

THÈSE

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

Présentée par : BOUCHOUICHA Kada

Intitulé

**MODELISATION MULTISPECTRALE DES IMAGES SATELLITAIRE
- Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère**

Faculté : *Physique*
Département : *Génie Physique*
Spécialité : *Génie Physique*
Option : *Rayonnement et Matière*

Soutenue le 29/06/2017 à 10:00 Devant le Jury Composé de :

<i>Membres de Jury</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Domiciliation</i>
BELBACHIR Ahmed-Hafid	<i>Professeur</i>	<i>Président</i>	<i>U.S.T.O-MB</i>
BACHARI Nour el islam	<i>Professeur</i>	<i>Encadrant</i>	<i>U.S.T.H.B</i>
BENABADJI Noureddine	<i>Professeur</i>	<i>Examineurs</i>	<i>U.S.T.O-MB</i>
BELASRI Ahmed	<i>Professeur</i>		<i>U.S.T.O-MB</i>
HAMIDAT Abderahmane	<i>Directeur de Recherche</i>		<i>C.D.E.R</i>
HASSINI Abdellatif	<i>Professeur</i>	<i>Examineurs</i>	<i>Univ -Oran2</i>



Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements

Année Universitaire : 2016/2017

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme cette thèse de doctorat.

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

Je voudrais remercier très chaleureusement tous les membres du jury:

Monsieur BELBACHIR Ahmed-Hafid, Professeur à l'USTO, directeur de LAAR (Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements) pour le grand plaisir qu'il me fait en présidant ce jury.

Monsieur BENABADJI Noureddine, Professeur à l'USTO, pour l'honneur qui m'a fait par sa participation à l'évaluation scientifique de ce travail en tant que rapporteur.

Monsieur BELASRI Ahmed, Professeur à l'USTO, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de le juger comme rapporteur.

Monsieur HAMIDAT Abderahmane, Directeur de Recherche au CDER pour s'être intéressé à ce travail et avoir accepté de siéger à ce jury.

Monsieur HASSINI Abdellatif, Professeur à l'Univ. d'ORAN 2, d'avoir consenti à être examinateurs dans mon jury de thèse.

Monsieur RAZAGUI Abdelhak, Maître de Recherche au CDER pour son encouragement et son savoir scientifique.

Je tiens à exprimer tout particulièrement ma reconnaissance à Mehdi KERROUCH de l'ONM-Alger, d'avoir mis à notre disposition les données essentielles à la conduite de ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous mes enseignants.

Je souhaite également remercier mes collègues de l'URER-MS-Adrar, CDER-Alger et du laboratoire LAAR.

J'adresse mes sincères remerciements à mes collègues et amis, plus particulièrement Brahim, Mebrouk et Nouar, laaredj et rabie.

Merci aussi à tous ceux qui ont consacré du temps, de l'énergie et de la patience.

Dédicaces

Je dédie ce rapport de thèse à mes deux chers parents, qui n'ont jamais cessés de me soutenirMerci 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 enfants Sami et Wissem.

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

Je tiens également à remercier mes beaux-parents pour leur gentillesse.

Sans oublier de remercier mes chers collègues de l'URER-MS, et du laboratoire LAAR, plus particulièrement Brahim, Mebrouk et Nouar, mes amis : laaredj et rabie.

Pour tous mes amis qui m'ont apporté leur soutien moral pendant ces années d'études, je les en remercie sincèrement.

*Une Dédicacs spéciale
A la mémoire de mes grands-parents.*

MODELISATION MULTISPECTRALE DES IMAGES SATELLITAIRE

Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère

Résumé :

Cette thèse porte sur l'étude de la variabilité spatio-temporel des différentes composantes du bilan énergétique solaire au niveau de la surface terrestre, plus particulièrement sur l'estimation de l'albédo de surface et du rayonnement global incident au sol, utilisant des données multi-spectrales issues du satellite géostationnaire MSG2 (Meteosat Second Generation). Dans ce contexte, une estimation de l'albédo de surface a été réalisée utilisant une solution approximative d'un modèle de transfert radiatif. Ensuite, La performance de deux approches d'estimation du rayonnement global à partir des images du canal HRV (high-resolution visible) a été évaluée par rapport aux mesures radiométriques au sol réalisées dans cinq stations situées dans différentes régions du territoire Algérien, au cours de l'année 2010. Les résultats des estimations des valeurs horaires et journalières des irradiances solaires globales sont très encourageants et prometteurs par rapport à la littérature existante.

Une cartographie annuelle et mensuelle de l'albédo de surface et du rayonnement global horizontal couvrant l'ensemble du territoire a été produites, et une analyse géospatiale de ces deux paramètres été réalisée sur cette base.

Mots clés : *images multispectrale MSG, Bilan énergétique Solaire, Albédo, Irradiation.*

نمذجة متعددة الطيف لصور الأقمار الإصطناعية

تطبيق : تكميم ميزانية طاقة الأرض مع الغلاف الجوي

ملخص

موضوع هذه الأطروحة دراسة التغير الزمكاني لمختلف مكونات ميزانية طاقة الإشعاع الشمسي على سطح الأرض، ولا سيما تقدير نسبة وضاءة سطح الأرض (Albedo) و الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الأرض باستخدام البيانات متعددة الطيف ناتجة عن صور لأقمار إصطناعية ثابتة المدار الجغرافي MSG2. في المرحلة الأولى قمنا بمحاكاة نسبة الوضاء لسطح الأرض باستخدام نموذج إشعاعي مبسط (Radiative Transfer Model). بعدها باستعمال صور الطيف المرئي عالي الدقة للقمر الاصطناعي، و بتطبيق طريقتين مختلفتين قمنا بتقدير الإشعاع الكلي و مقارنة النتائج مع قياسات على سطح الأرض خلال سنة 2010 لخمس محطات واقعة في أماكن مختلفة من الجزائر. النتائج المقدرة للأشعة الشمسية الكلية، الساعية وكذا اليومية جد هامة و مشجعة بالمقارنة مع نتائج دراسات و أبحاث سابقة. في الأخير تم إنجاز و تحليل خرائط شهرية و سنوية للوضاء الأرضية المقدرة و كذا الإشعاع الكلي الأفقي شملت كل التراب الوطني.

كلمات افتتاحية : صور أقمار إصطناعية متعددة الطيف، ميزانية طاقة الإشعاع الشمسي، نسبة الوضاء الأرضية، الإشعاع

MULTISPECTRAL MODELLING OF SATELLITE IMAGES

Application : Quantification of the ground-atmosphere energy budget

Abstract :

This thesis focuses on study of spatio-temporal variability of the various components of solar energy budget at the earth's surface, especially the estimation of ground albedo and solar radiation incident on the surface using MSG2 multispectral satellite data. In this context, an estimate of the surface albedo has been achieved using form of the atmospheric radiative transfer Model (RT). Then, an approximate the evaluation of two approaches for estimating global solar radiation has been carried out by comparing the estimated values with experimental data performed in five radiometric stations located in different regions of Algerian territory, during the Year 2010. The estimation of the hourly and daily global solar radiation shows promising results compared with the current literature.

Finally, the annual and monthly maps covering entirely the territory have been generated showing the spatial distribution and temporal variation of surface albedo and global solar irradiation on horizontal surfaces, and preliminary geospatial analysis was performed.

Keywords : *Multispectral MSG images, Solar energy budget, Albedo, Irradiation*

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
RESUME	iii
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIERES	ix
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX	xii
NOMENCLATURE	xv
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: LE RAYONNEMENT SOLAIRE	7
I.1 INTRODUCTION	8
I.2 SOURCE DU RAYONNEMENT SOLAIRE	8
I.3 RAYONNEMENT SOLAIRE HORS ATMOSPHERE	9
3.1. ECLAIREMENT ET CONSTANTE SOLAIRE	9
3.2. VARIATION DE L'ECLAIREMENT	11
I.4 RAYONNEMENT SOLAIRE A TRAVERS L'ATMOSPHERE	14
I.4.1. ATMOSPHERE TERRESTRE COMPOSITION ET STRUCTURE	15
a) Structure de l'atmosphère	15
b) Composition de l'atmosphère	15
I.4.2 ATTENUATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE	18
I.4.3 BILAN ENERGETIQUE DU SYSTEME TERRE/ATMOSPHERE	19
I.4.4 PARAMETRES ATMOSPHERIQUES	20
a) Masse d'air optique	20
b) Trouble atmosphérique	23
I.5 RAYONNEMENT AU SOL	26
a) Rayonnement direct	26
b) Rayonnement diffus	26
c) Rayonnement réfléchi	26
d) Rayonnement global	28
I.6 CONCLUSION	29
I.7 REFERENCES	30
CHAPITRE II: SOURCES ET TRAITEMENT DES DONNEES RELATIVES AU RAYONNEMENT SOLAIRE	31
II.1. INTRODUCTION	32
II.2. MESURES DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL	32
II.2.1 Paramètres mesurés	33
a) Le Rayonnement direct	33
b) Le Rayonnement global	33
c) Le Rayonnement diffus	33
d) L'albédo de surface	33
e) La durée d'insolation	34
f) La nébulosité	34
II.2.2 Paramètres dérivés de mesurés	34
a) la fraction d'insolation	34
b) l'indice de clarté	35
II.2.3 Réseau de mesures au sol en Algérie	35
II.2.4 Le traitement des données radiométriques	37
a) Correction du rayonnement diffus (correction d'arceau)	38
b) Le contrôle qualité des mesures	39
II.3. MESURES INDIRECTES PAR TELEDETECTION	40

II.3.1	LE SATELLITE MSG2	40
a)	Images des trois canaux Visibles VIS 0.6, VIS 0.8 et HRV	41
II.3.2	Traitement des images MSG2	41
a)	Radiances spectrale des canaux visible	42
b)	Réfléctances spectrale des canaux visible	43
II.4.	RESULTATS ET INTERPRETATION	43
II.4.1	LA VARIATION DE L'ECLAIREMENT	44
II.4.2	LA VARIATION DES IRRADIATIONS HORAIRES	44
II.4.3	LA VARIATION DES IRRADIATIONS JOURNALIERES	47
II.4.4	LA VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DE LA DUREE D'INSOLATION	48
II.5.	CONCLUSION	50
II.6.	REFERENCES	51
 CHAPITRE III: MODELISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL		 52
III.1.	INTRODUCTION	53
III.2.	MODELISATION DU RAYONNEMENT GLOBAL HORIZONTAL	54
a)	Modèle de Perrin de Brichambaut (WMO)	54
b)	Modèle de R.sun	55
c)	Modèle de Davies & Hay	55
d)	Modèle de Bird & Hulstrom	56
III.2.2.	RAYONNEMENT GLOBALE HORIZONTALE EN FONCTION DE LA DUREE D'INSOLATION	57
III.2.3.	RAYONNEMENT GLOBAL HORIZONTAL A PARTIR DES SORTIES DE MODELE METEOROLOGIQUE	58
III.3.	MODELISATION DU RAYONNEMENT GLOBAL INCLINE	60
III.3.1	ONGLES OPTIMAL MENSUEL ET ANNUEL	60
III.3.2	MODELES D'ESTIMATION	62
a)	Modèle de Liu-Jordan	63
b)	Modèle de Hay	63
c)	Modèle de Baltas	63
d)	Modèle de Klucher	64
III.4	RESULTATS ET INTERPRETATIONS	64
III.4.1	ESTIMATION DE L'ECLAIREMENT GLOBAL HORIZONTAL A CIEL CLAIR	64
III.4.2	ESTIMATION DU GLOBALE HORIZONTAL A PARTIR DE LA DUREE D'INSOLATION	67
III.4.3.	ESTIMATION DU RAYONNEMENT A SORTIE DE MODELE METEOROLOGIQUE	68
III.4.4	ESTIMATION DU RAYONNEMENT GLOBAL INCLINE	70
a)	Simulations à Ciel clair	71
b)	Simulations à Ciel couvert	72
III.5	CONCLUSION	76
III.6	REFERENCES	77
 CHAPITRE IV: ESTIMATION DE L'ALBEDO ET DU RAYONNEMENT GLOABL A PARTIE DES IMAGES SATELLITAIRES		 80
IV.1	INTRODUCTION	81
IV.2	ETAT DE L'ART	82
IV.2.1	Albédo de surface	82
IV.2.2	Rayonnement global	82
IV.3	DOMAINE D'ETUDE	82
IV.4	DONNEES	83
IV.4.1	Mesures au sol	83
IV.4.2	Trouble de Linke	84
IV.4.3	Données satellite	84
	METHODES	85
IV.5.1	Estimation de l'Albédo de surface.	85
IV.5.1.1	Equation de transfert radiatif	85
IV.5.1.2	Calcul des différents types d'albédos	87
a)	Albédo planétaire	87
b)	Albédo des eaux	87

c)	Albédo du Sol couvert et semi-couvert	87
d)	Albédo des Surfaces désertiques	88
e)	Albédo des nuages	88
IV.5.1.3	Constitution de l'image de référence	89
IV.5.1.4	Radiation mesurée par satellite	90
IV.5.1.5	Radiation atmosphérique E°	91
IV.5.1.6	Transmittance atmosphérique	91
IV.5.2	L'information de l'indice d'enneigement	91
IV.5.3	Estimation Du Rayonnement Global	92
a)	Approche 1	92
b)	Approche 2	93
IV.6	RESULTATS ET INTERPRETATIONS	94
IV.6.1	Albédo de surface	94
IV.6.2	Rayonnement global	98
IV.6.2.1	Irradiation horaire	99
IV.6.2.2	Irradiation journalière	106
IV.7	CONCLUSION	108
IV.8	REFERENCES	109
CHAPITRE V: CARTOGRAPHIE DU RAYONNEMENT SOALIRE		112
V. 1.	INTRODUCTION	113
V.2.	DOMAINE D'ETUDE	114
V.3.	DONNEES	115
a)	Mesure du rayonnement au sol	115
b)	Les données NASA-SSE	116
c)	Modèle numérique de terrain SRTM	117
V.4.	METHODOLOGIE	117
V.4.1	Prétraitement des données	118
V.4.2	Interpolation spatiale	118
V.4.3	Correction d'altitude	119
V.5.	RESULTATS ET INTERPRETATIONS	120
a)	Validation par des mesures au sol	120
b)	La distribution spatiale du rayonnement solaire	121
V.6.	CONCLUSION	128
V.7	REFERENCES	129
CONCLUSIONS ET PESPECTIVES		132
BIBLIOGRAPHIE		136
ANNEXES		146
A :	MESURE DU RAYONNEMENT - NORME ISO 9060	147
B :	RESEAU DE STATIONS METEOROLOGIQUES	149
C :	CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE (CAH)	150
D :	METHODES D'EVALUATION	152
E :	PUBLICATIONS DE L'AUTEUR	154

LISTES DES FIGURES

Chapitre I: RAYONNEMENT SOLAIRE

Figure I.1 :	Spectre du rayonnement solaire reçu hors atmosphère	9
Figure I.2 :	Constante solaire selon les équations (I-2) et (I-3)	10
Figure I.3 :	Cycle saisonnier de l'éclairement dû au rayonnement solaire hors-atmosphère	11
Figure I.4 :	Moyennes mensuelles des sommes quotidiennes du rayonnement solaire extra-terrestre	13
Figure I.5 :	\overline{H}_o en fonction des mois de l'année pour chaque latitude	13
Figure I.6 :	\overline{H}_o en fonction des mois de l'année pour la latitude 20°N, 30°N et 40°N.	14
Figure I.7 :	Structure de l'atmosphère terrestre	16
Figure I.8 :	Classification nuageuse de l'ISCCP	18
Figure I.9 :	Spectres du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère	19
Figure I.10 :	Schéma des principaux processus se produisant dans l'atmosphère	20
Figure I.11 :	Masse d'air optique atmosphérique	21
Figure I.12 :	Variation de la Masse optique en fonction de l'angle zénithal	22
Figure I.13 :	Variation journalière de la Masse optique à Adrar, 18 Juin 2013	23
Figure I.14 :	Facteur de trouble de Linke TL moyennes mensuelles (Janvier et Juillet)	25
Figure I.15 :	Facteur de trouble de Linke moyennes mensuelles	25
Figure I.16 :	Variation spectrale de l'albédo pour quelques types de surface	27
Figure I.17 :	Composantes principales du rayonnement solaire	28

Chapitre II: SOURCES ET TRAITEMENT DES DONNEES RELATIVES AU RAYONNEMENT SOLAIRE

Figure II.1 :	Réseau d'Héliographe (1983-2012).	36
Figure II.2 :	Réseau pyranométrique (ONM et CDER).	37
Figure II.3 :	Cartes de luminances des canaux C1 et C2 du capteur SEVIRI/MSG2	41
Figure II.4 :	Carte de luminance du canal HRV (C12) du capteur SEVIRI/MSG2.	37
Figure II.5 :	L'évolution de l'éclairement direct, diffus et global mesuré au site d'Adrar (a) Ciel Clair, (b) Partiellement nuageux et (c) Totalement couvert	45
Figure II.6 :	La variation des irradiances globales horaires au cours de l'année 2010, pour les stations (a) Alger, (b) : Oran, (c) : Ghardaïa, (d) : Adrar et (e) : In-Amenas.	46
Figure II.7 :	Variation de GHI quotidienne au site d'Adrar (2010).	47
Figure II.8 :	Variation de GHI quotidienne au site d'Adrar du global incliné ~28° (2010)	47
Figure II.9 :	Carte de la durée d'ensoleillement moyen annuel en Heure (1983-2012).	48
Figure II.10:	La variation de la moyenne mensuelle des durées d'insolation quotidienne (1983-2012)	49

Chapitre III: MODELISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL

Figure III.1 :	Grille des prédicteurs sélectionnées	59
Figure III.2 :	Le dispositif de mesure à différents plans d'inclinaison	60
Figure III.3 :	Moyennes mensuelles des irradiances quotidiennes en fonction de l'angle du plan d'inclinaison (Janvier à Juin).	61
Figure III.4 :	Moyennes mensuelles des irradiances quotidiennes en fonction de l'angle du plan d'inclinaison (Juillet à Décembre).	61
Figure III.5 :	Moyenne annuelle des irradiances quotidiennes en fonction de l'angle du plan d'inclinaison	62
Figure III.6 :	Eclairements global horizontale mesures et estimés, 15/01/2014.	65
Figure III.7 :	Eclairements global horizontale mesures et estimés, 03/06/2014.	66
Figure III.8 :	Graphique de dispersion des résultats des simulations pour la station d'Adrar.	69
Figure III.9 :	Confrontation des résultats expérimentales et celles des simulations pour la station d'Adrar	69

Figure III.10:	Eclairements global incliné mesures et estimés, 30/01/2010.	71
Figure III.11:	Eclairements global incliné mesures et estimés, 28/04/2010	71
Figure III.12:	Eclairements global incliné mesures et estimés, 11/01/2010	73
Figure III.13:	Eclairements global incliné mesures et estimés, 15/04/2010	73

Chapitre IV: ESTIMATION DE L'ALBEDO ET DU RAYONNEMENT GLOBAL A PARTIE DES IMAGES SATELLITES

Figure IV.1	Carte d'élévation et localisation des stations de mesure utilisées (GTOPO USGS, Projection cylindrique équidistante, WGS84).	83
Figure IV.2	Modèle de transfert radiatif soleil-pixel-satellite	86
Figure IV.3	Image ciel clair du MSG2/SEVIRI Canal Vis06 pour le mois de Juillet 2010	90
Figure IV.4	Carte de la moyenne annuelle de l'albédo de surface (2010).	95
Figure IV.5	Valeurs mensuelles de l'albédo de surface (2010).	95
Figure IV.6	Variation spatiotemporelle de l'albédo de surface, Zone 1.	96
Figure IV.7	Variation spatiotemporelle de l'albédo de surface, Zone 2.	97
Figure IV.8	Variation spatiotemporelle de l'albédo de surface, Zone 3.	98
Figure IV.9	Graphique de dispersion des résultats de la 1 ^{ière} Approche pour les Stations NORD (DAR-EL-BEIBA et ORAN-SENIA).	100
Figure IV.10	Graphique de dispersion des résultats de la 1 ^{ière} Approche pour la Station de GHARDAIA	100
Figure IV.11	Graphique de dispersion des résultats de la 1 ^{ière} Approche pour les Stations SUD (ADRAR et IN-AMENAS.).	101
Figure IV.12	Graphique de dispersion des résultats de la 1 ^{ière} Approche pour les Stations NORD (DAR-EL-BEIBA et ORAN-SENIA).	102
Figure IV.13	Graphique de dispersion des résultats de la 1 ^{ière} Approche pour les Stations de GHARDAIA	102
Figure IV.14	Même légende que Figure IV.12, Stations SUD (sites 3 et 5).	103
Figure IV.15	Résultats d'évaluation saisonnière Approche 1.	104
Figure IV.16	Résultats d'évaluation saisonnière Approche 2.	105

Chapitre V: CARTOGRAPHIE DU RAYONNEMENT SOALIRE

Figure IV.1 :	Carte d'élévation et localisation des stations de mesure utilisées (GTOPO USGS, Projection cylindrique équidistante, WGS84).	112
Figure IV.2 :	Les moyennes mensuelles des irradiations journalières.	114
Figure IV.3 :	moyennes annuelles des irradiations journalières	120
Figure IV.4 :	moyennes annuelles des irradiations journalières interpolées	121
Figure IV.5 :	le pourcentage de différentes classes du potentiel solaire	121
Figure IV.6 :	Moyennes mensuelles des irradiations quotidiennes	122
Figure IV.7 :	Moyenne des sommes annuelles d'irradiation globale. Résultat de cette étude,(b) celle du projet Atlas de SolarMed.	125

Annexes :

Figure C.1 :	Le dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique	151
Figure D.1 :	Exemple du Graphe de dispersion	153

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I: RAYONNEMENT SOLAIRE

Tableau I.1.	Liste des jours types par mois proposés par Duffie and William	12
Tableau I.2.	Composition de l'atmosphère terrestre	17
Tableau I.3.	Valeurs typiques de l'albédo du sol pour différents types de surface	27

Chapitre II: SOURCES ET TRAITEMENT DES DONNEES RELATIVES AU RAYONNEMENT SOLAIRE

Tableau II.1.	Caractéristiques et objectifs principaux des 12 canaux de prise d'images de SEVIR	40
Tableau II.2.	Les coefficients de calibration des canaux Visible du capteur SEVIRI	42
Tableau II.3	Répartition des stations dans les six classes	48

Chapitre III: MODELISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL

Tableau III.1.	Coordonnées géographiques des stations utilisées.	57
Tableau III.2.	Modèles statistiques utilisés	58
Tableau III.3.	les angles optimaux mensuels pour le site d'Adrar (en degré).	62
Tableau III.4.	Résultats statistiques simulation du 15 Janvier 2014	66
Tableau III.5.	Résultats statistiques simulation du 03 Juin 2014	67
Tableau III.6.	Résultats statistiques du modèle 4 (<i>Modèle de Bird & Hulstrom</i>).	67
Tableau III.7.	Coefficients et scores statistiques site d'Adrar	68
Tableau III.8.	Coefficients et scores statistiques site d'Oran	68
Tableau III.9.	résultats statistiques Situation du 30 Janvier 2010	72
Tableau III.10.	résultats statistiques Situation du 28 Avril 2010	72
Tableau III.11	résultats statistiques Situation du 11 Janvier 2010	74
Tableau III.12	résultats statistiques Situation du 15 Avril 2010	74
Tableau III.13	Irradiations journalières sur les différents plans de collecte pour ciel clair.	74
Tableau III.14	Erreur moyenne relative des modèles théorique (ciel clair).	75
Tableau III.15	Irradiations journalières sur les différents plans de collecte pour ciel couvert.	75
Tableau III.16	Erreur relative des modèles théorique (ciel couvert).	75

Chapitre IV: ESTIMATION DE L'ALBEDO ET DU RAYONNEMENT GLOBAL A PARTIE DES IMAGES SATELLITES

Tableau IV.1.	Coordonnées géographiques des stations	84
Tableau IV.2.	Moyennes mensuelles du facteur de trouble de Linke	84
Tableau IV.3.	Scores statistiques annuels des résultats d'estimation des irradiations horaires	101
Tableau IV.4.	Scores statistiques annuels des résultats d'estimation des irradiations quotidiennes	106
Tableau IV.5.	Tableau récapitulatif des résultats des différentes méthodes utilise les images METEOSAT	107

Chapitre V: CARTOGRAPHIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Tableau IV.1.	Potentiel solaires dans les différentes régions de l'Algérie	113
Tableau IV.2.	Coordonnées géographiques des stations.	113
Tableau IV.3.	Altitudes de différentes sources de données	118
Tableau IV.4.	comparaison des résultats statistiques des données sans (a) et avec correction (b)	119
Tableau IV.5	Grandeurs statistiques des moyennes mensuelles de l'irradiation journalière	122

Annexes :

Tableau. A.1:	Spécifications iso 9060 pyranomètre [3].	148
Tableau B.1:	Coordonnées géographiques des stations météorologique.	149

NOMENCLATURE**LISTE DES SYMBOLES**

- δ : Angle de déclinaison
 θ_s : Angle zénithal solaire
 ε : Coefficient de correction dû à la variation de la distance terre-soleil
 I_{sc} : Constante solaire
 δ_{reel} : Épaisseur optique idéale
 δ_{reel} : Épaisseur optique réelle
 ϕ : Latitude du lieu.
 m_0 : Masse d'air d'ozone
 m : Masse d'air optique
 m_a : Masse d'air optique
 m_{st} : Masse d'air standard
 $\overline{H_0}$: Moyenne mensuelle des sommes quotidiennes
 H_0 : Somme quotidienne du rayonnement solaire extra-terrestre
 T : Température ambiante
 T_{st} : Température ambiante standard
 ω_s : Angle horaire du lever ou du coucher du soleil (en degré).
 ρ'_a : Albédo du ciel clair
°N : degrés Nord
 a_s : Azimut du soleil
CAL_{Offset} : Constant de compensation
CAL_{slope} : Coefficient de calibration linéaire
D : *Rayonnement Diffus*
d : Distance réelle parcourue
 d_0 : Distance du parcours verticalement du rayonnement à travers l'atmosphère.
 D_h : *Rayonnement diffus sur un plan Horizontal*
 D_R : *Rayonnement réfléchi*
 d_{re} : Rayonnement solaire réfléchi par le sol
 D_{skc} : Rayonnement diffus sur un plan horizontal par ciel clair.
E° : Radiation diffuse vers l'extérieur (Hors Atmosphère)
E° : Partie de la radiation diffusée vers l'extérieur de l'atmosphère (bruit)
 F_c : Coefficient de dispersion de l'atmosphère
G : *Rayonnement Global*
 G_{skc} : Rayonnement global sur un plan horizontal par ciel clair.
 H_0^t : Eclaircissement Horizontal au sommet de l'atmosphère
 h_a : Épaisseur de la couche atmosphérique
I, I_h : *Rayonnement direct sur un plan Horizontal*
 I_0 : Eclaircissement solaire au sommet de l'atmosphère
-

I_N : Rayonnement direct sur un plan Normal
 I_{skc} : Rayonnement direct sur un plan horizontal par ciel clair.
 j : Numéro du jour de l'année
 L : Luminance énergétique
 n_c : Indice d'ennuagelement
 p : Pression atmosphérique
 p_{st} : Pression au niveau de la mer
 R : Rayon de la terre
 Ref : Réflectance
 R_{TOA} (Top Of Atmospher Radiance) Energie solaire à la limite de l'atmosphère
 s : Albédo sphérique
 S : Durée moyenne d'ensoleillement
 S : Facteur de correction du diffus
 S_0 : Durée astronomique du jour
 $T(\theta)$: Transmittance totale
 T_L : Trouble de Link
 T_n : Facteur de transmissivité
 U_0 : Epaisseur de la couche d'ozone
 U_w : Epaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm)
 z : l'altitude du site
 α_{mer} : Albédo Mer et Océan.
 A_{nuage} ou α_c : Albédo des nuages
 A_p : Albédo planétaire
 A_{s1}, A_{s2} : Albédo de surface
 α_w Coefficient d'absorption par la vapeur d'eau
 β : Angle du plan d'inclinaison
 δ : Déclinaison
 δ : Épaisseur optique de Rayleigh
 θ_v : Angle de vue du capteur
 λ_o : Longueur d'onde
 ρ : Albédo terrestre
 $\rho_{0.6}, \rho_{0.8}$: Réflectance Vis06 et Vis08
 ρ_{HRV} : Réflectance HRV
 τ : Fonctions de transmission de l'atmosphère dû à :
 τ_{aa} L'atténuation par les aérosols
 τ_g L'absorption par les mélanges gazeux
 τ_o L'absorption par l'ozone
 τ_r La diffusion moléculaire
 τ_w L'absorption par la vapeur d'eau
 φ : Latitude du lieu
 ω_0 Coefficient de réflexion unitaire relatif à la diffusion par les aérosols.
 ω_s : Angle horaire du lever pour un plan horizontal
 ω'_s : Angle horaire du lever réel sur un plan incliné.

LISTE DES ABREVIATIONS

- ALADIN - Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational
 CDC - Climate Diagnostics Center
 CEDRL : - Canada's Energy Diversification Research Laboratory
 C_N : - Couverture Nuageuse moyenne
 EST - Estimation ou Estimée ((Eclairage ou irradiance))
 EUMETCAST - Système Eumetsat pour la diffusion des Données Environnementales
 EUMETSAT - European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites.
 GAW - Global Atmospheric Watch
 GHI : - Global Horizontal Irradiation
 GTOPO - Global TOPOgraphic data set (Global 30 Arc-Second Elevation)
 HRV - High-Resolution Visible
 IR - Infra-red
 ISCCP - International Satellite Cloud Climatology Project
 LAAR - Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements.
 MBE - Mean Bias Error.
 MES - Mesure ou Mesurée (Eclairage ou irradiance)
 METEOSAT - Satellite Géosynchrone de Météorologie
 METEOSAT - Meteorological Satellite
 MSG - METEOSAT Second Génération.
 NASA - National Aeronautics and Space Administration, Agence nationale (américaine) de l'aéronautique et de l'espace)
 NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration
 NREL : - National Renewable Energy Laboratory
 OMM - Organisation Météorologique Mondiale.
 ONM - Office National de la Météorologie
 RMSE - Root Mean Square Error (erreur quadratique moyenne).
 RT ou RTM - Radiative transfer model (Modèle de transfert radiatif).
 SEVIRI - Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager
 SRTM - Shuttle Radar Topography Mission Mission de cartographie radar de la Terre
 SSE : - Surface meteorology and Solar Energy service.
 USGS - U.S. Geological Survey's Center
 VIS - Visible
 WGS84 - World Geodetic System 1984

INTRODUCTION GENERALE

1. INTRODUCTION

L'énergie solaire est la ressource énergétique inépuisable la plus abondante sur terre, elle représente la principale source d'énergie du système terre-atmosphère (Pekarek 2001). Le bilan énergétique, que les recherches ont tendance à élaborer pour une quantification, s'identifie en majeure partie par les échanges d'énergie radiative entre la surface de la Terre et l'atmosphère, il représente la combinaison des composantes du rayonnement de courte et de grande longueur d'onde, arrivant et quittant ce système. Si l'on considère une surface horizontale, l'équation du rayonnement net s'écrit sous la forme:

$$R_n = R_s(1 - \alpha) + (R_T \downarrow - R_T \uparrow)$$

Le premier terme est le bilan radiatif solaire net, il survient surtout dans le domaine spectral des courtes longueurs d'onde (0.3 à 3 μ m), R_s est le rayonnement solaire global incident sur la surface et le terme αR_s représente le rayonnement solaire réfléchi par cette surface (α est l'albédo de surface). Le deuxième terme est le bilan des rayonnements des grandes longueurs d'onde (thermique), l'étude de ce genre de rayonnement dépasse le cadre de cette thèse qui tend à traiter uniquement le rayonnement solaire.

L'étude du rayonnement solaire est un domaine de recherche d'une vaste ampleur dont les applications sont d'ordre météorologique, environnementale et climatologique, ainsi que celles dérivées et couvrant les activités de recherche dans les domaines de l'exploitation de l'énergie solaire. Ce dernier volet occupe une position de première importance, du fait que l'utilisation de cette source d'énergie offre une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts. Cette utilisation s'oriente essentiellement vers la production de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïque et vers une captation de la chaleur solaire thermique pour le chauffage et autres applications.

Notre région en particulier le Sud Algérien est caractérisée par un énorme potentiel énergétique solaire, l'un des plus importants au monde. Plus de 2.000.000 km² du pays reçoivent un ensoleillement de l'ordre de 2.500 kWh/m²/an. Du fait que cette énergie est devenue le premier vecteur de développement économique durable dans plusieurs pays du monde. Le recours au développement de ce type d'énergie est un choix stratégique pour notre pays, afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile (MEM, 2011). Dans ce contexte, le gouvernement Algérien s'est engagé dans un ambitieux programme de développement des énergies renouvelables largement dominé par le solaire, où le solaire thermique et le solaire photovoltaïque constitue une part essentielle de ce programme, et qui prévoit d'atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité (Stambouli *et al.*, 2012).

Les besoins et la possibilité d'exploitation de l'énergie solaire sont directement liés aux conditions climatiques. Cette source est intermittente dans le temps et dans l'espace ce qui pose des problèmes de dimensionnement des systèmes énergétiques solaire. Ces aspects exige une parfaite connaissance du gisement solaire avant d'entreprendre toute action ou programme de valorisation. Cet objectif ne peut être atteint que si les données radiométriques sont disponibles d'une manière continue dans l'espace et dans le temps.

2. Problématique

Bien qu'il existe un réseau de stations de mesure radiométrique, leur nombre reste très limité en Algérie, où on dispose seulement de sept stations qui assurent la mesure des composantes globale et diffuse du rayonnement solaire. Le nombre de ces stations est donc très insuffisant, de même les coûts d'investissement et de maintenance de ces stations de mesures étant élevés. Pour ces raisons, plusieurs études ont été menées sur l'évaluation du rayonnement solaire par des modèles empirique dans le but de générer des séquences artificielles de données radiométriques (Mellit *et al.*, 2005).

D'autres travaux ont utilisés soit les paramètres météorologiques, soit la durée d'insolation pour estimer les composantes du rayonnement solaire (Chegaar & Chibani., 2001 ; Mecibah *et al.*, 2014), d'autres auteurs ont proposé d'utiliser des méthodes d'interpolation, pour la prédiction des données à partir du réseau radiométrique disponible (Bechini *et al.*, 2000). Les résultats de ces études sont encourageants et parfois très efficaces là où on dispose d'un réseau d'observation très dense. Mais dès que la distance entre les stations augmente, l'estimation devient de plus en plus grossière. Plusieurs auteurs ont rapporté que l'erreur de l'interpolation est en fonction de la distance du site concerné, plus cette distance augmente plus l'erreur quadratique moyenne relative est élevée (Zelenka, *et al.*, 1999) , en plus pour notre réseau de mesure, cette distance dépasse les 200 km pour les régions sahariennes de notre pays.

Des techniques de mesure nouvelles doivent être mises en œuvre afin de déterminer les répartitions spatiales et temporelles du gisement énergétique solaire. Et aussi Un effort particulier devra être consenti pour le traitement de telles mesures. Outre la télédétection spatiale offre cette possibilité, ayant une couverture spatio-temporelle suffisante, qu'il est impossible d'obtenir par les moyens conventionnels (observations), une disponibilité très rapide, une qualité stable dans le temps, et une bonne compétitivité par rapport aux autres systèmes d'observation.

Le projet spatial européen EUMETSAT a mis sur orbite un ensemble de satellite géostationnaire permettant une couverture globale de la terre, avec une résolution horizontale élevée, plus particulièrement les images acquissent par le capteur SEVIRI embarqué sur le satellite MSG2 (Meteosat Second Generation), qui atteint 1 km pour le canal HRV, en ce qui concerne la résolution temporelle, ces images sont disponible toute les 15 minute (Schumann *et al.*, 2002).

3. Contexte et objectifs

En raison de l'étendu de notre pays, du coût très élevés de l'investissement et de la maintenance des stations de mesures radiométrique, et de l'avantage qu'offre la télédétection spatiale avec une couverture globale, une résolution spatiale élevée et un prélèvement temporel fréquent qu'aucun autre système d'observation ne peut offrir, les images satellites se présentent comme le moyen le plus pratique pour le suivi spatio-temporel des différentes composantes du bilan énergétique solaire à savoir l'albédo de surface et le rayonnement global.

Pour toutes ces raisons, on se fixe par la présente étude, comme objectif d'établir une cartographie spatio-temporelle couvrant tout le territoire national et prenant en comptes les principales composantes du rayonnement solaire, dans ce contexte les études suivantes ont été menées :

- (i) Une modélisation du rayonnement solaire dans différentes conditions météorologiques a été réalisée. Initiée par une étude comparative de quatre modèles d'estimation de l'éclairement solaire à ciel clair sur le site d'Adrar, puis l'estimation du rayonnement global horizontale et inclinée, cette deuxième partie nous permet d'établir des modèles de régression donnant le global horizontal en fonction des données météorologiques mesuré au sol, et des données prévue par des modèle numérique du temps, ensuite le passage au rayonnement inclinée (Benatallah *et al.*, 2016; Oulimar & Bouchouicha., 2013; Bouchouicha *et al.*, 2017 ; Aoun & Bouchouicha., 2017).
- (ii) L'albédo de surface et le rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontal a été évaluée à partir d'observations satellites, Nous allons aussi présenter les résultats de l'utilisation de deux approches d'estimation de l'irradiation solaire utilisant des images du satellite européen MSG2 (Bouchouicha *et al.*, 2016a,b). Une évaluation par rapport aux mesures de cinq stations caractérisées par des conditions climatiques très différentes de notre pays.

(iii) Afin d'évaluer le potentiel solaire et de caractériser sa variabilité spatio-temporelle à long terme sur l'ensemble du territoire, dans le but d'identifier les régions favorables à l'implantation des systèmes énergétiques solaires, une cartographie de ce potentiel en termes de rayonnement globale reçu sur une surface horizontale a été réalisée (Bouchouicha *et al.*, 2014 ; Bouchouicha *et al.*, 2015).

4. Organisation du travail

Le présent manuscrit est organisé de la façon suivante:

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les aspects physiques du rayonnement solaire (caractéristique, nature...), les différents phénomènes physiques qui seront sujettes à ce rayonnement, la structure de l'atmosphère et ces effets sur le rayonnement solaire. La connaissance de ces divers paramètres permet d'établir un bilan radiatif du système terre- atmosphère.

Le deuxième chapitre présente des différents équipements utilisés pour mesurer des différentes composantes du rayonnement solaire, et toute la chaîne de traitement de données, avec les résultats et les interprétations.

Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation du potentiel énergétique solaire sur site à travers une modélisation du rayonnement solaire dans différentes conditions météorologiques.

Le quatrième chapitre traite l'évaluation d'une méthode d'estimation de l'irradiation solaire au sol utilisant des images du satellite. Cette évaluation a été réalisée par comparaisons avec un jeu de données de cinq stations de mesure représentant les différentes régions de notre pays, et pour des irradiances horaires.

Le cinquième chapitre est consacré à une cartographie des ressources solaires sur l'ensemble du territoire Algérien, suivi par une analyse géospatiale de ce potentiel.

Le manuscrit s'achève par des conclusions et des recommandations complétant cette étude.



LE RAYONNEMENT
SOLAIRE

I.1. INTRODUCTION

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des autres énergies renouvelables. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique. Cependant, ce rayonnement est sujette à plusieurs perturbations, qui varient avec la constitution verticale de l'atmosphère terrestre (nuage, aérosol, ...etc), qui constitue une barrière empêchant ainsi l'entière radiation solaire de passer.

Il serait tout d'abord intéressant de connaître quelques notions sur le rayonnement solaire (caractéristique, nature, intensité...), les différents phénomènes physiques qui seront sujettes à ce rayonnement, la structure de l'atmosphère et ces effets sur le rayonnement solaire. Ainsi, la connaissance de ces divers paramètres permet d'établir un bilan radiatif du système terre- atmosphère.

I.2. SOURCE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

La principale source d'énergie dont nous disposons est le soleil, qui est situé à environ 150 millions de kilomètres de la terre, il émet de manière isotrope un rayonnement qui peut être assimilé, en première approximation, à celui d'un corps noir (parfaitement émissif et parfaitement absorbant) à 5800°k. Ce rayonnement se propage dans l'espace sous forme d'onde électromagnétique, il atteint la terre après environ huit minutes de son émission. Les 98% de l'énergie émise se situent dans la bande de longueur d'onde comprise entre 0.25 et 3 μ m [1].

La Terre reçoit une partie de ce rayonnement. Le flux énergétique reçu par la Terre est appelé éclairement énergétique, abrégé en éclairement. La moyenne annuelle de cet éclairement reçu sur un plan normal aux rayons du soleil situé au sommet de l'atmosphère est appelée constante solaire.

La [figure I.1](#) illustre la distribution spectrale du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère [2].

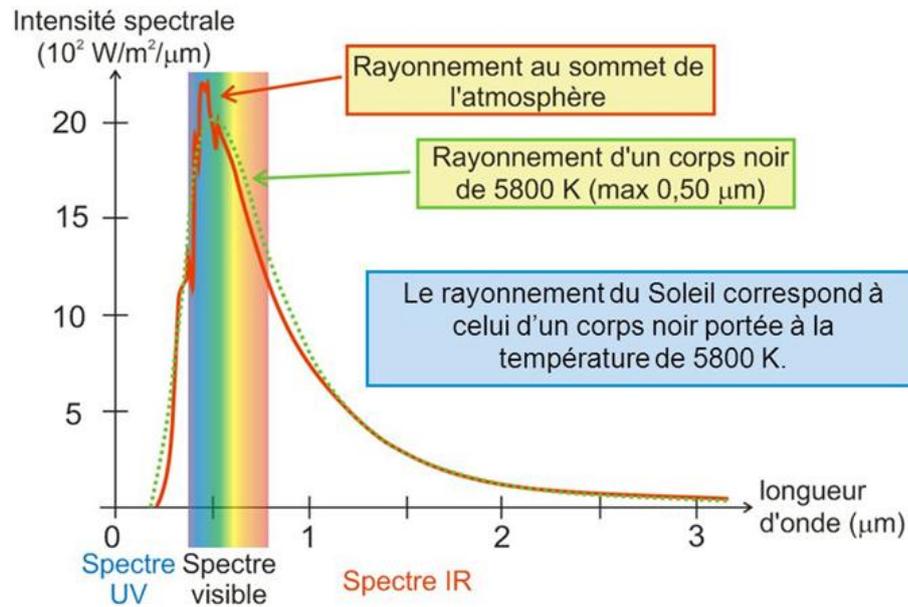


Figure. I.1: Spectre du rayonnement solaire reçu hors atmosphère.

I.3. RAYONNEMENT SOLAIRE HORS ATMOSPHERE

I.3.1. Eclairage et constante solaire

L'éclairage est le flux solaire traversant une surface unitaire perpendiculaire aux rayons du soleil et se situant au sommet de l'atmosphère, il dépend de la distance réelle terre-soleil, laquelle varie selon les saisons. Il s'exprime en W/m^2 .

La constante solaire I_{sc} représente la moyenne annuelle de cet éclairage [3]. La valeur de I_{sc} la plus utilisée est celle adoptée par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) en octobre 1981 avec une incertitude de 1% ($I_{sc}=1367 \text{ W/m}^2$).

Les mesures par satellite ont permis d'établir une formule empirique, d'une précision acceptable, donnant l'intensité de l'éclairage au sommet de l'atmosphère I_0 en fonction du facteur de correction de la distance Terre-Soleil ε , I_0 est exprimée par :

$$I_0(j) = I_{sc} \varepsilon(j) \quad (\text{I-1})$$

Le facteur ε représente le coefficient de correction dû à la variation de la distance terre-soleil, il varie en fonction du numéro du jour de l'année j , il est calculé par l'équation suivante [4]:

$$\varepsilon(j) = 1 + 0,0344 \times \cos\left(\frac{2\pi}{365,25} j\right) \quad (\text{I-2})$$

Si une grande précision est requise, il est possible d'envisager l'utilisation de celle issue d'un développement en série de Fourier [5]:

$$\varepsilon(j) = 1.00011 + 0.0342 \cos(d) + 0.00128 \sin(d) + 0.000791 \cos(2d) + 0.000077 \sin(2d) \quad (\text{I-3})$$

Avec :
$$d = \frac{2\pi}{365}(j-1)$$

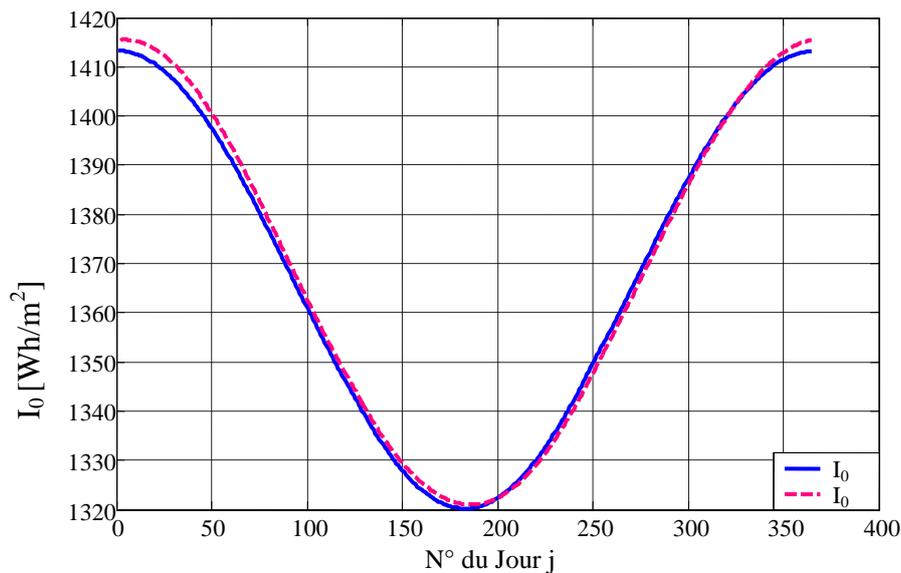


Figure. I.2: Constante solaire selon les équations (I-2) et (I-3).

Comme on peut le voir sur la Figure. I.2, le niveau minimal d'environ 1320 W/m² est atteint le mois juillet, et le niveau maximal (1415 W/m²) est atteint durant la fin du mois de décembre et le début du mois de janvier.

Compte tenu des cycles journaliers et saisonniers auxquels est soumis un point à la surface de la terre, cette valeur de la constante solaire correspond à une énergie moyenne reçue à la surface de l'atmosphère égale à 342 W/m². La figure I.3 présente une synthèse des mesures effectuées par satellite du rayonnement solaire reçu à la surface de l'atmosphère.

Localement, l'éclairement varie suivant la latitude et la saison. En moyenne annuelle, le maximum d'ensoleillement est donc aux latitudes tropicales, mais il varie au cours de l'année et est même maximal aux pôles pendant l'été local (Figure I.3): la durée du jour de 24h fait plus que compenser l'angle d'incidence réduit dû à la latitude élevée.

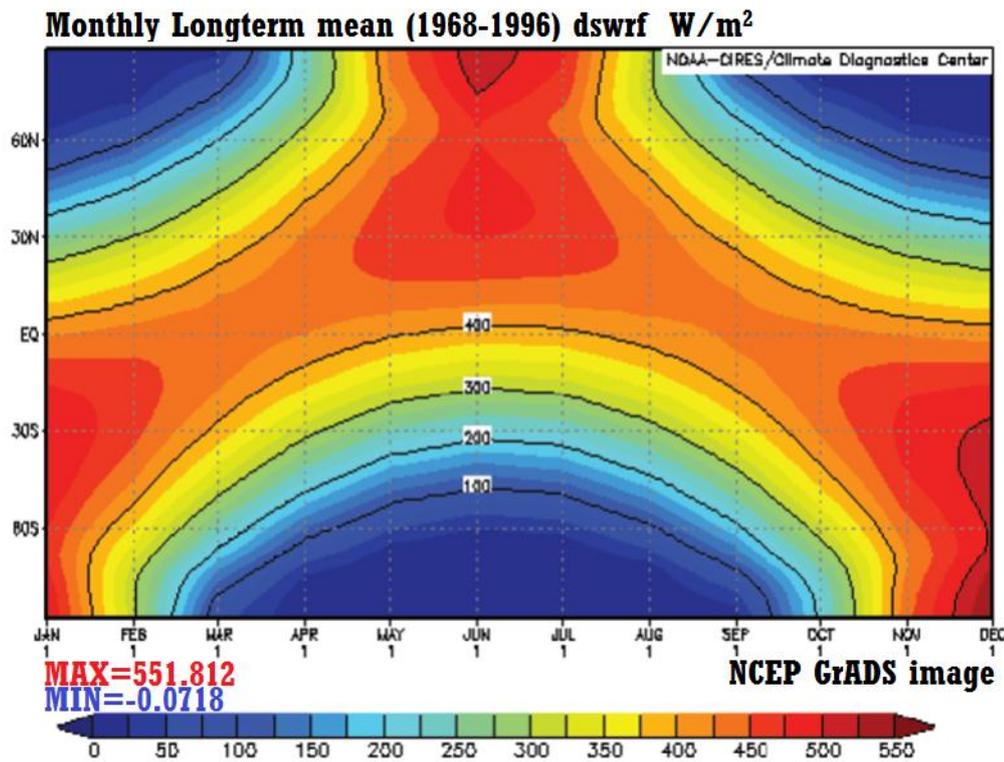


Figure. I.3: Cycle saisonnier de l'éclairement dû au rayonnement solaire hors-atmosphère (NOAA-CDC).

I.3.2. Variation de l'éclairement

L'éclairement énergétique incident à un instant en un endroit donné au sommet de l'atmosphère sur un plan horizontal dépend de la valeur de la distance terre-soleil à ce moment, de l'inclinaison de l'axe de la terre sur l'elliptique et de la latitude du lieu considéré. L'éclairement instantané H_0^t peut être exprimé en fonction de l'angle solaire zénithal θ_s^t , il est égal au produit de l'éclairement sur plan normal I_0 par le cosinus de cette angle [3].

$$H_0^t = I_0 \cos \theta_s^t \quad (\text{I-4})$$

L'angle zénithal solaire θ_s^t est fonction du temps, du jour de l'année et de la latitude. Il peut être calculé grâce à la relation:

$$\cos \theta_s = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega_s \quad (\text{I-5})$$

Avec :

ω_s : l'angle horaire du lever ou du coucher du soleil (en degré).

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad (\text{I-6})$$

δ : L'angle de déclinaison qui représente l'angle entre la direction terre soleil et le plan

équatorial de la terre, et qui est exprimées par :

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284+j}{365}\right) \quad (\text{I-7})$$

φ : La latitude du lieu.

Donc il est possible de calculer l'éclairement énergétique extra-terrestre dû au rayonnement solaire incident à tout moment de l'année, arrivant sur une surface horizontale, et en tout point du globe.

La sommes quotidiennes du rayonnement solaire extra-terrestre est exprimée par

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_0 \left\{ \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \sin \omega_s \right\} \quad (\text{I-8})$$

Il est possible de déterminer la journée type mensuelle (définie par une déclinaison caractéristique) et qui a une irradiation quotidienne égale à la moyenne mensuelle. Le jour recommandé pour chaque mois avec le numéro du jour correspondant de l'année sont données dans le [tableau I.1](#). De ce fait on peut déduire les moyennes mensuelles des sommes quotidiennes du rayonnement solaire extra-terrestre, comme suit:

$$\bar{H}_0 = H_0 \Big|_{\delta=\delta_c} \quad (\text{I-9})$$

Tableau. I.1: Liste des jours types par mois proposés par [3].

Mois	Jour type	N° de jour
Janvier	17	17
Février	16	47
Mars	16	75
Avril	15	105
Mai	15	135
Juin	11	162
Juillet	17	198
Aout	16	228
Septembre	15	258
Octobre	15	288
Novembre	14	318
Décembre	10	344

Localement, l'éclairement varie suivant la latitude et la saison. En moyenne mensuelle, le maximum d'ensoleillement est donc atteint aux latitudes tropicales, mais il varie au cours de l'année ([Figure I.4](#)).

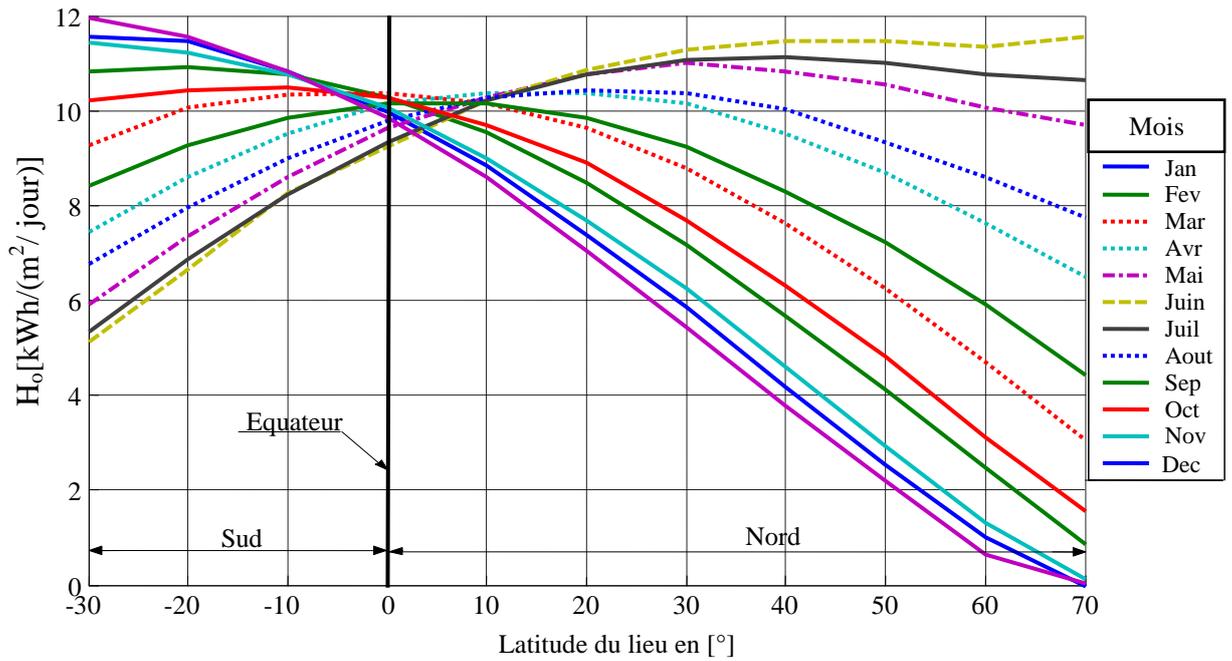


Figure. I.4: Moyennes mensuelles des sommes quotidiennes de \overline{H}_o .

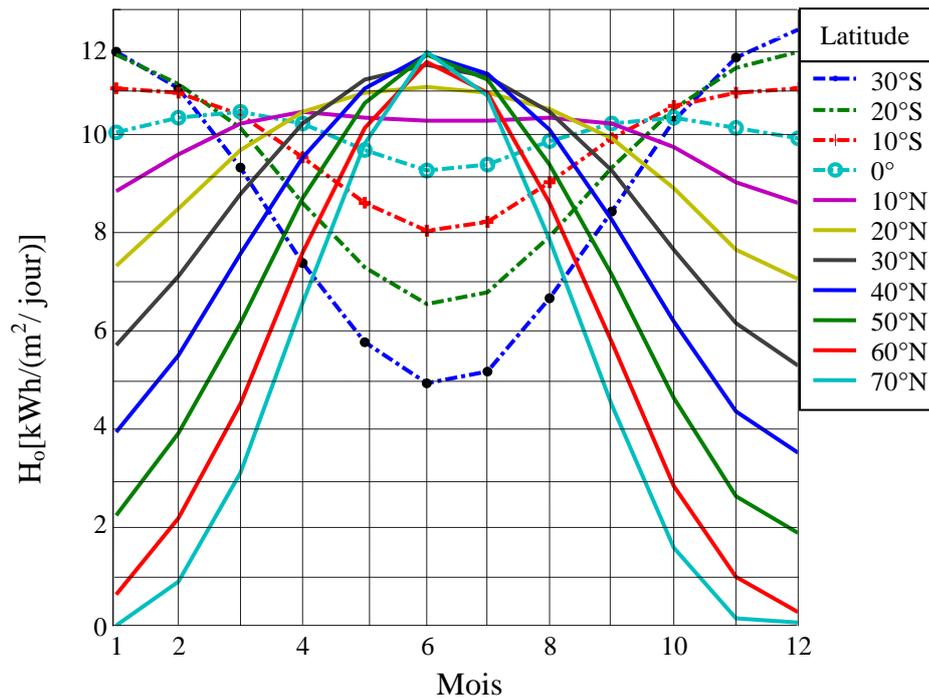


Figure. I.5: \overline{H}_o en fonction des mois de l'année pour chaque latitude.

Pour l'Algérie les latitudes à retenir sont de 20°N, 30°N et 40°N. Les valeurs intermédiaires peuvent être extrapolées. La figure I.6 représente les moyennes mensuelles des sommes quotidiennes du rayonnement solaire extra-terrestres relatives à ces latitudes en fonction des mois de l'année.

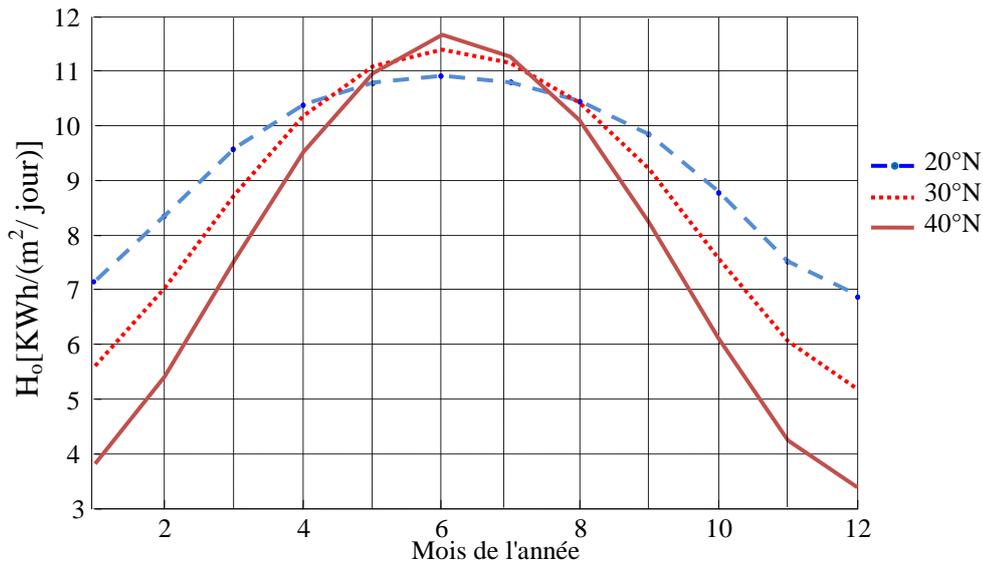


Figure. I.6: \overline{H}_o en fonction des mois de l'année pour la latitude 20°N, 30°N et 40°N.

Selon ces résultats les régions du sud sont les plus énergétiques ; de 7 à 10.9 kWh/(m². jour). Les moyennes pour l'année sont de l'ordre :

$$\overline{H}_o (20^\circ\text{N}) = 9,43 \text{ [kWh/(m}^2 \cdot \text{jour)]}$$

$$\overline{H}_o (30^\circ\text{N}) = 8,74 \text{ [kWh/(m}^2 \cdot \text{jour)]}$$

$$\overline{H}_o (40^\circ\text{N}) = 7,84 \text{ [kWh/(m}^2 \cdot \text{jour)]}$$

Nous concluons que l'énergie solaire reçue par une surface horizontale placée hors atmosphère est fonction uniquement des paramètres astronomiques suivants :

- La latitude du lieu.
- La déclinaison solaire
- L'angle horaire du lever du soleil.
- L'époque de l'année

I.4. RAYONNEMENT SOLAIRE A TRAVERS L'ATMOSPHERE

Le rayonnement se propageant dans l'atmosphère en interagissant avec les particules en suspension (molécules, poussières, gouttes d'eau...), il peut alors être soit absorbé soit diffusé (changement de direction). La somme de l'absorption et de la diffusion est appelée extinction du rayonnement. La composition de l'atmosphère joue un rôle important dans le bilan énergétique terrestre.

I.4.1. Atmosphère terrestre composition et structure

L'atmosphère terrestre est une enveloppe gazeuse entourant la terre, maintenue près de la surface grâce à la force gravitationnelle. Elle constitue une enveloppe protectrice pour notre planète, et est indispensable à la vie sur terre. Elle contient l'air que nous respirons, protège toutes les formes de vie contre les radiations dangereuses du soleil grâce à sa couche d'ozone, C'est un élément majeur dans le cycle de l'eau, qui contribue à adoucir de manière notable la température moyenne à la surface du globe.

a) Structure de l'atmosphère

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches au sein desquelles la température évolue différemment en fonction de l'altitude : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère (cf. [Figure I.7](#)). Le passage d'une couche à une autre est matérialisé par une zone de transition qui marque les limites où s'observent les inversions thermiques : la tropopause, la stratopause et la mésopause [6].

La troposphère est la couche la plus proche de la surface de la terre, son épaisseur varie de 7 kilomètres de hauteur au-dessus des pôles à 18 kilomètres au-dessus de l'équateur. Cette couche contenant 80 à 90 % de la masse totale de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau (la pression et la densité y sont maximales). C'est dans cette couche que se produisent la plupart des phénomènes météorologiques (formation des nuages, pluie...etc.) et les mouvements atmosphériques (vents...etc.).

Dans la couche supérieure de la troposphère, la température commence à augmenter, sa hauteur varie des pôles jusqu'à l'équateur, mais aussi selon les saisons. La stratosphère s'étend entre 8-15 km et 50 km d'altitude. Cette région abrite vers les 25 km d'altitude une bonne partie de la couche d'Ozone. La mésosphère se situe entre 50 km et 80 km d'altitude. Dans cette couche la température recommence à décroître en fonction de l'altitude pour atteindre les -80°C au plus haut niveau de cette couche (à environ 80 km). La thermosphère s'étend entre 80 km et 350 km à 800 km d'altitude. Dans cette zone les températures sont très élevées mais la densité est extrêmement faible et il y règne une pression très faible.

b) Composition de l'atmosphère

En effet, l'atmosphère est un mélange de gaz contenant des particules liquides (gouttelettes d'eau...etc.) et solides (cristaux de glace, poussières, cristaux salins...etc.) en suspension. La plus grande part de sa masse étant proche de la surface. Les molécules de

gaz se raréfient en altitude et la pression diminue. L'atmosphère est donc de moins en moins dense quand l'altitude augmente [7].

La composition de l'atmosphère joue un rôle important dans le bilan énergétique terrestre. Les gaz se présentent à différentes concentrations, parfois presque constantes, et parfois très variables dans le temps et dans l'espace. En plus des gaz, l'atmosphère est constituée de particules en suspension.

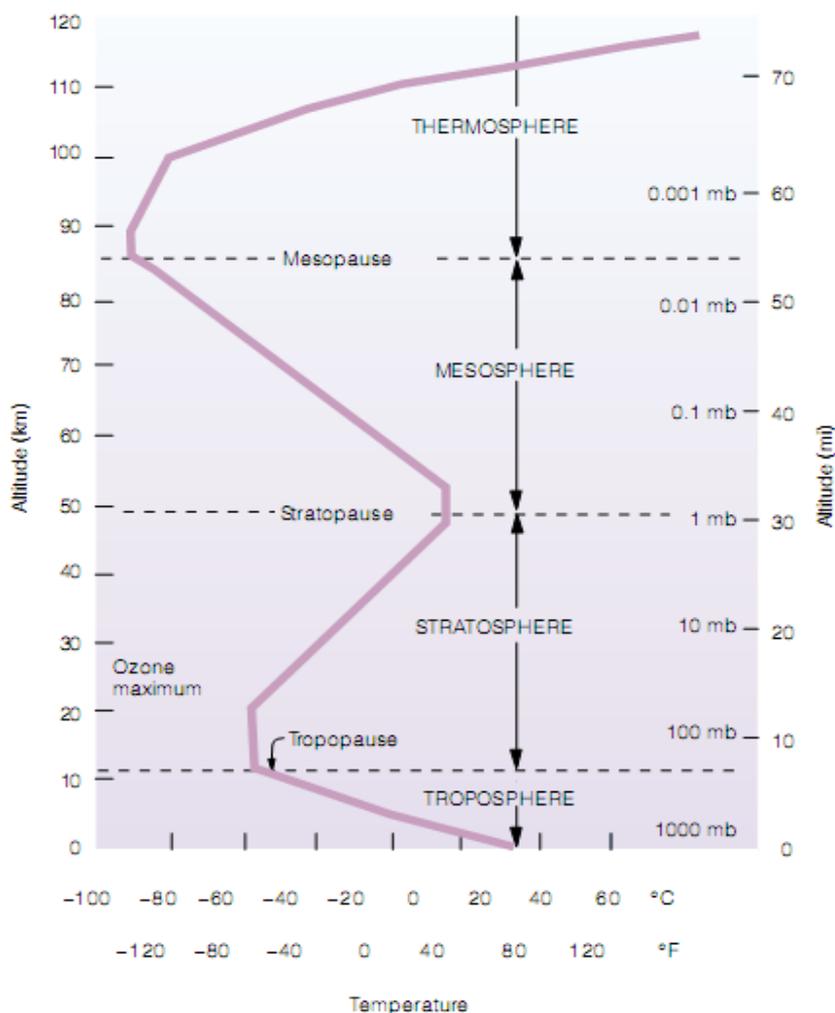


Figure. I.7: Structure de l'atmosphère terrestre. La ligne forte représente la variation de la température moyenne dans chaque couche atmosphérique [6].

L'atmosphère contient également des aérosols et des nuages. Les aérosols représentent une faible part de la masse de l'atmosphère (de l'ordre de 10^{-9}), mais ils jouent un rôle déterminant dans le comportement du rayonnement solaire dans l'atmosphère à travers les différents processus de réflexion, de diffusion et de l'absorption [8].

En gros, 20% du rayonnement solaire qui arrive au sommet de l'atmosphère est réfléchi vers l'espace par les nuages. L'atténuation de l'éclairement direct par les nuages dépend du type de nuages, leur épaisseur et le nombre de couches qui le constituent. Une détermination théorique de l'éclairement direct et diffus est tout à fait difficile. Une telle tâche nécessite des données complexes sur les types et propriétés optiques des nuages.

Tableau. I.2: Composition de l'atmosphère terrestre [6].

Gazes à concentration Permanent			Gazes à concentration Variable		
Gaz	Symbole	% volumiques	Gaz (+ Particules)	Symbole	% volumiques
Azote	N ₂	78.08	Vapeur d'eau	H ₂ O	0-4
Oxygène	O ₂	20.95	Dioxyde de carbone	CO ₂	0.037
Argon	Ar	0.93	Méthane	CH ₄	0.00017
Néon	Ne	0.0018	Nitrous oxide	N ₂ O	0.00003
Helium	He	0.0005	Ozone	O ₃	0.000004
Hydrogène	H ₂	0.00006	Particules (poussières, ...etc)		0.000001
Xénon	Xe	0.000009	Chlorofluorocarbones (CPCs)		0.00000002

Un nuage est formé d'un ensemble de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace en suspension dans l'air. Son comportement dépend de la lumière qu'il reçoit, de la répartition des particules qui le constituent, de la nature de ces dernières, de leur dimension, et de leur densité. Les gouttelettes d'eau d'un nuage proviennent de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air.

La Figure. I.8 donne la classification des nuages faite à partir de la base de données ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project), en fonction de la pression à leur sommet et leur épaisseur optique. Ce qui caractérise l'atténuation du rayonnement à travers le nuage.

Pour décrire les nuages dans notre application, il est nécessaire de considérer les paramètres suivants :

- Altitude des nuages (sommet des nuages): est donnée aussi en termes de niveau de pression.
- Couverture nuageuses (ou la nébulosité): c'est la fraction du ciel couverte par les nuages. La connaissance de la couverture nuageuse est restée cantonnée dans les stations météorologiques professionnelles et est réalisée par l'observateur de permanence toutes les heures ou toutes les 03 heures selon les offices de météorologie. La méthode est basée sur une observation visuelle uniquement qui vise à définir en huitième (baptisé Octa en

météorologie) la surface du ciel couverte par les nuages dans son champ de vision ainsi que l'altitude de la première couche [2].

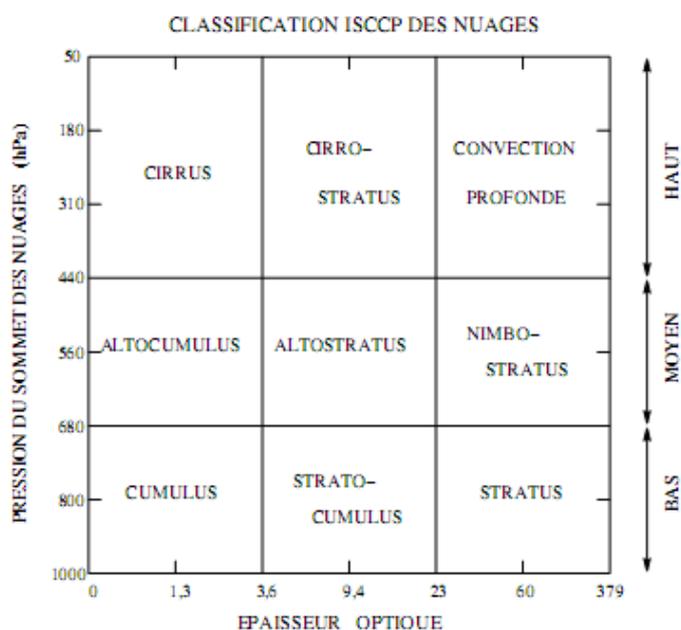


Figure. I.8: Classification nuageuse de l'ISCCP [5].

I.4.2. Atténuation du rayonnement solaire

Lors de sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est fortement atténué par différents éléments atmosphériques comme les molécules, les aérosols, les gaz, les gouttelettes nuageuses ou les cristaux de glace. Chacun de ces éléments possède ses propriétés optique et physique. Les phénomènes physiques liés à l'extinction se scindent en :

- L'absorption du rayonnement par les gaz atmosphériques tel que O_2 , O_3 , H_2O , CO_2 et d'autres polluants.
- La diffusion du rayonnement par les particules, les molécules d'air et la vapeur d'eau, qui se décompose en processus de diffraction, de réfraction et de réflexion.

L'ensemble des longueurs d'ondes du rayonnement solaire ne réagit pas de la même façon lors de la traversée des 15 km d'épaisseur que représente environ l'atmosphère. Schématiquement, on peut signaler que :

- Dans le domaine de l'ultraviolet du spectre solaire presque toutes les longueurs d'ondes inférieures à 0,3 micromètre sont entièrement absorbées par l'ozone (O_3) en limite supérieure de l'atmosphère ;
- Le rayonnement visible de 0,4 à 0,8 micromètre est relativement peu absorbé dans le cas d'un ciel clair, mais en revanche sa diffusion est d'autant plus importante que la longueur d'onde est faible ;

- Le rayonnement infrarouge est absorbé par les gaz tel que CO_2 , H_2O et O_3 de la troposphère.

L'influence de ces éléments atmosphériques se retrouve sur la distribution spectrale du rayonnement spectral solaire, comme on peut le voir sur la [Figure. I.9](#).

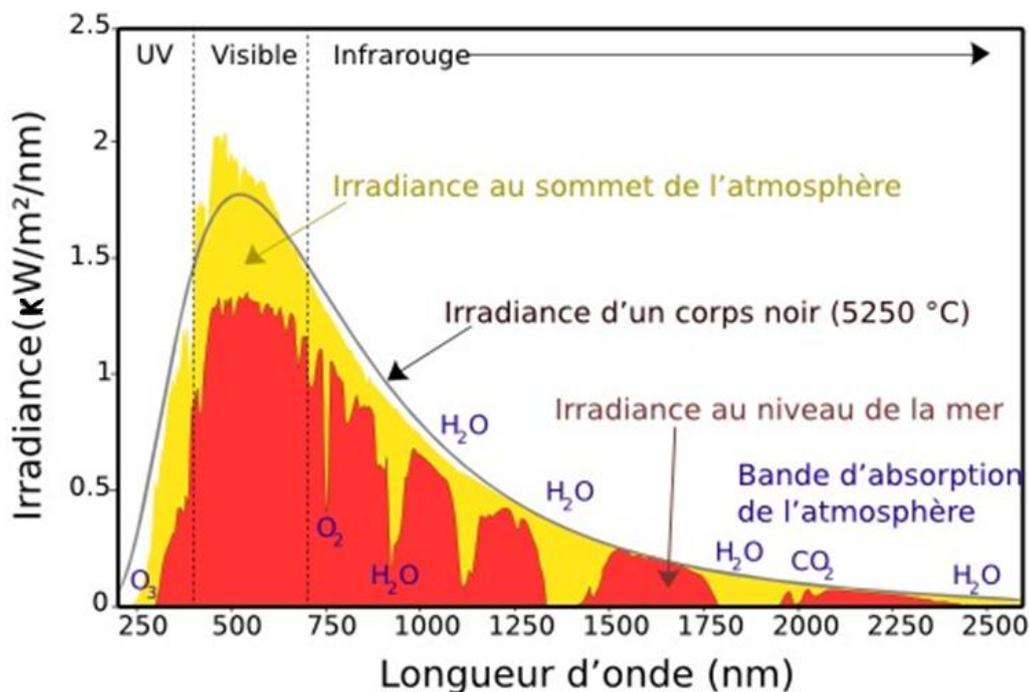


Figure. I.9: Spectres du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère (courbe rouge) et à la surface de la Terre (jaune) [9].

I.4.3. BILAN ÉNERGÉTIQUE DU SYSTÈME TERRE / ATMOSPHÈRE

Au cours de la traversée de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est divisé en plusieurs flux dues notamment à des processus d'absorptions et de diffusions. La figure ci-dessous, illustre par des valeurs moyennes, le devenir de l'énergie solaire incidente dans l'atmosphère en pourcentage de l'énergie solaire incidente hors atmosphère [10,11].

L'éclairement solaire incident au sommet de l'atmosphère est estimé à environ 342 W/m^2 en moyenne annuelle. Une fraction du rayonnement qui arrive au sommet de l'atmosphère (environ 30%) est réfléchi et renvoyée vers l'espace par les différentes composantes de l'atmosphère (6 % par l'air, 20 % par les nuages) et par les surfaces terrestres (4%). L'albédo global terrestre exprime cette fraction. Lors de sa traversée de l'atmosphère, environ 19% du rayonnement est absorbé par un mélange de gaz et de particules en suspension (gaz, poussières et nuages). Seulement 53% de l'éclairement

solaire incident parvient à la surface. L'énergie disponible en surface dépend en plus des fractions réfléchi et absorbée par l'atmosphère terrestre elle-même [11].

L'atténuation du rayonnement à travers l'atmosphère est en fonction de la densité, de la taille et de la nature des molécules et des particules rencontrées. Elle varie aussi avec la longueur de la trajectoire des rayons solaires à travers l'atmosphère. Cette longueur est caractérisée par la 'masse atmosphérique', appelée aussi masse d'air optique.

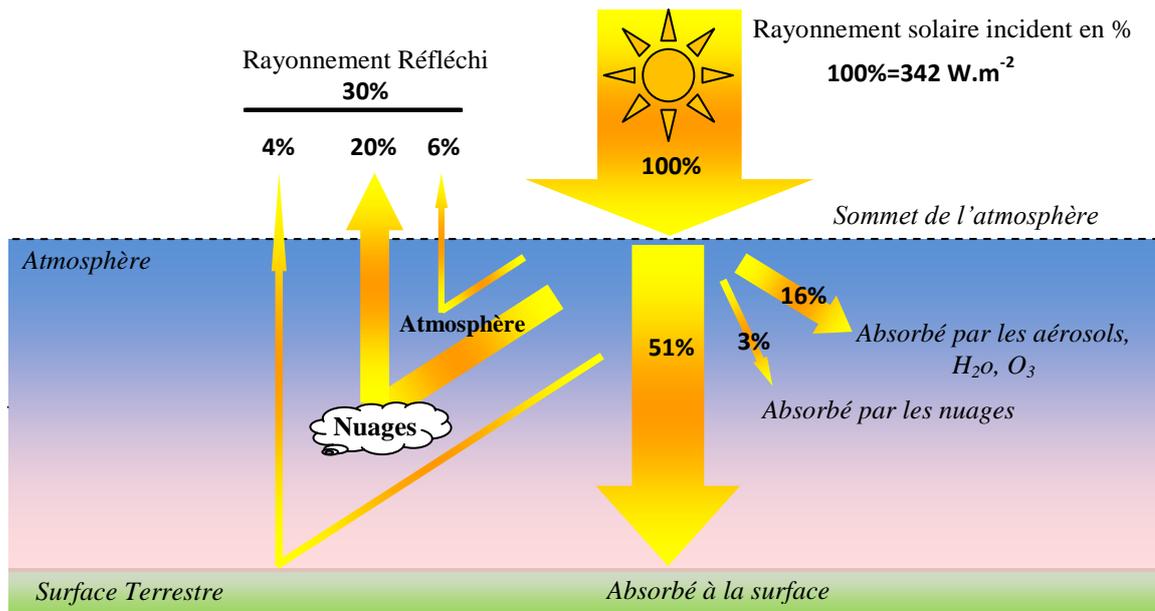


Figure. I.10: Bilan énergétique annuelle du système "Terre-Atmosphère".

I.4.2. Paramètres Atmosphériques

a) Masse d'air optique

L'extinction du rayonnement solaire est fonction de nombre de molécules et particules rencontrées en traversant les couches atmosphériques, donc elle est fonction de la distance parcourue dans l'atmosphère. On définit le trajet optique ou la masse d'air optique qui représente le rapport de l'épaisseur de l'atmosphère réellement traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair) sur celle traversée verticale au niveau de la mer (Figure. I.11). Cette épaisseur est beaucoup plus faible à l'équateur que dans les régions polaires. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$m = \frac{d}{d_0} \quad (\text{I-10})$$

Avec : d_0 : distance du parcours du rayonnement pour une incidence verticale, et d : distance réelle parcourue par le rayonnement pour une position quelconque.

Pour des fins de modélisation, une première approximation est utilisée pour évaluer la masse d'air, elle prend comme référence les conditions normales de température et de pression à savoir $P = 1\text{atm}$ et $T = 273\text{ K}$, elle est valable pour des angles zénithaux inférieurs à 70° , elle est donnée par [12]:

$$m_{st} = \frac{1}{\sin(h)} = \frac{1}{\cos(\theta_s)} \quad (\text{I-11})$$

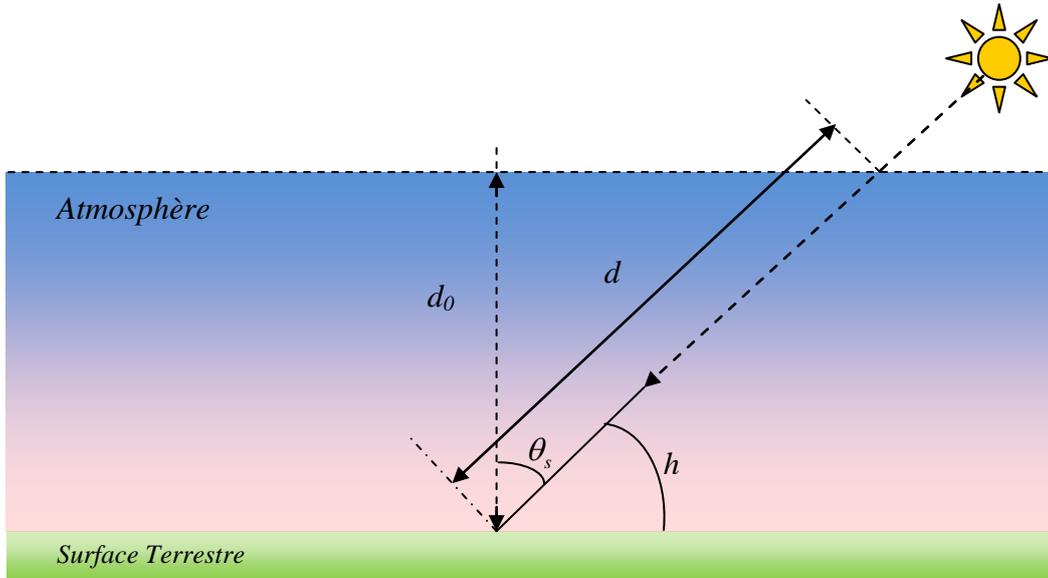


Figure. I.11: Masse d'air optique (atmosphérique). L'angle zénithal θ_s est le complémentaire de la hauteur solaire h

Dans le cas des grandes valeurs de θ_s , un terme correctif est ajouté qui tient compte de la sphéricité de la Terre. La masse d'air relative est donnée par Kasten [12].

$$m_{st} = \frac{1}{\cos(\theta_s) + 0.15(93.885 - \theta_s)^{-1.253}} \quad (\text{I-12})$$

On utilise une autre formule qui a été proposé par Badescu (1987) [13]:

$$m_{st} = \frac{-\cos(\theta_s) + \sqrt{\cos^2(\theta_s) + f^2 - 1}}{f - 1} \quad (\text{I-13})$$

Avec $f = 1 + \frac{h_a}{R}$

Dans laquelle, R représente le Rayon de la terre ($R=6371.2\text{ km}$), et h_a : l'épaisseur de la couche atmosphérique en fonction de la latitude (latitude 45° , $h_a=11\text{ km}$)

Les résultats de la variation de la masse d'air obtenus en fonction de l'angle zénithal solaire appliquant les trois méthodes de calcul sont représentées dans la Figure. I.12.

La masse d'aire m varie de 1 à 8, les valeurs les plus importantes correspondent au lever et au coucher du soleil car plus le soleil est bas sur l'horizon, plus la couche traversée par le rayonnement est importante, et le minimum est atteint au midi solaire (lorsque le soleil est au zénith du lieu).

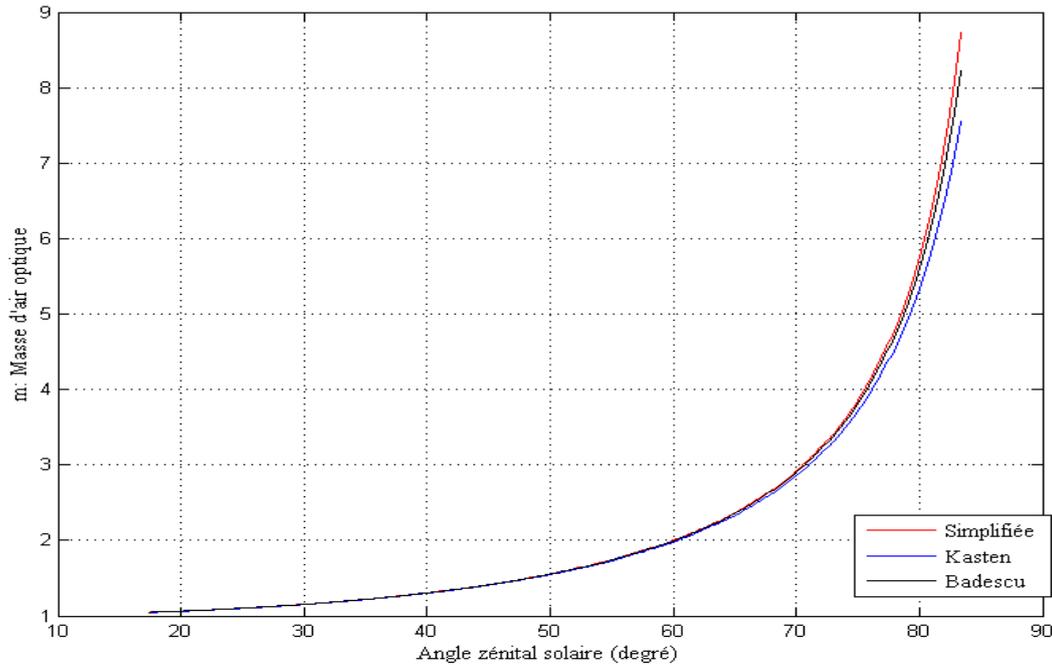


Figure.1.12: Variation de la Masse optique en fonction de l'angle zénithal.

Ce paramètre ne tient pas compte des propriétés physiques de la couche traversée. Comme cette couche est un mélange de gaz qui dépend de la température et de la pression. Elle doit être corrigée pour tenir compte de la diminution de la pression due à l'augmentation de l'altitude du site.

Dans le cas où on dispose des informations sur la pression atmosphérique, la température et la hauteur du site, une correction du model atmosphérique international peut être appliqué utilisant l'expression suivante [13]:

$$m_a = m_{st} \frac{p(z)}{p_{st}(z)} \quad (\text{I-14})$$

Avec p et p_{st} sont respectivement la pression atmosphérique du site considéré et celle correspondante au niveau de la mer.

$$p_{st}(z) = p_{st}(z=0) \left[\frac{T(z)}{T_{st}(z=0)} \right]^{5.2561} \quad (\text{I-15})$$

La température ambiante standard au niveau de Mer $T_{st}(z=0)$ qui est évaluée de la valeur mesurée $T(z)$ à une l'altitude z du site.

$$T_{st}(z=0) = T(z) + 0.0065 \cdot z \tag{I-16}$$

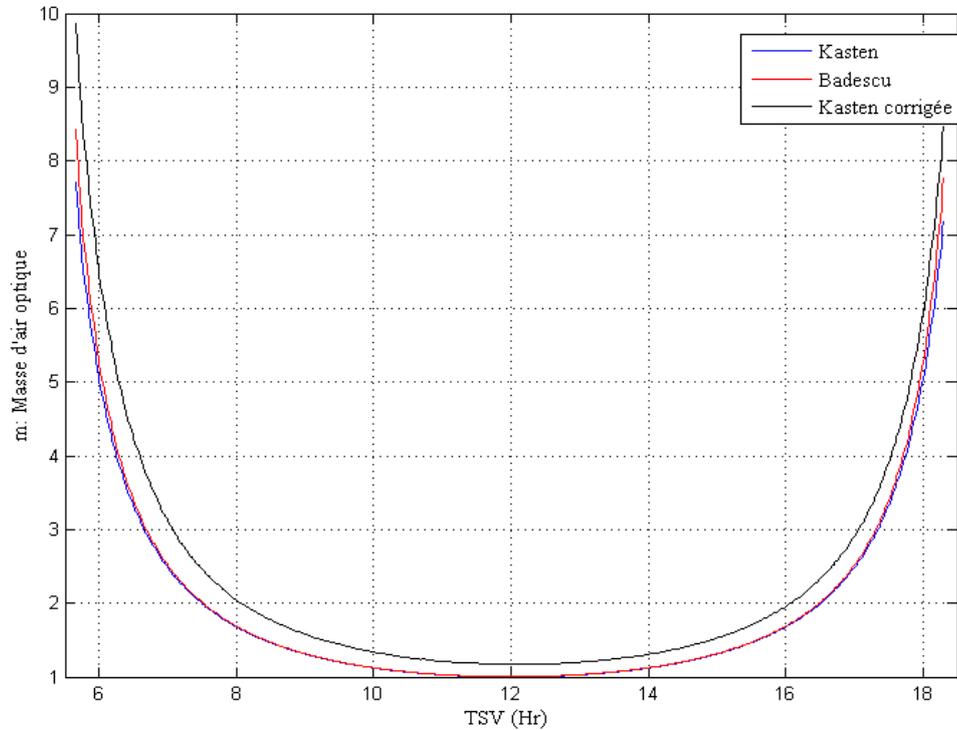


Figure.I.13: Variation journalière de la Masse optique à Adrar, 18 Juin 2013.

b) Trouble atmosphérique

Chaque composant atmosphérique agit sur le rayonnement solaire par les phénomènes d'absorption et de diffusion. Link a regroupé ces diverses extinctions dans un seul coefficient appelé trouble de Link ou trouble atmosphérique T_L , par définition le trouble de Link est le nombre d'atmosphères pures et sèches qu'il faudra accumuler pour provoquer la même extinction intégrale du rayonnement direct que l'atmosphère réelle.

$$T_L = \frac{\delta_{reel}}{\delta_{ideal}} \tag{I-17}$$

δ_{reel} : Épaisseur optique réelle

δ_{ideal} : Épaisseur optique idéale (sans aérosols, ni vapeurs d'eau, ni nuages)

Pour des applications énergétiques, plusieurs formules pour de calcul ont été proposées; Nous reprendrons celle établie par Dogniaux. Le facteur de trouble est calculé de la manière suivante [15]:

$$T_L = \frac{5.6\sqrt{m+5} - 3.7}{m} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (\text{I-18})$$

I_0 et I sont les éclairements solaires directs extra-terrestre et au sol.

Les données du facteur de trouble de Linke utilisées dans la suite de notre étude sont issues de la base de données SoDa Service [15].

Le produit du projet SoDa est sous forme de cartes globale de 2160 points en latitude 4320 points en longitude qui résultent de la fusion de données mesurées au sol et les données en points de grille provenant de satellite (luminances en ciel clair, la vapeur d'eau, épaisseur optique des aérosols) [15,16]. L'erreur quadratique moyenne de l'estimation de ce facteur est de l'ordre 0.7, La méthode utilisée pour élaborer cette base de données est détaillé sur le site Web HelioClim.

La [Figure. I.14](#) présente les variations spatiale des moyennes mensuelles du facteur de trouble de Linke du mois de janvier et de juillet.

La variation des moyenne mensuelle du facteur de trouble de Linke sur quelque sites dans différentes régions de notre pays est données sur la [figure I.15](#), qui montre des valeurs relativement élevées au cours de la saison estivale surtout au mois d'août ([Figure I.15](#)). Ces valeurs élevées peuvent être expliquées par la forte présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et une très faible diffusion par les aérosols (grains de sable et autres). Au mois de juin, on a constaté sur le site que la diffusion par les aérosols (grains de sables) est prépondérante et avec un faible taux d'humidité.

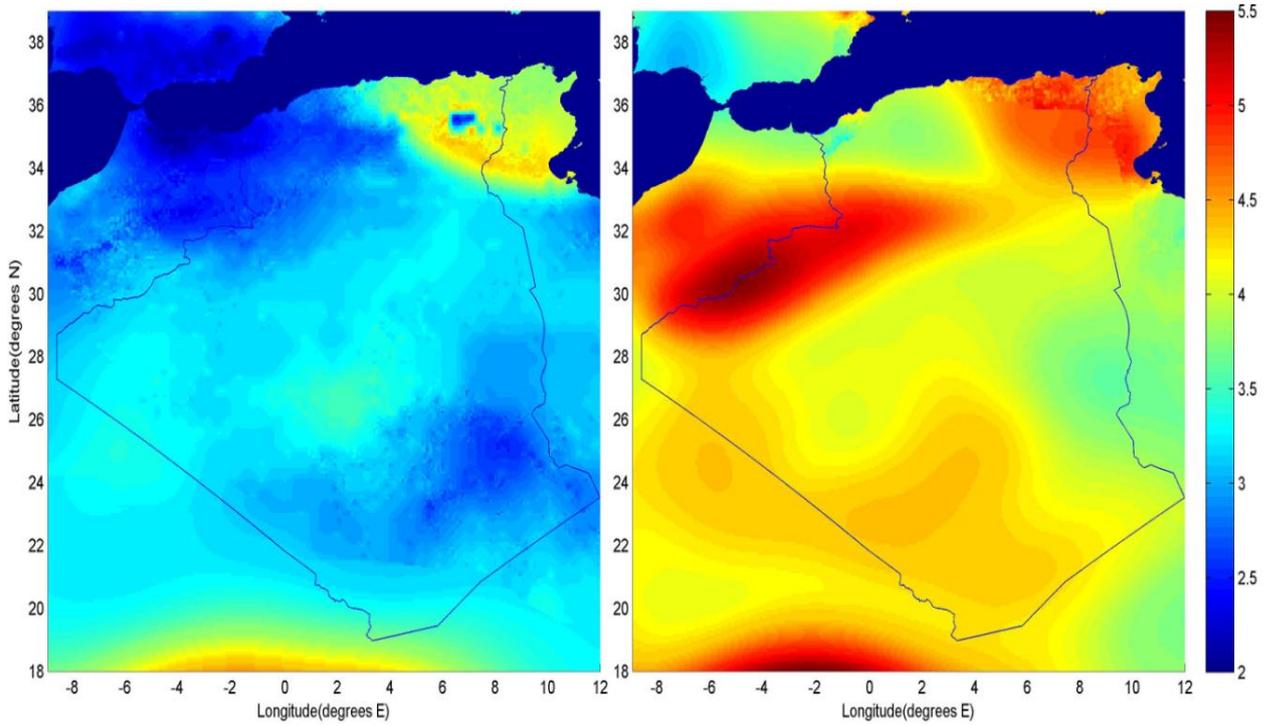


Figure. I.14: Facteur de trouble de Linke T_L moyennes mensuelles (Janvier et Juillet).

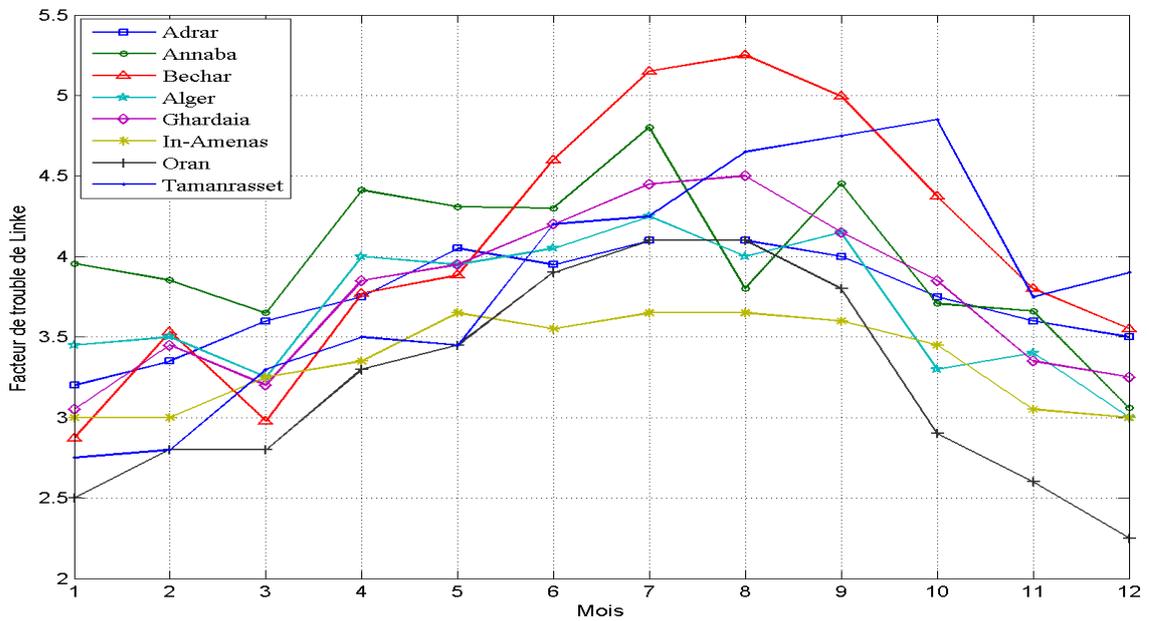


Figure. I.15: Facteur de trouble de Linke moyennes mensuelles.

I.5. RAYONNEMENT AU SOL

La radiation solaire arrive au sommet de l'atmosphère sous forme d'ondes électromagnétiques. Elle se subdivise premièrement en deux parties :

- La première est directement réfléchi vers l'espace avant de pénétrer dans l'atmosphère.
- La deuxième partie s'enfonce dans l'atmosphère, subit des réfractions et des diffractions pour être à son tour soit renvoyée vers l'espace soit vers le sol.

Ces phénomènes font que l'on peut regrouper les rayons solaires parvenant au sol en trois composantes principales, qui sont le direct, le diffus et le réfléchi [17].

a) Rayonnement direct Normal I_N

Le rayonnement solaire direct est le rayonnement reçu sur un plan normal parvenant directement du disque solaire sans avoir subi de diffusion. Il se diffère de façon notable du rayonnement atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en particulier du fait de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère.

b) Rayonnement diffus D

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

c) Rayonnement réfléchi d_{re}

Le rayonnement réfléchi d_{re} est la composante de l'éclairement par la surface terrestre, cette composante est prise en compte seulement dans le cas d'une surface inclinée, elle dépend essentiellement du type de surface.

La fraction d'énergie réfléchi par rapport à l'énergie incidente est appelée Albédo. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Il dépend fortement de la nature du sol et l'état de la surface. L'albédo total du système Terre/Atmosphère vaut environ 0.3 ce qui signifie que 30% du rayonnement solaire est réfléchi et 70% est absorbé (voir Section I.4.3).

L'albédo des forêts est proche de 0.15, celui des surfaces désertiques vaut environ 0.35, tandis que celui des surfaces englacées s'élève à 0.6. On peut citer quelques valeurs moyennes typiques pour différentes sortes de sols ou d'états de surface (Tableau I.3) [18].

Tableau. I.3: Valeurs typiques de l'albédo du sol.

Nature du sol	Valeur	Valeur moyenne
Sable sec	0,1 à 0,4	0,25
Désert	0,2 à 0,4	0,3
Prairies, herbages	0,2 à 0,3	0,25
Forêt	0,1 à 0,2	0,15
Neige fraîche	0,7 à 0,8	0,8
Neige fondante	0,5 à 0,7	0,6
Habitat très dense	0,1 à 0,2	0,15
Habita	0,15 à 0,25	0,2

Par ailleurs, pour un même type de sol, la valeur de l'albédo varie avec la longueur d'onde (Figure I.16). Elle peut être plus grande que la valeur moyenne de l'albédo. Par exemple, l'albédo de la neige avoisine 1 pour les petites longueurs d'onde tandis qu'elle est égale à 0 pour les grandes. Il est donc nécessaire de prendre en compte la distribution spectrale de l'albédo du sol.

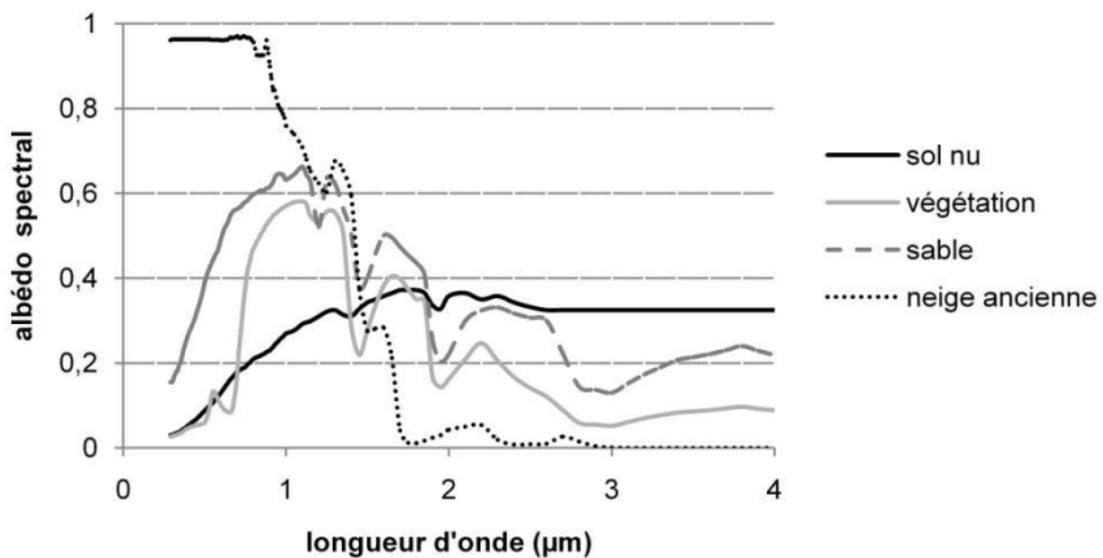


Figure. I.16: Variation spectrale de l'albédo pour quelques types de surface [18].

d) Rayonnement global G_h

C'est le rayonnement reçu sur une surface provenant de toute la voute céleste et du disque solaire.

❖ Rayonnement Global sur une surface horizontale

Le rayonnement global parvenant au sol sur une surface horizontale G_h est la somme du rayonnement direct et du diffus (Figure I.17), selon la formule suivante :

$$G_h = D_h + I_N \cos(\theta_s) \tag{I-19}$$

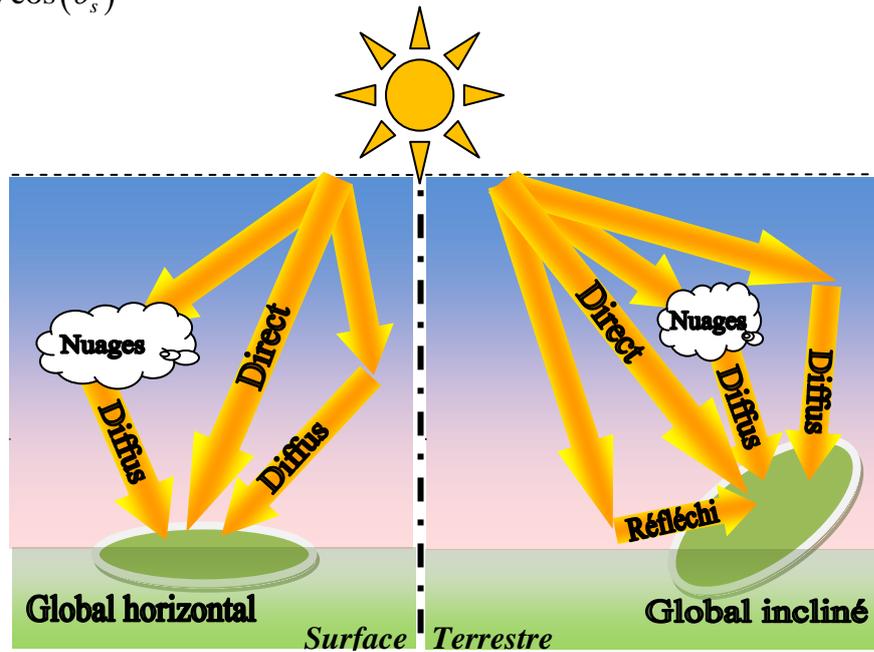


Figure. I.17: Composantes principales du rayonnement solaire.

❖ Le rayonnement Global sur une surface inclinée

Le rayonnement solaire global sur une surface arbitraire ayant une inclinaison β par rapport à l'horizontale et un angle azimutal γ est la somme des trois composantes directe, diffuse et réfléchi par le sol du rayonnement solaire (Figure I.17) [1, 2].

$$G_{\beta} = D_{\beta} + I_{N\beta} + d_{re} \tag{I-20}$$

L'énergie solaire varie en fonction de :

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

I.6. CONCLUSION

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique. En exploitant le rayonnement solaire, considéré comme la ressource principale, qui est très considérable à l'échelle planétaire, ce type d'énergie offre une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts.

L'aspect aléatoire de cette source d'énergie montre l'importance et la nécessité de connaître le potentiel solaire avant de procéder à l'installation de n'importe quel système solaire. Le meilleur moyen d'identifier ce potentiel sur un site donné est de disposer d'une bonne série de mesures de différents paramètres de rayonnement au sol.

Pour ces raisons, nous présenterons dans le prochain chapitre les divers dispositifs et instruments nécessaires pour réaliser les différentes mesures, et nous détaillerons toute la chaîne de mesure, avec des résultats et interprétations.

I.7. REFERENCES

- [1] **Pierre Bessemoulin** and Jean Olivieri,. (2000) ‘‘Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette’’, La Météorologie 8e série - n° 31 – septembre, 2000.
- [2] **Francis Codron**,. (2012) ‘‘Transfert radiatif bilan énergétique’’, Note du cours, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France, 2012.
- [3] **Duffie, John A** and William A. Beckman,. (2010) ‘‘ Solar energy thermal processes’’, University of Madison, USA, WI, 2010.
- [4] **Kumar, L.**, Skidmore, A.K. and Knowles, E,. (1997): ‘‘Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment’’, International Journal of Geographical Information Science, 11(5): 475-497, 1997.
- [5] **Bird, R. E** and Riordan, C. J, (1986): ‘‘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 (1):87-97, 1986.
- [6] **Ahrens D. C.**, (2000): ‘‘ Essentials of meteorology, an invitation to the atmosphere’’, 3^{ème} Ed, 2000.
- [7] **Clef CEA**, (2009) : ‘‘ Terre et environnement, Memo A « Voyage au centre de la Terre et aux confins de l’atmosphère’’, Hiver 2008-2009, N°57, PP21-24, 2009.
- [8] **DeMOOR G**, (2007) : ‘‘transfert radiatif en météorologie dynamique’’, Cours et manuels, N°17, Météo-France, 2007.
- [9] Wikipedia., Bilan radiatif de la Terre., lien (2015) : https://fr.wikipedia.org/wiki/Bilan_radiatif_de_la_Terre. Accédé en Novembre 2015.
- [10] **Hansen, J.**, Nazarenko, L., Ruedy, R., Sato, M., Willis, J., Del Genio, A., Koch, D., Lacis, A., Lo, K., Menon, S., Novakov, T., Perlwitz, J., Russell, G., Schmidt, G.A., and Tausnev, N, (2005): ‘‘Earth’s energy imbalance: confirmation and implications’’, Science, (308), 1431-1435, 2005.
- [11] **Kevin E.**, Trenberth, John T. Fasullo, and Jeffrey Kiehl, (2009): ‘‘Earth’s global energy budget’’, American Meteorological Society, 311-324, 2009.
- [12] **Kasten H**, (1966): ‘‘A new table and approximation formula for the relative optical air mass’’, Archiv fur Meteorol Geophys und Bioklim B: 206–223, 1966.
- [13] **Badescu V**, (1987): ‘‘Can the model proposed by Barbaro et al be used to compute global solar radiation on the Romanian territory?’’, Solar Energy, 38: 247–254, 1987.
- [14] **Dogniaux R.**, (1984): ‘‘De l’influence de l’Estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur l’Evaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair. Application aux Données Radiométriques de l’IRM à Uccle’’, Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N°20, 1984.
- [15] **Remund J.**, L. Wald, M. Lefevre, T. Ranchin and J. Page, (2003): Worldwide Linke Turbidity Information, Proceedings of The ISES Solar World Congress 2003, Goeteborg, Sweden, 16-19, June 2003.
- [16] **Lefèvre M.**, Remund J., Albuissou M., Ranchin T. and Wald L, (2004): ‘‘Fusing ground measurements and satellite-derived products for the construction of climatological maps in atmosphere optics’’, In Proceedings - 23rd EARSeL Annual Symposium "Remote Sensing in Transition", 2-4 June 2003, Belgique, 85-91, 2004.
- [17] **Tadili R.** et M. N. Bargach, (2005) : ‘‘Une méthode d’estimation du rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée’’, La Météorologie - n° 50, pp. 46-50, Septembre 2005.
- [18] **Armel OUMBE**, (2009) ‘‘ Exploitation des nouvelles capacités d’observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire au sol ‘’, PhD thesis, MINES ParisTech, 2009.



SOURCES ET TRAITEMENT DES
DONNEES RELATIVES AU
RAYONNEMENT SOLAIRE

II.1. INTRODUCTION

L'aspect aléatoire et discontinu de l'énergie solaire ainsi que le déphasage de sa disponibilité, dans le temps, par rapport aux besoins d'une exploitation énergétique, montre l'importance et la nécessité de connaître le gisement solaire avant de procéder au dimensionnement et à l'installation d'un quelconque système de captation solaire. La meilleure approche pour connaître le gisement solaire sur un site donné est de disposer d'une bonne série de mesures du rayonnement au sol. Donc il est nécessaire de connaître les méthodes de collecte, de traitement et d'analyser des données de ce rayonnement, afin d'évaluer correctement le potentiel d'énergie solaire de la région. Une évaluation exacte et fiable des ressources solaires constitue la partie intégrante de la planification énergétique.

Ce chapitre intervient dans notre présente contribution, afin d'élucider l'importance des mesures radiométrique, bien que l'Algérie possède un réseau de station de mesure très faible, donc une faible couverture en superficie territoriale, et ce pour pouvoir simuler le fonctionnement des systèmes énergétiques solaires envisagés et optimiser le dimensionnement de toute installation projetée.

II.2. MESURES DIRECTE DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL

La planification énergétique exige une précision et une fiabilité élevées dans la collecte des mesures du rayonnement solaire. Ces mesures effectuées du rayonnement solaire au sol sont essentiellement réalisées grâce aux pyranomètres pour le rayonnement global et le diffus, couvrant la gamme de longueurs d'onde s'étend de 0,3 à 3 μ m. Elles sont réalisées grâce aux pyrhéliomètres pour le rayonnement direct à incidence normale. Ces deux types d'appareil sont des capteurs conçus pour mesurer l'intensité du rayonnement électromagnétique émis directement par le soleil ou réfléchis par d'autres influences environnementales (atmosphère, nuages), ces mesures sont appelées irradiances (W/m²). Les différentes catégories de capteurs et leurs spécifications selon la norme ISO 9060 sont présentées en [Annexe A \[1\]](#). D'autres paramètres liés à l'intensité du rayonnement également mesurés, tel que la durée d'insolation et la nébulosité.

II.2.1. Paramètres mesurés

a) Le rayonnement direct

Ce type de rayonnement est essentiellement mesuré par un appareil appelé Pyrhéliomètre, dans le principe de fonctionnement est le suivant :

C'est un appareil dont la surface sensible est toujours disposé perpendiculairement aux rayons solaires. Cet instrument est en permanence orienté vers le Soleil de façon à ce qu'il ne mesure que le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il comporte une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale aux rayons du soleil grâce à un système automatique conçu à cette finalité.

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 7.5° (le diamètre apparent du soleil est de 0.5°) [1,2].

Pour pouvoir mesurer le rayonnement direct de façon continue, le pyrhéliomètre est muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le Soleil.

b) Le rayonnement global

Ce type de rayonnement est mesuré par un Pyranomètre, qui collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale ou inclinée, en provenance d'un angle solide de 2π stéradians. Le domaine spectral couvert s'étend de $0,3$ à $3\mu\text{m}$, il doit être régulièrement étalonné et entretenu (poussière, condensation). [3].

c) Le rayonnement diffus

Il est mesuré par un pyranomètre muni d'un dispositif occultant totalement le rayonnement direct. Il doit être soit un disque dirigé en permanence vers le Soleil, soit une bande pare-soleil parallèle au plan équatorial déplacée en fonction de la déclinaison solaire. La mesure du diffus implique des corrections.

d) L'albédo de surface

L'albédo de surface 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 total et l'autre le rayonnement solaire réfléchi par la surface. On supposant que la parcelle de surface vue par le second capteur est suffisamment

homogène et que le signal mesuré est équivalent à l'intégrale du flux réfléchi dans toutes les directions. Cet instrument doit être placé à grande distance du sol.

e) La durée d'insolation

La durée d'insolation ou d'ensoleillement exprime la longueur cumulée des périodes d'exposition directe au soleil entre le lever et le coucher du soleil pour un endroit donné du globe terrestre. Elle est mesurée à l'aide de L'héliographe.

L'héliographe de Campbell-Stokes est l'instrument employé dans la plupart des stations météorologiques. Il a été adopté par l'Organisation météorologique mondiale « OMM » en 1962 comme instrument de référence [4], il mesure la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct a une puissance suffisante (en pratique plus de 120 W/m²) pour brûler ou décolorer une bande de papier changée chaque jour. La mesure de la longueur des parties brûlées permet de calculer la durée d'insolation.

L'évolution technologique de la fin du siècle dernier s'est répercutée par le remplacement de ces instruments "statiques" par des instruments "dynamiques" équipées de capteurs qui permettent d'émettre un signal régulier engendrant une impulsion dès que l'éclairement reçu par le capteur dépasse 120 watts par mètre carré. Il s'agit d'un système électronique capable de mesurer l'insolation solaire d'une façon autonome et automatique à partir d'un procédé utilisant des photodiodes.

f) La nébulosité

La nébulosité (ou la couverture nuageuse) : C'est la fraction de la voute céleste du ciel couverte par les nuages. Ce paramètre est inclus dans les études du rayonnement solaire dans la mesure où il représente le principal facteur de son atténuation. Elle est fournie par l'intermédiaire d'estimations visuelles du ciel relevée toutes les heures ou toutes les 03 heures dans la plupart des stations professionnelles de l'ONM. Cette mesure n'est aujourd'hui pas encore automatisée. Elle s'exprime en Octa : 0 correspond à un ciel clair, 8 à un ciel totalement couvert [5].

II.2.2. Paramètres dérivés de mesures

a) La fraction d'insolation

La fraction d'insolation représente le rapport de la durée du jour mesurée à sa durée maximale théorique. Ce paramètre a un impact direct sur les composantes du rayonnement solaire. C'est généralement l'approche la plus utilisée pour l'estimation des moyennes mensuelles du rayonnement solaire global et ce par application des modèles de régression,

laquelle application alimenté la pluparts des projets de conception et de simulation des systèmes énergétiques solaire.

b) Indice de clarté

L'indice de clarté du ciel représente les variations liées à la couverture nuageuse sur site. Il est déterminé à partir des mesures du rayonnement global horizontal, par l'application de l'équation suivante [6] :

$$k_t = \frac{G_h}{I_{0h}} \quad (\text{II.1})$$

I_{0h} : représente l'irradiation hors atmosphère

Trois classes sont définies pour caractériser le type de ciel basant sur cet indice [7] :

- Classe A : $0 \leq k_t < 0,35$;
- Classe B : $0,35 \leq k_t < 0,75$;
- Classe C : $k_t > 0,75$;

La Classe A représenté des journées entièrement ensoleillées. Tandis que la classe B correspond à des journées partiellement ensoleillées, et enfin les journées complètement nuageuses transformant plus de 90% du rayonnement solaire global incident en rayonnement diffus sont représentées par la classe C.

II.2.3. Réseau de mesures au sol en Algérie

L'Office National de la Météorologie (O.N.M) gère sur l'ensemble du territoire national un réseau météorologique composé de quatre-vingt et une (81) stations météorologiques mesurant principalement la durée d'insolation. Parmi celles-ci, on dispose de seules sept (07) stations équipées de pyranomètres et servant donc à mesurer les composantes diffuses et globales reçues sur le plan horizontal, alors que deux stations seulement sont équipées de pyrhéliomètres mesurant le rayonnement direct, auquel s'ajoutent quelques compagnes de mesures du rayonnement global réalisée par des universités ou des centres de recherche. Malheureusement, les séries de mesures réalisées comportent beaucoup des données manquantes causées par des périodes plus ou moins longues de non fonctionnement des appareils de mesure.

Dans cette partie d'étude, les données de la durée d'insolation ont été triées en fonction de leur qualité et de la durée de l'enregistrement en continu couvrant une période de 30 ans de mesures. Les années 1983 à 2012 ont été prises comme périodes communes de référence. Le tableau B.1 reprend la liste des stations (Annexe B). La première carte présente la distribution géographique des stations (Figure. II.1). On note une assez bonne

répartition spatiale ; cependant, certaines régions sont moins couvertes géographiquement de stations comme, par exemple les régions intérieures, le centre et autres régions du grand sud.

Le deuxième intervenant dans le domaine, en Algérie est le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER), qui dispose de trois stations à savoir Bouzaréah, Ghardaïa et Adrar assurent d'une manière régulière la mesure des différentes composantes du rayonnement solaire. La prise de mesure effectuée implique un entretien et un contrôle permanent des appareils de mesure et d'enregistrement. Les pyranomètres étaient régulièrement nettoyés et contrôlés afin d'assurer d'excellente fiabilité dans la précision des mesures de rayonnement. En ce qui concerne la calibration de nos instruments, ils sont calibrés périodiquement au niveau du site de La station de surveillance de la composition chimique de l'atmosphère de ASSEKREM (GAW : Global Atmospheric Watch) à Tamanrasset

La répartition géographique de l'ensemble des stations équipées de pyranomètres est donnée par la [Figure. II.2](#).

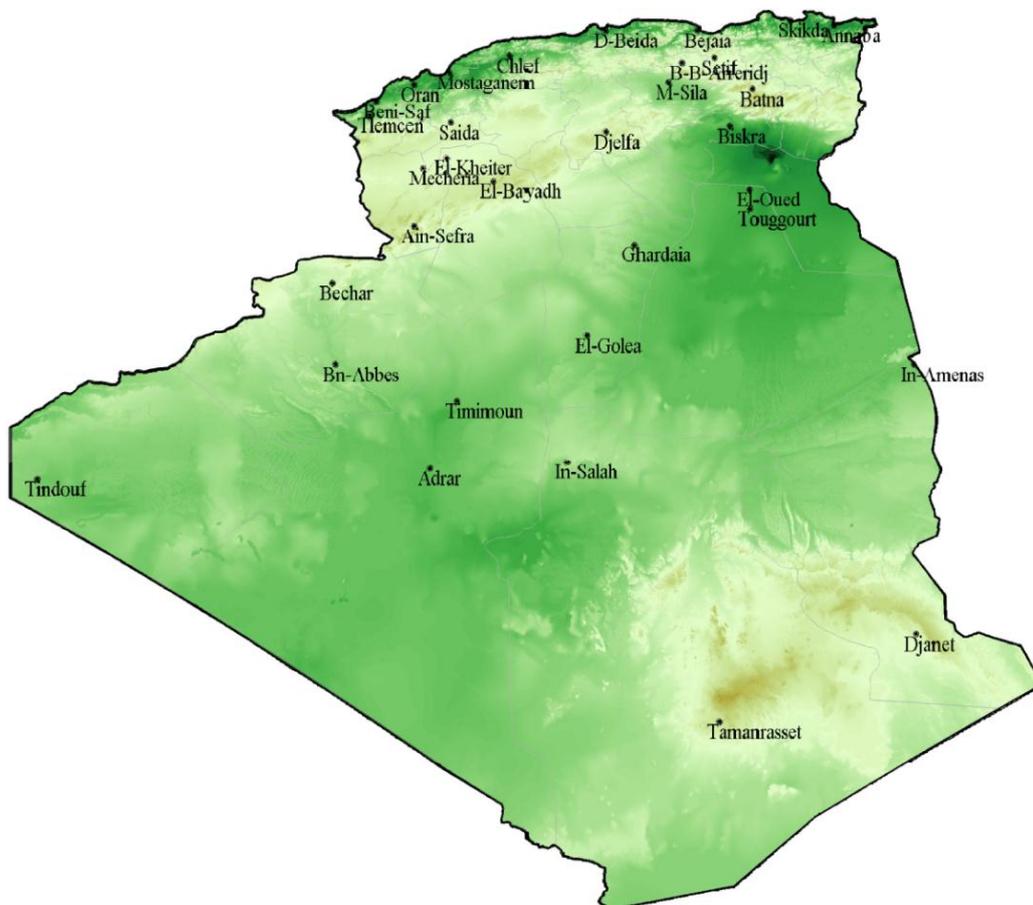


Figure. II.1: Réseau d'Héliographe (1983-2012).

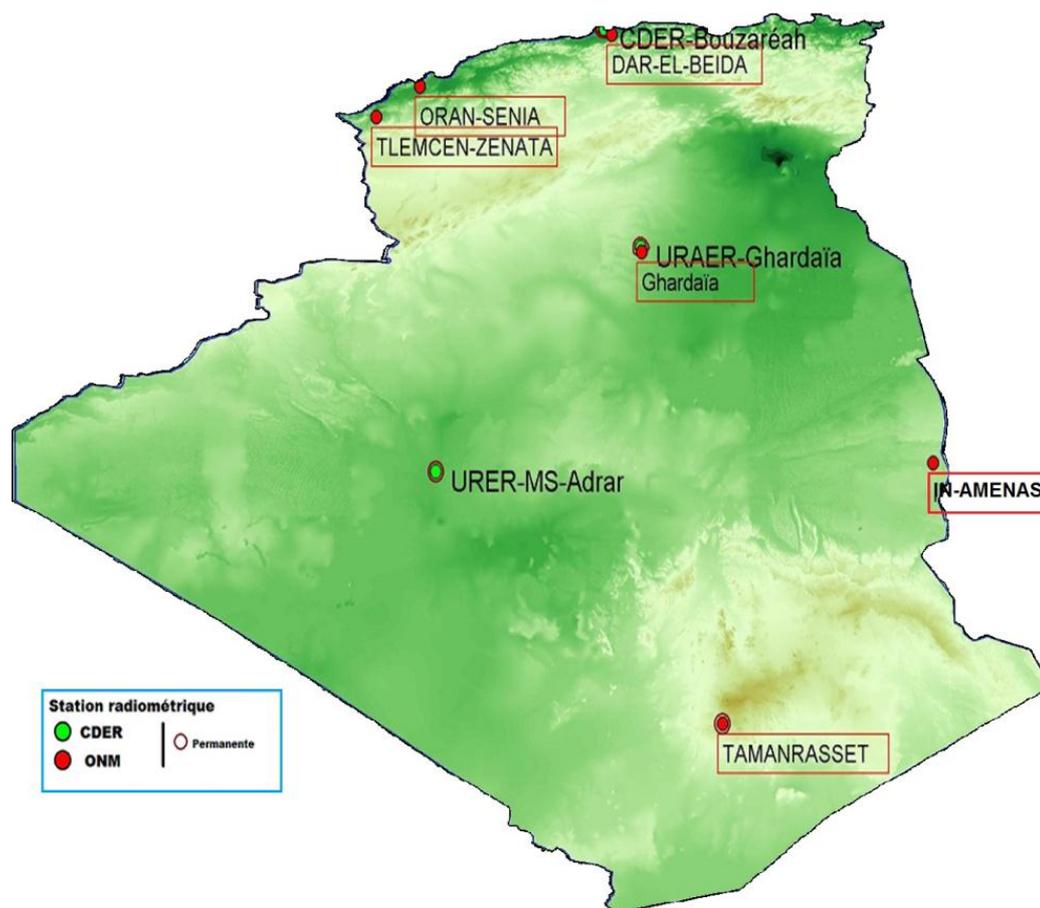


Figure. II.2: Réseau pyranométrique (ONM et CDER).

II.2.4. Le traitement des données radiométriques

Dans la chaîne de mesures radiométrique, la collecte est effectuée avec un pas de temps de la minute. Les valeurs instantanées, provenant des instruments sont directement corrigés en utilisant les coefficients de calibration correspondantes.

Une fois transférées sur Ordinateur, les données de rayonnement peuvent être visualisées avec un enregistrement toutes les 3 minutes. Les valeurs du rayonnement en millivolts sont ensuite converties en quantité énergétique (irradiance) suivant leurs coefficients de calibration.

Une autre correction est appliquée sur le rayonnement diffus dû au dispositif d'ombrage on se basant sur l'hypothèse décrite dans la section suivante. Les données prétraité sont soumises à un contrôle préliminaire; pour être situées dans des marges bien définies et ce afin de déceler le plus rapidement possible les erreurs dues à d'éventuels dérèglement ou pannes de l'appareillage.

Il s'agit d'un contrôle qualité réalisé sur ces données dès leur acquisition pour les soumettre aux corrections nécessaires avant leur utilisation. Les processus d'acquisition, de traitement et le stockage des données sont exécuté sous un Micro-ordinateur DELL VOSTRO 180 équipé d'un processeur Dual-Core 2.2 GHz [3].

a) Correction du rayonnement diffus (correction d'arceau)

Afin d'effectuer la mesure du rayonnement solaire diffus il suffit d'adapter un écran destiné à recouvrir complètement le dôme du pyranomètre, dans le but d'occulter le rayonnement solaire direct. A cette finalité deux méthodes sont utilisées [8]:

- Une bande pare-soleil réglable en fonction de la déclinaison du soleil.
- Un disque mobile suivant la trajectoire apparente du soleil et dont l'ombre se projette en permanence sur la surface sensible du pyranomètre.

L'arceau d'ombrage CM121B/C offre cette solution, par conséquent, il intercepte également une petite partie du rayonnement diffus venant du ciel.

Le système de mesure du diffus au niveau de l'URER-MS est équipé d'une bande pare-soleil, nous détaillerons par la suite la méthode de correction d'anneaux qu'il faut introduire dans la mesure.

Dans la méthode avec arceau ; l'axe de celui-ci est parallèle à l'axe terrestre. Une translation de l'arceau le long de cet axe permet de suivre la variation de la déclinaison. L'arceau masquant une partie de la voute céleste entraine une sous-évaluation du rayonnement diffus, d'où la nécessité d'un facteur correctif variable au long de l'année. Dans notre cas, ce facteur peut varier de -1.12 à 1.12 ; des ajustements périodiques de l'arceau ayant lieu tous les trois jours, il est possible d'effectuer des corrections plus minutieuses en appliquant des ajustements beaucoup plus fréquents.

L'arceau est constitué d'une bande de 7cm de largeur et de 17cm de rayon, peinte en noir du coté pyranomètre et en blanc sur la face vue par le soleil afin d'éviter des réflexions indésirables d'une part et un échauffement de l'arceau d'autre part. L'ajustement de l'arceau est effectué en moyenne tous les 3 jours et jusqu'à 2 fois par semaine lorsque la déclinaison du soleil varie rapidement [8].

Nous appelons « Diffus » (D_{H_brut}), la quantité mesurée directement par le pyranomètre (données en appliquant le facteur de correction du pyranomètre), la valeur du diffus D_H est égale à la somme du diffus brute et de la part caché par l'arceau.

$$D_H = D_{H_brut} \cdot C \quad (II-2)$$

$$\text{Avec } C = \frac{1}{1-s} \quad (\text{II-3})$$

Le calcul du facteur correctif pour la mesure du rayonnement diffus sur plan horizontal S est en fonction de l'angle de vue de l'arceau, de la déclinaison et de la latitude du lieu. Il est donné par l'équation suivante :

$$S = \frac{2}{\pi} \cdot V \cdot \text{Cos}(\delta) [w_0 \cdot \text{Sin}(\varphi) \cdot \text{Sin}(\delta) + \text{Sin}(w_0) \cdot \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Cos}(\delta)] \quad (\text{II-4})$$

V : un coefficient qui varie de -2% à +2%. La valeur utilisée est $V=0.185$ Rad.

b) Le contrôle qualité des mesures

Le contrôle de la qualité des mesures a pour objectif la vérification de la présence et de la cohérence physique des données. repose sur des tests de validation qualité des données radiométriques. Elle est basée sur une analyse de cohérence entre les trois composantes mesurées du rayonnement et qui est considérée comme un moyen très efficace pour éliminer des mesures erronées, il est inspiré des recommandations de l'OMM pour la mesure du rayonnement solaire [9-10]. Seules les mesures pyranométriques ayant passé l'ensemble des tests de qualité sont utilisées, si ces les données satisfont aux conditions suivantes elles sont automatiquement rejetées :

1. $|I_N - I_{N_{calc}}| > 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
2. $|G_H - D_H| < 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ & $I_N < 1.5G_H$ & $G_H > 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
3. $D_H > 1.1G_H$
4. $G_H > 1.2 \cdot I_0$
5. $D_H > 0.8 \cdot I_0$
6. $D_H < 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
7. $G_H < 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
8. $G_H - D_H > I_0$
9. $G_H > 1100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Données mesurés :

- G_H : Global horizontal
- D_H : Diffus horizontal
- I_N : Direct normal

Données Calculés :

- I_0 : Global horizontal Hors Atmosphere
- I_{n_calc} : Direct normal calculé

$$I_{n_calc} = \frac{(I_{GH} - I_{DH})}{\text{Cos}(\theta_z)} \quad (\text{II-5})$$

II.3. MESURES INDIRECTES PAR TELEDETECTION

La mesure par la télédétection étant la seconde alternative dans le domaine et se présente comme l'unique moyen permettant une couverture continue et ce dans l'espace et dans le temps de l'atmosphère. L'une des applications les plus importantes de la télédétection est l'observation météorologique et climatologique. En effet, cette application 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 tandis que les satellites à défilement fournissent une résolution spatiale plus élevée mais avec au deux prises quotidiennes d'images. Ainsi, nous essayons de cette étude d'évaluer le potentiel de l'imagerie satellite, les images de MSG2 en particulier pour le suivi du bilan radiatif solaire.

II.3.1. Le satellite MSG2

La série de satellites METEOSAT fait partie des satellites géostationnaires opérationnels, permettant l'observation de l'ensemble du globe terrestre, Le 21 décembre 2005 l'organisme européen EUMETSAT lance la dernière génération de leur satellite baptisé MSG-2 (Météosat Second Generation), qui devient complètement opérationnel le 6 juillet 2006 [11].

L'instrument principal des satellites MSG est un radiomètre imageur SEVIRI qui balaie la surface de la Terre de manière à produire une nouvelle image multi spectrale dans 12 canaux toutes les quinze minutes. On dispose de deux canaux visibles, de neuf canaux dans le domaine infrarouge et d'un douzième canal visible HRV à large bande ne couvrant qu'une partie du disque terrestre. La résolution spatiale passe aussi de 2,5 km à 1 km au nadir pour le canal visible à large bande et de 5 à 3 km pour tous les autres canaux. Les caractéristiques de canaux visibles de sont résumés comme suit (cf. [Tableau II.1](#)) [12].

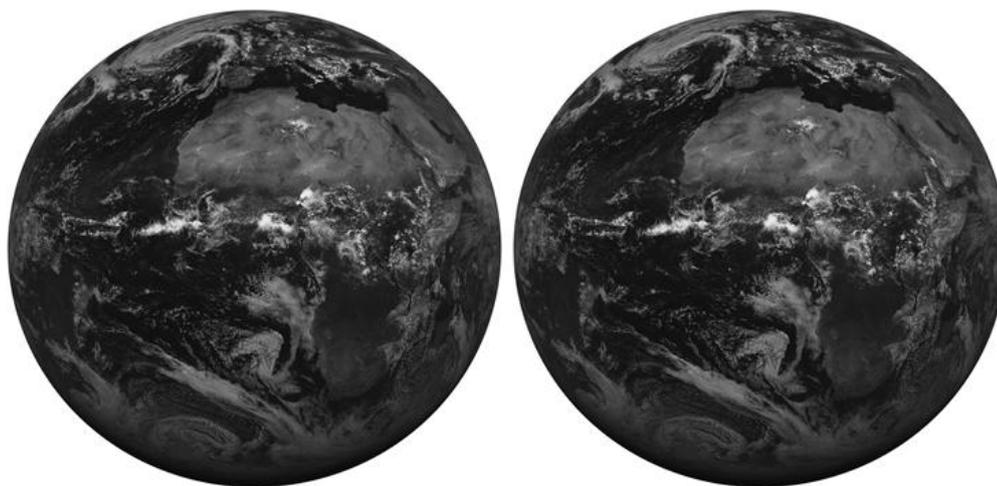
Tableau II.1 : Caractéristiques de prise d'images de SEVIR pour les 3 canaux Visible.

Canal	Autre appellation	Caractéristiques Spectrales $\lambda_{\text{centrale}}$	λ_{Min}	λ_{Max} (μm)
C1	VIS 0.6	0,635	0.56	0.71
C2	VIS 0.8	0,81	0,47	0.88
C12	HRV	Large bande environ 0,4-1,1		

a) Images des trois canaux Visibles VIS 0.6, VIS 0.8 et HRV

MSG-2 possède deux canaux visibles : VIS 0.6 et VIS 0.8. Les images provenant de ces canaux pour la journée du 30 mai 2009 à 12h00 sont représentées dans la [figure II.3](#). Il possède également un canal visible à large bande, avec un intervalle d'échantillonnage de 1km seulement, Ce dernier canal visible à haute résolution regroupe les informations des deux premiers canaux visibles et donne ainsi plus de détails sur l'état de la surface terrestre et les petits nuages.

L'exemple présenté par [La figure II.4](#) représente l'image du HRV avec un domaine qui couvre une partie de notre territoire. Cette image est acquise dans une bande spectrale large, couvrant la totalité du spectre solaire. Les images visibles représentent la quantité de lumière visible rétro diffusée par les nuages ou la surface de la terre. Les nuages et la neige apparaissent en blanc et les zones sans nuage en noir. Les nuages épais sont plus brillants que les nuages fins.



[Figure. II.3](#): Cartes de luminances des canaux C1 et C2 du capteur SEVIRI/MSG2.

II.3.2. Traitement des images MSG :

SEVIRI produit environ 25GB de données brutes par jour. Ces données sont stockées dans des fichiers compressés pour être ensuite retransmis aux utilisateurs par le centre de traitement EUMETSAT, ces derniers fichiers représentent le produit primaire du système MSG du niveau 1.5, dérivées des images brutes après une correction géométrique et radiométrique, avec une taille d'environ 7 GB. Ces produits représentent les images pixel par pixel alignés et ajustés en coordonnées de tel sorte qu'elles correspondent à l'information du même point sur la surface terrestre.

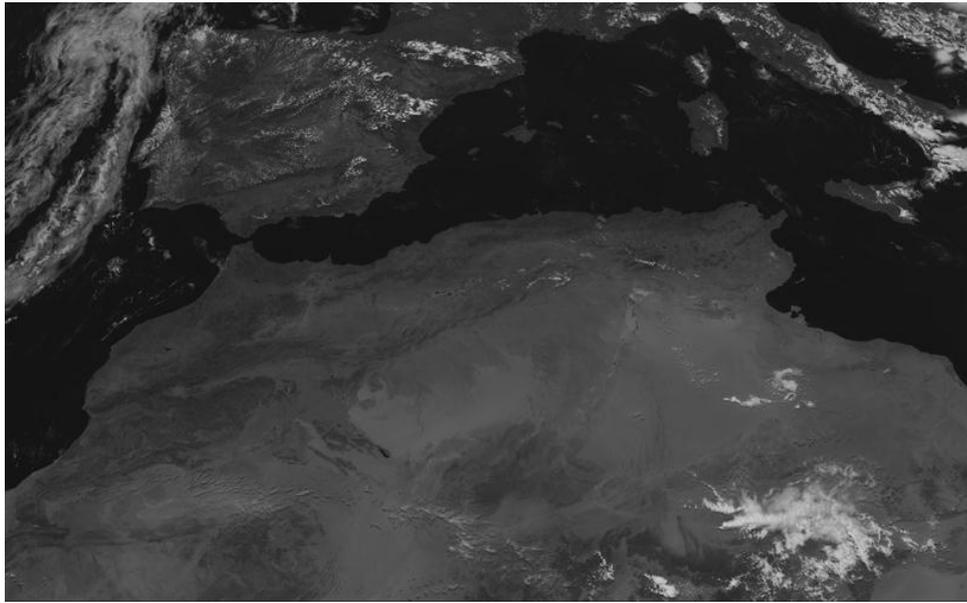


Figure. II.4: Carte de luminance du canal HRV (C12) du capteur SEVIRI/MSG2.

a) Radiance spectrale des canaux visibles

Les images sont enregistrées sous forme de comptes numériques dans des fichiers binaires; codées en 10 bits. La relation entre ce compte numérique et la radiance physique pour chaque canal i est donnée par la relation [13] :

$$L = CAL_{Offset} + CAL_{slope} * Count \quad (II-6)$$

Où L est la luminance énergétique ou la radiance (en $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$), mesurés par MSG2/SEVIRI au sommet de l'atmosphère ; CAL_{Offset} étant la constante de compensation entre le compte numérique et la radiance physique et CAL_{slope} représente le coefficient de calibration linéaire ; $Count$ étant le compte numérique en pixel qui prend 1024 valeurs allant de 0 à 1023. Ces coefficients peuvent être extraits des fichiers entête, le Tableau suivant donne les coefficients de calibration des canaux visibles du capteur SEVIRI.

Tableau II.2 : Les coefficients de calibration des canaux Visible du capteur SEVIRI

Canal	CAL_slope	Cal_offset
VIS006	0.023128	-1.179533
VIS008	0.029727	-1.516057
HRV	0.031999	-1.631964

b) Réflectance spectrale des canaux Visible

La conversion des radiances dans les trois canaux visibles en réflectances spectrales se fait à l'aide de la formule (II.7) ci-dessous. Cette relation ne tient pas compte des effets d'absorption atmosphériques [13].

$$Ref(canal) = \frac{L(canal)}{R_{TOA}(canal) \cdot \cos(\theta_s)} \quad (II-7)$$

Avec :

Ref est la réflectance, Canal=C1, C2 et C12

1 = VIS0.6;

2 = VIS0.8;

12 = HRV

L : La luminance en $(mWm^{-2}sr^{-1}(cm^{-1})^{-1})$ calculée à l'aide la formule (II.6)

R_{TOA} est l'énergie solaire à la limite de l'atmosphère en $(mWm^{-2}sr^{-1}(cm^{-1})^{-1})$.

θ_s est l'angle zénithal solaire

Le calcul de la radiance à la limite supérieure de l'atmosphère dans les différentes bandes spectrales de l'imageur SEVIRI se fait de la manière suivante :

$$R_{TOA}(VIS0.6) = \frac{20.76}{\varepsilon^2} \quad (II-8)$$

$$R_{TOA}(VIS0.8) = \frac{23.24}{\varepsilon^2} \quad (II-9)$$

$$R_{TOA}(HRV) = \frac{25.11}{\varepsilon^2} \quad (II-10)$$

ε : est donnée par la relation I.2 (cf. Chap. I.3.1) :

II.4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les résultats qui seront présenté dans la partie qui suit représentent :

- La variation des éclairements des différentes composantes du rayonnement mesurées au niveau de la station d'Adrar dans différentes conditions climatiques.
- Les irradiances journalières et les moyennes mensuelles du rayonnement global horizontal sous forme de tableaux et d'histogrammes.
- Une cartographie et une analyse de la variation spatiale de la durée d'insolation moyenne annuelle.

II.4.1. La variation de l'éclairement

Afin de prendre en compte cet aspect dynamique de l'éclairement solaire, il était nécessaire de qualifier la répartition temporelle de ce dernier au cours de la journée, Une représentation graphique de l'évolution de l'éclairement dû au rayonnement direct, diffus et global pour trois journées type de l'année (le 8 Mai, le 8 Juin et le 15 juillet) a été pris en compte pour référencer et catégoriser le paramètre d'éclairement entre journée « Eclairé », « Parcellement Eclairé » et « Nuageux ». (Figure. II.5).

Nous observons une variation remarquable du diffus et du direct qui s'explique par la présence des nuages ou leur absence, on remarque que le diffus augmente avec la présence des nuages par contre on enregistre l'inverse pour le direct qui diminue et jusqu'à devenir nul sous un ciel couvert. Dans ce dernier cas « ciel couvert » l'augmentation du diffus va jusqu'à atteindre l'égalité du global horizontal.

II.4.2. La variation des irradiations Horaires

Le calcul de l'irradiation horaire se fait par intégration numérique de l'éclairement sur un pas de temps d'une heure, puisque l'irradiation journalière est obtenue en sommant les valeurs horaires. L'intégration numérique est réalisée par la méthode des *trapèzes*.

La Figure II.6 présente une vue d'ensemble de la variation des irradiations globales horaires pour chaque heure en temps solaire vrai durant toute l'année 2010. Ces irradiations sont calculées à partir des mesures au sol réalisées dans différentes sites à travers le territoire Algérien (Alger, Oran, Ghardaïa, Adrar et In-Amenas).

Dans les graphes de cette figure, les valeurs représentant des anomalies sont représentées par des traits blancs, qui correspondent aux tranches horaires ayant des mesures manquantes ou bien erronées et rejetées d'après les tests de contrôle de la qualité (cf. Chap. II.2.4.b). Le taux représente respectivement 15%, 18%, 15%, 14% et 29% pour Alger, Oran, Ghardaïa, Adrar et In-Amenas.

La variation de l'irradiation horaire diffère d'une station à une autre, les couleurs du bleu clair au vert représente les faibles valeurs, tandis que celles de jaune à rouge représentent les fortes valeurs des irradiations.

Nous pouvons remarquer qu'au cours de l'année, cette énergie atteint sa valeur maximale vers midi solaire et avec des valeurs minimales au lever et au coucher du soleil. Les valeurs en début de journée et pendant l'après-midi sont presque équivalentes, exceptant les heures où on observe des fluctuations plus ou moins importantes, qui sont très

marqué dans les données des stations côtières (Alger et Oran), et qui sont probablement due à la présence d'une couverture nuageuse au cours de cette période.

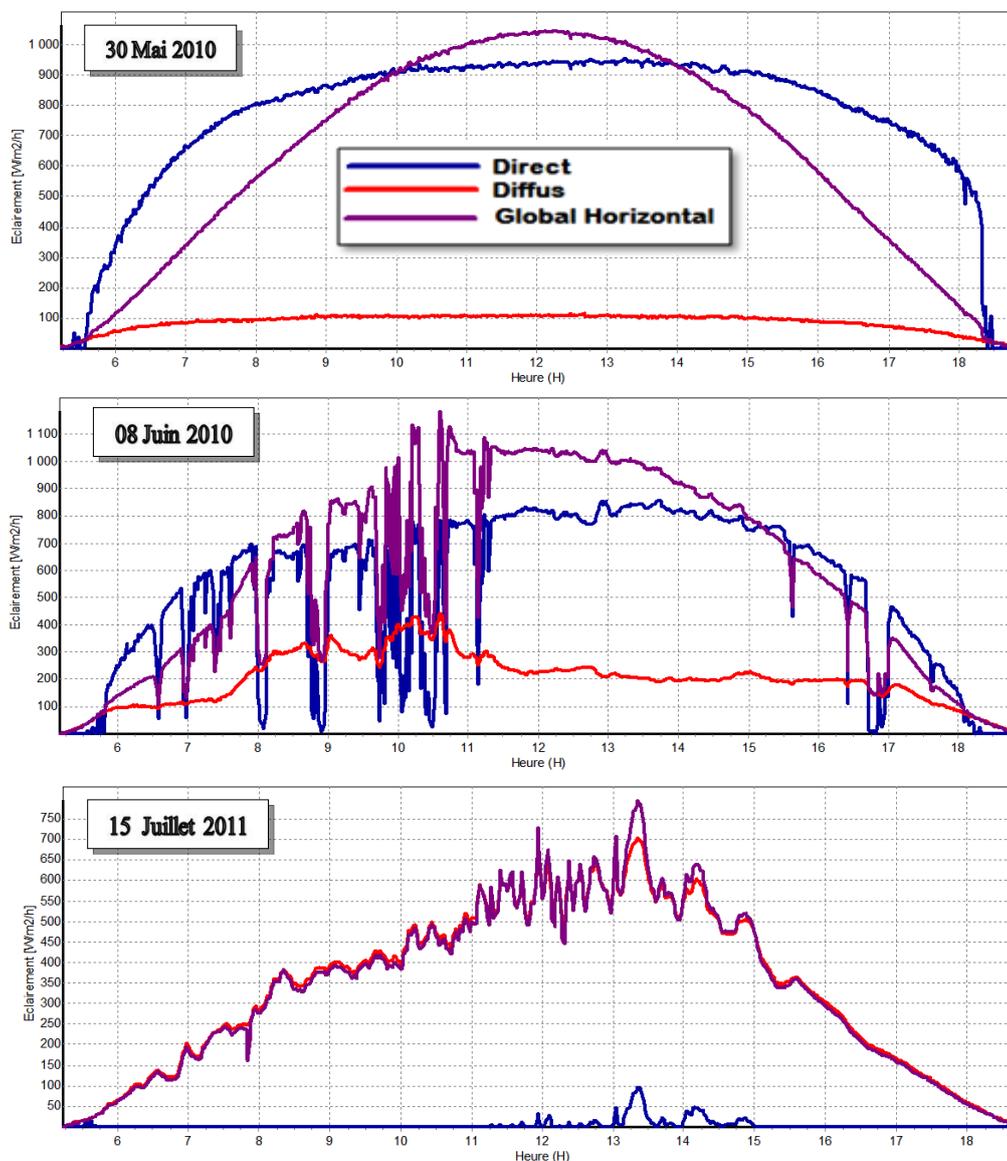


Figure. II.5: L'évolution de l'éclairement direct, diffus et global mesuré au site d'Adrar (a) Ciel Clair, (b) Partiellement nuageux et (c) Totalement couvert.

L'analyse de graphe de la Figures II.6, montre nettement que les valeurs maximales sont atteintes pendant les mois de mai et juin de 10h jusqu'à 14h TSV. Pendant les mois de janvier et décembre, la quantité reçue est moindre à cause de la faible hauteur du soleil.

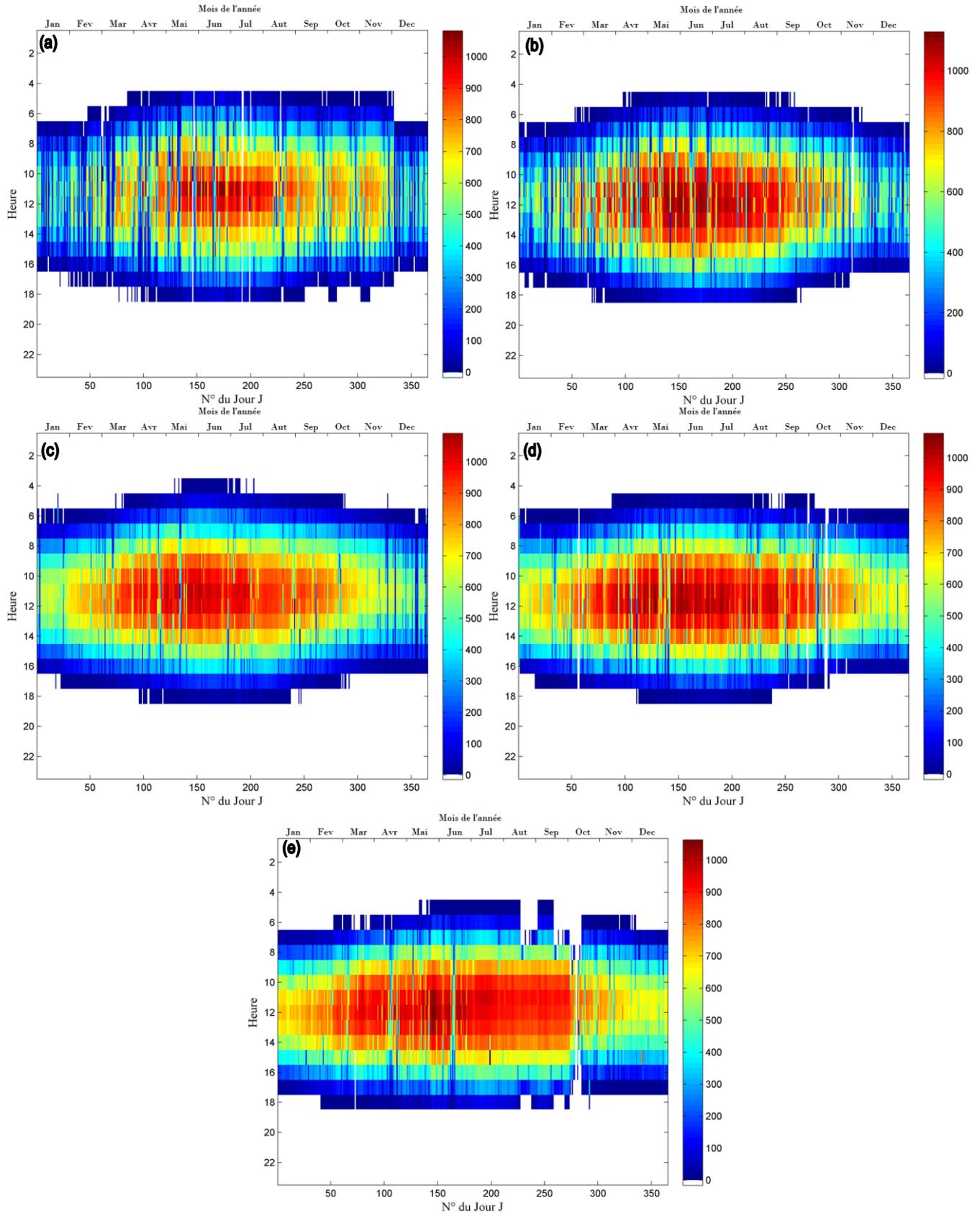


Figure. II.6: La variation des irradiances globales horaires au cours de l'année 2010, pour les stations (a) Alger, (b) : Oran, (c) : Ghardaïa, (d) : Adrar et (e) : In-Amenas.

II.4.3. La variation des irradiations journalières

Une première constatation est la différence des irradiations journalières entre celles des mois de décembre-janvier qui restent largement inférieures à celles du mois de juin, ce constat qui s'explique par l'amplitude de l'ensoleillement de la journée qui reste relativement plus longue en été qu'en hiver. (voir [Figure. II.7](#)).

Le maximum des irradiations journalières horizontales d'environ 9000 Wh/m²/Jour est atteint au mois de juin, tandis que sa valeur ne dépasse pas les 5000 Wh/m²/Jour au mois de décembre et de janvier.

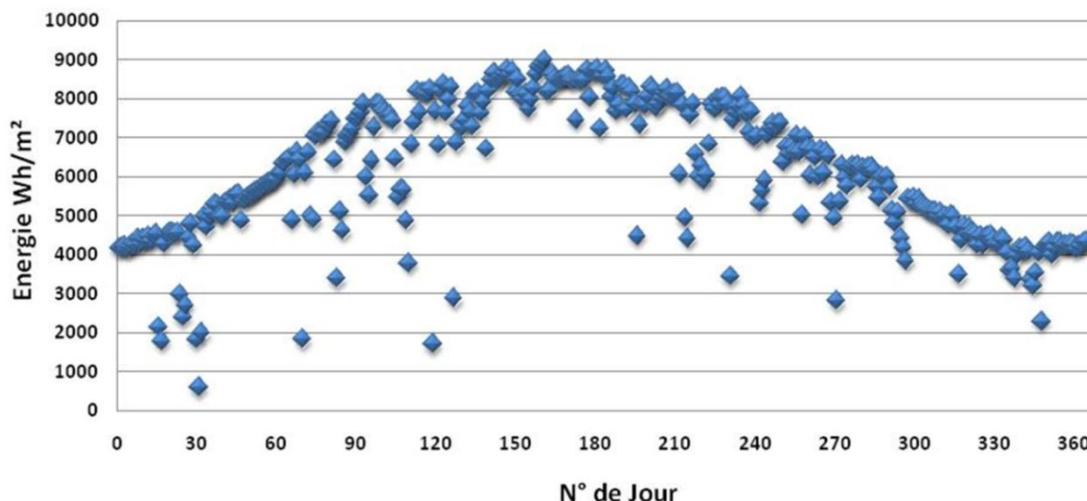


Figure. II.7: Variation de GHI quotidienne au site d'Adrar (2010).

Après une analyse des deux graphes ([Figure II.7](#) et [Figure. II.8](#)), nous pouvons constater que l'énergie globale horizontale est toujours supérieure à l'énergie globale inclinée pendant la période chaude, mais le contraire durant la période froide ce qui explique l'importance de l'inclinaison des collecteurs dans le domaine de l'énergie solaire.

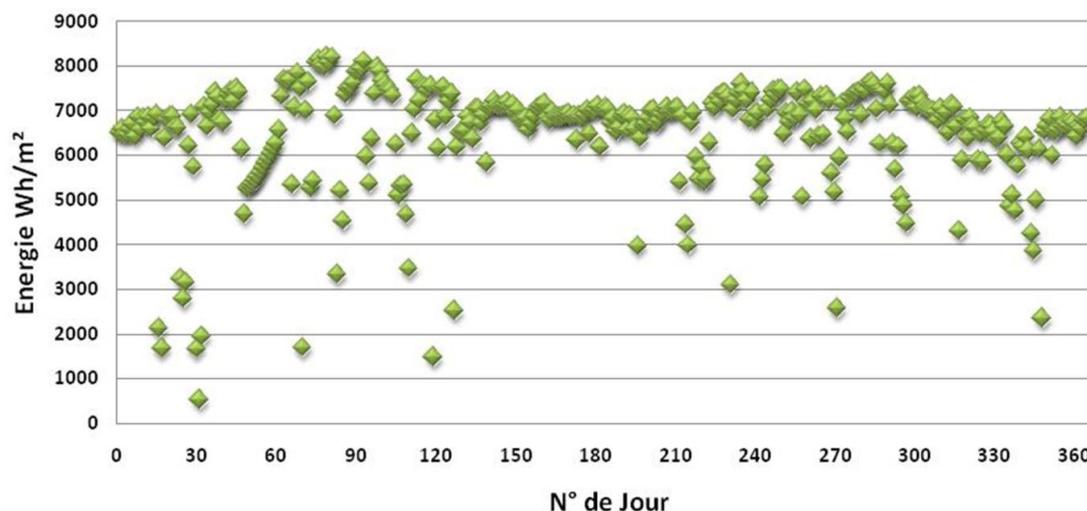


Figure. II.8: Même légende que Figure II.7 pour le global incliné ~28° (2010).

II.4.4. La variation spatio-temporelle de La durée d'insolation

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

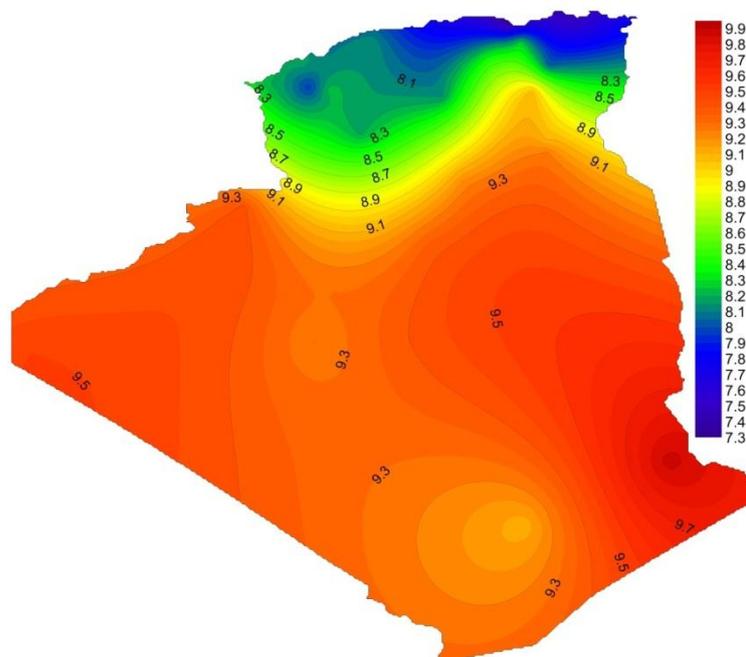


Figure. II.9: Carte de la durée d'ensoleillement moyen annuel en Heure (1983-2012).

Une régionalisation des données quotidiennes de la fraction d'insolation a été réalisée utilisant la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH), qui est présentée dans l'annexe [Annexe C \[14\]](#). Les résultats obtenus font ressortir six (6) régions climatiques homogènes, regroupant chacune un ensemble de stations. La répartition des stations dans les six classes (régions) est illustrée sur le tableau suivant. La variation de la moyenne mensuelle des durées d'insolation journalière des six régions est représentée sur [La Figure. II.10](#).

Tableau II.3 : Répartition des stations dans les six classes

Classes	Stations
Classe n°1	Adrar, Timimoune, In-Salah, Bechar, Beni-Abbes, Tindouf
Classe n°2	Tamanrasset, Djanet, In-Amenas
Classe n°3	Ghardaia, Biskra, El-Oued, Tougourt, El-Golea,
Classe n°4	Al-kheiter, Mechria, Ain-Safra, Djelfa, El-Bayad,
Classe n°5	Alger (Dar El-Beida), Chlef, Msila, Annaba, Batna, Bordj Bou-Arreridj, Bejaia, Sétif, Skikda
Classe n°6	Oran, Beni-saf, Mostaganem, Tlemcen, Saida

Interprétation des classes :

Région 1 : Une zone qui représente le centre du Sahara, est caractérisée par une durée d'insolation très élevée, répartie presque uniformément durant toute l'année.

Région 2 : La région du Hoggar et du Tassili, l'insolation totale est moins élevée, l'effet des saisons est accentué, et les mois d'hiver possèdent une durée d'insolation plus élevée que les mois d'été.

Région 3 : Constitue le nord du Sahara, elle est caractérisée par une fraction d'insolation élevée et répartie différemment le long de l'année.

Région 4 : Regroupe l'ensemble des régions intérieur Ouest. Elle est caractérisée par une fraction d'insolation faible. La répartition est très différente durant l'année. Les mois d'été sont beaucoup plus ensoleillés que les mois d'hiver.

Région 5 : s'étend sur les régions côtières Centre et Est, plus l'ensemble des hauts plateaux Est. Elle est caractérisée par une fraction d'insolation faible dont la répartition est très différente durant l'année entre les mois d'hiver et les mois d'été.

Région 6 : contient les régions côtières de la région Ouest et l'ensemble des régions intérieur (ouest). Elle est caractérisée par une fraction d'insolation faible mais un peu plus élevée que celle de la classe 5. La répartition est très différente durant l'année.

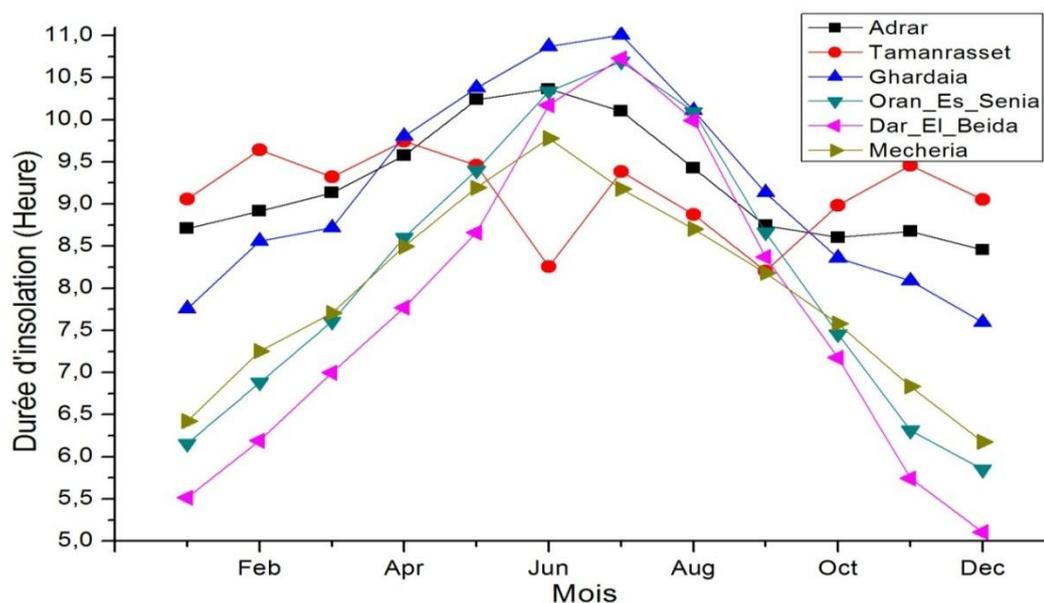


Figure. II.10: La variation de la moyenne mensuelle des durées d'insolation quotidienne (1983-2012).

II.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les dispositifs de mesure au sol des différentes composantes du rayonnement solaire, à savoir le direct, le diffus et le global, et d'autres mesures réalisées pour des paramètres liés à l'intensité du rayonnement tel que la durée d'insolation et la couverture nuageuse, et qui sont disponibles dans la plupart des stations météorologiques.

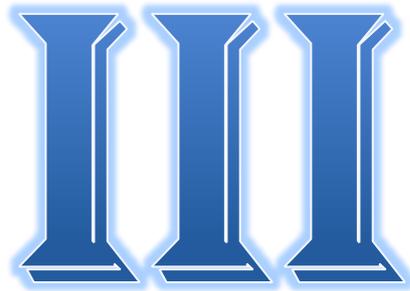
L'objectif de ce chapitre était aussi la présentation du dispositif satellitaire européen MSG-2, d'où proviennent les images sur lesquelles nous avons travaillé, et les différentes étapes de traitement réalisées. Les informations présentées ont montré clairement que ces images sont capables d'apporter de nouvelles connaissances utiles dans beaucoup de disciplines -y compris, bien sûr, sa contribution à l'évaluation des paramètres de rayonnement solaire.

Les différentes étapes de traitements et les interprétations des résultats d'analyse de données ont été présentées, et des représentations graphiques de la variabilité spatiale et temporelle des différentes mesures du rayonnement ont été exposées à la fin de ce présent chapitre.

On s'aperçoit que le réseau radiométrique de notre pays est très faible, les seules mesures disponibles en quantité suffisante sont les relevés Héliographiques. Nous remarquons aussi que la plupart de ces stations sont situées au nord alors que le sud de pays qui est la zone la plus vaste et la plus ensoleillée est presque dépourvue de station de mesure. L'utilisation de modèles de simulation est pratiquement le seul moyen de pallier à ce problème. Deux sortes d'approches d'estimation ont été rapportées dans la littérature, la première est basée sur l'évaluation du rayonnement solaire en connaissant les mesures au sol des paramètres météorologiques tels que : la durée d'insolation. La seconde approche exploite les images satellites pour quantifier le rayonnement solaire reçu au sol.

II.6. REFERENCES :

- [1] [ISO-9060 Standard & Pyranometer Measurement Accuracy](http://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pres/SOLAR2012_0829_presentation.pdf) (2014). Consulté en Avril 2014 http://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pres/SOLAR2012_0829_presentation.pdf
- [2] [Geuder, N., F. Trieb, C. Schillings, R. Meyer, V. Quaschnig](#), (2003). Comparison of different methods for measuring solar irradiation data. In proceedings of the 3rd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, 19th-21st of February 2003, Torremolinos, Spain. 9 pp.
- [3] [Bouchouicha K.](#) and Oulimar B., (2013): La chaîne de mesure radiométrique à l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar, International Conference on Energy and Sustainable Developmenticesd'13, Adrar - Algeria 19-20 February 2013 (2013.).
- [4] [WMO.](#), (2008): Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Draft First Supplement to the Seventh Edition ,2008 of the CIMO Guide.
- [5] [McArthur L.](#) (1998): Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual, (Version 1.0), WMO/TD No. 879. Geneva, Switzerland: World Climate Research Program, WMO, 1998.
- [6] [IQBAL M.](#), (1983): an Introduction to Solar Radiation, Academic Press Canada, 1983.
- [7] [Ineichen P.](#) (2011): Five satellite products deriving beam and global irradiance validation on data from 23 ground stations. *Février 2011*.
- [8] [Kipp & Zonen](#), (?): "directions for use – Pyranomete-r with shadow ring " CM 11/121. DELFT – HOLLAND.
- [9] [Abbott P. F.](#), (1986): Guidelines on the quality control of surface climatological data. WMO, TD n° 111, OMM, Genève, 71 p.
- [10] [Journée, M.](#), and Bertrand, C., (2011): Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. *Solar Energy*, 85: 72-86
- [11] [EUMETSAT.](#), (2007) : La chronique de l'Organisation européenne de satellites météorologiques, IMAGE, N°26, Mai 2007.
- [12] [EUMETSAT.](#), (2006):. EUMETCast - EUMETSAT's broadcast system for environmental data. Technical Description 15; 2006.
- [13] [EUMETSAT](#) (2009), Wavelet Transform Software, disponible au site: Consulté en 2014 www.eumetsat.int/Home/Main/Access_to_Data/User_Support/SP_1117714787347#wavelet
- [14] [Jambu.M.](#), (1999): Méthodes de base de l'analyse des données., Eyrolles, p 125-186



MODELISATION DU
RAYONNEMENT SOLAIRE AU
SOL

III.1. INTRODUCTION

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

En raison de l'étendu de notre pays, du coût très élevés de l'investissement et de la maintenance de stations de mesures radiométrique au sol, le recours à des modèles empiriques est nécessaire dans cette phase. De nombreuses études et travaux de recherches se sont fixés comme objectif cette estimation du rayonnement solaire, et divers modèles empiriques ont été développés dans diverse sortes de condition météorologique et géographique [1-4].

Le travail que nous entreprenons dans ce chapitre consiste essentiellement à l'évaluation du potentiel énergétique solaire sur site à travers une modélisation du rayonnement solaire dans différentes conditions météorologiques. Commenant par une étude comparative de quatre modèles d'estimation de l'éclairement solaire à ciel clair sur le site d'Adrar [5,6].

Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons spécifiquement à l'estimation du rayonnement global horizontale, cette deuxième partie nous permis établir des modèles de régression donnant le global horizontal en fonction des données météorologiques mesuré au sol (Durée d'insolation) et des données prévue par des modèle numérique du temps [7].

Dans le domaine de l'exploitation de l'énergie solaire, l'orientation des plans récepteurs joue un rôle majeur dans l'optimisation du rendement du système. Il est donc nécessaire de déterminer le rayonnement incident sur des surfaces inclinées à partir du rayonnement global horizontal mesuré. Il existe de nombreux modèles de décomposition et de transposition du rayonnement solaire pouvant être très simples ou bien relativement compliqués. Une analyse critique à partir des confrontations des résultats seront présentées dans la dernière section [8]. L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre a été réalisé à l'aide du logiciel Matlab®.

III.2. MODELISATION DU RAYONNEMENT GLOBAL HORIZONTAL

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

Dans cette phase, nous avons réalisé une étude comparative de quatre modèles d'estimation de l'éclairement solaire à ciel clair, Il nous a paru utile dans un deuxième temps d'étudier l'estimation du rayonnement global a un ciel quelconque, à travers des modèles de régression donnant le global horizontal en fonction des données météorologiques mesuré au sol (la durée d'insolation) et des données prévue par des modèle numérique de prévision du temps.

III.2.1. Rayonnement global horizontal à ciel clair

L'éclairement solaire par ciel clair est le rayonnement observé dans le cas d'absence des couches nuageuses dans l'atmosphère. Il dépend donc de paramètres géométriques comme la distance Terre-Soleil, mais aussi des propriétés optiques des aérosols ainsi que le contenu en vapeur d'eau et en ozone de la colonne atmosphérique. Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature pour caractériser le rayonnement par ciel clair [9-16]. Dans cette partie de l'étude, nous essayons d'effectuer une étude comparative de quatre approches d'estimation du rayonnement direct, diffus et le global horizontal pour des journées parfaitement ensoleillées. Deux types de modèle seront utilisés :

Type 1 : Des modèle où l'absorption et la diffusion du rayonnement solaire à travers les couches atmosphériques dues à ces constituants sont exprimées par le facteur de trouble de Linke (Modèle 1 et 2). Pour ce type de modèle nous avons utilisé les données de facteur de Linke issues de la base du projet Soda [17,18].

Type 2 : Des modèles basés sur des relations empiriques permettant d'estimer les différents coefficients de transmission du rayonnement solaire (Transmittance d'ozone, Vapeur d'eau, d'aérosol et de mélanges gazeux), pour déduire les différentes masses atmosphériques et les composantes du rayonnement solaire (Modèle 3 et 4).

a) *Modèle 1 : Perrin de Brichambaut (WMO)*

Dans ce modèle, l'éclairement dû au rayonnement global sur un plan horizontal par ciel clair est exprimé en fonction du facteur T_L , selon la formule suivante [9]:

$$G_{skc} = (1250 - 50T_L)(1 + \varepsilon) (\text{Cos } \theta_s)^{0.01(3T_L+10)} \quad (\text{III-1})$$

Le rayonnement direct et diffus sur un plan horizontal sont exprimés par:

$$I_{skc} = (900 - 20T_L)(1 + \varepsilon) \exp\left(\frac{-T_L}{12.6 \cos\theta_s}\right) \quad (\text{III-2})$$

$$D_{skc} = 248(1 + f)(\cos\theta_s)^{\frac{T_L+5.7}{30}} \exp\left(-\frac{4}{T_L}\right) \quad (\text{III-3})$$

b) Modèle 2 : *R.sun*

Les rayonnement direct et diffus sur un plan horizontal sont donnés sous la forme suivante:

$$I = I_o \exp[-0.8662 T_L m_a \delta_R] \sin(h) \quad (\text{III-4})$$

$$D = I_o T_n(T_L) \cdot F_d(h, T_L) \quad (\text{III-5})$$

Le facteur de transmission (T_n est en fonction uniquement du facteur de trouble atmosphérique de Linke corrigé T_L) et une fonction du diffus de l'altitude solaire F_d qui ne dépend que de la hauteur du solaire [10].

Fonction de transmission sont données par :

$$\begin{cases} T_n(T_L) = -0.051843 + 0.030543 T_{Lc} + 0.0003797 T_{Lc}^2 \\ F_d(h, T_L) = A_1 + A_2 \sinh + A_3 \sinh \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

A_i : sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble T_L corrigé, défini par les expressions suivantes [11]:

$$A'_1 = .26463 - 0.061581 T_L + 0.0031408 T_L^2 \quad (\text{III-7})$$

$$A_1 = \begin{cases} \frac{0.0022}{T_n(T_L)} \text{ si } A'_1 \cdot T_n(T_L) < 0.0022 \\ A'_1 \text{ si } A'_1 \cdot T_n(T_L) \geq 0.0022 \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

$$A_2 = 2.04020 + 0.018945 T_L - 0.011161 T_L^2 \quad (\text{III-9})$$

$$A_2 = -1.3025 + 0.039231 T_L - 0.0085079 T_L^2 \quad (\text{III-10})$$

L'épaisseur optique de Rayleigh est donnée en fonction de la masse optique sous cette forme [12]:

$$\delta_R = \begin{cases} \frac{1}{6.6296 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4)} ; m_a \leq 20 \\ \frac{1}{10.4 + 0.718 \cdot m_A} ; m_a > 20 \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

c) Modèle 3 : *Davies & Hay*

Ce modèle propose des relations empiriques permettant d'estimer les différents coefficients de transmission du rayonnement solaire (Transmittance d'ozone, Vapeur d'eau, d'aérosol et de mélanges gazeux), pour déduire les différentes masses atmosphériques et les composantes du rayonnement solaire.

L'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal est donné par la relation [13]:

$$I_{skc} = I_0(\tau_o\tau_r - \alpha_w)\tau_a \sin h \quad (III-12)$$

$$D_{skc} = D_g + D_{as} \quad (III-13)$$

$$\text{Avec } D_g = \frac{(B+D_{as})\rho\rho_s}{(1-\rho\rho_s)} \quad (III-15)$$

$$D_{as} = I_0 \left[\frac{\tau_o(1-\tau_r)\tau_a}{2} + (\tau_o\tau_r - \alpha_w)(1 - \tau_a)\omega_0 Ba \right] \sin(h) \quad (III-14)$$

Les fonctions de transmission sont données par:

$$D_r = 0.79 \cdot I_0 \cdot \cos(z)\tau_r\tau_o\tau_g\tau_w\tau_{aa} \cdot 0.5 \frac{(1-\tau_r)}{(1-m_a+m_a^{1.02})} \quad (III-16)$$

$$D_a = 0.79 I_0 \cos(z)\tau_o\tau_g\tau_w\tau_{aa} \quad (III-17)$$

$$D_m = \frac{(I+D_a+D_r)\cdot\rho\cdot\rho'_a}{(1-\rho\cdot\rho'_a)} \quad (III-18)$$

Les termes: $\tau_{aa}, \tau_w, \tau_o, \tau_g$ sont les fonctions de transmission de l'atmosphère à la longueur d'onde relativement à la diffusion moléculaire, à l'atténuation par les aérosols, à l'absorption par la vapeur d'eau, à l'absorption par l'ozone et l'absorption par les mélanges gazeux uniformes [14]:

d) Modèle 4 : Bird & Hulstrom

D'après ce modèle, l'éclairement dû au rayonnement direct et au diffus sur un plan horizontal sont donnés respectivement par [14,15]:

$$I_{skc} = 0.9751 I_0\tau_r\tau_g\tau_o\tau_w\tau_a \sin(h) \quad (III-19)$$

$$I_{skc} = D_r + D_a + D_m \quad (III-20)$$

$$\text{Avec } D_m = \frac{(I+D_a+D_r)\rho\rho'_a}{(1-\rho\rho'_a)} \quad (III-21)$$

$$\text{Où: } \rho'_a = 0.0685 + (1 - F_c) \cdot (1 - \tau_{as}) \quad (III-22)$$

$$D_a = 0.79 I_0 \cos(z)\tau_g\tau_o\tau_w\tau_{aa} \quad (III-23)$$

$$D_r = 0.79 I_0 \cos(z)\tau_g\tau_o\tau_w\tau_{aa} \frac{(1-\tau_r)}{2(1-m_a+m_a^{1.02})} \quad (III-24)$$

Les différents coefficients d'absorption sont donnés par :

$$\tau_o = 1 - 0.1611 \cdot U_0 \cdot (1.0 + 139.48 \cdot U_0)^{-0.3035} \cdot 0.002715 \cdot U_0 \cdot (1 + 0.044 \cdot U_0 + 0.0003 \cdot U_0^2)^{-1} \quad (III-25)$$

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_0)(1 - m_a + m_a^{1.06})(1 - \tau_a) \quad (III-26)$$

$$\tau_{as} = \frac{\tau_a}{\tau_{aa}} \quad (III-27)$$

$$\tau_r = \exp[-0.0903 m_a^{0.84}(1 + m_a - m_a^{1.01})] \quad (III-28)$$

$$\tau_o = \frac{1 - 0.1611 \cdot U_0 (1.0 + 139.48 \cdot U_0)^{-0.3035}}{0.002715 \cdot U_0} \quad (III-29)$$

$$\tau_g = \exp(-0.0127m_a^{0.26}) \quad \text{(III-30)}$$

$$\tau_w = \frac{1-2.4959 U_w}{(1+79.03)0.6828 + 6.385 U_w} \quad \text{(III-31)}$$

$$U_0 = L \cdot m_r \quad \text{(III-32)}$$

III.2.2. Rayonnement global horizontal en fonction de la durée d'insolation

Il est évident qu'un fort ensoleillement aboutit à une forte insolation et vice-versa. Cependant il doit y avoir un rapport entre le nombre des heures d'ensoleillement pendant une journée et l'intensité du rayonnement.

Le nombre des stations de mesure du rayonnement sont très limité dans plusieurs régions de notre pays. Toutefois, la durée d'insolation et l'état du ciel sont largement disponibles dans la plupart des stations météorologiques. Il est donc intéressant de faire appel à des méthodes de calcul pour obtenir les différentes composantes du rayonnement à partir des données disponibles.

Plusieurs méthodes paramétriques ont été proposées pour l'estimation des irradiances journalières, pour un état de ciel quelconque et pour un pas de temps à l'échelle de la moyenne mensuelle, des modèles empiriques basés essentiellement sur l'utilisation des données météorologiques, en particulier, la durée d'insolation [19,20].

Dans notre étude, deux sites Algériens, Oran et Adrar ont été choisis. Ce choix s'est porté sur la disponibilité des données radiométriques recherchées et sur la différence de climat existant entre ces deux sites. Nous avons pris le site d'Oran comme ville côtière, et celui d'Adrar comme ville saharienne. Les valeurs mesurées des irradiances journalières et de la durée d'insolation de ces deux sites sont utilisées pour tester six modèles de calcul basés sur la durée d'insolation. Les enregistrements des données des irradiances solaires globales sont effectués dans des périodes de plus de 10 ans pour le site d'Adrar et de 5 ans pour celui d'Oran. (Tableau III.1).

Tableau. III.1: Coordonnées géographiques des stations utilisées.

Station	Latitude	Longitude	Altitude(m)	Période
Adrar	27.88°N	0°17°E	269	1996-2008
Oran	35°38 N	00°36 W	90	2006-2010

Dans cette étude nous avons testé 6 types de modèle pour exprimer le rayonnement global relatif (H/H_0) en fonction de l'insolation relative (S/S_0) [21-23].

H et H_0 sont respectivement les moyennes mensuelles du rayonnement global horizontal au sol et du rayonnement global horizontal hors atmosphère, ils sont exprimés en kWh/m²/Jour (cf. Chap. I.3.2), S est la durée moyenne d'ensoleillement effective du jour par mois (h) et S_0 est la durée moyenne maximal d'ensoleillement (durée astronomique) du jour par mois (h).

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_s \quad \text{(III-33)}$$

Tableau. III.2: Modèles statistiques utilisés.

Modèles	Types	Equations
1	Linaire	$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0}\right)$ (III-34)
2	Polynomiale 2	$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0}\right) + c \left(\frac{S}{S_0}\right)^2$ (III-35)
3	Polynomiale 3	$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0}\right) + c \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 + d \left(\frac{S}{S_0}\right)^3$ (III-36)
4	Logarithmique	$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \log \left(\frac{S}{S_0}\right)$ (III-37)
5	Puissance	$\frac{H}{H_0} = a \cdot \left(\frac{S}{S_0}\right)^b$ (III-38)
6	Exponentiel	$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \exp \left(\frac{S}{S_0}\right)$ (III-39)

III.2.3. Rayonnement global horizontal à partir des sorties de modèles météorologiques

Notre objectif est de mettre un moyen pour prévoir le rayonnement global horizontal reçu au niveau du sol, qui est un paramètre qui est très dépendant d'un ensemble de variables qualifiant l'état de l'atmosphère (température, humidité, couverture nuageuse pression, etc.) [24-26].

Les modèles numériques de prévisions météorologiques utilisent des algorithmes de résolution numérique des équations physiques assimilant les données météorologiques acquises par les satellites et les stations de mesures au sol réparties sur le globe. Ils fournissent ainsi des prévisions de nombreuses variables atmosphériques (température, pression, vent, etc.) pour chaque point de la grille spatiale d'une résolution de plus ou moins fine (12 km pour le modèle ALADIN opérationnel à l'Office National de la Météorologie) [27].

Grâce à aux sorties de modèles nous auront la possibilité d'estimer le rayonnement utilisant les paramètres atmosphériques prévus. Dans ce contexte on s'appuyer sur les études menées par Perez, Martín et autres [28-29]. Nous proposons un système de prévisions du rayonnement solaire basés sur le post-traitement des résultats des modèles de prévision numérique.

L'idée principale réside dans l'utilisation des données provenant des sorties de ces modèles météorologiques ALADIN du centre de prévision météorologique nationale pour la prédiction à l'avance de l'irradiation solaire à courte échéance, à travers une procédure d'adaptation statistique.

L'adaptation statistique consiste à établir des liaisons statistiques entre les irradiances et les champs prévus par le modèle puis, lors de la prévision opérationnelle, les équations ainsi mises au point sont utilisées avec les champs prévus par ce modèle. Ce dernier fournit une prévision sur un domaine qui couvre tout le territoire Algérien et qui contient 78400 points de grille. L'adaptation statistique est composée d'une phase dite d'apprentissage et d'une phase test. Lors d'une phase d'apprentissage, un lien statistique synchrone entre les produits du modèle ALADIN et les irradiances, ce qui permettra de transformer cette prévision, en point de grille du modèle, en une prévision locale pour chaque station donnée, lors de la phase test.

Les prédicteurs sont les irradiances journalières pour les stations sélectionnées. Nous avons décidé d'utiliser les paramètres suivants : la couverture nuageuse moyenne l'humidité relative, la température maximale et minimale à 2m comme prédicteurs.

Les données de rayonnement global quotidiennement mesurés aux niveaux de station de mesure radiométriques d'Adrar sont utilisées. Les paramètres d'entrées sélectionnées pour cette phase sont : les températures et l'humidité à 2m et le taux de couverture nuageuse moyenne au cours de la journée du point de grille le plus proche de la station (Figure III.1).

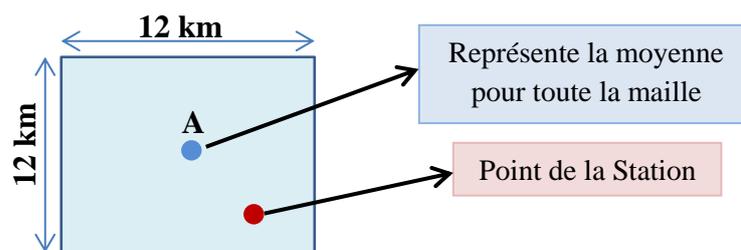


Figure. III.1: Grille des prédicteurs sélectionnés.

Pour les premiers tests de cette technique, nous disposons d'une année d'archivage de sorties de modèle, il s'agit des prévisions réalisées durant les mois du janvier à décembre 2010. Dans ce cas, la base de données est divisée en deux parties, une première de 6 premiers mois (Janvier à Juin) pour la phase l'apprentissage, et la deuxième pour la validation. Les premiers résultats sont présentés dans la section III.5.3.

III.3. MODELISATION DU RAYONNEMENT GLOBAL INCLINE

L'éclairement du au rayonnement global reçu sur un plan incliné d'un angle (β) est la somme des trois composantes du rayonnement solaire incident sur le même plan à savoir, le direct, le diffus et la composante réfléchi par le surface terrestre, il est généralement calculé par la formule suivant [30]:

$$G_{\beta} = I_{\beta} + D_{\beta} + d_{re} \quad (III-40)$$

I_{β} : l'éclairement direct sur un plan incliné est exprimé par la relation suivante :

$$I_{\beta} = I \cdot R_b \quad (III-41)$$

Où, le facteur d'inclinaison R_b du rayonnement direct est donné par la relation suivante:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta)} \quad (III-42)$$

δ : déclinaison du soleil, ω : angle horaire, φ : latitude, β : inclinaison du plan.

(D_{β}) : Le rayonnement diffus: (d_{re}) le rayonnement réfléchi, ce dernier terme qui se change d'un modèle à l'autre (selon l'isotropie et l'anisotropie) ;

III.3.1 Angles optimal mensuel et annuel :

L'angle optimal mensuel est une inclinaison moyenne propre pour chaque mois, qui fait que la surface du capteur reçoit un maximum d'énergie durant la période considéré. Il peut être tiré une fois localisé le maximum de rayonnement, en faisant varier l'angle d'inclinaison (β) de 0° à 90° . Le même principe pour l'angle optimal annuel, avec une inclinaison fixe où on peut récupérer le maximum d'énergie au cours de l'année. Pour notre cas l'orientation est toujours plein sud ($\alpha=0$) et β l'angle d'inclinaison de la surface réceptrice.

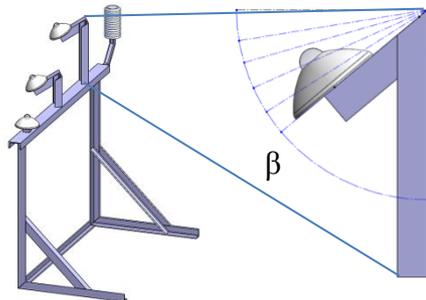


Figure. III.2: Le dispositif de mesure à différents plans d'inclinaison.

Le rayonnement extraterrestre reçu à la limite supérieur de l'atmosphère en fonction de l'angle d'inclinaison (β) est donné par la relation suivante [30]:

$$B_0(\beta, 0) = \frac{24}{\pi} \cdot I_0 \left[\sin \delta \sin(\varphi - \beta) \omega'_s \cdot \frac{\pi}{180} + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \sin \omega'_s \right] \quad (III-43)$$

Tel que: $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$; δ : déclinaison solaire, φ : latitude du lieu ($\sim 28^\circ$), ω_1 : angle horaire du lever réel sur un plan incliné.

$$\omega'_s = \text{Min}[\omega_s, \arccos(-\tan(\varphi - \beta) \tan(\delta))] \quad (\text{III-44})$$

ω_s : l'angle horaire du lever pour un plan horizontal (cf. Chap. I.3.2).

Le principe étant le calcul de l'énergie reçue sur une surface réceptrice d'orientation supposée fixe plane sud et une inclinaison variable entre 0° (plan horizontal) à un angle de 90° (plan vertical) pour chaque jour de l'année, de déduire par la suite l'irradiation moyenne mensuelle, ou simplement faire le calcul pour les journées types mensuelles (cf. Tableau. I.1), l'angle optimum est déterminé en cherchant la valeur maximale de l'irradiation journalière durant cette période.

Les figures III.3 et III.4 représente les courbes des irradiations globales journalières en moyennes mensuelles en fonction de l'angle d'inclinaison pour les 12 mois de l'année.

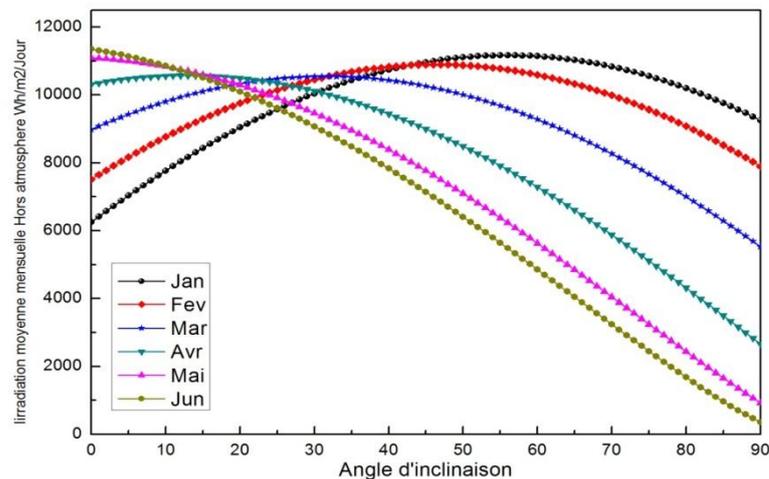


Figure. III.3: Moyennes mensuelles des irradiations quotidiennes en fonction de l'angle du plan d'inclinaison (Janvier à Juin).

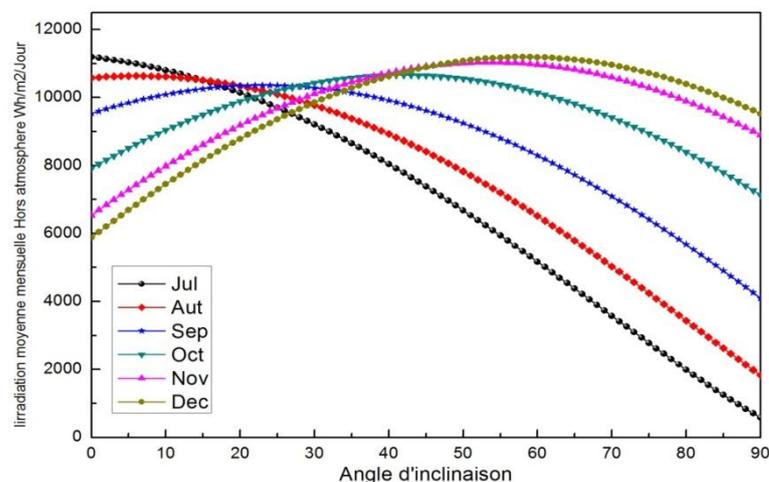


Figure. III.4: Même légende que Figure III.3, mois de Juillet à Décembre.

De la même façon, on déduit l'angle optimum annuel qui représente l'angle d'inclinaison fixe qui correspond au maximum d'irradiation pendant toute l'année. D'après la courbe de la figure III.5, le rayonnement maximal est obtenu pour un angle β de 28° . La figure III.5 représente la variation de la moyenne annuelle des irradiances quotidiennes en fonction de l'angle d'inclinaison.

Le tableau III.3, présente les angles optimaux mensuels et annuels déduits à partir des graphes pour le site d'Adrar.

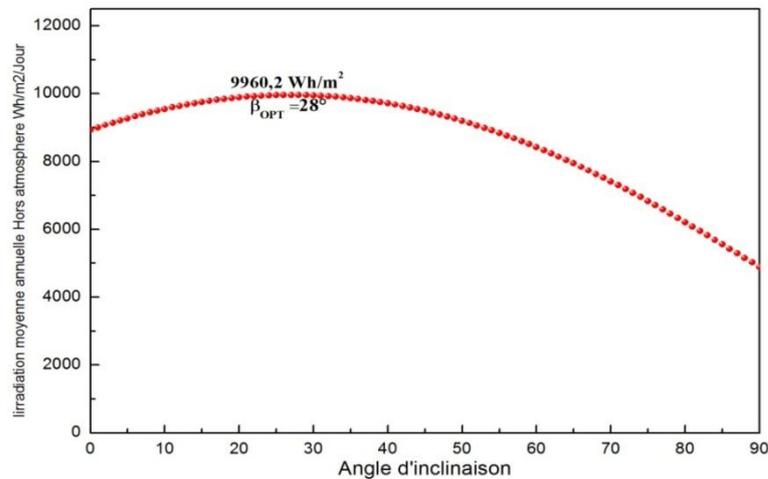


Figure. III.5: Moyenne annuelle des irradiances quotidiennes en fonction de l'angle du plan d'inclinaison.

Tableau. III.3: les angles optimaux mensuels pour le site d'Adrar (en degré).

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annuel
Angle Optimal	57	47	33	14	0	0	0	7	24	43	55	59	28

III.3.2. Modèles d'estimation

Plusieurs auteurs ont étudiés la performance des modèles d'estimation de l'éclairement global reçu sur un plan incliné à partir des éclaircissements mesurés sur un plan horizontal à partir des composantes direct et diffuses mesurées sur un plan horizontal et qui sont différenciés par un facteur de forme correspondant à chaque contribution du rayonnement diffus c'est-à-dire en tenant compte de l'isotropie et de l'anisotropie du ciel.

Notre travail consiste à calculer l'éclairement global incident sur une surface inclinée en utilisant quatre (04) modèles : le modèle de Liu & Jordan, le modèle de Hay, le modèle de Baltas et le modèle de Klucher [31-34].

a) *Modèle de Liu-Jordan*

Ce modèle suppose que le rayonnement diffus du ciel est isotrope, La relation de Liu & Jordan généralisée pour le calcul de l'éclairement global sur un plan incliné d'un angle (β) est donnée sous la forme suivante [31]:

$$G = I_{\beta} + d_h \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \rho \cdot (I_h + D_h) \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (\text{III-45})$$

I_h et D_h Sont respectivement les éclairements direct et diffus horizontal.

b) *Modèle de Hay*

La relation générale (III.40) pour le calcul du rayonnement global sur un plan incliné d'un angle (β) reste valable. Mais ce modèle suppose que le rayonnement diffus du ciel est formé de deux composantes, à savoir l'une isotrope et l'autre circumsolaire. Ce qui conduit à [32]:

$$D_{\beta} = D_h \cdot \left[(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + A_i \frac{\cos(\theta)}{\sin(h)} \right] \quad (\text{III-46})$$

$$A_i \text{ Est l'indice d'anisotropie, il est donné par : } \quad A_i = \frac{I_h}{I_0} \quad (\text{III-47})$$

Avec:

I_h : L'éclairement direct incident sur un plan horizontal.

I_0 : L'éclairement global extraterrestre incident sur un plan horizontal.

L'éclairement du au rayonnement solaire réfléchi par le sol dépend fortement de la nature du sol et plus précisément de son albédo. Pour ce travail, le modèle de Temps et Coulson [31], qui tient compte de l'incidence du rayonnement solaire sur le plan horizontal, a été retenu. Il est donné par l'expression suivante:

$$d_{re} = \frac{1}{2} \rho \cdot G_h \cdot (1 - \cos(\beta)) \cdot \left[1 + \sin^2 \left(\frac{\theta_z}{2} \right) \right] |\cos(a_s)| \quad (\text{III-48})$$

a_s : Azimut du soleil

c) *Modèle de Baltas*

Dans ce modèle, nous supposons que la distribution de l'éclairement du au rayonnement diffus est anisotrope. Pour ceci, nous avons choisi le modèle proposé par Baltas [33], qui est donné par la relation suivante:

$$G = I_{\beta} + D_h \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \cdot \left[1 + F \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \left[\frac{1 + F \cdot \cos^2(\theta) \cdot \sin^3(90-h)}{1 + F \cdot \cos^2(\theta_z) \cdot \sin^3(\theta_z)} \right] + d_{re} \quad (\text{III-49})$$

D_h , β , θ , θ_z et h sont respectivement l'éclairement du au rayonnement diffus, l'inclinaison du capteur, l'angle d'incidence, la distance zénithale et la hauteur du soleil.

F est un paramètre qui tient compte de l'état du ciel, il est donné par :

$$F = 1 - \left(\frac{D_h}{G_h}\right) \quad (\text{III-50})$$

Il faut remarquer aussi que pour un état de ciel couvert, le facteur F est égal à zéro, car $D_h = G_h$, et la composante diffuse sera réduite à l'expression proposée par Liu & Jordan [31], qui supposent que la distribution de l'éclairement du au rayonnement diffus est isotrope.

d)Modèle de Klucher

Klucher a modifié le modèle de Temps and Coulson [34], il est donné comme suit:

$$D_\beta = D_h \cdot \left[\left(\frac{1+\cos(\beta)}{2}\right) \cdot \left(1 + f \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \cdot \left(1 + f \cdot \cos^2(\theta) \cdot \sin^3(\theta_z)\right) \right] \quad (\text{III-51})$$

f : est un paramètre qui tient compte de l'état du ciel, et il se calcule par la relation suivante:

$$f = 1 - \left(\frac{D_h}{G_h}\right)^2 \quad (\text{III-52})$$

III.4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

L'ensemble de simulations réalisées ont d'abord été comparé graphiquement sous forme des courbes représentatives des valeurs mesurées et celles estimées par chacun des modèles, ensuite pour évaluer ces simulations d'un point de vue statistique, nous avons calculé les scores les plus utilisés pour évaluation des modèle d'estimation [35], il sont décrits dans l'Annexe D: le coefficient de corrélation, l'erreur moyenne (MBE : Mean Bias Error) biais et l'Erreur quadratique moyenne (RMSE : Root Mean Square Error).

III.4.1 Estimation de l'éclairement global horizontal a ciel clair

Dans le but d'évaluer les estimations réalisées par les quatre modèles pour l'éclairement global à ciel clair, un ensemble de simulations a été exécuté, couvrant des situations des différentes périodes de l'année, dans le but d'avoir une grande représentativité des résultats. Afin de sélectionner les journées claires, une procédure de vérification basée sur l'indice de clarté a été mise en place (cf. Chap. II.2.2b), les données de l'éclairement avec un k_t supérieur à 0,7 ont été considérées comme claire, une inspection visuelle a été menée par la suite aux fins de vérifications. Deux dates ont été retenues pour être présentées, une période hivernale du 15 Janvier et une autre estivale correspondant au 03 Juin de l'année 2014. Les mesures réalisées à la station d'Unité de Recherche à Adrar ont servies pour cette évaluation.

Les Figures III.6 et III.7, illustrent l'évaluation de l'éclairement global mesuré et estimé par les quatre modèles sur le site d'Adrar, les courbes ont été dressées sur le même graphique, les résultats de deux périodes différentes de l'année 2014 sont représentés.

Un obstacle est présent sur l'horizon de cette station, qui n'excède pas une hauteur de 10° , ce qui peut correspondre à une interception du rayonnement solaire d'une durée maximum d'environ une heure en fin de la journée pendant la période hivernale. C'est ce qu'on pourra remarquer surtout dans la courbe de la figure III.6.

Les tableaux III.4 et III.5 présentent les résultats d'évaluation statistique obtenus pour les quatre modèles par rapport aux données expérimentales relatives au rayonnement global horizontal.

Pour les deux situations, les résultats obtenus indiquent la présence d'un écart minimal au lever et au coucher et qui devient important au milieu de journée, en particulier pour la deuxième situation.

Pour une période hivernal (Figures III.6), nous remarquons qu'en milieu de journées, les modèles 1 et 3 surestiment le rayonnement global, par contre le 2 et le 4 le sous-estime. Par ailleurs, dans une période estivale et aux alentours de midi-solaire le modèle 3 est le seul qui surestime l'éclairement avec un écart plus important qui peut atteindre les 150 W/m^2 (Figures III.7). Pour les modèles 1 et 2, on remarque une sous-estimation plus intense par rapport à la première période. Les meilleurs résultats sont donnés par le modèle 4.

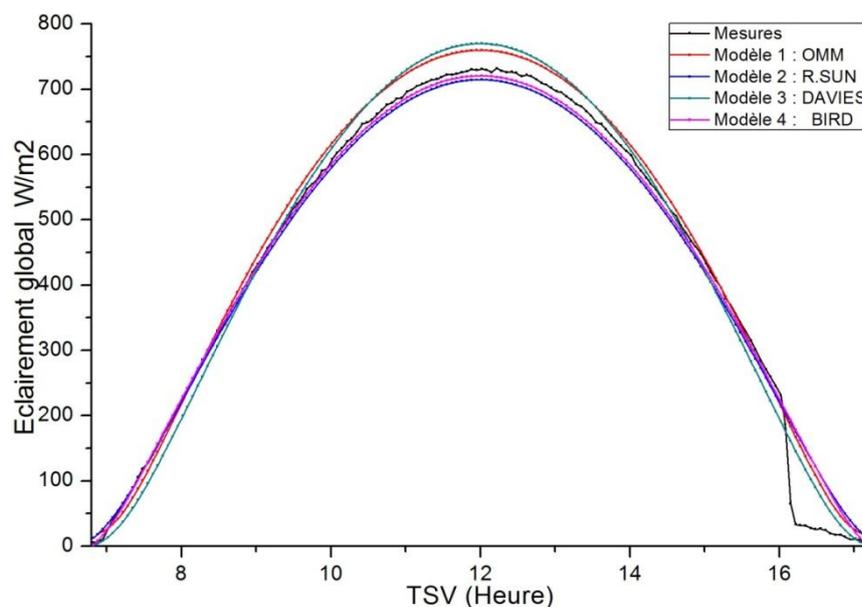


Figure. III.6: Eclairements global horizontale mesures et estimés, 15/01/2014.

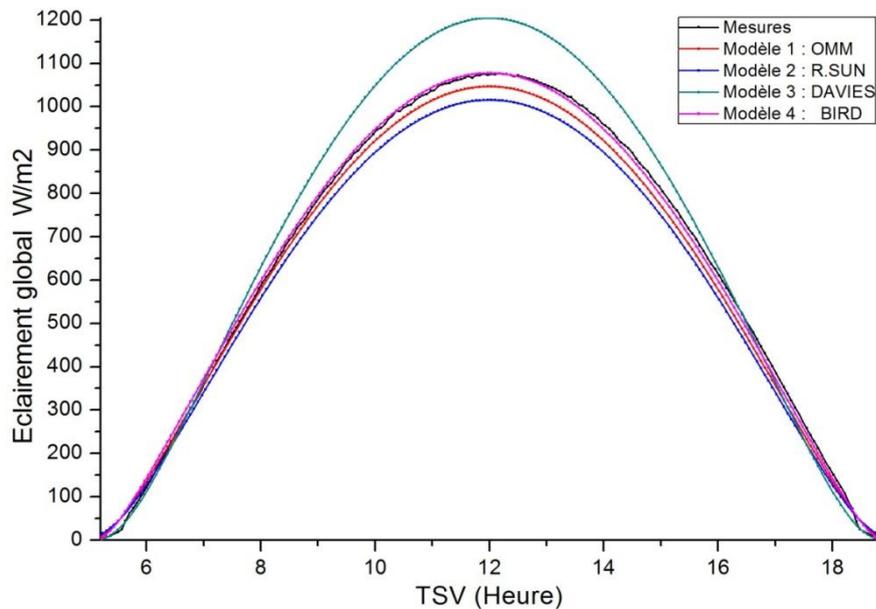


Figure. III.7: Eclaircements global horizontale mesures et estimés, 03/06/2014.

Mais d'un point de vue général, tous les modèles ont tendance à surestimer le rayonnement. Ce qui est confirmé par les scores statistiques (Tableaux III.4 et III.5), avec un MBE toujours positif. Pour la première simulation du 15 janvier, les valeurs du MBE varient de 3% à environ 5.6% avec un maximum enregistré pour le modèle 2. Le RMSE est de l'ordre de 6% pour tous les modèles. En ce qui concerne la deuxième simulation du 3 juin, le MBE atteint un maximum de 9% pour le modèle 2 et un minimum 1.7% enregistré pour le modèle 4.

D'une manière générale, on peut dire que le modèle 1 qui appartient au premier type et le modèle 4 du deuxième type donne une estimation assez bonne du rayonnement solaire global. Mais le modèle 4 (Bird) reste plus performant.

Tableau. III.4: Résultats statistiques simulation du 15 Janvier 2014.

Modèle	MBE(%)	RMSE (%)	R
Modèle 1	4,9810	6,8420	0,9955
Modèle 2	5,6525	6,9526	0,9944
Modèle 3	4,1941	6,6968	0,9951
Modèle 4	3,1482	6,3058	0,9951

Une évaluation statistique des résultats a été poursuivie pour le meilleur modèle sur les mesures du rayonnement global horizontal pour d'autres journées claires représentant les 12 mois de l'année (Tableau III.6).

Tableau. III.5: Résultats statistiques simulation du 03 Juin 2014.

Modèle	MBE(%)	RMSE(%)	R
Modèle 1	3,3919	4,2110	0,9984
Modèle 2	9,4494	11,7544	0,9987
Modèle 3	6,5167	7,1606	0,9993
Modèle 4	1,7063	1,8990	0,9994

En termes de MBE et RMSE, le modèle atteint des valeurs maximales en Juillet minimales en Décembre. La moyenne de MBE est de l'ordre de 3% et le RMSE et de 4.5%. Le coefficient de corrélation est toujours supérieur à 0.99.

Tableau. III.6: Résultats statistiques du modèle 4 (*Modèle de Bird & Hulstrom*).

Jour	Modèle 4 : <i>Bird & Hulstrom</i>		
	MBE (%)	RMSE(%)	R
15 Janvier	3,148	6,306	0,9951
24 Février	4,377	5,278	0,9989
22 Mars	3,006	4,077	0,9986
25 Avril	2,138	2,897	0,9991
12 Mai	2,982	3,694	0,9993
03 Juin	1,706	1,899	0,9994
29 Juillet	9,416	9,948	0,9985
23 Aout	2,461	3,711	0,9991
13 Septembre	2,156	2,695	0,9994
17 Octobre	2,413	3,058	0,9995
13 Novembre	2,570	6,509	0,9949
16 Décembre	1,993	4,691	0,9968
Moyenne	3,197	4,564	0,9982

III.4.2. Estimation du globale horizontal à partir de la durée d'insolation

Les moyennes mensuelles de l'irradiation journalière globale horizontale sur les deux sites Oran et Adrar ont été estimée en utilisant six (06) types de modèles de régression basés sur la fraction d'ensoleillement.

En comparant mesures avec les résultats d'estimation obtenus à l'aide des modèles décrit dans la section précédant, nous pouvons en déduire les précisions de chaque modèle, afin de tirer le meilleur pour chaque site de mesure.

Six types de modèles (linéaire simple, quadratique et polynomiales d'ordre 3, logarithmique, puissance et exponentiel) ont été ajustés pour représenter la corrélation entre le rayonnement global et la durée d'insolation. D'après les résultats statistiques, le 3^{ème} modèle est le plus performant pour le site d'Adrar et les modèles 3 et 4 pour le site d'Oran.

Tableau. III.7: Coefficients et scores statistiques site d'Adrar.

Modèle	Coefficients de Régression				Scores statistiques		
	a	b	c	D	MBE	RMSE	R
1	0.5015	0.2208			0,457	4,551	0.9685
2	-0.3205	2.3070	-1.3154		0,586	4,629	0.9681
3	69.5193	263.917	335.851	-141.874	0,243	3,460	0.9803
4	0.7179	0.1753			0,486	4,559	0.9685
5	0.7156	0.2461			0,271	4,536	0.9688
6	0.4574	0.0990			0,543	4,547	0.9686

Tableau. III.8: Coefficients et scores statistiques site d'Oran.

Modèle	Coefficients de Régression				Scores statistiques		
	A	b	c	D	MBE	RMSE	R
1	0.2622	0.5138			-0,983	4.151	0.979
2	0.4721	0.1339	0.4878		-1,374	4.379	0.976
3	1.7186	10.204	15.482	8.0875	-1,019	4.229	0.982
4	0.7432	0.331			-0,952	4.129	0.987
5	0.7534	0.5431			-1,418	4.476	0.970
6	0.3432	0.8388			-1,2264	4,3452	0.978

D'une manière générale, les modèles optimaux trouvés pour la plupart des séries sont du type polynomial d'ordre 3. Selon ces résultats, ces types de modèles sont le plus performants pour l'estimation de la moyenne mensuelle du rayonnement solaire global, ils peuvent être utilisés pour des sites dont le climat est similaire à celui des deux sites, en l'absence de données mesurées.

III.4.3. Estimation du rayonnement à sortie de modèle météorologique

Nous avons utilisé la méthode de régression multiple pour trouver des relations entre le prédicand (irradiation) et un ou plusieurs prédicteurs .Ce travail est réalisé au moyen de d'une application Macro sous Excel.

L'équation choisie pour décrire les relations entre les irradiances quotidiennes et les différents paramètres sélectionnés, indiquent que les deux meilleurs prédicteurs sont la

température maximale et la couverture nuageuse moyenne (T_{max} et CN). Ces deux prédicteurs sont utilisés dans le modèle à travers l'équation suivante:

$$GHI = 13,131 * (T_{max}) + 25,924 * (CN) - 1068,304 \quad (III-53)$$

La Figure III.8 représente les nuages de point des irradiances quotidiennes estimées par adaptation statistique des sorties du modèle ALADIN, et celles mesurées au niveau du site d'Adrar, pour la période de test. La qualité de l'ajustement est représentée par la valeur du coefficient de corrélation.

Les résultats sont prometteurs, les scores statistiques obtenus entre les valeurs expérimentales et celles estimées en termes de l'erreur quadratique moyenne et de l'ordre de 12%. Le modèle donne un MBE positif qui signifie que sur l'ensemble des estimations le modèle a tendance à surestimer les irradiances quotidiennes. On constate que le coefficient de corrélation est légèrement faible.

Une autre manière d'évaluer les résultats de la simulation consiste à des représentations graphiques des variations des irradiances globales journalières estimées et celles mesurées. A titre illustratif, nous présentons la comparaison des résultats de la simulation pour la station d'Adrar pour toute la période de l'année 2010 (Figure III.9).

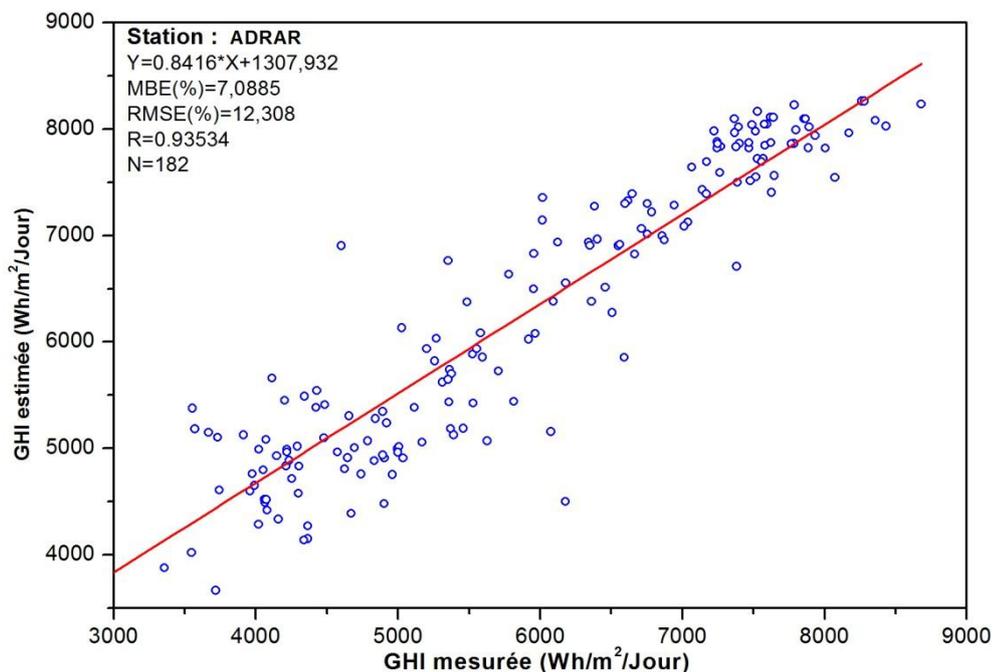


Figure. III.8 : Graphique de dispersion des résultats des simulations pour la station d'Adrar.

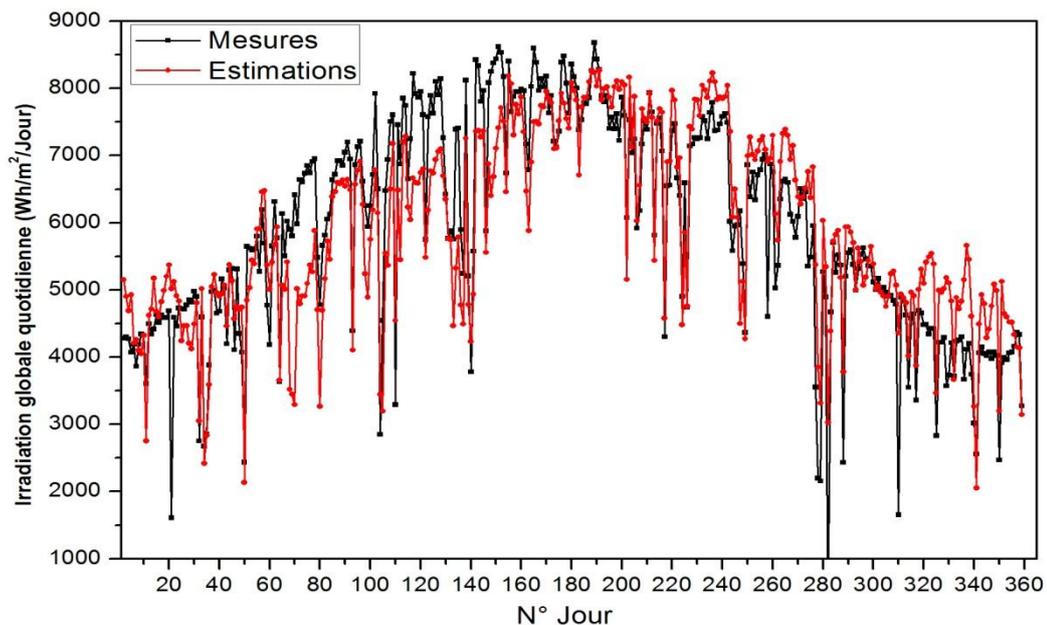


Figure. III.9 : Confrontation des résultats expérimentales et celles des simulations pour la station d'Adrar (2010).

III.4.4. Estimation du rayonnement global incliné

Dans ce qui suit, il s'agit d'évaluer les estimations faites par les quatre modèles pour différentes inclinaisons. Les mesures sont réalisées par un le pyranomètre et à travers un support d'assemblage permettant de varier l'angle d'inclinaison avec une orientation plein Sud, quatre positions correspond aux angles optimaux mensuels ont été désignées pour cette évaluation, il s'agit des quatre premier mois de l'années 2010, un changement de l'angle du plan d'inclinaison du ce support a été effectué chaque premier du moi selon les angles suivantes:

- $\beta = 57^\circ$: du 01 au 31 Janvier.
- $\beta = 47^\circ$: du 01 au 28 Février.
- $\beta = 33^\circ$: du 01 au 31 Mars.
- $\beta = 14^\circ$: du 01 au 30 Avril.

Nous cherchons dans les paragraphes suivants dévaluer ces simulations, dans une première partie, nous présentons les résultats reflétant deux situations à ciel clair, tandis que dans la seconde partie, nous essayerons de réaliser des simulations dans des conditions nuageuses. L'ensemble des simulations a été, d'abord évalué visuellement, ensuite en utilisant les scores statistiques décrits dans l'[Annexe D](#) [35].

a) Simulations à Ciel clair

Les figures III.10 et III.11 représentent les résultats obtenus pour des estimations du rayonnement global incliné pour les deux dates, celle du 30 Janvier et du 11 Avril 2010, représentant des situations à ciel clair.

D'après ces résultats, nous constatons que tous les modèles arrivent à reproduire l'éclairement global incliné, avec une légère différence qui commence à augmenter l'après-midi pour la première situation (Figure III.10). Par contre, on note une assez forte similitude des courbes pour la deuxième situation (Figure III.11). On remarque aussi que les modèles de Liu & Jordan et de Baltas sont les plus fiables.

Les tableaux III.9 et III.10, illustrent les résultats statistiques obtenus. Nous constatons que tous les modèles choisis surestiment les mesures. Nous remarquons pour la première situation (cf. Tableau III.9) que les plus faibles valeurs des MBE et RMSE correspondent aux modèles de Liu & Jordan et de Baltas. Les RMSE sont respectivement égales à 4.9% et 5.26%. Des écarts importants sont observés pour les autres modèles, et que le modèle de Hay est le moins favorable avec un MBE de l'ordre 5% et un RMSE de 7%. Pour la deuxième situation (cf. Tableau III.10), les plus faibles valeurs des erreurs correspondent aux modèles de Hay et de Baltas, avec une faible surestimation des modèles par rapport aux mesures. Le coefficient de corrélation est très élevé ($R > 0,99$) pour toutes les modèles.

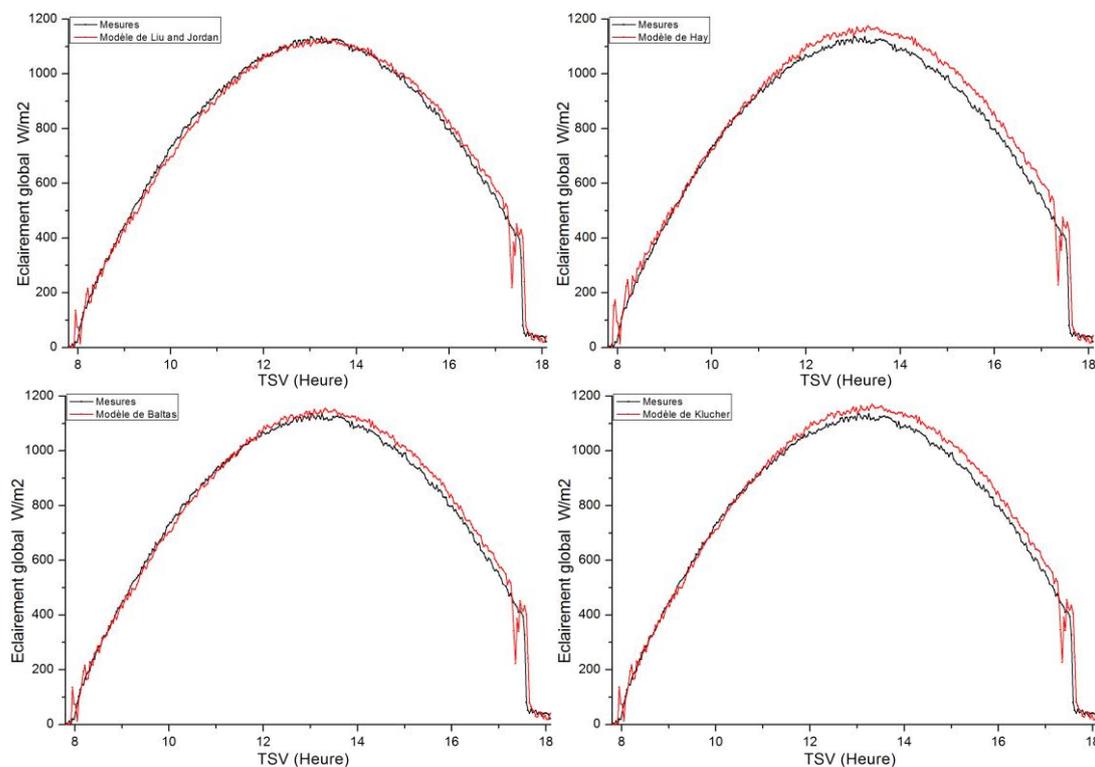


Figure. III.10: Eclairements global incliné mesurés et estimés, 30/01/2010.

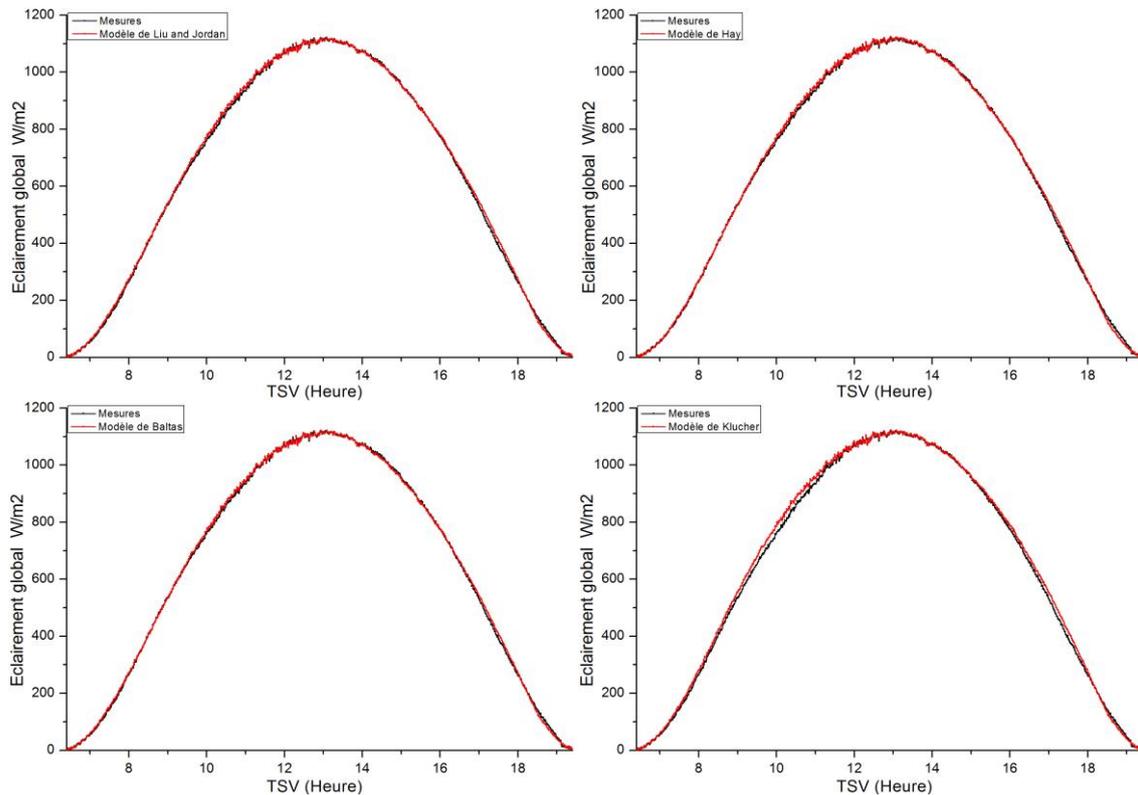


Figure. III.11: Eclairéments global incliné mesures et estimés, 28/04/2010.

Tableau. III.9: résultats statistiques Situation du 30 Janvier 2010

Modèle	MBE(%)	RMSE(%)	R
Liu & Jordan	2,95	4,90	0,99637
Hay	5,08	7,00	0,99581
Baltas	3,44	5,26	0,99641
Klucher	4,27	6,04	0,99636

Tableau. III.10: résultats statistiques Situation du 28 Avril 2010

Modèle	MBE(%)	RMSE(%)	R
Liu & Jordan	1,03	1,31	0,99982
Hay	0,92	1,19	0,99984
Baltas	0,89	1,12	0,99984
Klucher	1,83	2,32	0,99960

b) Simulations à Ciel couvert

Deux journées ont été retenues, représentant des journées à ciel couvert, les résultats obtenus sont présentés de la même manière que précédemment, les figures III.12 et III.13 représentent respectivement, les estimations du 30 Janvier et ceux du 11 Avril de l'année 2010.

Dans ces figures nous constatons que les courbes sont quasiment superposées, avec une légère surestimation très marqué en milieu de journée pour les modèles de de Hay, de Baltas et de Klucher pour la situation du 30 Janvier.

Le tableau III.11 et III.12, illustre les résultats statistiques obtenus pour les deux situations, dans le cas d'un ciel couvert. Nous remarquons que pour la première situation (cf. tableau III.11), les plus faibles valeurs des erreurs quadratiques correspondent au modèle de Baltas, Le RMSE est de l'ordre de 6%. Les plus grandes valeurs correspondent aux autres modèles, notamment pour le modèle de Hay avec un RMSE de l'ordre 10%.

En ce qui concerne la deuxième situation, on constate que les plus faibles valeurs des MBE et RMSE, correspondent au modèle de Hay avec un MBE de 2.27% et un RMSE inférieur à 4%.

D'une manière générale, On peut dire que les valeurs des irradiations obtenues par les divers modèles sont très proches des mesures expérimentales, de même que les erreurs sont très faibles pour tous les modèles (<6%).

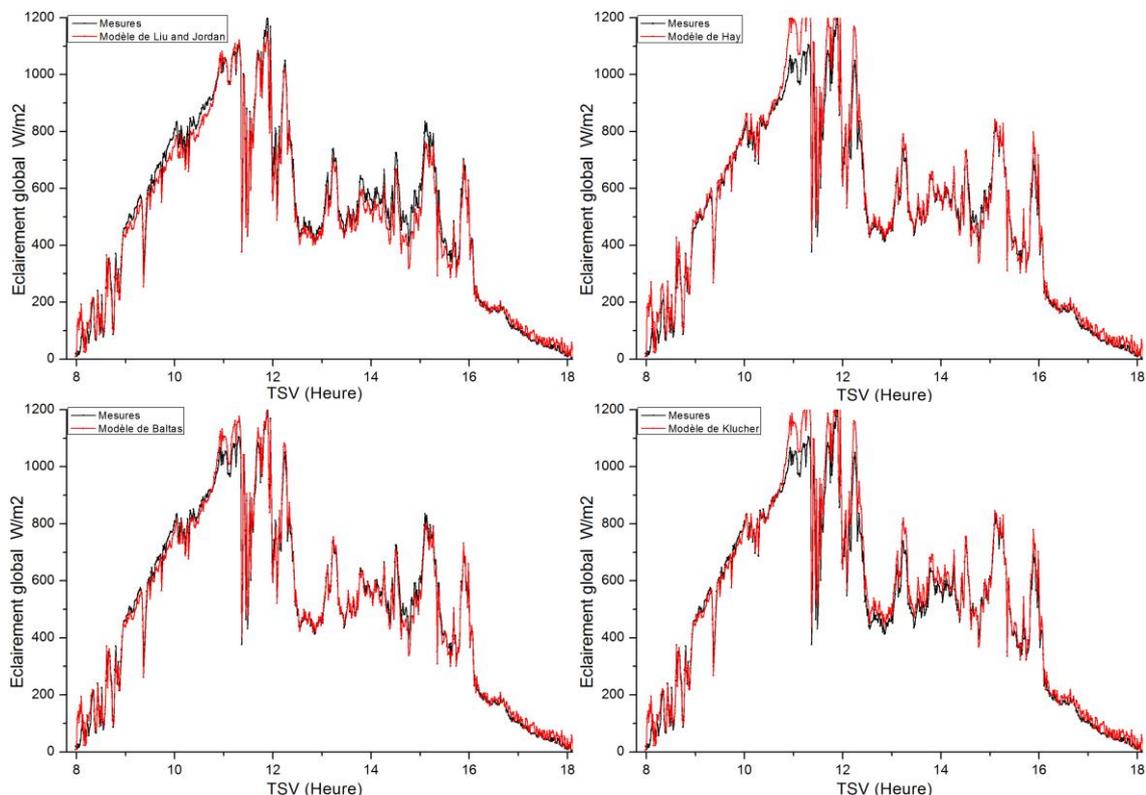


Figure. III.12: Eclairiments global incliné mesures et estimés, 11/01/2010.

Tableau. III.11 : résultats statistiques Situation du 11 Janvier 2010

Modèle	MBE(%)	RMSE(%)	R
Liu & Jordan	6,50	8,05	0,99497
Hay	6,63	10,10	0,99194
Baltas	4,80	6,19	0,99512
Klucher	6,85	9,25	0,99395

Tableau. III.12 : résultats statistiques Situation du 15 Avril 2010

Modèle	MBE(%)	RMSE(%)	R
Liu & Jordan	2,45	4,23	0,99936
Hay	2,27	3,81	0,99941
Baltas	2,49	4,27	0,99937
Klucher	2,86	4,61	0,99921

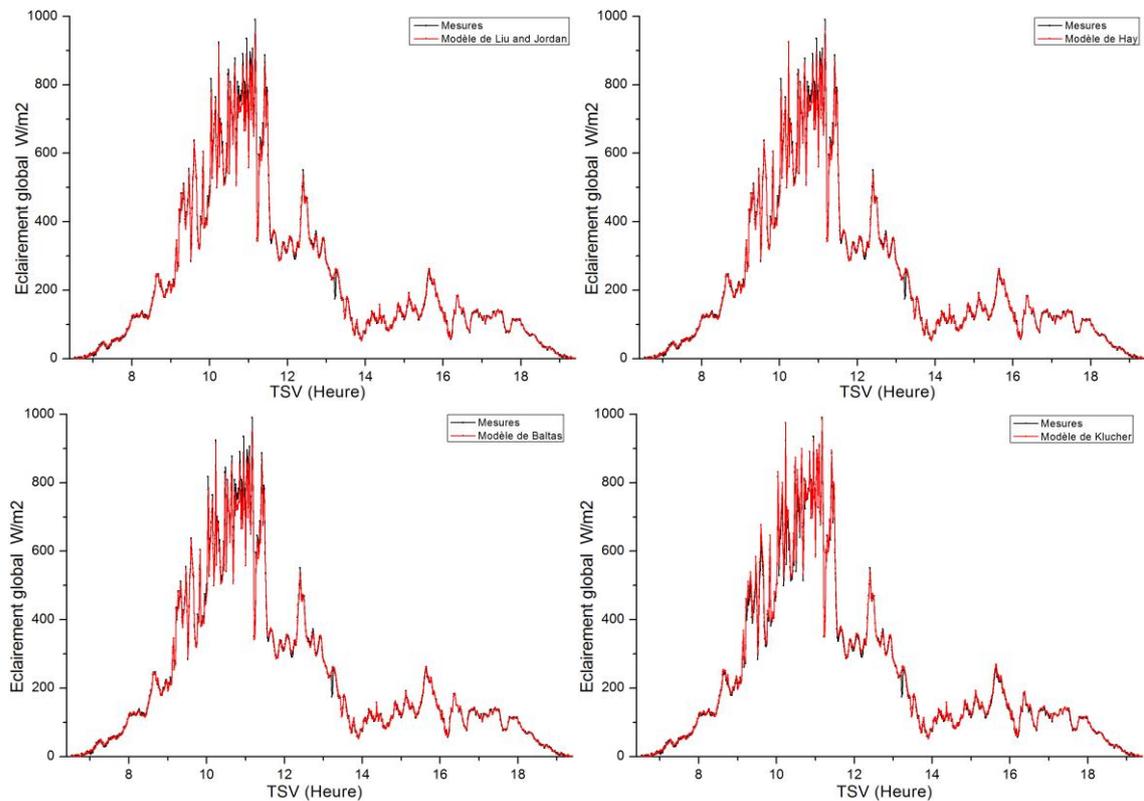


Figure. III.13: Eclaircements global incliné mesures et estimés, 15/04/2010.

- *les irradiations globales journalières*

Le [tableau III.13](#) représente, les irradiations globales journalières en Wh/m²/jour obtenues par une intégration numérique des courbes des éclaircements mesurés et ceux estimés par les quatre modèles, dans le cas du ciel couvert. Les erreurs relatives entre ces estimations et les mesures sont représenté dans le [tableau III.14](#).

De la même façon le [tableau III.15](#) représente, les irradiances globales pour des situations à ciel couvert. Les erreurs relatives dans ce dernier cas sont représentées dans le [tableau III.16](#).

Tableau. III.13: Irradiations journalières sur les différents plans de collecte pour ciel clair.

Période	Angle	Liu&Jord	Hay	Baltas	Klucher	Mesuré
30-janv.	57	7830	8145	7945	8065	7813
06-févr.	47	7207	7536	7336	7491	7386
29-Mars	33	7378	7508	7374	7660	7652
28-Avr	14	8434	8416	8409	8513	8383

Tableau. III.14: Erreur moyenne relative des modèles théorique (ciel clair).

Période	Angle	Liu&jord	Hay	Baltas	Klucher
30-janv.	57	-0,2%	-4,2%	-1,7%	-3,2%
06-févr.	47	2,4%	-2,0%	0,7%	-1,4%
29-Mars	33	3,6%	1,9%	3,6%	-0,1%
28-Avr	14	-0,6%	-0,4%	-0,3%	-1,6%
Moyenne		1,3%	-1,2%	0,6%	-1,6%

Tableau III.15: Irradiations journalières sur les différents plans de collecte pour ciel couvert.

Période	Angle	Liu&jord	Hay	Baltas	Klucher	Mesuré
11-janvier	57	4909	5370	5126	5391	5127
01-février	47	2843	2971	2927	3102	2977
06-mars	33	3738	3812	3768	3941	3794
15-avril	14	2897	2899	2892	2985	2925

Tableau III.16: Erreur relative des modèles théorique (ciel couvert).

Période	Angle	Liu&Jord	Hay	Baltas	Klucher
11-janvier	57	4,2%	-4,7%	0,0%	-5,2%
01-février	47	4,5%	0,2%	1,6%	-4,2%
06-mars	33	1,5%	-0,5%	0,7%	-3,9%
15-avril	14	1,0%	0,9%	1,1%	-2,1%
Moyenne		2,8%	-1,0%	0,9%	-3,8%

III.5. CONCLUSION

Dans le présent chapitre, une évaluation du potentiel énergétique solaire sur site à travers une modélisation du rayonnement solaire à ciel clair puis dans différentes conditions météorologiques a été réalisée. Commencant par une étude comparative de quatre modèles d'estimation de l'éclairement solaire à ciel clair sur le site d'Adrar. Nous avons constaté que le modèle *Bird & Hulstrom* est le plus favorable, il donne une bonne estimation du rayonnement solaire. Les résultats obtenus pour le site d'Adrar se rapprochent avec une grande précision des mesures au sol.

A travers cette étude, nous avons développé des modèles de régression donnant le global horizontal en fonction de la durée d'insolation pour le site d'Oran et le site d'Adrar. L'estimation du rayonnement solaire global par une relation polynomiale d'ordre 3 donne de bons résultats pour les deux sites. Ainsi, pour les différentes régions engendrées par le manque de sites de mesure au sol, l'emploi de telles méthodes d'approche s'avère justifié.

Ce chapitre nous a permis de tester une technique d'estimation du rayonnement global à partir des sorties de modèles numériques, cette technique permettra de pallier certaines lacunes en fournissant des données relatives à l'humidité, la température et la couverture nuageuse. Toutefois, cette étude constitue une initiation dans la maîtrise et l'exploitation des techniques de prévision des ressources énergétiques solaire qui peut devenir dans un futur proche un outil indispensable pour la planification énergétique. Les estimations à travers l'adaptation statistique s'améliorent une fois la base de données de la phase d'apprentissage sera assez conséquente, ce qui contribue à la performance de prévisions sur la phase de validation.

Ce travail nous a permis aussi de tester l'efficacité de quatre modèles d'estimation du rayonnement global incliné pour différents angles d'inclinaison. L'évaluation de ces différentes méthodes a permis d'apprécier le modèle le plus adapté pour la caractérisation radiométrique. Ces modèles ont été testés sur des situations différentes sur le site d'Adrar, les estimations sont en bonne concordance avec les mesures expérimentales. Les erreurs en termes de MBE relative sont inférieures à 6%. La précision des modèles sont en fonction de l'état du ciel et de l'angle d'orientation du plan de collecte. Dans l'ensemble des simulations, Nous pouvons conclure que le modèle de Baltas est le plus fiable, et que le modèle de Klucher est le moins favorable.

III.6. REFERENCES

- [1] [Jamil Ahmad M.](#), Tiwari. G.N., (2010): Solar radiation models – review., INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT., Volume 1, Issue 3, 2010 pp.513-532
- [2] [Besharat F.](#), Ali A. Dehghan and Ahmad R. Faghieh., (2013) Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study., Renewable and Sustainable Energy Reviews 21 798-821.
- [3] [Meza F.](#), Varas. E., (2015): Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature., Renewable and Sustainable Energy Reviews., 52 (2015) 1294–1299
- [4] [Bakirci. K.](#), (2009): Models of solar radiation with hours of bright sunshine: A review., Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 2580-2588.
- [5] [Benatallah D.](#), [Bouchouicha K.](#), Benatallah A. and Harouz A., (2016), "Development and Modeling of a Geographic Information System solar Flux in Adrar, Algeria", International Journal of System Modeling and Simulation Vol 1(1) Apr-Jun 2016, pp 15-19.
- [6] [Benatallah D.](#), Benatallah A., [Bouchouicha K.](#) and Harouz A., (2016), "Solar radiation estimate calculated using two models ", 5th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), November 14-17, 2016, Marrakech, Morocco.
- [7] [Bouchouicha K.](#), Aoun N., Bellaoui M., Oulimar B., Babahadj A., (2017): La prévision des ressources énergétiques solaires., 3RD CONFERENCE ON ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT., ADRAR, 07 - 08 FEBRUARY, 2017.
- [8] [Oulimar B.](#), [Bouchouicha. K.](#), (2013): «Modèle radiométrique adéquate pour caractériser l’apport énergétique optimal sur le site d’Adrar», INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT ICESD’13, Adrar - Algeria 19-20 February 2013.
- [9] [Perrin, C. and Vauge, C.](#) (1982). Le Gisement Solaire : Evaluation de la Ressource Energétique. Technique et Documentation, Librairie Lavoisier, Paris, France, 222 pages.
- [10] [Koussa M.](#), Malek A. and Haddadi M., (2006):« Validation de Quelques Modèles de Reconstitution des Eclairements dus au Rayonnement Solaire Direct, Diffus et Global par Ciel Clair », Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4 pp. 307 – 332, 2006.
- [11] [Hofierka J.](#), Suri M., (2002): « The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications », Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference 2002 - Trento, Italy, 11-13, September 2002.
- [12] [Dogniaux R.](#), (1984): « L’influence de L’estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur L’évaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair », Application aux Données Radiométriques de l’IRM à Uccle, Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N° 20, 1984.

- [13] [Hay, J.E.](#), Davies, J.A., (1980): Calculations of the solar radiation incident on an inclined surface. In: Hay, J.E., Won, T.K. (Eds.), Proc. of First Canadian Solar Radiation Data Workshop, 59. Ministry of Supply and Services, Canada.
- [14] [Mesri-Merad M.](#), Rougab I., Cheknane A. and Bachari N.I., (2012): 'Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques', Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3, pp.451 – 463, 2012
- [15] [Bird E .R.](#), Hulstrom R.L., (1981a): « A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insulation on Horizontal Surfaces », Seri Tr -642-761, February 1981.
- [16] [Bird E .R.](#), Hulstrom R.L., (1981b). Direct insolation models, Transactions of the ASME J. Sol. Energy Engineering, 103, 182-192.
- [17] [Diabaté L.](#), Remund J., Wald L., (2003): Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa, Solar Energy, 75, pp. 111-119, 2003.
- [18] [Gschwind B.](#), Ménard L., Albuissou M. and Wald L., (2006): « Converting a Successful Research Project Into a Sustainable Service, The Case of the Soda Web Service », Environmental Modelling a Software, Vol, 21, N° 11, pp. 1555 - 1561, 2006.
- [19] [Despotovic M.](#), Nedic V, Despotovic D, Cvetanovic S. (2015): Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models. Renew Sustain Energy Rev 2015;52:1869–80.
- [20] [Bakirci, K.](#), (2009): Models of solar radiation with hours of bright sunshine: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, vol. 13, no 9, p. 2580-2588
- [21] [Al-Mostafa ZA](#), Maghrabi AH, Al-Shehri SM., (2014): Sunshine-based global radiation models: a review and case study. Energy Convers Manage 2014;84:209–16.
- [22] [Gairaa K.](#), Bakelli Y., (2013): A comparative study of some regression models to estimate the global solar radiation on horizontal surface from sunshine duration and meteorological parameters for Ghardaia Site, Algeria. ISRN Renew Energy 2013; 2013:1-11.
- [23] [Akinoğlu, B. G.](#) et ECEVIT, A., (1990): A further comparison and discussion of sunshine-based models to estimate global solar radiation. Energy, 1990, vol. 15, no 10, p. 865-872.
- [24] [Perez R.](#), Moore, K, Wilcox S, Renne D, Zelenka K., (2007): Forecasting solar radiation: Preliminary evaluation of an approach based upon the national forecast database. Solar Energy 2007; 81(6):809-812.
- [25] [Khatib, T.](#), Mohamed, A., Sopian, K., (2012): A review of solar energy modeling techniques. Renew. Sustain. Energy Rev. 16, 2864–2869
- [26] [Inman, R.H.](#), Pedro, H.T., Coimbra, C.F., (2013): Solar forecasting methods for renewable energy integration. Prog. Energy Combust. Sci. 39 (6), 535–576.
- [27] [Bouchouicha K.](#) and Bachari N. I., (2012) : « Simulation of a clear sky satellite image in water vapor and infrared satellite M.S.G channel's », Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°4, 2012, 671 – 679

- [28] [Martín, L.](#), et al., (2010): Prediction of global solar irradiance based on time series analysis: Application to solar thermal power plants energy production planning. *Solar Energy*, 84, 1772-1781, 2010.
- [29] [Schermeier, H.](#); [Bertsch, V.](#); [Fichtner, W.](#), (2014): Validation and utilization of numerical weather model data in energy systems analysis of decentralized electricity production. In Proceedings of the 7th International Scientific Conference on Energy and Climate Change, Athens, Greece, 8–10 October 2014.
- [30] [Oulimar B.](#), (2010): (2010): diagnostic sur les différents modes de collecte énergétique, rapport d'activité, URER-MS, 2010.
- [31] [Liu B.](#), [Jordan R.](#), (1962): Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *Trans ASHRAE* 1962;67.
- [32] [Hay J.](#) (1979): Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and tilted surfaces. *Solar Energy* 1979;23, 1979.
- [33] [Batlas P.](#), [Tortoreli M.](#) and [Russel P.E.](#), (1986): 'Evaluation of Power Output for Fixed and Step Tracking Photovoltaic Arrays', *Solar Energy*, Vol.32, N2, pp.147-163, 1986.
- [34] [Klucher M.](#), (1979): Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*;23:111–4, 1979.
- [35] [Stone, R.J.](#), (1993): Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Sol. Energy*, 51 (4): 289-291.

IV

ESTIMATION DE L'ALBEDO ET DU RAYONNEMENT GLOBAL A PARTIR DES IMAGES SATELLITAIRES

IV.1. INTRODUCTION

L'albédo de la surface est un élément important dans le bilan radiatif de la Terre, car il permet de connaître la quantité de lumière solaire incidente réfléchiée par la surface terrestre. Les méthodes utilisées pour l'estimation de l'albédo et du rayonnement solaire incident à partir du traitement des images satellitaires semblent donc plus appropriées pour répondre correctement à nos besoins; ces besoins portent en général sur des données détaillées en tout point de notre pays. Par ailleurs, on note, qu'avec la forte résolution spatiale des données satellitaires qui donne plus de précision, les estimations sont d'autant meilleures.

Ce chapitre présente une méthode pour la détermination de l'albédo de surface à partir d'images satellitaire visibles. Cette méthode est basée sur des solutions approximatives de l'équation du transfert radiatif, intégrant des images satellitaires. L'application de ce modèle sur des images prises a ciel clair permet de calculer l'albédo de surface, aussi ce modèle est appliqué sur l'image à ciel couvert afin d'extraire l'albédo des nuages [1].

A partir des images MSG prises dans les deux canaux visibles VIS006 et VIS008, et en se basant sur cette méthode, nous avons analysé les images a ciel clair pour chaque mois de l'année 2010, ceci nous permet de réaliser une estimation de l'albédo de surface à une meilleure résolution spatiale.

Le calcul du rayonnement global au sol est possible après avoir déterminé les principaux facteurs responsables du transfert radiatif de la radiation à ciel clair et le calcul de taux de couverture des nuages pour une surface élémentaire.

Deux approches ont été proposées pour l'estimation du rayonnement solaire global horizontal, les résultats sont comparés avec les mesures radiométriques au cours de l'année 2010 de cinq sites caractérisées par des conditions climatiques très différentes de notre pays. L'étude comparative entre les irradiances mesurées et celles calculées montrent qu'il est possible d'évaluer le rayonnement global avec une précision de 10% à 20%. Les résultats des estimations obtenus pour les irradiances solaires globales, en termes d'erreur quadratique moyenne relative, varient entre 11 % et 33% sur une base horaire, et entre 7% et 13% sur une base quotidienne [1,2].

IV.2. ETAT DE L'ART

IV.2.1. Albédo de surface

Plusieurs approches d'estimation de l'albédo de surface reposant sur l'utilisation des images satellitaires ont été rapportées dans la littérature [3-5]. Les méthodes existantes se répartissent en deux catégories: les méthodes statistiques et celles basées sur une modélisation physique. Dans les deux cas, l'objectif principal est en général l'estimation du rayonnement net et l'albédo de surface. Les méthodes physiques sont basées sur une modélisation physique du transfert radiatif à travers l'atmosphère pour extraire l'équation de radiation nette en haute atmosphère en utilisant l'image satellitaire [6-8]. Tandis que, les méthodes statistiques sont des techniques qui utilisent des mesures au sol de la réflectance par des radiomètres simulant celles embarquées par les satellites afin de calibrer les paramètres d'un modèle empirique établi [9-10]. Le choix d'une technique, dépend de plusieurs facteurs, dont les plus importants sont le type de données, la période couverte par les mesures disponibles.

IV.2.2. Rayonnement global

La faisabilité d'estimation du rayonnement global au sol par le traitement des images issues des satellitaires météorologiques géostationnaires a été démontrée à travers plusieurs études. Différentes approches développées, et qui sont classées en deux catégories, à savoir les modèles physiques et les modèles empiriques.

Les modèles physiques prennent en compte les échanges d'énergie qui se produisent lors de la traversée du système atmosphère-terre par le rayonnement solaire [11-13]. Ces échanges d'énergie sont alors décrits par une équation de transfert radiatif et nécessite une meilleure connaissance de la composition de l'atmosphère. Tandis que les modèles empiriques sont basées sur des équations de régression, qui utilisent un ou plusieurs variables indépendantes déduites des données satellitaires [14-15]. Ces variables sont le niveau de luminance (exprimé parfois comme un niveau de gris), l'angle zénithal solaire, la quantité d'eau précipitant et la quantité des nuages existante sur les données satellitaire.

IV.3. DOMAINE D'ETUDE

L'Algérie est située au centre du continent Nord-Africain, avec une superficie de 2.381.741 km², il est le plus grand pays au niveau africain et du monde arabe. Son sol est couvert de nombreuses forêts au centre et Est, vastes plaines à l'est et le Sahara qui représente à lui seul 84 % du territoire. (Figure IV.1).

Le relief algérien se compose de deux principales chaînes montagneuses : l'Atlas tellien et l'Atlas saharien : ce sont deux ensembles parallèles qui parcourent le pays d'Ouest en Est, elles se rapprochent au centre du pays jusqu'à presque se confondre à l'extrême Est vers la Tunisie. Ces deux chaînes constituent des frontières naturelles entre lesquelles s'intercalent de vastes plaines et hauts plateaux [16].

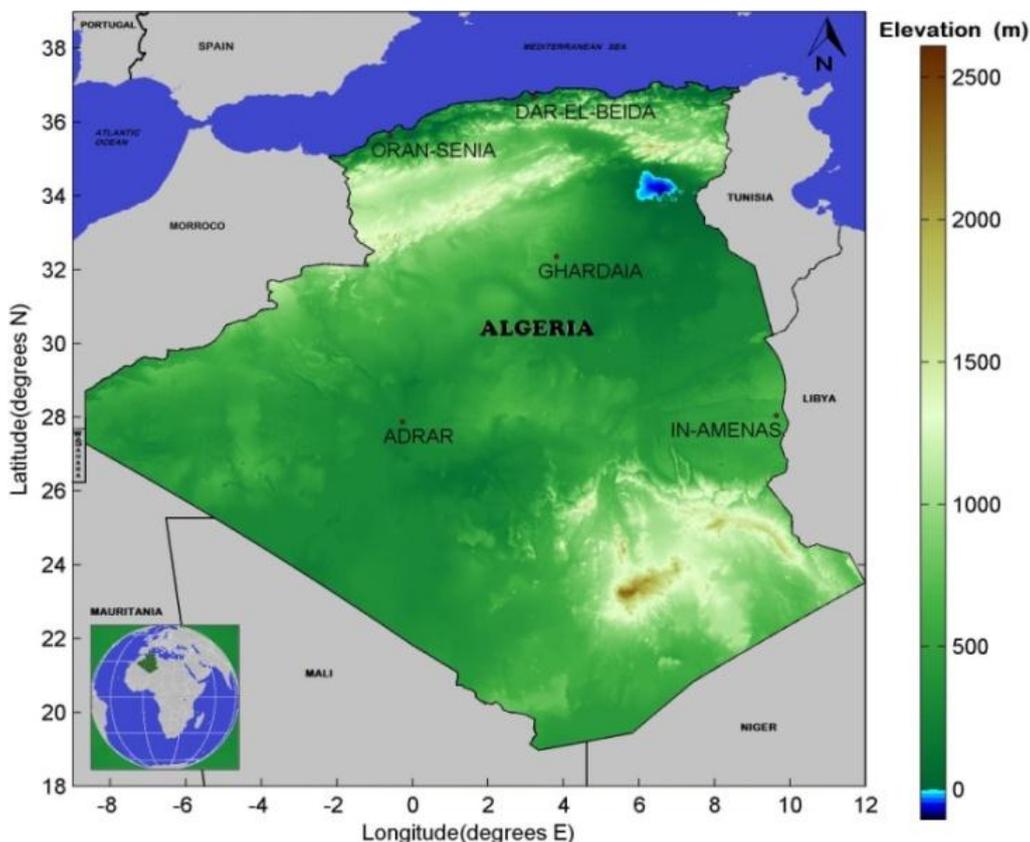


Figure IV.1: Carte d'élévation et localisation des stations de mesure utilisées (GTOPO USGS, Projection cylindrique équidistante, WGS84).

IV.4. DONNEES

IV.4.1. Mesures au sol

Les données du rayonnement global proviennent de cinq stations de mesure radiométriques installées dans les différentes régions du territoire algérien. Deux stations situées dans le Nord, avec un climat méditerranéen semi-aride (DAR-EL-BEIDA et ORANSENIA), deux autres situés dans le sud avec un climat désertique (ADRAR et IN-AMENAS) et la cinquième situé dans une zone intermédiaire considérée comme une région aride et sèche. (GHARDAIA). Les coordonnées géographiques de ces stations sont données sur le tableau IV.1

IV.4.2. Trouble de Linke

L'absorption et la diffusion du rayonnement solaire à travers les couches atmosphériques dues à ces constituants sont exprimées par le facteur de trouble de Linke. Nous avons choisi d'utiliser les données de facteur de Linke issues du projet Soda (*cf.* Chap. I.4.2b) [17].

Tableau IV.1: coordonnées géographiques des stations.

N°	Station	Latitude	Longitude	Élévation (m)
1	DAR-EL-BEIDA	36.68	3.22	25
2	ORAN-SENIA	35.63	-0.6	90
3	ADRAR	27.88	-0.28	269
4	GHARDAIA	32.4	3.8	468
5	IN-AMENAS	28.05	9.63	561

Les valeurs des moyennes mensuelles de trouble de Linke sur les sites sélectionnés sont données sur le tableau IV.2 :

Tableau. IV.2: moyennes mensuelles du facteur de trouble de Linke

Month	Station				
	1	2	3	4	5
Jan	3.45	2.5	3.2	3.05	3.0
Feb	3.5	2.8	3.35	3.45	3.0
Mar	3.25	2.8	3.6	3.2	3.25
Apr	4.0	3.3	3.75	3.85	3.35
May	3.95	3.45	4.05	3.95	3.65
Jun	4.05	3.9	3.95	4.2	3.55
Jul	4.25	4.1	4.1	4.45	3.65
Aug	4.0	4.1	4.1	4.5	3.65
Sep	4.15	3.8	4.0	4.15	3.6
Oct	3.3	2.9	3.75	3.85	3.45
Nov	3.4	2.6	3.6	3.35	3.05
Dec	3.0	2.25	3.5	3.25	3.0

IV.4.3. Données satellite

Les mesures du satellite MSG2 (Meteosat Second Generation) sont particulièrement adaptées à l'étude du bilan radiatif solaire, d'une part par leur résolution spatiale qui passe de 1 km au nadir pour le canal HRV à 3 km pour les autres canaux visibles (VIS006 et VIS008), d'autre part par la fréquence des prises d'images qui sont disponibles toutes les 15 minutes. [18].

Pour des limitations de transmission entre le satellite et le sol, seules deux secteurs de l'image HRV sont diffusés, par conséquent, la zone de notre étude n'est pas totalement couverte. Dans le cadre de cette étude, pour l'estimation de l'albédo de surface sur tout le territoire Algérien, nous utiliserons l'approche de Deneke & Roebeling [19], qui suppose que la réflectance pour la longueur d'onde du canal HRV est donnée sous forme d'une combinaison linéaire des réflectances des deux autres canaux visible :

$$\rho_{HRV} = 0,667\rho_{0,6} + 0,368\rho_{0,8} \quad (IV-1)$$

Les deux canaux à bande étroite ne couvrent pas la bande passante spectrale complète du canal HRV. Néanmoins, cette approximation linéaire explique au moins > 95% de la variance HRV sur le disque Meteosat complet [19].

IV.5. METHODES

IV.5.1. Estimation de l'Albédo de surface.

Ce travail a pour objectif, la résolution de l'équation du transfert radiatif en utilisant un modèle physique et des images satellitaires. La première partie est consacrée, au développement de trois solutions approximatives de la radiation nette en haute atmosphère. La première solution est linéaire et s'applique aux surfaces couvertes par l'eau, la deuxième a une forme parabolique et s'applique à tous les autres types de sol et la troisième solution est aussi parabolique du point de vue forme et s'applique seulement aux régions à basses altitudes équipées de pyranomètres pour la mesure du rayonnement en quelques lieux.

IV.5.1.1. Equation de transfert radiatif

L'équation de transfert radiatif en haute atmosphère à ciel clair pour un sol homogène d'albédo α_s est donnée par la relation suivante:

$$E = E^o + \frac{G_{skc} \cdot T(\theta_v)}{1 - s \alpha_s} \alpha_s \quad (IV-2)$$

Avec: E^o désigne la radiation diffuse vers l'extérieur par les particules suspendues dans l'atmosphère et qui peut être captée par le satellite et qu'on appelle aussi bruit; G_{skc} représente la radiation globale qui atteint le sol par ciel clair; $T(\theta_v)$ est la transmittance totale de la radiation directe dans la direction pixel-satellite (sans dimension); θ_v angle de vue du capteur, s est l'albédo sphérique représentant la diffusion de la radiation réfléchiée par l'atmosphère vers le sol et le terme $(1 - s \alpha_s)^{-1}$ décrit la réflexion multiple sol-atmosphère (Figure. IV.2).

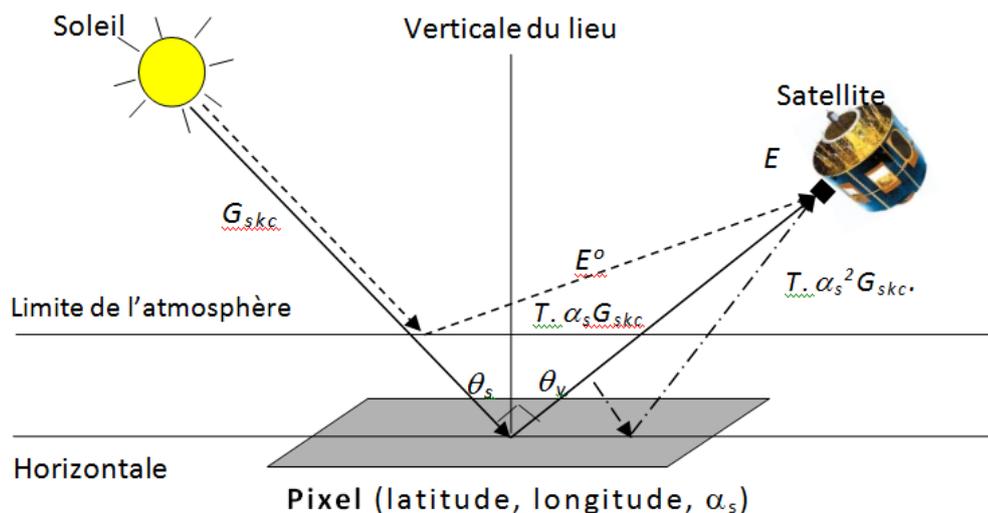


Figure. IV.2: Modèle de transfert radiatif soleil-pixel-satellite [20]

De nombreuses études et travaux de recherches ont fait l'objet de la résolution de l'équation du transfert radiatif, en se basant sur des méthodes numériques couplées avec l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour le calcul de la radiation en haute atmosphère et le développement d'un modèle physique pour le calcul des différents éléments intervenant dans les équations développées. Trois approximations sont proposées selon le type de cible, l'état de l'atmosphère terrestre et la disponibilité des mesures de rayonnement global au sol [21].

- Dans le cas des surfaces à très faible albédo, le terme de réflexion multiple peut être négligé. L'équation du transfert radiatif dans ce cas peut être représentée par la relation suivante:

$$E = E^o + G_{skc} \cdot T(\theta_v) \alpha_s \quad (IV-3)$$

- Dans le cas d'une surface d'albédo moyen, le terme de réflexion multiple est développé en premier ordre $(1 - s \alpha_s)^{-1} \approx (1 + s \alpha_s)$ et l'équation (IV-6) prend une forme parabolique [21,22] :

$$E = E^o + G_{skc} \cdot T(\theta_v) \alpha_s + s G_{skc} \cdot T(\theta_v) \alpha_s^2 \quad (IV-4)$$

- Pour les régions qui possèdent des mesures du rayonnement global au sol, et situées dans une zone géographique de faibles angles zénithaux ($\theta_s < 30^\circ$), la transmittance atmosphérique sol-satellite dans ces conditions, peut être approximée à la transmittance soleil-sol $T(\theta_v) \approx T(\theta_s)$. Aussi pour un ciel bleu profond, la radiation globale est composée en grande partie de la radiation directe.

Dans ce cas la transmittance de l'atmosphère peut être écrite ainsi:

$$T(\theta_s) \cong \frac{G_{skc}(1-s\alpha_s)}{E_o(1+f)} \quad (IV-5)$$

L'équation (IV-6) s'écrit sous une forme parabolique en fonction de α_s :

$$E = E^o + \left(\frac{G_{skc}^2}{E_1}\right)\alpha_s + s\left(\frac{G_{skc}}{E_1}\right)\alpha_s^2 \quad (IV-6)$$

Avec $E_1 = E_o (1 + f)$ et E_o représente la constante solaire 1368 W.cm^{-2} et f est un facteur de correction astronomique de distance soleil-sol qui est en fonction du jour julien ($1 \leq \text{jour} \leq 365$) [22].

IV.5.1.2. Calcul des différents types d'albédos

a) Albédo planétaire :

Supposons qu'un élément de surface du système sol-atmosphère reçoit l'éclairement solaire : $E_1 \text{Cos}(\theta_s)$. Une partie de la radiation sera transmise, par contre l'autre partie est réfléchiée d'une manière Lambertienne en dehors de l'atmosphère terrestre [23]. Le facteur de réflexion dans ce cas est l'albédo planétaire α_p , donné par la relation suivante :

$$\alpha_p = \frac{E}{E_o(1+f)\text{Cos}(\theta_s)} \quad (IV-7)$$

Le calcul et le suivi de l'albédo planétaire est d'une grande importance pour la modélisation des changements climatiques à échelle globale, car l'albédo planétaire est l'unique mesure continue pour le suivi de l'effet de serre.

b) Albédo des eaux

Les surfaces maritimes (mer, océan) sont transparentes à la radiation de courtes longueurs d'ondes du rayonnement solaire. Le terme de réflexion multiple dans l'équation (5.1) est négligeable. L'albédo des eaux est donné donc par la relation suivante:

$$\alpha_{mer} = \frac{E-E^o}{G_{skc}T(\theta_v)} \quad (IV-8)$$

c) Albédo du Sol couvert et semi-couvert

Dans le cas des sols ayant un albédo de l'ordre de 20% (couverts, semi-couverts), le terme de réflexion multiple n'est pas négligeable et l'équation (5.1) prend la forme parabolique dont la résolution donne deux solutions qui sont les suivantes :

$$\alpha_{s1} = \frac{-G_{skc}T(\theta_v) - [(G_{skc}T(\theta_v))^2 + 4(E-E^o)G_{skc} s T(\theta_v)]^{1/2}}{2 s G_{skc}T(\theta_v)} \quad (IV-9)$$

$$\alpha_{s2} = \frac{-G_{skc}T(\theta_v) + [(G_{skc}T(\theta_v))^2 + 4(E-E^o)G_{skc} s T(\theta_v)]^{1/2}}{2 s G_{skc}T(\theta_v)} \quad (IV-10)$$

La première solution α_{s1} est une solution mathématique qui donne un albédo négatif, cette solution est exclue, car le pouvoir de réflexion du rayonnement par le sol est positif.

La deuxième solution α_{s2} est une solution mathématiquement et physiquement acceptable. La formule donnée pour α_{s2} est générale, elle s'applique pour toutes les surfaces de la terre.

d) Albédo des Surfaces désertiques :

Dans les régions désertiques, le ciel est souvent sec, et les mesures du rayonnement peuvent être considérées représentatives des grandes zones. Dans ce cas la solution qui donne l'expression de l'albédo de surface est :

$$\alpha_{s3} = \frac{G_{skc}^2/E_o - ((G_{skc}^2/E_o)^2 - 4s(E-E^o)G_{skc}^2/E_o)^{1/2}}{sG_{skc}^2/E_o} \quad (IV-11)$$

L'évolution de l'Albédo du Sahara est important dans le suivi des déplacements de sable, car cette région représente la principale source mondiale d'aérosols terrigènes.

e) Albédo des nuages

L'analyse des nuages par satellite s'effectue par une analyse bis-spectrale des images prises dans la bande visible et des images prises dans la bande infrarouge. Les nuages se trouvent à une altitude de 300m jusqu'à 7000m selon leurs natures. Pour le calcul de l'albédo des nuages nous élaborons une image à ciel couvert. L'image à ciel couvert est obtenue en inversant l'algorithme de brillance minimale.

La radiation nette en haute atmosphère dans le cas du ciel totalement couvert est donnée par la relation linéaire suivante [21] :

$$E = E^o + G'T(\theta_v)\alpha_{nuage} \quad (IV-11)$$

L'albédo des nuages est donné donc par la relation suivante:

$$\alpha_{nuage} = \frac{(E - E^o)}{G'T(\theta_v)} \quad (IV-12)$$

Avec : G' représente la radiation globale au sommet des nuages et $T(\theta_v)$ est la transmittance atmosphérique de la radiation directe dans la direction du capteur. Dans le cas des nuages, on prend en moyenne l'altitude $Z = 2000 \text{ m} \Rightarrow \Delta T1 \cong -0.7$, la pression de vapeur d'eau $e = 4 \text{ mb} \Rightarrow \Delta T2 \cong -0.4$ et $\Delta T3$ est prise comme étant une erreur égale à -0.3 .

Les nuages les plus faciles à identifier à partir des images d'albédo sont : le gros Cumulus, qui est caractérisé par un fort albédo [50 % - 65 %] et une extension verticale moyenne, ce qui correspond à un pixel complètement blanc.

Le Cumulonimbus, qui apparaît avec une teinte blanche très brillante, caractérisé par un très fort albédo [80 % - 94 %], une extension verticale importante et une forme géométrique bien spécifique. L'Altostratus qui se présente avec un albédo [65 % - 75 %] et une forme géométrique arrondie.

Les nuages moyennement identifiables à partir des images brutes et les images d'albédo sont : le Stratus et le Brouillard qui sont caractérisés par un albédo compris entre [30 % - 60 %], leurs couleurs varient du blanc vers le gris, le stratocumulus qui possède un albédo compris entre [65 % - 75 %] et une couleur grise qui tend vers le blanc. L'Altostratus et le Nimbostratus qui possèdent un albédo oscillant autour de [35 % - 70 %] et leurs couleurs varient du blanc au gris. On dit que ce sont des nuages de basse couche et de grande étendue (Robinson, 1987 ;). Les nuages les plus difficiles à identifier à partir des images d'albédo et l'analyse visuelle des images brutes sont: les Cirrus fibratus qui sont minces et transparents aux rayons lumineux. Lors de la prise d'image dans le visible, le Cirrus peut être confondu avec le sol, et il est caractérisé par un albédo moyen [25 % - 35 %] pour cette raison, il peut être identifiable uniquement dans le cas des surfaces à faible albédo (mer et forêts) et dans le cas des sols à fort albédo.

IV.5.1.3. Constitution de l'image de référence

Dans le but d'éliminer les pixels nuageux et de créer une image à ciel clair à partir des données Météosat, pour l'intégrer dans le calcul de l'albédo de surface, un algorithme établi par Legrand a été utilisé dans notre étude, son principe est la séparation entre la structure à caractère permanent de la surface, et celle variable de l'atmosphère [Legrand M., 1990]. C'est ainsi que deux images de références sont construites par la technique de la brillance minimale (ciel clair) et maximale (ciel nuageux) à partir d'une série d'images prises à la même heure pendant une période de référence. Généralement au bout de dix à quinze jours, l'image à ciel clair peut être élaborée pour certaines régions (basses latitudes), alors que pour d'autres régions, cet intervalle de temps n'est pas suffisant (latitudes élevées). Sachant que les fortes valeurs numériques dans le visible correspondent aux brillances réfléchies par les nuages. Une fois l'image à ciel clair est élaborée, cette dernière est introduite dans le modèle pour l'extraction des valeurs d'albédo de surface.

Une brillance minimale enregistrée durant une période, pour la même heure et pour le même pixel décrit l'état du ciel. Partant de ce principe, nous calculons les brillances minimales de chaque pixel pour la même heure durant un mois. Le calcul complet doit être répété pour chaque mois.

A titre indicatif, nous représentons le résultat obtenu d'une image à ciel clair du Vis06 couvrant le domaine d'étude, qui a été élaborées à partir d'une série d'images MSG pour le mois de Juillet 2010. Le contour noir autour a été rajouté pour faire ressortir la frontière (Figure. IV.3).

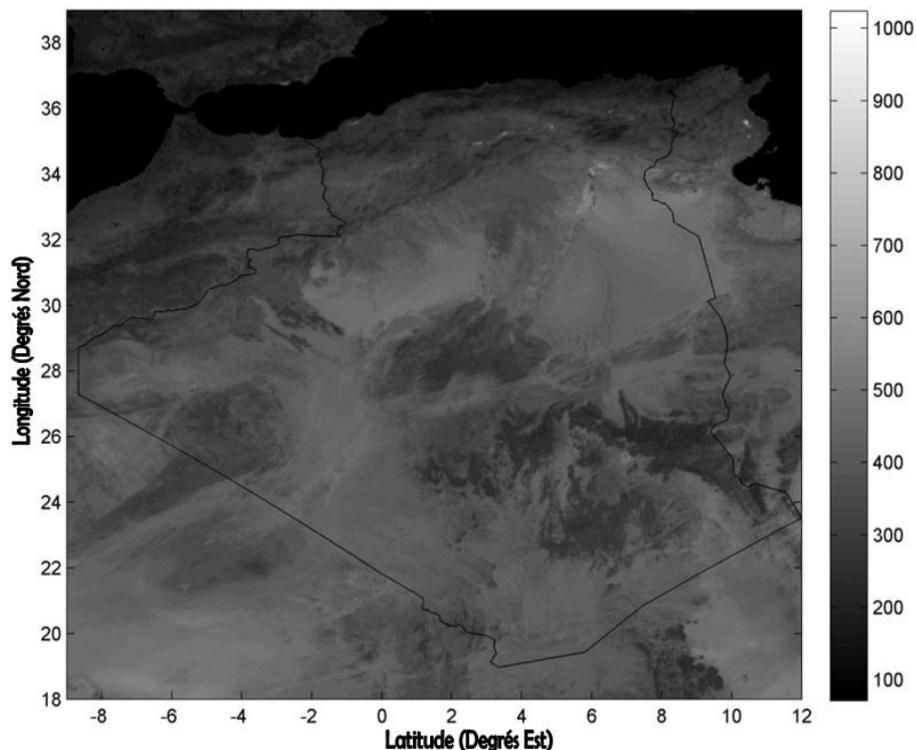


Figure. IV.3: Image ciel clair du MSG2/SEVIRI Canal Vis06 pour le mois de Juillet 2010.

IV.5.1.4. Radiation mesurée par satellite

La donnée radiométrique satellitale (Météosat) est une valeur numérique codée sur dix bits et sans dimension appelée compte numérique. Pour que cette donnée soit dans le même système d'unité, et puisse être utilisée dans l'équation de transfert radiatif, il faut qu'elle passe à une grandeur physique. Les équations précédentes permettent de calculer le coefficient de réflectance α_s , si les différentes quantités intervenant dans les équations précédentes sont connues.

Le radiomètre capte l'énergie E sous forme de compte numérique, qui est transformé en radiance à l'aide de l'équation II.6 décrite dans le chapitre II (cf. Chap. II.3.2a).

Pour un problème d'homogénéité des unités physiques des radiations théoriques et satellitaires utilisées dans le model radiatif, nous avons convertie la radiance satellitaire ($\text{mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}(\text{cm}^{-1})^{-1}$) donnée par la formule suivante [20] :

$$E = \frac{10\pi}{(\lambda_o)^2} E_s \Delta\lambda \quad (\text{IV-13})$$

Ou : λ_0 est la longueur d'onde central du canal HRV et $\Delta\lambda$ sa largeur de bande et égale à $0.88\mu\text{m}$. La valeur de l'irradiation solaire dans la formule (IV-2) est remplacée par la nouvelle valeur dans bande relative au canal HRV.

Les réflectance sont calculées par l'équation II.7 (cf. Chap. II.3.2b).

IV.5.1.5. Radiation atmosphérique E°

Le facteur E° , qu'on appelle bruit, représente la partie de la radiation diffusée vers l'extérieur de l'atmosphère par les molécules d'air et les aérosols qui se trouvent au-dessus des nuages, et qui peut être captée par le satellite. Le développement du modèle de transfert radiatif à ciel clair donne la relation suivante [21] :

$$E^\circ = \left(\frac{(1-F)}{F} D_{skc}(\theta_v) + \frac{(2F-1)}{F} D_r(\theta_v) \right) \text{Cos}(\theta_v) \quad (\text{IV-14})$$

Avec : $D_r(\theta_v)$ est la radiation diffuse de Rayleigh. Le calcul de $D_r(\theta_v)$ est possible si nous considérons l'atmosphère terrestre comme étant une atmosphère composée uniquement par les molécules d'air et en utilisant l'équation (2.10). Une telle atmosphère dite atmosphère de Rayleigh est caractérisée par une couleur bleue profonde (ciel limpide) ne se réalise qu'après une forte chute de pluie.

Du point de vue pratique, le facteur du trouble de l'atmosphère de Rayleigh est compris dans l'intervalle [1-2], par conséquent: $D_r(\theta_v) = D_{skc}(\theta_v, 1 < T < 2)$. Les données utilisées pour la réalisation de cette partie d'étude sont de natures différentes, des données au sol, et les données spatiales sont des images METEOSAT.

IV.5.1.6. Transmittance atmosphérique

La transmittance atmosphérique de la radiation directe dans la direction du capteur est représentée par le rapport de la radiation directe sur la radiation extraterrestre:

$$T(\theta_v) = \frac{I_{skc}(\theta_v)}{886(1+f)\text{Cos}(\theta_v)} \quad (\text{IV-15})$$

IV.5.2. L'information de l'indice d'ennuagement

L'indice d'ennuagement n_c est le paramètre clé de la plupart des méthodes d'estimation, Il représente l'atténuation du rayonnement du a la présence des nuages [24]. Cet indice résulte d'une comparaison entre ce qui est observé par le capteur à ce qui devrait être observé au-dessus de ce pixel si le ciel est clair. Il peut être s'exprimer comme:

$$n_c^t(i,j) = \frac{\rho^t(i,j) - \rho_s^t(i,j)}{\rho_{\text{nuage}}^t(i,j) - \rho_s^t(i,j)} \quad (\text{IV-16})$$

Avec: $\rho^t(i, j)$ représente le compte numérique du pixel (i, j) , au temps t (image HRV). $\rho_{ground}^t(i, j)$ et $\rho_{cloud}^t(i, j)$ compte numérique correspondant respectivement à un ciel clair et un autre complètement couvert dans une période fixée à un mois donné.

Concernant la technique d'extraction de l'indice d'ennuagement à partir des images METEOSAT, plusieurs travaux de recherches ont été effectués dans ce sujet [25,26]. En se basant sur la méthode décrite par A. Hammer [25], qui a été adaptée pour les données de METEOSAT 8 par R. Kuhlemann and A. Hammer [26], le compte normalisé pour les canaux Visible et le HRV est données par:

$$\rho = \frac{C - C_r}{\cos(\theta)} \quad (IV-17)$$

$$(HRV), C_r = 51$$

$$\rho_{max} = \max(650, \rho_{cloud}^t(i, j)) \quad (IV-18)$$

$$n_c^t(i, j) = \frac{\rho^t(i, j) - \rho_{ground}^t(i, j)}{\rho_{max} - \rho_{ground}^t(i, j)} \quad (IV-19)$$

IV.5.3. Estimation du Rayonnement global

Le rayonnement global au sol décroît sensiblement avec l'augmentation de la turbidité ou en présence d'une couverture nuageuse. Cette décroissance varie d'un type de nuage à un autre selon sa nature. En effet certains nuages tels que les cirrus sont plus transparent que d'autre, les cumulonimbus sont beaucoup plus opaque au rayonnement solaire.

a) Approche 1

La présence de nuages modifie sensiblement l'importance respective des rayonnements diffus et direct, les nuages jouant un rôle de milieu diffusant additionnel. Dans le cas d'un ciel couvert par les nuages, on propose d'utilisée une relation empirique proposé à l'origine par *Imamura et al.* [28], puis amélioré par *Gueymard et Brinsfield et al.*, [29,30] et qui ont utilisé un facteur de couverture nuageuse fonction de la nébulosité total du ciel. Ce dernier paramètre a été remplacé par l'indice d'ennuagement calculé précédemment. Le rayonnement global instantané par un ciel couvert est donné par l'équation :

$$G_c = I_{skc}[K(1 - N)] + D_{skc}[1.028 + 0.0195 \cdot N + 0.0095 \cdot N^2 - K(1 - N)] \quad (IV-20)$$

I_{skc} et D_{skc} représentent les rayonnements direct et diffus sur un plan horizontal par un ciel clair (cf. Chap. III.2.1a).

N représente l'enuagement qui a remplacé le taux de couverture nuageuse ou la nébulosité dans l'équation originale (cf. Chap. II.2.1f). le paramètre K est exprimé par la relation :

$$K = \frac{\sin(\varphi)}{C + \sin(\varphi)} + \frac{(P-1)}{(1-Y)} \quad (\text{IV-21})$$

Où C est le ratio de la radiation diffuse sur la radiation directe à ciel clair, P le coefficient de clarté du ciel et Y un polynôme de deuxième ordre en fonction de la latitude de lieu :

$$Y = 0.309 - 0.137 \cdot \sin(\varphi) + 0.394 \cdot \sin^2(\varphi) \quad (\text{IV-22})$$

b) Approche 2

L'albédo des nuages varie, typiquement de 0,4 à 0,9 selon leur nature, leur épaisseur, la hauteur du soleil, etc. Les nuages absorbent en outre une fraction du rayonnement solaire, mais celle-ci reste assez faible et ne dépasse pas 10 % de l'énergie incidente pour les nuages les plus épais [31].

Un modèle en décroissance exponentielle du rayonnement à ciel clair en fonction de l'enuagement et l'albédo du nuage est une bonne approximation pour l'estimation du rayonnement global. Nous proposons donc le modèle suivant:

$$G_n = G_{skc} e^{-2.5 \alpha_n n_c} \quad (\text{IV-1})$$

Où: α_n est l'albédo de nuage et n_c est l'enuagement.

G_{skc} représente le rayonnement global sur un plan horizontal par un ciel clair (cf. Chap. III.2.1a). la valeur 2,5 est ajusté sur la base des estimations des irradiances horaire, qui correspondent à des simulations réalisées à 12TU, couvrant une période d'environ quatre mois.

IV.6. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.6.1. Albédo de surface :

Dans la figure V.4. nous présentons la moyenne annuelle de l'albédo de surface sous forme de carte, représentant la variabilité spatiale de ce paramètre. En l'examinant, on peut constater que la partie Tellienne est caractérisée par des valeurs faibles d'albédo, qui est dû à la présence des sols avec un couvert végétal dense. Le désert est caractérisé par des surfaces hautes qui correspondent à des forts albédos. De l'Ouest Algérien jusqu'à l'Est Marocain, le haut plateau est large à l'Ouest et rétrécit en direction Nord-Est. Cette représentation montre qu'il y a une analogie entre la carte d'albédo et la carte topographique (cf. [Figure V.1](#)).

Le suivi temporel de l'albédo nous a permis de réaliser une cartographie mensuelle, en utilisant ces résultats, nous avons sélectionné trois zones géographiques représentant différentes sortes de sols et états de surface. Les trois zones sur lesquelles nous faisons l'analyse sont la Zone forestière, c'est-à-dire la zone au niveau de El-Kala, la Zone montagneuse, qui correspond à la partie ouest de l'Atlas marocain, et la zone désertique, qui se trouve à la limite de la ville d'Adrar. Ces zones sont notées: Zone 1; Zone II et Zone III. La variabilité spatiotemporelle de l'albédo de surface est présentée dans les figures [V.6](#), [V.7](#) et [V.8](#), et les courbes de la [Figure V.5](#) représente la variation de l'albédo mensuel des trois points représentant chaque zone.

L'analyse des différentes valeurs de l'albédo montre que la zone 1 présente des faibles valeurs d'albédo durant l'hiver et augmente pour les mois d'été. La végétation absorbe fortement le rayonnement solaire, le développement de cette végétation entraîne une très nette diminution de l'albédo des surfaces naturelles, et l'augmentation est due à une diminution de la surface occupée par la végétation.

L'albédo de la zone 2 est minimum du mois de mai jusqu'au mois d'octobre. Les maximums sont enregistrés durant les mois hivernaux. Cette augmentation est engendrée par la présence de neige dans toutes les hauteurs, elle varie d'un pixel à un autre suivant le taux de recouvrement ainsi que le niveau de fraîcheur de ce dernier. L'albédo commence à diminuer avec la disparition de cette couverture neigeuse.

Concernant la zone 3, où le désert est souvent occupé par le sable fin, est caractérisé par un l'albédo stable durant l'année.

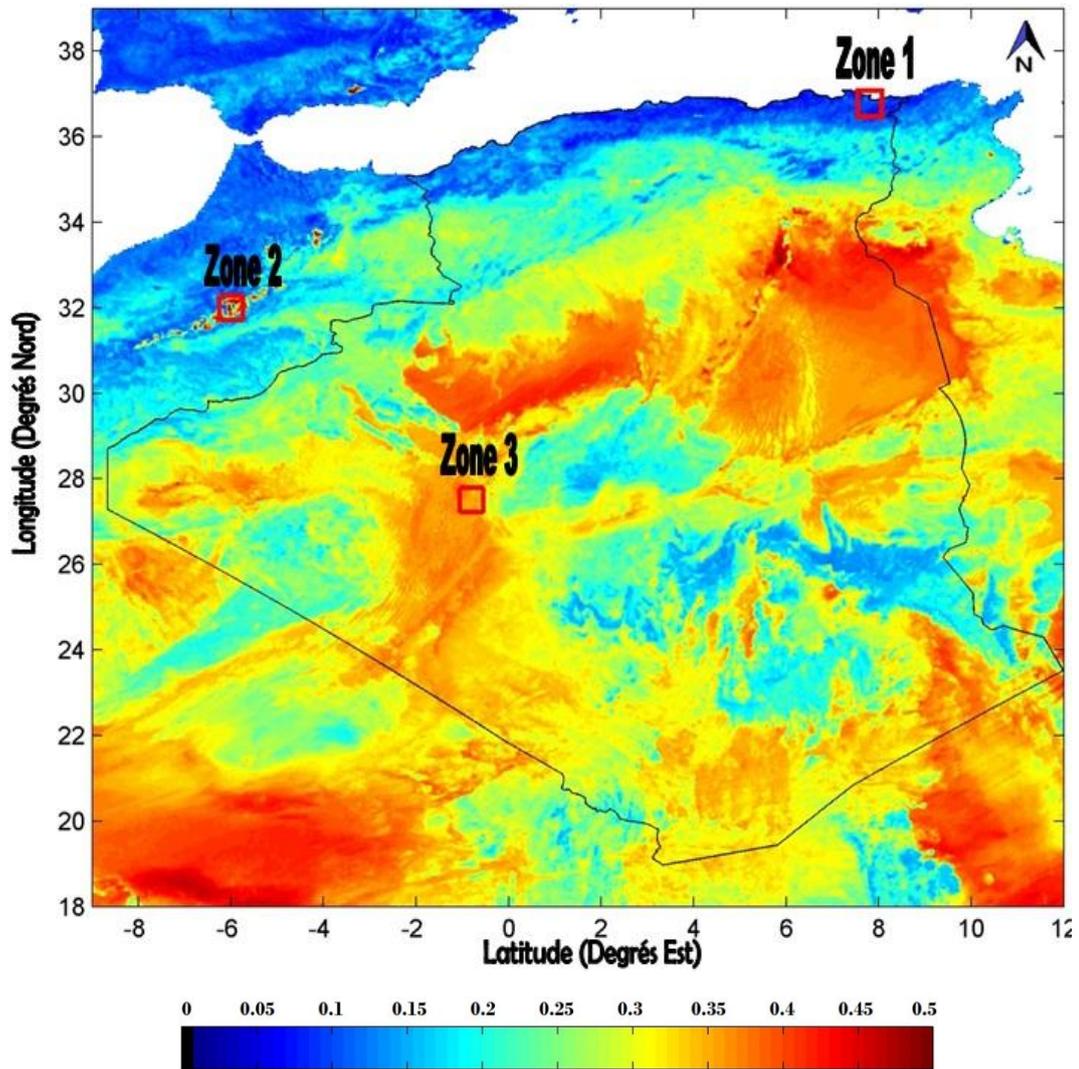


Figure. IV.4: Carte de la moyenne annuelle de l'albédo de surface (2010).

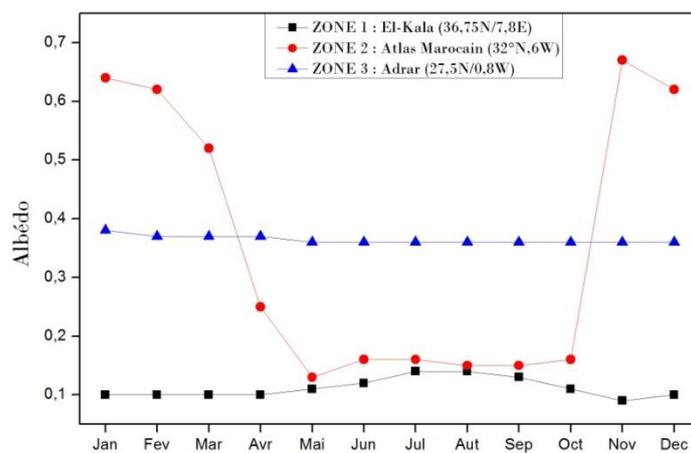


Figure. IV.5: Valeurs mensuelles de l'albédo de surface (2010).

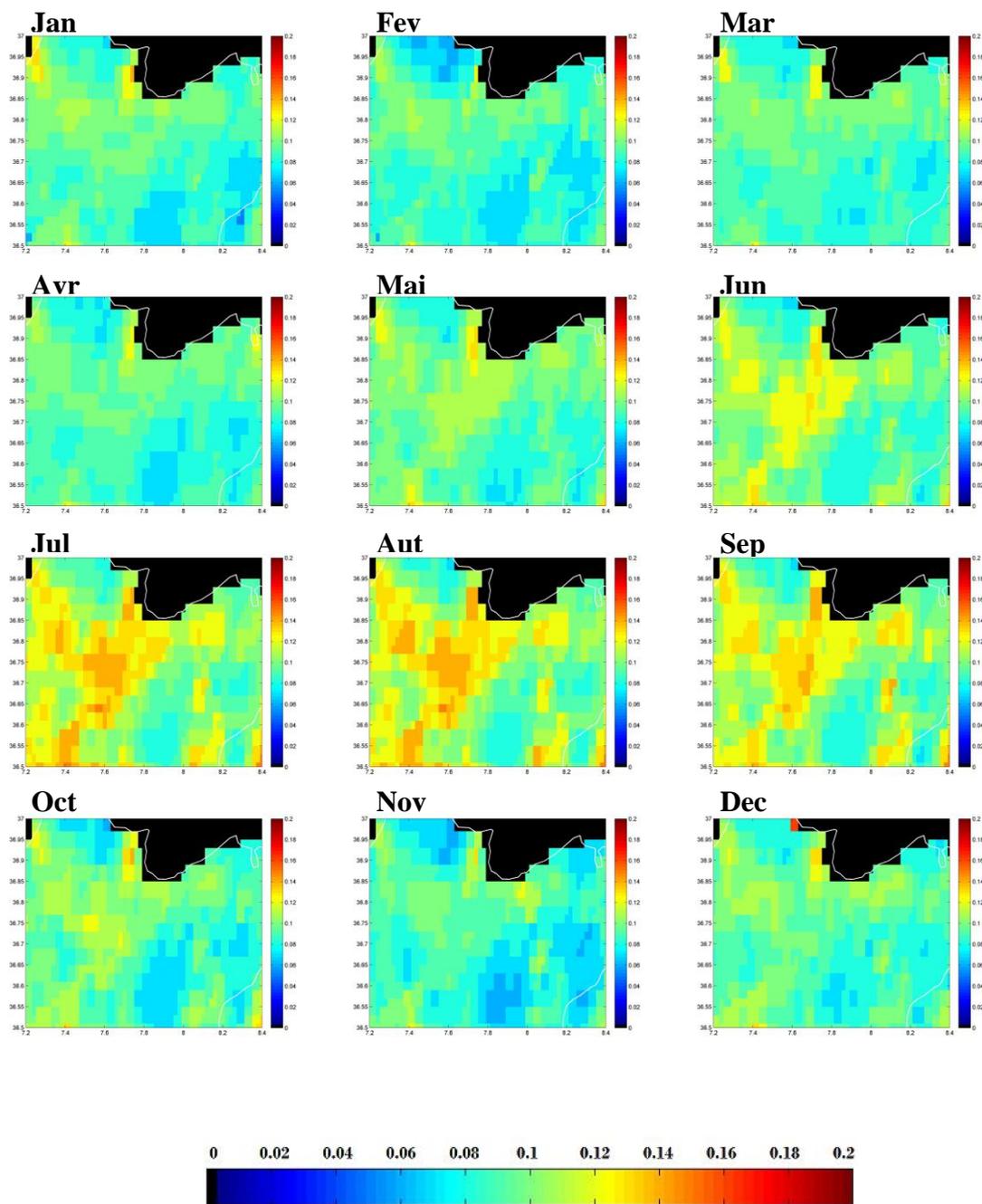


Figure. IV.6: Variation spatiotemporelle de l'albédo de surface année 2010, Zone 1.

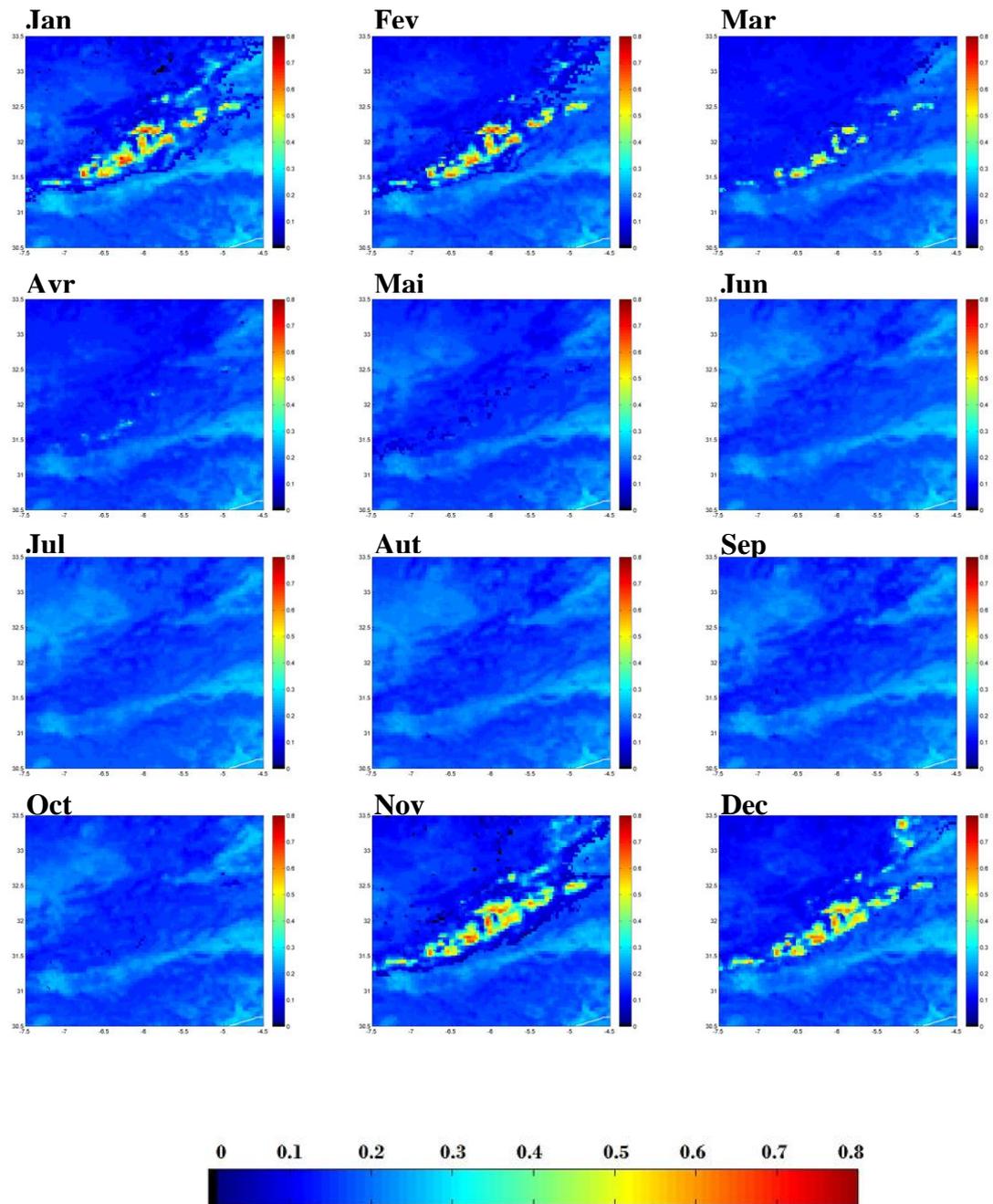


Figure. IV.7: Variation spatiotemporelle de l'albédo de surface année 2010, Zone 2.

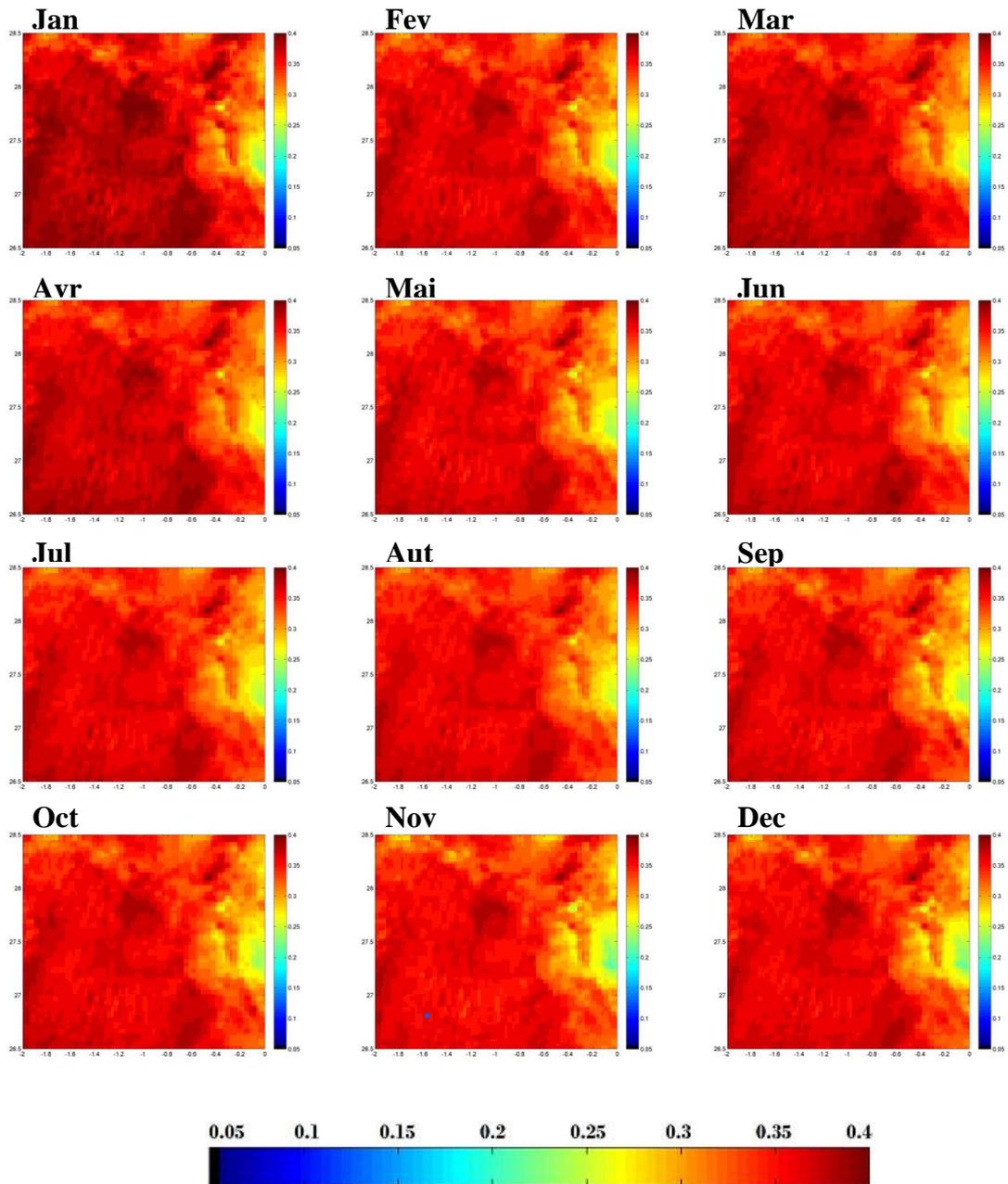


Figure. IV.8: Variation spatiotemporelle de l'albédo de surface année 2010, Zone 3.

IV.6.2. Rayonnement global

Nous avons appliqué les différentes méthodes de calcul aux données du canal HRV pour l'années 2010. Les valeurs de l'éclairement à chaque quart-heure ont été moyennées sur 3x3 pixels représentant une surface au sol de l'ordre de 3 km x 3. Le calcul de l'irradiation horaire se fait par intégration numérique de ces éclairements sur un pas de temps d'une heure, puisque l'irradiation journalière est obtenue en sommant les valeurs horaires. L'intégration numérique est réalisée par la méthode des *trapèzes*. Les irradiances sont comparées aux mesures effectuées par les pyranomètres de cinq stations.

L'évaluation est réalisée par comparaison avec les mesures au sol. Des simulations réalisées par les deux approches d'estimation du rayonnement global à partir de l'indice d'enneigement d'un point de vue statistique, nous avons évalué les estimations réalisées pour 12 mois de l'année 2010, à travers les scores les plus utilisés pour l'évaluation des modèles d'estimation, [28], ils sont décrits dans l'Annexe D: le coefficient de corrélation, l'erreur moyenne (MBE : Mean Bias Error) et l'Erreur quadratique moyenne (RMSE : Root Mean Square Error).

IV.6.2.1. Irradiation horaire

Dans cette partie sont comparées les estimations des irradiances réalisées par les deux modèles, sur une base horaire. Les figures IV.9 à IV.14 correspondent aux résultats obtenus des estimations, elles décrivent respectivement les nuages de points formés des couples des irradiances estimées et mesurées. Pour chaque figure, on donne l'équation de la droite de régression, R, MBE et RMSE.

Les résultats sont combinés pour les deux sites du Nord (Sites 1 et 2), et ceux des deux sites du Sud (Site 3 et 5).

Comme le montre les figures IV.9, IV.10 et IV.11, pour la 1^{ière} approche les dispersions des nuages de points sont assez fortes autour des droites de régression, avec un coefficient qui dépasse 0,95. Le modèle surestime les irradiances de l'ensemble de régions. Les valeurs de MBE varient de 0,07 à 1,13%, avec un minimum enregistré à la région sud (~0,07%), du fait de la compensation de surestimations des irradiances du site d'Adrar par des sous-estimations enregistrées à In-Amenas (Tableau IV.3).

Comme présenté dans le tableau IV.3, pour les sites de la région Sud, le RMSE relative se situe entre 11 à 15% cependant en ce qui concerne les stations du Nord, le modèle présente des valeurs du RMSE qui dépassent les 17%.

Les Figures IV.12, IV.13 et IV.14 représentent les nuages de points des irradiances horaires estimées par la deuxième approche, et celles mesurées, ceci pour les cinq sites. On peut constater sur la figure que la deuxième approche donne une dispersion moins importante des points en comparaison avec les résultats de la 1^{ière} approche.

Les MBE relative varient entre 0,2 et 1,39%. Le RMSE relative varie de 12 à 15% pour les régions Sud, tandis qu'il dépasse les 19% pour le Nord du pays (Tableau IV.3).

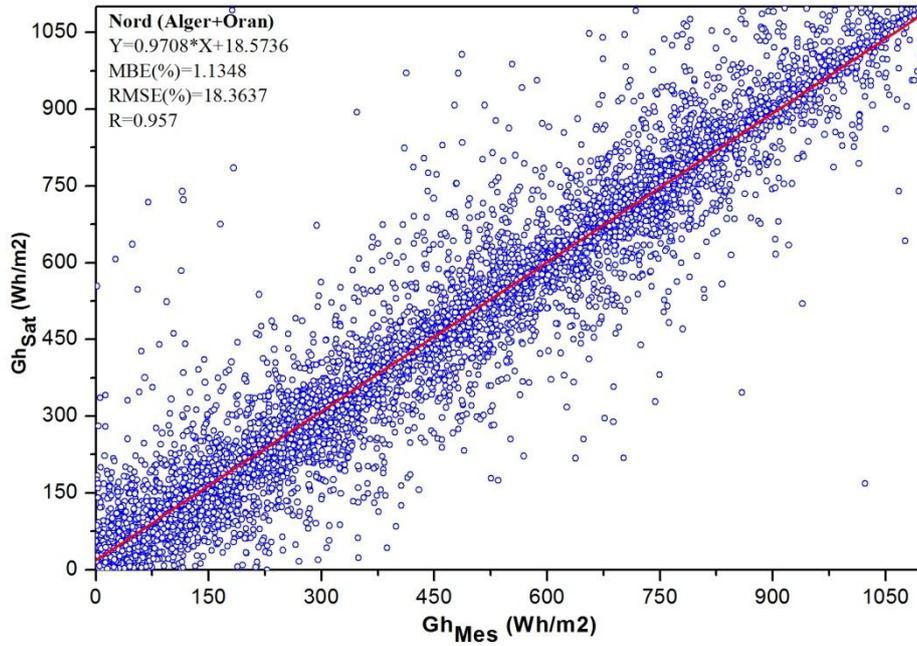


Figure. IV.9: Graphique de dispersion des résultats de la 1^{ière} Approche pour les Stations NORD (DAR-EL-BEIBA et ORAN-SENIA).

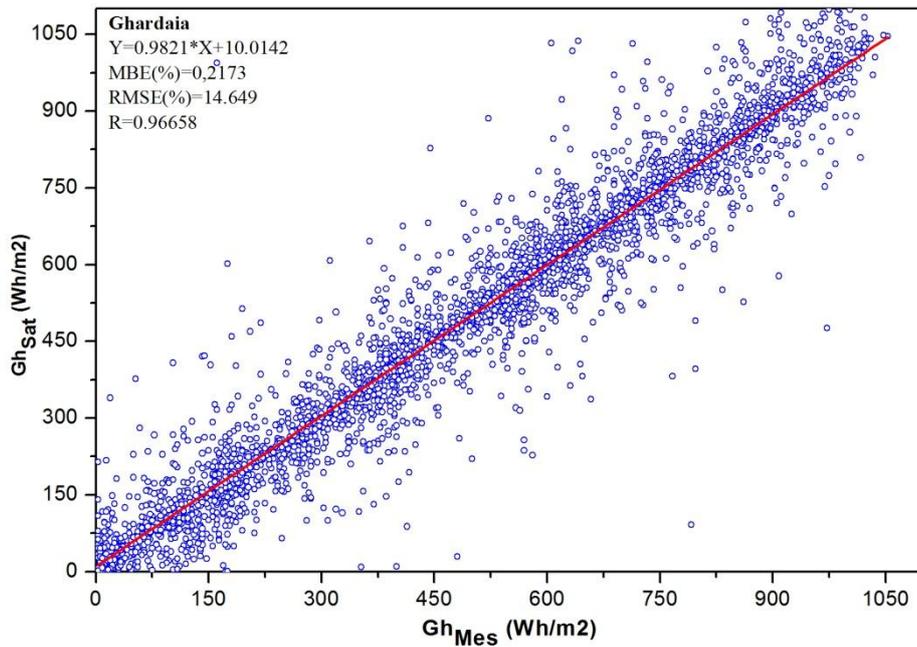


Figure. IV.10: Même légende que Figure IV.9, Station de GHARDAIA.

Tableau. IV.4: Scores statistiques annuels des irradiances horaires, modèle 1 et 2

Station	Modèle	MBE(%)	RMSE(%)	R
1	(1)	1,21	19,05	0,951
	(2)	1.71	21.28	0.946
2	(1)	1,06	17,7	0,961
	(2)	1.11	19.15	0.958
3	(1)	0,22	14,65	0,967
	(2)	0.66	14.15	0.972
4	(1)	0,3	13,7	0,969
	(2)	0.69	15.08	0.968
5	(1)	-0,2	11,72	0,976
	(2)	-0.36	12.65	0.977
Tous	(1)	0,5	15,34	0,966
	(2)	0,76	16,46	0,964

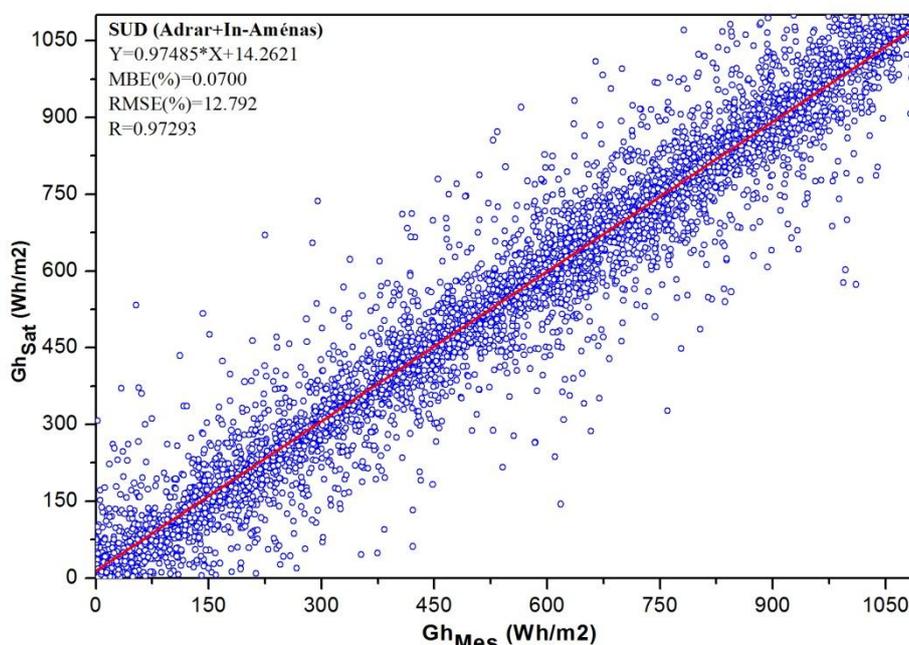


Figure. IV.11: Même légende que Figure IV.9, Stations SUD (ADRAR et IN-AMENAS.).

Pendant cette même période, on a calculé la variation saisonnière et la distribution des scores statistiques (MBE, RMSE et R) pour chaque station. Les résultats sont présentés dans les figures IV.15 et IV.16. D'une manière générale, la variation saisonnière de l'erreur MBE relative des deux approches diffère d'un site à un autre, avec un mélange de valeurs positives et négatives, en indiquant respectivement, surestimation et sous-estimation du modèle. La valeur absolue du MBE varie entre 0.1 et 6% pour la 1^{ière} approche, tandis qu'elle se situe entre 0.1 et ~4.3% pour la 2^{ième} approche.

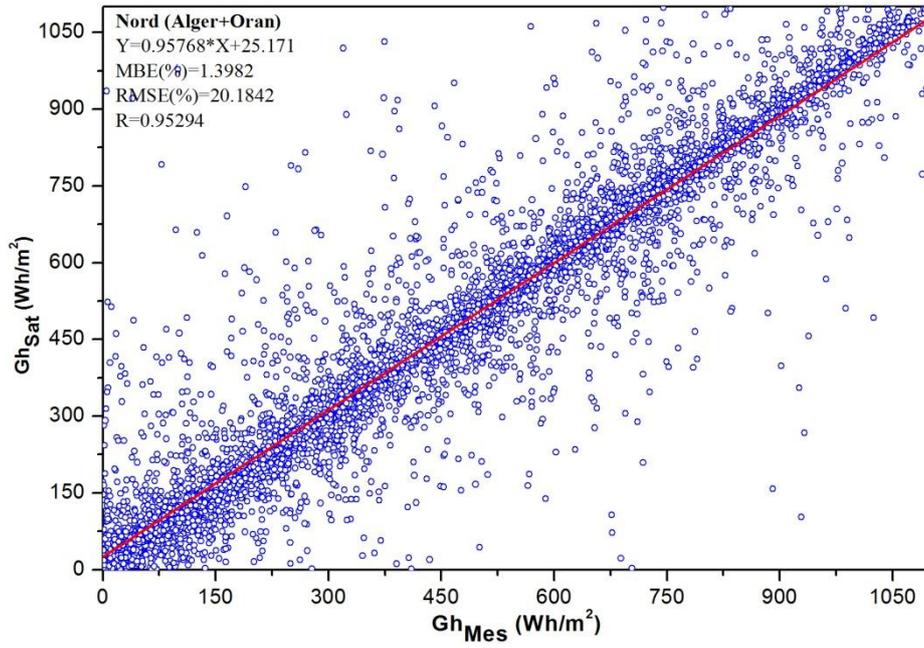


Figure. IV.12: Graphique de dispersion des résultats de la 2^{ème} Approche pour les Stations NORD (DAR-EL-BEIBA et ORAN-SENIA).

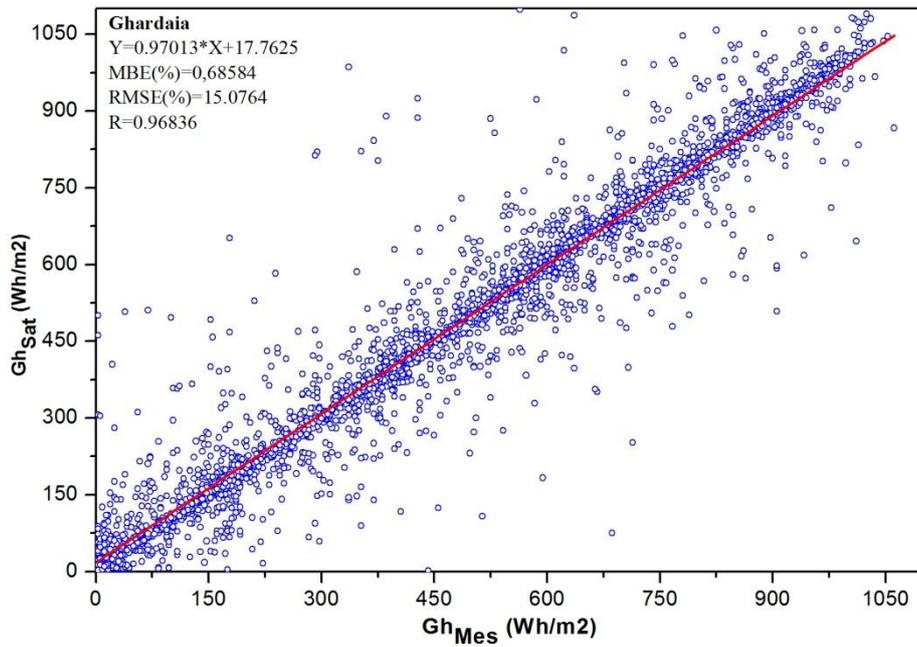


Figure. IV.13: Même légende que Figure IV.12, Stations de GHARDAIA.

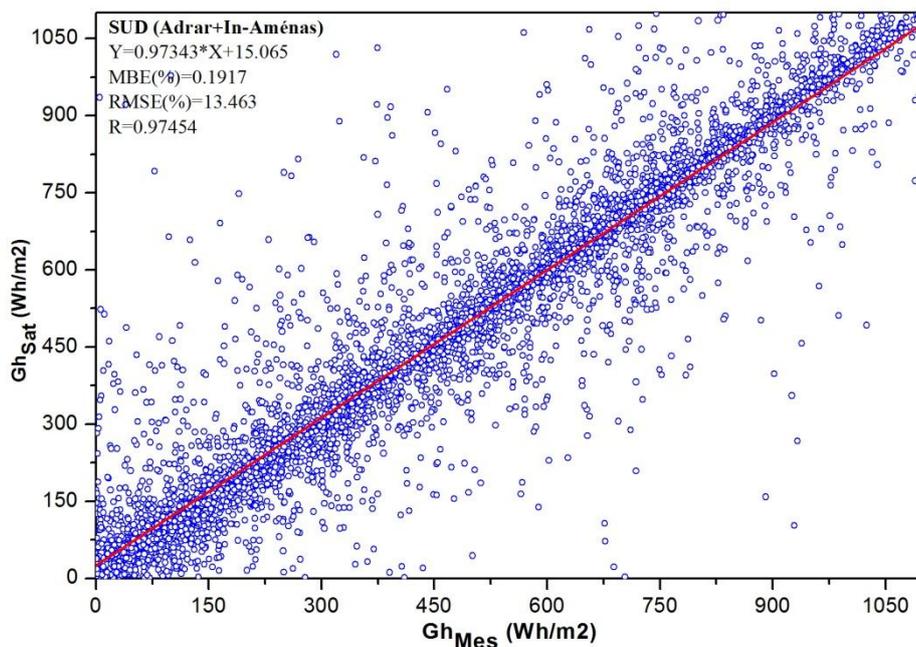


Figure. IV.14: Même légende que Figure IV.12, Stations SUD (sites 3 et 5).

Les résultats de la 1^{ière} approche donnent un MBE positive durant toute l'année pour le site de 1. Le même résultat est obtenu par la 2^{ième} approche pour les deux sites 1 et le site 3, de plus, les valeurs de MBE sont positives pour tous les sites durant la saison automne.

Au printemps et en été, les deux modèles reproduisent mieux les irradiances horaires avec des RMSE plus petite pour presque toutes les stations, on observe un maximum entre 20 et 22% pour le site 1. Au cours de cette période, le climat est le plus stable de l'année; le ciel est généralement clair et irradiances solaires dérivées des données satellitaires sont similaires aux mesures au sol. Par contre,

Durant l'hiver et l'automne le RMSE est relative plus grande, avec un climat marqué par des fréquents passages nuageux plus marquée dans les sites du Nord, sauf pour le site 5 où le RMSE reste inférieur à 14 %. Cela est confirmé par les coefficients de corrélation.

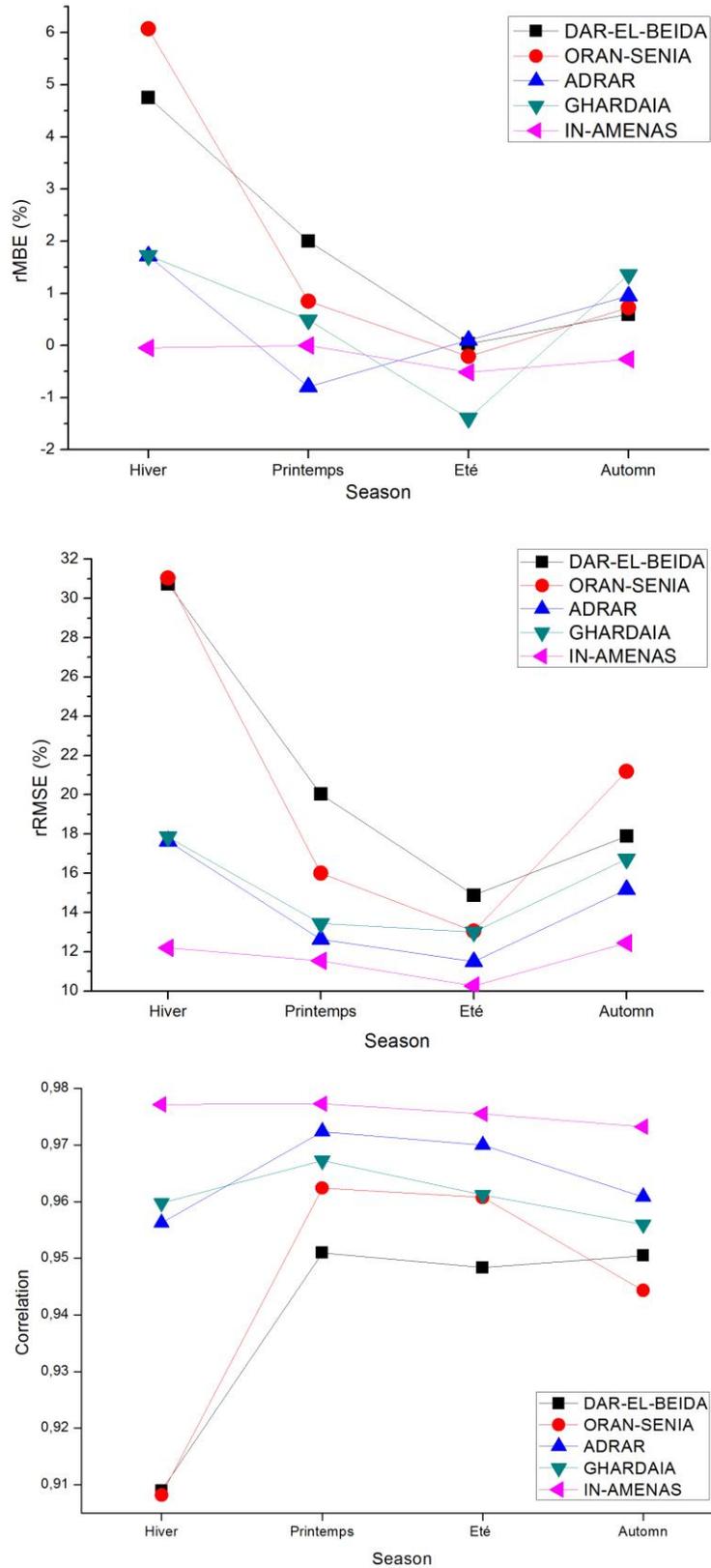


Figure. IV.15: Résultats d'évaluation saisonnière Approche 1.

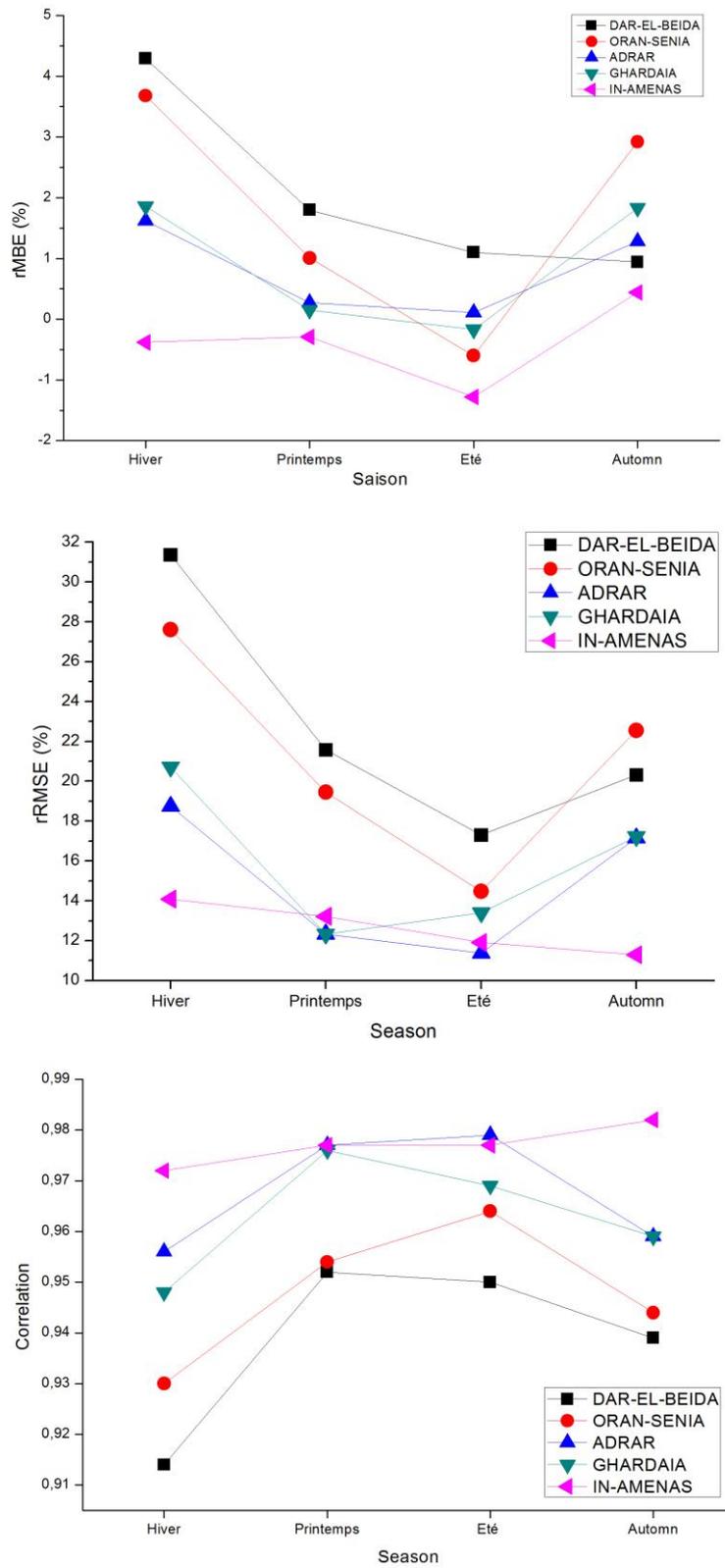


Figure. IV.16: Résultats d'évaluation saisonnière Approche 2.

IV.6.2.2. Irradiation journalière

Nous cherchons dans les paragraphes suivants à évaluer les résultats d'estimation des irradiances quotidiennes du rayonnement global horizontal. Nous reprenons les mêmes calculs qui ont été faits précédemment.

Les résultats statistiques sont présentés dans le [tableau IV.5](#).

Comme indiqué dans le tableau IV.5, le 1^{er} modèle surestime les valeurs quotidiennes avec MBE entre 0,1 et ~1,4% pour la plupart des stations, sauf pour IN-AMENAS, le modèle sous-estime les irradiances avec le MBE de 0.17%. Les valeurs RMSE varient entre 4 à 8%. Le coefficient de corrélation entre les valeurs mesurées et celle estimées est important pour tous les sites, il est supérieur à 0.98.

Pour le 2^{ème} modèle, les résultats sont similaires à ceux obtenus par la 1^{ère} approche. Avec un MBE relative variant entre 0,6 et 1,5% pour la plupart des stations, sauf pour IN-AMENAS, le modèle sous-estime les irradiances avec le MBE de 0.63%. Les valeurs RMSE varient entre 4 à 12%. Les corrélations entre les valeurs observées et celle estimées sont élevées et supérieures à 0.98.

Tableau 5: Scores statistiques annuels des résultats d'estimation des irradiances quotidiennes.

Station	Modèle	MBE(%)	RMSE(%)	R
1	(1)	1,37	7,88	0,984
	(2)	1.50	11.89	0.989
2	(1)	1,2	7,6	0,987
	(2)	0.67	10.28	0.993
3	(1)	0,1	4,95	0,989
	(2)	0.67	4.70	0.989
4	(1)	0,31	4,26	0,991
	(2)	0.64	4.98	0.994
5	(1)	-0,17	4,57	0,986
	(2)	-0.63	4.64	0.987
Tous	(1)	0,64	5,7	0,989
	(2)	0.58	7.67	0.966

Cette étude de performance montre que :

L'application de la 1^{ère} méthode offre une bonne performance par rapport à la seconde qu'elle soit pour les irradiances horaires ou quotidiennes.

Les meilleurs résultats sont obtenus sur les sites 3 et 5 (Adrar et In-Amenas).

Les deux modèles reproduisent mieux les irradiances horaires au printemps et en été,

Dans le cadre de ce travail, nous comparons la performance de ces deux modèles à celles présentés dans la littérature. Les résultats obtenus à partir des estimations des irradiances solaires globales horaires et journalières sont très encourageants et prometteurs par rapport à la littérature existante [32-39]. Par exemple, en termes de l'erreur quadratique moyenne relative, elle varie entre 11 % et 33% sur une base horaire, et entre 4% et 12% sur une base quotidienne (Tableau IV.3).

Tableau. IV.6: Tableau récapitulatif des résultats des différentes méthodes utilise les images METEOSAT.

Méthode	Res.Temp.	RMSE(%)	R	Référence
Heliosat 1	HR	14%-30%	-	Rigollier et al. (2004)
	JR	9%-16%	-	(Europe 1983-2003)
Heliosat 2	HR	18%-45%	0.83-0.90	Rigollier et al. (2004)
	HR	18%-45%	0.83-0.90	(Europe 1995)
	JR	10%-20%	0.94-0.95	Moradi et al. , (2009)
Heliosat 3	HR	17%-46%	0.86-0.98	Beyer et al. (2009)
		-	0.90-0.98	(Europe 1995)
Solemi (MESoR)	HR	-	0.91-0.98	P. Ineichen, May 2009
	JR	-	0.98-0.99	(Europe 2006)
GISTEL SICIC	HR	7%-23%	0,88-0,97	Beyer et al. (2009)
	JR	9%-30%	0,81-0,94	(Europe 1996-2000)
GISTEL	JR	-	0,96	Mefti et al. (2008)
GISTEL	HR	-	0,77	Algeria (1994-1995)
	JR	-	0,96	Chaabane et al. (2002)
				(Tunisia, 1995)
GISTEL	HR	-	0,77	Meziani et al. (2013)
	JR	-	0,96	(Algeria, 2011)

HR : Horaire ; JR : Journalière.

IV.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode pour la détermination de l'albédo de surface à partir d'images satellitaire dans le domaine visibles. Elle est basée sur des solutions approximatives de l'équation du transfert radiatif des images satellitaires. L'application de ce modèle a permis de réaliser une cartographie mensuelle de la répartition spatiale de l'albédo de surface. Une analyse spatiotemporelle des cartes établies montre que l'albédo est fortement lié à l'état du sol, et que le développement de la végétation influe sur les variations saisonnières de l'albédo des surfaces naturelles. Aussi la présence de neige entraîne une augmentation de l'albédo, et qui dépend du taux de recouvrement ainsi que du niveau de fraîcheur de la neige. Cette représentation montre aussi qu'il y a une analogie entre la carte d'albédo et la carte topographique.

Dans le présent chapitre nous avons exposé les résultats de l'évaluation de deux méthodes d'estimation du rayonnement global horizontal à partir des images HRV du satellite MSG2. Les études menées ont permis de déterminer l'erreur générées pour les estimations horaires et quotidiennes.

La qualité des résultats d'estimation en générale, traduisant une bonne cohérence avec les mesures. De même, les droites de régression ajustent bien les observations, exprimant ainsi une corrélation élevée entre les irradiances mesurées et celles estimées à partir des données HRV.

L'analyse des résultats statistique, nous à permet aussi de mettre en évidence l'erreur dû aux modèle qui sont peut être due aux traitements des pixels nuageux dans le calcul des indice d'ennuagement, et qui sont accentué par le fait d'intégrer l'albédo de nuage dans le 2^{ième} modèle, aussi les valeurs estimée de l'albédo du sol peut donc être une cause d'erreur pour les deux modèle.

Cette investigation scientifique et technique a passé en revue les principaux travaux de recherches nationaux et internationaux se rapportant à l'évaluation du gisement énergétique solaire à partir des images satellitaire. Elle a permis de tirer un certain nombre de renseignements et recommandations susceptibles d'améliorer la banque de données radiométriques, pour des fins de dimensionnement ou d'optimisation des systèmes solaires.

IV.8. REFERENCES :

- [1]. [Bouchouicha K.](#), Razagui A., Bachari N.I. & Aoun N., (2016): " Estimation of Hourly Global Solar Radiation Using MSG-HRV images", International Journal of Applied Environmental Sciences, ISSN 0973-6077, Volume 11, Number 2 (2016), pp. 351-368.
- [2]. [Bouchouicha K.](#), Razagui A., Bachari N.I. and Aoun N., (2016),"Hourly global solar radiation estimation from MSG-SEVIRI images-case study: Algeria", World Journal of Engineering, [ISSN 1708-5284], Vol. 13 Iss 3 pp. 266 – 274.
- [3]. [Francois Cabot](#), (1995). Estimation de l'Albédo de surface à l'échelle globale, à l'aide de mesures satellitaires, Thèse de doctorat d'état.
- [4]. [C. Cano](#), J.M. Monget, M. Albuissou, H. Guillard, N. Regas, L. Wald (1986): A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. Solar Energy 37, 31-39.
- [5]. [Müller](#), R. W., Dagestad, K. F., Ineichen, P., Schroedter, M., Cros, S., Dumortier, D., Kuhlemann, R., Olseth, J. A., Piernavieja, C., Reise, C., Wald, L. and Heinemann, D. (2004): Rethinking satellite based solar irradiance modeling - The SOLIS clear sky module. Remote Sensing of the Environment 91 160 – 174.
- [6]. [Chen](#), T., and [Ohring](#), T., (1984). On the relationship between clear sky planetary and surface albedos. J. Atmos, 41.
- [7]. [Matthews](#), and [Rossow](#), (1986). Regional and seasonal variation of surface reflectance from satellite observation at 0.6 μm . J.A. tmos.sci.26.
- [8]. [Stephane](#), P.E., and [Mvestracte](#), M., and [Meyer](#), D.J., (1993). Inverting a bidirectional effects AVHRR data 6th AVHRR data user's meeting Beligrate, 29th june-2nd July.
- [9]. [Mekler](#), Y., and [Joseph](#), J., (1984). Direct determination of surface albedos from satellite imagery, J.Climate, 22.
- [10]. [Stum](#), P., [Pinty](#), B., and [Ramon](#), D., (1985). A new technique for inferring surface albedo from satellite observation. J. Atmos.Sci.24.
- [11]. [Raschke](#), R., [Preuss](#), H.J., (1979). The determination of the solar radiation budget at the earth surface from satellite measurements. Meteorol. Rundsch. 32, 18
- [12]. [Gautier](#) C., [G. Diak](#), and [S. Masse.](#), (1980) : A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. J. Appl. Meteor., 19, 1005–1012.
- [13]. [Schillings](#), C., [Mannstein](#), H., [Meyer](#), R., (2004a). Operational method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data. Sol. Energy 76, 475–484
- [14]. [Trapely](#), J.D., (1979). Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. J. Appl. Meteorol. 18, 1172–1181.
- [15]. [Fontoyont](#), M., [Dumortier](#), D., [Heinemann](#), D., [Hammer](#), A., [Olseth](#), J.A., [Skartveit](#), A., [Ineichen](#), P., [Reise](#), C., [Page](#), J., [Roche](#), J., [Beyer](#), H., [Wald](#), L., (1998). Satel-Light: a www server which provides high quality daylight and solar radiation data for western and central Europe. In: Proceedings of the 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography in Paris, 25–28 May 1998, pp. 434–437.
- [16]. [D.G.E](#) : (2001): Direction Générale de l'Environnement : Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques, Projet national ALG/98/G31, (2001)

- [17]. Diabaté L., Remund J., Wald L., (2003): Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa, *Solar Energy*, 75, pp. 111-119.
- [18]. Schumann, W., Stark, H., McMullan, K., Aminou, D., and Luhmann, H-J., (2002). The MSG System., European Space Agency (ESA) bulletin, ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands, bulletin 111, august 2002: 11-14 (Home Page at : www.esa.int)
- [19]. Deneke, H. M., and R. A. Roebeling (2010), Downscaling of meteosat seviri 0.6 and 0.8 channel radiances utilizing the high-resolution visible channel, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(20), 9761–9772, doi:10.5194/acp-10-9761-2010.
- [20]. Razagui A., (2013). Développement d'une méthodologie pour l'exploitation des images MSG pour le suivi des paramètres physiques du sol et la prévision météorologique., [Ph.D. Dissertation], Université des sciences et technologie d'Oran, Oran ; 1999.
- [21]. Bachari, N. I., (1999). Méthodologie d'analyse des Données Satellitaires en utilisant des Données Multi-Sources. [Ph.D. Dissertation], Université des sciences et technologie d'Oran, Oran ; 1999.
- [22]. Bachari N.I., Razagui A., (2003). Development of a methodology for determining and mapping of thermal radiation from the ground. In: proceedings of the 11th International Thermal Conference (11th JITH), Algiers-Algeria, June 21-23, 2003
- [23]. Briegleb, B. and Ramanathan, V., (1982)., Spectral and diurnal variation in clear sky planetary albedo .J. App.Meteor, 21.
- [24]. Cano, D., Monget, J.M., Albuissou, M., Guillard, H., Michaud-Regas, N., and Wald L., (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37(1):31-39.
- [25]. Hammer, A., (2000). Anwendungsspezifische Solarstrahlungs informationen aus Meteosat-Daten. PhD Thesis, University of Oldenburg- Germany.
- [26]. Dagestad, K., (2005). Estimating global radiation at ground level from satellite images DOCTOR SCIENTIARUM THESIS IN METEOROLOGY, UNIVERSITY OF BERGEN, MAY 2005.
- [27]. Kuhlemann, R., and Hammer, A., (2005). Sunsat : the new program for processing high resolution data of Meteosat-8, Energy-Specific Solar Radiation Data from Meteosat Second Generation (MSG). The Heliosat-3 Project; 2005.
- [28]. Imamura M.S, Hulstrom R.L., Cookson C., Waldman B.H., Lane R.A., (1976). Definition study for photovoltaic residential prototype system. *Martin Marietta Corp Report*.
- [29]. Brinsfield, R., Yaramanoglu, M., Wheaton, F., (1984) : Ground level Solar Radiation prediction model including cloud cover effects., *Solar Energy*, Vol.33,No.6, pp.493-499.1984
- [30]. Gueymard, C. (1986) "POTSOL: Model to predict extraterrestrial and clear sky solar radiation" and "Ground level solar radiation prediction model including cloud cover effects • . 37 (4), 319-321.
- [31]. Bessemoulin P. et Olivieri J., (2000) .Le Rayonnement Solaire et sa Composante Ultraviolette, *Physique Atmosphérique , La Météorologie*, 8^{ème} Série, N°31, Septembre 2000.
- [32]. Rigollier, C., Lefèvre, M. and Wald, L., (2004). The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77(2): 159-169.

- [33]. [Moradi, I.](#), Mueller, R., Alijani, B., and Kamali, G.A., (2009). Evaluation of the Heliosat-II method using daily irradiation data for four stations in Iran. *Solar Energy*, 83: 150-156
- [34]. [Beyer H.G.](#) , Polo Martinez J., Suri M., Torres J.L. , Lorenz E., Müller S.C., Hoyer-Klick C. and Ineichen, P., (2009). D1.1.3 “Report on Benchmarking of Radiation Products”. Report under contract no. 038665 of MESoR; 2009.
- [35]. [Chaabane, M.](#), and Ben Djemaa, A., (2002). Use of HR Meteosat images for the mapping of global solar irradiation in Tunisia: preliminary results and comparison with Wefax images. *Renewable Energy*, 25: 139–151.
- [36]. [Mefti, A.](#), Adane, A., and Bouroubi, M.Y., (2008). Satellite approach based on cloud cover classification: Estimation of hourly global solar radiation from Meteosat images *Energy Conversion and Management*, 49: 652-659.
- [37]. [Ineichen, P.](#), (2011). Five satellite products deriving beam and global irradiance validation on data from 23 ground stations. [Ph.D. Dissertation] ; University of Geneva 2011.
- [38]. [Haurant, P.](#), Muselli, M., Pillot, B., and Oberti, P., (2012). Disaggregation of satellite derived irradiance maps: Evaluation of the process and application to Corsica., *Solar Energy*, 86:3168–3182
- [39]. [Meziani, F.](#), Boulifa, M., and Ameer, Z., (2013). Determination of the global solar irradiation by MSG- SEVIRI images processing in Algeria *Energy Procedia*, 36 :525-534



CARTOGRAPHIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

1. INTRODUCTION

A travers l'objectif recherché et le domaine choisit, l'approfondissement de la connaissance de la variation spatiale et temporelle du rayonnement solaire atteignant le sol, s'impose comme élément primordial dans toute étude stratégique concernant le domaine. Ainsi, de nombreux travaux ont été réalisés dans ce sens ces dernières décennies, et plusieurs bases de données radiométriques ont été développées pour faciliter l'accès à ce genre d'information, ces bases diffèrent selon le type de données, la zone géographique couverte, la période de mesure et la résolution spatiale et temporelle. Deux catégories de bases de données sont développées, les données issues d'un réseau de stations de mesure au sol, et celles basées sur le traitement des images satellitaires. Les données issues des satellites sont les plus appropriées à notre étude, ils sont considérés comme source fiable pour caractériser la variabilité spatio-temporelle du rayonnement solaire [1]. Ils ont été intégrés à travers des services web, tels que la base de données de la NASA-SSE (National Agency Service of America) [2] créée par Atmospheric Science Data Center, celle du programme SoDa [3] créée par Mines ParisTech avec des données de quelques sites seulement, ainsi que d'autres comme celle du projet Solar-Med-Atlas [4] et celle de SolarGIS [5]. On trouve parmi ces bases de données celles qui sont commerciales, d'autres sont librement disponibles pour la communauté scientifique [6], comme celles du service proposé par la NASA, connues sous le nom de Surface meteorology and Solar Energy (SSE), qui fournit des données d'irradiation sous forme de séries de données et de valeurs moyennes d'une période de 22 ans allant de 1983 à 2005, ces données sont représentées sur une grille géographique régulière (Latitudes, Longitude), possédant une résolution de 1° et recouvrant tous le globe terrestre. [7,8]. Le programme NASA-SSE ne fournissant que la moyenne des paramètres du rayonnement sur une maille de 100 km de côté et par conséquent, leur précision n'est pas aussi fiable. C'est pour cette raison qu'il est préférable de procéder à une interpolation spatiale afin de reproduire d'une manière plus fine ces paramètres.

L'idée générale est l'application d'une technique d'interpolation spatiale aux données provenant de la base de données NASA-SSE, La procédure de calcul inclue également une désagrégation de la résolution (Downscaling) de ces données à la résolution du modèle numérique de terrain (MNT), intégrant les effets dus aux

altitudes, l'approche utilisé est celle développé par Wahab *et al.*, [9]. Au final, une cartographie à haute résolution du le potentiel solaire est élaborée [10]. L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre a été réalisé à l'aide du logiciel Matlab®.

2. DOMAINE D'ETUDE

L'Algérie est située au centre du continent Nord-Africain, avec une superficie de 2.381.741 km², près de 1200 Km de côte sur la mer Méditerranée, elle est bordée à l'Est par la Tunisie, au Sud-Est par la Libye, au Sud par le Niger et le Mali, au Sud-Ouest par la Mauritanie et à l'Ouest par le Sahara Occidental et le Maroc (Figure V.1).

Le relief algérien se compose de deux principales chaînes montagneuses : l'Atlas tellien et l'Atlas saharien : ce sont deux ensembles parallèles qui parcourent le pays d'Ouest en Est, elles se rapprochent au centre du pays jusqu'à presque se confondre vers l'extrême Est à la frontière de la Tunisie. Ces deux chaînes constituent des frontières naturelles entre lesquelles s'intercalent de vastes plaines et hauts plateaux [11].

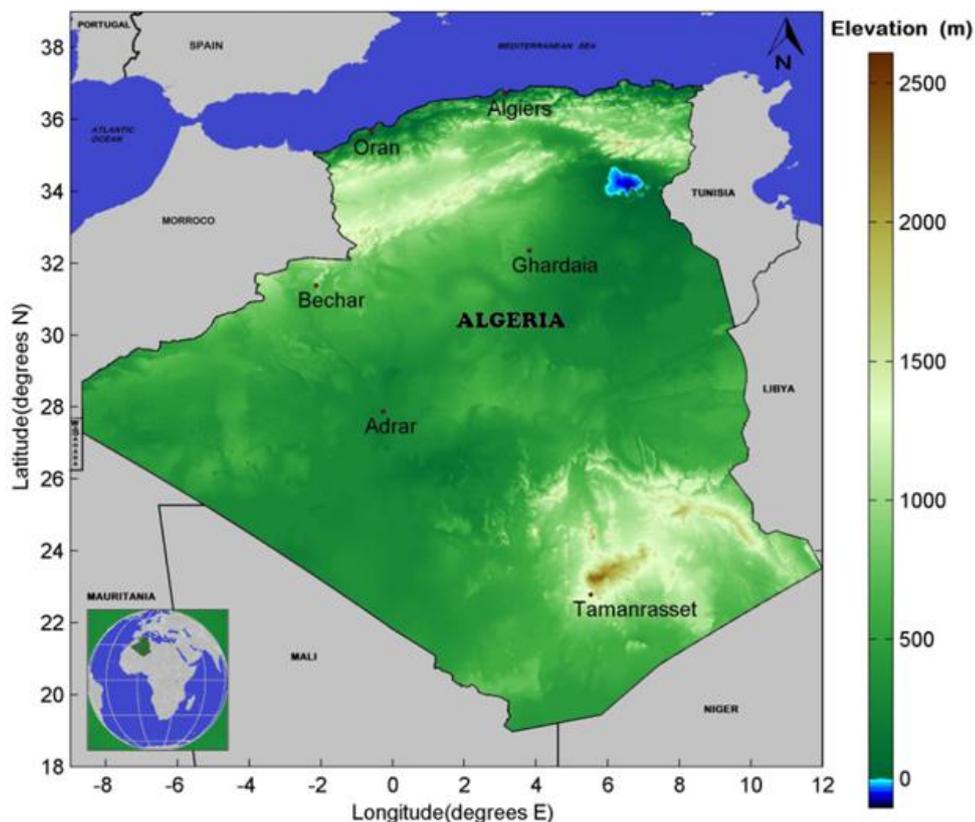


Figure V.1: Carte d'élévation et localisation des stations de mesure utilisées (GTOPO USGS, Projection cylindrique équidistante, WGS84).

L'Algérie possède un gisement solaire non négligeable, elle est classée parmi les zones privilégiées pour les applications des systèmes solaires. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2500 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national. Le tableau suivant montre le potentiel solaire dans les différentes zones de l'Algérie [12].

Tableau V.1: Potentiel solaires dans les différentes régions de l'Algérie

région	côtière	Hauts plateaux	Sahara
Surface (%)	4	10	86
Surface (km²)	95,27	238,174	2,048, 297
Durée d'insolation moyenne (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne (kW h/m²/an)	1700	1900	2650

3. DONNEES

Dans ce qui suit, nous présentons les différents types de données qui ont été utilisée pour réaliser cette étude, comme les données NASA-SSE, celles du modèle MNT et les mesures au sol :

a) Mesure du rayonnement au sol

Les moyennes mensuelles des irradiations journalière de six station représentant les différentes régions de notre pays ont été utilisées (cf. [Tableau V.2](#)) [13-15]. La variation des moyennes mensuelles de ces stations est représentée dans la [figure V.2](#).

Tableau V.2: Coordonnées géographiques des stations.

N°	Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Elévation (m)
1	Alger	36.68	3.22	25
2	Oran	35.63	-0.6	90
3	Bechar	31.38	-2.15	806
4	Ghardaïa	32.4	3.81	450
5	Adrar	27.88	-0.28	269
6	Tamanrasset	22.78	5.52	1378

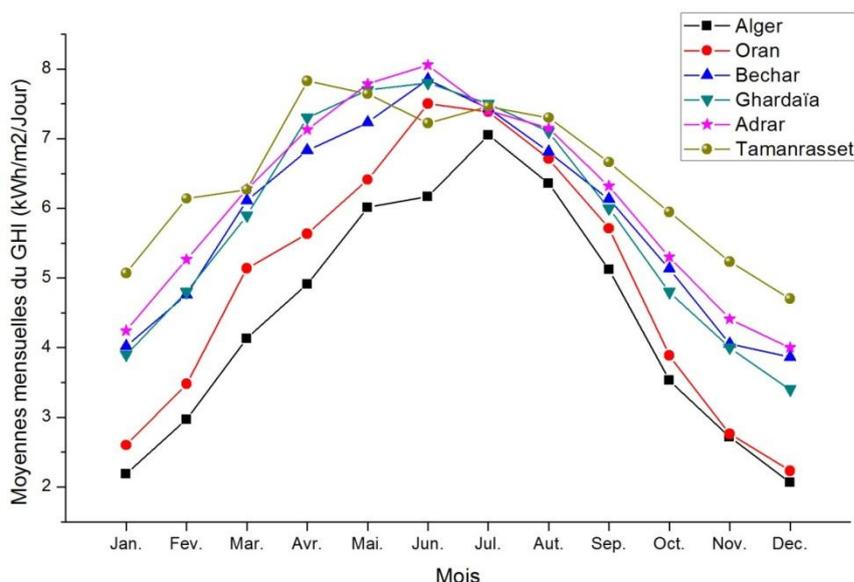


Figure V.2: Les moyennes mensuelles des irradiations journalières.

b) Les données NASA-SSE

La NASA à travers ses programmes de recherches en sciences de la terre a depuis longtemps dominé les activités intégrant les systèmes satellitaires, fournissant des données importantes pour les études liées aux phénomènes météorologiques et climatiques. Ces programmes donnent accès aux archives de plus de 200 bases de données et des paramètres dérivés des images satellitaires tels que les données météorologiques et celles du rayonnement solaire.

Les produits du programme SSE développés par le centre de la NASA sont basés sur l'intégration de sources de données différentes dont diverses observations satellitaires et des mesures au sol de plusieurs paramètres. Elles possèdent une résolution temporelle journalière et mensuelle. Sur le plan de la résolution spatiale, ces images sont représentées sur une grille géographique régulière (Latitudes, Longitude), possédant une résolution de 1° et recouvrant tous le globe terrestre. Elles couvrent désormais, les données quotidiennes du rayonnement global incident sur une surface horizontale pour la période 1983-2005. Or, dans cette étude, on ne considère en effet que des données moyennes mensuelles. [16-17]

Les produits de la NASA-SSE peuvent déterminer les caractéristiques climatiques et permettent une estimation du potentiel des ressources énergétiques renouvelables avec une précision moins bonne que celle des mesures sur site. Mais, ils restent le seul moyen là où les mesures de surface sont rares ou inexistantes [18,19].

Ces produits ont été testés et validés dans différentes régions du monde, par des données provenant des stations faisant partie de plusieurs réseaux internationaux tels que le réseau de référence global pour la mesure du rayonnement à la surface de la terre (BSRN : Baseline Surface Radiation Network), celui du Laboratoire national sur les énergies renouvelables (NREL : National Renewable Energy Laboratory) et du Laboratoire Canadien de recherches de diversification d'énergie (CEDRL : Canada's Energy Diversification Research Laboratory). L'analyse des résultats pour les valeurs moyennes mensuelles de l'irradiation produite par NASA-SSE sur l'ensemble de la période considérée de 1985 à 2005, par rapport aux mesures de BSRN, donne une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 10,25 % et un biais moyen de - 0,01% [7,8].

c) **Modèle numérique de terrain SRTM**

Le modèle numérique de terrain a été exploité afin de modéliser les effets de l'altitude sur moyenne mensuelles des irradiances journalière globale horizontale. Ce modèle a été en partie créé par U.S.G.S (Geological Survey's) et les données relatives sont dérivées de l'ensemble de données de la GTOPO30 (Global TOPOgraphic data sets 30 arc-seconds) avec une résolution de 30 secondes d'arc (0.00833° environ 1 km). L'ensemble de ces données est accessible sur le site internet du programme U.S.G.S pour l'information spatiale [20]. Dans cette base de données, chaque point est repéré par sa position géographique (latitude et longitude) et une valeur correspond à l'altitude du lieu [21].

4. METHODOLOGIE

Nous présenterons dans ce chapitre les étapes de calcul pour la réalisation d'une cartographie des moyennes mensuelles des irradiances globales (GHI) en se basant sur des données issue de la base NASA-SSE [2], une analyse géographique a été menés sur la base de ces résultats.

Cette section présente la méthodologie employée pour réaliser une désagrégation de la résolution spatiale des données de l'irradiation moyenne mensuelle. Les données en point de grille de la NASA avec une résolution 1° latitude x longitude recouvrant toute la zone d'étude ont été préparées, nous avons d'abord augmenté la résolution de ces données utilisant méthode d'interpolation spatiale, pour avoir une nouvelle résolution de $0.00833^\circ \times 0.00833^\circ$ (environ 1 km^2), puis un traitement des données pixel par pixel, tenant compte la variabilité spatiale de la topographie, sur la base du modèle

numérique du terrain. Au final, une cartographie de la distribution spatiale des moyennes mensuelles et annuelle des irradiances globales horizontales (GHI) ont été établies. Les différentes étapes du processus de post-traitement des données, de calculs et de la cartographie spatiale ont été réalisées via des programmes informatiques appropriés en MATLAB® [22-23].

Les trois étapes suivantes sont réalisées :

1. Prétraitement des données
2. Interpolation spatiale
3. Correction d'altitude.

4.1. Prétraitement des données

Dans le présent travail, les données relatives au rayonnement solaire obtenues de la base NASA-SSE ont été traitées et préparées dans la même zone, La [figure V.3](#) correspond à la répartition spatiale de la moyenne annuelle de l'irradiation journalière résultant de ce traitement de la base de données NASA-SSE avec une résolution 100x100 km sur une période de 22 ans (1983-2005).

Prenant comme les données d'une grille régulière d'une résolution spatiale de $0,00833^\circ \times 0,00833^\circ$ (approximativement 1 km) couvrant le domaine d'étude et qui ont été extraites de la base de données du modèle numérique d'élévation de terrain du GTOPO30, présentant les valeurs moyennes d'élévation. La projection sur cette même grille et pour chaque point repéré par sa latitude/longitude, des données des moyennes mensuelles du rayonnement global horizontal hors atmosphère ont été calculées et utilisés dans la suite de cette étude (*cf.* [Chap. I.3.2](#)).

4.2. Interpolation spatiale

Les coordonnées de latitude et de longitude du MNT sont utilisées pour extrapoler et cartographier les données d'irradiation. Nous faisons appel donc à ce stade à une méthode d'interpolation très connue qui est le modèle des « Splines cubiques », cette tâche a été réalisée en se servant de la fonction « interp2 » de MATLAB®. Au final, les données de rayonnement couvrant une grille régulière de 1 km de résolution ont été générées.

4.3. Correction d'altitude.

Du fait que les valeurs de l'irradiation sont fortement liées à l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire (cf. [Chap. I.4.2.a](#)), il sera donc important de tenir compte de l'effet dû à l'altitude. Dans ce contexte, une méthodologie de correction de rayonnement solaire dû à l'altitude du site a été implémentée, utilisant les données de la grille MNT, en prenant en compte la différence d'altitude entre les points de grille de résolution différente. Sachant que la donnée d'un pixel MNT représente l'altitude moyenne sur une grille de 30 secondes d'arc (1x1 km²), par contre celle de la base NASA-SSE a une altitude moyenne sur une maille de 100x100 km. Nous donnons l'exemple de quelque site dans le [Tableau V.3](#).

Dans le présent document, l'approche utilisé est celle développé par Wahab *et al.*, [9] pour la correction dû à des irradiances mensuelles appliqué pour quelques site en Afrique du Nord. Elle a été améliorée pour la correction des irradiances horaires, en tenant compte de l'ombrage topographique. Utilisation de cette approche a permis d'identifier des zones favorables aux installations solaires dans de nombreuses régions à travers le monde, qui n'ont pas été connue auparavant [24-27].

Selon Wahab *et al.*, [9], l'irradiation horizontale globale d'un point localisée géographiquement par sa latitude et sa longitude, qui a comme altitude la valeur z données à partir du modèle numérique de terrain GTOPO30, est exprimée par :

$$G_h(z) = G_0 e^{(-\tau(z))} \quad (V.1)$$

G_0 représente la moyenne mensuelle du rayonnement global horizontal hors atmosphère (cf. [Chap. I.3.2](#)).

$\tau(z)$ caractérise l'épaisseur optique de la couche atmosphérique

$$\tau(z) = \tau(z_0) \beta^{(z_0-z)} \quad (V.2)$$

z_0 est l'altitude moyenne de 1 degrés Latitude/longitude, z_0 et z sont exprimées en kilomètre, et $\beta = 1.20$ avec

$$\tau(z_0) = -\ln \left(\frac{G_h(z_0)}{G_0} \right) \quad (V.3)$$

Tableau V.3: Altitudes de différentes sources de données.

Station	Altitude (Mètres)		
	Mesuré	Moyenné sur 1° Lat/Lon	GEOtopo DEM sur 1 km
1	25	423	48
2	99	440	75
3	806	558	712
4	450	18	445
5	269	213	275
6	1378	968	1317

5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Deux catégories de résultats sont discutées dans cette section :

- Evaluation statistique de cette méthode par rapport aux mesures au sol.
- Répartition spatial à travers une cartographie des moyennes mensuelles et annuelle des irradiances globales journalières sur le plan horizontal.

a) Validation par des mesures au sol-

Afin de valider les résultats du modèle de désagrégation, il est nécessaire d'avoir accès aux données de mesurées au sol. Une analyse comparative est effectuée sur les moyennes mensuelles des irradiances globales (GHI) issues des produit d'origine de la NASA-SSE, et celles corrigés par rapport aux mesures de cinq stations caractérisées par des conditions climatiques très différentes de notre pays (Figure V.1).

Pour évaluer les simulations réalisées d'un point de vue statistique, nous avons calculé les scores statistiques décrits dans l'Annexe D, à savoir le coefficient de corrélation (R), le biais et l'erreur quadratique moyenne (MBE, RMSE) [28].

Le tableau V.4 présente les résultats statistiques des estimations mensuelles pour chaque site. Comme l'on peut déduire de ce tableau, les résultats de la méthode de désagrégation présente un MBE relative variant de 4 % à 15,5 %, avec une diminution considérable par rapport à celles des données NASA-SSE original. Le RMSE varie entre 7,5 % et 16,5 %. En ce qui concerne les coefficients de corrélation, il n'y a pas de différences significatives.

Cette précision est comparable à celle des bases de données à haute résolution [29-31]. Il a été considéré aussi, que cette méthode fournit des résultats plus précis que celles obtenues en utilisant des meilleurs modèles empiriques proposées pour l'Algérie, et qui ont été fondées sur des mesures météorologiques (durée d'ensoleillement, la couverture nuageuse et la température de l'air) [32-34].

Tableau V.4: comparaison des résultats statistiques des données sans (a) et avec correction (b).

Station	Modèle	MBE	RMSE	R
1	(a)	16.94	18.56	0.982
	(b)	15.57	16.57	0.989
2	(a)	-8.33	9.07	0.994
	(b)	-5.07	6.25	0.993
3	(a)	-7.53	13.82	0.988
	(b)	-5.46	12.77	0.989
4	(a)	-8.54	11.46	0.995
	(b)	-4.3	9.15	0.994
5	(a)	-12.07	12.66	0.984
	(b)	-10.68	12.29	0.987
6	(a)	-8.11	8.74	0.969
	(b)	-6.7	7.59	0.966

b) La distribution spatiale du rayonnement solaire

Après l'évaluation statistique des résultats, la méthode a été généralisée pour l'ensemble des données, dans le but de générer des cartes mensuelles et annuelle des irradiations journalières moyennes, ces données représentent des estimations satellitaires NASA-SSE corrigées pour une période de 22 ans (entre 1983 et 2005).

Les différentes étapes de calcul ont été appliquées aux données représentant plus de 2 millions de point (pixels) couvrant tout le territoire national. Un ensemble de programmes MATLAB® a été développé et basé sur la manipulation des données, le traitement d'image et la cartographie spatiale [22,23]. Les résultats de l'irradiation journalière moyenne sur un plan horizontal obtenus sous forme de cartes mensuelles et annuelle sont représentés dans Figures V.4 et V.6.

- *Moyenne annuelle de l'irradiation journalière*

La figure V.3 correspond à la répartition spatiale de de la moyenne annuelle de l'irradiation journalière résultat du traitement de la base de données NASA-SSE avec une résolution 100x100 km et couvrant une période de 22 ans (1983-2005).

Nous avons d'abord augmenté la résolution de ces cartes originales pour parvenir à une résolution de 1 km² en appliquant une méthode d'interpolation spatiale (Voir Figure V.4.a), suivi d'une correction du rayonnement en altitude (Figure V.4.b). Comme l'on peut déduire de cette figure, que la différence des deux cartes représente un maximum dans les régions montagneuses. Les caractéristiques orographiques sont plus apparentes dans la deuxième carte.

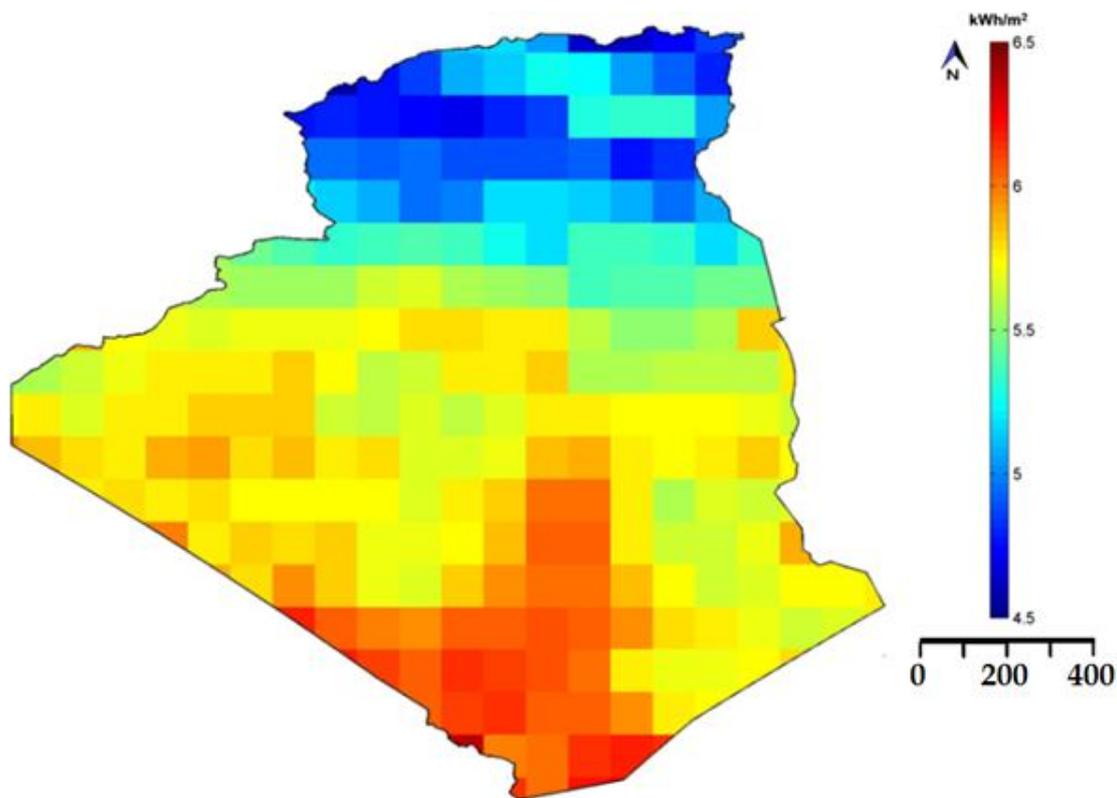


Figure V.3: moyennes annuelles des irradiances journalières
(NASA-SSE résolution 1.0°x1.0°).

Afin d'établir une classification spatiale de la moyenne mensuelle des irradiances journalières, cinq classes ont été retenues (Figure V.5), commençant par la valeur la plus petites enregistrés dans la zone côtière (~4.6 kWh/m²-Day), jusqu'à la valeur maximale enregistrés dans la région Sud (~6.9 kWh/m²-Day).

A partir de ces cartes, chaque point (pixel) de l'image est repéré par sa latitude et sa longitude, il représente une superficie d'environ 1km x 1km. L'ensemble de ces points sont classées suivant leurs valeurs de la moyenne annuelle de l'irradiation globale. La figure V.5 représente le potentiel solaire en pourcentage des différentes classes.

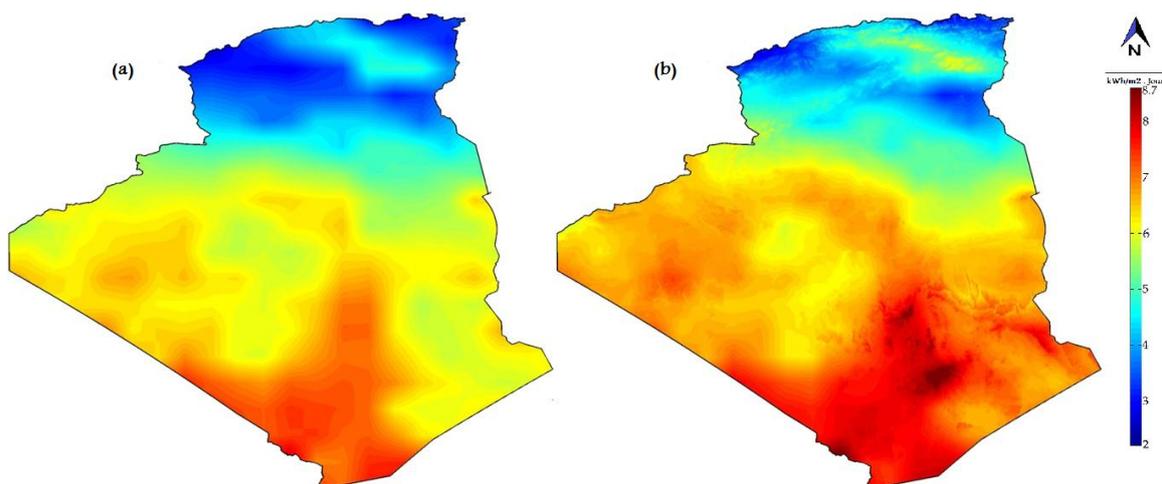


Figure V.4: moyennes annuelles des irradiances journalières interpolées sans correction (a) et avec correction (b) (résolution 1 x1 km).

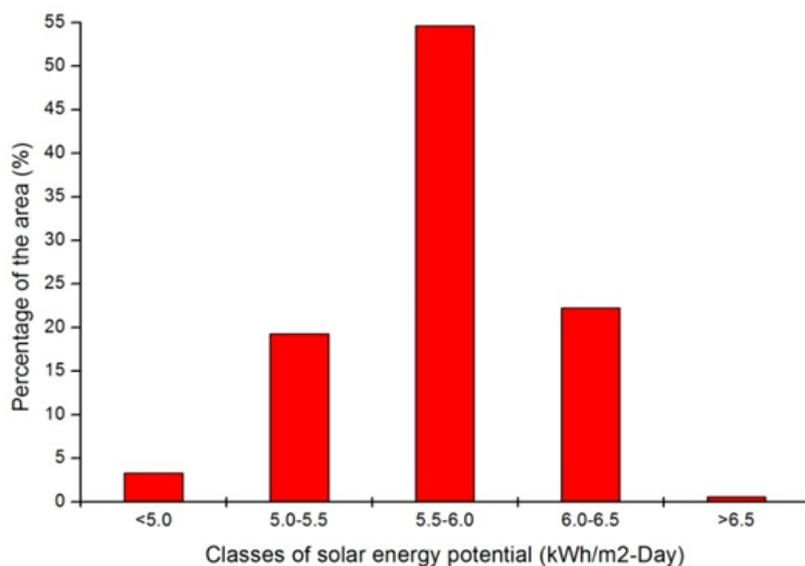


Figure V.5: le pourcentage de différentes classes du potentiel solaire.

À partir des résultats, nous constatons que la classification nous donne plus de 54 % de la surface totale du pays soit l'équivalent d'environ 1 118 183 km² est réceptrice de 5,5 à 6,0 kWh/m²-jour de l'énergie solaire. Dans la deuxième tranche nous avons les 22,25% de cette surface, l'équivalent de, 455 711 km² qui reçoivent entre 6,0 à 6,5 kWh/m²-jour. Concernant la troisième classe qui couvre les 394 792 km² (19,27%) de la surface, les irradiances varient entre 5,0 à 5,5 kWh/m²-jour. Dans les deux autres catégories du potentiel solaire, 67 795 km² (3,31 %) et 11 815 km² (0,58 %) sont respectivement caractérisées par les valeurs les plus faible ($G_h < 5$ kWh/m²-jour) et les plus élevée ($G_h > 6,5$ kWh/m²-jour).

- *Moyenne annuelle de l'irradiation journalière*

La [figure V.6](#) représente les cartes des moyennes mensuelles de l'irradiation journalière de chaque mois. Chaque carte représente la distribution spatiale du paramètre d'une résolution de 1x1 km². Le [tableau V.4](#) regroupe les différentes grandeurs statistiques extraites de ces cartes (Moyennes et écart-type).

Tableau V.5: Grandeurs statistiques des moyennes mensuelles de l'irradiation journalière.

Période	Global irradiation (kWh/m ² Day)		
	Rang	Moyenne	Std
Janvier	2,35-4,81	3,72	0,58
Février	3,25-4,94	4,79	0,58
Mars	4,39-7,18	5,90	0,53
Avril	5,48-8,01	6,92	0,42
Mai	6,25-8,60	7,38	0,33
Jun	6,82-8,71	7,66	0,28
Juillet	6,99-8,63	7,69	0,31
Aout	6,09-8,16	7,06	0,36
Septembre	4,90-7,39	6,05	0,40
Octobre	3,51-7,17	4,84	0,53
Novembre	2,51-5,14	3,85	0,58
Décembre	2,04-4,44	3,36	0,58
Annuelle	4,63-6,89	5,77	0,36

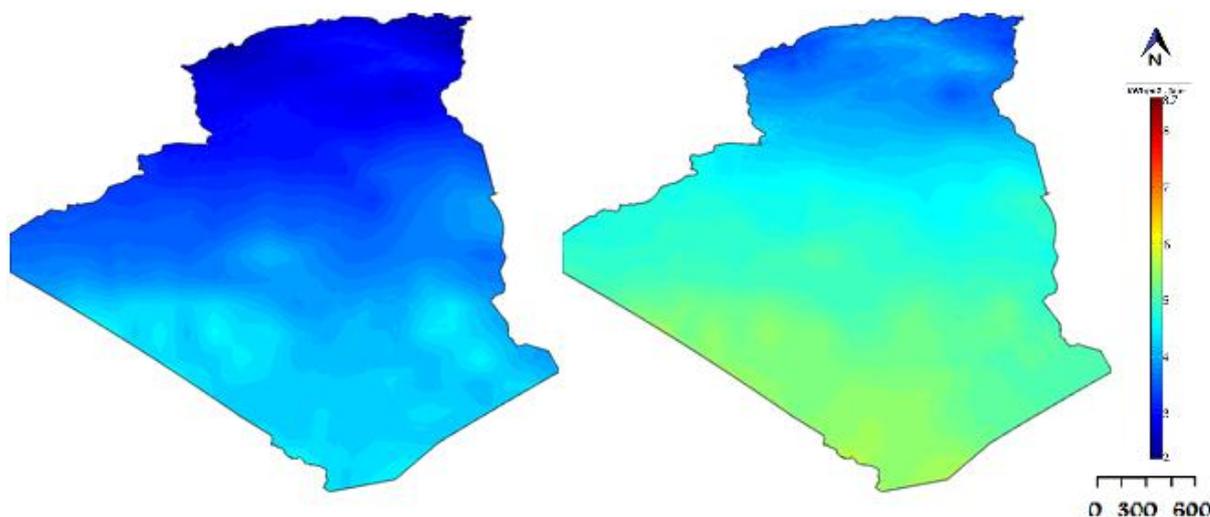


Figure V.6: Moyennes mensuelles des irradiations quotidiennes.

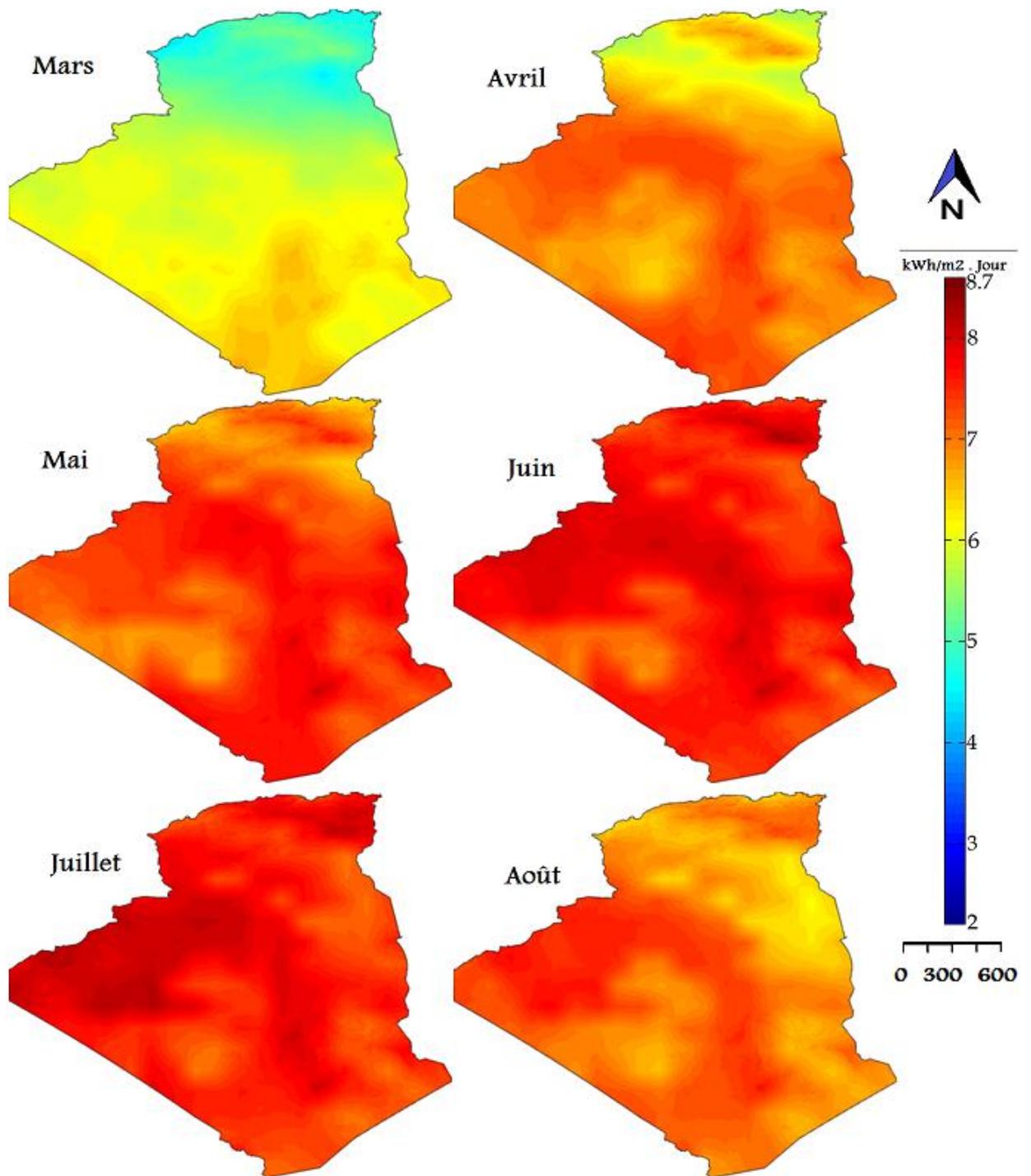


Figure V.6: Moyennes mensuelles des irradiances quotidiennes (Suite).

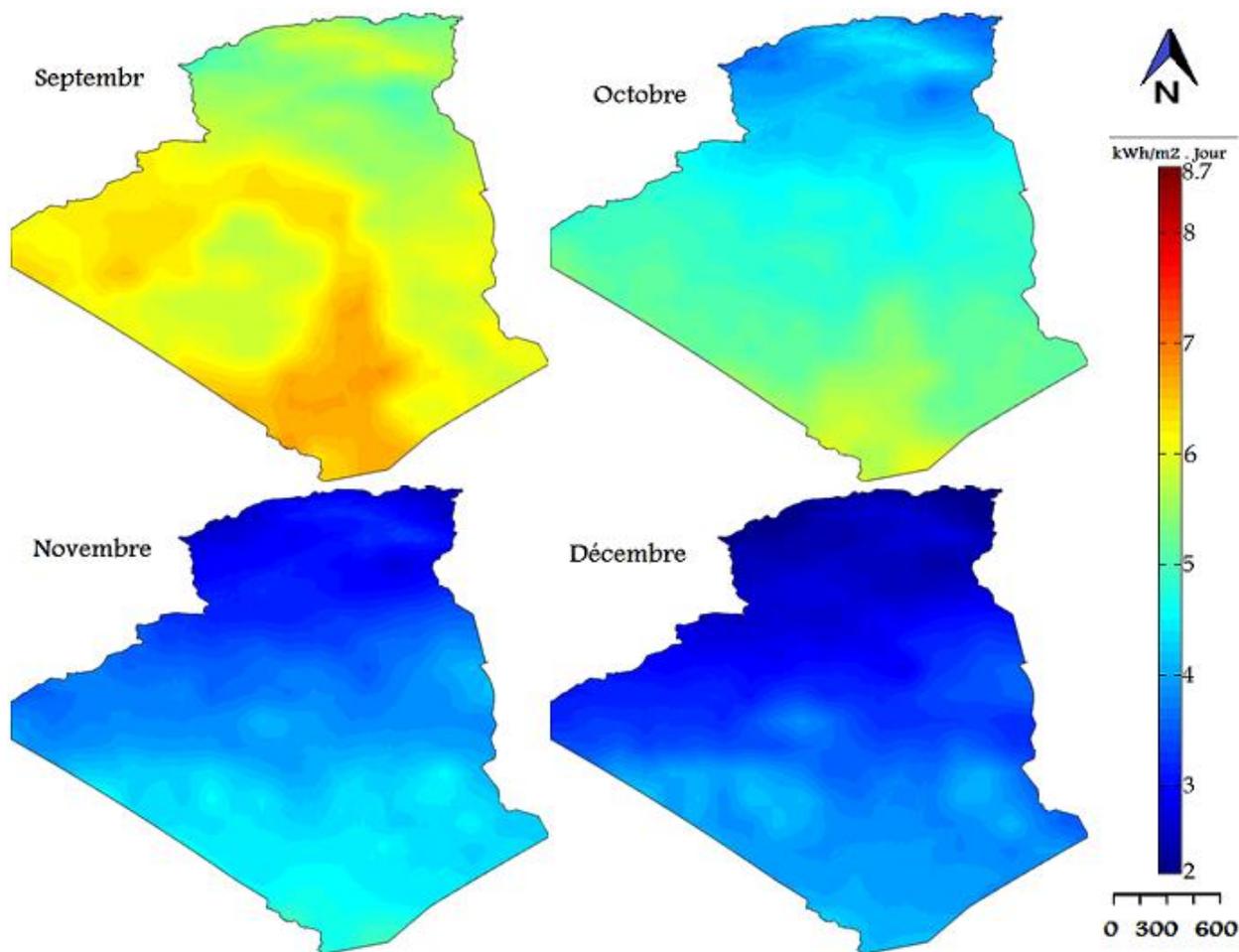


Figure V.6: Moyennes mensuelles des irradiations quotidiennes (Suite).

- *Moyenne des sommes annuelle de l'irradiation*

Une carte est produite ci-après et couvrant tout le territoire de l'Algérie, elle représente la moyenne des cumuls annuels d'irradiation globale. Comme on peut en déduire de la Figure V.7 l'irradiation annuelle varie entre 1400 et 2600 kWh/m²/an. Avec un potentiel plus élevé au Sud par rapport au Nord du pays. Les caractéristiques orographiques sont plus apparentes dans la carte reproduite.

Cette carte a été comparée à celle résultante du Project Atlas de SolarMed, qui à son tour, représente la moyenne des cumuls annuels d'irradiation globale d'une résolution de 1 km² couvrant une période de 20 ans (1991-2010) [4]. La figure V.7 On montre clairement qu'il y a une bonne similitude entre les deux cartes. On constate aussi, que le modèle reproduit convenablement les structures spatiales des irradiations, dont les valeurs maximales et minimales sont bien localisées avec une légère surestimation.

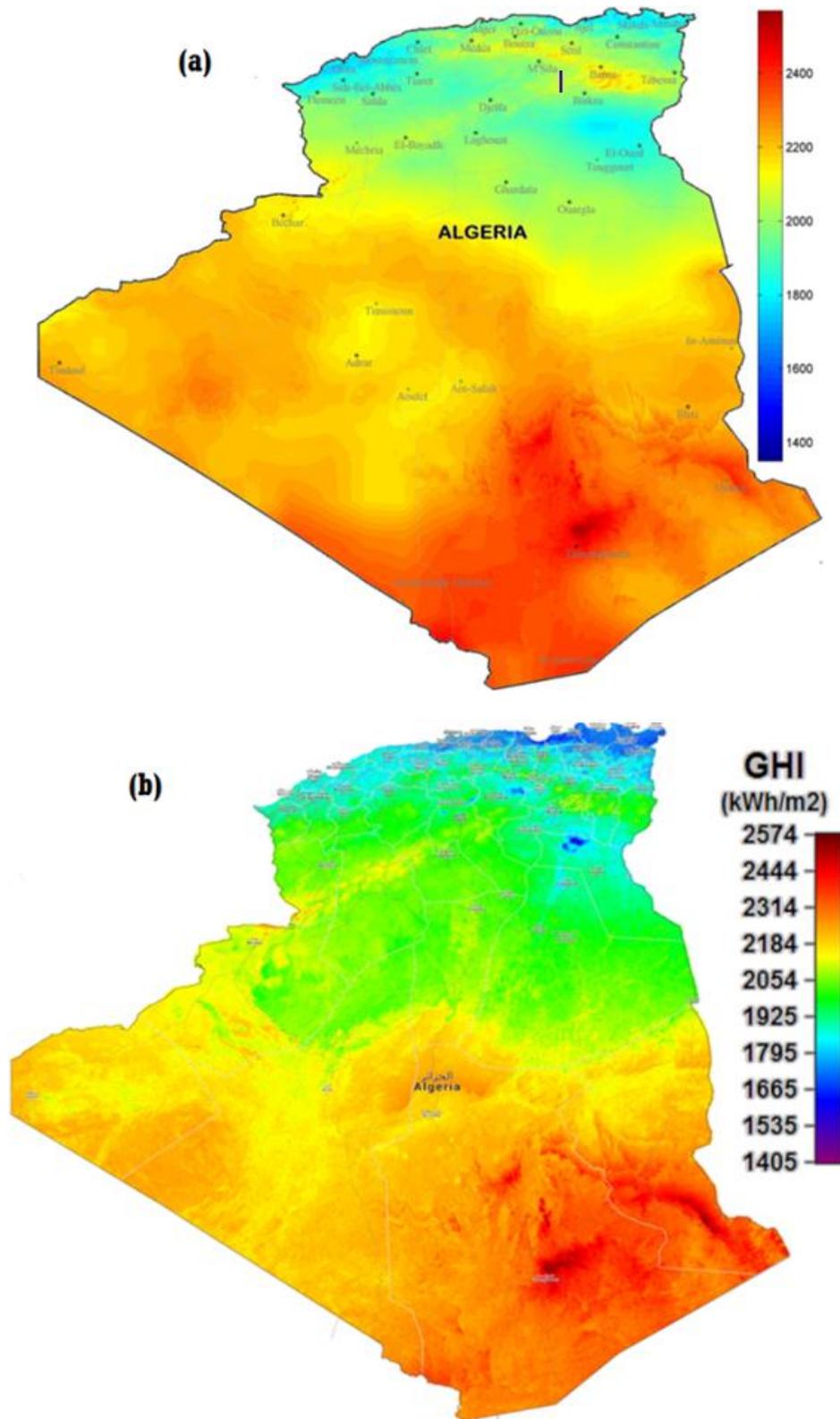


Figure V.7: Moyenne des sommes annuelles d'irradiation globale. Résultat de cette étude,(b) celle du projet Atlas de SolarMed Ref. [4]. [kWh/m²/an].

6. CONCLUSION

Afin d'avoir des informations détaillées sur la variabilité spatiotemporelle des ressources solaires sur l'ensemble du territoire Algérien, une méthode de désagrégation a été appliquée aux données historiques du rayonnement global provenant de la base de données SSE, qui contiennent des moyennes mensuelles des irradiations relevées quotidiennement à long terme, pour la période 1983-2005. Les données sont basées sur l'intégration de sources de données à partir des images satellite, regroupant plusieurs satellites.

L'évaluation par rapport aux mesures expérimentales réalisées sur les six sites Algériens montre que la moyenne mensuelle de GHI quotidiennes sur ces sites devienne plus précise en appliquant cette méthode. La divergence étant très marquée lorsque la différence d'altitude est supérieure à 200 m. Les résultats statistiques montre bien une bonne corrélation supérieure à 0,96. L'utilisation de cette méthode permet une diminution de l'ordre de 1 à 4 % de l'erreur moyenne, et de 1 % à 3 % du RMSE relative, par rapport aux données originales sur des stations individuelles. On peut en conclure que l'application de cette méthode donnerait des résultats plus précis que ceux obtenus en par l'application des meilleurs modèles empiriques proposés pour l'Algérie [32-34].

Ce travail a permis de réaliser une cartographie annuelle et mensuelle du rayonnement global à haute résolution spatiale couvrant l'ensemble du territoire, suivi par une analyse géospatiale de ce potentiel.

V.1. REFERENCES

- [1] Vernaya C., Pitavala S., Blanc P. (2014): Review of satellite-based surface solar irradiation databases for the engineering, the financing and the operating of photovoltaic systems, *Energy Procedia*. 57, 1383–1391.
- [2] NASA-SSE. (2015): Atmospheric Science Datacenter. NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi> (accessed May 2015).
- [3] SoDa, Mines ParisTech: Solar radiation data. <http://www.soda-is.com/eng/index.html>.
- [4] SolarMed. (2015): Mediterranean area 1km by SolarMed Atlas project, German Aerospace Center (DLR), at <http://www.solar-med-atlas.org/solarmed-atlas/map.htm#t=ghi> (2015) (accessed on November 2015).
- [5] SolarGIS, Geomodel Solar.. <http://solargis.info/>.
- [6] Pagola I, et al. (2010): New methodology of solar radiation evaluation using free access databases in specific locations. *Renew Energy* 2010; 35(12): 2792-8..
- [7] Whitlock C H., Brown D. E., Chandler W. S. and DiPasquale R. C. (2000): Release 3 NASA Surface meteorology and Solar Energy data set for renewable industry use, Paper presented at the 26th Annual Conference of the Solar Energy Society of Canada Inc. & Solar Nova Scotia, Canada, 21- 24 Oct, 2000.
- [8] Chandler W. S., Whitlock C. H., Stackhousep W. Jr. (2004): NASA climatological data for renewable energy assessment, *Journal of Solar Energy Engeneering*. 126, 945-949, 2004.
- [9] Wahab M. A., El-Metwally M., Hassan R., Lefevre M., Oumbe A., Wald L. (2009): Assessing surface solar irradiance and its long-term variations in the Northern Africa desert climate using meteosat images, *International Journal of Remote Sensing*, 31(01),261-280.
- [10] Bouchouicha K., Razagui A., Bachari N.I. and Aoun N., (2015): "Mapping and Geospatial Analysis of Solar Resource in Algeria", *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, ISSN: 1054-853X, Volume 23, Number 6.
- [11] D.G.E : (2001): Direction Générale de l'Environnement : Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques, Projet national ALG/98/G31.
- [12] Boudghene Stambouli, A. (2011): Algerian renewable energy assessment: The challenge of sustainability, *Energy Policy*. 39, 4507–4519.
- [13] Chegaar M., Lamriand A., Chibani A. (1998): Estimating Global Solar Radiation Using Sunshine Hours, *Rev. Energ. Ren, Physique Energétique* (1998), 7–11.
- [14] Gairaa K. and Bakelli Y. (2013): Solar Energy Potential Assessment in the Algerian South Area: Case of Ghardaia Region., *Journal of Renewable Energy*, Volume 2013, Article ID 496348, 11 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/496348>.

- [15] [Bouchouicha K.](#) and Oulimar B., (2013) : La chaine de mesure radiométrique à l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar, International Conference on Energy and Sustainable Developmentesd'13, Adrar - Algeria 19-20 February 2013.
- [16] [Pinker RT.](#), Laszlo I. (1992): Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Application on a Global Scale. *J. Appl. Meteorol.*, 31, 194–211 (1992).
- [17] [Erbs D.G.](#), Klein S.A., Duffie J.A. (1982): Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Sol. Energy*, 28(4), 293–302(1982).
- [18] [Vernaya C.](#), Pitavala S., Blanc P. (2014): Review of satellite-based surface solar irradiation databases for the engineering, the financing and the operating of photovoltaic systems, *Energy Procedia*. 57, 1383–1391, 2014.
- [19] [Renné D.](#), George R., Wilcox S., Stoffel T., Myers D., and Heimiller D. (2008): Solar Resource Assessment. Technical Report NREL/TP-581-42301, February 2008.
- [20] [USGS](#), (1996): GTOPO30: Global 30 arc second elevation data. Online at <http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30.html>, EROS Data Center, Sioux Falls, SD.
- [21] [GLOBE Task Team](#) & others: (1999): The Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0. Digital data base on the World Wide Web (URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>) and CD-ROMs. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80303, U.S.A. 1999.
- [22] [Pratap R.](#) (2007): Getting Started with MATLAB7 A Quick Introduction for Scientists and Engineers, 6th edition, *Oxford university press*, 144-157.
- [23] [Quarteroni A.](#), Saleri F., Gervasio P. (2014): Scientific Computing with MATLAB[®] and Octave (Texts in Computational Science and Engineering) Forth (4th) Edition Hardcover. Springer, New York, second edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [24] [Ruiz-Arias J.A.](#), Cebecauer T., Tovar-Pescador J., Šúri M. (2010): Spatial disaggregation of satellite-derived irradiance using a high-resolution digital elevation model, *Solar Energy*, 84, 1644–1657.
- [25] [Bosch J. L.](#), Batlles F. J., Zarzalejo L. F., and López G. (2010): Solar resources estimation combining digital terrain models and satellite images techniques, *Renewable Energy*, 35, 2853-2861.
- [26] [Pillot B.](#), Muselli M., Poggi P., Haurant P., and Hared I. (2013a): The first disaggregated solar atlas of Djibouti: A decision-making tool for solar systems integration in the energy scheme. *Renewable Energy*, 57, 57-69.
- [27] [Pillot B.](#), Muselli M., Poggi P., Haurant P., Hared P. (2013b): Solar energy potential atlas for planning energy system off-grid electrification in the Republic of Djibouti., *Energy Conversion and Management*, 69, 131–147.

- [28] [Stone, R. J.](#) (1993): Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Sol. Energy*, 51 (4), 289-291.
- [29] [Huld T.](#), Muller R., and Gambardella A. (2012): A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa, *Solar Energy*, 86, 1803–1815, 2012.
- [30] [Alsamamra H.](#), Ruiz-Arias J.A., Pozo-Vazquez D., Tovar-Pescador J. (2009): A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain., *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1343–1357, 2009.
- [31] [Šúri M.](#) and Cebecauer T. (2014): Satellite-based solar resource data: Model validation statistics versus user’s uncertainty. ASES SOLAR 2014 Conference, San Francisco, 7-9 July 2014.
- [32] [Chegaar M.](#) and Chibani A. (2001): Global solar radiation estimation in Algeria., *Energy conversion and management*, 42(8), 967-973.
- [33] [Mellit A.](#), Benghanem M., Hadj Arab A., Guessoum A. (2005): A simplified model for generating sequences of global solar radiation data for isolated sites: Using artificial neural network and a library of Markov transition matrices approach, *Solar Energy*, 79, 469–482.
- [34] [Mecibah M.S.](#), Boukelia T.E., Tahtah R., Gairaa K. (2014): Introducing the best model for estimation the monthly mean daily global solar radiation on a horizontal surface (Case study: Algeria). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 194–202.

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Conclusions

L'objectif général de cette thèse est le suivi spatio-temporel des différentes composantes du bilan énergétique solaire à savoir l'albédo de surface et le rayonnement global. Plus particulièrement la réalisation d'une cartographie à haute résolution de ces deux composantes.

Dans une première partie, une évaluation du potentiel énergétique solaire sur site à travers une modélisation du rayonnement solaire dans différentes conditions, partant d'une base de données météorologiques mesurées au sol et celles prévues par un modèle de prévision numérique du temps. Cette étude comparative a couvert quatre modèles d'estimation de l'éclairement solaire à ciel clair sur le site d'Adrar. Complétant cette partie par l'estimation du rayonnement global horizontale et inclinée. Un ensemble de simulations a été mené, pour différentes situations ou conditions météorologiques, ensuite une évaluation statistique de chaque modèle a été réalisée, cette évaluation a été effectuée par rapport aux données mesurées au niveau de deux stations, la station d'Oran et la station d'Adrar, et cela nous a permis d'établir des modèles de régression donnant le global horizontal en fonction de la durée d'insolation pour les mesures au sol.

Dans une deuxième partie de notre travail, nous sommes passés à la réalisation d'une cartographie de l'albédo de surface à partir de traitement et de la combinaison des images satellitaires des deux canaux visibles. L'albédo a été, ainsi, calculé en utilisant une forme approximative d'un modèle de transfert radiatif atmosphérique (RT). Deux approches d'évaluation du rayonnement solaire global sur une surface horizontale par le traitement des images HRV du satellite MSG2 ont été testées. Ces deux approches ont été appliquées pour l'estimation des irradiations en valeurs horaires et journalières sur cinq sites représentatifs de différentes régions climatiques. Les cinq stations que nous avons utilisées sont pour deux d'entre elles du climat tempéré une d'un climat semi-aride et deux autres du climat désertique.

Les études menées ont permis de déterminer l'erreur générées pour les estimations du rayonnement global. Par ailleurs, sur les deux approches employées, la première approche a été identifiée comme étant la plus performante qu'elle soit pour les irradiations horaires ou quotidiennes.

Les résultats obtenus sont très encourageants et prometteurs par rapport à la littérature existante. Les résultats obtenus font apparaître une erreur quadratique moyenne relative, elle variant entre 11 % et 31% sur une base horaire, et entre 4% et 12% sur une base quotidienne. De plus, sur l'ensemble des estimations, le modèle possède un comportement en meilleur accord avec les mesures sur les régions Sud que sur celles du Nord du pays. Nous concluons aussi que les résultats dépendent de la situation géographique du site et de la période traitée. L'analyse de ces résultats, nous a permis aussi de mettre en évidence l'erreur dû aux modèles qui sont peut être due soit aux traitements des pixels nuageux dans le calcul des indices d'enneuagement, soit aux calculs de de l'albédo du sol lui-même.

Ce travail a permis aussi de réaliser une cartographie annuelle et mensuelle du rayonnement global à haute résolution spatiale couvrant l'ensemble du territoire national, suivi par une analyse géospatiale.

Cette étude est bénéfique et utile pour l'estimation des composantes du rayonnement solaire, via la télédétection spatiale en raison de la disponibilité d'une station de réception des images METEOSAT installée sur le site d'Adrar. En effet, l'étude montre la faisabilité d'utilisation de l'imagerie satellitaire pour l'évaluation de ces paramètres, tout en balayant les inconvénients du réseau terrestre existant de mesure radiométrique existante. Elle joue alors le rôle d'une station de mesure radiométrique terrestre à moindre coût.

Perspectives :

Cette étude, comme toute autre, comporte toutefois certaines limitations qui pourraient faire l'objet d'amélioration lors de futurs travaux.

L'albédo de surface peut être évalué comme une source d'erreur non négligeable pour l'évaluation du rayonnement global. Pour cela, une idée à approfondir sera de faire augmenter la qualité des estimations de ce paramètre à travers l'utilisation des images à plus haute résolution spatiale tel que celles du capteur MODIS embarqué sur les satellites Terra et Aqua.

Sur le plan national, un grand nombre de projets pilotes de centrales thermiques à concentration solaire plus connu sous le nom de « concentrating solar power » (CSP) sont prévus. Ce type de centrale produit de l'électricité en convertissant l'irradiation solaire directe (Direct Normal Irradiance - DNI) en énergie. Une meilleure connaissance de la distribution spatiale et temporelle de ce paramètre permet de mieux identifier les futurs sites d'implantation, et d'optimiser le dimensionnement de ces systèmes.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- Abbott P. F., (1986): Guidelines on the quality control of surface climatological data. WMO, TD n° 111, OMM, Genève, 71 p.
- Ahrens D. C., (2000): Essentials of meteorology, an invitation to the atmosphere, 3^{ième} Ed.
- Akinoğlu, B. G., ECEVIT, A., (1990): A further comparison and discussion of sunshine-based models to estimate global solar radiation. Energy, vol. 15, no 10, p. 865-872.
- Al-Mostafa ZA, Maghrabi AH, Al-Shehri SM., (2014): Sunshine-based global radiation models: a review and case study. Energy Convers Manage;84:209–16.
- Alsamamra H., Ruiz-Arias J.A., Pozo-Vazquez D., Tovar-Pescador J. (2009): A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain., *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1343–1357.
- Aoun N. and **Bouchouicha K.**, (2017), Estimating daily global solar radiation by day of the year in Algeria., *The European Physical Journal Plus*, Volume 132, Issue 5, pp. 216-228.
- Armel O., (2009) Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire au sol, PhD thesis, MINES ParisTech.
- Bachari N.I., Razagui A., (2003). Development of a methodology for determining and mapping of thermal radiation from the ground. In: proceedings of the 11th International Thermal Conference (11th JITH), Algiers-Algeria, June 21-23.
- Bachari, N. I., (1999). Méthodologie d'analyse des Données Satellitaires en utilisant des Données Multi-Sources. [Ph.D. Dissertation], Université des sciences et technologie d'Oran, Oran.
- Badescu V., (1987): Can the model proposed by Barbaro et al be used to compute global solar radiation on the Romanian territory?, *Solar Energy*, 38: 247–254.
- Bakirci, K., (2009): Models of solar radiation with hours of bright sunshine: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, no 9, p. 2580-2588
- Batlas P., Tortoreli M. and Russel P.E., (1986): 'Evaluation of Power Output for Fixed and Step Tracking Photovoltaic Arrays', *Solar Energy*, Vol.32, N2, pp.147-163.
- Benatiallah D., Benatiallah A., **Bouchouicha K.** and Harouz A., (2016), Solar radiation estimate calculated using two models, 5th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), November 14-17, 2016, Marrakech, Morocco.
- Benatiallah D., **Bouchouicha K.**, Benatiallah A. and Harouz A., (2016), Development and Modeling of a Geographic Information System solar Flux in Adrar, Algeria, *International Journal of System Modeling and Simulation* Vol 1(1) Apr-Jun 2016, pp 15-19.
- Besharat F., Ali A. Dehghan and Ahmad R. Faghih., (2013) Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study., *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21 798–821.
- Bessemoulin P. and Oliiviéri J., (2000) Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, *La Météorologie* 8e série - n° 31 – septembre.

- Bessemoulin P. et Oliviéri J., (2000) .Le Rayonnement Solaire et sa Composante Ultraviolette, Physique Atmosphérique, La Météorologie, 8^{ème} Série, N°31, Septembre 2000.
- Beyer H.G., Polo Martinez J., Suri M., Torres J.L., Lorenz E., Müller S.C., Hoyer-Klick C. and Ineichen, P., (2009). D1.1.3 Report on Benchmarking of Radiation Products”. Report under contract no. 038665 of MESoR; 2009.
- Bird E .R., Hulstrom R.L., (1981a): A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insulation on Horizontal Surfaces, Seri Tr -642-761, February 1981.
- Bird E .R., Hulstrom R.L., (1981b). Direct insolation models, Transactions of the ASME J. Sol. Energy Engineering, 103, 182-192.
- Bird, R. E and Riordan, C. J, (1986): 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 (1):87-97.
- Bosch J. L., Batlles F. J., Zarzalejo L. F., and López G. (2010): Solar resources estimation combining digital terrain models and satellite images techniques, *Renewable Energy*, 35, 2853-2861.
- Bouchouicha K.** and Bachari N. I., (2012) : Simulation of a clear sky satellite image in water vapor and infrared satellite M.S.G channel's, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°4, 2012, 671 – 679.
- Bouchouicha K.** and Oulimar B., (2013): La chaine de mesure radiométrique à l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar, International Conference on Energy and Sustainable Developmenticesd'13, Adrar - Algeria 19-20 February 2013.
- Bouchouicha K.**, Bellaoui M., Bachari N. I., (2014) : « Cartography of Global solar radiation over Adrar », INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN ENERGY AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING GEEE'14, Soussa - Tunisia 22-23 May 2014.
- Bouchouicha K.**, Razagui A., Bachari N.I. and Aoun N., (2015): Mapping and Geospatial Analysis of Solar Resource in Algeria, *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, ISSN: 1054-853X, Volume 23, Number 6, pp 735-751.
- Bouchouicha K.**, Razagui A., Bachari N.I. & Aoun N., (2016a): Estimation of Hourly Global Solar Radiation Using MSG-HRV images, *International Journal of Applied Environmental Sciences*, ISSN 0973-6077, Volume 11, Number 2, pp. 351-368.
- Bouchouicha K.**, Razagui A., Bachari N.I. and Aoun N., (2016b), Hourly global solar radiation estimation from MSG-SEVIRI images-case study: Algeria, *World Journal of Engineering*, [ISSN 1708-5284], Vol. 13 Iss 3 pp. 266 – 274.
- Bouchouicha K.**, Aoun N., Bellaoui M., Oulimar B., Babahadj A., (2017): La prévision des ressources énergétiques solaires., 3RD CONFERENCE ON ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT., ADRAR, 07 - 08 FEBRUARY, 2017.
- Boudghene Stambouli, A. (2011): Algerian renewable energy assessment: The challenge of sustainability, *Energy Policy*. 39, 4507–4519.
- Briegleb, B. and Ramanathan, V., (1982)., Spectral and diurnal variation in clear sky planetary albedo .J. App.Meteor, 21.

- Brinsfield, R., Yaramanoglu, M., Wheaton, F., (1984) : Ground level Solar Radiation prediction model including cloud cover effects., *Solar Energy*, Vol.33,No.6, pp.493-499.1984
- Cano, D., Monget, J.M., Albuisson, M., Guillard, H., Michaud-Regas, N., and Wald L., (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37(1):31-39.
- Chaabane, M., and Ben Djemaa, A., (2002). Use of HR Meteosat images for the mapping of global solar irradiation in Tunisia: preliminary results and comparison with Wefax images. *Renewable Energy*, 25: 139–151.
- Chandler W. S., Whitlock C. H., Stackhousep W. Jr. (2004): NASA climatological data for renewable energy assessment, *Journal of Solar Energy Engineering*. 126, 945-949.
- Chegaar M. and Chibani A. (2001): Global solar radiation estimation in Algeria., *Energy conversion and management*, 42(8), 967-973.
- Chegaar M., Lamriand A., Chibani A. (1998): Estimating Global Solar Radiation Using Sunshine Hours, *Rev. Energ. Ren, Physique Energétique*, 7–11.
- Chen, T., and Ohring, T., (1984). On the relationship between clear sky planetary and surface albedos. *J. Atmos*, 41.
- Clef CEA, (2009) : Terre et environnement, Memo A Voyage au centre de la Terre et aux confins de l'atmosphère, Hiver 2008-2009, N°57, PP21-24.
- D.G.E : (2001): Direction Générale de l'Environnement : Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques, Projet national ALG/98/G31.
- Dagestad, K., (2005). Estimating global radiation at ground level from satellite images DOCTOR SCIENTIARUM THESIS IN METEOROLOGY, UNIVERSITY OF BERGEN, MAY 2005.
- DeMOOR G, (2007) : transfert radiatif en météorologie dynamique, Cours et manuels, N°17, Météo-France, 2007.
- Deneke, H. M., and R. A. Roebeling (2010), Downscaling of meteosat sevir 0.6 and 0.8 channel radiances utilizing the high-resolution visible channel, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(20), 9761–9772, doi:10.5194/acp-10-9761.
- Despotovic M, Nedic V, Despotovic D, Cvetanovic S. (2015): Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models. *Renew Sustain Energy Rev*;52:1869–80.
- Diabaté L., Remund J., Wald L., (2003): Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa, *Solar Energy*, 75, pp. 111-119.
- Dogniaux R., (1984): De l'influence de l'Estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur l'Evaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair. Application aux Données Radiométriques de l'IRM à Uccle, Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), *Miscellanea, Serie C*, N°20.
- Duffie, J.A and William A.B.,. (2010) *Solar energy thermal processes*, University of Madison, USA, WI.

- Erbs D.G., Klein S.A., Duffie J.A. (1982): Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Sol. Energy*, 28(4), 293–302.
- EUMETSAT (2009), Wavelet Transform Software, disponible au site: Consulté en 2014 www.eumetsat.int/Home/Main/Access_to_Data/User_Support/SP_1117714787347#wavelet
- EUMETSAT., (2006):. EUMETCast - EUMETSAT's broadcast system for environmental data. Technical Description 15.
- EUMETSAT., (2007): La chronique de l'Organisation européenne de satellites météorologiques, IMAGE, N°26, Mai 2007.
- Fontoynt, M., Dumortier, D., Heinemann, D., Hammer, A., Olseth, J.A., Skartveit, A., Ineichen, P., Reise, C., Page, J., Roche, J., Beyer, H., Wald, L., (1998). Satel-Light: a www server which provides high quality daylight and solar radiation data for western and central Europe. In: Proceedings of the 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography in Paris, 25–28 May 1998, pp. 434–437.
- Francis C., (2012) Transfert radiatif bilan énergétique, Note du cours, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France.
- Francois C., (1995). Estimation de l'Albédo de surface à l'échelle globale, à l'aide de mesures satellitaires, Thèse de doctorat d'état.
- Gairaa K. and Bakelli Y. (2013): Solar Energy Potential Assessment in the Algerian South Area: Case of Ghardaia Region., *Journal of Renewable Energy*, Volume 2013, Article ID 496348, 11 pages.
- Gautier C., Diak G., and Masse S., (1980) : A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *J. Appl. Meteor.*, 19, 1005–1012.
- Geuder, N., Trieb F., Schillings C., Meyer R., Quaschnig V., (2003). Comparison of different methods for measuring solar irradiation data. In proceedings of the 3rd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, 19th-21st of February 2003, Torremolinos, Spain. 9 pp.
- GLOBE Task Team & others: (1999): The Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0. Digital data base on the World Wide Web (URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>) and CD-ROMs. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80303, U.S.A. 1999.
- Gschwind B., Ménard L., Albuissou M. and Wald L., (2006): Converting a Successful Research Project Into a Sustainable Service, The Case of the Soda Web Service, *Environmental Modelling a Software*, Vol, 21, N° 11, pp. 1555 - 1561.
- Gueymard, C. (1986) POTSOL: Model to predict extraterrestrial and clear sky solar radiation” and Ground level solar radiation prediction model including cloud cover effects. 37(4),319-321.
- Hammer, A., (2000). Anwendungsspezifische Solarstrahlungs informationen aus Meteosat-Daten. PhD Thesis, University of Oldenburg- Germany.

- Hansen, J., Nazarenko, L., Ruedy, R., Sato, M., Willis, J., Del Genio, A., Koch, D., Lacis, A., Lo, K., Menon, S., Novakov, T., Perlwitz, J., Russell, G., Schmidt, G.A., and Tausnev, N, (2005): Earth's energy imbalance: confirmation and implications, *Science*, (308), 1431-1435.
- Haurant, P., Muselli, M., Pillot, B., and Oberti, P., (2012). Disaggregation of satellite derived irradiance maps: Evaluation of the process and application to Corsica., *Solar Energy*, 86:3168–3182
- Hay J. (1979): Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and tilted surfaces. *Solar Energy* 1979;23.
- Hay, J.E., Davies, J.A., (1980): Calculations of the solar radiation incident on an inclined surface. In: Hay, J.E., Won, T.K. (Eds.), *Proc. of First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, 59. Ministry of Supply and Services, Canada.
- Hofierka J., Suri M., (2002): The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications, *Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference 2002 - Trento, Italy*, 11-13, September 2002.
- Huld T., Muller R., and Gambardella A. (2012): A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa, *Solar Energy*, 86, 1803–1815.
- Imamura M.S, Hulstrom R.L., Cookson C., Waldman B.H., Lane R.A., (1976). Definition study for photovoltaic residential prototype system. *Martin Marietta Corp Report*.
- Ineichen, P., (2011). Five satellite products deriving beam and global irradiance validation on data from 23 ground stations. [Ph.D. Dissertation] ; University of Geneva.
- Inman, R.H., Pedro, H.T., Coimbra, C.F., (2013): Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Prog. Energy Combust. Sci.* 39 (6), 535–576.
- IQBAL M., (1983): an Introduction to Solar Radiation, Academic Press Canada.
- ISO-9060 Standard & Pyranometer Measurement Accuracy (2014). Consulté en Avril 2014 http://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pres/SOLAR2012_0829_presentation.pdf
- Jambu.M., (1999): Méthodes de base de l'analyse des données., Eyrolles, p 125-186
- Jamil Ahmad M., Tiwari. G.N., (2010): Solar radiation models – review., *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT.*, Volume 1, Issue 3, pp.513-532
- Journée, M., and Bertrand, C., (2011): Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. *Solar Energy*, 85: 72-86
- Kasten H, (1966): A new table and approximation formula for the relative optical air mass, *Archiv fur Meteorol Geophys und Bioklim B*: 206–223.
- Kevin E., Trenberth, John T. Fasullo, and Jeffrey Kiehl, (2009): Earth's global energy budget, *American Meteorological Society*, 311-324.
- Khatib, T., Mohamed, A., Sopian, K., (2012): A review of solar energy modeling techniques. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 2864–2869
- Kipp & Zonen, (?): directions for use – Pyranomete-r with shadow ring CM 11/121. DELFT – HOLLAND.
- Klucher M., (1979): Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*;23:111–4.

- Koussa M., Malek A. and Haddadi M., (2006):** Validation de Quelques Modèles de Reconstitution des Eclairements dus au Rayonnement Solaire Direct, Diffus et Global par Ciel Clair, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 9 N°4 pp. 307 – 332.
- Kuhlemann, R., and Hammer, A., (2005).** Sunsat : the new program for processing high resolution data of Meteosat-8, Energy-Specific Solar Radiation Data from Meteosat Second Generation (MSG). The Heliosat-3 Project; 2005.
- Kumar, L., Skidmore, A.K. and Knowles, E., (1997):** Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment, *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5): 475-497.
- Lefèvre M., Remund J., Albuissou M., Ranchin T. and Wald L, (2004):** Fusing ground measurements and satellite-derived products for the construction of climatological maps in atmosphere optics, In *Proceedings - 23rd EARSeL Annual Symposium Remote Sensing in Transition*, 2-4 June 2003, Belgique, 85-91.
- Liu B, Jordan R., (1962):** Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *Trans ASHRAE* 1962;67.
- Martín, L., et al., (2010):** Prediction of global solar irradiance based on time series analysis: Application to solar thermal power plants energy production planning. *Solar Energy*, 84, 1772-1781.
- Mattews, and Rossow, (1986).** Regional and seasonal variation of surface reflectance from satellite observation at 0.6 μm . *J.A. tmos.sci.*26.
- McArthur L. (1998):** Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual, (Version 1.0), WMO/TD No. 879. Geneva, Switzerland: World Climate Research Program, WMO.
- Mecibah M.S, Boukelia T.E., Tahtah R., Gairaa K. (2014):** Introducing the best model for estimation the monthly mean daily global solar radiation on a horizontal surface (Case study: Algeria). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 194–202.
- Mefti, A., Adane, A., and Bouroubi, M.Y., (2008).** Satellite approach based on cloud cover classification: Estimation of hourly global solar radiation from Meteosat images *Energy Conversion and Management*, 49: 652-659.
- Mekler, Y., and Joseph, J., (1984).** Direct determination of surface albedos from satellite imagery, *J.Climate*, 22.
- Mellit A., Benghanem M., Hadj Arab A., Guessoum A. (2005):** A simplified model for generating sequences of global solar radiation data for isolated sites: Using artificial neural network and a library of Markov transition matrices approach, *Solar Energy*, 79, 469–482.
- Mesri-Merad M., Rougab I., Cheknane A. and Bachari N.I., (2012):** ‘Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques’, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°3, pp.451 – 463, 2012
- Meza F., Varas. E., (2015):** Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature., *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 52, 1294–1299

- Meziani, F., Boulifa, M., and Ameer, Z., (2013). Determination of the global solar irradiation by MSG- SEVIRI images processing in Algeria Energy Procedia,36 :525-534
- Moradi, I., Mueller, R., Alijani, B., and Kamali, G.A., (2009). Evaluation of the Heliosat-II method using daily irradiation data for four stations in Iran. Solar Energy, 83: 150-156
- Müller, R. W., Dagestad, K. F., Ineichen, P., Schroedter, M., Cros, S., Dumortier, D., Kuhlemann, R., Olseth, J. A., Piernavieja, C., Reise, C., Wald, L. and Heinemann, D. (2004): Rethinking satellite based solar irradiance modeling - The SOLIS clear sky module. Remote Sensing of the Environment 91 160 – 174.
- NASA-SSE. (2015): Atmospheric Science Datacenter. NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi> (accessed May 2015).
- Oulimar B., (2010): diagnostic sur les différents modes de collecte énergétique, rapport d'activité, URER-MS.
- Oulimar B., **Bouchouicha. K.**, (2013): Modelé radiométrique adéquate pour caractériser l'apport énergétique optimal sur le site d'Adrar, INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT ICESD'13, Adrar - Algeria 19-20 February 2013.
- Pagola I, et al. (2010): New methodology of solar radiation evaluation using free access databases in specific locations. Renew Energy 2010; 35(12): 2792-8..
- Pekarek, A. H., (2001) Solar forcing of earth's climate, in L. C. Gerhard, W. E. Harrison, and B. M. Hanson, eds., Geological perspectives of global climate change, p. 19–34.
- Perez R, Moore, K, Wilcox S, Renne D, Zelenka K., (2007): Forecasting solar radiation: Preliminary evaluation of an approach based upon the national forecast database. Solar Energy; 81(6):809-812.
- Perrin, C. and Vauge, C. (1982). Le Gisement Solaire : Evaluation de la Ressource Energétique. Technique et Documentation, Librairie Lavoisier, Paris, France, 222 pages.
- Pillot B., Muselli M., Poggi P., Haurant P., and Hared I. (2013a): The first disaggregated solar atlas of Djibouti: A decision-making tool for solar systems integration in the energy scheme. *Renewable Energy*, 57, 57-69.
- Pillot B., Muselli M., Poggi P., Haurant P., Hared P. (2013b): Solar energy potential atlas for planning energy system off-grid electrification in the Republic of Djibouti., *Energy Conversion and Management*, 69, 131–147.
- Pinker RT., Laszlo I. (1992): Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Application on a Global Scale. J. Appl. Meteorol., 31, 194–211.
- Pratap R. (2007): Getting Started with MATLAB7 A Quick Introduction for Scientists and Engineers, 6th edition, *Oxford university press*, 144-157.
- Quarteroni A., Saleri F., Gervasio P. (2014): Scientific Computing with MATLAB® and Octave (Texts in Computational Science and Engineering) Forth (4th) Edition Hardcover. Springer, New York, second edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Raschke, R., Preuss, H.J., (1979). The determination of the solar radiation budget at the earth surface from satellite measurements. *Meteorol. Rundsch.* 32, 18
- Razagui A., (2013). Développement d'une méthodologie pour l'exploitation des images MSG pour le suivi des paramètres physiques du sol et la prévision météorologique., [Ph.D. Dissertation], Université des sciences et technologie d'Oran, Oran .
- Razagui A., Bachari N. I., **Bouchouicha K.** & Hadj Arab A., (2016) « Modeling the Global Solar Radiation Under Cloudy Sky Using Meteosat Second Generation High Resolution Visible Raw Data », *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, ISSN 0255-660X.
- Remund J., L. Wald, M. Lefevre, T. Ranchin and J. Page, (2003): Worldwide Linke Turbidity Information, Proceedings of The ISES Solar World Congress 2003, Goeteborg, Sweden, 16-19, June 2003.
- Renné D., George R., Wilcox S., Stoffel T., Myers D., and Heimiller D. (2008): Solar Resource Assessment. Technical Report NREL/TP-581-42301, February 2008.
- Rigollier, C., Lefèvre, M. and Wald, L., (2004). The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77(2): 159-169.
- Ruiz-Arias J.A., Cebecauer T., Tovar-Pescador J., Šúri M. (2010): Spatial disaggregation of satellite-derived irradiance using a high-resolution digital elevation model, *Solar Energy*, 84, 1644–1657.
- Schermeyer, H.; Bertsch, V.; Fichtner, W., (2014): Validation and utilization of numerical weather model data in energy systems analysis of decentralized electricity production. In Proceedings of the 7th International Scientific Conference on Energy and Climate Change, Athens, Greece, 8–10 October 2014.
- Schillings, C., Mannstein, H., Meyer, R., (2004). Operational method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data. *Sol. Energy* 76, 475–484
- Schumann, W., Stark, H., McMullan, K., Aminou, D., and Luhmann, H-J., (2002). The MSG System., European Space Agency (ESA) bulletin, ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands, bulletin 111, august 2002: 11-14 (Home Page at : www.esa.int)
- SoDa, Mines ParisTech: Solar radiation data. <http://www.soda-is.com/eng/index.html>.
- SolarGIS, Geomodel Solar. <http://solargis.info/>.
- SolarMed. (2015): Mediterranean area 1km by SolarMed Atlas project, German Aerospace Center (DLR), at <http://www.solar-med-atlas.org/solarmed-atlas/map.htm#t=ghi> (2015) (accessed on November 2015).
- Stephane, P.E., and Mvestracte, M., and Meyer, D.J., (1993). Inverting a bidirectional effects AVHRR data 6th AVHRR data user's meeting Beligrate, 29th june-2nd July.
- Stone, R.J., (1993): Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Sol. Energy*, 51 (4): 289-291.
- Stum, P., Pinty, B., and Ramon, D., (1985). A new technique for inferring surface albedo from datellite observation. *J. Atmos.Sci.*24.

- Šúri M. and Cebecauer T. (2014): Satellite-based solar resource data: Model validation statistics versus user's uncertainty. ASES SOLAR 2014 Conference, San Francisco, 7-9 July 2014.
- Tadili R. et M. N. Bargach, (2005) : Une méthode d'estimation du rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée, *La Météorologie* - n° 50, pp. 46-50, Septembre 2005.
- Trapely, J.D., (1979). Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *J. Appl. Meteorol.* 18, 1172–1181.
- USGS, (1996): GTOPO30: Global 30 arc second elevation data. Online at <http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30.html>, EROS Data Center, Sioux Falls, SD.
- Vernaya C., Pitavala S., Blanc P. (2014): Review of satellite-based surface solar irradiation databases for the engineering, the financing and the operating of photovoltaic systems, *Energy Procedia*. 57, 1383–1391.
- W.M.O., (2008): Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Draft First Supplement to the Seventh Edition, 2008 of the CIMO Guide.
- Wahab M. A., El-Metwally M., Hassan R., Lefevre M., Oumbe A., Wald L. (2009): Assessing surface solar irradiance and its long-term variations in the Northern Africa desert climate using meteosat images, *International Journal of Remote Sensing*, 31(01), 261-280.
- Whitlock C H., Brown D. E., Chandler W. S. and DiPasquale R. C. (2000): Release 3 NASA Surface meteorology and Solar Energy data set for renewable industry use, Paper presented at the 26th Annual Conference of the Solar Energy Society of Canada Inc. & Solar Nova Scotia, Canada, 21- 24 Oct, 2000.
- Wikipedia., Bilan radiatif de la Terre., lien (2015) : https://fr.wikipedia.org/wiki/Bilan_radiatif_de_la_Terre. Accédé en Novembre 2015.
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., and Renne D., (1999): Effective accuracy of the satellite-derived hourly irradiance. *Theor. Appl. Climatol.*, 62:199–207.

ANNEXES

A : Mesure du rayonnement - Norme ISO 9060

B : Réseau de stations météorologiques

C : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

D : Méthodes d'évaluation

E : PUBLICATIONS DE L'AUTEUR

Mesure de rayonnement - Norme ISO 9060

Les pyranomètres (capteur de radiation globale) mesurent la radiation globale. Ils sont également utilisés comme instruments de référence du fait de leur grande précision de mesure [1]. L'utilisation de ces capteurs est cruciale pour les mesures aux applications solaires. Il est recommandé de n'utiliser que des pyromètres certifiés et calibrés pour assurer une bonne précision de mesure. Un socle ajustable permet un bon ajustement horizontal.

Selon la norme ISO 9060 les pyranomètres sont classés: "Énergie solaire - Spécification et classification des instruments de mesure du rayonnement solaire". Cette norme est officiellement approuvée par l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO). Elle distingue trois catégories [1, 2]:

- **Catégorie I (Secondary Standard):** instruments étalons secondaires ISO 9060:1990: C'est une catégorie de performance ISO la plus élevée, ils sont destinée à la recherche scientifique exigeant le plus haut niveau de précision et de fiabilité, comme dans le cas des stations Baseline Surface Radiation Network (BSRN) [2].
- **Catégorie II (First Class):** Des radiomètres conforme à la norme ISO 9060:1990 dédiée aux pyranomètres de première classe, avec des mesures de bonne qualité, utilisés dans des réseaux météorologiques et pour des mesures en environnement (Mesure de l'effet de serre).
- **Catégorie III (Second Class):** Des radiomètres conforme à la norme ISO 9060:1990 dédiée aux mesures de deuxième classe, d'une Qualité de mesure moyenne, conçu pour des mesures de routine dans des stations météorologique et pour des essais sur le terrain.

Toutes ces catégories de radiomètres sont des instruments robustes, fiables, prévus pour supporter des conditions climatiques adverses et adaptés pour l'installation sur terrain.

Les pyranomètres ne nécessitent d'aucune alimentation extérieure. Ils génèrent une tension qui, typiquement, équivaut à $10 \text{ mV kW} \cdot \text{m}^2$. Chaque pyranomètre est calibré individuellement conformément à WRR (World Radiometric Reference) et livré avec le Rapport d'étalonnage correspondant.

Tableau. A.1: Spécifications iso 9060 pyranomètre [3].

Spécificatons ISO 9060 Pyranomètre	Secondary Standard	First Class	Second Class
Temps de réponse :	< 15s	< 30s	< 60s
Zero-offset :			
Offset-A :	+ 7 W/m ²	+ 7 W/m ²	+ 7 W/m ²
Offset-B :	± 2 W/m ²	± 2 W/m ²	± 2 W/m ²
Non-stabilité :	± 0.8%	± 1.5%	± 3%
Non-linéarité :	± 0.5%	± 1%	± 3%
Réponse directionnelle (pour le direct) : directe ≈ 1000 W/m²	± 10 W/m ²	± 20 W/m ²	± 20 W/m ²
Sélectivité spectrale :	± 3%	± 5%	± 10%
Réponse en température : (de -10 à +40°C)	2%	4%	8%
Réponse en inclinaison : directe ≈ 1000 W/m²	± 0.5%	± 2%	± 5%

REFERENCES :

[1] WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Draft First Supplement to the Seventh Edition (2008) of the CIMO Guide.

[2] McArthur L. Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual, (Version 1.0), WMO/TD No. 879. Geneva, Switzerland: World Climate Research Program, WMO, 1998.

[3] ISO-9060 Standard & Pyranometer Measurement Accuracy (2014). Consulté en Avr 2014 http://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pres/SOLAR2012_0829_presentation.pdf

Tableau B.1: Coordonnées géographiques des stations météorologique.

Code OMM	Station	Latitude	Longitude	Altitude
60620	Adrar	27,88	-0,28	263
60560	Ain_Sefra	32,77	-0,60	1058
60360	Annaba	36,83	7,82	4
60468	Batna	35,55	6,18	1052
60571	Bechar	31,62	-2,23	773
60402	Bejaia	36,72	5,07	2
60602	Beni_Abbes	30,00	-2,17	499
60518	Beni_Saf	35,30	-1,35	68
60525	Biskra	34,80	5,73	87
60444	Bordj_Bou_Argeridj	36,07	4,77	928
60425	Chlef	36,22	1,33	143
60390	Dar_El_Beida	36,72	3,25	25
60670	Djanet	24,55	9,47	1054
60535	Djelfa	34,68	3,25	1144
60590	El_Golea	30,57	2,87	397
60540	El_Kheiter	34,15	0,07	1000
60559	El_Oued	33,50	6,12	63
60550	Elbayadh	33,67	1,00	1341
60566	Ghardaia	32,38	3,82	450
60611	In_Amenas	30,00	9,41	562
60630	In_Salah	28,00	2,47	293
60549	Mecheria	34,93	-0,43	1149
60457	Mostaganem_Ville	35,88	0,12	137
60467	M'Sila	35,67	4,50	441
60490	Oran_Es_Senia	35,63	-0,60	90
60533	Saida	34,87	0,15	770
60445	Setif	36,18	5,42	1081
60355	Skikda	36,93	6,95	7
60680	Tamanrasset	22,78	5,52	1378
60656	Tindouf	27,67	-8,13	431
60607	Timimoun	29,25	0,28	312
60531	Tlemcen_Zenata	35,02	-1,47	247
60555	Touggourt	33,12	6,13	85

CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE (CAH)

Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est l'une des méthodes statistiques de réduction de l'information, elle repose sur le principe de simplification du nombre de dimensions explicatives des variables en regroupant celles qui se « ressemblent le plus ». Deux types de critères sont principalement utilisés : la corrélation qui définit l'intensité de la relation entre les variables et la covariance qui est un indicateur du sens de variation simultanée des deux variables.

Principe

Cette technique consiste à créer des groupements de variables (colonnes) à partir d'un tableau de données en utilisant des méthodes d'agrégation basées sur la distance des éléments à joindre entre eux. Les classifications font appel à des méthodes algorithmiques récursives, qui peuvent être répétées de façon indéfinie. Il existe plusieurs familles de classifications dont les plus connues sont les classifications descendantes ou ascendantes.

La classification fournit soit une partition en x classes, soit une hiérarchie des partitions (dendrogrammes) contenant $n-1$ partitions. C'est à partir de ces dendrogrammes que l'on pourra définir le nombre de classes. Les méthodes de classifications ascendantes procèdent par agglomérations successives des éléments deux à deux et fournissent une hiérarchie de partitions des éléments agrégés.

Le critère de Ward

Ce critère d'agrégation utilise la variance. Les différentes techniques de la méthode du saut minimal (bien que nécessitant uniquement le calcul des distances une fois pour toutes), présentent l'inconvénient d'induire des effets de chaîne. Un effet de chaîne se traduit par l'agrégation d'individus ayant des distances faibles mais pouvant se situer dans des classes différentes. La forme des classes résultant d'un effet de chaînage est en général allongée. Les techniques d'agrégation selon la variance ont pour but d'optimiser les partitions par des critères non plus de distance mais de calcul d'inertie (variance).

Dendrogramme (Arbre Hiérarchique) :

Le dendrogramme représente de manière claire la façon dont l'algorithme procède pour regrouper les variables puis les sous-groupes. Au final, l'algorithme a progressivement regroupé toutes les observations (Figure. C.1).

La ligne en pointillé représente la troncature effectuée par le logiciel qui permet de se d'identifier les 06 classes homogènes. des résultats présentés ont été réalisé à l'aide du logiciel Statistica®.

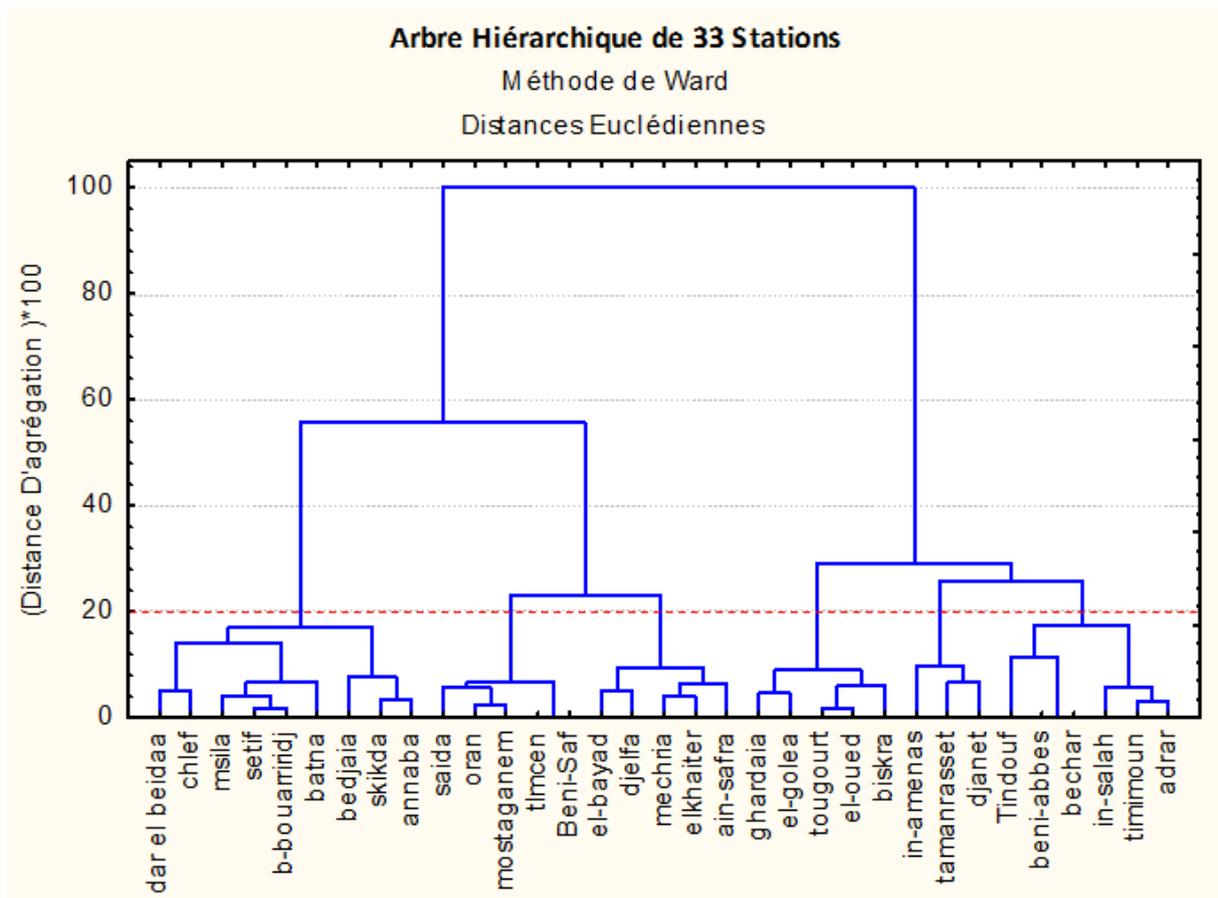


Figure. C.1: Le dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique

Méthodes d'évaluation

Une évaluation objective a été menée en calculant les scores statistiques, utilisant aussi d'autres moyens graphiques, permettent de comparer la valeur des irradiations mesurées et celles estimées.

a) Les scores statistiques :

Pour évaluer les estimations réalisées d'un point de vue statistique, nous avons calculé le coefficient de corrélation, le biais et l'erreur quadratique moyenne.

1. L'erreur moyenne (Mean Bias Error) qui quantifie l'écart moyen entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées. Le MBE reflète la tendance d'ensemble de la grandeur simulée à sa surestimation (MBE > 0) ou à sa sous-estimation (MBE < 0).

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{Sim,i} - X_{Mes,i}) \quad (D.1)$$

$$MBE(\%) = 100 \times \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_{Est,i} - X_{Meas,i}}{X_{Meas,i}} \right) \right) \quad (D.2)$$

Où X est l'indice considéré (Irradiation globale), «Mes» représente les valeurs mesurées et «Est» à celles estimées. N est le nombre de données.

2. L'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE : Root Mean Square Error) : C'est un score qui mesure l'amplitude de l'erreur. elle s'exprime comme suit:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{Sim,i} - X_{Mes,i})^2}{N}} \quad (D.3)$$

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_{Est,i} - X_{Meas,i}}{X_{Meas,i}} \right)^2} \quad (D.4)$$

3. Le coefficient de corrélation R : La corrélation quantifié la correspondance temporelle des variations des champs simulés et celles mesurés.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{Sim,i} - \bar{X}_{Sim})(X_{Mes,i} - \bar{X}_{Mes})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{Sim,i} - \bar{X}_{Sim})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{Mes,i} - \bar{X}_{Mes})^2}} \quad (D.3)$$

Il nous donne le comportement de des simulations par rapport aux mesures, Plus la corrélation est élevée, plus les variations des simulations sont bien placées. Des meilleures simulations ont comme coefficient de corrélation proche de 1.

b) Evaluation graphique :

Une représentation graphique est utilisée dans notre étude, «Le graphe de dispersion» connue sous le nom de **Scatterplot** :

Une manière d'évaluer les résultats, utilisant un moyen graphique qui représente les nuages de points formés du couple des valeurs estimées et celles mesurées dans un seule graphe, ainsi que la droite de régression qui s'ajuste à ce nuage de points. Donnant l'exemple de nuages de points des irradiances globales estimées en fonction des celles mesurées, pour 39168 points.

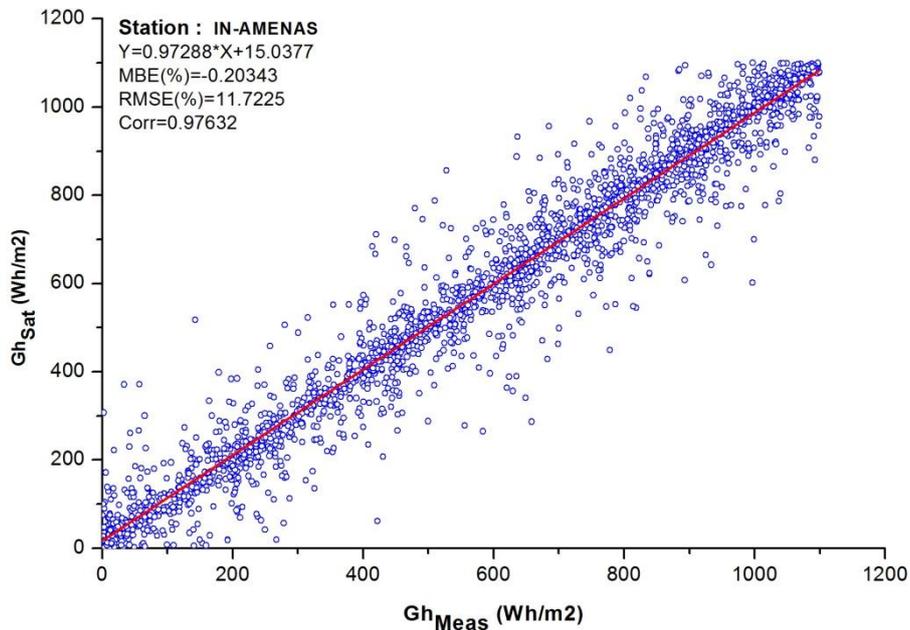


Figure. D.1: Exemple du Graphe de dispersion

Pour chaque Figure, on donne l'équation de la droite de régression, le coefficient de corrélation (R) Ainsi que le MBE et le RMSE.

PUBLICATIONS DE L'AUTEUR

E.1 Publication en rapport avec la thèse

E.1.1 Publication en revue internationale

- Aoun N. and **Bouchouicha K.**, (2017), Estimating daily global solar radiation by day of the year in Algeria., The European Physical Journal Plus, Volume 132, Issue 5, pp. 216-228. (THOMSON)
- **Bouchouicha K.**, Razagui A., Bachari N.I. and Aoun N., (2016), « Hourly global solar radiation estimation from MSG-SEVIRI images-case study: Algeria », World Journal of Engineering, [ISSN 1708-5284], Vol. 13 Iss 3 pp. 266 – 274. (THOMSON)
- **Bouchouicha K.**, Razagui A., Bachari N.I. & Aoun N., (2016), « Estimation of Hourly Global Solar Radiation Using MSG-HRV images », International Journal of Applied Environmental Sciences, ISSN 0973-6077, Volume 11, Number 2 (2016), pp. 351-368. (SCOPUS)
- Razagui A., Bachari N. I., **Bouchouicha K.** & Hadj Arab A., (2016) « Modeling the Global Solar Radiation Under Cloudy Sky Using Meteosat Second Generation High Resolution Visible Raw Data », Journal of the Indian Society of Remote Sensing, ISSN 0255-660X, (in press)(THOMSON).
- Benatallah D., **Bouchouicha K.**, Benatallah A. and Harouz A., (2016), « Development and Modeling of a Geographic Information System solar Flux in Adrar, Algeria », International Journal of System Modeling and Simulation Vol 1(1) Apr-Jun 2016, pp 15-19.
- **Bouchouicha K.**, Razagui A., Bachari N.I. and Aoun N., (2015), « Mapping and Geospatial Analysis of Solar Resource in Algeria », International Journal of Energy, Environment, and Economics, ISSN: 1054-853X, Volume 23, Number 6. (SCOPUS)

E.1.2 Publication en conférence internationale

- **Bouchouicha K.**, Aoun N., Bellaoui M., Oulimar B., Babahadj A., (2017). « La prévision des ressources énergétiques solaires », 3RD CONFERENCE ON ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT., , Adrar – Algeria 07 - 08 February 2017.
- Benatallah D., Benatallah A., **Bouchouicha K.** and Harouz A., (2016), « Solar radiation estimate calculated using two models », 5th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), November 14-17, 2016, Marrakech, Morocco.
- **Bouchouicha K.**, Bellaoui M., Bachari N. I., (2014) : « Cartography of Global solar radiation over Adrar », INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN ENERGY AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING GEEE'14, Soussa - Tunisia 22-23 May 2014.
- **Bouchouicha K.**, Oulimar. B., (2013) : « La chaîne de mesure radiométrique à l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar », INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT ICESD'13, Adrar - Algeria 19-20 February 2013.
- Oulimar B., **Bouchouicha K.**, (2013) : «Modèle radiométrique adéquate pour caractériser l'apport énergétique optimal sur le site d'Adrar», INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT ICESD'13, Adrar - Algeria 19-20 February 2013.

E.2 Autre publication hors du contexte de la thèse

E.2.1 Publication en revue internationale

- Bellaoui M., Hassini A., **Bouchouicha K.**, (2017) « Pre-seismic anomalies in remotely sensed land surface temperature measurements: The case study of 2003 Boumerdes earthquake », *Advances in Space Research*, Vol. 59, Iss 10, pp. 2645-2657. (THOMSON)
- Aoun N., Nahman B., Chenni R. & **Bouchouicha K.**, (2015) « Effect of weather conditions on the energy and exergy efficiencies of mono-crystalline photovoltaic module », *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* 15, 61–67, 2015. (SCOPUS)
- Aoun N., Chenni R. and **Bouchouicha K.**, (2014) « Experimental and Validation of Photovoltaic Solar Cell Performance Models in Desert Climate », *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 492, pp 135-142, 2014, (ISSN: 1662-7482). (SCOPUS)
- Aoun N., Nahman B., Chenni R. and **Bouchouicha K.**, (2014) « A Detailed Modeling of a Five Parameters Model for Photovoltaic Modules », *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 4, pp. 54-59, 2014, (ISSN: 2249-6645). (SCOPUS)
- Razagui A., **Bouchouicha K.** and Bachari N.E.I., (2013): « Cloudy simulation algorithm in RTTOV using Aladin forecasting output », *Advances in Modelling B Signal Processing and Pattern Recognition* Vol. 56 N°1-2, 2013.
- **Bouchouicha K.** and Bachari N. I., (2012) : « Simulation of a clear sky satellite image in water vapor and infrared satellite M.S.G channel's », *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°4, 2012, 671 – 679
- Razagui A., **Bouchouicha K.** and Bachari N.E.I., (2011): « Cloud type identification algorithm to simulate MSG infrared radiance using the Radiative Transfer Model RTTOV and ALADIN forecasting output », *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 14 N°4, 601–612.
- Bandou F., Hadj Arab A., **Bouchouicha K.** et Zerhouni N., (2011) : « Diagnostic de pannes d'un système de pompage photovoltaïque », *Revue des Energies Renouvelable*, Vol.14, N°3.

E.2.2 Communication internationale

- Nouar Aoun, Ismail Tabet, **Kada Bouchouicha** et Nahman Boukheit., (2016) : « Comparaison entre différentes méthodes pour la détermination des paramètres électriques d'un module photovoltaïque », The 4th International Seminar on New and Renewable Energies., Ghardaïa Algeria 24-25 October 2016.
- Benmoussat A., Ouaridhene A., Zamaki M. and **Bouchouicha K.**, (2015) : « Study on the effect of illumination and the temperature of silicon single-crystal and polycrystal in solar conversion », THIRD EURO-MEDITERRANEAN MEETING ON FUNCTIONALIZED MATERIALS, EMM-FM 2015, Hammamet, Tunisia, September 9-13, 2015
- Nouar A., Chenni R., **Bouchouicha K.**, (2013): «Experimental and validation of photovoltaic solar cell performance models in desert climate», The 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGENIRING AND APPLICATION, Turkey 24-25 October 2013.
- **Bouchouicha K.**, Bachari N. I., (2012) : « Simulation of a clear sky satellite image », INTERNATIONAL CONGRESS ON TELECOMMUNICATION AND APPLICATION'12, Université de Bejaïa, Bejaïa - Algeria 11-12 April 2012.
- Maouedj. R, **Bouchouicha. K.**, Benyoucef. B, (2011): « Evaluation of the wind energy potential in the Saharan sites of Algeria », 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING (EEEIC 2011), Rome, Italy 8-11 May 2011.

نمذجة متعددة الطيف لصور الأقمار الإصطناعية

تطبيق : تكيم ميزانية طاقة الأرض مع الغلاف الجوي

ملخص

موضوع هذه الأطروحة دراسة التغير الزمكاني لمكونات ميزانية طاقة الإشعاع الشمسي على سطح الأرض، ولا سيما تقدير نسبة وضاءة سطح الأرض (Albedo) و الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الأرض باستخدام البيانات متعددة الطيف ناتجة عن صور لأقمار إصطناعية ثابتة المدار الجغرافي MSG2. في المرحلة الأولى قمنا بمحاكاة نسبة الوضاءة لسطح الأرض باستخدام نموذج إشعاعي مبسط (Radiative Transfer Model). بعدها باستعمال صور الطيف المرئي عالي الدقة للقمر الاصطناعي، و بتطبيق طريقتين مختلفتين قمنا بتقدير الإشعاع الكلي و مقارنة النتائج مع قياسات على سطح الارض خلال سنة 2010 لخمس محطات واقعة في أماكن مختلفة من الجزائر. النتائج المقدرة للأشعة الشمسية الكلية، الساعية وكذا اليومية جد هامة و مشجعة بالمقارنة مع نتائج دراسات و أبحاث سابقة. في الأخير تم انجاز و تحليل خرائط شهرية و سنوية للوضاءة الارضية المقدرة و كذا الإشعاع الكلي الأفقي شملت كل التراب الوطني.

الكلمات المفتاحية : صور أقمار إصطناعية متعددة الطيف، ميزانية طاقة الإشعاع الشمسي، نسبة الوضاءة الأرضية، الإشعاع

MODELISATION MULTISPECTRALE DES IMAGES SATELLITAIRE

Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère

Résumé :

Cette thèse porte sur l'étude de la variabilité spatio-temporelle des différentes composantes du bilan énergétique solaire au niveau de la surface terrestre, plus particulièrement sur l'estimation de l'albédo de surface et du rayonnement global incident au sol, utilisant des données multi-spectrales issues du satellite géostationnaire MSG2 (Meteosat Second Generation). Dans ce contexte, une estimation de l'albédo de surface a été réalisée utilisant une solution approximative d'un modèle de transfert radiatif. Ensuite, la performance des deux approches d'estimation du rayonnement global à partir des images du canal HRV (High-Resolution Visible) a été évaluée par rapport aux mesures radiométriques au sol réalisées dans cinq stations situées dans différentes régions du territoire Algérien, au cours de l'année 2010. Les résultats des estimations des valeurs horaires et journalières des irradiations solaires globales sont très encourageants et prometteurs par rapport à la littérature existante. Une cartographie annuelle et mensuelle de l'albédo de surface et du rayonnement global horizontal couvrant l'ensemble du territoire national a été produite, et une analyse géospatiale de ces deux paramètres est réalisée sur cette base.

Mots clés : images multispectrale MSG, Bilan énergétique Solaire, Albédo, Irradiation.

MULTISPECTRAL MODELLING OF SATELLITE IMAGES

Application : Quantification of the ground-atmosphere energy budget

Abstract :

This thesis focuses on study of spatio-temporal variability of the various components of solar energy budget at the earth's surface, especially the estimation of ground albedo and solar radiation incident on the surface using MSG2 multispectral satellite data. In this context, an estimate of the surface albedo has been achieved using form of the atmospheric radiative transfer Model (RT). Then, an approximate the evaluation of two approaches for estimating global solar radiation has been carried out by comparing the estimated values with experimental data performed in five radiometric stations located in different regions of Algerian territory, during the Year 2010. The estimation of the hourly and daily global solar radiation shows promising results compared with the current literature. Finally, the annual and monthly maps covering entirely the territory have been generated showing the spatial distribution and temporal variation of surface albedo and global solar irradiation on horizontal surfaces, and preliminary geospatial analysis was performed.

Keywords : Multispectral MSG images, Solar energy budget, Albedo, Irradiation