Meinel, M.P. Meinel, *Applied Solar Energy, an Introduction*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1976.
- [79] N.C. Majumdar, B.L. Mathur, S.B. Kaushik, Prediction of direct solar radiation for low atmospheric turbidity, *Sol. Energy* 13 (1972) 383–394.
- [80] C.A. Gueymard, A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: towards a better bankability of solar projects, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39 (2014) 1024–1034.
- [81] R. Dogniaux, Standardization of methods of measurement and calculation of climatological data for thermal and daylight applications, in: *Proceedings of the Symposium on Solar Radiation*, Smithsonian Institution, Washington, 1973, pp. 50–60.
- [82] R. Dogniaux, M. Lemoine, Programme de calcul des éclairagements solaires énergétiques et lumineux de surfaces orientées et inclinées, in: *Report C14*, Institut Royal Météorologique de Belgique, Uccle, Brussels, 1976.
- [83] J.K. Page, M. Albuissou, L. Wald, The european solar radiation Atlas: a valuable digital tool, *Sol. Energy* 71 (2001) 81–83.
- [84] K. Scharmer, J. Greif, *The european solar radiation Atlas*, Presses de l'Ecole des Mines de Paris (2000).
- [85] F. Kasten, The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness, *Sol. Energy* 56 (1996) 239–244.
- [86] H.I. Rich, G.E. James, F.M. Carlos, Impact of local broadband turbidity estimation on forecasting of clear sky direct normal irradiance, *Sol. Energy* 117 (2015) 125–138.
- [87] Q. Dai, X. Fang, A simple model to predict solar radiation under clear sky conditions, *Adv. Space Res.* 53 (2014) 1239–1245.
- [88] C. Perrin de Brichambaut, C. Vauge, *Le Gisement Solaire*, Lavoisier, Paris, 1982.
- [89] M.A. Atwater, J.T. Ball, A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations, *Sol. Energy* 21 (1978) 163–170.
- [90] M.A. Atwater, J.T. Ball, Effects of clouds on insolation models, *Sol. Energy* 27 (1981) 37–44.
- [91] R.E. Bird, R.L. Hulstrom, Direct insolation models. *Transaction ASME Journal, Solar Energy Engineering* 103 (1980) 182–192.
- [92] J.A. Davies, D.C. McKay, G. Luciani, M. Abdel-Wahab, Validation of models for estimating solar radiation on horizontal (B.23) surfaces, in: *IEA Task IX Final Report*, Atmospheric Environment Service, Downsview, OT, 1988.
- [93] R.E. Bird, A Simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance, *Sol. Energy* 32 (1984) 461–471.
- [94] Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, Z. Choulli, T. Ajzoul, Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 56 (2016) 87–99.
- [95] K. Yang, T. Koike, B. Ye, Improving estimation of hourly, daily, and monthly downward shortwave radiation by importing global data sets, *Agriculture and Forest Meteorology* 137 (2006) 43–55.
- [96] K. Yang, J. He, W. Tang, Q. Jun, C.K. Cheng, On downward shortwave and long-wave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau, *Agric. For. Meteorol.* 150 (2010) 38–46.
- [97] G.G. Rodgers, C.G. Souster, J.K. Page, The development of an interactive computer program SUN1 for the calculation solar irradiances and daily irradiances on horizontal surfaces on cloudless days for given conditions of sky clarity and atmospheric water content, in: *Report BS 28*, Department of Building Science, University of Sheffield, UK, 1978.
- [98] R.W. Mueller, K.F. Dagestad, P. Ineichen, M. Schroedter, S. Cros, D. Dumortier, R. Kuhlemann, J. Olseth, G. Piernavieja, C. Reise, L. Wald, D. Heinemann, Rethinking satellite based solar irradiance modelling—the SOLIS clear sky module, *Remote Sens. Environ.* 91 (2004) 160–174.
- [99] K. Gairaa, A. Khellaf, Y. Messlem, F. Chellali, Estimation of the daily global solar radiation based on Boxe Jenkins and ANN models: a combined approach, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57 (2016) 238–249.
- [100] K. Dahmani, R. Dizene, G. Notton, C. Paoili, C. Voyant, M.I. Nivet, Estimating of 5 Min time: step data of tilted solar global irradiation using ANN (Artificial Neural Network) model, *Energy* 70 (2014) 374–381.
- [101] V. Bahel, R. Srinivasan, H. Bakhsh, Statistical comparison of correlation for estimation of global horizontal solar radiation, *Energy* 12 (1987) 1309–1316.
- [102] K. Bakirsi, Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey, *Energy* 34 (2009) 485–501.
- [103] C. Gueymard, SMARTS Code, Version 2.9.2 User's Manual, Solar Consulting Services, Bailey, CO, 2010. Available; <http://www.nrel.gov/rredc/smarts/>.
- [104] D.G. Kaskaoutis, H.D. Kambezidis, The role of aerosol of the SMARTS code in predicting the spectral direct-beam irradiance in an urban area, *Renew. Energy* 33 (2008) 1532–1543.
- [105] D.R. Myers, C.A. Gueymard, Description and availability of the SMARTS spectral model for photovoltaic applications, *International Symposium on Optical Science and Technology* (2004) 560–36320. Colorado NREL/CP.
- [106] Y. Aissa, S. Munawwar, A. Oumbe, P. Blanc, H. Gherdira, L. Wald, H. Bru, D. Goffe, Validating surface downwelling solar irradiances estimated by McClear model under cloud-free skies in the United Arab Emirates, *Sol. Energy* 114 (2015) 17–31.