



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE AFRICANE AHMED DRAIA ADRAR  
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIES  
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE

# Thèse

En vue de l'obtention du

Diplôme de Doctorat en science

Option : Physique des matériaux

Présenté par : Djelloul BENATIALLAH

## Intitulé

*Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie*

Soutenu le : 21/10/2019

*Devant le Jury Composé de :*

Président :	Mr. Messaoud HAMOUDA	Professeur	Université Adrar
Promoteur :	Mr. Ali BENATIALLAH	Professeur	Université Adrar
Examineur :	Mlle. Lahouaria BOUDAOU	MCA	Université Adrar
Examineur :	Mr. Rachid MAOUEDJ	MRA	URERMS
Examineur :	Mr. Samir MOUHADJAR	MRA	URERMS
Examineur :	Mr. Miloud BENMEDJAHED	MRA	URERMS

Année universitaire 2018 / 2019

# Remerciements

*Avant tout, je remercie notre Dieu le tout puissant de m'avoir donnée la force d'atteindre mon but et d'accomplir mon travail.*

*Que mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon directeur de thèse Monsieur **Ali BENATIALLAH**, professeur à l'université d'Adrar, qui a assuré l'encadrement de ce travail. Je lui exprime toute ma reconnaissance pour sa confiance en mon travail, sa patience et les nombreux conseils qu'il m'a prodigués.*

*Mes remerciements vont également à Mr. **Messaoud HAMOUDA** Professeur à l'université d'Adrar, a bien voulu présider ce jury de thèse.*

*Mes remerciements vont également à Mlle. **Lahouaria BOUDAUD** maître de conférences A à l'université d'Adrar, Mr. **Rachid MAOUEDJ**, Mr. **Samir MOUHADJAR** et Mr. **Miloud BENMEDJAHED** Maîtres de recherche A à URERMS, qui m'ont fait l'honneur par leurs participations à l'évaluation scientifique de ce travail et en tant que partie de ce jury.*

*Je tiens à le remercier très vivement Mr. **Kada BOUCHOUICHA** maitre de Recherches A à URERMS pour les encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce travail, pour ces conseils scientifiques et de sa disponibilité sans limite, mille mercis !!!*

*Je souhaite également remercier mes collègues de l'université, laboratoires LEESI, LDDI et URERMS.*

*Mes remerciements vont également tous les personnes qui n'ont pas été cité et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail.*

## **DEDICACES**

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents.*

*A mes frères et sœurs.*

*A ma femme et mes enfants.*

*A tous mes amis.*

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

## **Résumé**

La connaissance de gisement solaire et le rayonnement reçue au sol est une tâche très important pour la conception et le dimensionnement des systèmes solaires dans différents domaines tel que la production de l'électricité, chaleur...etc. En outre, les mesures du rayonnement solaire sont limitées à quelques zones seulement dans l'Algérie. Ainsi, on a recours à des approches théoriques pour évaluer le gisement solaire sur un lieu donné. Il est préférable d'estimer la quantité du flux solaire et de généraliser le modèle pour tout les régions ayant des conditions similaire. Plusieurs méthodes existent pour estimer de manière opérationnelle le rayonnement solaire au sol à partir de l'appelle de plusieurs modèles physiques, statistiques, intelligence artificielle et par la logique Floue ...etc.

Le but de la présente thèse est la détermination du gisement solaire à travers l'étude, modélisation et simulation en particulier les modèles physique, méthodes de l'intelligence artificielle et le traitement des images satellite, la création et développement d'un système d'information géographique (SIG) permettant l'intégration des données et l'estimation du flux solaire sur les cartes géographiques. Ensuite évalue la performance de ces modèles en se basant sur la validation des résultats par les données expérimentales, qui sont essentiels pour la conception et le dimensionnement de tout système utilisent l'énergie solaire, nous utiliserons des données et images réceptionnées de Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar. Les résultats d'estimation des valeurs horaires et journalières du rayonnement solaire de certains modèles sont très satisfaisants.

**Mots clés :** Gisement solaire, Intelligence artificielle, Images satellitaire, Réseaux de neurone, CSP, SIG.

## **ABSTRACT**

The solar field knowledge and the radiation received on the ground is a very important task for both the sizing and the design of solar systems in different fields such as the production of electricity, heat ... etc. In addition, the solar radiation measurements of solar radiation are limited to only a few areas in Algeria. Thus, theoretical approaches are used to evaluate the solar deposit at a given location. It is most excellent to estimate the amount of solar flux and generalize the model for all regions at similar conditions. Several methods exist to estimate and predict operationally ground solar radiation from the call of several physical models, statistics, and artificial intelligence and by fuzzy logic and others.

The aim of the present thesis is the determination of the solar field through the study, modeling and simulation especially the physical models, methods of artificial intelligence and the processing of satellite images, the creation and development of a geographical information system (GIS) solar allowing the integration of the data and the estimation of the solar flux on the geographical map. Then evaluate the performance of these models based on the validation of results by experimental data, which are essential for the design and sizing of any system using solar energy, we will use data and images received from Renewable Energy Research Unit in Saharan Region of Adrar. The results of the hourly and daily solar radiation estimations of some models are satisfactory.

**Key words:** Solar field, Artificial intelligence, Satellite images, Neural networks, CSP, GIS.

## المخلص

تعتبر معرفة مجال الطاقة الشمسية والإشعاع الذي يتم تلقيه على الأرض مهمة للغاية في تحديد تصميم وتثبيت الأنظمة الشمسية في مجالات مختلفة مثل إنتاج الكهرباء والتسخين الحراري وغيرها، من جهة أخرى إن قياسات الإشعاع الشمسي تقتصر على مناطق قليلة فقط في الجزائر، وبالتالي يتم استخدام النهج النظرية لتقييم الإشعاع الشمسي في موقع معين، حيث من الأفضل تقدير كمية الإشعاع الشمسي وتعميم النموذج في جميع المناطق في ظروف مماثلة، توجد عدة طرق لتقدير وتوقع الإشعاع الشمسي الأرضي من خلال استخدام العديد من النماذج الفيزيائية، الذكاء الاصطناعي والمنطق الضبابي وغيرها.

الغرض من هذه الأطروحة هو تحديد المجال الشمسي من خلال الدراسة، النمذجة والمحاكاة خاصة النماذج الفيزيائية، طرق الذكاء الاصطناعي ومعالجة صور الأقمار الصناعية وإنشاء وتطوير نظام معلومات جغرافي الذي يسمح بدمج البيانات وتقدير التدفق الشمسي على الخريطة الجغرافية، ثم تقييم أداء هذه النماذج بناء على التحقق من صحة النتائج الضرورية مقارنة بالبيانات التجريبية، بغية تصميم وتثبيت أي نظام يستخدم الطاقة الشمسية، سوف نستخدم البيانات والصور الواردة من وحدة الطاقة المتجددة بأدرار، لقد وجد أن نتائج تقدير الإشعاع الشمسي الساعي واليومي لبعض النماذج المدروسة جد مرضية.

**الكلمات المفتاحية:** الإشعاع الشمسي ، الذكاء الاصطناعي ، صور الأقمار الصناعية ، الشبكات العصبية ، التسخين الحراري.

# Sommaire

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>II</b>
Liste des figures .....	xi
Liste des tableaux .....	xiii
<b>NOMENCLATURE .....</b>	<b>xiv</b>
LISTE DES SYMBOLES .....	xiv
LISTE DES ABREVIATIONS .....	xv
<b>Introduction Générale .....</b>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE I      GENERALITES SUR LE GISEMENT SOLAIRE .....</b>	<b>5</b>
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2. Source de l'énergie solaire.....</b>	<b>6</b>
<b>I.3 Mouvements de la Terre autour du Soleil .....</b>	<b>7</b>
<b>I.4 Position du soleil par rapport à la terre .....</b>	<b>8</b>
I.4.1 Repérage d'un site à la surface de la terre .....	8
I.4.2 La trajectoire apparente du soleil .....	9
I.4.3 Spectre du rayonnement solaire .....	12
I.4.4 Facteur de correction de la distance terre-soleil.....	13
<b>I.5 Rayonnement solaire à la traversée de l'atmosphère .....</b>	<b>15</b>
I.5.1 L'atmosphère.....	15
I.5.2 Atténuation du rayonnement solaire .....	16
I.5.3 Les nuages .....	18
<b>I.6 L'énergie solaire .....</b>	<b>18</b>
<b>I.7 Le temps .....</b>	<b>20</b>
a) Le temps universel (TU).....	20
b) Le temps solaire moyen (TSM).....	20
c) Le temps solaire vrai (TSV) .....	20
d) Equation du temps .....	21
e) Numéro du jour de l'année J.....	21
f) Lever et coucher du soleil .....	21
<b>I.8 Différentes composantes du rayonnement solaire .....</b>	<b>22</b>
I.8.1 Rayonnement direct.....	23
I.8.2 Rayonnement diffus .....	23
I.8.3 L'albédo .....	24
I.8.4 Rayonnement Global.....	24
I.8.5 Irradiation.....	24
I.8.6 Indice de clarté.....	24

I.9 Conclusion .....	25
I.10. REFERENCES.....	26
<b>CHAPITRE II        MESURE ET TRAITEMENT.....</b>	<b>28</b>
II.1 Introduction.....	29
II.2 Mesures du rayonnement solaire .....	29
II.2.1 Rayonnement solaire direct .....	29
II.2.2 Rayonnement diffus .....	30
II.2.3 Rayonnement global .....	30
II.2.4 Albédo du sol.....	31
II.2.5 Durée d'insolation .....	31
II.2.6 La nébulosité .....	32
II.3 Réseau météorologique Algérien.....	32
II.4 Gisement solaire en Algérie .....	33
II.4.1 La variation spatio-temporelle de La durée d'insolation.....	34
II.5 Mesures par télédétection.....	37
II.5.1 Image numérique en Télédétection et ses Caractéristiques .....	39
II.5.2 Plates-formes et capteurs .....	39
II.5.3 Caractéristiques des satellites - l'orbite .....	40
II.5.4 Traitement numérique des images .....	41
II.6 EUMETSAT .....	42
II-7 Historique des satellites METEOSAT .....	43
II-8 Météosat de seconde génération (MSG).....	43
II.9 Conclusion .....	46
II.10. REFERENCES.....	48
<b>CHAPITRE III    MODELISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE .....</b>	<b>49</b>
III-1 Introduction .....	50
III-2 Données expérimentales .....	51
III-3 Méthodologie.....	53
III-3-1 Modèle Bird & Hulstrom .....	54
III-3-2 Modèle Ashrae.....	57
III-3-3 Modèle Atwater & Ball.....	57
III-4 Statistique et évaluation.....	58
III-5 Résultats et discussion.....	59

<b>III-6 Système d'information géographique du gisement solaire .....</b>	<b>66</b>
III-6-1 Objectif.....	66
III-6-2 Bibliographie des logiciels de gisement solaire.....	66
III-6-3 Description du logiciel GISOL2 (Système d'Information Géographique SOLaire 2) .....	67
<b>III-7 CONCLUSION .....</b>	<b>71</b>
<b>III-8 REFERENCES .....</b>	<b>72</b>
<b>CHAPITRE IV            ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR RESEAUX DE NEURONE ARTIFICIEL(RNA) .....</b>	<b>74</b>
<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>75</b>
<b>IV.2. Procédure de la construction d'un réseau de neurones .....</b>	<b>75</b>
IV.2.1. Collecte d'une base de données .....	76
IV.2.2. Séparation de base de données.....	76
IV.2.3. Choix de l'architecteur de réseau de neurone artificiel.....	77
IV.2.4. Prétraitement de données.....	79
IV.2.5. Phase d'apprentissage .....	80
IV.2.6. Phase de test.....	80
<b>IV.3. Etude des paramètres de construction.....</b>	<b>80</b>
<b>IV.4. Critères utilisé pour l'évaluation les performances des modèles.....</b>	<b>87</b>
IV.4.1. Résultat et discussion .....	87
<b>IV.5. Conclusion .....</b>	<b>98</b>
<b>IV.6. REFERENCES.....</b>	<b>99</b>
<b>CHAPITRE V        ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE A PARTIR DES IMAGES SATELLITAIRE.....</b>	<b>101</b>
<b>V.1. Introduction.....</b>	<b>102</b>
<b>V.2. Méthodes d'estimation du rayonnement solaire à partir d'images satellitaire .....</b>	<b>103</b>
V.2.1. Approche empirique .....	104
V.2.2. Approche analytique.....	105
<b>V.3. Données utilisées .....</b>	<b>107</b>
V.2.1. Les données radiométriques.....	107
V.3.2. Les données satellitaires .....	107
<b>V.4. Méthodologie .....</b>	<b>109</b>
V.3.1. Estimation du rayonnement solaire global (Gc) sous ciel clair .....	110
V.4.2. Estimation du rayonnement solaire global par Héliosat.....	110
V.4.3. Détermination des deux images de référence.....	111
<b>V.5. Résultats et discussion .....</b>	<b>112</b>

V.5.1.	Estimation du rayonnement solaire global instantané.....	112
V.5.2.	Comparaison des valeurs estimées aux mesures au sol .....	115
<b>V.6.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>118</b>
<b>V.7.</b>	<b>REFERENCES .....</b>	<b>119</b>
	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVE .....</b>	<b>120</b>
	Conclusions et perspective .....	121
	<b>BIBLIOGRAPHIES .....</b>	<b>123</b>
	<b>ANNEXES .....</b>	<b>126</b>
	Annexe A: Coordonnées géographiques des stations météorologiques.....	127
	Annexe B : Logiciel MapInfo-Delphi .....	128
	Annexe C : logiciel GISOL2 .....	129
	Annexe D : Réseaux de neurone (Fonction linéaire) .....	131
	Annexe E : Publication de l'auteur .....	133

# Liste des figures

## **Chapitre I :** Gisement solaire

Figure I.1	Spectre du rayonnement solaire	7
Figure I.2	Mouvement de la terre autour du soleil	8
Figure I.3	Coordonnées terrestres	9
Figure I.4	Déclinaison solaire en fonction du jour de l'année	10
Figure I.5	Angle horaire $\omega$ du soleil	11
Figure I.6	Coordonnées solaires selon le repère horizontal	12
Figure I.7	Distribution spectrale du rayonnement solaire	13
Figure I.8	Variations de la distance du terre-soleil pendant l'année	14
Figure I.9	La structure verticale de l'atmosphère	15
Figure I.10	Processus de transmission, d'absorption, de diffusion et de réflexion dans l'atmosphère	17
Figure I.11	Constante solaire	19
Figure I.12	Masse d'air	20
Figure I.13	Variations annuelles de l'équation du temps	22
Figure I.14	Les différents composants du rayonnement solaire	22
Figure I-15	Rayonnement solaire globale, direct et diffus pour le 01 Janvier 2016 à Adrar	24

## **Chapitre II :** Mesure et traitement

Figure II.1	Appareil de mesure le rayonnement direct	29
Figure II.2	L'instrument qui mesure le rayonnement diffus	30
Figure II.3	Le pyranomètre	30
Figure II.4	L'albédomètre	31
Figure II.5	L'héliographe	32
Figure II.6	Réseau pyranométrique (ONM et CDER)	33
Figure II.7	Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	34
Figure II.8	Moyenne annuelle de l'irradiation globale inclinée à la latitude du lieu Cas d'un ciel totalement clair	35
Figure II.9	Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale Cas d'un ciel totalement clair	35
Figure II.10	Moyenne annuelle de la duré d'insolation mesuré - Période 1992-2002	36
Figure II. 11	Moyenne annuelle de la duré d'insolation mesuré	36
Figure II. 12	Processus de télédétection	37
Figure II. 13	Image numérique	39
Figure II. 14	Satellites à orbite Géostationnaire	40
Figure II. 15	Satellites à orbite héliosynchrone	41
Figure II. 16	Carte satellite METEOSAT	42
Figure II.17	Le satellite Météosat Second Génération	43
Figure II.18	Séquence de trois images prises par SEVIRI dans le canal VIS 0.6 (C1) le 19 juin	46

## **Chapitre III :** Modélisation du rayonnement solaire

Figure. III. 1	Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale (GHI)	51
Figure. III.2	Stations météorologique	52
Figure. III.3	Composants du rayonnement global	53
Figure. III-4	Rayonnement solaire globale et l'erreur relative pour le 24 février 2016	60
Figure. III-5	Rayonnement solaire globale et l'erreur relative pour le 17 Mai 2016	60
Figure. III-6	Rayonnement solaire globale et l'erreur relative pour le 03 Aout 2016	61
Figure. III.7	Rayonnement solaire globale et l'erreur relative pour le 13 Novembre 2016	61
Figure. III-8	MAPE durant toute la période d'étude	63

Figure. III-9	rMBE durant toute la période d'étude	63
Figure. III-10	rRMSE durant toute la période d'étude	63
Figure. III-11	Nuage de points du meilleur modèle dans les trois stations et durant toute la période d'étude	64
Figure III-12	L'interface générale du logiciel GISOL2	68
Figure III.13	Carte SIG de la région d'Adrar	69
Figure III.14	Informations du site d'Adrar	69
Figure III.15	Modélisation de l'éclairement solaire au différent site de la région	70
Figure III.16	Carte thématique d'éclairement solaire de la région d'Adrar	71

#### **Chapitre IV : Prédiction du rayonnement solaire par Réseaux de neurone artificiel (RNA)**

Figure IV. 1	Flux de base pour la conception d'un modèle de réseau neuronal artificiel	77
Figure IV.2	Structure d'un neurone artificiel	78
Figure IV.3	Architecture de l'MLP associé au modèle 6	82
Figure IV.4	Coefficient de corrélation du Modèle 1	83
Figure IV.5	Coefficient de corrélation de Modèle 2	83
Figure IV.6	Coefficient de corrélation de Modèle 3	84
Figure IV.7	Coefficient de corrélation de Modèle 4	84
Figure IV.8	Coefficient de corrélation de Modèle 5	85
Figure IV.9	Coefficient de corrélation de Modèle 6	85
Figure IV.10	Coefficient de corrélation de Modèle 7	86
Figure IV.11	Coefficient de corrélation de Modèle 8	86
Figure IV.12	Coefficient de corrélation de Modèle 9	87
Figure IV.13	Interface de MLP entrainement de réseau de neurone de fonction linéaire	89
Figure IV.14	Interface de MLP entrainement de réseau de neurone de fonction Sigmoidale logistique	89
Figure IV.15	Interface de MLP entrainement de réseau de neurone de la fonction Tangente Hyperbolique	90
Figure IV.16	Courbe d'indicateur RMSE	98
Figure IV.17	Courbe d'indicateur R	98
Figure IV.18	Courbe d'indicateur MAPE	99

#### **Chapitre V : Prédiction du rayonnement solaire par Imagerie satellitaire**

Figure V.1	Pyranomètre utilisé pour la mesure de rayonnement solaire global	108
Figure V.2	Le satellite Météosat Second Génération	109
Figure V.3	Zone d'étude extraite d'une image globale	110
Figure V.4	Les différentes étapes à suivre pour estimer l'irradiation solaire globale au sol	110
Figure V.5	Image de référence ciel nuageux	111
Figure V.6	Image de référence ciel clair	111
Figure V.7	Estimation du rayonnement solaire global de la station d'Adrar les 08, 09, 21 et 22 Février 2013 (ciel clair)	114
Figure V.8	Estimation du rayonnement solaire global de la station d'Adrar les 15, 19, 23 et 26 Février 2013 (Ciel nuageux)	114
Figure V.9	Variation du rayonnement solaire global et l'indice de clarté Kc (17 Février 2013)	115
Figure V.10	Corrélation entre données journalières estimées et mesurées	117
Figure V.11	Données mesurées et calculées d'irradiations horaires globales horizontales (Février 2013)	118

## Liste des tableaux

Tableau I.1	Classification des nuages selon l'altitude	18
Tableau I.2	Liste des jours types par mois proposés	21
Tableau II.2	Potentiel solaire en Algérie	34
Tableau II.3	Caractéristiques et objectifs principaux des 12 canaux de prise d'images de SEVIRI	45
Tableau III.1	Coordonnées géographiques des sites	52
Tableau III.2	Caractéristiques des instruments solaires utilisés pour les trois sites	53
Tableau III.3	Coefficient de turbidité d'Angstrom	55
Tableau III.4	A, B et C sont les valeurs recommandées par le modèle Ashrae	57
Tableau III.5	Scores statistiques de MBE, RMSE et R pour tous les jours de cette étude sur trois sites	62
Tableau III-6	Résultats de l'analyse statistique	64
Tableau III.7	Quelques logiciels de gisement solaire	67
Tableau IV.1	Paramètres utilisés	82
Tableau IV.2	Différents modèles utilisé pour l'entraînement du réseau de neurone	82
Tableau IV.3	Différents coefficient de corrélation des modèles utilisé pour l'entraînement du réseau de neurone	82
Tableau IV.4	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée	90
Tableau IV-5	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée	91
Tableau IV.6	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée	92
Tableau IV.7	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone et paramètre d'entrées dans la couche cachée	92
Tableau IV.8	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée	92
Tableau IV.9	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée	93
Tableau IV.10	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée	94
Tableau IV.11	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone et paramètre d'entrées dans la couche cachée	95
Tableau IV.12	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée	95
Tableau IV.13	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée	95
Tableau IV.14	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée	96
Tableau IV.15	Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone et paramètre d'entrées dans la couche cachée	97
Tableau IV.16	Résultat de comparaison de chaque modèle de fonction	97
Tableau V.1	Coefficients de corrélation R obtenus par la comparaison des irradiances solaires globales horaires estimées du sol et mesures pour le mois de février 2013	116
Tableau V.2	Scores statistiques	

# NOMENCLATURE

## LISTE DES SYMBOLES

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>
$\theta$	Latitude (°)
$\varphi$	Longitude (°)
$z$	Altitude (m)
$\delta$	Déclinaison (°)
$\omega$	Angle horaire ah (°)
$\gamma$	Angle de la hauteur solaire hs (°)
$\xi$	hauteur du plan (°)
$\Psi$	Azimut (°)
$Z'$	Distance zénithale (°)
$C_{t-s}$	Facteur de correction de la terre-soleil (m)
$S_0$	Durée astronomique du jour (h)
$G_0$	Rayonnement solaire extraterrestre ( $W/m^2$ )
$I_0$	Constante solaire ( $W/m^2$ )
$\delta_{exp}$	Angle entre le soleil et surface incliné (°)
$\beta$	Inclinaison du capteur (°)
$i$	Angle d'incidence sur un plan (°)
$\alpha$	Azimut de plan (°)
$\rho$	Albédo
$\lambda$	Longueur d'onde ( $\mu$ )
$I$	Rayonnement direct ( $w/m^2$ )
$D$	Rayonnement diffus ( $w/m^2$ )
$G$	Rayonnement global ( $w/m^2$ )
$J$	Numéro du jour de l'année
$\tau_r, \tau_o, \tau_g, \tau_w, \tau_a$	Transmittances de diffusion Rayleigh, ozone, gaz, eau et aérosols
$m_a$	Masse d'air à la pression réelle
$U_1$	Longueur du chemin optique corrigée en pression de l'eau précipitable (cm)
$K_a$	Epaisseur optique de l'aérosol (cm)
$U_3$	Longueur du trajet optique (cm)
$\theta_z$	Angle zénithal (dégrées)
$F_c$	Coefficient de dispersion de l'atmosphère
$R$	Coefficient de corrélation
$a_w$	L'absorption du rayonnement solaire
$T_{amb}$	Température
BP	Pression atmosphérique
RH	Humidité relative
WS	Vitesse du vent
$\rho^t(i, j)$	Réflectance à l'instant t
$L^t(i, j)$	Luminance observée par le capteur à l'instant t
$K_c$	L'indice de clarté

## LISTE DES ABREVIATIONS

CSP	Concentrated Solar Power
ANN	Artificial Neural Network
UTM	Universal Transverse Mercator
S.I.G	Système d'Information Géographique
U.V	Ultraviolet
I.R	Infrarouge
AM	Air masse
TSV	Temps solaire vrai (heure)
TL	Temps local (heure)
DE	Décalage horaire
ET	Equation du temps
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
ONM	Office National de la Météorologie
RMSE	Root Mean Square Error (erreur quadratique moyenne)
GHI	Global Horizontal Irradiation
MBE	Mean Bias Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
RNA	Réseau de Neurone Artificiel
DHI	Direct Horizontal Irradiation
DNI	Diffus Normal Irradiation
URERMS	Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien
SODA	Simple Ocean Data Assimilation
SKTM	Shariket Kahraba Wa Taket Moutadjadida
GMT	Greenwich Mean Time
CDER	Centre de développement des énergies renouvelables
MSG	Meteosat Second Génération

# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction Générale

Récemment, la demande en énergie produite à partir du pétrole, du gaz et de l'uranium a augmenté assez rapidement pour pouvoir être utilisée dans le chauffage, le refroidissement et la production de l'électricité. Il a été observé que de nombreuses sources naturelles ont été épuisées au cours des dernières décennies, notamment des sources de combustibles à base de pétrole et de gaz, en raison du développement rapide des applications industrielles. Dans l'économie mondiale, une communauté de chercheurs en pleine croissance se concentre sur le domaine des énergies renouvelables, notamment le solaire, dans le but de fournir de l'énergie à l'avenir. Par conséquent, les chercheurs sont concentrés sur diverses formes d'énergie renouvelable pouvant satisfaire la demande mondiale sans nuire l'environnement. L'énergie solaire est largement disponible presque partout; gratuit, respectueuse de l'environnement et illimitée dans de nombreuses régions du monde, tout en offrant la possibilité économique de répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Dans les systèmes à énergie solaire, les données sur le rayonnement solaire sont extrêmement vitales et sont utilisées dans la conception, dimensionnement et l'optimisation des performances de diverses technologies de l'énergie solaire et l'application sur le terrain.

Cet objectif de dimensionnement et d'installation ne peut être atteint que si les données radiométriques sont disponibles d'une manière continue dans l'espace et dans le temps. La région du sud de l'Algérie et notamment Adrar est l'un des sites les plus favorables à l'utilisation de cette énergie avec un flux moyen qui dépasse  $7 \text{ KWh/m}^2/\text{j}$  et une durée de l'insolation de plus des 3500 heures par ans [1].

Les composantes du rayonnement solaire sur les surfaces horizontales et inclinées sont considérées comme faisant partie intégrante des études sur les performances du système solaire. Cependant, les stations de mesure du rayonnement ne couvrent pas toujours plusieurs sites géographiques. En règle générale, dans de nombreuses régions du monde et en particulier en Algérie, les installations météorologiques permettant d'évaluer le rayonnement solaire sont absentes ou rares, de même les coûts d'investissement et de maintenance de ces stations de mesures étant élevés. Par conséquent, ils doivent être estimés à l'aide de la modélisation et simulation, qui nécessite la connaissance des facteurs de transmission atmosphérique. De nombreux aspects des approches de modélisation pour l'estimation du rayonnement solaire ont été étudiés au cours des dernières années. Un grand nombre d'articles ont été publiés sur ce sujet, développant différents modèles et approches à cet objectif et

utilisant différentes sources de données [2-9]. Ces modèles sont formulés sous des équations similaires et liés aux données des sites, ils doivent être validés avec les valeurs réelles mesurées dans les régions au cours de différentes saisons.

Le premier principal groupe de l'estimation est le modèle physique, qui utilise les équations de transfert radiatif [10-12]. Ces types d'équations reposent sur des solutions analytiques complexes et nécessitent donc un outil mathématique très spécifique permettant de résoudre simultanément un grand ensemble de données.

Quant au second groupe est le modèle paramétrique [13-16], qui a les mêmes principes physiques que le groupe précédent avec un ensemble de paramètres simplifiés. Le modèle paramétrique a amélioré l'expression de la transmittance pour les différents processus d'atténuation dans l'atmosphère, ce qui peut être utilisé pour estimer la composante directe du rayonnement solaire entrant. Le rayonnement diffus calculé à partir de quelques approximations afin de réduire la complexité du processus de diffusion. Enfin, le rayonnement global a été produit en combinant des rayonnements directs et diffus [17].

Le troisième groupe est le modèle de l'intelligence artificielle représenté par le développement du réseau de neurone artificielle (RNA) qui fournissent un mécanisme pour estimer une ou plusieurs sorties de quelques données en entrée, une fonction d'activation utilisée et un certain nombre de couches.

Le quatrième groupe est le modèle d'estimation par le traitement des images satellitaires collectées par les satellites géostationnaires.

Nous nous intéressons dans cette thèse en particulier à la modélisation et simulation du flux solaire par trois modèles physiques en trois zones au sud (Adrar, Tamanrasset, El-Goléa), puis en développons des nouveaux modèles de l'intelligence artificielle qui permettent la prédiction du rayonnement solaire global par traitement de plusieurs modèles créés à partir des réseaux de neurone artificielle pour choisir la meilleure par sa prédiction. Dans ce cadre, on va utiliser comme entrées différents paramètres astronomiques et météorologiques, enfin on va tester et évaluer un modèle de traitement des images satellitaires pour estimer l'irradiation solaire globale dans notre région. Les résultats de ces travaux sont validés pour des données expérimentales de CDER, vu l'importance de ces résultats pour la conception et le dimensionnement de tout système utilisant l'énergie solaire.

Dans ce but le présent travail comporte cinq chapitres qui sont répartis de la façon suivante :

- Le **premier chapitre** est consacré à l'étude du gisement solaire, la structure de l'atmosphère et ces effets sur le rayonnement solaire, avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.
  - La présentation des différents appareils de mesure de diverses composantes de rayonnement solaire, ainsi une description de réseau météorologique et station de mesure en Algérie et la mesure par télédétection de satellite feront l'objet du **deuxième chapitre**.
  - Le **troisième chapitre** contient l'étude et la simulation de trois modèles physique, dans trois régions du sud de l'Algérie, ainsi les résultats des différentes équations pour le calcul du flux solaire et la création et développement d'un système d'information géographique (SIG).
  - Concernant le **quatrième chapitre**, nous avons étudié la possibilité de l'estimation de l'irradiation solaire globale par les réseaux de neurones artificiels (ANN), neuf (09) modèles et trois (03) fonctions d'activation ont été testées.
  - Le **cinquième chapitre** décrit l'estimation du rayonnement solaire à Adrar en utilisant une technique de traitement des images satellitaires collectées par les satellites géostationnaires.
- Enfin, nous terminerons cette thèse par une conclusion générale et perspective qui résume notre manuscrit.

# Chapitre I

## Généralités sur le gisement solaire

## I.1 Introduction

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux ont autant de ressources naturelles capables de produire de l'énergie grâce aux technologies développées par l'homme, leur faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Il existe divers types d'énergies renouvelables qui sont des sources d'énergie inépuisables comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leurs caractéristiques commune est de ne pas produire d'émissions polluantes, et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord mettre le point sur quelques notions astronomiques sur le rayonnement solaire (soleil, nature, intensité...etc.), les différents phénomènes physiques de ce rayonnement, la structure de l'atmosphère et ces effets sur le rayonnement solaire. Ainsi, les différentes composantes du rayonnement solaire.

## I.2. Source de l'énergie solaire

La principale source d'énergie est le soleil, c'est une étoile du système solaire la plus proche de la terre qui est situé à une distance d'environ 150 millions de kilomètres de la terre, le soleil libère d'énormes quantités d'énergies qui, après avoir parcouru cette distance atteignent la surface de la terre, il produit un rayonnement qui peut être assimilé, en première approximation, à celui d'un corps noir à 5800°k. Ce rayonnement émis par le soleil sous forme d'ondes électromagnétiques, et reste environ 8 minute à nous atteindre. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, Les 98% de l'énergie émise se situent dans la bande de longueur d'onde comprise entre 0.25 et 3  $\mu\text{m}$  [1].

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie appelé éclairage énergétique, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [2]. La [figure I.1](#) illustre la distribution spectrale du rayonnement solaire [3].

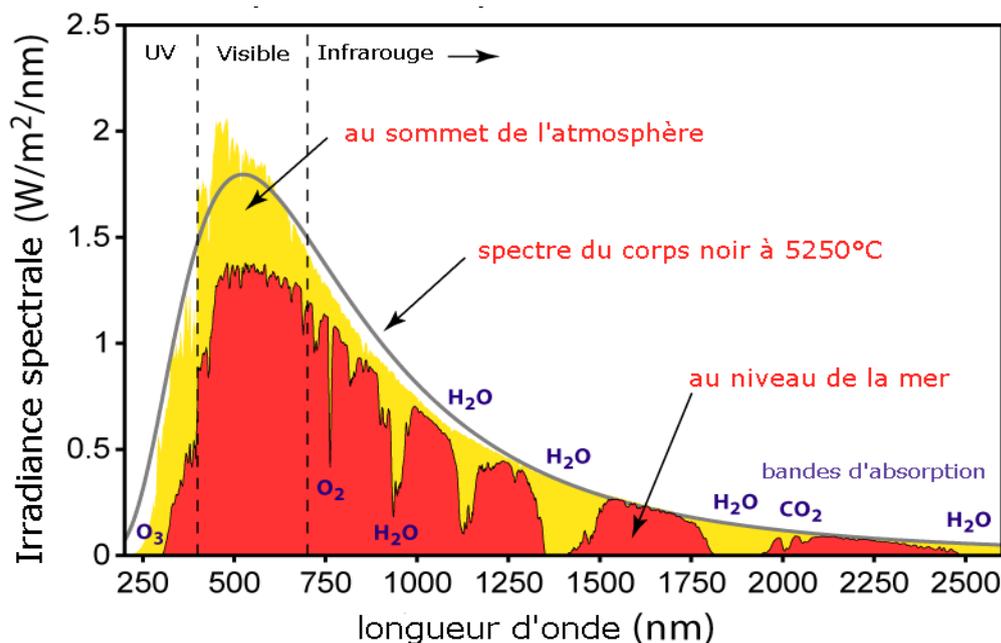


Figure I.1 : Spectre du rayonnement solaire

### I.3 Mouvements de la Terre autour du Soleil

La Terre fait un tour autour du Soleil en un an, dans un plan appelé « éclipseptique ». La Terre tourne 365.25 jours sur elle-même pendant qu'elle fait, dans le même sens, un tour autour du Soleil (Figure I.2). Pendant cette révolution annuelle, l'axe de rotation de la Terre reste parallèle à lui-même, mais est incliné de  $23.5^\circ$  par rapport à la normale au plan de l'éclipseptique.

Le mouvement de la Terre autour du Soleil s'effectue à une vitesse orbitale d'environ 30 km/s, entraînant à chaque année un parcours d'environ un milliard de kilomètres. Du point de vue du pôle Nord de la Terre, cette dernière parcourt son orbite dans le sens antihoraire. Cette direction correspond, à midi, à l'ouest d'un observateur situé sur l'équateur terrestre.

Au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est le plus près du soleil: 147 millions de Km et au solstice d'été qu'elle en est le plus éloigné: 153 millions de Km, la distance moyenne étant de 149,5 millions de Km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 Février) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) à une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle avec la normale du plan de l'éclipseptique [4].

L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné par rapport au plan de l'éclipseptique céleste. On appelle déclinaison  $\delta$  l'angle formé par l'axe Terre -Soleil avec le plan équatorial. La déclinaison varie de  $+23^\circ 27'$  solstice d'été (21 juin), à  $-23^\circ 27'$  solstice d'hiver

# Chapitre I : Gisement Solaire

(23 décembre), elle s'annule deux fois par an les 21 Février et 23 Septembre (ce sont les équinoxes) et elle est responsable des saisons. Les parties diurnes et nocturnes de la journée ont alors la même durée aux équinoxes la déclinaison passe par  $0^\circ$  ( $-23^\circ 27' < \delta < + 23^\circ 27'$ ) [5].

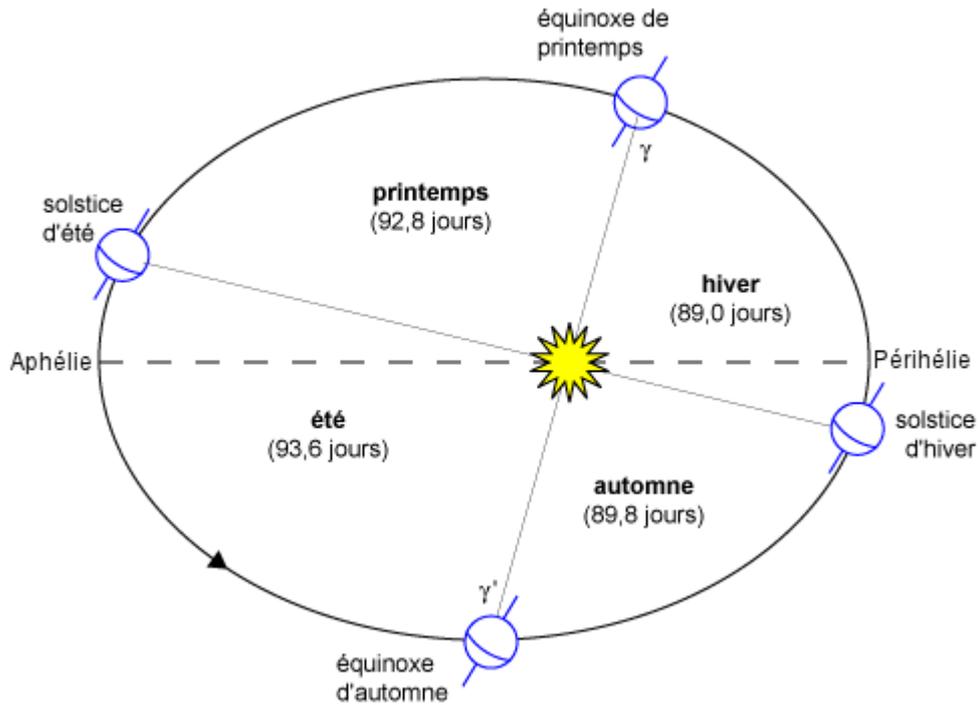


Figure I.2: Mouvement de la terre autour du soleil

## I.4 Position du soleil par rapport à la terre

Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

### I.4.1 Repérage d'un site à la surface de la terre

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

- ✚ La latitude ( $\theta$ ) c'est l'angle  $\theta$  que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial. Si  $\theta > 0$ , le site se trouve dans l'hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud (Figure I.3).
- ✚ La longitude ( $\varphi$ ) c'est l'angle  $\varphi$  formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre  $-180$  (vers l'ouest) et  $+180$  (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même ( $360^\circ$ ), chaque

## Chapitre I : Gisement Solaire

heure représente  $15^\circ$  d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes.

L'altitude ( $z$ ) c'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence [6].

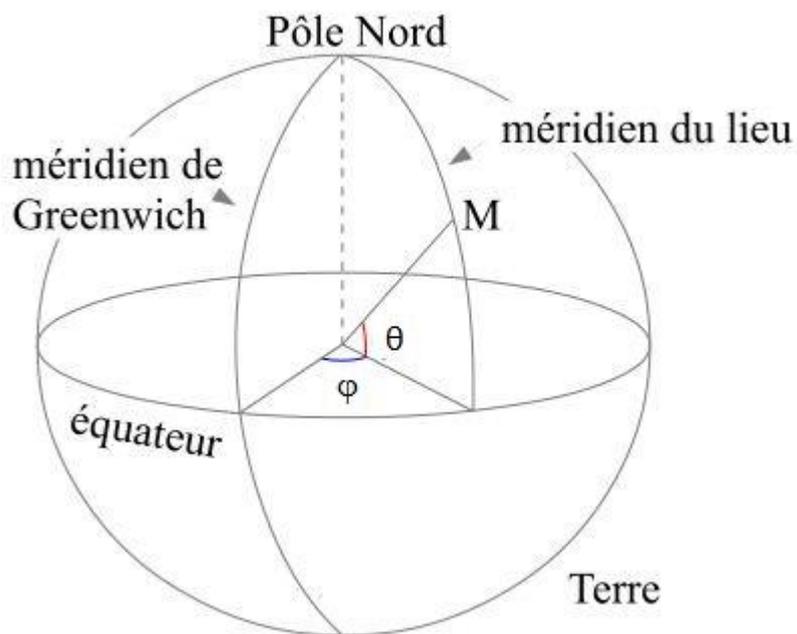


Figure I.3 : Coordonnées terrestres

### I.4.2 La trajectoire apparente du soleil

La position du soleil dans la voûte céleste est repérée à tout instant de la journée par deux systèmes de coordonnées:

#### a) Les coordonnées équatoriales

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure de l'observation. La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont :

# Chapitre I : Gisement Solaire

## • La déclinaison $\delta$

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial, la déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année (Figure I.4). Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper [7].

$$\delta = 23.45 \sin \frac{360}{365} (J + 284) \quad (I.1)$$

Où J est le numéro du jour de l'année de 1 à 365.

La figure suivant montre le changement de la déclinaison solaire en fonction du jour de l'année [22].

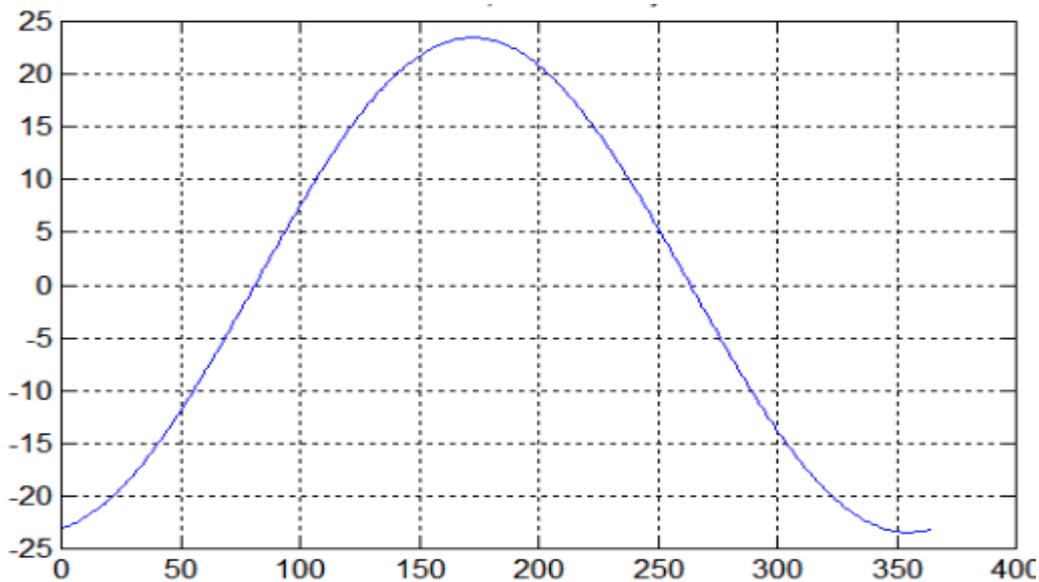


Figure I.4 : Déclinaison solaire en fonction du jour de l'année

## • L'angle horaire $\omega$

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante [8] :

$$\omega = 15 (TSV - 12) \quad (I.2)$$

Où TSV est le temps solaire vrai qui sera décrit dans l'équation (I.14).

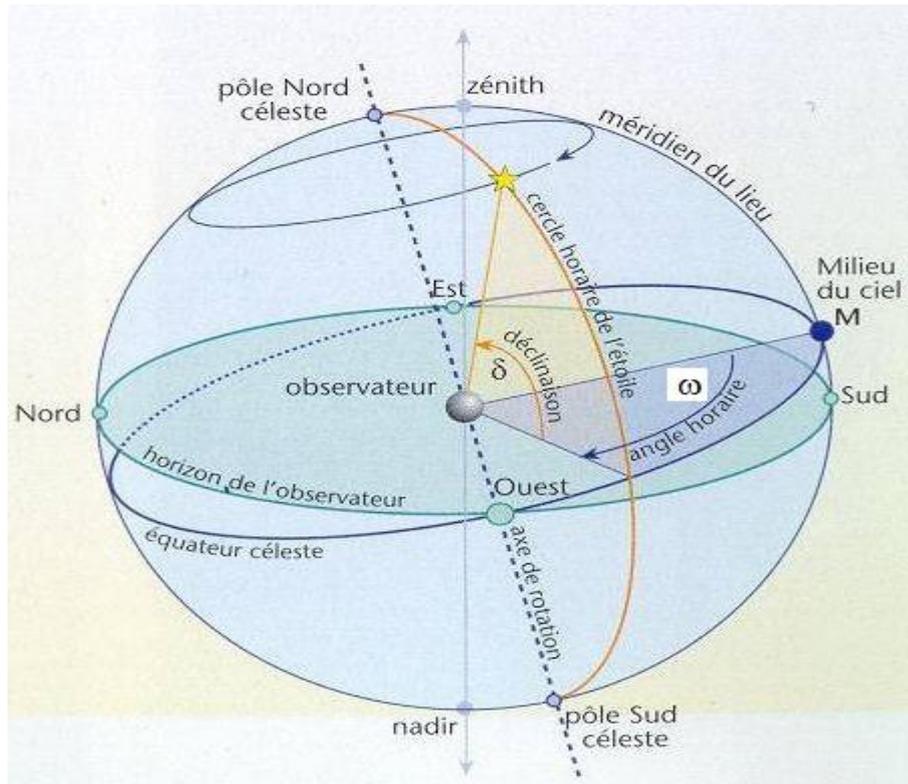


Figure I.5 : Angle horaire  $\omega$  du soleil

## b) Les coordonnées horizontales

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes :

### • L'angle de la hauteur solaire $\gamma$

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal  $\gamma$  varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  vers le zénith et de  $0^\circ$  vers  $-90^\circ$  vers le nadir. L'angle de la hauteur solaire est donné par [9].

$$\sin \gamma = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega \quad (I.3)$$

### • l'azimut $\psi$

L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction sud.

Il se compte de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  à partir du sud dans le sens rétrograde. La relation qui donne l'azimut est donnée ci-dessous:

$$\cos \psi = (\sin \gamma \sin \theta - \sin \delta) / \cos \gamma \cos \theta \quad (I.4)$$

# Chapitre I : Gisement Solaire

## • La distance zénithale $Z'$

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith). L'angle  $Z'$  est complémentaire de  $\gamma$  [9].

$$\cos Z' = \sin \delta \sin \theta + \cos \delta \cos \theta \cos \omega \quad (I.5)$$

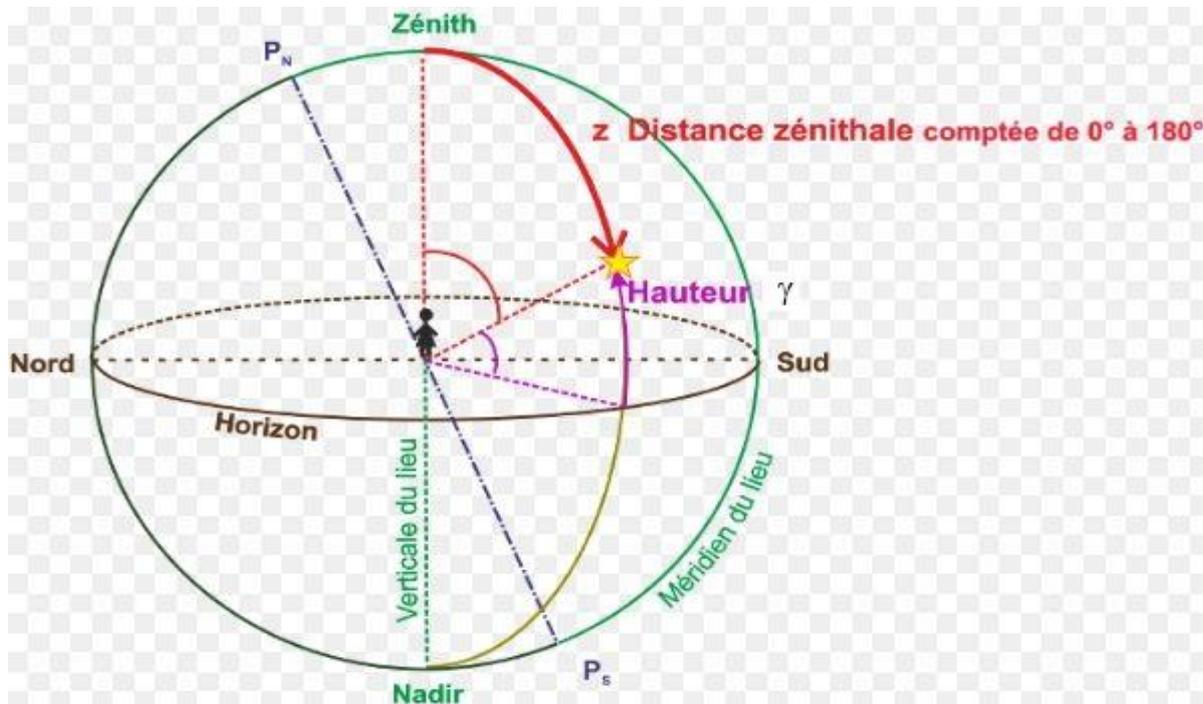


Figure I.6 : Coordonnées solaires selon le repère horizontal

### I.4.3 Spectre du rayonnement solaire

L'émission d'ondes électromagnétiques par le Soleil est convenablement modélisée par un corps noir à 5 800 kelvins, et peut donc être décrit par la loi de Planck. Le maximum d'émission est dans le vert ( $\lambda=504$  nm), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1 % d'ultraviolets.

Arrivé au niveau de la mer, c'est-à-dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, une partie du rayonnement solaire a été absorbée. On peut repérer notamment sur le spectre ci-contre les bandes d'absorption de l'ozone (qui absorbe une partie importante des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau [5].

Le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère, dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne. Lorsque ce

# Chapitre I : Gisement Solaire

rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci.

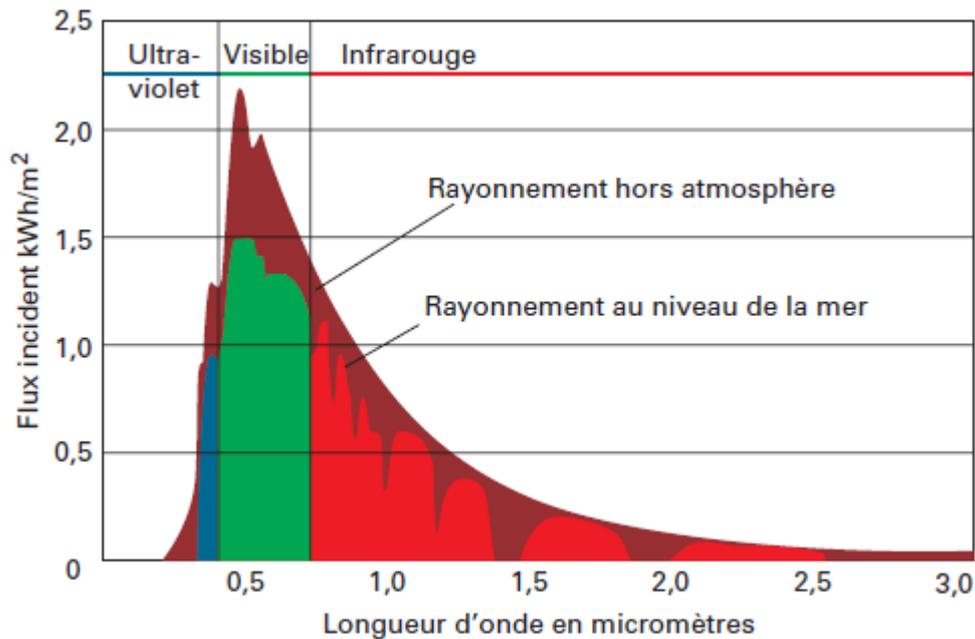


Figure I.7 : Distribution spectrale du rayonnement solaire

## I.4.4 Facteur de correction de la distance terre-soleil

Au cours d'une révolution, la distance entre la terre et le soleil varie sensiblement en raison de la trajectoire elliptique de la terre autour du soleil (voir figures I.2 et I.8). Ce facteur dépend du numéro du jour de l'année  $J$  de 1 à 365, qui est déterminé en utilisant le tableau I.2, et en connaissant le numéro du jour dans le mois, nous avons calculé le facteur correction de la distance terre-soleil ( $C_{t-s}$ ) correspondant à l'aide de l'équation [10]:

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos(0.986(J' - 2)) \quad (I-6)$$

avec:

$$J' = 2\pi J/365.25$$

$J$  : Le numéro du jour de l'année à partir du 1<sup>er</sup> Janvier

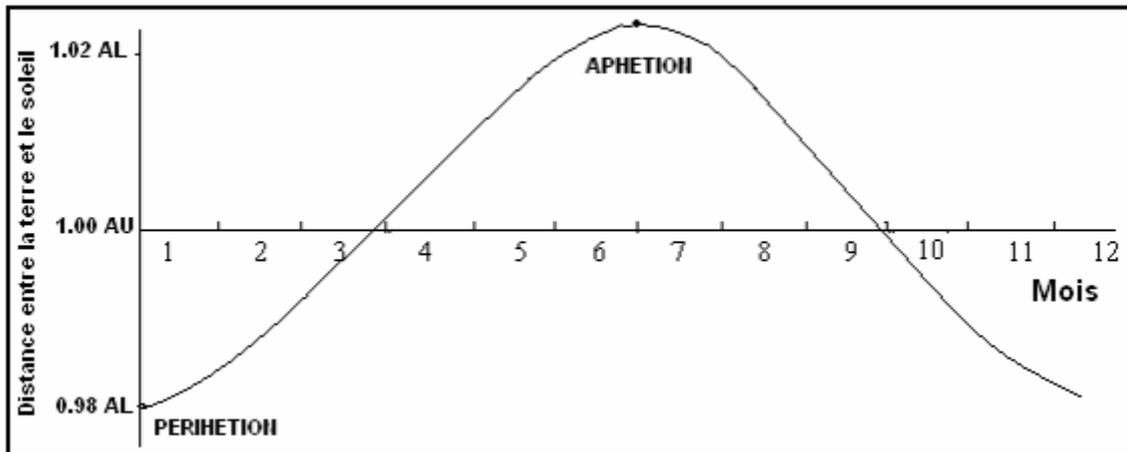


Figure I.8 : Variations de la distance du terre-soleil pendant l'année [11]

- **Durée d'insolation**

La durée d'insolation du jour  $S_0$  est correspond la durée entre le moment du lever de soleil, jusqu'à le coucher de soleil, en absence total de nuages, cette durée égale à la durée astronomique du jour, s'obtient facilement par rapport à l'angle horaire  $\omega$  par l'équation suivants:

$$S_0 = \left(\frac{2}{15}\right) \omega \quad (I.7)$$

- **Rayonnement solaire extraterrestre**

Le rayonnement solaire extraterrestre (hors atmosphère) est le rayonnement solaire qui frappe la surface de la couche atmosphérique. Pour avoir l'irradiation solaire globale ( $G_0$  :  $W/m^2/jour$ ) sur une surface horizontale à la limite supérieure de l'atmosphère est donné par l'équation suivante :

$$G_0 = \frac{24}{\pi} g_0 \left( \cos(\theta) \cos(\delta) \sin(w) + \sin(\theta) \sin(\delta) \frac{\pi}{180} w \right) \quad (I.8)$$

$$g_0 = I_0 \left( 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360J}{365}\right) \right) \quad (I.9)$$

Avec

$I_0$  : Constante solaire ( $W/m^2$ )

## I.5 Rayonnement solaire à la traversée de l'atmosphère

### I.5.1 L'atmosphère

L'atmosphère est composée de couches superposées les unes sur les autres. Depuis le sol, on distingue la troposphère, la stratosphère, puis la mésosphère, suivi de la thermosphère (Figure I.9).

L'air sec est composé de 78% d'azote, de 21% d'oxygène, de 0.9 % d'argon et de 0.03% de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de gaz dont la concentration varie spatialement et au cours du temps, comme la vapeur d'eau H<sub>2</sub>O, le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> ...etc., Chacun des gaz constituant de l'atmosphère absorbe le rayonnement dans des longueurs d'onde sélectives délimitant ainsi de nombreuses bandes d'absorption. On rajoute à cela les aérosols qui sont des particules soit d'origine naturelle, tels que le sable, la suie, les cristaux de glace ou les poussières volcaniques, soit d'origine artificielle telle que celles produites par l'industrie, l'automobile ou le chauffage [5].

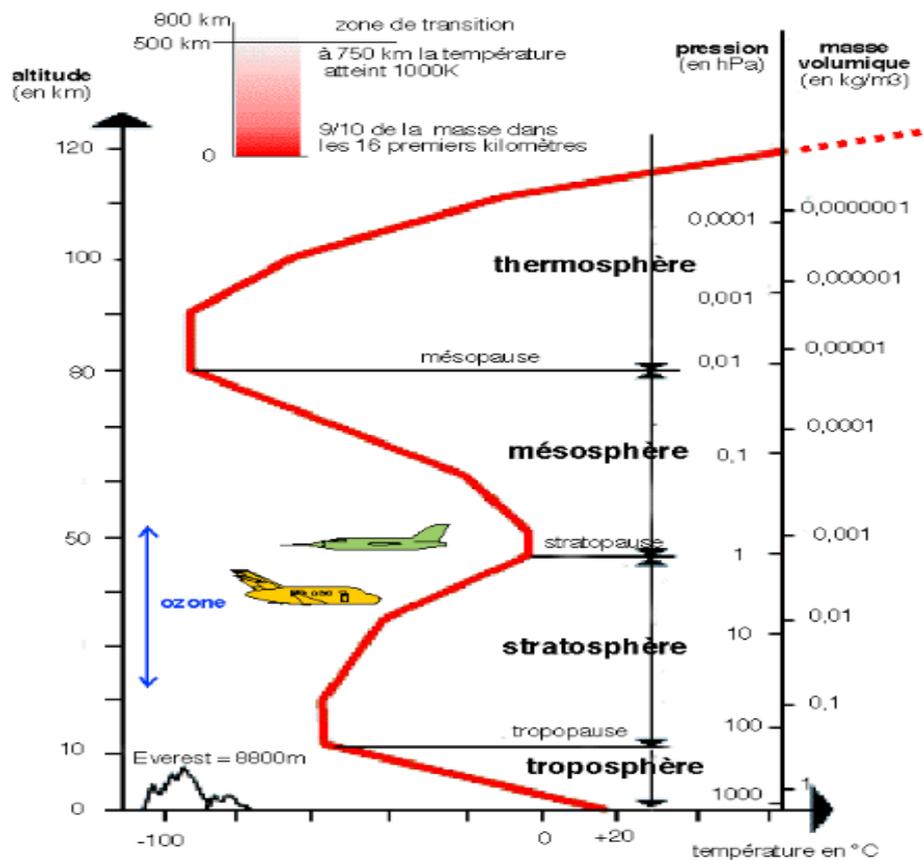


Figure I.9 : La structure verticale de l'atmosphère

## I.5.2 Atténuation du rayonnement solaire

L'atmosphère modifie le spectre du rayonnement solaire à travers les processus d'absorption par les différents gaz, la diffusion par les molécules d'air, les aérosols et les nuages.

### a) L'absorption atmosphérique

L'absorption par les gaz atmosphériques est dite sélective, car elle n'affecte que des radiations de longueurs bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), à l'ozone (O<sub>3</sub>), à l'oxygène (O<sub>2</sub>) et au gaz carbonique (CO<sub>2</sub>).

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

L'absorption propre à la vapeur d'eau est d'environ 10% [12].

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

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

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

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

$$K_r(\lambda) = 0.008735\lambda^{-4} \quad (\text{I.10})$$

## Chapitre I : Gisement Solaire

La diffusion de Mie désigne la diffusion par les particules dont la taille est de même ordre de grandeur que les longueurs d'onde, comme pour la vapeur d'eau et les aérosols. Le coefficient d'extinction s'écrit [14] :

$$K_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (\text{I.11})$$

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

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

Les phénomènes d'absorption et de diffusion par les nuages réduisent considérablement le rayonnement reçu au sol surtout pour les longueurs d'ondes supérieures à  $1 \mu\text{m}$ . Les nuages sont constitués des particules dont les dimensions sont notablement supérieures aux longueurs d'ondes ultraviolets et visibles. C'est ainsi que dans ce domaine du spectre solaire, la diffusion par les nuages est indépendante de la longueur d'ondes [15]. Le taux d'atténuation par les nuages dépend essentiellement de leur épaisseur, leur nature et leur distribution dans le ciel. Une couche de nuages, aussi mince que possible peut renvoyer le rayonnement incident vers l'atmosphère. Quant à l'absorption du rayonnement par les nuages, elle est moins marquée. Les nuages les plus épais n'absorbent qu'environ 8 % de l'énergie incidente. La contribution de ces différents phénomènes est illustrée par [figure I.10](#).

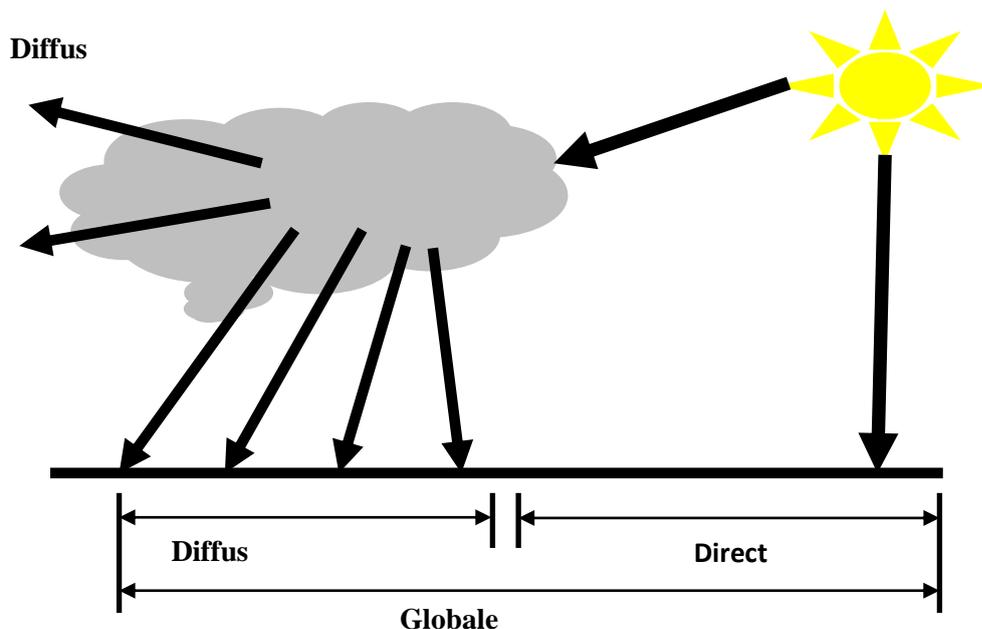


Figure I.10 : Processus de transmission, d'absorption, de diffusion et de réflexion dans l'atmosphère

# Chapitre I : Gisement Solaire

## I.5.3 Les nuages

Un nuage est composé de millions de toutes petites gouttes d'eau ou de cristaux de glace si la température de l'air est très basse, flottant dans l'air. Un nuage se forme lorsque la vapeur d'eau devient liquide, c'est-à-dire lorsque l'air humide se refroidit et que la vapeur condense sur des minuscules particules. Les nuages peuvent être divisés en trois catégories selon le niveau caractéristique d'apparence: nuages bas, nuages de niveau intermédiaire (les nuages d'étage moyen) et les nuages hauts plafonnant à des altitudes avoisinant la dizaine de kilomètres. Les météorologues ont ainsi identifié un nombre limité de formes caractéristiques en fonction de l'altitude et des conditions de formation. Les espèces de nuages se rapportent à une ou plusieurs des caractéristiques suivantes [16]: la forme (nuages en banc, en couches, en nappes, en voile... etc.), la dimension (surface des éléments constitutifs, extension verticale...etc.). Les nuages peuvent être classifiés selon l'altitude (voir [tableau I.1](#)).

**Tableau I.1** : Classification des nuages selon l'altitude

Groupe	Altitude moyenne de la base (m)	Préfixe du nom du nuage
<b>Etage supérieur</b>	6000	Cirr
<b>Etage moyen</b>	2000	Alto
<b>Etage moyen</b>	Du sol à 2000	Stra
<b>A développement verticale</b>	500	Cum

## I.6 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et traversant l'atmosphère, qui absorbe une partie de l'énergie, et parvenant à la surface de la Terre.

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du Soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous la forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- l'énergie solaire envoyée par le Soleil et arrivant au voisinage immédiat de la Terre (fluctuations décennales, saisonnières, et ponctuelles) ;
- la nébulosité (nuages, brouillards...etc.), qui varie énormément d'un endroit à un autre. Celle-ci est forte à très forte dans les régions océaniques tempérées et subpolaires ainsi que dans les régions équatoriales alors qu'elle est faible à très faible dans les régions arides subtropicales ou polaires ;

## Chapitre I : Gisement Solaire

- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du Soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 149.5 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à  $1367 \text{ W/m}^2$  [17].

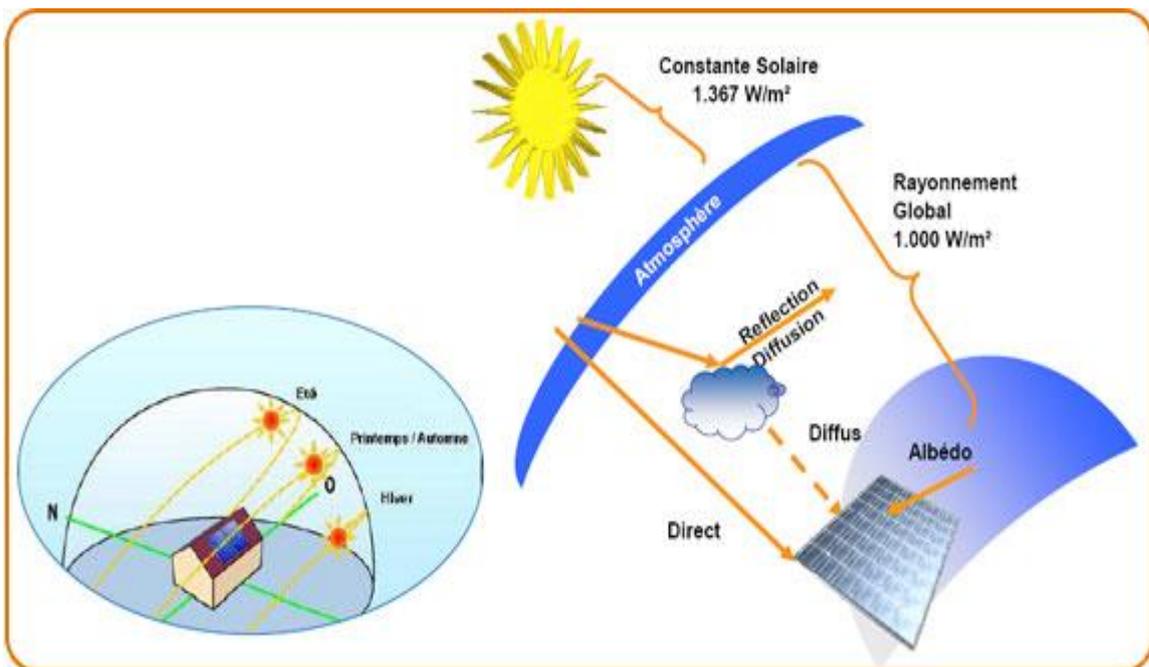


Figure I.11 : Constante solaire

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 \text{ W/m}^2$  il décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air (Figure I.12), perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000 \text{ W/m}^2$ .

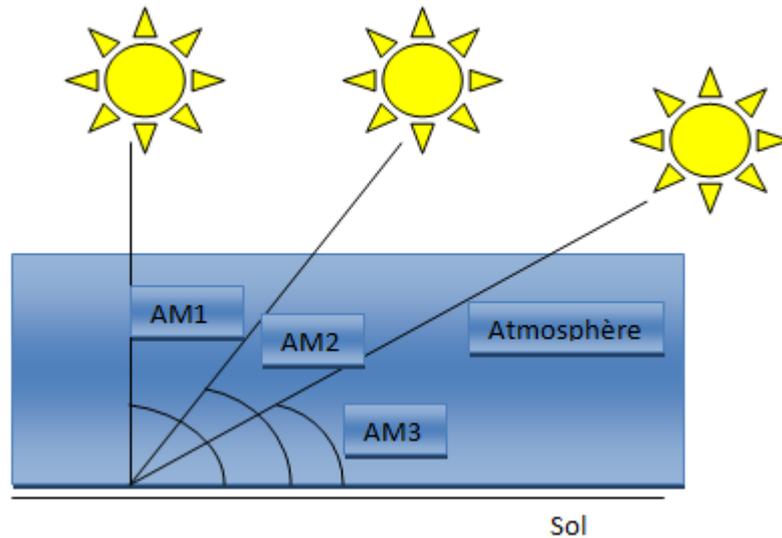


Figure I.12: Masse d'air

### I.7 Le temps

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

#### a) Le temps universel (TU)

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

$$TL = TU + \text{décalage} \quad (I.12)$$

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

#### b) Le temps solaire moyen (TSM) : Il se déduit de l'équation suivante :

$$TSM = TU + \varphi/15 \quad (I.13)$$

Avec TSM en heure.

**c) Le temps solaire vrai (TSV) :** C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil, ce temps est indiqué par les cadrans solaires et les héliographes.

## Chapitre I : Gisement Solaire

---

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (I. 14)$$

Où  $\omega$  est l'angle horaire en degré.

### d) Equation du temps

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

$$E_t = 9.9 \sin[2(0.986 J + 100)] - 7.7 \sin(0.986 J - 2) \quad (I. 15)$$

Où  $E_t$  est exprimé en minutes et  $J$  est le numéro du jour dans l'année à partir du 1<sup>er</sup> Janvier.

### e) Numéro du jour de l'année J

Le calcul du numéro du jour dans l'année consiste à ajouter le numéro du jour dans le mois (quantième) au numéro caractéristique de chaque mois.  $J$  varie de 1 (1er janvier) à 365 (31 décembre) ou 366 pour une année bissextile. Le tableau ci-dessous donne les numéros caractéristiques de chaque mois [18].

Tableau I.2 : Liste des jours types par mois proposés par [22]

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

### f) Lever et coucher du soleil

Connaissant la déclinaison  $\delta$  et la latitude  $\theta$  du lieu considéré, on peut donc calculer l'heure solaire vraie du lever et du coucher du soleil [21], on a les équations suivantes :

$$TSV_{\text{lever}} = 12 - (\arcsin(-\tan(\theta) * \tan(\delta)))/15 \quad (I. 16)$$

$$TSV_{\text{coucher}} = 12 + (\arcsin(-\tan(\theta) * \tan(\delta)))/15 \quad (I. 17)$$

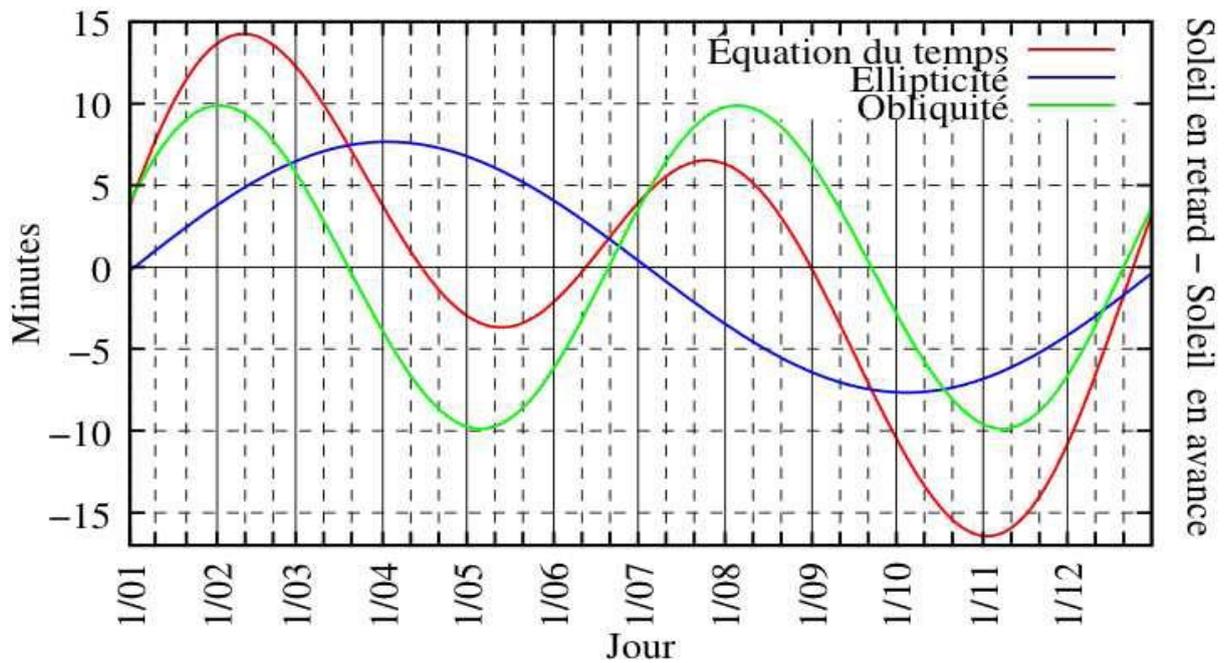


Figure I.13 : Variations annuelles de l'équation du temps

## I.8 Différentes composantes du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. Ce qui ne permet que la réception au sol des composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus. L'albédo ou la partie réfléchi par le sol du rayonnement solaire global comme représentés dans la figure suivante [19].

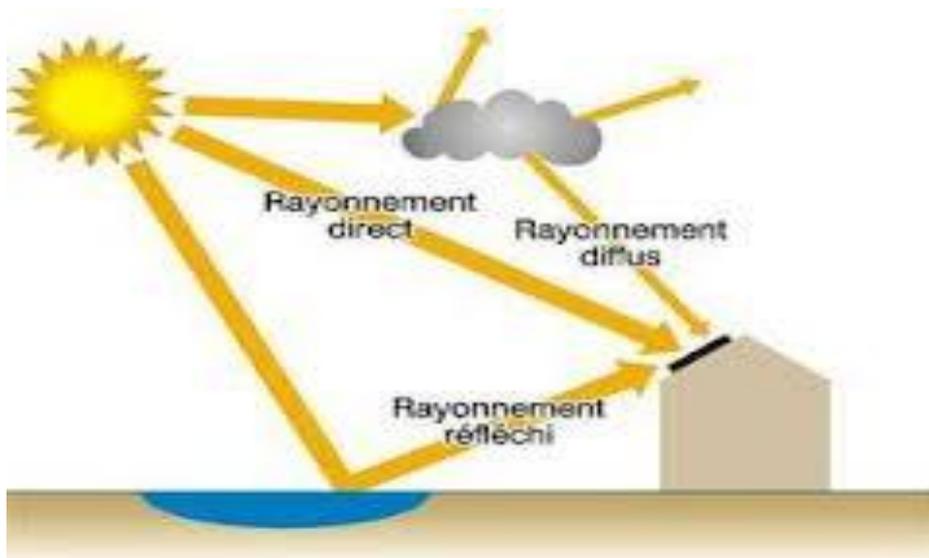


Figure I.14 : Les différents composants du rayonnement solaire

# Chapitre I : Gisement Solaire

## I.8.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil c'est un flux uniforme de rayons parallèles entre eux et de puissance incidente  $I$  ( $W/m^2$ ). C'est le flux des photons qui n'ont pas interagi avec les constituants de l'atmosphère et ont conservé une direction commune et leurs énergies propres.

## I.8.2 Rayonnement diffus

Parmi les photons qui ont interagi avec la couche d'atmosphère, certains ont été absorbés et d'autres ont subi un simple changement de direction (diffusion). Il s'agit donc de la répartition d'un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Pour un élément plan considéré la composante diffuse  $D$  ( $W/m^2$ ) provenant de toutes les directions est la plus difficile des composantes à calculer.

La [figure I.15](#) représente un graphe des données expérimentales pour la mesure des trois composantes du rayonnement global GHI, direct DNI et diffus DHI pour le 1 janvier 2019 enregistré à URERMS à Adrar.

D'après le graphe le rayonnement solaire (global, direct et diffus) augmente avec la croissance du temps jusqu'à atteindre une valeur maximale aux environs de 13h:00 puis commence à diminuer jusqu'à atteindre zéro (coucher de soleil), dans le lever et le coucher de soleil atteint une valeur minimale.

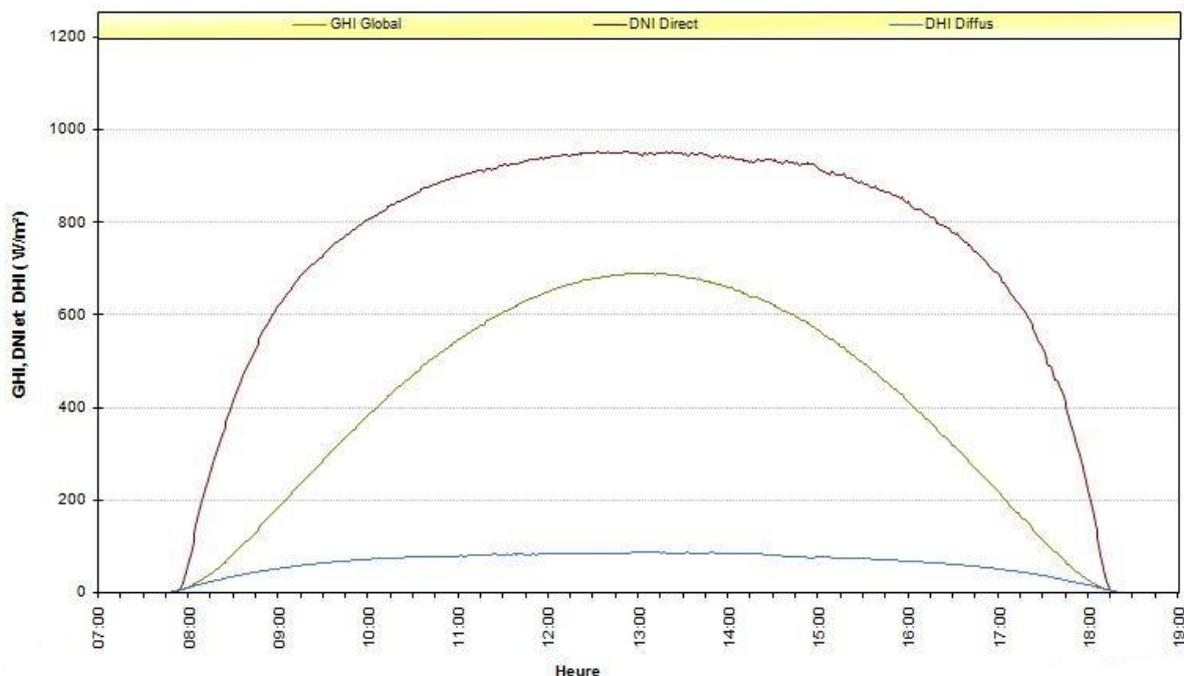


Figure I.15 : Rayonnement solaire globale, direct et diffus pour le 01 Janvier 2016 à Adrar

# Chapitre I : Gisement Solaire

---

## I.8.3 L'albédo

Parvenant au sol, le rayonnement solaire n'est qu'en partie absorbé. On appelle albédo la fraction de rayonnement réfléchi par le sol, il dépend directement de la nature du sol (prairie, terre, désert). Le rayonnement réfléchi par le sol n'est évidemment à prendre en considération que pour les surfaces inclinées [20].

## I.8.4 Rayonnement Global

Le rayonnement global est simplement la somme des composantes directe et diffuse.

On distingue deux types de données d'ensoleillement :

- Rayonnement instantané : on considère les courbes de l'intensité du rayonnement en fonction de l'heure de la journée.
- Rayonnement cumulé : le cumul du rayonnement global par jour. Ce sont toutes les valeurs cumulées d'année en année et l'on en réalise avec des moyennes pour chaque mois de l'année.

## I.8.5 Irradiation

Plutôt que d'exprimer le rayonnement solaire en puissance, on préfère souvent raisonner en énergie reçue pendant un intervalle de temps : l'heure, la journée ; on emploie alors le terme d'irradiation horaire ou quotidienne.

## I.8.6 Indice de clarté

Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté. Les valeurs de ce dernier varient selon les endroits et les saisons. Cet indice est donné par la formule :

$$K_T = \frac{G}{G_0} \quad (\text{I-18})$$

Où : G est l'irradiation solaire reçue sur un plan horizontal,

Basant sur cet indice, cet indice varie généralement en trois classes qui définies pour caractériser le type de ciel [21] :

- 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. Concernant la classe B correspond à des journées partiellement ensoleillées, et la dernière classe pour les journées complètement nuageuses transformant plus de 90% du rayonnement solaire global incident en rayonnement diffus sont représentées par la classe C.

## I.9 Conclusion

L'objet de ce chapitre traitait la présentation des notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres, le mouvement du soleil, différentes composantes du rayonnement solaire et autres. L'irradiation solaire dépend de plusieurs facteurs tels que l'ensoleillement, la température, le lieu géographique, l'instant considéré dans la journée, et la nature des couches nuageuses. De nombreux travaux de recherche ont été développés sur l'estimation de l'irradiation solaire au sol pour faire le dimensionnement d'une installation solaire et prédire le rayonnement solaire, la connaissance du potentiel solaire pour faire des installations solaires thermiques du chauffage ou pour la production l'électricité oblige la meilleur mesuré des différents paramètres de l'irradiation, nous présenterons dans le prochain chapitre les divers appareils et instruments nécessaires pour réaliser les différentes mesures.

## I.10. REFERENCES

- [1] Bessemoulin P. et Oliiviéri J., (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.
- [3] Konrad Mertens, (2014), « Photovoltaics : fundamentals, technology, and practice», Chichester, Wiley, P. 280 , ISBN 9781118634165.
- [4] Ricaud A., (2009), « Gisement Solaire », Cythelia Sarl.
- [5] Kassewa A., Tchapo.Singo, (2006), « Système d'alimentation photovoltaïque avec ,stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome.», Thèse de Doctorat de l'Université, Henri. Poincare, Nancy-I.
- [6] L'énergie solaire, lien : <http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/solaire> , Consulté en Juin 2018.
- [7] Cooper P., (1969), « The absorption of solar radiation in solar stills », Solar Energy, 12 (3), 333-346.
- [8] Bernard J., (2004), « Energie solaire calculs et optimisation », Ellipse Edition Marketing.
- [9] Iqbal M., (1983), « An introduction to solar radiation », Academic press, New York.
- [10] Hofierka J., Suri M., (2002), «The Solar Radiation Modèle for Open Source GIS: Implementation and Applications», Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference - Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [11] Cyril Voyant, (2011), « Prédiction de séries temporelles de rayonnement solaire global et de production d'énergie photovoltaïque à partir de réseaux de neurones artificiels», Thèse Doctorat en physique, Université de Corse-Pascal Paoli.
- [12] Boulifa M., (2005), « Estimation du rayonnement solaire par traitement d'images satellitaires utilisation de l'équation du transfert radiatif », Thèse en électronique, Option Télédétection.
- [13] Oumbe Ndeffotsing A.B, (2009), « Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire incident au sol », Thèse de Doctorat en Energétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [14] Angstrom A., (1964), « The parameters of atmospheric turbidity », Tellus XVI, 64-75.
- [15] Perrin C. Brichambaut et Vauge C., (2009), « le gisement solaire : Evaluation de la ressource énergétique », Technique et Documentation, Librairie Lavoisier, Paris.

## Chapitre I : Gisement Solaire

---

- [16] Selami N. et Benabadji N.,(2009), « Etude des structures nuageuses », JAS09 de l'AUF, Alger.
- [17] Bernard J., (2004), « Energie solaire calculs et optimisation », Ellipse Edition Marketing.
- [18] Bouchouicha Kada, (2017), «Modélisation multi spectrale des images satellitaire - Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère », Thèse de Doctorat, option Rayonnement et Matière, université USTMB.
- [19] Delorme C., « le rayonnement solaire utilisable », Université d'Avignon publication-France.
- [20] Brochure, (2000), « Dimensionnement et installation des systèmes Solaires PV pour l'éclairage domestique », Centre de Développement des Energies Renouvelables Royaume du Maroc Marrakech édition l'UNESCO et l'IEPF Marrakech 29 juillet 2000.
- [21] RETScren , International Centre d'aide à la décision sur les énergies propres « Analyse de projets d'installation photovoltaïques », Documents de Ministère des ressources Naturelles, Canada, 2001-2004.
- [22] Duffie, John A. and William A., (2010), « Solar energy thermal processes», University of Madison, USA, WI.

# Chapitre II

# Mesure et Traitement

# Chapitre II : Mesure et traitement

---

## II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des appareils de mesure de diverses composantes de rayonnement solaire, ainsi une description de réseau météorologique des stations de mesure et une petite description de gisement solaire en Algérie, nous terminerons par une présentation de mesure de télédétection par satellite.

## II.2 Mesures du rayonnement solaire

L'ensoleillement correspond à la mesure du rayonnement solaire que reçoit une surface au cours d'une période donnée, l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ). L'ensoleillement varie de zéro, au lever et couché du Soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire. L'ensoleillement peut également exprimer la quantité d'énergie solaire captée sur un plan pendant un intervalle déterminé.

On distingue principalement selon sa provenance, sa constitution ou la méthode de mesure les paramètres suivant [1] :

### II.2.1 Rayonnement solaire direct

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



Figure II.1 : Appareil de mesure le rayonnement direct

## Chapitre II : Mesure et traitement

---

### II.2.2 Rayonnement diffus

Ce type de rayonnement est mesuré par un appareil appelé « Pyranomètre », muni d'une bande pare-soleil (anneau métallique cachant le disque solaire). Ce rayonnement en provenance de la voûte céleste, à l'exception du disque solaire. C'est-à-dire la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère.

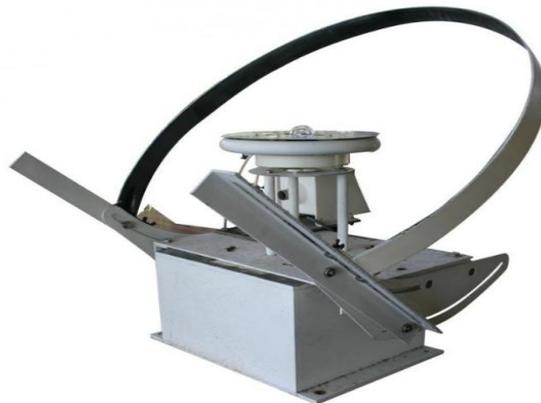


Figure II.2 : l'instrument qui mesure le rayonnement diffus

### II.2.3 Rayonnement global

Le pyranomètre (figure II.3) est un instrument pour mesurer l'irradiance solaire (directe et diffuse) qui atteint la surface terrestre dans la bande de longueur d'onde 0.3 à 3  $\mu\text{m}$ . Avec cet instrument, il est possible de mesurer non seulement le rayonnement global, mais aussi le rayonnement solaire réfléchi. Le rayonnement global défini aussi comme la somme du rayonnement direct et diffus suivant la formule

$$G = I \sin \gamma + D \quad (\gamma : \text{hauteur du soleil})$$



Figure II.3 : le pyranomètre

## Chapitre II : Mesure et traitement

---

### II.2.4 Albédo du sol

L'albédo pour le rayonnement solaire est défini comme le rapport du rayonnement diffusé ou réfléchi par le sol au rayonnement global. Il est mesuré par un Albédomètre (Figure II.4): deux pyranomètres montés en opposition, l'un regardant vers le sol et l'autre vers le ciel.



Figure II.4 : l'Albédomètre

### II.2.5 Durée d'insolation

La durée d'ensoleillement se mesure le plus souvent à l'aide d'un héliographe de Campbell– Stokes qui utilise une lentille optique en verre en forme de sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant (figure II.5). Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Cet instrument d'optique permet d'enregistrer la durée pendant laquelle le rayonnement solaire est d'une intensité suffisante pour produire des ombres manifestes, ce qui correspond à la définition de cet indicateur climatique. Ces appareils existent sous plusieurs modèles. La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle même dépend de la période de l'année considérée [2].

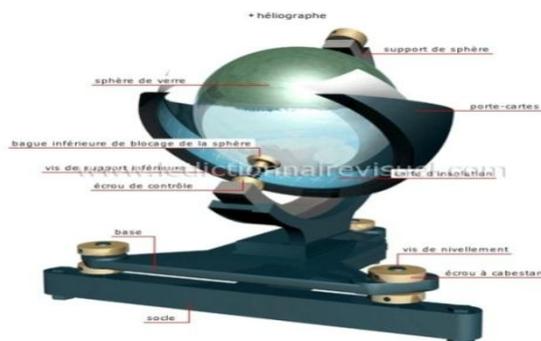


Figure II.5 : l'héliographe

### II.2.6 La nébulosité

La nébulosité ou la couverture nuageuse c'est la fraction de la voûte céleste occultée en un lieu et à un instant donnés par tout ou partie des nuages est une grandeur mesurable, usuellement évaluée par l'observateur en octas : 0 correspond à un ciel clair, 8 à un ciel totalement couvert. 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 toutes les heures ou toutes les trois heures dans la plupart des stations professionnelles de l'ONM [3].

### II.3 Réseau météorologique Algérien

La mesure du rayonnement solaire en Algérie est réalisée par l'Office National de la Météorologie (O.N.M) à travers son réseau constitué de quatre-vingt-un (81) stations météorologiques mesurant la durée d'insolation. Parmi celles-ci, seules sept (07) stations ont assuré entre les années 1970 et 1989 la mesure des composantes diffuses et globales reçues sur le plan horizontal. De plus, ces séries de mesures comportent des données manquantes causées par des périodes plus ou moins longues de non fonctionnement des appareils de mesure, les coordonnées géographiques des stations météorologiques (voir Annexe A).

Les informations récoltées en 2011 indiquaient que seules trois (03) stations à savoir Oran, Tamanrasset et Ksar Chellala assuraient d'une manière régulière la mesure du rayonnement solaire sur le plan horizontal. Huit (08) autres stations automatiques mesurent le rayonnement depuis 2009 et qui sont : Alger (aéroport), Oran (Sénia), In amenas, Ghardaïa, Annaba, Tamanrasset, Tlemcen et Constantine [4].

## Chapitre II : Mesure et traitement

La répartition géographique de l'ensemble des stations équipées de pyranomètres est donnée par la [figure II.6](#).

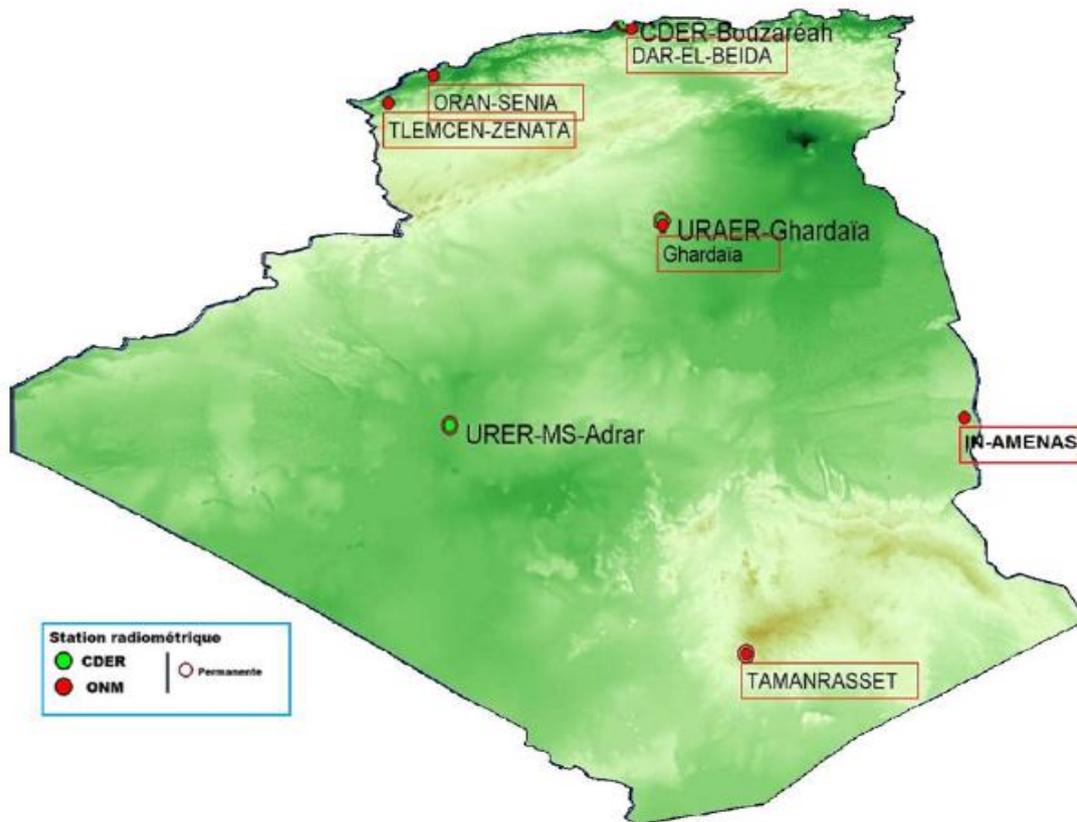


Figure II.6 : Réseau pyranométrique (ONM et CDER).

### II.4 Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [5].

Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique [6].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde comme le montre la [figure II.7](#).

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kwh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays, Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh [7].

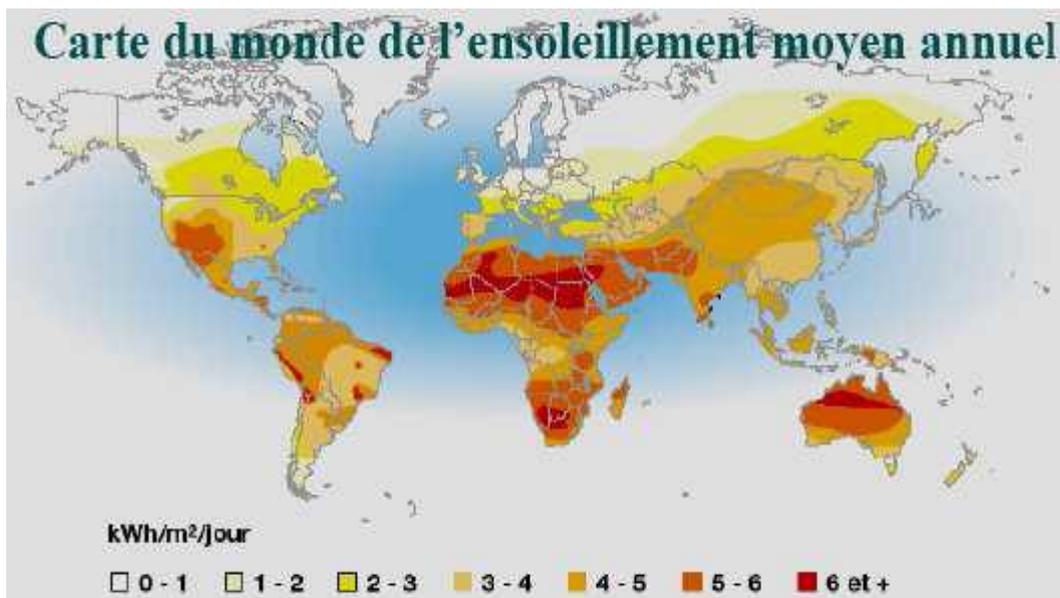


Figure II.7 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire Algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire Algérien est représentée dans le [Tableau II.2](#) selon l'ensoleillement reçu annuellement [8].

Tableau II.2 : Potentiel solaire en Algérie

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

### II.4.1 La variation spatio-temporelle de La durée d'insolation

La durée d'insolation moyenne dans le Sud Algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, de l'ordre de 9 Heure/Jour (Voir [Figures II.10](#) et [II.11](#)), on constater 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 [3] présente le plus grand potentiel de tout le territoire Algérien (voir [Figures II.8 - II.9](#)).

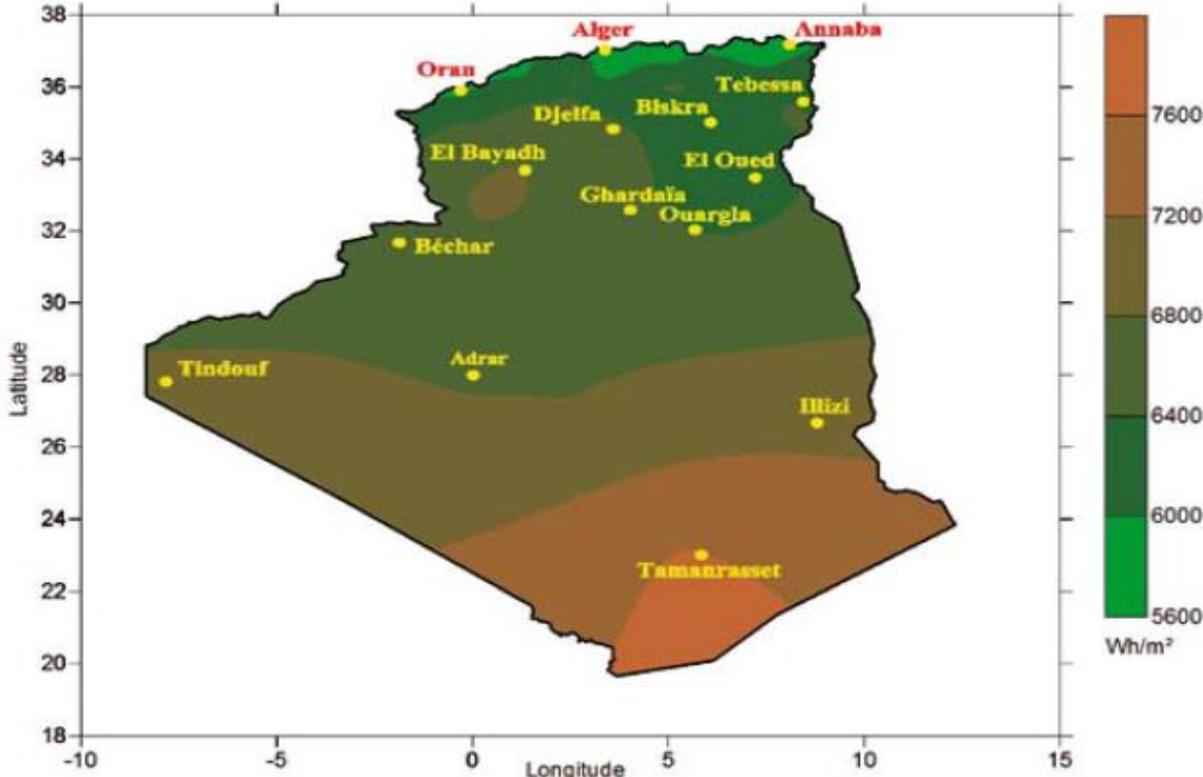


Figure II.8: Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale  
Cas d'un ciel totalement clair [9]

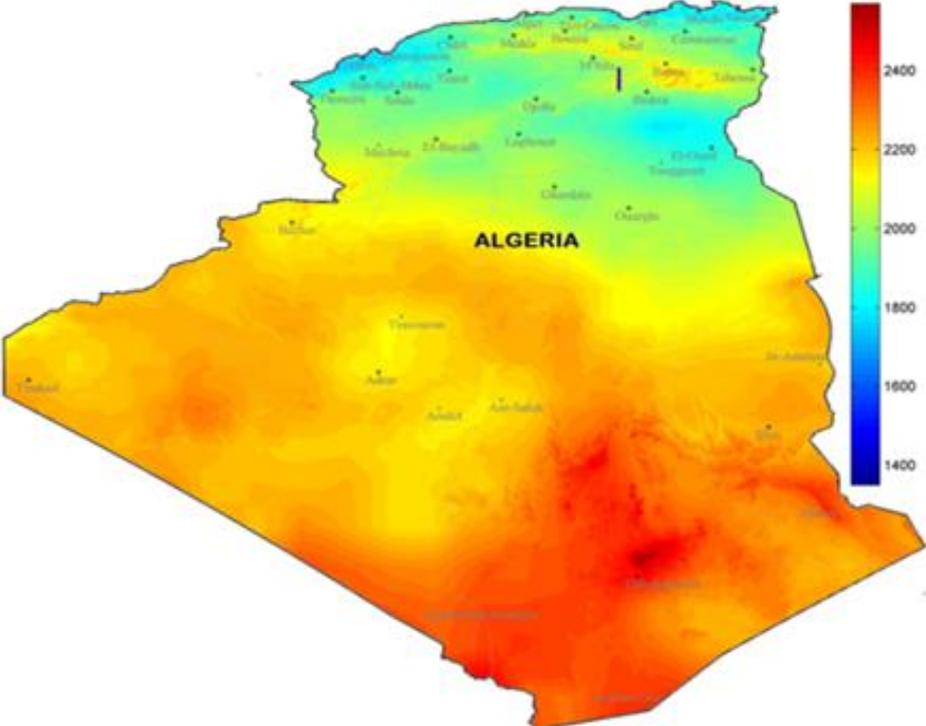


Figure II.9: Moyenne des sommes annuelles d'irradiation globale inclinée [3]

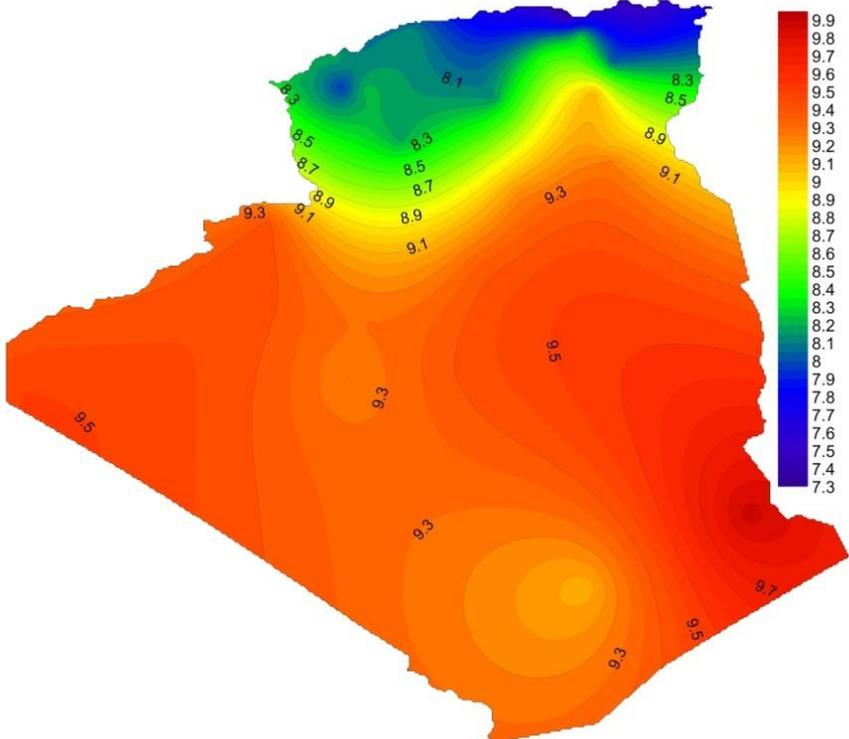


Figure II.10: Carte de la durée d’enseillent moyen annuel en Heure (1983-2012) [3]

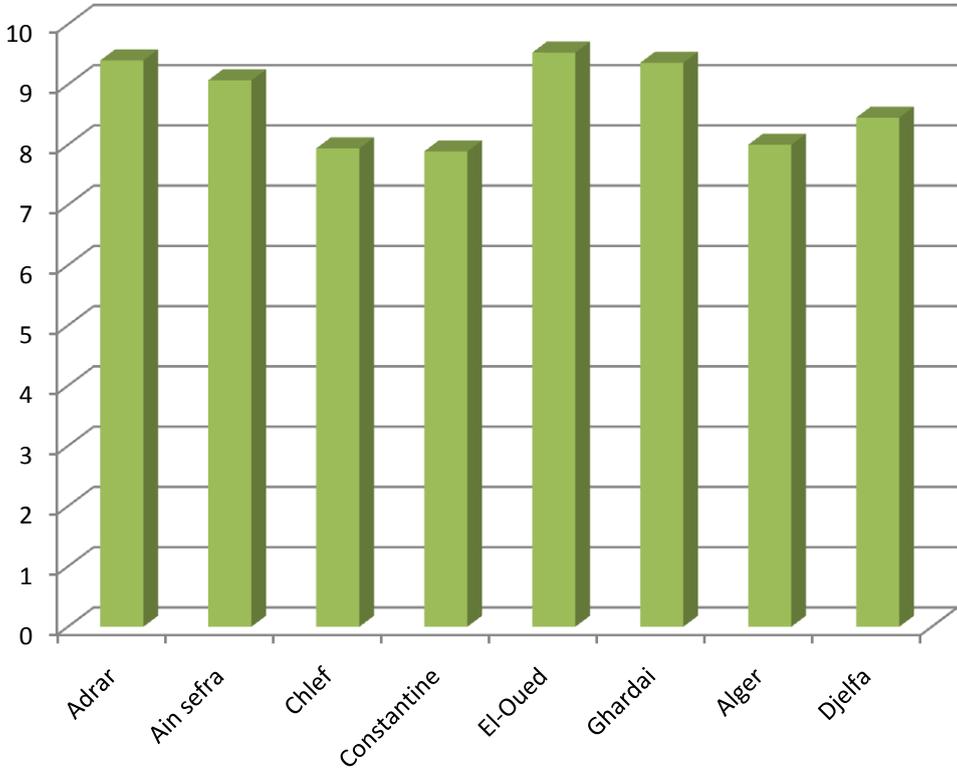


Figure II.11: Moyenne annuelle de la durée d’insolation mesuré [14]

### II.5 Mesures par télédétection

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images [10], permet d'extraire de l'information sur la surface du sol sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique envoyé ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information.

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-après. Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs.

La télédétection passe par sept étapes :

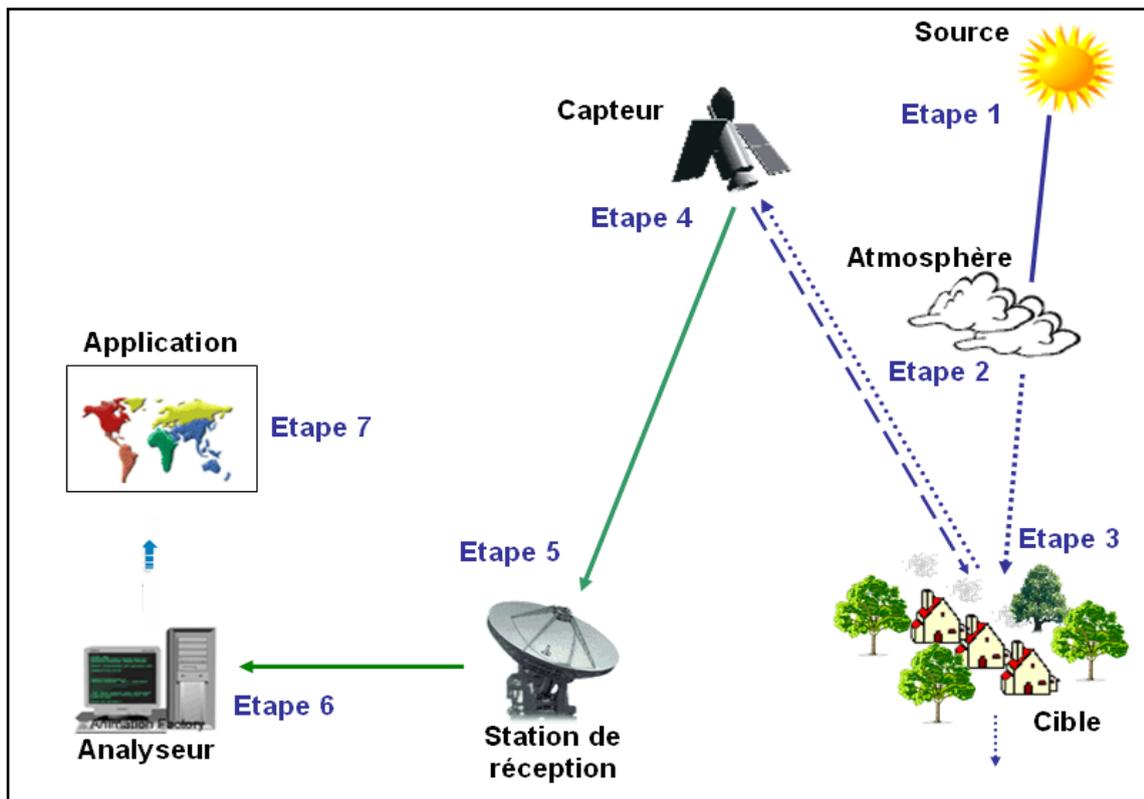


Figure II.12: Processus de télédétection

## Chapitre II : Mesure et traitement

---

### **Etape1** : Source d'énergie ou d'illumination

A l'origine de toute opération de télédétection se trouve obligatoirement une source d'énergie pour éclairer la cible. Le plus souvent, la source d'énergie est le soleil. Mais le satellite lui-même peut être source d'énergie : c'est le cas pour le domaine de la télédétection radar.

### **Etape 2** : Rayonnement et atmosphère

Pendant son chemin « aller » entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du tournée « retour » entre la cible et le capteur.

### **Etape 3** : Interaction avec la cible

Une fois arrivée à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci, cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface. Chaque objet géographique émet ou réfléchit un rayonnement dans les diverses fréquences du spectre électromagnétique. Cette caractéristique s'appelle le comportement spectral.

### **Etape 4** : Archivage de l'énergie par le capteur

Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible mais embarqué à bord d'un satellite ou d'un avion par exemple, pour être enfin enregistrée sous format numérique.

### **Etape 5** : Transmission, réception et traitement

Cette information enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception généralement située au sol où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

### **Etape 6** : Interprétation et analyse

Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite essentielle pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

### **Etape7** : Application

L'étape finale du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, c'est-à-dire la portion d'espace étudiée (Foggaras, réseau AEP, zone inondée, une forêt, etc....) pour aider à résoudre un problème spécifique.

## Chapitre II : Mesure et traitement

### II.5.1 Image numérique en Télédétection et ses Caractéristiques

C'est une représentation plane d'un paysage terrestre, à tous points  $(x,y)$  du plan image on peut ajuster une valeur  $G(x,y)$  qui représente la radiométrie du point au sol.

Une image de télédétection est une matrice géométrique de 2 dimensions.

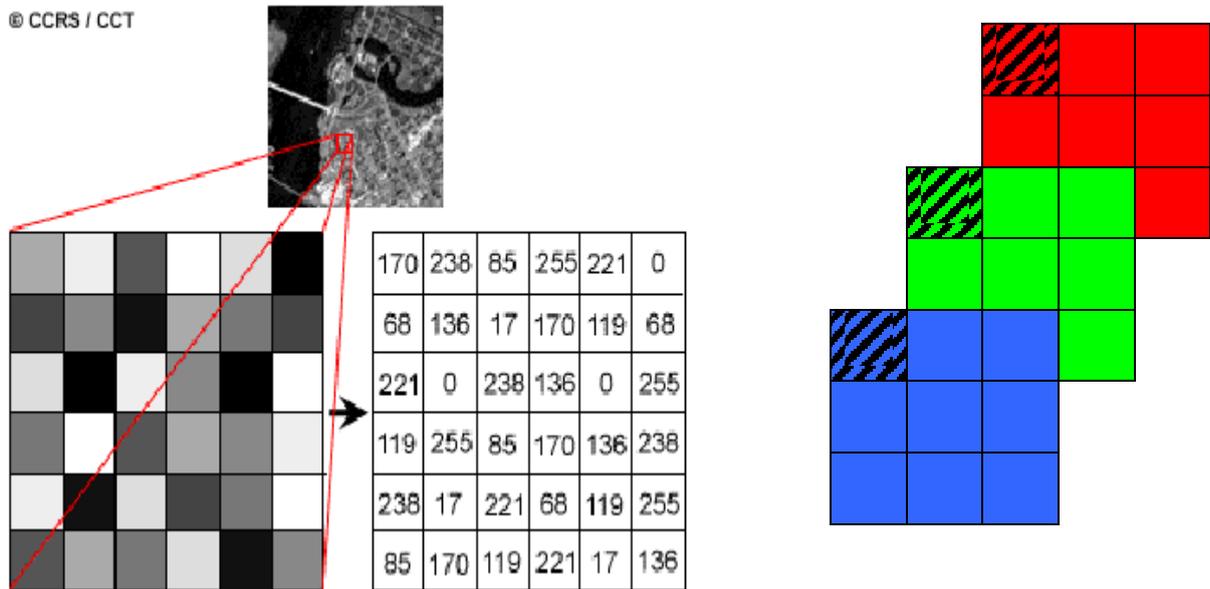


Figure II.13: Image numérique

Le pixel est la plus petite surface perceptible par un capteur. A un pixel quelconque sont associés 3 valeurs, permet ces valeur en le compte numérique CN.

Chaque compte numérique est codé en 8 bits, et les niveaux de gris sont stockés entre 0 et 255

### II.5.2 Plates-formes et capteurs

Dans cette partie, nous allons regarder de plus près l'enregistrement de cette énergie par un capteur en examinant plus en détail les caractéristiques de la plate-forme de télédétection, des capteurs et des informations qui y sont enregistrées.

Les capteurs au sol sont souvent utilisés pour enregistrer des informations détaillées sur la surface. Ces informations sont, par la suite, comparées aux informations recueillies par avion ou à partir d'un satellite. Les capteurs au sol sont souvent placés sur des échelles, des échafaudages, des édifices élevés, des grues...etc.

Dans l'espace, la télédétection est parfois effectuée à partir de la navette spatiale ou plus fréquemment, à partir de satellites. Grâce à leur orbite, les plates-formes spatiales permettent

## Chapitre II : Mesure et traitement

---

une couverture répétitive et continue de la surface de la Terre. Le coût est souvent un facteur déterminant dans le choix des différentes plates-formes.

### II.5.3 Caractéristiques des satellites - l'orbite

Bien que les plates-formes terrestres ou aéroportées soient utilisées, ce sont les satellites qui fournissent la majeure partie des données recueillies par télédétection de nos jours.

Le circuit effectuée par un satellite autour de la Terre est appelée orbite. L'orbite d'un satellite est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission. Le choix d'une orbite est déterminé par l'altitude (la hauteur du satellite au-dessus de la surface de la Terre), l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la Terre, sur cette base on peut définir deux types de satellites [10]:

#### *A- Satellites à orbite Géostationnaire*

C'est des satellites qui ont une altitude très élevée et observent toujours la même région de la surface de la Terre, Ces satellites géostationnaires ont une altitude d'environ 36 000 kilomètres et se déplacent à une vitesse qui correspond à celle de la Terre, donnant ainsi l'impression qu'ils sont stationnaires. Cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement de l'information sur une région spécifique. Les satellites de communication et d'observation des conditions météorologiques sont situés sur de telles orbites. L'altitude élevée de certains satellites météorologiques leur permet d'observer les nuages et les conditions qui couvrent un hémisphère complet de la Terre.

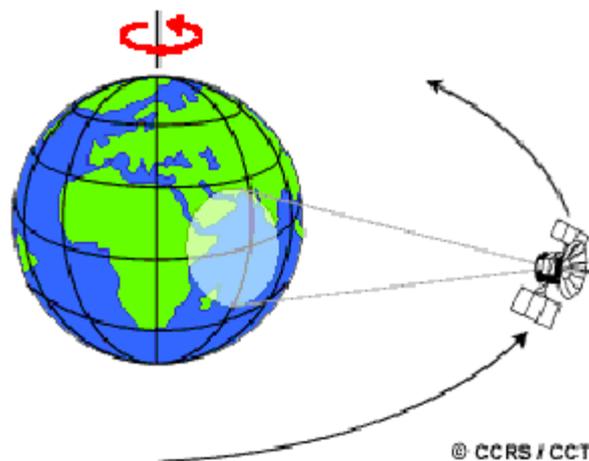


Figure II.14: Satellites à orbite Géostationnaire

## Chapitre II : Mesure et traitement

---

### *B- Satellites à orbite héliosynchrone*

C'est des satellites qui observent toujours chaque région du globe à la même heure locale solaire. Pour une latitude donnée, la position du Soleil dans le ciel au moment où le satellite survole une certaine région au cours d'une saison donnée sera donc toujours la même.

Ces plates-formes spatiales suivent une orbite allant pratiquement du nord au sud ou vice versa. Cette configuration, combinée à la rotation de la Terre (ouest-est) fait qu'au cours d'une certaine période, les satellites ont observé la presque totalité de la surface de la Terre. Ce type d'orbite est appelé orbite quasi polaire à cause de l'inclinaison de l'orbite par rapport à une ligne passant par les pôles Nord et Sud de la Terre.

Cette caractéristique orbitale assure des conditions d'illumination solaire similaires, lorsqu'on recueille des données pour une saison particulière sur plusieurs années ou pour une région particulière sur plusieurs jours. Ceci est un facteur important lorsqu'on compare deux images successives ou lorsqu'on produit une mosaïque avec des images adjacentes, puisque les images n'ont pas à être corrigées pour tenir compte de l'illumination solaire.

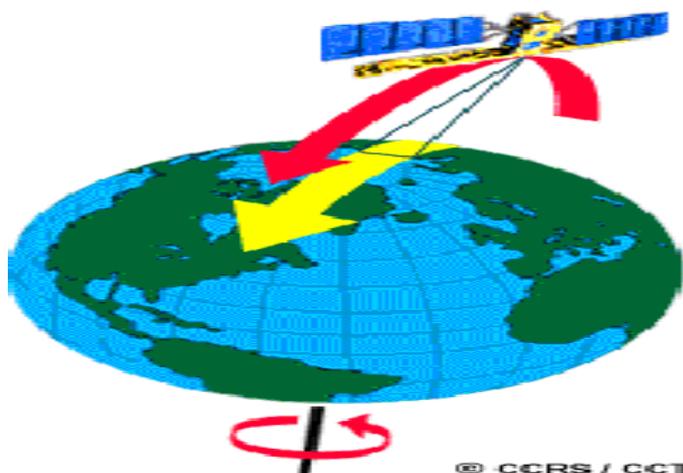


Figure II.15: Satellites à orbite héliosynchrone

### **II.5.4 Traitement numérique des images**

Le traitement d'images numériques nécessite nécessairement un système informatique (ou système d'analyse d'images) ainsi que l'équipement et les logiciels pour traiter les données.

## Chapitre II : Mesure et traitement

---

Plusieurs systèmes de logiciels commerciaux ont été développés spécifiquement pour le traitement et l'analyse des images de télédétection.

Nous pouvons regrouper les fonctions de traitement des images communément disponibles en analyse d'images en quatre catégories :

- Prétraitement
- Rehaussement de l'image
- Transformation de l'image
- Classification et analyse de l'image



Figure II.16: Carte satellite METEOSAT

### II.6 EUMETSAT

EUMETSAT est une organisation intergouvernementale européenne [11] active dans le domaine spatial, elle est occupée de l'établissement et de l'exploitation de systèmes opérationnels de satellite météorologiques.

EUMETSAT contient aujourd'hui plus de 20 Etats membres européens comme: l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France...etc. L'organisation a également signé quelques accords de coopération privilégiée avec une dizaine d'autres pays comme : la Bulgarie, la Croatie, la Hongrie, la Lettonie... etc. Qui ont l'accès aux données produits 24 heures sur 24, chaque jour de l'année, notamment via EUMETCast, le système de diffusion numérique de données environnementales.

## Chapitre II : Mesure et traitement

---

### II-7 Historique des satellites METEOSAT

Le groupe de satellites européens METEOSAT fait partie des satellites géostationnaires opérationnels, admettant l'observation de l'ensemble du globe terrestre, à l'exception des pôles. Météosat 1 a été lancé en 1977 pour une tâche expérimentale, mais il a remporté un tel succès que le service a pris une dimension opérationnelle dès le lancement de Météosat 2 en 1981. Quatre autres satellites ont été lancés en 1988, 1989, 1991 et 1993, Un septième satellite de même conception a été construit dans le cadre du programme Météosat est lancé en 1997.

### II-8 Météosat de seconde génération (MSG)

Le premier satellite de la série baptisé Météosat Second Génération (MSG) a été lancé le 28 août 2002 [12], après une phase de réalisation conduite par l'Agence spatiale européenne pour le compte de l'Organisation Européenne Chargée de l'Exploitation des Satellites Météorologiques –EUMETSAT, la phase d'essais de mise en service, qui a suivi, a porté non seulement sur le nouveau satellite proprement dit, mais aussi sur un segment sol complètement nouveau réalisé par EUMETSAT, dont les fonctions sont de commander et de contrôler le satellite et de traiter ses données au siège même de l'organisation et dans des centres répartis dans toute l'Europe. Au cours de cette période de mise en service, l'exploitation régulière des satellites de la première génération a continué, mais dans toute l'Europe les utilisateurs ont été en mesure de recevoir des données initiales du nouveau satellite à partir d'Avril 2003.



Figure II.17 : Le satellite Météosat Second Génération.

## Chapitre II : Mesure et traitement

---

Le 29 Janvier 2004 le satellite, rebaptisé à l'occasion Météosat-8, a été déclaré pleinement opérationnel, ce qui signifie qu'il fonctionnait à pleine capacité et qu'il était possible d'accéder régulièrement à ses données, qui pouvaient donc donner lieu à une utilisation opérationnelle régulière dans toute la zone de couverture du satellite, comprenant non seulement l'Europe, mais aussi l'Afrique et le Moyen-Orient.

Le 21 décembre 2005 EUMETSAT lance le deuxième satellite MSG-2, et le 6 juillet 2006 il passe au 0° de longitude et devient complètement opérationnel, il est rebaptisé Météosat-9 et remplace le satellite de réserve Meteosat-8.

La tâche principale de ces satellites [13] est l'observation continue de la surface du globe et de l'atmosphère, dans plusieurs bandes spectrales, nommées des canaux, ainsi que d'autres activités telles que :

- l'analyse des masses d'air.
- La prise d'image à haute résolution.
- La collecte de données.
- La retransmission et la diffusion de données météorologique
- L'exploitation d'un système complet d'archivage et de consultation des données.

L'instrument principal des satellites MSG est un radiomètre imageur SEVIRI qui balaie la surface de la Terre de manière à créer 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 spécificités des 12 canaux de MSG ainsi que leurs buts sont résumés dans la [Tableau II.3](#).

## Chapitre II : Mesure et traitement

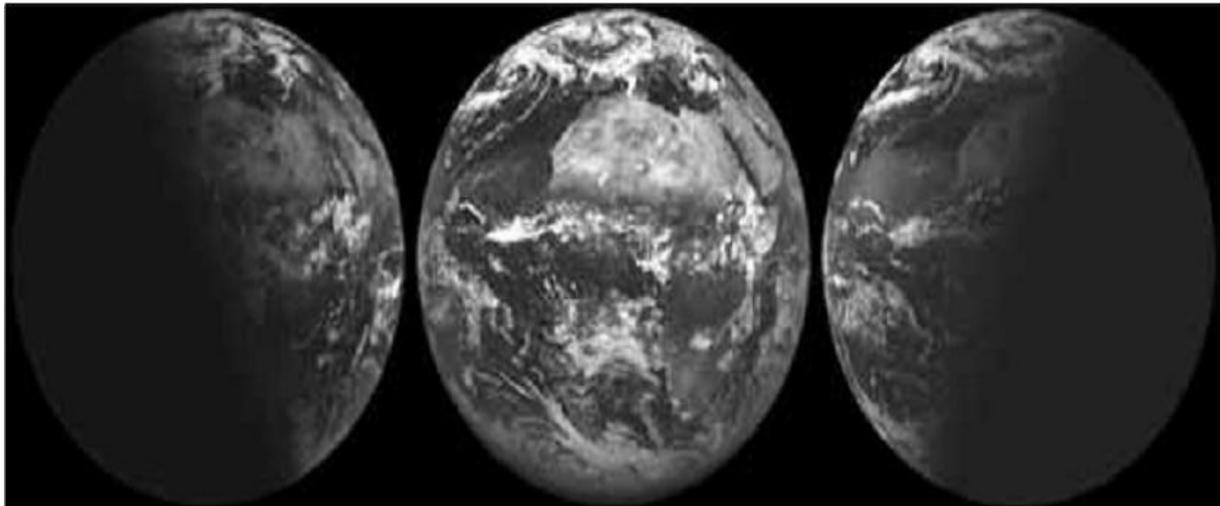
Tableau II.3. Caractéristiques et objectifs principaux des 12 canaux de prise d'images de SEVIRI.

Canal	Autre appellation	Longueur d'onde centrale ( $\mu\text{m}$ )	Objectif principal
C1	VIS 0.6	0,635	Surface, nuages, champs de vent
C2	VIS 0.8	0,81	Surface, nuages, champs de vent
C3	NIR 1.6	1,64	Surface, phase du nuage
C4	IR 3.9	3,90	Surface, nuages, champs de vent
C5	WV 6.2	6,25	Vapeur d'eau, nuages à haute altitude, instabilité atmosphérique
C6	WV 7.3	7,35	Vapeur d'eau, instabilité atmosphérique
C7	IR 8.7	8,70	Surface, nuages, instabilité atmosphérique
C8	IR 9.7	9,66	Ozone
C9	IR 10.8	10,80	Surface, nuages, champs de vent, instabilité atmosphérique
C10	IR 12.0	12,00	Surface, nuages, instabilité atmosphérique
C11	IR 13.4	13,40	Hauteur des cirrus, instabilité atmosphérique
Large bande:			
C12	HRV	0,4 - 1,1 $\mu\text{m}$	Surface, nuages

Cet accroissement des capacités de MSG par rapport à Météosat répond à l'évolution des besoins de la prévision immédiate et de la gestion du risque météorologique à courte échéance et ceci grâce à sa capacité de caractériser les systèmes météorologiques actifs, leur évolution rapide et leur probabilité de développement.

La [figure II.18](#) montre trois images prises dans le canal VIS 0.6 (C1) de l'instrument SEVIRI, à des heures différentes de la journée. Ce canal est sensible au rayonnement solaire réfléchi dans la partie visible du spectre, dans une fenêtre spectrale étroite centrée sur 0.6  $\mu\text{m}$ . Les variations de l'illumination solaire au cours de la journée sont mises en évidence par courbe terminatrice entre la partie éclairée et obscure, que l'on voit à 6 heures et à 18 heures UTC.

Quatre canaux de SEVIRI, soit les canaux VIS 0.6 (C1), VIS 0.8 (C2), NIR 1.6 (C3) et HRV (C12), sont essentiellement sensibles au rayonnement solaire réfléchi à 0.6  $\mu\text{m}$ , d'une façon similaire.



**Figure II.18:** Séquence de trois images prises par SEVIRI dans le canal VIS 0.6 (C1) le 19 juin 2004 à 06:00, 12:00 et 18:00 UTC.

Le rayonnement électromagnétique aperçu par le capteur d'un satellite traverse l'atmosphère d'une part lors de l'éclairage solaire (entre le soleil et le sol) et d'autre part entre le sol et le satellite (rayonnement réfléchi par la surface terrestre). Ce double passage perturbe le rayonnement solaire, et qui fait que la quantité du rayonnement solaire subit une grande variation dans l'espace et dans le temps, qui est entraînée par la différence de la position géographique du lieu d'une part, et d'autre part de la couverture et la composition des nuages.

En raison du coût très élevé de l'investissement et de la maintenance de 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. En conséquence, des techniques d'estimation des composantes du rayonnement solaire qui sont basées sur des données des satellites sont développées, afin d'évaluer le gisement solaire.

### II.9 Conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre les différents appareils de mesure des composantes de rayonnement solaire et une petite description du gisement solaire en Algérie. Remarquons que la durée d'insolation dans le Sahara Algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8 h/j et peut arriver jusqu'à 12 h/j pendant l'été. La région d'Adrar donc est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel solaire de toute l'Algérie.

## Chapitre II : Mesure et traitement

---

La mesure par télédétection par image satellitaire se fait par des appareils développés, en outre plusieurs algorithmes et modèles empiriques et analytiques ont été développés pendant les 30 dernières années pour l'estimation des composantes du rayonnement solaire au sol à partir du traitement des images satellitaires afin d'évaluer le gisement énergétique solaire.

### II.10. REFERENCES

- [1] Bouchouicha K., Oulimar B., (2013), «La chaîne de mesure radiométrique à l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar », International Conférence on Energy and Sustainable Development ICESD'13, 19-20 Février 2013, Adrar, Algeria.
- [2] McArthur L., (1998), Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual (Version 1.0), WMO/TD No. 879. Geneva, Switzerland: World Climate Research Program, WMO.
- [3] Bouchouicha K., (2017), « Modélisation multi spectrale des images satellitaire - Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère », thèse Doctorat en science, université U.S.T.O-MB.
- [4] Faiza M., (2008), « Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG », Thèse Magister, Université Tiziouzou.
- [5] Capderou M., (1985), « Atlas Solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger ».
- [6] Mefti A., Bouroubi M.Y et Khellaf A., (1999), « Analyse Critique du Modèle de l'Atlas de l'Algérie », Revue des Energies Renouvelables, 2(2), 69 - 85.
- [7] Portail Ministère de l'Energie, [www.energy.gov.dz](http://www.energy.gov.dz) , Consulté en Février 2018.
- [8] Mefti A., Bouroubi M.Y, Mimouni H.,(2002), « Evaluation du potentiel énergétique solaire », Bulletin des Energies Renouvelables, N° 2, pp.12, Décembre 2002.
- [9] Atlas solaire Algérien publiée par le CDER, site : [www.CDER.dz](http://www.CDER.dz), Consulté en Février 2018.
- [10] Notions fondamentales de télédétection, Un cours tutoriel du Centre canadien de télédétection.
- [11] 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., vol.19, pp. 1005–1012.
- [12] Site EUMETSAT : [www.eumetsat.int](http://www.eumetsat.int), Consulté en Février 2019.
- [13] Site Internet:<http://sinfotech-sig.teledetection.fr/site/index.php>, Consulté en Mars 2019.
- [14] Djelloul Benatiallah, Ali Benatiallah , Kada Bouchouicha, Bahous Nasri, Abdelkader Harouz, Hamouda Messaoud, «Evaluation et comparaison du rayonnement solaire globale sur une surface horizontale » , Conférence Internationale sur les Matériaux, le Patrimoine et l'Environnement en Zones Arides ICMaPEAZ19 Université Ahmed DRAIA, Adrar 17 & 18 février 2019.

# **Chapitre III**

## **Modélisation du rayonnement solaire**

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

---

### III-1 Introduction

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

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

Dans ce chapitre nous présenterons une description de trois modèles physique pour le calcul des divers composants du rayonnement solaire à ciel clair, puis en fait une comparaison entre eux à trois sites au sud de l'Algérie. Premièrement, le modèle de Bird & Huldstrom [1] est considéré comme une référence pour les concepteurs de systèmes solaires. Ce modèle prend en compte les données météorologiques, notamment la température de l'air, l'humidité et la pression atmosphérique. En outre, le deuxième modèle Ashrae [2] est un modèle plus simple utilisé dans différents types d'applications d'énergie solaire. Il nécessite un angle zénithal solaire et des valeurs empiriques. Enfin, le troisième modèle Atwater & Ball [3] dépend de nombreux paramètres et coefficients atmosphériques. Ces modèles ont été évalués pour estimer le rayonnement solaire instantané par ciel clair sur une surface horizontale dans le climat du sud de l'Algérie en comparant les données mesurées aux valeurs estimées. La vérification et la validation de l'ensemble des modèles ont été effectuées après la collecte continue de données radiométriques et météorologiques provenant de trois sites; El-Goléa, Adrar et Tamanrasset, situées dans la région centrale du Sahara, connaissent des températures diurnes élevées en été et des températures basses en hiver. Comme le montre la [figure III.1](#), ces régions ont également un potentiel d'énergie solaire considérable, avec une intensité de rayonnement solaire global élevée et une durée d'ensoleillement comprise entre 9 et 11 heures par jour [4,12].

# Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

## III-2 Données expérimentales

Les stations de mesures sont rares à travers le territoire national. Pour l'estimation l'irradiation solaires, on a recours aux modèles théoriques. Ces modèles sont établis sous forme de corrélation. Pour qu'ils soient applicables aux sites considérés, ces derniers doivent être confrontés aux valeurs réellement mesurées sur le site considéré sur une période qui couvrira les différentes saisons de l'année [5].

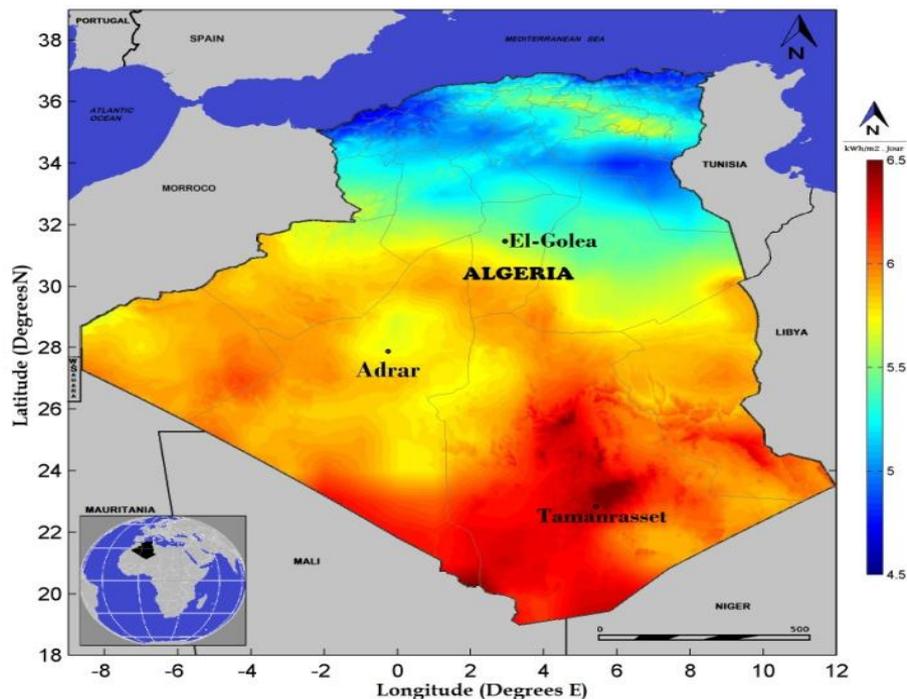


Figure III. 1: Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale (GHI)

Les données expérimentales ont été recueillies auprès de trois stations différentes situées dans la région sud de l'Algérie, il est délimité entre latitude 22 ° à 31 ° N et la longitude de 1 ° W à 6 ° E. Ainsi, Il est intéressant de mentionner que cette zone est située dans la région de ceinture solaire [6], ce qui représente plus de 3 000 heures d'ensoleillement par an avec plus de 5,5kWh/m<sup>2</sup>/jour d'intensité de rayonnement solaire, cette région connue par des températures diurnes très élevées en été, et des températures basses [7] en hiver (Figure III.1). Selon la première station d'observation les mesures de routine de rayonnement direct, diffus et global ont été effectuées dans l'unité de recherche des énergies renouvelables en milieu saharien (URERMS), dans la ville d'Adrar, constituée du système SOLYS 2 Pyranomètre Kipp & Zonen CMP21 (Figure III.2). La deuxième station de la ville d'El-Goléa de Shariket Kahraba Wa Taket Moutadjadida (SKTM) équipée du pyranomètre Kipp & Zonen CMP 6. Pour la troisième station, les mesures ont été

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

effectuées à la station de l'office national météorologique (ONM) de Tamanrasset à l'aide du pyranomètre Eppley PSP. Tandis que les spécifications techniques de ces instruments sont présentées dans le [Tableau III-2](#). Dans la présente étude, simples procédures de contrôle de la qualité ont été adoptées et conduites afin d'améliorer les résultats obtenus [8,9]. Les procédures ont été appliquées pour la mesure instantanée de l'éclairement énergétique solaire global, puis comparées aux valeurs extrêmes pouvant être mesurées à chaque instant, sur la base des valeurs calculées à partir de l'éclairement énergétique extraterrestre sur une surface horizontale. Selon les résultats des contrôles de qualité, les mesures manquantes représentent environ 11%, 3% et 6% de la base de données complète pour la première, deuxième et troisième station, respectivement. La collecte de données de cette étude effectuée au cours d'une année allant de janvier à décembre 2016 avec un ensemble de données composé d'une valeur moyenne sur 5 minutes pour la station d'Adrar, d'une minute pour la station Tamanrasset et de 10 minutes pour la station El-Goléa, il y a enivrent 12612 données mesuré et sélectionnées en globale.

**Tableau III.1:** Coordonnées géographiques des sites

Station	Sites	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Station 1	Tamanrasset	5° 52' E	22° 78' N	1320
Station 2	Adrar	0° 28' W	27° 88' N	269
Station 3	El-Goléa	2° 87' E	30° 58' N	380



**Figure III.2:** Stations météorologique

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

Tableau III.2 : Caractéristiques des instruments solaires utilisés pour les trois sites

Capteur	Kipp & Zonen CMP21	Kipp & Zonen CMP 6	Eppley PSP
Irradiance opérationnelle maximale	4000 W/m <sup>2</sup>	2000 W/m <sup>2</sup>	4000 W/m <sup>2</sup>
Gamme spectrale	270 to 3000 nm	285 à 2800 nm	305–2800 nm
Sensibilité	7 to 14 μV/W/m <sup>2</sup>	5 - 20 μV/W/m <sup>2</sup>	7mV/kW/m <sup>2</sup>
Réponse directionnelle	< 10 W/m <sup>2</sup>	< 20 Wm <sup>-2</sup>	< ±10 W/m <sup>2</sup>
Non-stabilité (Changement / année)	< 0.5%	0.5%	<±0,2%
Réponse à la température	< 1 % (-20 °C à +50 °C)	4% (0°C à +100°C)	<±1%
Temps de réponse	< 5 s	18 s	~8 sec
Non-linéarité	< 0.2 %	0.5%	<±0,2%
Plage de température de fonctionnement et de stockage	-40 °C à +80 °C	-40°C à +80°C	-40 °C à +80 °C

### III-3 Méthodologie

Le rayonnement global reçu par le soleil est la somme du rayonnement direct I (W/m<sup>2</sup>), diffus D (W/m<sup>2</sup>) et des composants réfléchis. Le composant réfléchi à la valeur nulle en surface horizontale. La figure III.3 présente les composants du rayonnement solaire entrant [10]. L'éclairement énergétique global G (W /m<sup>2</sup>) sur une surface horizontale peut être donné par [11]:

$$G = I + D \quad (III-1)$$

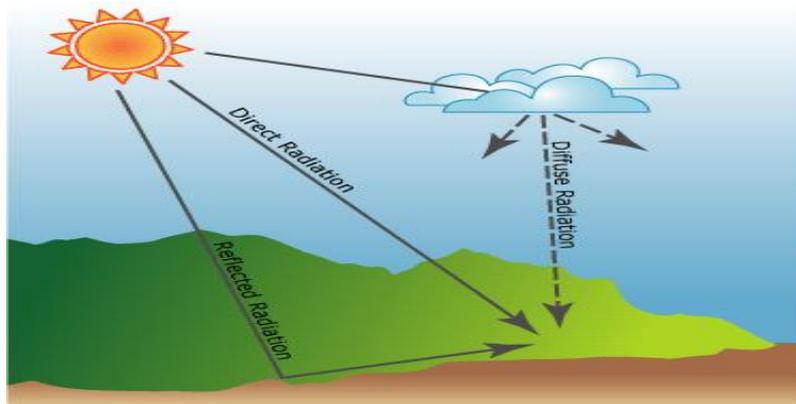


Figure III.3: Composants du rayonnement global

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

La sous-section suivante décrit les modèles étudiés ainsi que les techniques utilisées pour calculer les équations fondamentales et divers paramètres sur des surfaces horizontales.

### III-3-1 Modèle Bird & Hulstrom

Comme recommandé par le modèle du Bird & Hulstrom (Modèle 1), l'irradiance normale directe dans la direction des rayons  $I_n$  ( $\text{W/m}^2$ ) à ciel clair est en fonction de l'absorption, de la transmittance par les composants atmosphériques et peut être calculée par la formule suivante [11,12]:

$$I_n = 0.9751 I_0 \tau_r \tau_g \tau_o \tau_w \tau_a \quad (\text{III-2})$$

Lorsque le facteur 0.9751 est inclus en fonction de la gamme spectrale considérée de 0.3-3  $\mu\text{m}$ ,  $I_0$  est la constante solaire ( $\text{W/m}^2$ ).

$\tau_r$ ,  $\tau_o$ ,  $\tau_g$ ,  $\tau_w$ ,  $\tau_a$  (sans dimension) sont les transmittances de diffusion Rayleigh, ozone, gaz, eau et aérosols. Tous ces composants sont donnés respectivement par:

$$\tau_r = \exp(-0.903 m_a^{0.84} (1 + m_a - m_a^{1.01})) \quad (\text{III-3})$$

$$\tau_o = 1 - (0.1611 U_3 (1 + 139.48 U_3)^{-0.3035} - 0.002715 U_3 (1 + 0.044 U_3 + 0.0003 U_3^2))^{-1} \quad (\text{III-4})$$

$$\tau_g = \exp(-0.0127 m_a^{0.26}) \quad (\text{III-5})$$

$$\tau_w = 1 - 2.4959 U_1 ((1 + 79.034 U_1)^{0.6828} + 6.385 U_1)^{-1} \quad (\text{III-6})$$

$$\tau_a = \exp(-K_a^{0.873} (1 + K_a - K_a^{0.7808}) m_a^{0.9108}) \quad (\text{III-7})$$

Où,  $m_a$  (sans dimension) est la masse d'air à la pression réelle,  $U_1$  (cm) étant la longueur du chemin optique corrigée en pression de l'eau précipitable,  $K_a$  est l'épaisseur optique de l'aérosol et  $U_3$  (cm) est la longueur du trajet optique. Ils sont donnés par [13].

$$m_a = \frac{1}{\sin(h) + 9.4 \cdot 10^{-4} \cdot (\sin(h) + 0.0678)^{-1253}} \quad (\text{III-8})$$

$$m_r = m_a \left( \frac{P}{1013.25} \right)^{-1} \quad (\text{III-9})$$

$$U_1 = \frac{0.493}{T} \cdot \text{HR} \cdot \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (\text{III-10})$$

T, température ambiante (K) et HR, humidité relative (%).

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

$$K_a = 0.2758 \cdot K_{a\lambda/\lambda=0.38\mu\text{m}} + 0.35 \cdot K_{a\lambda/\lambda=0.5\mu\text{m}} \quad (\text{III-11})$$

$$K_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (\text{III-12})$$

$\lambda$  ( $\mu\text{m}$ ) est la longueur d'onde et  $\beta$  et  $\alpha$  sont respectivement le coefficient caractérisant la visibilité du ciel et le coefficient de trouble d'Angstrom [14,15], et ils sont donnés [3] comme suit dans le [Tableau III.3](#).

**Tableau III.3** : Coefficient de turbidité d'Angstrom

Zone climatic	$\beta$	$\alpha$
Site rural	0.05	<b>0.11</b>
Site urbane	0.10	<b>0.22</b>
Site industriel	0.30	<b>0.66</b>

$$U_3 = L m_r \quad (\text{III-13})$$

$$L = \frac{1}{9.4 + 0.9 \cdot m_a} \quad (\text{III-14})$$

$p$  (mbar) est la pression atmosphérique locale,  $z$  (m) est l'altitude de la position étudiée,  $L$  (cm) est l'épaisseur de la couche d'ozone verticale,  $m_r$  (sans dimension) est la masse d'air à la pression standard (1013,25 mbar) [10,12].

$$p = 1013 (1 - 2.257 \cdot 10^{-5} Z)^{5.26} \quad (\text{III-15})$$

$$T = 288 - 6.5 \cdot 10^{-3} Z \quad (\text{III-16})$$

L'éclairement dû au rayonnement direct  $I$  est donnée par la formule suivante:

$$I = \cos \theta_z \cdot I_n \quad (\text{III-17})$$

Où  $\theta_z$  (degrés) est l'angle zénithal.

Dans ce modèle, le rayonnement diffus  $D$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) sur un plan horizontal est la somme de trois composantes diffuses: le composant de diffusion Rayleigh  $D_r$ ; le composant par les aérosols  $D_a$ ; et le composant qui tient compte des réflexions multiples de l'irradiance entre le sol et le ciel  $D_m$ . Tous ces composants sont donnés dans les expressions suivantes :

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

---

$$D = D_r + D_a + D_m \quad (\text{III-18})$$

$$D_r = \frac{0.79 \cdot I_{sc} \cdot \sin(h) \cdot \tau_0 \tau_g \tau_w \tau_{aa} \cdot 0.5(1 - \tau_r)}{1 - m_a + m_a^{1.02}} \quad (\text{III-19})$$

Où  $I_{sc}$  est une correction de la constante solaire,  $\tau_{aa}$  est la transmittance du rayonnement direct dû à l'absorption des aérosols est donnée par l'expression suivante:

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_0) \cdot (1 - m_a + m_a^{1.06}) \cdot (1 - \tau_a) \quad (\text{III-20})$$

$$D_a = \frac{0.79 \cdot I_{sc} \cdot \sin(h) \cdot \tau_0 \tau_g \tau_w \tau_{aa} \cdot F_c \cdot 0.5(1 - \tau_{as})}{1 - m_a + m_a^{1.02}} \quad (\text{III-21})$$

où  $F_c$  est le coefficient de dispersion de l'atmosphère.  $F_c = 0,84$  est la valeur recommandée par ce modèle [16].

$T_{as}$  est la fraction incidente transmise après que les effets d'aérosols diffusés soient donnés par:

$$\tau_{as} = \frac{\tau_a}{\tau_{aa}} \quad (\text{III-22})$$

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

$$D_m = \frac{(I_n \cdot \sin(h) + D_r + D_a) \rho_g \cdot \rho_a}{1 - \rho_g \cdot \rho_a} \quad (\text{III-23})$$

$$\rho_a = 0.0685 + (1 - F_c) \cdot (1 - \tau_{as}) \quad (\text{III-24})$$

Avec  $\rho_g$  est l'albédo du sol et  $\rho_a$  est l'albédo du ciel clair,  $h$  (degrés) est l'élévation solaire;  $\omega_0$  est l'albédo de diffusion unique d'aérosol  $\omega_0 = 0,9$  [12].

Le rayonnement global sur un plan horizontal est la somme des deux composantes solaires directe et diffus peut être donnée par [13]:

$$G = I + D \quad (\text{III-25})$$

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

### III-3-2 Modèle Ashrae

Ashrae est un modèle empirique (modèle 2) utilisé dans de nombreuses applications solaires dépendant de l'angle zénithal solaire  $\theta_z$  et de certaines valeurs empiriques (A, B et C sont présentées dans le [Tableau III.4](#)). Les équations suivantes expliquent de l'irradiance solaire globale G et le rayonnement solaire direct  $I_n$  au plan normale ainsi que le rayonnement solaire diffus D dans le plan horizontal [2], sont donné respectivement par :

$$G = I_n \cos \theta_z + D \quad (\text{III-26})$$

$$I_n = A \exp(-B/\cos(\theta_z)) \quad (\text{III-27})$$

$$D = C \cdot I_n \quad (\text{III-28})$$

[Tableau III.4](#): A, B et C sont les valeurs recommandées par le modèle Ashrae

Mois	A	B	C
Janv	1230	0.142	0.058
Feb	1215	0.144	0.060
Mar	1186	0.156	0.071
Apr	1136	0.180	0.097
May	1104	0.196	0.121
Jun	1088	0.205	0.134
Jul	1085	0.207	0.136
Aout	1107	0.201	0.122
Sept	1152	0.177	0.092
Oct	1193	0.160	0.073
Nov	1221	0.149	0.063
Dec	1234	0.142	0.057

### III-3-3 Modèle Atwater & Ball

Le modèle Atwater & Ball (modèle 3) a démontré la relation entre l'eau précipitable, la pression, la masse d'air et la profondeur optique des aérosols à large bande afin de calculer les transmittances des aérosols et de la vapeur d'eau. Le rayonnement solaire global à la surface horizontale en ciel clair est représenté par [3]:

$$G = I_0 \cos(\theta_z) ((\tau_{md} - a_w)\tau_a/(1 - 0.0685\rho)) \quad (\text{III-29})$$

Où

$$\tau_{md} = 1.041 - 0.16(m_a(949 \cdot 10^{-6}P + 0.051))^{0.5} \quad (\text{III-30})$$

$$a_w = 0.077(U_1 m_a)^{0.3} \quad (\text{III-31})$$

$\tau_{md}$  est le coefficient de transmission directe alors que  $a_w$  est l'absorption du rayonnement solaire.

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

### III-4 Statistique et évaluation

La performance du modèle de rayonnement solaire étudié est également évaluée sur la base des scores statistiques et du coefficient de corrélation proposé par [12] tels que l'erreur de biais moyen (MBE), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le coefficient de corrélation (R) et moyenne des erreurs absolues (MAPE). Les expressions pour les paramètres statistiques susmentionnés c'est les plus populaire et plus utilisés qui sont :

- **RMSE** [17] (Root Mean Square Error), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, RMSE fournit des informations sur la performance à court terme qui est une mesure de la variation des valeurs prédictives autour des données mesurées. Plus le RMSE est bas, plus l'estimation est précise elle est toujours positive:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (G_c^i - G_m^i)^2 / N} \quad (III-32)$$

- **MBE** (Mean Bias Error), erreur de biais moyen, MBE [17] est une indication de l'écart moyen des valeurs prédites à partir des données mesurées correspondantes et peut fournir des informations sur la performance à long terme des modèles, plus la MBE est basse, meilleure est la prédiction du modèle à long terme. Une valeur MBE positive indique la quantité de surestimation dans l'irradiation solaire directe prédiquée et vice versa.

$$MBE = \sum_{i=1}^N (G_c^i - G_m^i) / N \quad (III-33)$$

- **MAPE** [15] (Mean Absolute Percentage Error), moyenne des erreurs absolues en pourcentage : la MAPE est dans l'ensemble une mesure de la justesse de la prévision. Une valeur de MAPE inférieure à 10% est considérée comme acceptable.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{G_c^i - G_m^i}{G_m^i} \right) \times 100 \quad (III-34)$$

- **R** (corrélations coefficient) : Le coefficient de corrélation [15] mesure combien les valeurs se rapprochent-elles des valeurs. Clairement, une valeur du coefficient de corrélation plus proche de un implique une meilleure estimation.

$$R = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (G_m^i - \overline{G_m})(G_c^i - \overline{G_c})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_m^i - \overline{G_m})^2 \sum_{i=1}^N (G_c^i - \overline{G_c})^2}} \right] \quad (III-35)$$

Avec : N : Nombre de valeur d'observations

$G_m^i$  : Valeur mesurée du rayonnement global

$G_c^i$  : Valeur calculée du rayonnement global

$\overline{G_m}$  : La valeur moyenne de l'irradiation solaire mesurée

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

$\overline{G_c^i}$  : La valeur moyenne de l'irradiation solaire estimée.

Le MBE relatif (rMBE) et RMSE relatif (rRMSE), peut être calculé par les équations suivantes:

$$rMBE = 100 \cdot \left( \frac{1}{N} \sum \left( \frac{G_c^i - G_m^i}{G_m^i} \right) \right) \quad (III-36)$$

$$rRMSE = 100 \cdot \left( \frac{1}{N} \sum \left( \frac{G_c^i - G_m^i}{G_m^i} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (III-37)$$

Dans notre étude, nous avons utilisé tous les indicateurs cités ci-dessus, pour évaluer la performance de nos modèles.

### III-5 Résultats et discussion

Pour une validation du rayonnement solaire, nous comparerons certaines valeurs du rayonnement solaire à ciel clair fourni par les trois stations radiométriques Tamanrasset, Adrar et El-Goléa avec des valeurs simulés dans le plan horizontal.

Nous présentons les résultats et graphes comparatifs suivants; relatifs au rayonnement global pour les trois modèles avec les données expérimentales de l'année 2016 mesurées par la station de l'Unité de Recherche de l'Energies Renouvelables au Milieu Saharien d'Adrar (URERMS), Shariket Kahraba Wa Taket Moutadjadida (SKTM) et Office National de la Météorologie (ONM). Nous présentons les résultats obtenus dans le cadre de notre travail qui à été réalisés par le logiciel Matlab ainsi que leurs interprétations, pour apprécier la précision de notre travail, nous avons fait une étude comparative. L'une consiste à déterminer les trois modèles empiriques étudié qui vont nous permettre d'estimer les irradiances globales journalières sur un plan horizontal et ont le comparons par les résultats mesuré dans les trois sites durant les quatre saisons. Le graphe d'erreur relative dans le temps (TSV) est également donné au rayonnement global. L'expression de l'erreur relative moyenne (%) est donnée par l'équation suivante:

$$Err = \frac{|G \text{ mesuré} - G_{\text{calculé}}|}{G \text{ mesuré}} \cdot 100 \quad (III-38)$$

G: Irradiation solaire global ( $W/m^2$ )

Les données de la figure suivante montrent les valeurs mesurées du rayonnement solaire global en surface horizontale selon trois modèles pour les trois emplacements nommés; Tamanrasset (station 1), Adrar (station 2) et El-Goléa (station 3) basée sur la comparaison des flux de radiation solaire globale prédits par les modèles étudiés, Bird & Hulstrom (modèle 1), Ashrae (modèle 2), et Atwater & Ball (modèle 3).

# Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

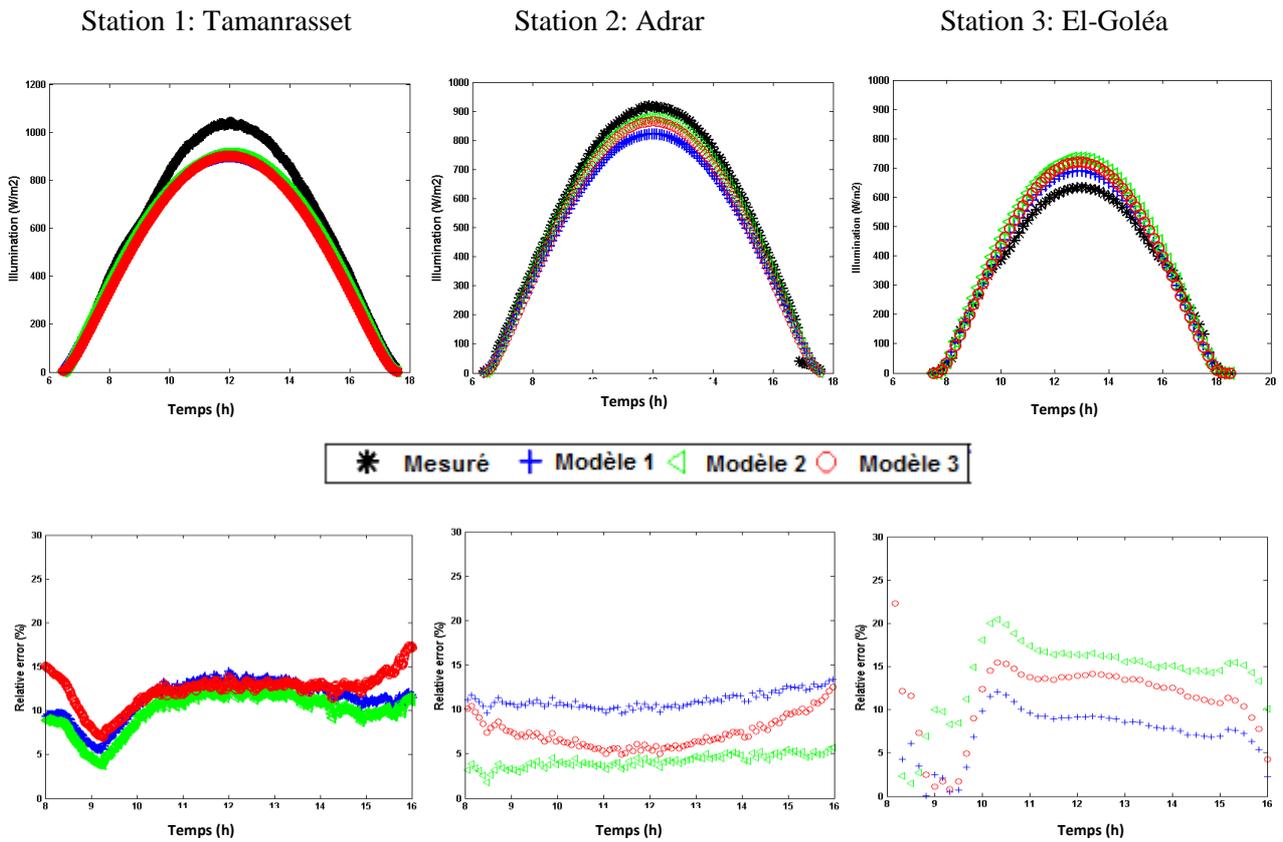


Figure III-4 : Rayonnement solaire globale et l'erreur relative pour le 24 février 2016

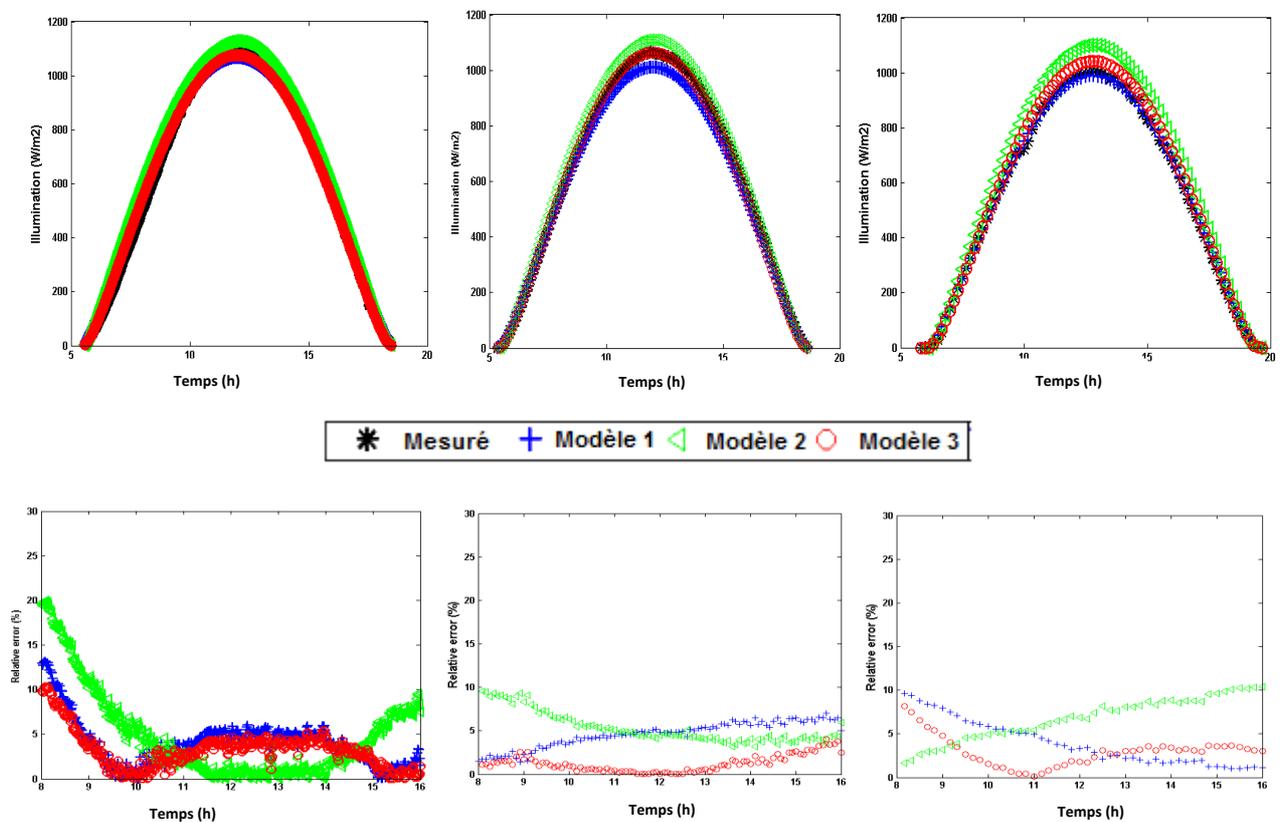


Figure III-5 : Rayonnement solaire globale et l'erreur relative pour le 17 Mai 2016

# Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

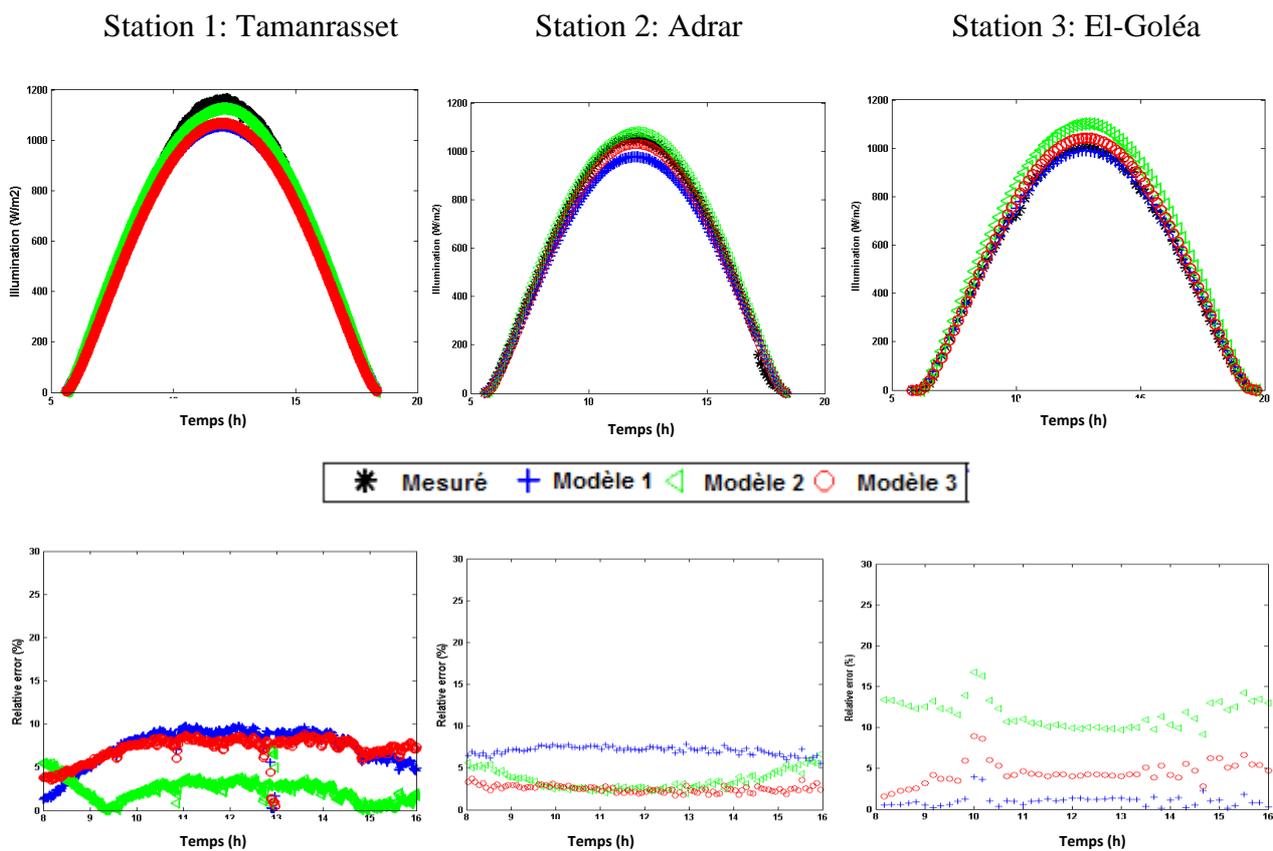


Figure III-6 : Rayonnement solaire globale et l'erreur relative pour le 03 Aout 2016

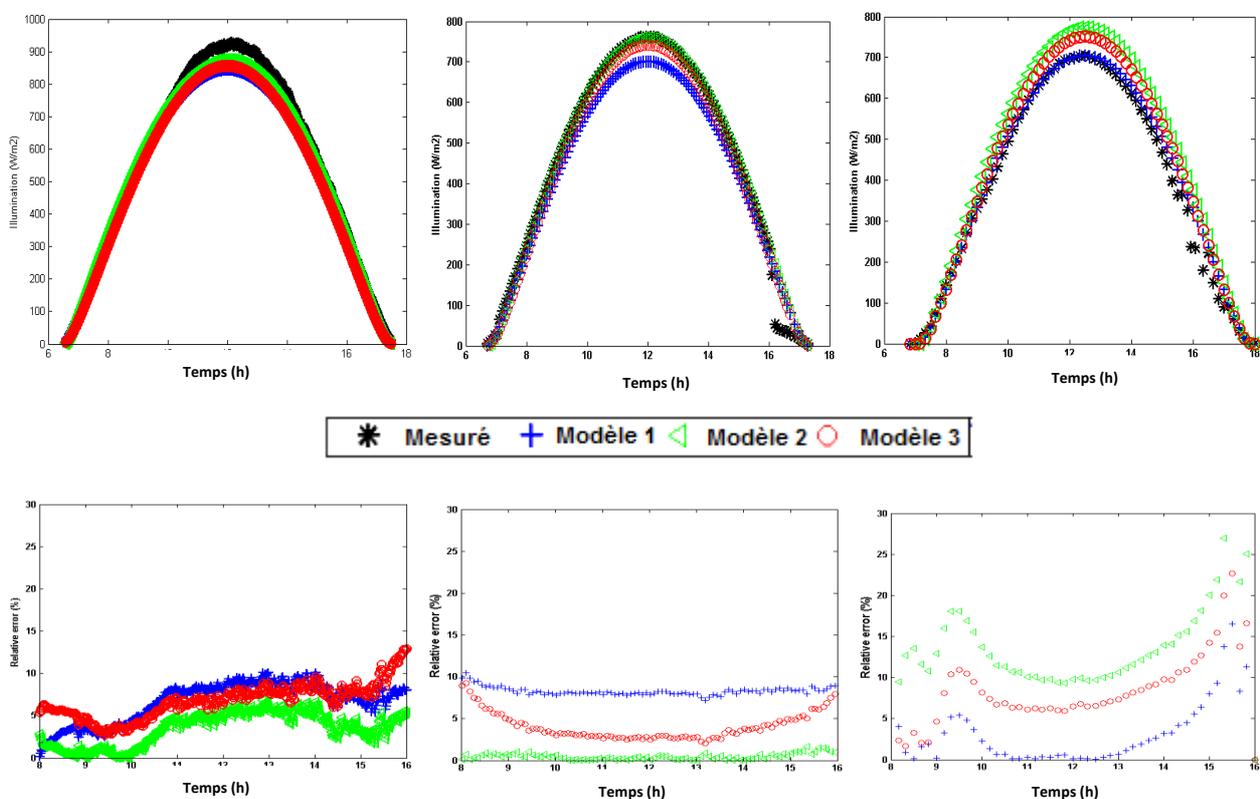


Figure III.7 : Rayonnement solaire globale et l'erreur relative pour le 13 Novembre 2016

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

Les figures III.(4–7) illustrent la comparaison des résultats entre les valeurs estimées et mesurées enregistrées dans trois stations différentes au sud de l'Algérie. Le rayonnement solaire est varié au cours de la journée, atteignant son maximum à midi 12 :00 environ 1000 watts par mètre carré, ses valeurs sont plus faibles dans le lever et le coucher du soleil en raison de la diminution des valeurs de la hauteur du soleil, avec une augmentation des mois chauds et une réduction des mois froids.

Les scores statistiques du rayonnement solaire global ont été calculés aux trois stations pour valider les modèles d'estimation en comparant les valeurs estimées et mesurées qui ont illustrés aux Tableaux (III.5-6) et aux figures (III.8-11).

**Tableau III.5:** Scores statistiques de MBE, RMSE et R pour tous les jours de cette étude

Jour	Modèle	Station 1 (Tamanreset)			Station 2 (Adrar)			Station 3 (El-Golea)		
		MBE (Wh/m <sup>2</sup> )	RMSE (Wh/m <sup>2</sup> )	R	MBE (Wh/m <sup>2</sup> )	RMSE (Wh/m <sup>2</sup> )	R	MBE (Wh/m <sup>2</sup> )	RMSE (Wh/m <sup>2</sup> )	R
15 Janvier	Modèle 1	39.73	51.07	0.9958	54.86	55.53	0.9996	-19.55	28.56	0.9966
	Modèle 2	57.96	63.90	0.9959	23.84	24.22	0.9996	-43.28	52.72	0.9968
	Modèle 3	43.72	51.88	0.9957	40.18	40.34	0.9995	-25.89	39.81	0.9961
24 Février	Modèle 1	78.11	90.66	0.9988	80.95	82.47	0.9996	-30.83	41.47	0.9971
	Modèle 2	86.85	93.68	0.9989	30.84	32.11	0.9996	-65.79	75.77	0.9968
	Modèle 3	69.64	79.61	0.9985	49.90	50.26	0.9996	-47.45	61.66	0.9972
22 Mars	Modèle 1	63.72	81.30	0.9994	65.89	68.96	0.9995	8.17	15.13	0.9988
	Modèle 2	67.33	76.89	0.9996	4.26	11.90	0.9995	-0.47	11.47	0.9987
	Modèle 3	31.66	47.72	0.9990	30.33	31.50	0.9995	6.79	14.39	0.9977
25 Avril	Modèle 1	0.45	47.14	0.9971	61.61	64.23	0.9997	35.81	40.51	0.9976
	Modèle 2	3.33	34.99	0.9976	-15.09	16.40	0.9996	-35.34	39.27	0.9972
	Modèle 3	-43.36	54.50	0.9965	25.33	25.98	0.9997	1.44	16.02	0.9976
12 Mai	Modèle 1	-2.79	46.63	0.9977	31.77	38.18	0.9997	27.72	28.00	0.9999
	Modèle 2	-0.23	33.70	0.9982	-51.69	52.15	0.9996	-58.70	62.50	0.9999
	Modèle 3	-51.17	59.66	0.9971	-4.35	7.77	0.9997	-8.22	19.73	0.9999
03 Juin	Modèle 1	31.96	53.53	0.9992	48.57	50.76	0.9999	-54.49	58.70	0.9987
	Modèle 2	33.87	45.06	0.9995	-41.51	42.34	0.9998	-147.99	148.69	0.9984
	Modèle 3	-18.97	30.65	0.9988	12.63	13.71	0.9999	-91.59	92.42	0.9987
29 Juillet	Modèle 1	55.64	70.84	0.9990	-2.01	23.91	0.9995	18.11	19.45	0.9998
	Modèle 2	57.37	65.31	0.9992	-95.11	95.52	0.9994	-76.17	78.41	0.9999
	Modèle 3	5.98	25.93	0.9986	-39.24	40.32	0.9996	-18.68	22.87	0.9998
23 Aout	Modèle 1	55.64	70.84	0.9990	61.34	63.99	0.9999	3.32	10.21	0.9992
	Modèle 2	57.37	65.31	0.9992	-27.36	27.53	0.9999	-88.54	91.20	0.9990
	Modèle 3	5.98	25.93	0.9986	21.88	22.22	0.9999	-33.84	37.82	0.9992
13 Sept.	Modèle 1	27.40	48.27	0.9985	50.61	54.58	0.9993	9.60	23.83	0.9986
	Modèle 2	25.58	38.02	0.9987	-32.61	33.90	0.9992	-71.28	72.22	0.9985
	Modèle 3	-11.18	29.02	0.9982	8.70	12.47	0.9993	-30.49	32.61	0.9986
17 Octobre	Modèle 1	20.90	40.20	0.9986	59.00	60.61	0.9996	22.54	34.53	0.9932

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

13 Nov.	Modèle 2	18.56	29.54	0.9988	-10.79	12.09	0.9996	-45.16	50.20	0.9927
	Modèle 3	-10.55	25.86	0.9984	17.83	18.36	0.9996	-14.95	25.73	0.9933
	Modèle 1	40.12	50.04	0.9987	50.81	51.58	0.9999	-20.47	35.79	0.9899
	Modèle 2	42.43	46.79	0.9988	-0.87	2.50	0.9999	-76.67	80.84	0.9895
16 Déc.	Modèle 3	20.20	29.06	0.9985	21.06	21.13	0.9999	-51.21	57.01	0.9900
	Modèle 1	18.26	31.05	0.9981	44.53	44.73	0.9994	-20.29	28.11	0.9954
	Modèle 2	34.79	39.33	0.9984	13.20	14.18	0.9995	-46.85	54.68	0.9956
	Modèle 3	19.20	27.90	0.9978	31.07	32.00	0.9993	-28.61	40.21	0.9949

En outre, les figures III.(8-11) et Tableaux III.(5-6) illustrent la moyenne des erreurs absolues en pourcentage, l'erreur de biais moyenne, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne et les graphes de nuage de points. Par ailleurs, le meilleur modèle utilisé pour l'estimation celui qui donne la meilleure approximation avec les données mesurées.

De plus, la figure III.8 montre les graphes de nuage de points des valeurs journalières du rayonnement solaire global en 2016 pour les meilleurs modèles pour chaque station. On peut voir que les données sont distribuées sous forme d'un ensemble de points plus proches de la droite linéaire parfaitement ajustée (en rouge), indiquant la relation entre les valeurs mesurées et simulés ( $W/m^2$ ) durant la période d'étude à chaque station.

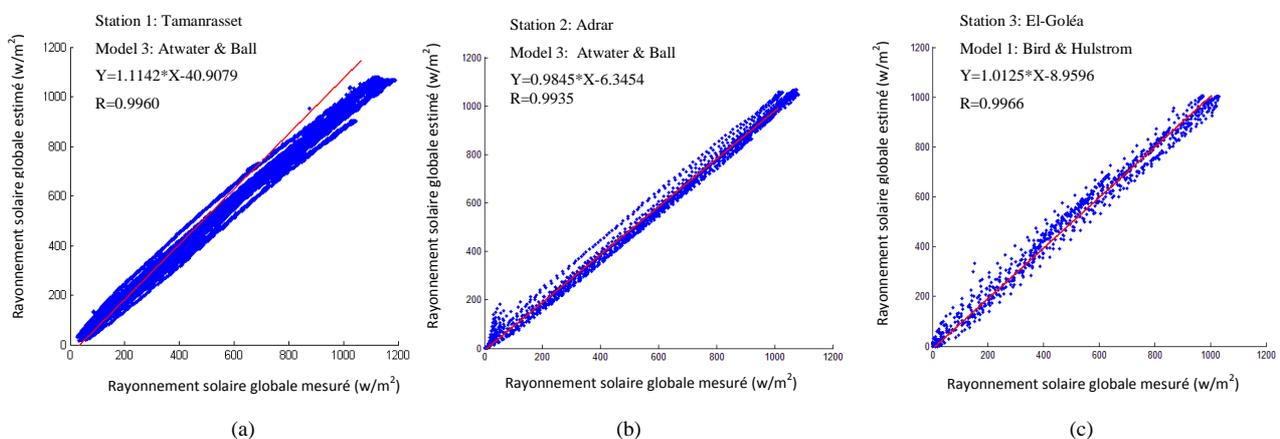


Figure III-8: Nuage de points du meilleur modèle dans les trois stations durant toute la période d'étude

Comme le montrent les figures III.(9-11), le rayonnement solaire global instantané calculé par les modèles concordait bien avec ceux mesurés par toutes les stations. Les MAPE enregistrées aux stations 1 et 2 étaient inférieures à 10% pour tous les mois, sauf en février et juillet comme représenté sur les figures III.(9A -9B). Cependant, le MAPE mesurés à la station 3 est inférieur à 20% pour tous les mois, comme le montre la figure III.9C. Bien que le MAPE enregistré aux

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

stations 1 et 2 soit inférieur à 10% et 7%, respectivement. La valeur la plus basse des coefficients MAPE enregistrés à la station 3 est liée au modèle 1 (MAPE <8%).

Sur la base des résultats statistiques (rMBE, rRMSE, R), on peut constater que les résultats du rMBE n'ont pas dépassé 10 et 7% en valeur absolue pour les stations 1 et 2, respectivement. La valeur de rMBE du modèle 1 varie de -7 à + 8% à la station 3 et de -20 à +13 (%) pour trois modèles à toutes les stations (Figure III.10). Par conséquent, la valeur rRMSE n'a pas dépassé les pourcentages respectifs de 14, 12 et 20% pour la station 1, 2 et 3 (Figure III.11).

Une bonne corrélation entre les valeurs prédites et calculées à chaque station est apparue; les valeurs du coefficient de corrélation R sont supérieures à 0,98, comme indiqué dans le tableau III.5. En outre, les résultats d'analyse de MBE et de RMSE fournissent également une bonne approximation entre les valeurs de rayonnement solaire mesuré et celles calculées par les modèles.

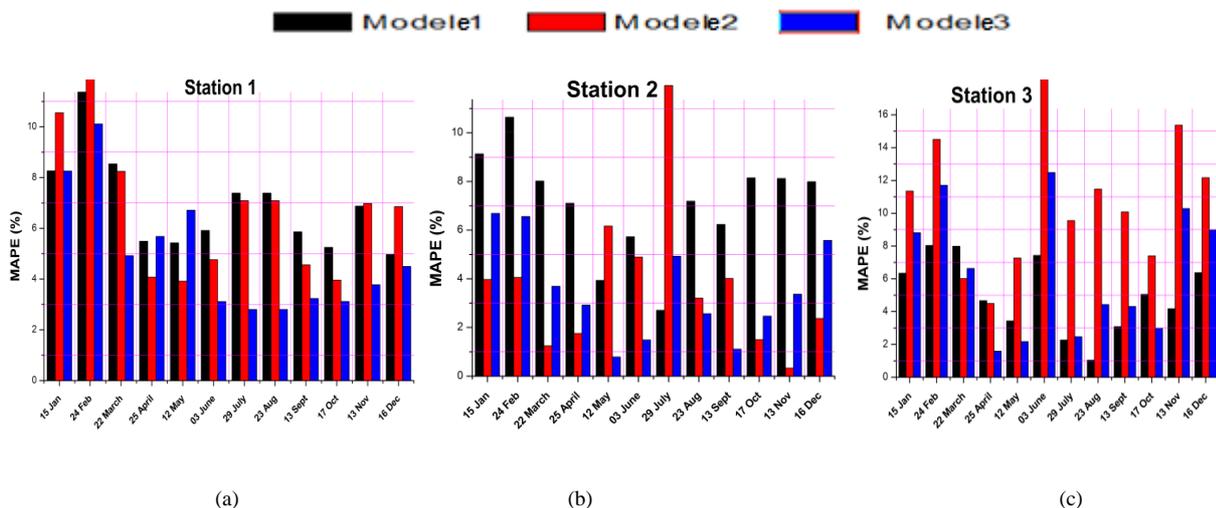


Figure III-9: MAPE durant toute la période d'étude

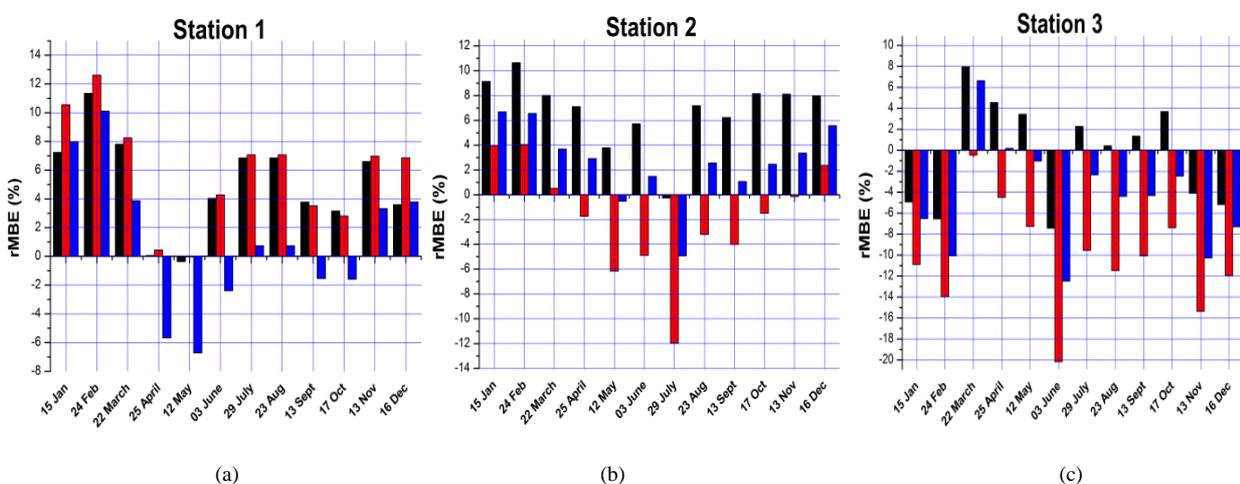


Figure III-10: rMBE durant toute la période d'étude

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

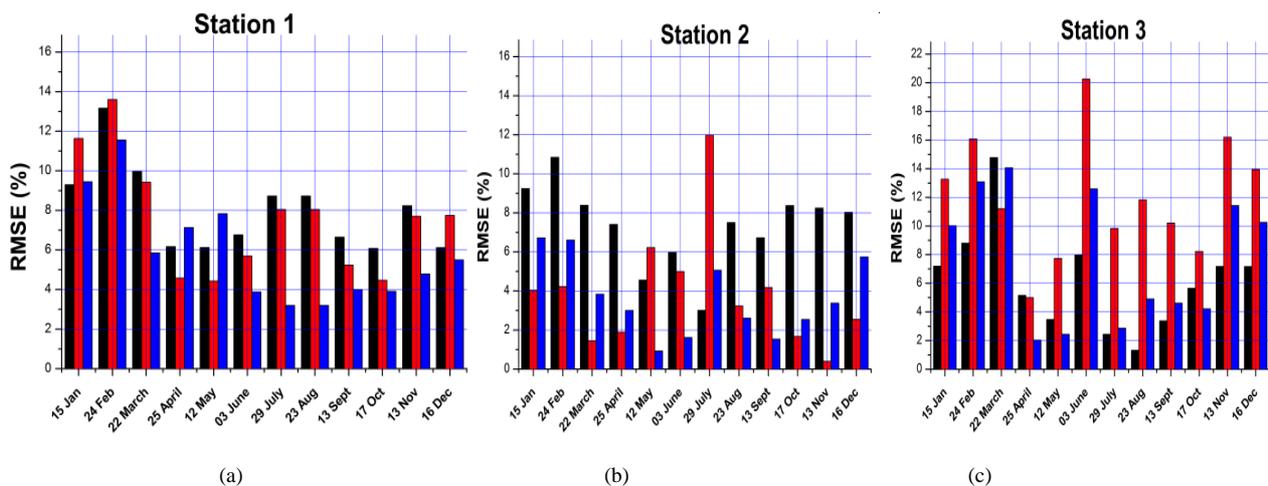


Figure III-11: rRMSE durant toute la période d'étude

Les résultats des statistiques de MAPE, MBE, rMBE, RMSE, rRMSE et R pour toutes les stations du 1er janvier au 31 décembre sont présentés au [Tableau III.6](#). En général, tous les modèles utilisés dans cette étude ont bien servi à estimer le rayonnement solaire global. Les valeurs les plus faibles des coefficients de scores statistiques se retrouvent dans le modèle Atwater & Ball aux stations 1 et 2 (MAPE = 4.99 et 3.62, R = 0.9960 et 0.9935, respectivement), ce qui indique que ce modèle convient mieux aux stations 1 et 2 situées à Tamanrasset et Adrar, respectivement. Les valeurs des indicateurs statistiques pour le modèle Bird & Hulstorm à la station 3 ont une excellente performance pour les valeurs les plus basses (MAPE = 4.12, R = 0.9966). On peut en conclure que le meilleur modèle de l'estimation du rayonnement solaire global à la station 3 située à El-Goléa est celui de Bird & Hulstorm. L'aspect le plus intéressant de ce résultat est qu'il existe une bonne corrélation entre les valeurs de rayonnement solaire mesurées et celles calculé dans les stations sélectionnées. Le résultat de cette étude montre que la simulation présente un bon accord avec les valeurs mesurées alors que le meilleur modèle donne des meilleurs résultats, les erreurs entre les valeurs mesurées et estimées sont négligeables dans certains cas. Ainsi, les modèles les mieux étudiés ont une excellente performance, précise pour estimer l'irradiance solaire globale dans le sud de l'Algérie.

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

Tableau III.6: Résultats de l'analyse statistique

Station	Modèle	MAPE (%)	MBE (Wh/m <sup>2</sup> /j)	rMBE (%)	RMSE (Wh/m <sup>2</sup> /j)	rRMSE (%)	R
Station1 (Tamanrasset)	1	6.87	30.43	4.64	55.98	8.54	0.9953
	2	6.65	37.32	5.69	53.16	8.11	0.9955
	3	<b>4.99</b>	<b>2.44</b>	<b>0.37</b>	<b>42.55</b>	<b>6.49</b>	<b>0.9960</b>
Station 2 (Adrar)	1	7.07	50.07	6.74	56.43	7.59	0.9935
	2	4.00	<b>-18.23</b>	-2.45	39.16	5.27	0.9875
	3	<b>3.62</b>	18.78	<b>2.53</b>	<b>30.47</b>	<b>4.10</b>	<b>0.9933</b>
Station 3 (El-Goléa)	1	<b>4.12</b>	<b>-2.87</b>	<b>-0.48</b>	<b>30.59</b>	<b>5.07</b>	<b>0.9966</b>
	2	10.92	-65.41	-10.84	74.84	12.40	0.9938
	3	5.63	-29.89	-4.95	42.89	7.11	0.9941

### III-6 Système d'information géographique du gisement solaire

Cette partie est consacrée à la réalisation d'une application géographique du SIG que nous avons développé, la méthodologie nécessite la construction d'une base de données contenant les informations géographiques liées à la région. Ces informations seront intégrées dans la carte SIG afin de faire une modélisation des flux solaire pour les localités de la région d'Adrar par divers modèles empiriques pour simuler le potentiel solaire en fonction du temps, ensuite en va stocker les informations (flux mensuelle, annuelle, direct, diffus et global). Pour cela, nous allons aborder progressivement la connaissance des potentiels énergétiques renouvelables sur le site de l'étude, le développement d'une base de données pour gisements solaire.

#### III-6-1 Objectif

L'objectif consiste à élaborer un SIG de gisement solaire de la région. En s'exprimant en langage naturel, il faut que l'utilisateur puisse déterminer rapidement et de manière adéquate les références aux objets unique qui fournissent les coordonnées requises afin de positionner les lieux sur une carte géographique. Le but ultime du système consiste à accroître la qualité des localisations en termes de précision et d'exactitude.

#### III-6-2 Bibliographie des logiciels de gisement solaire

Il y a beaucoup de logiciels de gisement et dimensionnement solaire permet eux en à (Tableau III.7) [18] :

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

Tableau III.7 : Quelques logiciels de gisement solaire

Logiciel	Description
<b>METEONORM 5.0 (CH)</b>	Logiciel (de Meteotest) de données climatiques et irradiation solaire, calcule suivant l'orientation et l'inclinaison. Logiciel téléchargeable fonctionnant en mode démonstration durant 10 jours.
<b>SoDa (F)</b>	Service web (de l'Ecole des Mines de Paris) pour les professionnels en énergie solaire. Base de données climatiques et irradiation solaire sur la planète avec différentes applications.
<b>CalSol (INES)</b>	Ce logiciel conçu par l'INES, accessible gratuitement sur Internet, permet d'apprécier le potentiel en énergie solaire pour une quinzaine de villes en France suivant l'inclinaison et l'orientation et d'effectuer une pré étude énergétique, économique et environnementale pour une installation PV connectée au réseau électrique (à venir : PV en site isolé, eau chaude sanitaire solaire, chauffage solaire et solaire passif).
<b>PVSOL (GE)</b>	Logiciel de la société Valentin, programme de simulation d'installations photovoltaïques. Possibilité de télécharger une version de démonstration ainsi que le manuel d'utilisation
<b>RETScreen (CAN)</b>	Logiciels téléchargeables gratuits sur les données solaires, simulation de systèmes photovoltaïques, thermiques, passifs et sur l'émission GES
<b>PVGIS</b>	L'application en ligne gratuite PVGIS est un excellent outil de simulation qui permet de calculer gratuitement la production de systèmes photovoltaïques connectés au réseau en Europe et en Afrique (et également pour site isolés en Afrique seulement). A l'aide de son interface Google Maps intégré, il est très facile d'obtenir les données de production d'un système PV à partir des données d'ensoleillement précises du site (intégrant notamment les masques lointains liés au relief, collines, montagnes).

### III-6-3 Description du logiciel GISOL2 (Système d'Information Géographique SOLaire 2)

La présente application permet de simulé divers types de rayonnements solaires, pour les sites de la région. Il permet de modéliser l'ensemble du rayonnement solaire incident à des fins d'optimisation des systèmes utilisant l'énergie solaire, que ce soit leur dimensionnement ou l'évaluation de leurs performances.

L'application donne pour un site choisi sur la carte les déférents paramètres astronomiques parmi ces en cite : déclinaison, l'équation du temps ET, lever et coucher de soleil, calcule le flux solaire direct, diffus et global par jour ou mois ou année par différent modèles que nous avons sélectionnées (Figure III.15).

Le SIG développer permet d'effectuer certains fonctionnalités courants (Figure III.12) telles que la sélection des données désirées, la création des cartes thématiques et en plus la fonctionnalité standard assurée par n'importe quelle système d'information géographique tel que Zoom Avant-

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

Arrière, le contrôle de la carte (déplacement), menu contextuelle, l'affichage par couche, mise à jour les données des sites, impression rapport, graphe du statistique et autres, comme indiqué dans les Figures III.(13-16) .

Puisque on a utilisé le logiciel MapInfo version 10 pour le traitement des cartes, on à également choisi pour l'affichage de nos cartes dans notre application et ceci grâce à une connexion entre lui et le langage de programmation Delphi version 7, en effet ce langage repose sur des appels aux procédures et des fonctions proposent en MapBasic (Annexe B).

Ce logiciel crée et développer appelé GISOL2 possède une interface d'utilisation (Figure III.12), il et composé de plusieurs fenêtres chacune traite une partie bien définie. On trouve ces fenêtres comme suit :

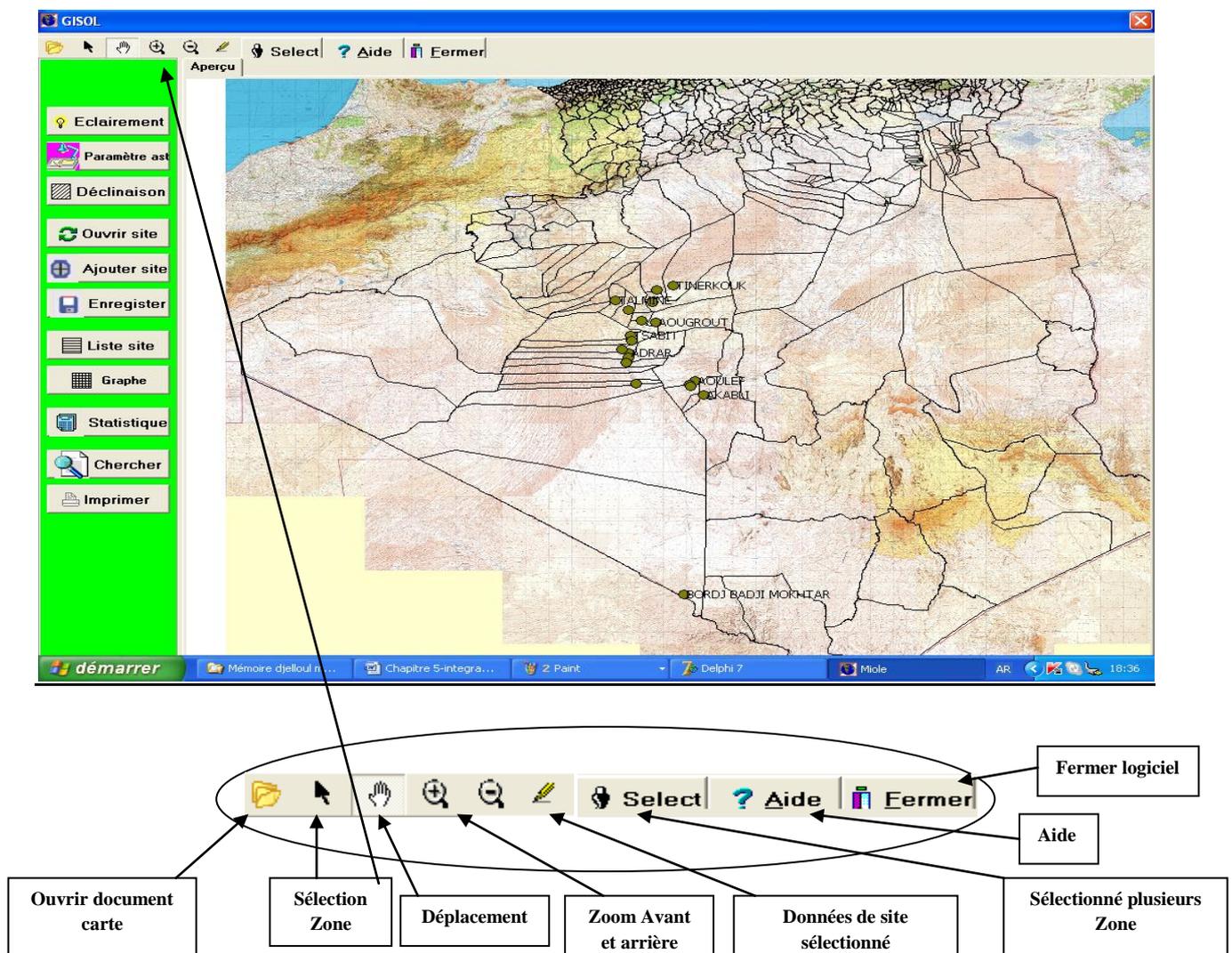


Figure III-12: L'interface générale du logiciel GISOL2

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

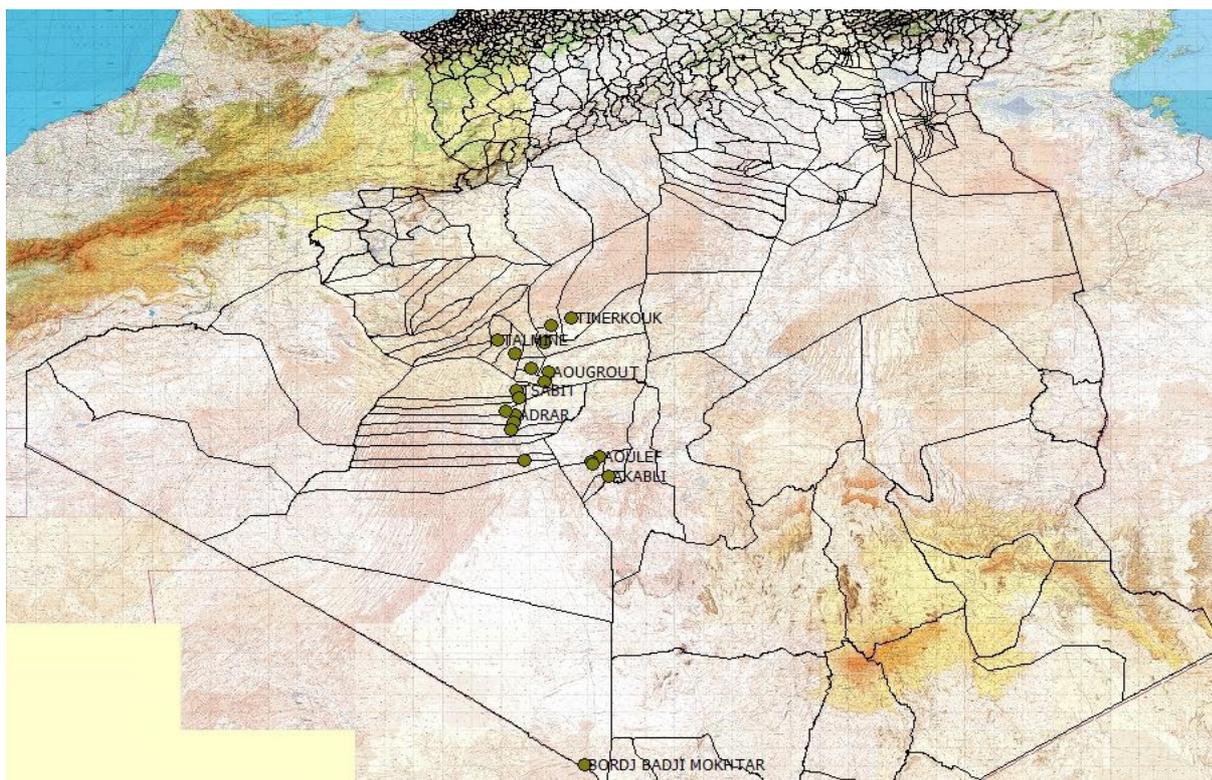


Figure III.13 : Carte SIG de la région d'Adrar

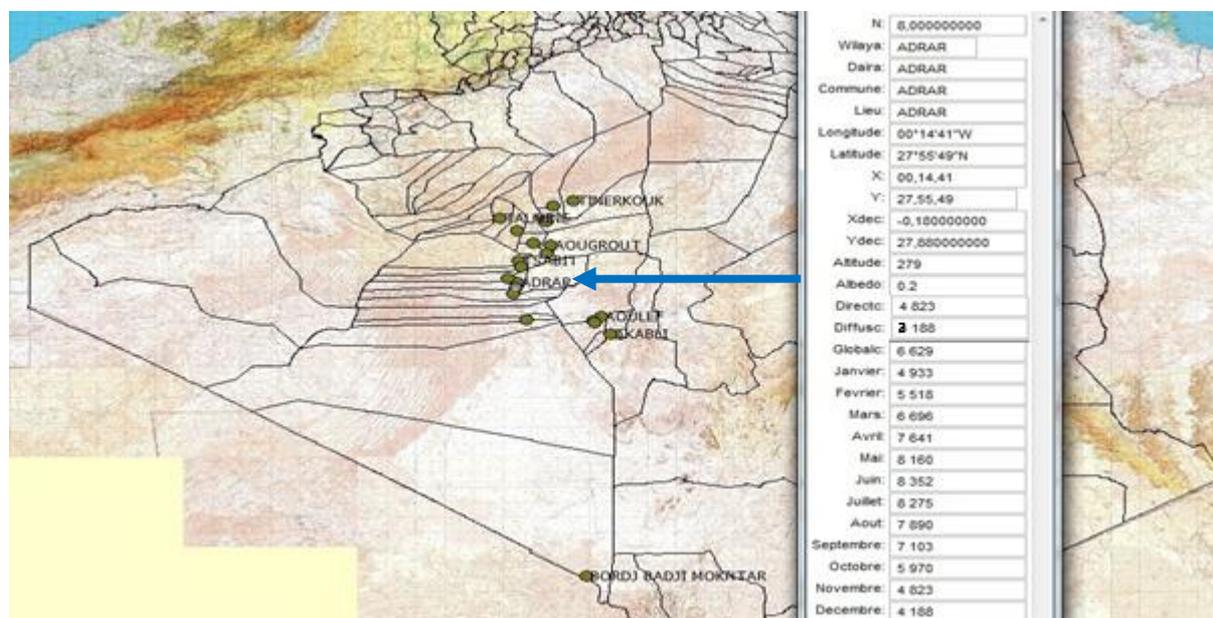


Figure III.14: Informations du site d'Adrar

On peut faire une modélisation de l'éclairement direct, diffus et global horizontal sur n'importe quelle site, date de l'année et divers modèles, ses données de l'éclairement mensuel et annuel calculer seront intègre sur les sites de la carte géographique (Annexe C).

# Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

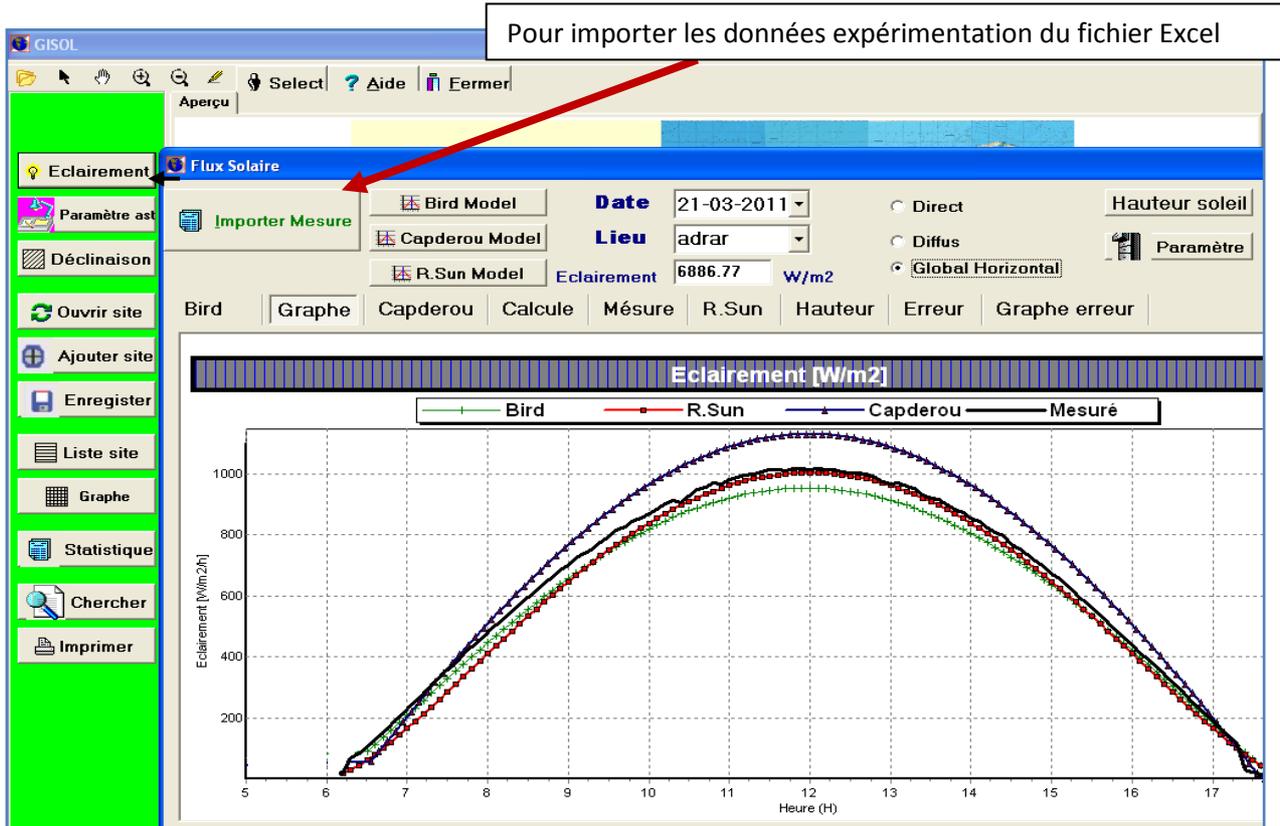


Figure III.15: Modélisation de l'éclairement solaire au différent site de la région

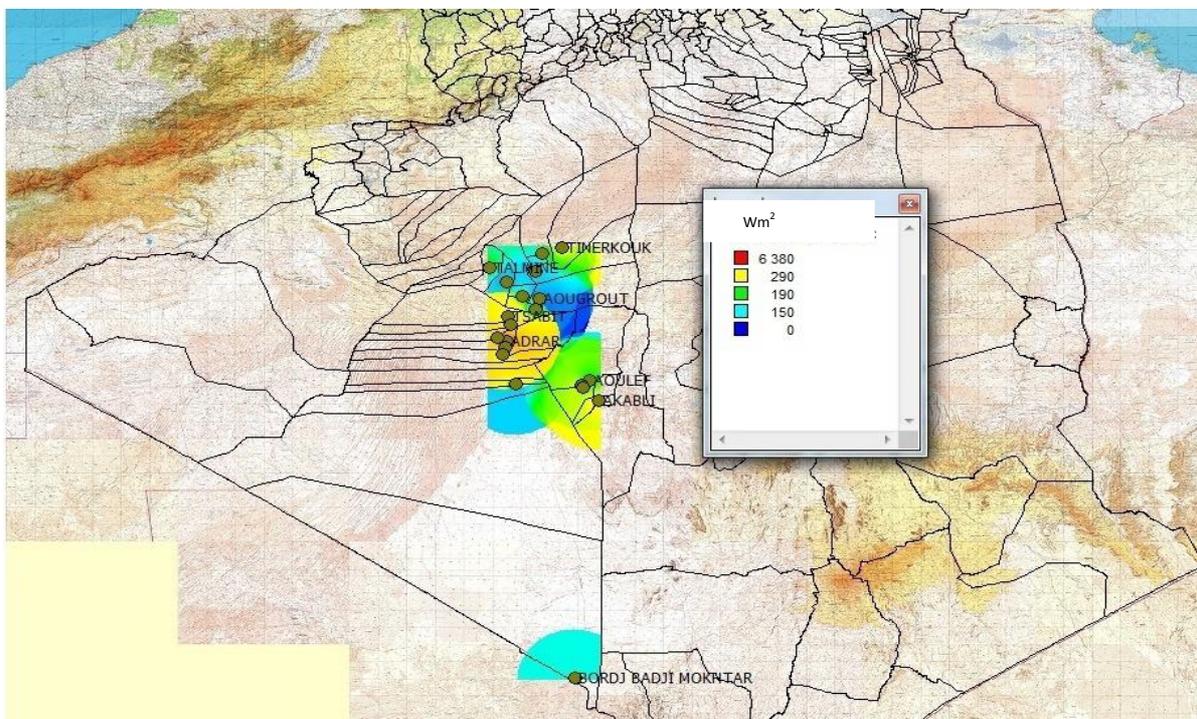


Figure III.16 : Carte thématique de l'éclairement solaire de la région d'Adrar

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

---

### III-7 CONCLUSION

Cette étude a été réalisée dans une région climatique aride avec trois stations dans la région sud de l'Algérie, trois modèles empiriques d'estimation du rayonnement solaire global par ciel clair ont été testés et évalués en termes de précision et d'indicateurs statistiques. Les modèles ont été définis avec des paramètres d'entrée tels que la pression atmosphérique, le coefficient de diffusion des aérosols, la température moyenne et l'humidité relative.

Cette simulation a évalué les trois modèles empiriques de Bird & Hulstrom, Ashrae et Atwater & Ball afin d'estimer le flux de rayonnement solaire global en comparant les valeurs mesurées et estimées. Les résultats ont démontré que le modèle Atwater & Ball est plus adapté à l'estimation du rayonnement solaire global à Tamanrasset et Adrar par rapport aux autres modèles. Cependant, le modèle Bird & Hulstrom donne une bonne prévision du rayonnement solaire global à El-Goléa. En règle générale, pour tous les meilleurs modèles sur trois sites, l'erreur moyenne absolue ne dépasse pas 5% et le coefficient de corrélation était supérieur à 0.99, de même que le coefficient relatif de l'erreur de biais n'excède pas 3% en valeur absolue. RMSE relatif variait entre 4% et 7% pour l'irradiation globale. Les résultats obtenus pour les sites choisis s'approchent avec une grande précision des données réelles, des comparaisons avec d'autres travaux de la littérature montrent que ces travaux offrent des résultats similaires, parfois meilleurs, par rapport aux valeurs de score statistiques recommandées et études précédentes. Il a été conclu que pour des conditions de ciel clair, les modèles empiriques Atwater & Ball et Bird & Hulstrom fournissent la meilleure précision pour estimer le rayonnement solaire global sur un plan horizontal, ce qui présente un intérêt pour plusieurs applications utilisant l'énergie solaire (chauffe-eau solaire, fours solaires, cellules photovoltaïques ...etc.), en particulier dans les localités du sud de l'Algérie et pour divers sites présentant des conditions atmosphériques similaires.

Le développement d'un système d'information géographique GISOL2, un projet qui permet la création d'une base de données dynamique pour une gestion durable des ressources naturelles renouvelables dans un milieu saharien, présente essentiellement une météorologie pour évaluer les ressources d'énergies renouvelables géographiquement d'une manière rapide et efficace sur n'importe quelle localité de la région, et permet pour les concepteurs et chercheurs l'estimation de la quantité de flux solaire dans la région et de voir un bilan de gisement solaire.

### III-8 REFERENCES

- [1] Bird R. E. and Riordan, C., (1986), «Simple Solar Spectral Modèle 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.
- [2] ASHRAE, (1985), Handbook of fundamentals. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers.
- [3] Atwater MA., Ball JT., (1978), «A numerical solar radiation Model based on standard meteorological observations», *Solar Energy*, 21,163–70.
- [4] Bouchouicha, K. Razagui, Bachari A. N. and Aoun N.,(2016), «Hourly global solar radiation estimation from MSG-SEVIRI images-case study: Algeria», *World Journal of Engineering*, 13(3), 266 – 274.
- [5] Djelloul Benatiallah, Ali Benatiallah, Kada Bouchouicha, Nasri Bahous, Basharat Jamil, (2019), «A statistical comparative study of clear sky global solar irradiance Models under south Algerian climate », *Cinecia e Técnica Vitvincola*, 34(3),14-29.
- [6] Djelloul Benatiallah, Ali Benatiallah, Kada Bouchouicha, Messaoud Hamouda, and Bahous Nasri,(2018), «An empirical Modèle for estimating solar radiation in the Algerian Sahara», *American Institute of Physics*, <https://doi.org/10.1063/1.5039218>
- [7] Djelloul Benatiallah, Ali Benatiallah, Kada Bouchouicha, A.Harouz, (2016), «Development and Modeling of a Geographic Information System solar flux in Adrar, Algeria, *International Journal of System Modeling and Simulation*», 1(1), 15-19.
- [8] Bailek N., Bouchouicha K., Al-Mostafa Z. et al. ,(2018), «A new empirical Model for forecasting the diffuse solar radiation over Sahara in the Algerian Big South», *Renewable Energy*, 117, 117-530.
- [9] Abbott P.,(1986), Guidelines on the Quality Control of Surface Climatological Data, *Report edition*.
- [10] Pandey C. K. and Katiyar A. K., (2013), «Solar Radiation: Modèles and Measurement Techniques», *Journal of Energy*, Article ID 305207.
- [11] El-Mghouchi Y., El-Bouardi A., Choulli Z., and Ajzoul T. (2016), «Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56,87–99.
- [12] Bird, E .R. Hulstrom, R.L.,(1981), «A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insulation on Horizontal Surfaces», *Seri Tr*,642-761.

## Chapitre III : Modélisation du rayonnement solaire

---

- [13] Bouchouicha K., Razagui A., Bachari N.I. et al., (2016), «Mapping and Geospatial Analysis of Solar Resource in Algeria», *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 23 (6), 735-751.
- [14] Bird, R.E., Hulstrom, R.L.,(1980), «Direct insolation Modèles. Trans. ASME J», *Solar Energy*, Vol. 103, 182-192.
- [15] Stone R.J., (1993), «Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation Models», *Solar Energy*, 51(4), 289–91.
- [16] El Mghouchi Y., El Bouardi, A., Sadouk A., Fellak I. Ajzoul T., (2016), « Comparison of three solar radiation Modèles and their validation under all sky conditions – case study: Tetuan city in northern of Morocco», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, 1432–1444.
- [17] National Centers For Environmental Information, Consulté Octobre 2018, [www.ncdc.noaa.gov](http://www.ncdc.noaa.gov)
- [18] Ricaud A., «Gisement Solaire», Cythelia Sarl, Septembre 2009.

**Chapitre IV**  
**Estimation du rayonnement**  
**solaire par réseaux de**  
**neurone artificiel(RNA)**

### IV.1. Introduction

Pour optimiser et dimensionné l'utilisation de l'énergie solaire, un besoin fondamental est de connaître la quantité de radiations solaires à un emplacement spécifié de la Terre en utilisant les données de mesure métrologique, astronomique, durée d'insolation et autre disponibles. Les modèles de l'intelligence artificielle représenté par l'apprentissage par réseaux de neurone artificielle (RNA), fournissent un mécanisme pour estimé une ou plusieurs sortie de quelque données en entré, une fonction d'activation utilisé et un certain nombre de couche.

Le présent travail vise à développer un modèle neuronal pour estimé l'irradiation solaire globale horaire pour un ciel quelconque, en fonction des paramètres de la géométrie solaire et d'autre données astronomique pour la région d'Adrar. Pour ce faire, nous avons utilisé neuf modèles et trois fonctions d'activation. On à utilisé les données acquises par l'URERMS et de la base de donnée SODA (Simple Ocean Data Assimilation) sur une période de six (06) ans (2013 - 2018), 80% des données ont été utilisées pour entraîner le réseau et les 20% qui restantes pour le valider. Nous avons essayé plusieurs combinaisons des données d'entrée, qui donne différent niveau de précision.

### IV.2. Procédure de la construction d'un réseau de neurones

Une techniques d'intelligences artificielles, telles que les réseaux de neurones artificiels (RNA) à était utilisé pour modéliser le rayonnement solaire, plusieurs travaux de RNA ont été menés par les chercheurs dans les dernières années [1-10].

La procédure de conception d'un réseau de neurone peut être résumée en cinq étapes :

- a. La collecte d'une base de données (BDD).
- b. La séparation de la base de données en deux sous-ensembles (base d'apprentissage, base de validation et test).
- c. Prétraitement des données.
- d. Entraînement du réseau de neurones sur les bases d'apprentissage et de validation.
- e. Mesure les performances du réseau de neurone.

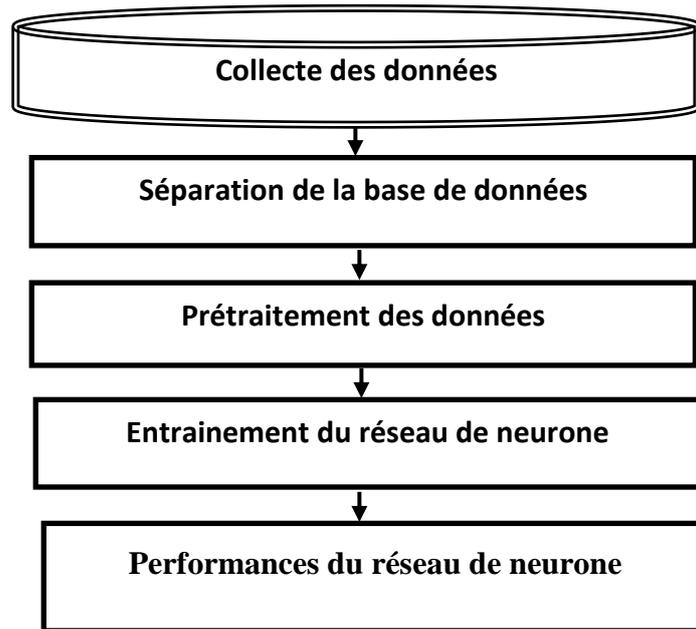


Figure IV. 1 : Flux de base pour la conception d'un modèle de réseau neuronal artificiel

### IV.2.1. Collecte d'une base de données

L'objectif de cette étape est de collecter un grand nombre de données et suffisant pour construire une base de données globale, qui sera utilisée à l'apprentissage et au test du AAN. Cette base de données forme l'entrée de réseau de neurones, et par logique c'est elle qui détermine à la fois la taille du réseau, et les performances du système. Pour notre étude, nous avons utilisé les données horaires de six (06) ans (de 2013 à 2018) de 07h00 jusqu'à 18h00 (Comptant 27844 valeurs) collectées par l'URERMS d'Adrar (Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien) et fournies par la base de données SODA [11].

Nous avons travaillé avec les paramètres météorologiques et astronomiques pour prévoir en sortie le rayonnement solaire global et comme entrées : Température, Humidité, Vitesse du vent, Pression atmosphérique, et en calculer les paramètres : déclinaison horaire, angle de la hauteur solaire du soleil, durée d'insolation du jour, irradiation solaire extraterrestre, par les équations (I.1), (I.3), (I.7) et (I.8) respectivement (voir [Tableau IV.1](#)).

### IV.2.2. Séparation de base de données

Après collecter les données suffisantes, il faut commencer à la phase de séparation de ces données en deux parties, une partie pour réaliser l'apprentissage et l'autre pour le test qui

permet de contrôler la phase d'apprentissage, validé le réseau obtenu et déterminer ses performances.

La séparation des données en partie d'apprentissage et partie de test convient à une partie importante de l'évaluation des modèles d'exploration de données. En général, lorsque nous partitionnons des données en une partie d'apprentissage et une partie de test, la plupart des données sont utilisées pour l'apprentissage (qui dépasse 60%) et une plus petite partie des données est utilisée pour les tests. La sélection choisie de manière aléatoire des données afin d'aider à s'assurer que les partitions de test et d'apprentissage sont conformes. Il est important de ne pas utiliser aucun élément de la base de test pendant toute la durée de l'apprentissage. L'utilisation des mêmes données pour l'apprentissage et les tests nous permet de diminuer les effets des différences de données et de mieux comprendre les spécificités du modèle, nous avons utilisé dans notre étude 80% des données pour l'apprentissage et le reste pour le test et validation.

Après le traitement d'un modèle à l'aide du cycle d'apprentissage, nous testons le modèle en effectuant des prédictions sur la partie de test. Comme les données dans la partie de test contiennent déjà des valeurs connues pour l'attribut que nous désirons prédire, il est facile de déterminer si les prédictions du modèle sont conformes.

### IV.2.3. Choix de l'architecteur de réseau de neurone artificiel

La définition de l'architecture du réseau de neurones multicouches pour la résolution d'un problème donné reste un problème ouvert [12], ce problème est généralement déterminé en utilisant deux approches : la première consiste à ajouter successivement des neurones et des connexions à une petite architecture, la deuxième consiste à retirer des neurones et des connexions d'une architecture initiale maximale. Ces deux approches ont généralement comme inconvénient le grand temps d'apprentissage.

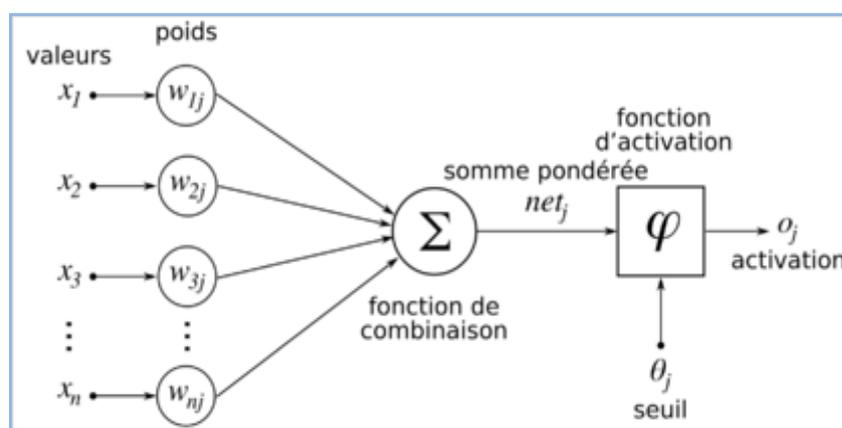


Figure IV.2 : Structure d'un neurone artificiel

Le neurone calcule la somme de ses entrées, ensuite cette valeur passe à travers la fonction d'activation pour produire sa sortie (Figure IV.2). L'architecture d'un réseau de neurones est l'organisation des neurones entre eux au sein d'un même réseau. Autrement dit, il s'agit de la façon dont ils ordonnés et connectés [13].

Pour pouvoir utiliser les réseaux des neurones multicouches en apprentissage, deux critères doit indiqué [14], ont doit connaitre:

- Combien de couches cachées existent ?
- Combien de neurones dans chaque couche cachée ?

D'une autre manière une méthode qui définit comment choisir une architecture de réseau pour résoudre un problème donné.

Après l'architecture du réseau choisie, un algorithme d'apprentissage qui calcule, à partir de la base de données d'apprentissage, les valeurs des coefficients synaptique pour créer un réseau adapté au problème.

La premier condition est encore un sujet de recherche actif parce qu'aucune loi ou règle exacte n'existe seul quelques expressions empiriques approximatives. Quelques algorithmes d'apprentissage auto-constructifs ont été proposés, leur rôle est double [15], apprentissage de l'échantillon avec un réseau courant et la modification du réseau courant, en ajoutant de nouvelles couches, en cas d'échec de l'apprentissage.

En général le nombre de neurones cachés  $N_c$  peut être calculé. En appliquant l'équation empirique suivante [16]:

$$N_c = \frac{E+S}{2} + \sqrt{Nm} \quad \text{IV.1}$$

Où  $E$  : le nombre d'entrées ;

$S$  : le nombre de sorties ;

$Nm$  : le nombre de modèles de formation disponibles.

À cet effet, le créateur spécifie le nombre de couches cachées, les neurones dans chaque couche, la fonction de transfert dans chaque couche, la fonction d'apprentissage, la fonction d'apprentissage du poids/biais, et la fonction de performance. D'après [14,21] un réseau de neurone à deux couches, ayant une fonction d'activation de type sigmoïde dans la première couche (couche cachée) et une fonction linéaire dans la couche de sortie, à condition de disposer de suffisamment de neurones sur la couche cachée.

La construction du réseau dépend profondément de la base de données. Constituée de couples entrée/sortie(s), choisis le nombre de nœuds d'entrées et de sorties sont généralement

imposés par la fonction à approximer [17]. Le premier est déterminé par le nombre de variables utilisées en entrée. Dans notre cas, ce nombre est variable. Car on a essayé plusieurs architectures [20] avec différentes variables en entrées (voir [tableau IV.1](#)).

Pour la couche de sortie, le nombre de neurones est limité par le nombre de sortie à approximer, (le variable qu'on veut prédire) dans notre étude on va prédire l'irradiation solaire globale, donc on n'utilisera qu'un seul neurone dans la couche de sortie. En effet, avec un nombre limité de neurones (par exemple trop petit), le réseau ne sera pas performant sur l'apprentissage.

Il n'existe pas une relation, qui relie le nombre de neurones de la couche cachées au nombre de variable d'entrées, ou au nombre de neurone de sortie et le nombre d'exemples dans la base d'apprentissage [18], mais la meilleure méthode est de construire plusieurs modèles (c'est-à-dire différents neurones dans la couche cachée) et de choisir le mieux approprié pour l'application fixée [19].

Nous avons adopté une démarche qui consiste à considérer d'abord l'architecture la plus simple (avec un minimum de neurones dans la couche cachée). Puis à la rendre plus complexe et à tenir celle qui présente les meilleurs résultats.

Dans ce cas, nous partons d'une architecture à un neurone dans la couche cachée, et on augmente continuellement ce nombre jusqu'à 15, puis on garde l'architecture qui donne le minimum de l'erreur sur la base de test, pour échapper le problème de sur-apprentissage.

#### IV.2.4. Prétraitement de données

Après la collecte des données de la base, trois procédures de prétraitement des données sont réalisées pour établir les RNA plus efficacement. Ces procédures sont: résoudre le problème des données manquantes, normaliser et randomiser les données. Les données manquantes sont changées par la moyenne des valeurs voisines au cours de la même semaine. La procédure de normalisation avant de présenter les données d'entrée au réseau est généralement une bonne pratique.

Le mélange de variables de grandes amplitudes et de petites amplitudes va déranger l'algorithme d'apprentissage sur l'importance de chaque variable et l'obliger à refuser finalement le variable ayant la plus petite magnitude. En appliquant l'équation de normalisation suivante [7] :

$$valeur\_normalisée = \frac{valeur\_non\_normalisée - valeur\_min}{valeur\_max - valeur\_min} \quad IV.2$$

Avec : valeur-min et valeur- max : les valeurs minimale et maximale respectivement de variable à normaliser.

Ce prétraitement rend le réseau opérant, et assurant qu'aucune entrée ne soit au dommage des autres.

### IV.2.5. Phase d'apprentissage

Pendant le processus de formation, les poids sont ajustés afin de rendre les sorties cibles (estimé) proches des sorties réelles (mesurées) du réseau qui sont initialisés aléatoirement avant l'apprentissage, puis modifiés itérativement afin d'éviter que l'apprentissage ne s'arrête pas sur un minimum local de la fonction d'erreur.

L'ensemble des données d'apprentissage est donc présenté plusieurs fois au réseau avec différentes valeurs d'initialisation des poids synaptique. Une fois on a choisi l'architecture du réseau de neurone, elle doit supporter une phase d'apprentissage. Cette dernière consiste à calculer les pondérations idéales des différentes liaisons, en utilisant la base d'apprentissage [15].

On a choisi dans cette étude l'apprentissage supervisé, en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquadt pour donner des meilleurs résultats, on ce qui concerne la performance de généralisation et la rapidité de convergence [21]. Cet algorithme trouve le minimum par des méthodes d'optimisation non linéaire, un calcul de l'écart entre les valeurs prédire et les valeurs mesurés (fonction de cout) [22].

### IV.2.6. Phase de test

L'étape suivante comporte le teste de la performance du modèle développé. À cet effet, des données non visibles sont exposées au modèle, il faut toujours procéder à des tests pour estimer sa capacité de généralisation, et ce en lui présentant une base de données différente de celles usagées pour l'apprentissage (qui représente 20% de la totalité de la base de données). Cette base est réservée uniquement à la mesure finale de la performance. Autrement dit, elle sert à vérifier si le réseau de neurones a une bonne performance sur les exemples qu'il n'a pas appris (base de test). Si la performance ne sont pas passables, il devra soit modifier l'architecture du réseau, soit de modifier la base d'apprentissage.

## IV.3. Etude des paramètres de construction

L'objectif de notre étude est le développement et validation du réseau de neurone, comme mécanisme de prédiction de l'irradiation solaire, par apprentissage supervisé. Nous avons résumé les variables d'entrées utilisées dans le tableau suivant :

Tableau IV.1: Paramètres utilisés

Variable	Abréviation	Unité	Catégorie	Type
Température	T <sub>amb</sub>	°C	Météorologique	Numérique
Pression atmosphérique	BP	hPa		
Humidité relative	RH	%		
Vitesse du vent	WS	m/s		
Déclinaison	DECL	Degré (°)	Astronomique	
Angle de la hauteur solaire	AngleH	Degré (°)		
Irradiation solaire extraterrestre	G0	Wh/m <sup>2</sup>		
Durée d'insolation du jour	Dday	heure		
Numéro de jour de l'année	Jday	-	Numérique (1-365)	
Numéro heure du jour	Hday	-	Numérique (7-18)	

On a essayé plusieurs modèles des paramètres d'entrée afin de trouver les combinaisons de variables d'entrée qui donne une prédiction efficace. Les entrées usagées pour ces modèles ont été choisi en se basant sur le calcul du coefficient de corrélation entre l'irradiation solaire global et chacune des modèles choisi [23].

En résumé le tableau suivante, qui présente les modèles qui nous avons jugé être le plus intéressant :

Tableau IV.2 : Différents modèles utilisé pour l'entraînement du réseau de neurone

Modèles d'entrée	Variable d'entrée									
	Jday	G0	Dday	Hday	AngleH	DECL	T <sub>amb</sub>	RH	BP	WS
Modèle 1	X	X	X	X						
Modèle 2	X	X	X	X					X	X
Modèle 3	X	X	X	X		X	X			
Modèle 4	X	X	X	X	X			X		
Modèle 5	X	X	X	X	X	X				
Modèle 6	X	X	X	X	X	X	X			
Modèle 7	X	X	X	X	X	X	X	X		
Modèle 8	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Modèle 9	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Un exemple d'architecture de l'MLP associé au modèle 6 avec six paramètres en entrées dans la figure ci-dessous.

La fonction est :  $GHI=f(Jday, G0, Dday, Hday, DECL, AngelH, T)$

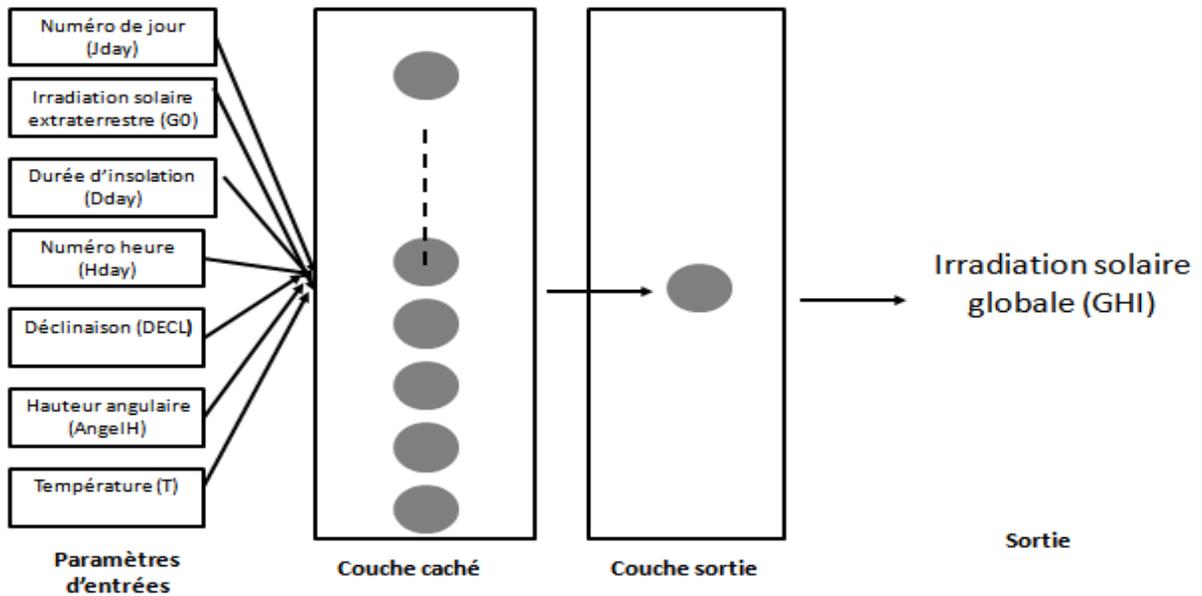


Figure IV.3 : Architecture de l'MLP associé au modèle 6

Les figures suivantes représentent la corrélation ente l'irradiation solaire globale et chacune des modèles (1 à 9) d'entrées.

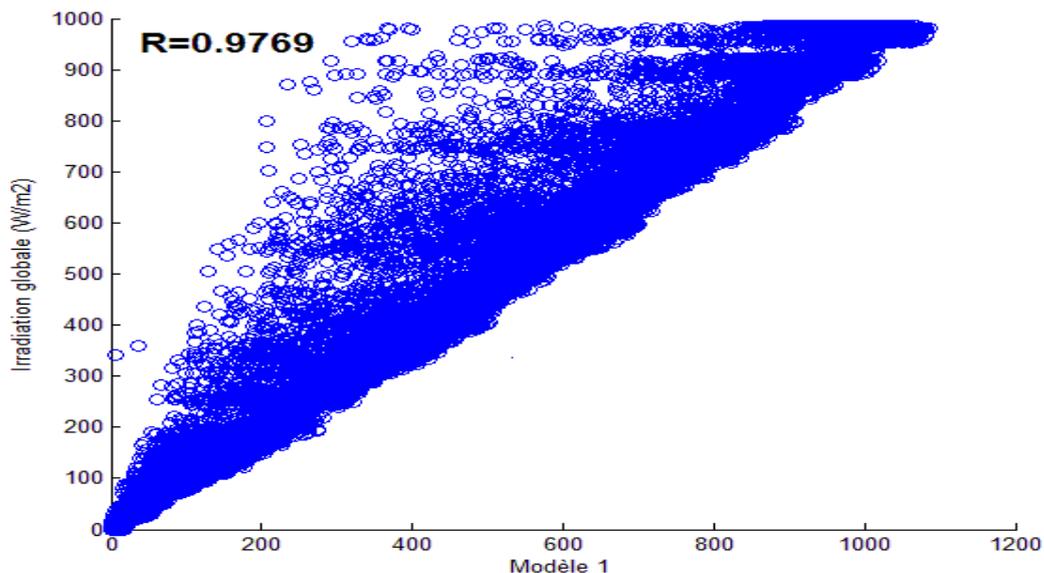


Figure IV.4 : Coefficient de corrélation du Modèle 1

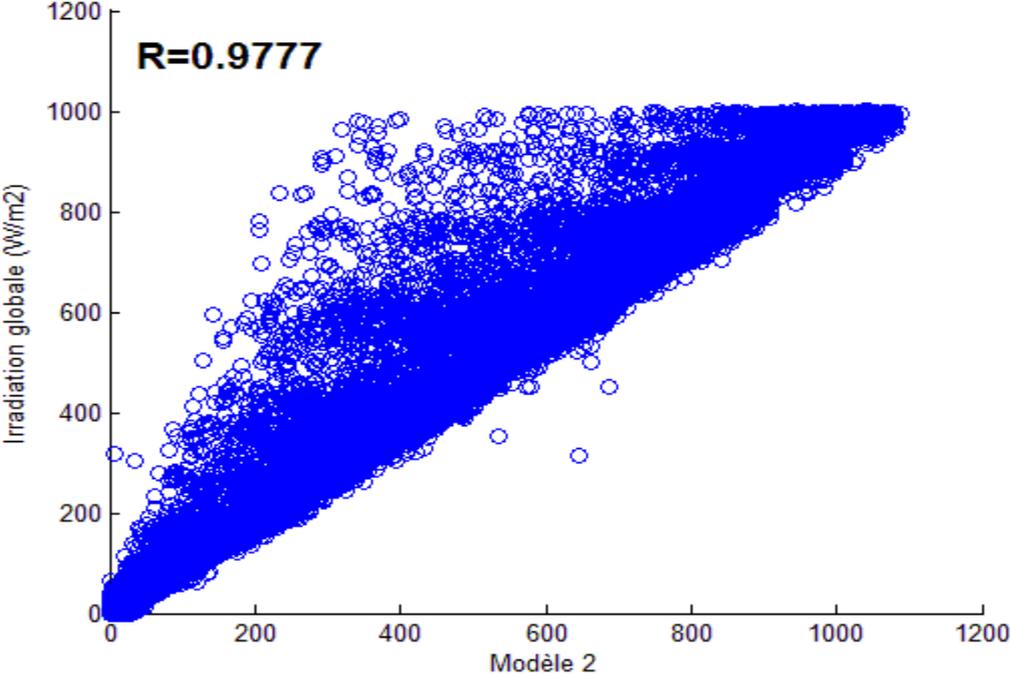


Figure IV.5 : Coefficient de corrélation du Modèle 2

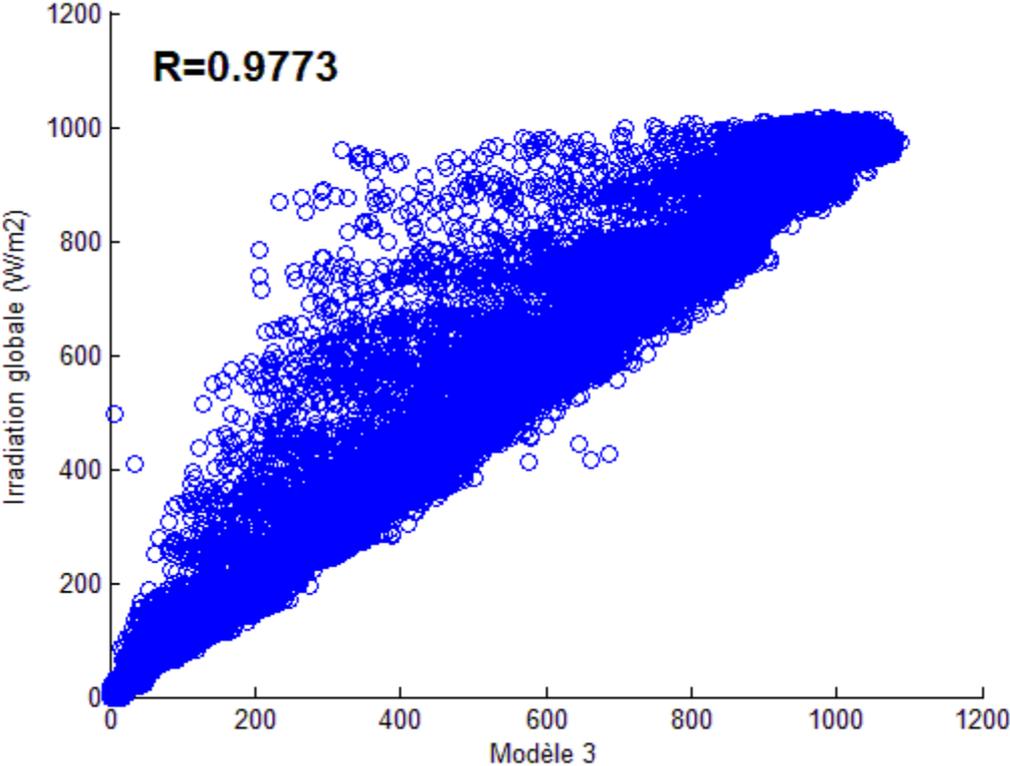


Figure IV.6 : Coefficient de corrélation du Modèle 3

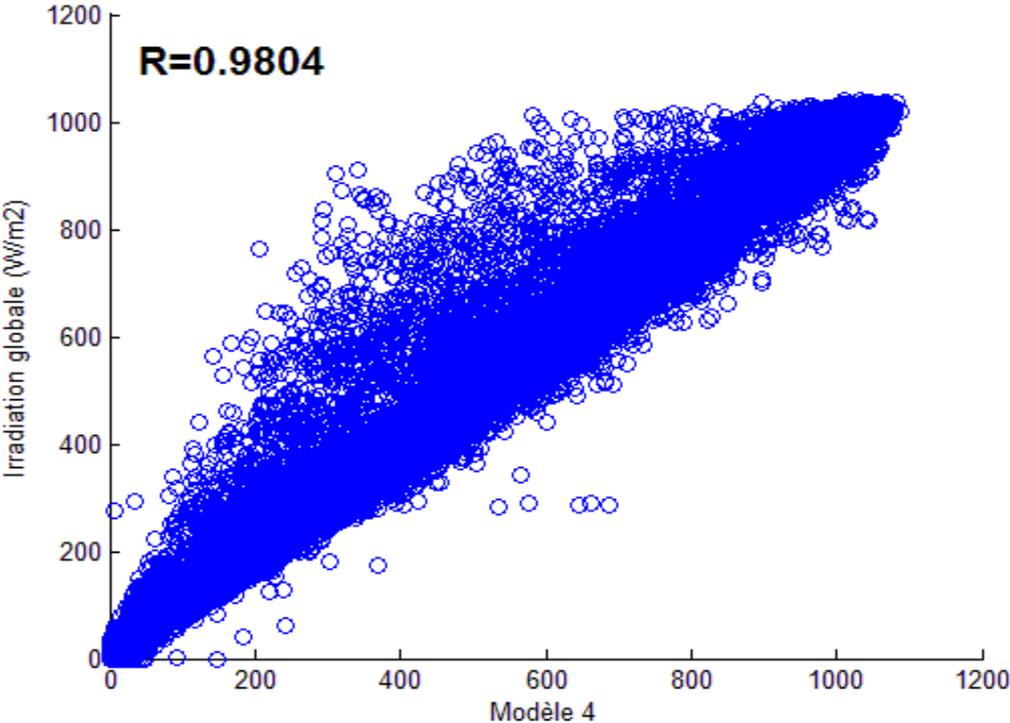


Figure IV.7 : Coefficient de corrélation du Modèle 4

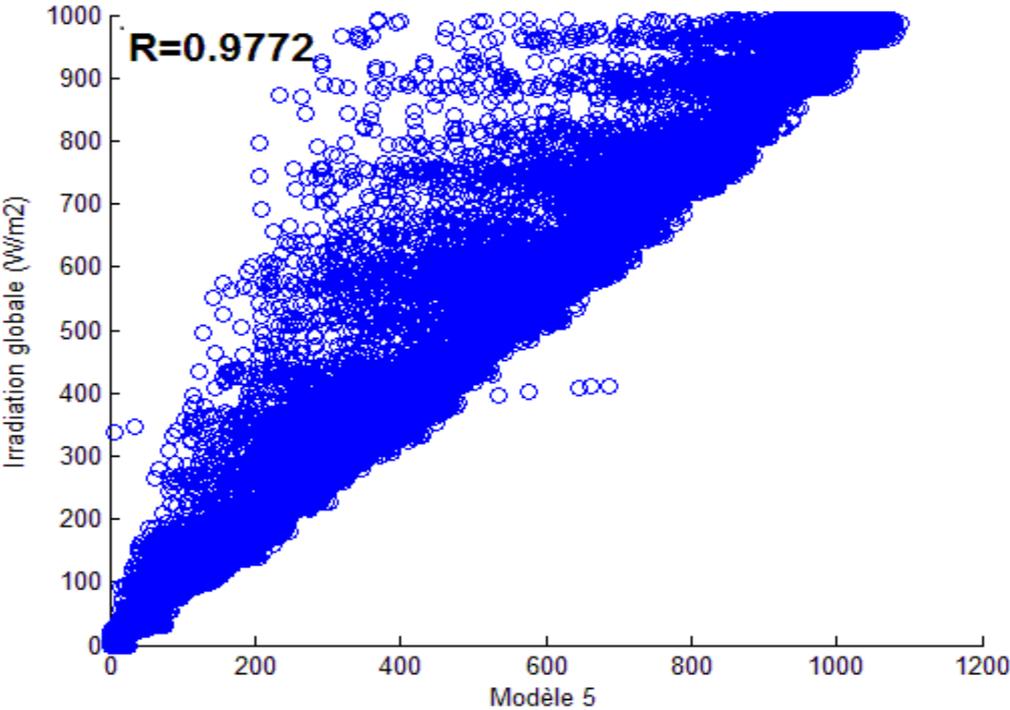


Figure IV.8 : Coefficient de corrélation du Modèle 5

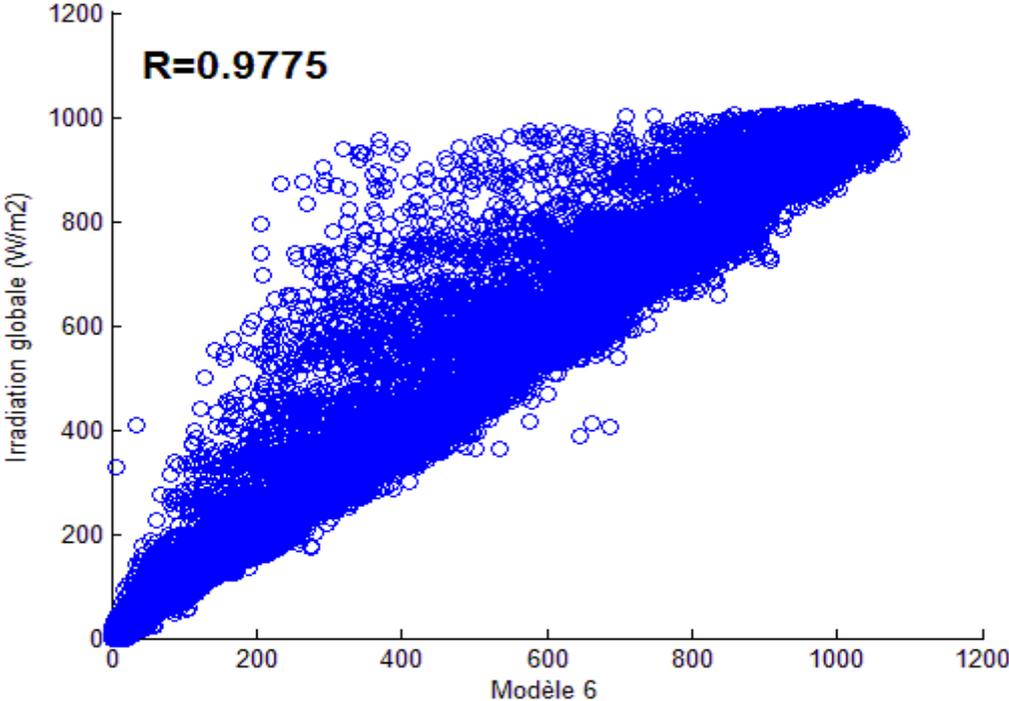


Figure IV.9 : Coefficient de corrélation du Modèle 6

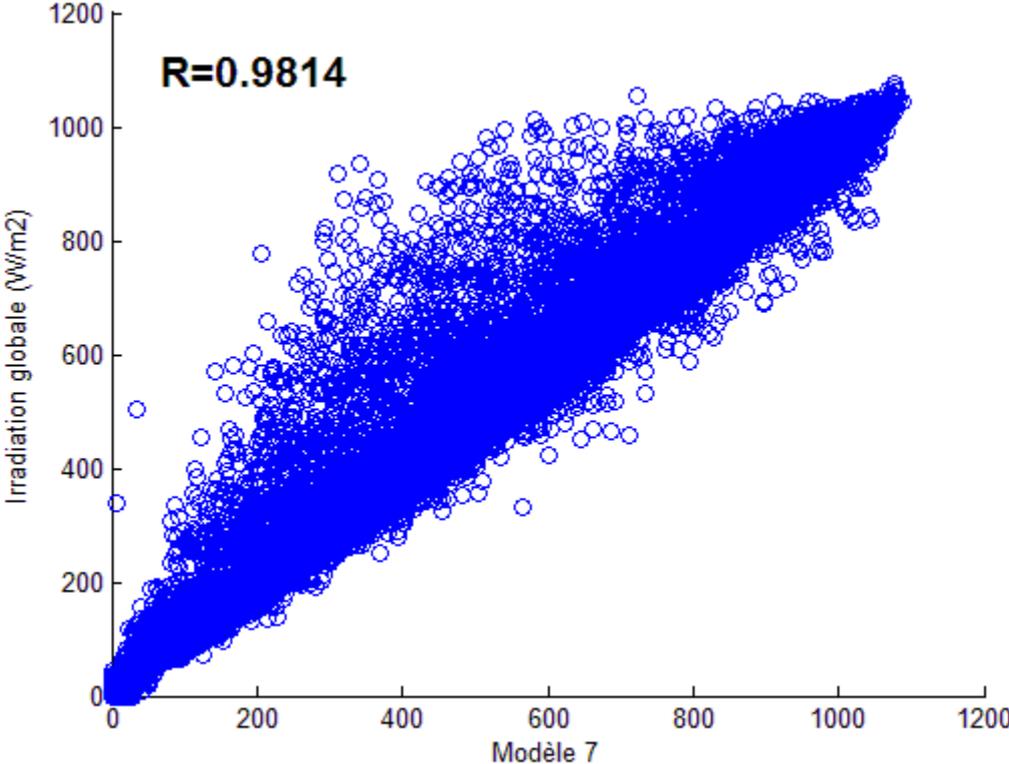


Figure IV.10 : Coefficient de corrélation du Modèle 7

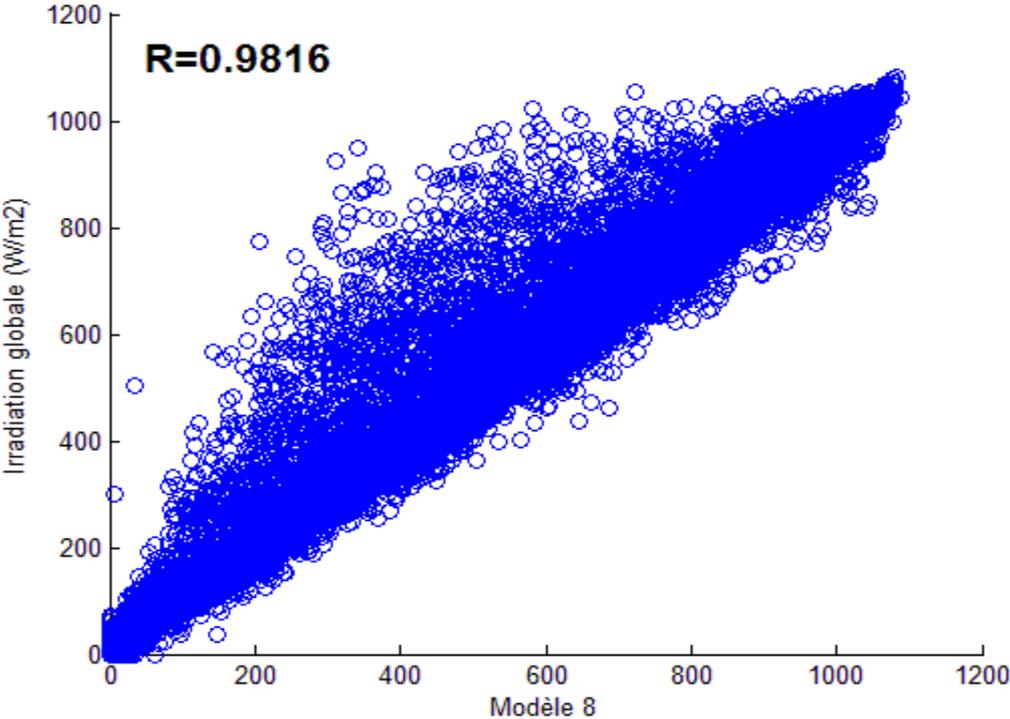


Figure IV.11 : Coefficient de corrélation du Modèle 8

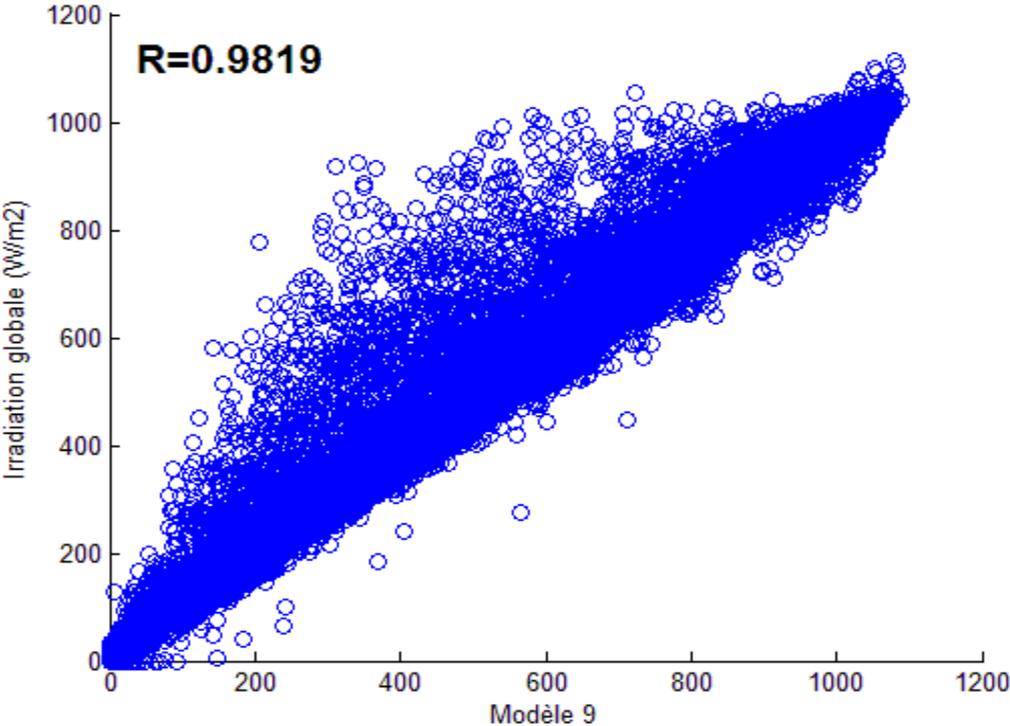


Figure IV.12 : Coefficient de corrélation du Modèle 9

On résume les résultats dans le tableau ci-dessus :

**Tableau IV.3** : Différents coefficient de corrélation des modèles utilisé pour l'entraînement du réseau de neurone

<b>Paramètre d'entrer</b>	<b>Coefficient de corrélation R</b>	<b>Rang</b>
Modèle 1	0.9769	9
Modèle 2	0.9777	5
Modèle 3	0.9773	7
Modèle 4	0.9804	4
Modèle 5	0.9772	8
Modèle 6	0.9775	6
<b>Modèle 7</b>	<b>0.9814</b>	<b>3</b>
<b>Modèle 8</b>	<b>0.9816</b>	<b>2</b>
<b>Modèle 9</b>	<b>0.9819</b>	<b>1</b>

A partir de ce tableau on a remarqué que les trois derniers modèles d'entrées (7,8 et 9) ont les meilleur résultats parce que le coefficient de corrélation entre les paramètres d'entrées et sortie (rayonnement globale) est grand par rapport au autre, ils sont proche de 1 (entre 0.9814 et 0.9819), donc on va tester uniquement ces trois modèles.

### IV.4. Critères utilisé pour l'évaluation les performances des modèles

Afin d'évaluer quantitativement la performance des modèles ANN développés et d'examiner s'il existe une capacité dépendante de la performance des modèles des réseaux de neurone, l'évaluation comprenant le coefficient de corrélation (R), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur moyenne de biais (MBE) et l'erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE), les expressions pour les paramètres statistiques susmentionnés c'est les plus populaire et plus utilisés sont indiqué en détail dans le [chapitre III](#). Dans notre étude, nous avons utilisé tous les indicateurs cités précédemment, pour évaluer la performance de nos modèles sur les deux bases, d'entraînement et de test.

#### IV.4.1. Résultat et discussion

Dans la couche caché, on peut tester les meilleur trois modèles dans le [tableau IV.3](#), donc le nombre de paramètre d'entrée sont (7, 8 et 9) paramètres, on va teste chacun par les

trois (3) fonctions (linéaire, Sigmoides logarithique, Tangente hyperbolique), et nous changeons le nombre de neurones dans la couche cachée de 1 à 15, on a effectué 1000 apprentissages avec chaque fois une initialisation différente pour chaque une de ces architectures, puis on conserve la valeur des poids synaptiques qui donne le minimum de R et RMSE sur la base d'entraînement, les résultats obtenus dans les tableaux (IV.7- IV.11 - IV.15) après on choisit le plus efficace dans chaque modèle (annexe D) .

- Exemple d'interface MLP entrainement de réseau de neurone :

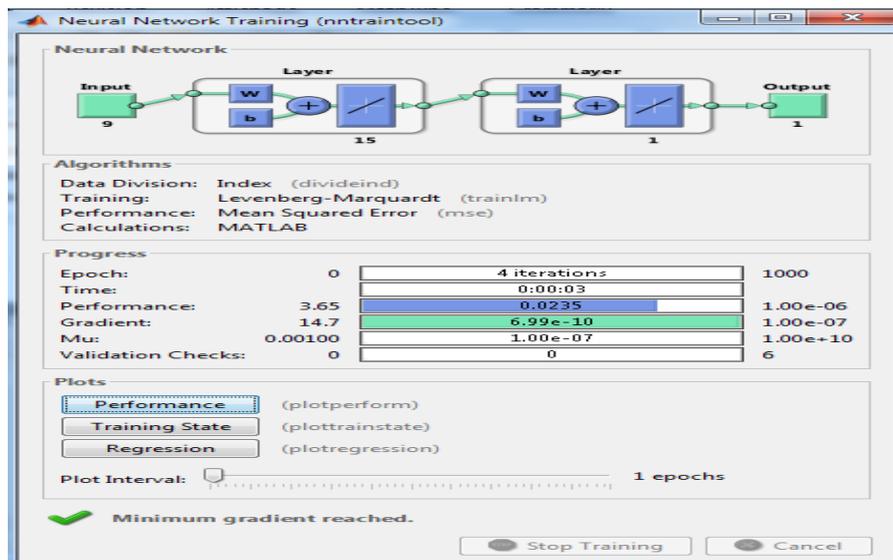


Figure IV.13 : Interface de MLP entrainement de réseau de neurone par la fonction linéaire

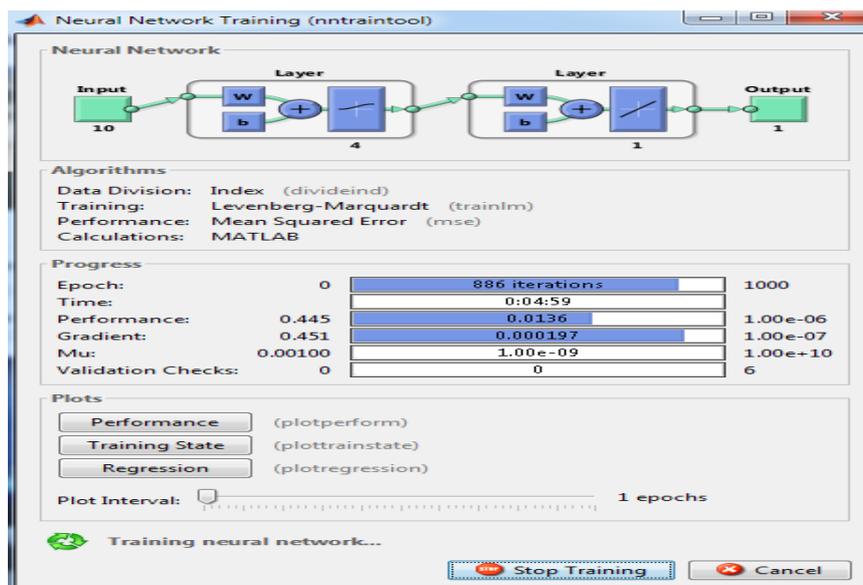


Figure IV.14 : Interface de MLP entrainement de réseau de neurone par la fonction Sigmoides logarithique

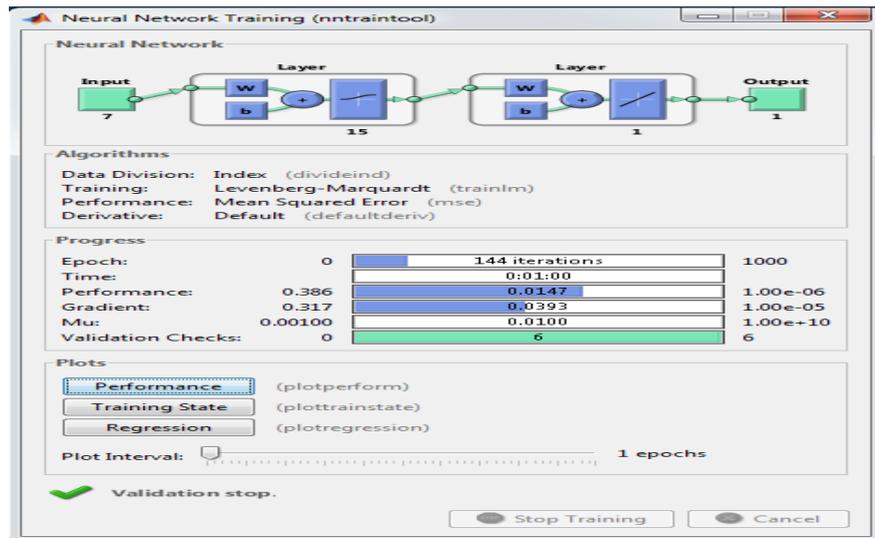


Figure IV.15: Interface de MLP entrainement de réseau de neurone par la fonction Tangente hyperbolique

- **Fonction 1** : on utilise la fonction linéaire
- ✓ **Paramètre d'entrée Modèle 9**

Tableau IV.4 :Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée

Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )
1	0,97213	77,3154	<b>-4,9051</b>
2	0,97217	77,2226	-5,4924
3	0,97215	77,2938	-5,2574
4	0,97217	77,2607	-5,6200
5	0,97219	77,2010	-5,6446
6	0,97218	77,2751	-5,6153
<b>7</b>	<b>0,97224</b>	<b>77,1672</b>	-5,1264
8	0,97211	77,3059	-5,1287
9	0,97219	77,2433	-4,9362
10	0,97218	77,2476	-5,4955
11	0,97223	77,1971	-5,0616
12	0,97214	77,3262	-5,0028
13	0,97210	77,2912	-5,5745
14	0,97215	77,3076	-5,5816
15	0,97217	77,2636	-5,3794

✓ Paramètre d'entrée Modèle 8

Tableau IV.5 : Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée

Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )
1	0,9743	73,4075	-1,3291
2	0,9789	66,6482	-0,9252
3	0,9796	65,5055	-0,8863
4	0,9807	63,6430	-0,7627
5	0,9812	62,8459	-0,7018
6	0,9808	63,5697	-1,0508
7	0,9814	62,5683	-0,5285
8	0,9814	62,5735	-0,3322
9	0,9812	62,8463	0,0182
<b>10</b>	<b>0,9818</b>	<b>62,0093</b>	-0,3700
11	0,9815	62,3976	-0,8379
12	0,9815	62,2789	0,0657
13	0,9817	62,0737	-0,9414
14	0,9816	62,1709	<b>-0,0073</b>
15	0,9815	62,3992	-0,3441

✓ Paramètre d'entrée Modèle 7

Tableau IV.6 : Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée

Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )
1	0,9739	73,9651	-1,2083
2	0,9766	70,1066	-0,8952
3	0,9798	65,1819	-0,8715
4	0,9806	63,8679	-0,6797
5	0,9809	63,3592	-0,4784
6	0,9808	63,4913	-1,2806
7	0,9810	63,1426	<b>-0,1429</b>
8	0,9811	63,0866	-0,5509
9	0,9813	62,6546	-0,4023

10	0,9813	62,6232	-0,3482
11	0,9814	62,4566	-0,3290
12	0,9814	62,5472	-0,6295
13	0,9814	62,5577	-0,5267
14	0,9815	62,3024	0,8129
<b>15</b>	<b>0,9816</b>	<b>62,1357</b>	-0,1431

À partir des tableaux IV.4, tableau IV.5 et tableau IV.6 on a choisi le mieux paramètre d'entrée en fonction des indicateurs statistique (la valeur du R proche de 1, plus le RMSE est bas, plus la valeur absolu du MBE est basse, une valeur de MAPE inférieure à 10% acceptable) on résume les résultats de comparaison entre les paramètres d'entrée de modèle de la fonction linéaire pour chaque nombre des neurones on couche cacher au tableau suivant :

**Tableau IV.7 :** Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone et paramètre d'entrées dans la couche cachée

Paramètres d'entrées	Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )	MAPE (%)
9	7	0,97224	77,1672	-5,1264	11.24
<b>8</b>	<b>10</b>	<b>0,9818</b>	<b>62,0093</b>	<b>-0,3700</b>	<b>7.77</b>
7	15	0,9816	62,1357	-0,1431	7.81

- **Fonction 2 :** on utilise la fonction Sigmoidale logistique
- ✓ **Paramètre d'entrée Modèle 9**

**Tableau IV.8 :** Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée

Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )
1	0,9743	73,3917	-1,3830
2	0,9770	69,4727	-0,9893
3	0,9799	64,9537	-1,0437
4	0,9811	63,0041	-0,6014
5	0,9810	63,2638	-1,0517
6	0,9812	62,8781	-1,3983
7	0,9815	62,2793	-0,0155

8	0,9815	62,3334	-0,6520
9	0,9816	62,1905	-0,8710
10	0,9817	62,0992	-0,6018
11	0,9819	61,7220	-0,1954
12	0,9819	61,6600	-0,9179
13	0,9820	61,5843	-0,1760
14	0,9820	61,4756	-0,7018
<b>15</b>	<b>0,9825</b>	<b>61,1410</b>	<b>0,0591</b>

✓ Paramètre d'entrée Modèle 8

Tableau IV.9 : Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée

Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )
1	0,9743	73,3899	-1,3024
2	0,9757	71,3810	-1,7977
3	0,9776	68,5785	-0,7395
4	0,9810	63,2765	-0,8140
5	0,9811	62,9687	-0,5721
6	0,9808	63,4595	-0,3805
7	0,9813	62,6915	-0,1212
8	0,9815	62,3613	-0,4840
9	0,9815	62,4362	-0,1762
10	0,9816	62,2250	-0,0250
11	0,9818	61,9107	0,0350
12	0,9816	62,1307	-0,5513
13	0,9818	61,8445	-0,8624
14	0,9821	61,3306	-0,7228
<b>15</b>	<b>0,9822</b>	<b>61,3276</b>	<b>-0,0059</b>

✓ Paramètre d'entrée Modèle 7

Tableau IV.10 : Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée

Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )
1	0,9739	74,0277	-0,9011
2	0,9762	70,7054	-0,7004
3	0,9793	65,9514	-0,5526
4	0,9800	64,8731	-0,3873
5	0,9810	63,1992	-0,2444
6	0,9810	63,1534	-0,7472
7	0,9811	63,0060	-0,3080
8	0,9811	63,0715	-0,6421
9	0,9813	62,6094	<b>-0,0818</b>
10	0,9812	62,8711	0,4978
11	0,9813	62,7036	-0,4725
12	0,9815	62,3594	-0,1490
13	0,9815	62,3324	-0,5252
<b>14</b>	<b>0,9820</b>	<b>61,5255</b>	-0,3712
15	0,9816	62,1325	-0,4610

À partir des Tableau IV.8, Tableau IV.9 et Tableau IV.10 on a choisi les meilleures paramètre d'entrée en fonction des indicateurs statistique (R proche de 1, Plus RMSE et MBE est bas, une valeur de MAPE inférieure à 10% acceptable) en résumé les résultats de comparaison entre les paramètre d'entrée de modèle de la fonction Sigmoidale logistique a chaque nombre des neurones a couche cacher au tableau suivant :

Tableau IV.11 : Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone et paramètre d'entrées dans la couche cachée

Paramètres d'entrées	Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )	MAPE (%)
<b>9</b>	<b>15</b>	<b>0,9825</b>	<b>61,1410</b>	<b>0,0591</b>	<b>7.60</b>
8	15	0,9822	61,3276	-0,0059	7.66
7	14	0,9820	61,5255	-0,3712	12.98

- **Fonction 3** : on utilise la fonction Tangente hyperbolique
  - ✓ **Paramètre d'entrée Modèle 9**

Tableau IV.12 : Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée

Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )
1	0,9743	73,3838	-1,2370
2	0,9788	66,8052	-0,5147
3	0,9798	65,1790	-0,2519
4	0,9804	64,1551	-1,2834
5	0,9812	62,9353	<b>0,0806</b>
6	0,9812	62,8485	-0,3718
7	0,9813	62,6273	-0,4395
8	0,9817	62,0847	-0,7397
9	0,9818	61,7773	-0,3784
10	0,9817	62,0273	-0,7141
11	0,9820	61,2349	-0,8041
12	0,9817	62,0006	-0,2864
<b>13</b>	<b>0,9821</b>	<b>61,0233</b>	-0,0905
14	0,9816	62,1167	-0,3573
15	0,9820	61,2966	-0,4695

- ✓ **Paramètre d'entrée Modèle 8**

Tableau IV.13 : Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée

Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )
1	0,9743	73,4368	-1,2121
2	0,9769	69,6195	0,3703
3	0,9787	66,8571	-0,5319
4	0,9809	63,4013	-0,4893
5	0,9805	63,9891	-0,6667
6	0,9813	62,7633	-0,2379

7	0,9813	62,7429	-0,5143
8	0,9814	62,5771	-0,2978
9	0,9815	62,3603	-0,3694
10	0,9817	62,0004	-0,4699
11	0,9818	61,8843	<b>-0,1154</b>
12	0,9817	62,0619	-0,2503
13	0,9820	61,6014	-0,2266
14	0,9819	61,7180	-0,5123
<b>15</b>	<b>0,9824</b>	<b>61,5793</b>	-1,1415

✓ Paramètre d'entrée Modèle 7

Tableau IV.14 : Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone dans la couche cachée

Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )
1	0,9739	73,9620	-0,9428
2	0,9762	70,6953	-0,2546
3	0,9783	67,5162	-0,5616
4	0,9803	64,3270	-0,9888
5	0,9807	63,6633	-0,4869
6	0,9807	63,6569	-0,8135
7	0,9812	62,9376	-0,0629
8	0,9814	62,5777	-0,3080
9	0,9814	62,4985	-0,9615
10	0,9815	62,2901	-0,1853
11	0,9813	62,7339	-0,5663
12	0,9814	62,5753	-0,0055
13	0,9814	62,5562	-0,0429
14	0,9814	62,5268	<b>-0,0098</b>
<b>15</b>	<b>0,9816</b>	<b>62,1899</b>	-0,4046

À partir des tableaux (IV.12, IV.13 et IV.14 ) on a choisi les meilleures paramètre d'entrée en fonction des indicateurs statistique (R est proche de 1, Plus le RMSE est bas, plus

MBE est basse, une valeur de MAPE inférieure à 10% acceptable) en résumé les résultats de comparaison entre les paramètre d'entrée de modèle de la fonction Tangente à chaque nombre des neurones a couche caché au tableau suivant :

**Tableau IV.15** : Variation des erreurs en fonction du nombre de neurone et paramètre d'entrées dans la couche cachée

Paramètres d'entrées	Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )	MAPE (%)
9	13	0,9821	61,0233	-0,0905	7.65
<b>8</b>	<b>15</b>	<b>0,9824</b>	<b>61,5793</b>	<b>-1,1415</b>	<b>7.62</b>
7	15	0,9816	62,1899	-0,4046	7.74

Après comparaison avec tous les tableaux des résultats et l'observation du nombre de neurone qui donne la meilleure corrélation, les résultats sont présentés au tableau suivant :

**Tableau IV.16** : Résultat de comparaison pour chaque modèle

Modèle de la fonction	Paramétrée d'entrée	Nombre de neurone	R	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )	MAPE (%)
Fonction 1	8	10	0,9818	62,0093	-0,3700	7.77
<b>Fonction 2</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>0,9825</b>	<b>61,1410</b>	<b>0,0591</b>	<b>7.60</b>
Fonction 3	8	15	0,9824	61,5793	-1,1415	7.62

D'après les résultats du [Tableau IV.16](#) le modèle de la fonction 2 (Sigmoidale logistique) c'est le meilleur par rapport des autres modèles, donc on a fixé les paramètres d'entrée à 9 pour le modèle 9, qui donne des meilleurs indicateurs statistique R, RMSE et MAPE.

A cette phase nous avons adopté sur le [tableau IV.16](#) pour fait le test, les graphes suivants présents les résultats :

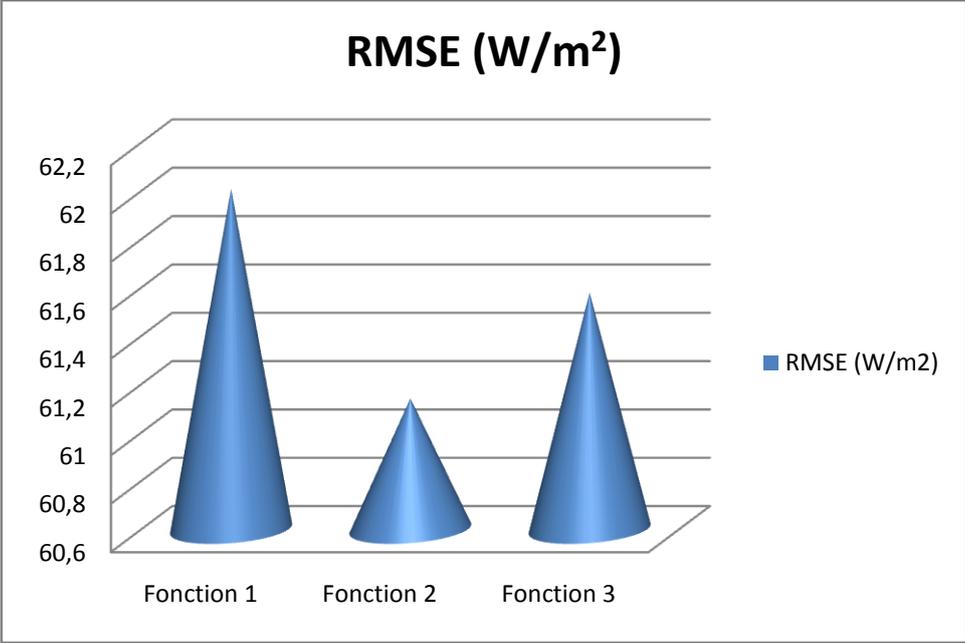


Figure IV.16 : Courbe d'indicateur RMSE

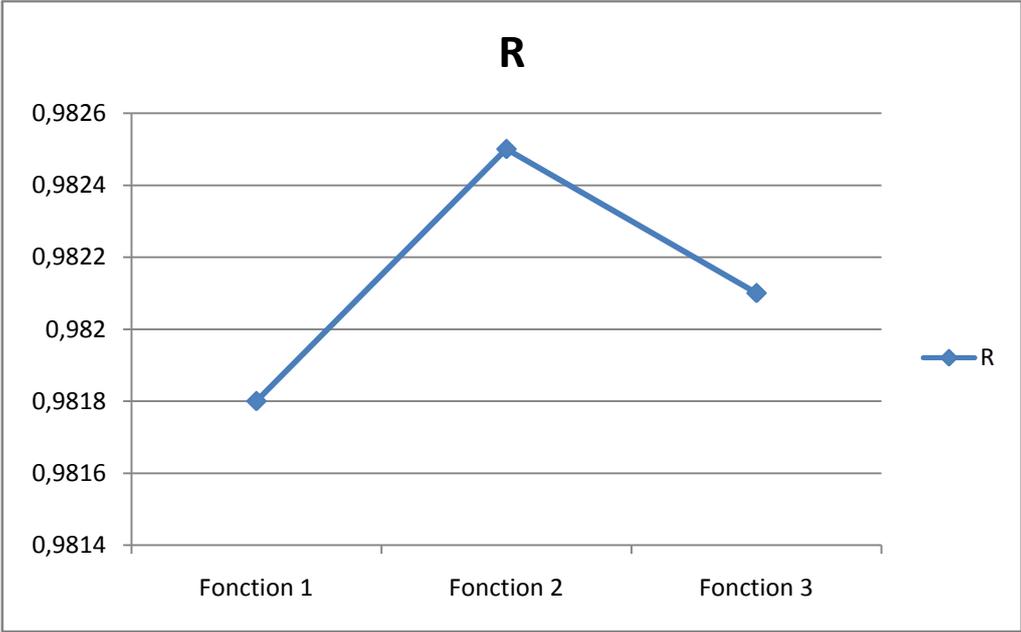


Figure IV.17 : Courbe d'indicateur R

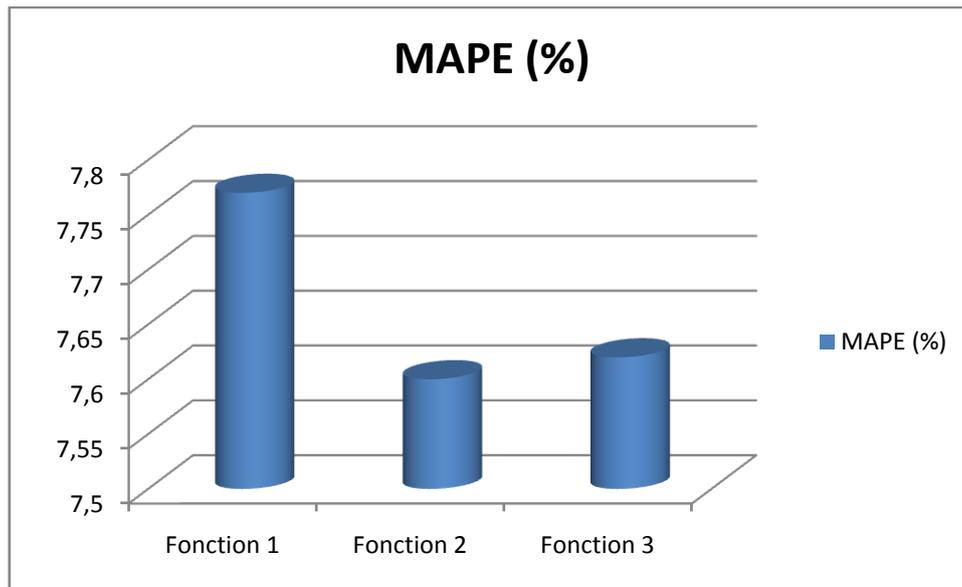


Figure IV.18 : Courbe d'indicateur MAPE

A partir des figures (IV.15, IV.16 et IV.17) et la comparaison de chaque indicateur statistique dans chaque modèle, on a remarqué que le modèle de la fonction 2 (Sigmoïde logistique) c'est le meilleure par rapport les autre dans la phase de test.

### IV.5. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons examiné la possibilité d'estimer le rayonnement solaire globale horaire pour un ciel quelconque à partir des paramètres astronomique et métrologique en utilisant un réseau de neurones multicouches MLP. Nous avons essayé plusieurs combinaisons des données d'entrée et nous avons constaté que la combinaison (Irradiation solaire extraterrestre, Durée du jour, Température, Pression atmosphérique, Humidité relative, Vitesse du vent, Déclinaison et Hauteur angulaire maximale du soleil, numéro de jour de l'année, numéro heure du jour) avec la fonction Sigmoïde logistique de 15 neurones de la couche cachée est celle qui donne les meilleurs résultats, pour cette combinaison, le coefficient de corrélation entre l'irradiation solaire globale mesuré et celle estimée est de 98.25% pour les données de validation. Il a été conclu que ce modèle peut être préféré pour estimer intensités de rayonnement solaire pour le site étudié et pour d'autres endroits ayant des conditions climatiques similaires.

### IV.6. REFERENCES

- [1] Karoro A., Senyonga T. and Mubiru J.,(2011), «Predicting Global Solar Radiation using an Artificial Neural Network Single-Parameter Model», *Advances in Artificial Neural Systems*, Vol. 20, Article ID 751908.
- [2] Benghanem M., (2012), «Artificial Intelligence Techniques for Prediction of Solar Radiation Data: A Review», *International Journal of Renewable Energy Technology*, 3(2), 189 - 219.
- [3] Mohandes M., Rehman S., Halawani TO, (1998), «Estimation of global solar radiation using artificial neural networks», *Renewable Energy*, 14 (4), 179–184.
- [4] Behrang MA., Assareh E., Ghanbarzadeh A., Noghrehabadi AR., (2010), «The potential of different artificial neural network (ANN) techniques in daily global solar radiation modeling based on meteorological data», *Solar Energy*, 84(8), 1468-1480.
- [5] Miloudi Lalia, Acheli Dalila, and Kesraoui Mohamed, (2017), «Application of Artificial Neural Networks for Forecasting Photovoltaic System Parameters», *Applied Solar Energy*, 53(2), 85–91.
- [6] Azadeh A., Maghsoudi A., Sohrabkhani S., (2010), «An integrated artificial neural networks approach for predicting global radiation», *Energy Conversion and Management*.
- [7] Mellit A. and Pavan A.M., (2010), « A 24-h Forecast of Solar Irradiance Using Artificial Neural Network: Application for Performance Prediction of a Grid-Connected PV Plant at Trieste, Italy», *Solar Energy*, 84(5), 807–821.
- [8] Sfetsos A., Coonick AH., (2000), «Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques», *Solar Energy*, 68(2), 169- 178.
- [9] Mohandes M., Balghonaim A., Kassas M., Rehman S. et Halawani TO., (2000), «Use of radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation», *Solar Energy*, vol. 68.
- [10] Voyant C., Muselli M., Paoli C. and Nivet M.L., (2010), «Optimization of an Artificial Neural Network Dedicated to the Multivariate Forecasting of Daily Global Radiation», *Energy*, 36(1), 348 – 359.
- [11] SODA, [www.soda-pro.com/web-services#meteo-data](http://www.soda-pro.com/web-services#meteo-data), consulté en octobre 2018.
- [12] Foggia G., (2009), « Pilotage optima de système multi-source pour le bâtiment », thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut polytechnique de Grenoble, soutenue le 17/07/2009.

- [13] Hopfield J.,(1982), « Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities», PNAS proceedings of national academy of sciences of USA, 79 (8); <https://doi.org/10.1073/pnas.79.8.2554>
- [14] Hornik K., (1991), « Approximation capabilities of multilayer feed forward networks », neural networks, 4,254-257.
- [15] Tarahi F.,(2011), « Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzu par les réseaux de neurones artificiels », mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magister en université Mouloud Mammeri- Tizi-ouzu.
- [16] Elie F., (1997), « Conception et réalisation d'un système utilisant des réseaux de neurones pour l'identification et la caractérisation, à bord de satellites, de signaux transitoires de type sifflement », thèse de doctorat en électronique, Université d'Orléans.
- [17] Ihya B., Mechaqrane A., Tadili R., Bargach M.n, (2011), « Estimation de la fraction diffuse a Fès en utilisant les réseaux de neurones artificiels », Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Efficacité Energétique 20-21 Avril 2011, FST-Fès, Maroc.
- [18] Jiang Y., (2008), « Prediction of monthly mean daily diffuse solar radiation using artificial neural networks and comparison with other empirical Modèles», *Energy Policy*.
- [19] Tymvois F.S, Jacovides C.P., Michaelides S.C., Scouteli C., (2005), « Comparative study of Angströms and atificial neural networks metodologies in estimationg global solar radiation », *Solar Energy*.
- [20] Djelloul Benatiallah, Ali Benatiallah, Kada Bouchouicha, Bahous Nasri, «Prédiction du rayonnement solaire horaires en utilisant les réseaux de neurone artificiel », Algerian Journal of Environmental Sciences and Technology, [www.aljest.org](http://www.aljest.org) (en cours de publication).
- [21] Dreyfus G., Martinez M., Samueldies M. et al., (2002), «Réseaux de nuerons méthodologie et application », Ed Eyrolles.
- [22] Hanae Loutfi, (2017), « Prédiction des composantes de l'irradiation solaire horaire sur plan horizontal en utilisant les réseaux de neurones artificiels », Thèse Doctorat d'état Spécialité : Energétique, université Mohamed V Rabat.

# **Chapitre V**

## **Estimation du rayonnement solaire à partir des images satellitaire**

### V.1. Introduction

Actuellement, on constate à une demande de plus en plus importante de l'énergie électrique, pour considérer la maîtrise de cette énergie comme l'une des priorités majeures des états. En Algérie différentes mesures sont en train de se développer en se basant sur des nouvelles perspectives face à la création et l'exploitation de systèmes de production électrique à partir des sources d'énergies renouvelables.

L'une des ressources énergétiques les plus abondantes sur terre est l'énergie solaire, elle présente un intérêt particulier en tant qu'énergie renouvelable, elle est aussi à l'origine de la majorité des autres énergies renouvelables.

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire important dans le monde. Et du fait que cette source présente un intérêt particulier en tant qu'énergie renouvelable, la connaissance de ce gisement solaire est d'une importance capitale pour concevoir, dimensionner et optimiser les systèmes énergétiques solaires. Cet objectif ne peut être réalisé que si les données radiométriques sont disponibles d'une manière continue dans l'espace et dans le temps.

Bien qu'il existe un réseau de stations de mesure radiométrique, le nombre de ces stations est très limité. En Algérie, on dispose seulement de sept stations qui assurent la mesure de la composante globale et diffuse du rayonnement solaire [1]. Le nombre de ces stations reste insuffisant, aussi 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 dans le but de générer des séquences artificielles de données radiométriques [2-3].

D'autres études et travaux ont utilisés soit les paramètres météorologiques, soit la durée d'insolation pour estimer les composantes du rayonnement solaire [4], on cite aussi d'autres auteurs qui ont proposé d'utiliser des méthodes d'interpolation, pour la prédiction des données à partir du réseau radiométrique disponible. Les résultats de ces études sont encourageants et parfois très efficaces là où on dispose d'un réseau d'observation très fort. Mais dès que la distance entre les stations augmente, l'estimation devient de plus en plus difficile, en plus pour notre réseau de mesure, cette distance dépasse les 150 km pour les régions sahariennes de notre pays.

La télédétection spatiale offre une meilleure solution car elle possède une couverture spatio-temporelle suffisante, reste 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 qui atteint 1 km pour la dernière génération des satellites METEOSAT, et une résolution temporelle (répétitivité) de 15 minute.

Dans ce chapitre nous évaluons le rayonnement solaire global horaire et journalière reçu sur une surface horizontal par le modèle Héliosat-2 qui permet de traiter les images satellite MSG-2, on va traiter les images de la ville d'Adrar de l'année 2013, puis en compare les résultats de l'estimation par les données réelle mesurés par la station URERMS d'Adrar.

### V.2. Méthodes d'estimation du rayonnement solaire à partir d'images satellitaire

Dans ce contexte nous présenterons un aperçu sur les différentes méthodes utilisées pour l'estimation du rayonnement solaire reçu au sol à partir d'images satellitaire.

Les méthodes utilisées pour l'évaluation du gisement solaire à partir 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 région. Par ailleurs, on note la forte résolution spatiale des données satellitaires qui donne plus de précision et les estimations sont d'autant meilleures.

Cependant, il y a un grand nombre de problèmes associés à l'utilisation des données satellitaires pour l'estimation des composantes du rayonnement solaire. De là, découlent plusieurs méthodes d'estimation du rayonnement par traitement d'images satellitaires.

Plusieurs auteurs ont démontré que les données satellitaires peuvent être utilisées pour cartographier l'irradiation solaire globale au niveau du sol, on cite : Hay et Hanson, 1978 ; Ellis et Vonder Haar, 1978 ; Tarpley, 1979 ; Gautier et al 1980 ; Pastre, 1981 ; Cano, 1982 ; Moser et Raschke, 1984 ; Taylor et al, 1984 ; Cano et al, 1986 ; Diabaté et al, 1989 ; Stuhlmnn et al, 1990 ; Whitlock et al, 1990 ; Delorme et al 1992 ; Berger et al, 1996 ; Zelanka et al, 1999 ; Janjai et al, 2005 [5-10].

Les modèles développés pour l'extraction des irradiations solaires à partir des images satellitaires sont classées en deux catégories, les modèles empiriques et les modèles analytiques.

### V.2.1. Approche empirique

#### a) Les méthodes statistiques

Ce type de méthodes fait appel à une multitude de variables indépendantes déduites des données satellitaires. 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.

Parmi les méthodes statistiques on citera celles élaborées par les auteurs suivants :

- Hanson (1976) et de Nimira (1980) : leur modèle met en jeu la relation existant entre l'irradiation solaire et le taux d'enneuagement. Le taux d'enneuagement est déduit de la couverture nuageuse estimée après une analyse des données satellitaires.
- Brakke et Kanemasu (1981) : ils ont relié l'irradiation solaire au niveau de gris et l'angle zénithal.
- Shaltout et Hassen (1990) : ils ont établi des relations de régression entre la moyenne mensuelle des composantes globales et diffuse de l'irradiation solaire et la luminance observée dans les domaines visible, infrarouge et vapeur d'eau. Pour chacune de ces bandes, les relations de régression qui ont été utilisées sont soit linéaire, soit du deuxième ordre ou troisième ordre.
- Pastre (1981) : son modèle se fonde sur le fait que l'indice d'enneuagement défini à partir des niveaux de gris est complémentaire de la fraction d'insolation et que cette dernière peut être utilisée comme prédicteur du rayonnement solaire au sol.

#### b) Les méthodes Physique

La majorité des algorithmes dans cette catégorie considère les échanges d'énergie qui se produisent lors de la traversée du système atmosphère-terre par le rayonnement solaire. Ces échanges d'énergie sont alors décrit par une équation ou intervient principalement le flux d'irradiation solaire qui est réfléchi vers l'espace par les couche supérieure de l'atmosphère, la partie du rayonnement solaire absorbée par l'atmosphère, le flux global d'irradiation solaire mesuré au sol et la valeur hors atmosphère de ce rayonnement.

Les premières études sur les échanges d'énergie dans l'atmosphère ont montré que l'albédo planétaire est fortement corrélé à l'irradiation absorbée par le sol.

Parmi ces modèles :

- Modèle de Hanson (1971) : ce modèle est basé sur l'équation de régression qui relie l'albédo planétaire et la fraction du rayonnement incident transmit par l'atmosphère, tel que l'albédo est estimé en traitant les niveaux de gris qui composent les images satellitaires.
- Modèle de Ellis et Von Der Haar (1976) : c'est une approche dérivée de l'approche de Hanson, mais dans laquelle l'indice d'ennuagement et l'albédo terrestre sont estimés par traitement des données satellitaires, l'albédo planétaire est ensuite calculé en considérant que celle-ci est une fonction linéaire de l'indice d'ennuagement.
- Tarpley (1979) : même modèle de Hanson, mais pour chacune des bande visible, infrarouge et vapeur d'eau , il fait intervenir des équations de régression multi variables qui lient les niveau de gris, mesurés par la luminance B, de chaque pixel, a l'angle zénithal  $\theta_z$ , et l'angle d'azimut du satellite par rapport au soleil.
- Cano et al (1986) : ce modèle présente des similitudes avec le modèle d'Ellis et Von Der Haar du point de vue du calcul des albédos et de l'indice d'ennuagement.
- Ramanathan (1986) : il établi un modèle qui lie directement la partie du rayonnement solaire absorbée par le sol et celle réfléchi par l'atmosphère vers l'espace.
- Delorme (1992) : cette méthode s'exprime sous forme d'un algorithme appelé GISTEL, comme dans le cas de Tarpley l'algorithme GISTEL permet de classer le pixel en trois type, pour cela la brillance de l'image a étudiée est comparée point par point a deux images de références l'une obtenue en ciel clair et l'autre en ciel couvert [11].

### V.2.2. Approche analytique

#### a) Les méthodes des bandes d'absorption

Le principe de base de ces méthodes est l'équilibre des échanges radiatifs dans le système atmosphère-terre, faisant notamment intervenir l'effet des bandes d'absorption.

- Gautier et Masse (1980) : Gautier et Masse furent les premiers à développer ce type de raisonnement, qui est comme ce qui suit : dans une première étape l'analyse est restreinte à ciel sans nuage, c'est-à-dire que le rayonnement reçu par le satellite est limité au rayonnement diffusé et le rayonnement absorbé par l'atmosphère et le rayonnement solaire observé au niveau du sol est la somme des composantes directe et diffuse. Dans le cas d'un ciel couvert, les équations précédentes deviennent plus compliquées à formuler ;

ainsi l'énergie rayonnée vers le satellite, se compose de trois terme qui représentent respectivement le rayonnement diffuse de l'atmosphère vers le satellite, l'énergie solaire réfléchié par les nuages vers le satellite et celle traversant les nuages puis réfléchié par l'atmosphère vers le satellite.

Il existe d'autre approche similaire à celle de Gautier et Masse, les principale méthodes qu'on le peut citer sont :

- Nimira (1980)
- Delorme et al (1983) ;
- Dedieu et al (1983) ;
- Pinker et Lazlo (1989) ;

### **b) Les méthodes spectrales**

Toutes les méthodes reviennent à résoudre l'équation de transfert radiatif qui décrit l'atmosphère lorsque celle-ci est a la fois absorbante et dissipative. Pour cela le spectre de rayonnement qui s'étend de 0.2 à 4  $\mu\text{m}$  incluant le visible et l'infrarouge est subdivisé en plusieurs intervalles spectraux et la partie basse de l'atmosphère est explorée en décomposant celle-ci en une succession de couches élémentaires qui viennent s'empiler les uns sur les autres en fonction de l'altitude.

Une telle analyse est aussi fondée sur l'hypothèse anisotropie de la diffusion du rayonnement solaire par les aérosols et par les gouttelettes d'eau formant les nuages.

Parmi les modèle qui fond appelle a une analyse spectrale il y a :

- Raschke et Preuss (1979) : dans ce modèle la gamme 0.2 – 3.6 est subdivisée en 87 intervalles spectraux et l'atmosphère est décomposée en 70 couches ayant chacune une épaisseur de 1km.
- Halpern (1984) : les flux d'irradiation solaire observé au sol et au sommet de l'atmosphère sont estimés en considérant 83 intervalles spectraux de la gamme 0.28 - 2.5  $\mu\text{m}$  et 51 couches atmosphériques se superposent à une altitude qui va de 0 à 50 Km.
- Pinker et Ewing (1985) : c'est un modèle pour lequel le spectre solaire est décomposé en 12 intervalles et l'atmosphère en 3 couches.
- Darnell et al (1988) : l'une des particularités de ce modèle est qu'il suppose que l'irradiation solaire au sol est le produit de la valeur extraterrestre, de transparence en ciel clair et de la transparence en ciel couvert.

- Pinker et Laszlo (1989) : c'est un modèle pour lequel le spectre solaire est décomposé en 2 intervalles et l'atmosphère en 3 couches.

### V.3. Données utilisées

Nous avons utilisé dans cette étude deux types de données: d'une part, les mesures au sol enregistré à la station au sol par la station radiométrique de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelable en Milieu Saharien (URERMS) d'Adrar située au sud d'Algérie pour le mois de Février 2013. Et d'autre part, les Images Meteosat de deuxième génération (MSG) prises par le satellite géostationnaire MSG-2. Ils ont été rassemblés dans le canal visible (VIS008) au cours du même mois de l'année 2013 entre 8H et 17H avec un intervalle de quinze minutes.

#### V.2.1. Les données radiométriques

Dans le but de valider les simulations nous utilisons des données mesurés par un pyranomètre de type CM11 (fabriqué par Kipp & Zonen), installé à la station radiométrique de l'Unité de recherche à Adrar avec les coordonnées  $27^{\circ}53'N$  et  $0^{\circ}17'W$ .



Figure V.1 : Pyranomètre utilisé pour la mesure de rayonnement solaire global

#### V.3.2. Les données satellitaires

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, qui devient complètement opérationnel le 6 juillet 2006 [12].



Figure V.2 : Le satellite Météosat Second Génération.

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 des 12 canaux de MSG ainsi que leurs objectifs sont résumés dans le chapitre II.

Les satellites MSG nous offre chaque 15 minute une acquisition avec un volume en espace mémoire de 1.5 Géra Octet cela se traduit par 6 G.O par heure et 144 G.O par jour. Le traitement nous impose à stocker tous les images acquises. Pour une année les images stockées occupent un espace mémoire d'ordre de 540 G.O cela se traduit par un défi d'optimisation d'espace mémoire sans perte d'information [13].

Ces images que nous avons considérées représentent l'Algérie. Ils sont extraits des images MSG recouvrant le disque de terre et consistent en 3712x3712 pixels. Pour faire cette extraction, nous avons localisé la zone d'intérêt (Algérie) par son emplacement géographique [12]. Nous avons donc constitué une base d'images (voir Figure V.3). Ensuite, nous avons localisé Adrar coordonnées géographiques 27°88`N et 0°28`W sur toutes les images qui composent notre base de données.

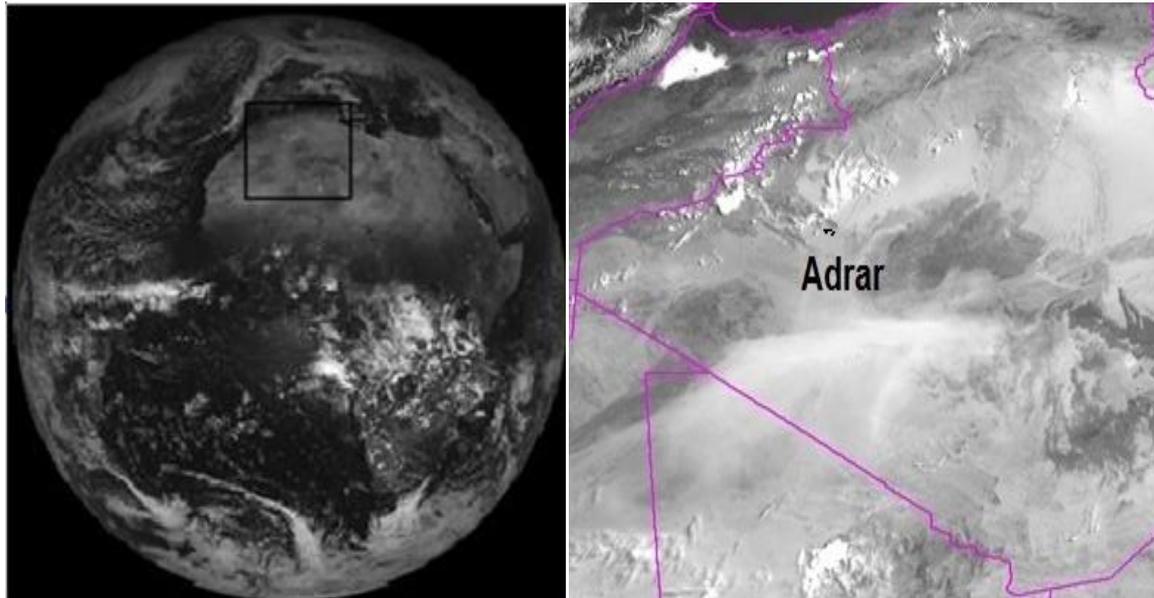


Figure V.3 : Zone d'étude extraite d'une image globale

#### V.4. Méthodologie

La méthodologie adoptée comporte plusieurs étapes que nous avons résumées par le diagramme de la figure V.4.

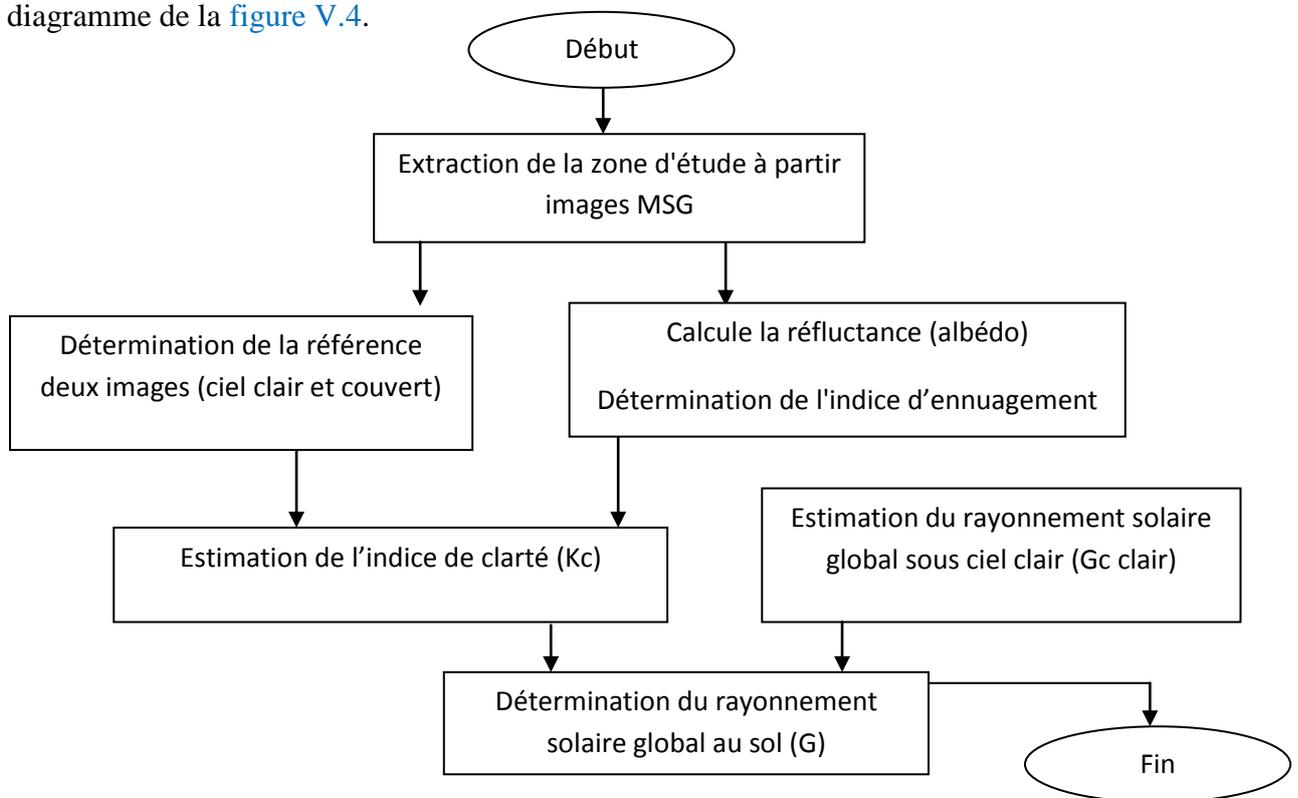


Figure V.4 : Les différentes étapes à suivre pour estimer l'irradiation solaire globale au sol

### V.3.1. Estimation du rayonnement solaire global (Gc) sous ciel clair

Le modèle de ciel clair utilisé dans notre étude est le Modèle Bird & Hulstrom [14], ce modèle dépend essentiellement de l'absorption et de la transmittance par les composants atmosphériques et les composantes diffuses, il est donné dans les équations du chapitre III.

### V.4.2. Estimation du rayonnement solaire global par Héliosat

Héliosat est une méthode physique qui peut déduire le rayonnement solaire à partir de la luminance captée par le satellite. Elle utilise un Modèle de calcul du rayonnement par ciel clair en chaque pixel de l'image satellitaire et à tout moment, et un Modèle d'extinction du rayonnement obtenu dû à la présence de nuage. Elle a été développée à MINES ParisTech en collaboration avec plusieurs partenaires européens et considérer comme l'une des plus performantes parmi les différentes méthodes utilisant des images du spectre visible des satellites météorologiques.

Cette méthode est basée sur la conversion des données brutes en luminances qui sont des grandeurs physiques reconnues et utilisable par les modèles de transfert radiatif de l'atmosphère. Ces données sont traduit par la suite en réflectances (ou Albédo) [16].

$$\rho^t(t, i, j) = \frac{\pi L^t(i, j)}{G_0 C_{t-s} \cos \theta_z(t, i, j)} \quad (V.1)$$

Avec :

$\rho^t(i, j)$  : Réflectance à l'instant t

$L^t(i, j)$  : Luminance observée par le capteur à l'instant t

$G_0$  : Irradiance solaire extraterrestre ( $W/m^2$ )

$C_{t-s}$  : Facteur de correction de la distance Terre-Soleil

$\theta_z$  : Angle zénithal du soleil à l'instant t, au point (i,j)

La présence du nuage est traduite par ce qu'on appelle l'indice d'ennuagement, qui est le paramètre clé de la méthode Heliosat-2, comme résultant d'un rapport entre ce qui est observé par le capteur et ce qui serait observé si le ciel était clair (sans nuages) [17].

Cela s'exprime par:

$$n = \frac{\rho^t(i, j) - \rho_{Sol}^t(i, j)}{\rho_{Nuage}^t(i, j) - \rho_{Sol}^t(i, j)} \quad (V.2)$$

$\rho^t$  : Réflectance apparente observée par le capteur.

$\rho_{\text{Sol}}^t$  : Réflectance apparente du sol par ciel clair.

$\rho_{\text{Nuage}}^t$  : Réflectance apparente des nuages les plus brillants à l'instant t.

Cet indice ne doit pas être confondu avec la nébulosité que relèverait un observateur météorologue au sol. Ne peut être considéré comme une mesure de l'atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère, et relié au rayonnement global par l'intermédiaire du  $K_c$ , quotient de l'irradiation observée par l'irradiation qui devrait être observée par ciel clair :

$$K_c = \frac{G(i,j)}{G_{\text{clear}}(i,j)} = f(n) \quad (\text{V.3})$$

Avec :

$G$  : Irradiation globale calculé.

$G_{\text{clear}}$  : Irradiation globale par ciel clair, elle est calculée par le modèle ciel clair de Bird & Hulstrom [14] suivant l'équation (III.1).

$f(n)$  Fonction empirique reliant l'indice d'ennuage  $n$  à l'indice de clarté  $K_c$  [15].

$$\left\{ \begin{array}{ll} n \leq -0.2 & K_c = 1.2 \\ -0.2 < n \leq 0.8 & K_c = 1 - n \\ 0.8 < n \leq 1.1 & K_c = 2.0667 - 3.6667n + 1.6667n^2 \\ 1.1 < n & K_c = 1 - n \end{array} \right. \quad (\text{V.4})$$

Pour chaque pixel, nous avons obtenu le rayonnement solaire global instantané  $G(i,j)$  en multipliant l'indice de clarté  $k_c$  au rayonnement solaire global obtenu sous ciel claire  $G_{\text{clear}}(i,j)$ , il est donné par l'équation suivante:

$$G(i,j) = K_c \cdot G_{\text{clear}}(i,j) \quad (\text{V.5})$$

### V.4.3. Détermination des deux images de référence

Les deux images de référence sont celles des coefficients de réflexion obtenus sur ciel clair et couvert. Ces images ont été obtenues à l'aide d'une séquence d'images prises sur une période suffisamment longue [12]. L'image de référence en ciel clair est obtenue en attribuant à chaque pixel la valeur minimale du coefficient de réflexion qui apparaît au moins une fois dans la séquence d'images. L'image de référence en ciel couvert s'effectue en sélectionnant les pixels dont la valeur du coefficient de réflexion est la plus grande pendant la même séquence

d'images. Les figures ci-dessous illustres les deux images de référence obtenues par ce raisonnement.

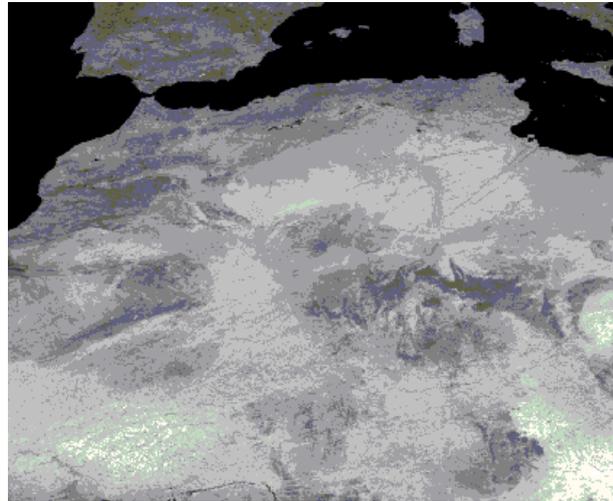
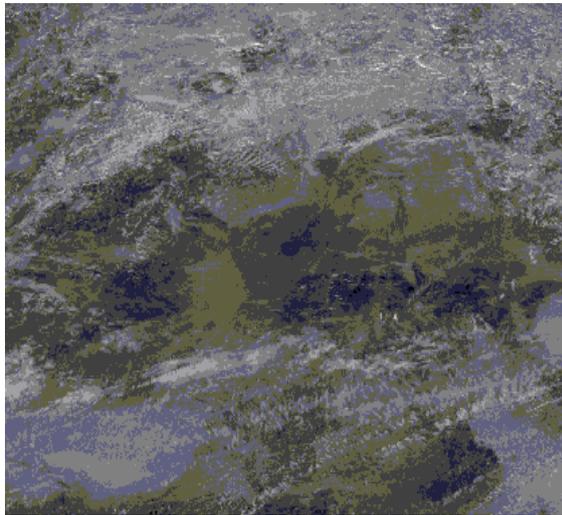


Fig. V.5 : Image de référence ciel nuageux

Fig. V.6 : Image de référence ciel clair

#### V.4.4. Scores statistiques

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

Nous avons utilisé plusieurs scores statistiques [18] qui existaient dans la littérature indiqué dans les chapitres précédente.

### V.5. Résultats et discussion

#### V.5.1. Estimation du rayonnement solaire global instantané

Les données solaires extraites d'images satellitaires représentent l'intensité du rayonnement solaire exprimée en  $W/m^2$  ou appelé rayonnement solaire. Ce rayonnement est déterminé par une relation entre l'indice de clarté et l'irradiation solaire globale sous ciel clair. Après détermination des indices de clarté correspondant à les images prises respectivement de 8H à 17H pour la station d'Adrar en utilisant l'équation (V.4), et après le calcul du rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale au sol par ciel clair du modèle Bird & Hulstrom (donnée par les équations du chapitre III) aux mêmes instants de la prise des images, nous avons estimé le rayonnement solaire global en utilisant l'équation (V.5). Les résultats obtenus de l'estimation du rayonnement solaire pour quelques journées ciel claire et ciel nuageux sont illustrés dans les figures (V.7 et V.8).

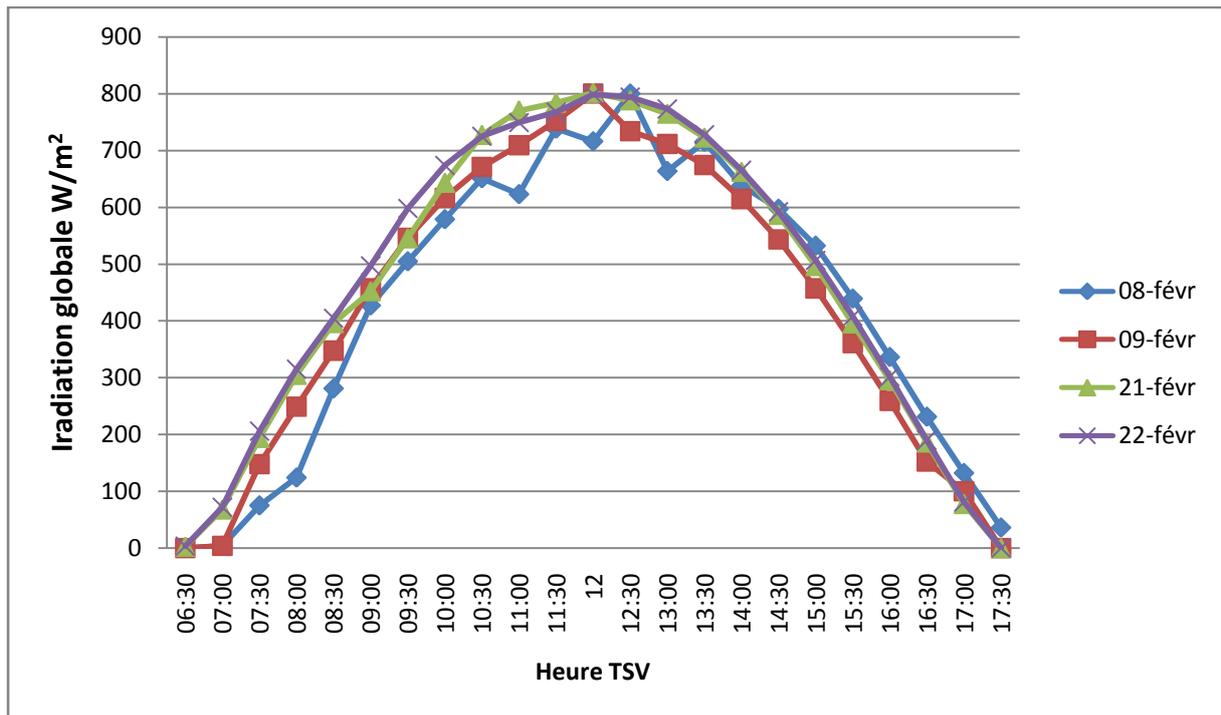


Figure V.7 : Estimation du rayonnement solaire global de la station d'Adrar les 08, 09, 21 et 22 Février 2013 (ciel clair)

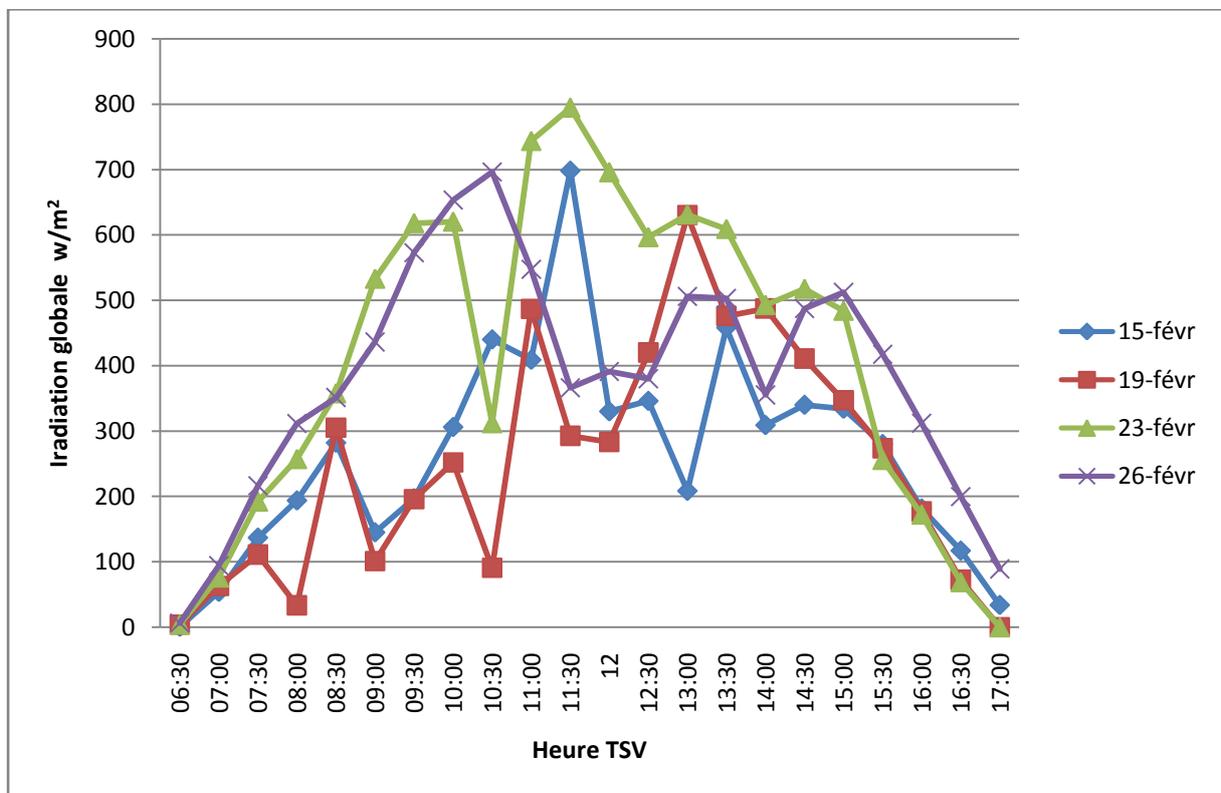


Figure V.8 : Estimation du rayonnement solaire global de la station d'Adrar les 15, 19, 23 et 26 Février 2013 (Ciel nuageux)

D'après les figures ci-dessus, nous notons que le rayonnement solaire varie au cours de la journée. Il est bas dans le lever et le coucher du soleil et atteint son maximum en midi solaire (12:00) si le ciel conserve le même état pour un jour. Par contre, si le ciel change d'un état à l'autre, des fluctuations importantes se produisent sur le rayonnement. Ces fluctuations sont principalement dues à la présence de nuages. Les variations de l'énergie solaire et l'irradiation est proportionnelle aux changements d'indice de clarté pour les quatre intervalles indiqués à l'équation (V.4), mais les variations de l'indice de clarté ainsi que le rayonnement solaire globale sont observés à la figure V.9. Ces variations sont dues au type des nuages, leur épaisseur et leur altitude.

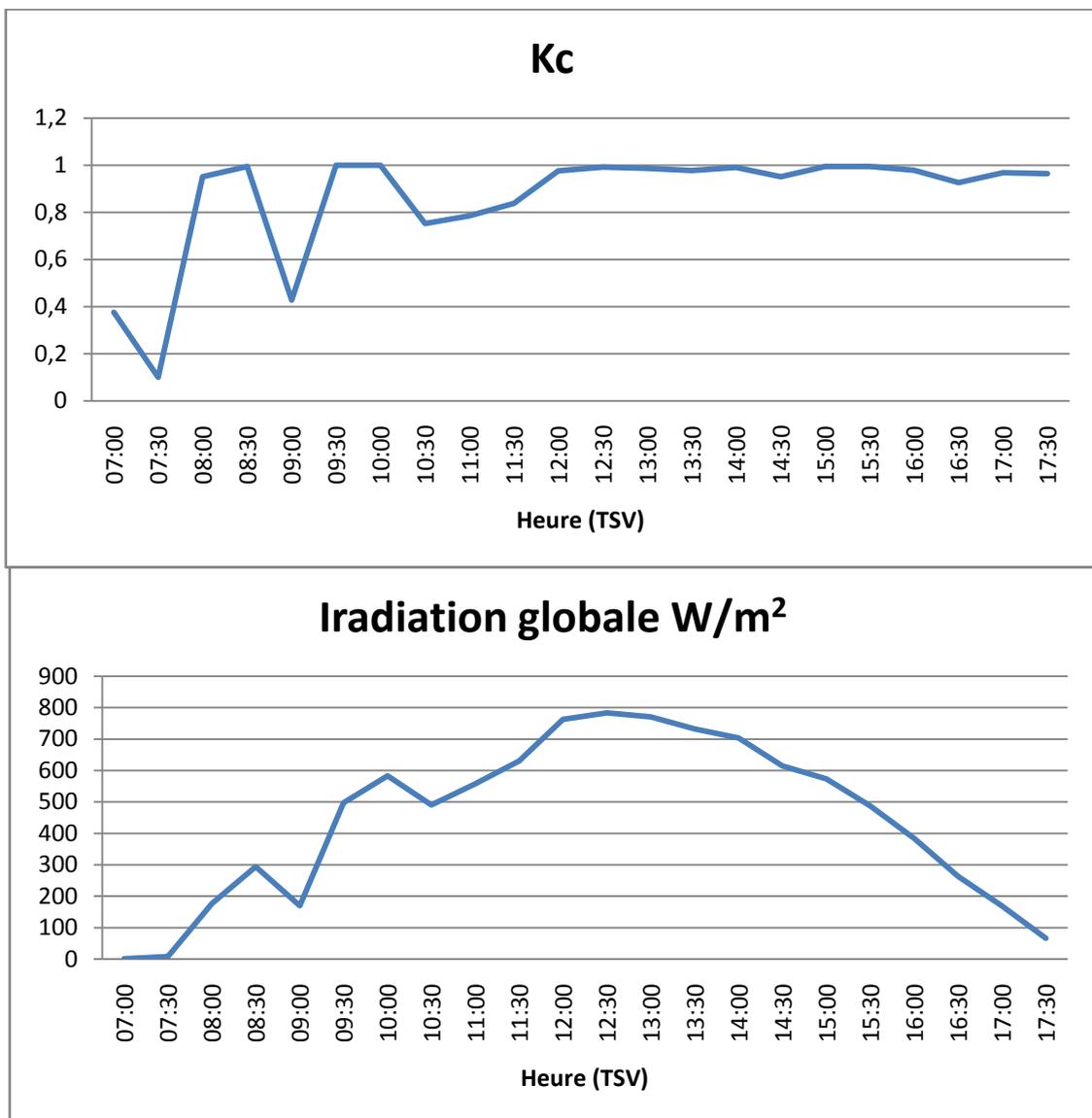


Figure V.9 : Variation du rayonnement solaire global et l'indice de clarté Kc (17 Février 2013)

### V.5.2. Comparaison des valeurs estimées aux mesures au sol

Pour valider nos résultats, une comparaison entre les valeurs estimées et mesurées est importante. Les mesures instantanées au sol enregistrées dans URERMS sont des irradiations ( $W/m^2$ ). Nous avons comparé les irradiations solaires globales estimées par le modèle avec les mesures au sol recueillies dans la station d'Adrar. L'analyse comparative est effectuée à la base du score statistique et le coefficient de corrélation. Les résultats de cette comparaison sont illustrés par le tableau et figures suivants.

**Tableau V.1** : Coefficients de corrélation R obtenus par la comparaison des irradiations solaires globales horaires estimées au sol et mesures pour le mois de février 2013

<b>Date</b>	01-Fév.	02-Fév.	05-Fév.	06-Fév.	07-Fév.	08-Fév.	13-Fév.	14-Fév.	15-Fév.
<b>R</b>	0,978	<b>0,698</b>	0,814	0,941	0,939	0,974	<b>0,684</b>	0,916	<b>0,687</b>
<b>Date</b>	16-Fév.	17-Fév.	18-Fév.	19-Fév.	20-Fév.	24-Fév.	26-Fév.	27-Fév.	28-Fév.
<b>R</b>	0,914	0,983	<b>0,675</b>	<b>0.568</b>	0.935	0,918	<b>0,697</b>	0,989	0,962

Les coefficients de corrélation reliant les estimations horaires aux mesures au sol sont satisfaisants, ils sont en générale supérieurs à 0.80. Le coefficient de corrélation inférieur à 0.70 (70%) mentionné en gras correspond à des situations nuageuses ou caractérisées par un indice de clarté variable.

Nous avons validé ce modèle en utilisant les données au sol de la station radiométrique de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelable en Milieu Saharien (URERMS) d'Adrar, sur la base de quelques 600 données horaires (Figure V.10).

La figure ci-dessous représente le graphe du nuage de point formés en traçant les couples du sol horaire mesures et les valeurs estimées par image satellite.

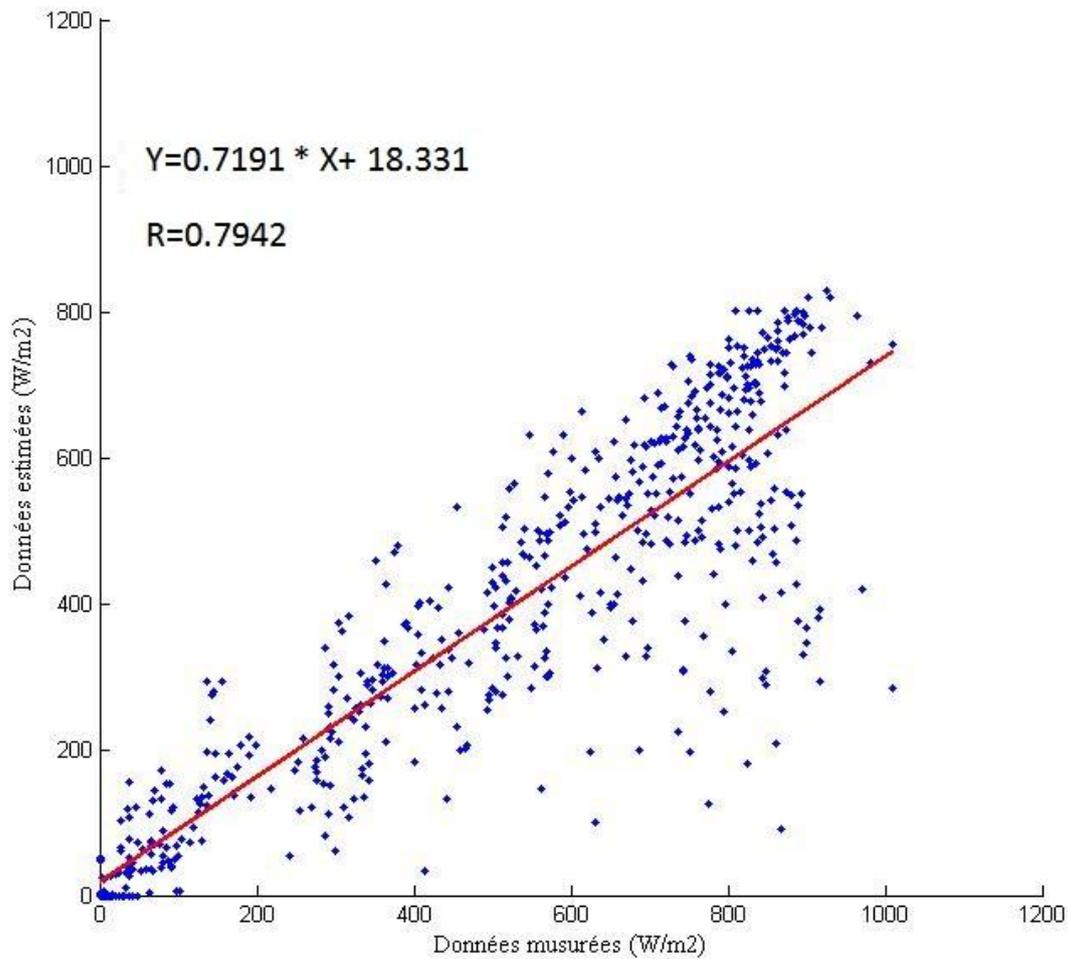


Figure V.10 : Corrélation entre données journalières estimées et mesurées

Les valeurs des différents coefficients statistiques erreurs moyennes (MBE), erreurs quadratiques moyennes (RMSE), coefficient de corrélation (R) ; sont données dans le [TableauV.2](#). On a trouvé l'erreur de biais moyen  $MBE= -51,69 \text{ Wh/m}^2$  et l'erreur quadratiques moyennes  $RMSE= 81,62 \text{ Wh/m}^2$  qui constituent respectivement -9% et 19% des valeurs mesurées. Aussi pour le coefficient de corrélation  $R=0,7942$  qui sont pratiquement des valeurs acceptable.

D'après les résultats tirés à partir les scores statistiques, on a pu prouver la relative bonne performance du modèle étudié aussi l'importance de l'intervention de la télédétection spatiale pour résoudre le problème d'estimation du rayonnement solaire globale au sol.

Tableau V.2: Scores statistiques

MBE (wh.m <sup>-2</sup> )	rMBE %	RMSE (wh.m <sup>-2</sup> )	rRMSE %	R
-51.69	-9.09	81.62	19.10	0.7942

La figure V.11 montre la comparaison des courbes de variations journalières entre le rayonnement globale horizontale horaire mesuré et estimé à Adrar du mois de Février 2013. Ces courbes nous montrent qu'à l'exception des valeurs horaires estimées à 8h et 17h du même mois, l'estimation à partir des images satellite donne un bon accord de la forme de la journée comparativement aux mesures.

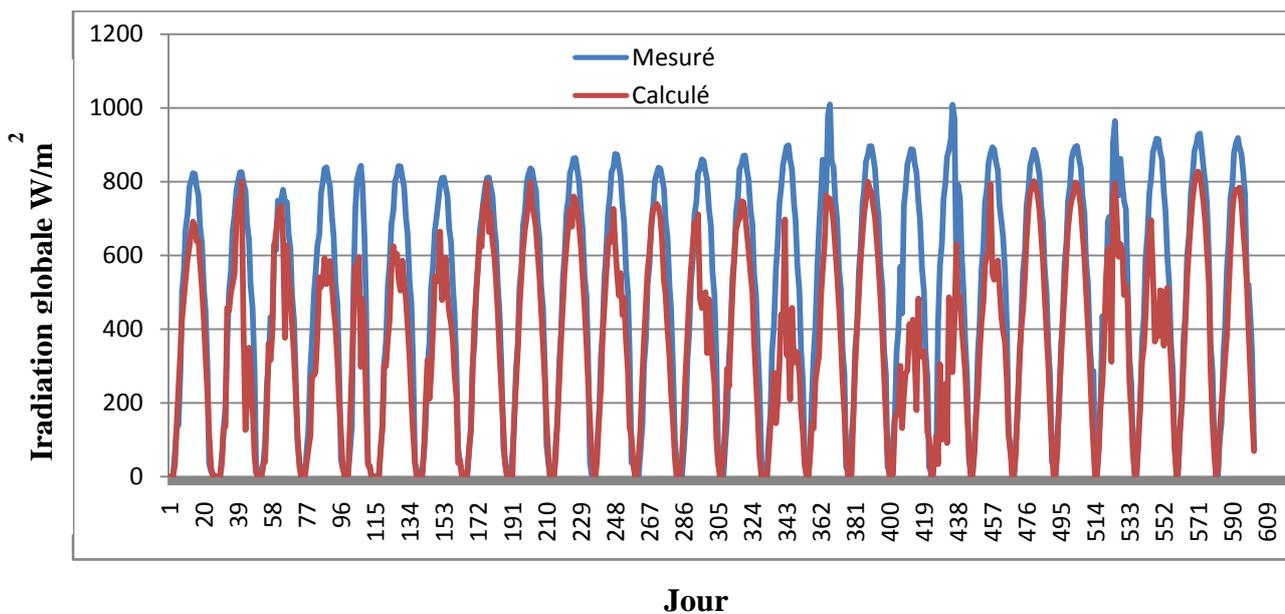


Figure V.11 : Données mesurées et simulées d'irradiations horaires globales horizontales (Février 2013)

### V.6. Conclusion

La finalité de notre étude est de pouvoir fournir aux utilisateurs et concepteurs de systèmes énergétiques solaires, des informations sur les quantités du rayonnement global horizontal en un site quelconque de notre zone d'étude. Dans la phase de validation de la méthode Heliosat-2, nous avons fait notre étude sur la station d'Adrar.

La validation montre une corrélation entre les données mesurées et celles simulées ( $R = 0,7942$ ), avec un biais moyen de  $-51.69 \text{ Wh/m}^2$  et une erreur quadratique moyenne de  $81.62 \text{ Wh/m}^2$ . Le modèle Héliosat-2 sous-estime légèrement le rayonnement durant cette période étudiée.

Une étude détaillée, telle que celle que nous avons fait sur le gisement solaire à Adrar est bien justifiée, car maintenant on a la certitude de la continuité dans notre travail sur plusieurs années. Par ailleurs un modèle comme le nôtre peut être implanté dans un système de réception des images satellite associé à un micro-ordinateur, dont le coût total de l'ensemble serait supportable.

L'exploitation des images obtenues par satellites permet de pallier partiellement le manque d'observations au sol ; on peut tirer une climatologie dès que la série de valeurs obtenues depuis l'espace sera suffisamment longue et établir un atlas du rayonnement solaire pour toute la région.

Cependant, comme nous avons envisagé un traitement sur une série d'images d'un mois, il sera intéressant d'étendre cette application à une base de données plus considérable, une série d'images collectées sur un an et plus, et de l'appliquer à d'autres sites Algériens, si l'on prend en compte la disponibilité des mesures.

### V.7. REFERENCES

- [1] Mefti A. et al., (1999), « Analyse critique de l'Atlas solaire de l'Algérie », *Revue des Energies Renouvelables*, 2(2), 69-85.
- [2] Capderou M., (1987), « Atlas solaire de l'Algérie, modèles théoriques et expérimentaux », Tome 1, Vol.1 Modèles Théoriques et Expérimentaux, OPU, Algérie, 1987
- [3] Salmi M. et al., (2007), « Modèles d'estimation de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale au sol », *Revue Internationale d'Héliotechnique Énergie – Environnement*, N° 35 ; 19-24.
- [4] Koussa M. et al., (2007), « Reconstitution des irradiances globale et diffuse en fonction de quelques paramètres météorologiques pour un ciel quelconque », *Revue des Energies Renouvelables*, 10(1), 75–92.
- [5] Gautier C., Diak G., Masse S., (1980), « A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data », *J. Appl. Meteor.*, vol. 19, 1005–1012.
- [6] Pastre C., (1981), « Développement d'une méthode de détermination du rayonnement solaire global à partir des données Meteosat », *La Météorologie*, VIe série N°24, mars 1981.
- [7] Cano D., Monget J.M., Albuissou M., Guillard H., Regas N., Wald L., (1986), « A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data », *Solar Energy*, vol. 37, 31-39.
- [8] Diabaté L., Moussu G., Wald L., (1989), « Description of an operational tool for determining global solar radiation at ground using geostationary satellite images », *Solar Energy*, vol. 42, 201-207.
- [9] Delorme C., Gallo A., Olivieri J., (1992), « Quick use of Wefax images from Meteosat to determine daily solar radiation in France », *Solar Energy*, 49 (3), 191-197.
- [10] Janjai et al., (2005), « Development of a method generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment », *Solar Energy*, 78, 739–751.
- [11] Fariza Meziani, Mina Boulifa, Zohra Ameer, (2013), « Determination of the global solar irradiation by MSG-SEVIRI images processing in Algeria », *Energy Procedia*, vol.36, 525 – 534.
- [12] Eumetsat, Site Internet : <http://www.eumetsat.int>, consulté en Mars 2019.
- [13] Bouchouicha Kada, (2017), « Modélisation multispectrale des images satellitaire - Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère », Thèse de Doctorat, option Rayonnement et Matière, université USTMB.
- [14] Bird R. E. and Riordan C., (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.
- [15] Rigollier, C., Wald, L., (1998), « Using Meteosat images to map the solar radiation: improvements of the Heliosat method », In Proceedings of the 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Published by Eumetsat, Darmstadt, Germany, EUMP 22, pp. 432-433.
- [16] Cros S., Albuissou M., Lefevre M., Rigollier C., and Wald L. (2004), « HelioClim: a long-term database on solar radiation for Europe and Africa ». In Proceedings of Eurosun 2004, published by PSE GmbH, Freiburg, Germany, 3, 916-920, ISBN 3-9809656-4-3.
- [17] Isaac Moradi, Richard Mueller, Bohloul Alijani, Gholam Ali Kamali, (2009), « Evaluation of the Heliosat-II method using daily irradiation data for four stations in Iran », *Solar Energy*, vol. 83, 150–156
- [18] Stone R.J., (1993), « Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation Models », *Solar Energy*, 51(4), 28–91.

# **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVE**

### Conclusions et perspective

L'utilisation de l'énergie solaire est actuellement une réalité mondiale, l'Algérie donne une grande importance à son développement en particulier au sud du pays et notamment Adrar qui dispose naturellement d'un potentiel solaire important, le nombre d'heures d'ensoleillement dépasse 3500 h/an. Ce constat qualitatif favorise l'exploitation et l'épanouissement de cette ressource énergétique. Cependant, l'utilisation de cette énergie exige la connaissance du gisement solaire dans la région. Malheureusement, les stations de mesure sont rares et se trouvent uniquement à quelque région et au chef lieu de quelque wilaya.

Le travail effectué dans cette thèse a pour objectif d'une part la détermination du gisement solaire par plusieurs méthodes et modèles, commençant par une approche physique et semi-empirique qui a été présentée et simulée par la description des trois modèles de connaissance relatifs pour l'estimation du rayonnement solaire dans trois régions du sud de l'Algérie, chacun des modèles proposés dans l'étude utilise leurs équations propres pour le calcul du rayonnement solaire, cet outil de simulation nous a permis de comparer des valeurs mesurées et celles estimées par les modèles paramétrés, ensuite on a estimé le rayonnement solaire global par neuf nouveaux modèles et trois fonctions d'activation durant une période de six ans suivant une technique de l'intelligence artificielle par l'évaluation de plusieurs modèles de réseaux de neurones artificielle pour choisir la meilleure concernant son prédiction, on a utilisé comme entré déférent paramètre astronomique et météorologique, la dernière technique utilisée est par le traitement des images satellitaires pour prédire le rayonnement solaire global dans notre site d'étude à Adrar.

Pour résumer les résultats d'estimations du rayonnement, nous avons constaté que dans la première approche les modèles Atwater & Ball et Bird & Hulstrom donnent une bonne estimation du rayonnement solaire à ciel clair, les résultats obtenus pour les trois sites (Adrar, El-Goléa, Tamanrasset) par les deux modèles précédents se rapprochent avec une grande précision des données réelles et sont acceptables, le coefficient de corrélation était supérieur à 0.99, l'erreur relative MAPE ne dépasse pas 5%, de même que le coefficient relatif de l'erreur de biais n'excède pas 3% en valeur absolue, RMSE relatif variait entre 4% et 7% pour l'irradiation globale.

Dans la douzième approche nous avons constaté que la combinaison d'entré (Irradiation solaire extraterrestre, Durée du jour, Température, Pression atmosphérique, Humidité relative, Vitesse du vent, Déclinaison et Hauteur angulaire maximale du soleil, numéro de jour de l'année, numéro heure du jour) avec la fonction Sigmoidale logistique de 15 neurones de la couche cachée est celle qui donne les meilleurs résultats de prédiction à ciel quelconque, la corrélation entre l'irradiation solaire globale mesuré et celle simulé est de 98.25% et l'erreur relative ne dépasse pas 8%.

Dans la troisième étude, la méthode d'estimation par traitement des images satellitaire que nous avons sélectionné permet d'estimer l'irradiation solaire globale reçue au sol dans divers états du ciel. Elle est basée sur le principe du modèle Heliosat-2, cette dernière repose sur une relation entre l'indice de clarté déterminé pour les images satellites et l'irradiation globale atteignant le sol par ciel clair. Les résultats obtenus avec les images MSG dans le canal visibles VIS008 sont satisfaisantes, on a trouvé le coefficient de corrélation  $R = 79,42\%$ , l'erreur de biais moyen relatif - 9% et l'erreur quadratiques moyennes relatif 19%. Ils ont été validés pour Adrar au sud de l'Algérie, ces résultats montrent que cette approche est bien adaptée au traitement des Images MSG.

Pour poursuivre ce modeste travail nous proposons les perspectives suivantes :

- ✚ Ajouter d'autres approches et modèles pour l'estimation du rayonnement solaire à savoir la logique flou, méthode SVM, chaine de Markov .....etc.
- ✚ L'extension et l'extrapolation de cette étude dans toutes les localités à n'importe quels points sur le territoire Algérienne avec cartographie.

Nous souhaitons que ce travail puisse contribuer à lancé la recherche et les études de gisement solaire et le potentiel à d'autre source d'énergie renouvelable, éolienne, biomasse, géothermie et CSP.

**BIBLIOGRAPHIES**

### Bibliographies introduction générale

- [1] [Benatiallah](#) Djelloul, Benatiallah A, Bouchouicha K. et al., (2016), “Development and Modeling of a Geographic Information System solar flux in Adrar, Algeria”, *International Journal of System Modeling and Simulation*, vol.1: 15-19.
- [2] [Mesri](#) M., (2015), “Numerical methods to calculate solar radiation, validation through a new Graphic User Interface design”, *Energy Conversion and Management*, vol. 90: 436–445.
- [3] [Zaatri](#) A., Azzizi N., (2016), “Evaluation of some mathematical models of solar radiation received by a ground collector”, *World Journal of Engineering*, vol. 13: 376 – 380.
- [4] [Lealea](#) T., Tchinda R., (2013), “Estimation of diffuse solar radiation in the north and far north of Cameroon”, *European Scientific Journal*, vol. 9.
- [5] [El-Mghouchi](#) Y., El Bouardi A., Choulli Z. et al., (2014), “Estimate of the Direct, Diffuse and Global Solar Radiations”, *International Journal of Science and Research*, vol.3: 1449-1457.
- [6] [Gueymard](#) C., (2014), “The sun’s total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models”, *Solar Energy*, 76 (4), 423-453.
- [7] [Otunla](#) T., (2019), “Estimates of clear-sky solar irradiances over Nigeria”, *Renewable Energy*, vol. 131:778-787.
- [8] [Ruiz-Arias](#) J., Gueymard C., (2018), “Worldwide inter-comparison of clear-sky solar radiation models: Consensus-based review of direct and global irradiance components simulated at the earth surface”, *Solar Energy*, vol. 168:10-29.
- [9] [Scarpa](#) F., Bianco V., Tagliafico L., (2018), “A clear sky physical based solar radiation decomposition model”, *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 6:323-329.
- [10] [Berk](#) A., Bernstein L., Robertson D., (1989), “MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN7”, Rep. GL-TR-89-0122. Air Force Geophys. Lab., Bedford, MA.
- [11] [Bird](#) R., Riordan C., (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*, vol. 25:87-97.
- [12] [Gueymard](#) C., (1995), “A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment », *Florida Solar Energy Center*.
- [13] [Ashrae](#), (1985), “Handbook of fundamentals. Atlanta, Georgia: American Society of Heating”, *Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers*.

- [14] [Campbell](#) GS., Norman JM, (1989), “An introduction to environmental biophysics”, 2<sup>nd</sup> ed.. *New York Springer*, ISBN 0-387-94937-2.
- [15] [Atwater](#) MA., [Ball](#) JT., (1978), “A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations”, *Solar Energy*, vol. 21:163–70.
- [16] [Davies](#) JA., (1988), “Validation of models for estimating solar radiation on horizontal surface”, Atmospheric Environment Service, Downsview (Ont.), IEA Task IX Final Report.
- [17] [Ineichen](#) P., (2006), “Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks”, *Solar Energy*, vol. 80:468–478.

# ANNEXES

## Annexe A: Coordonnées géographiques des stations météorologiques

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

## Annexe B : Logiciel MapInfo-Delphi

Il y a beaucoup de logiciel SIG ou systèmes d'information géographiques bureautiques, nous citons à titre exemple ceux que nous avons pu avoir celui utilisé dans notre projet le logiciel MapInfo.

MapInfo est un logiciel modulaire, ce logiciel peut aussi bien être fourni en version mono poste que multi utilisateurs accessible par réseau.

C'est un outil de type systèmes d'information géographique bureautique qui sert à créer de l'information géographique, à traiter de l'information et à la cartographier.

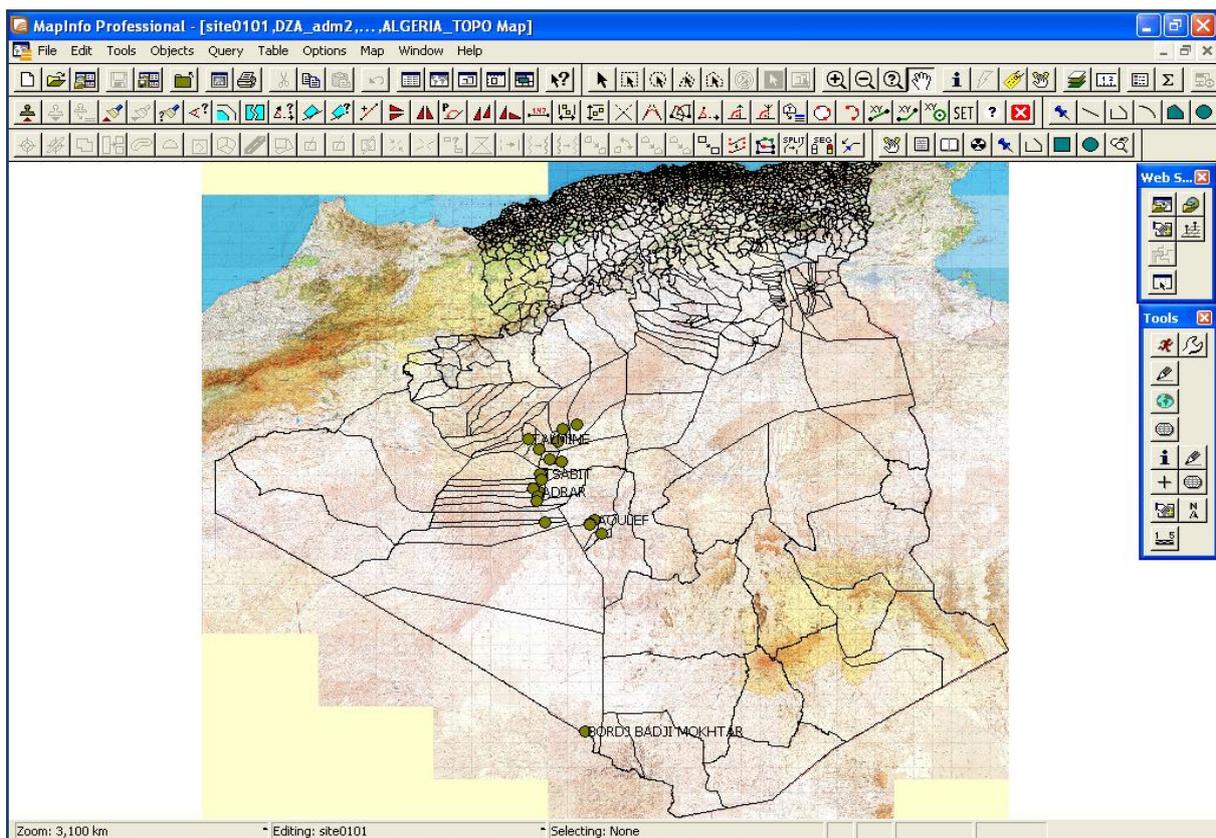


Figure B.1: L'interface de MapInfo

### Langage de programmation Delphi7

Delphi7 est un environnement de programmation visuel orienté objet pour le développement rapide d'applications (RAD). En utilisant Delphi7, vous pouvez, avec un minimum de codage manuel, créer de performantes applications Windows, Delphi fournit tous les outils qui sont nécessaires pour développer, tester et déployer des applications, incluant une importante bibliothèque de composants réutilisables, un ensemble d'outils de conception, des modèles d'applications et de fiches et des experts de programmation.

## Annexe C : logiciel GISOL2

GISOL2 a une base de données qui contient vingt (20) sites (chefs lieux de commune) sur la région d'Adrar, afficher les données pour chaque site (numéro de site, latitude, longitude, l'altitude...etc.), on peut ajouter d'autres sites par « Ajouter site ».

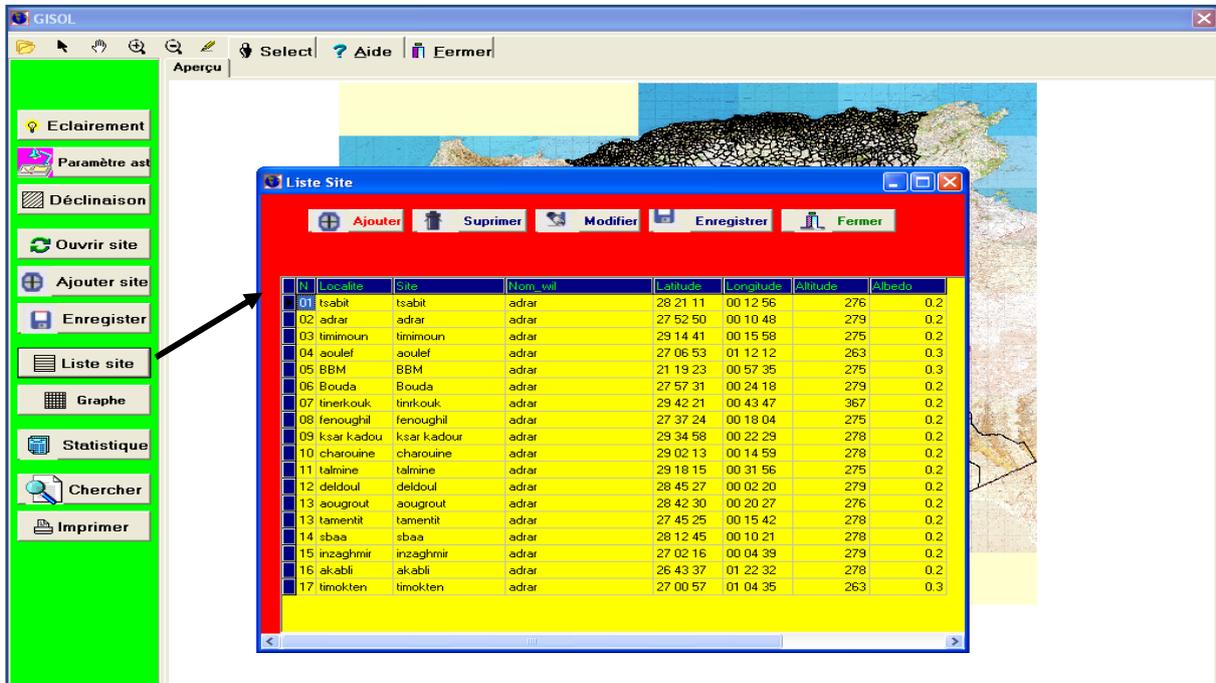


Figure C.1: Liste des sites de la région d'Adrar

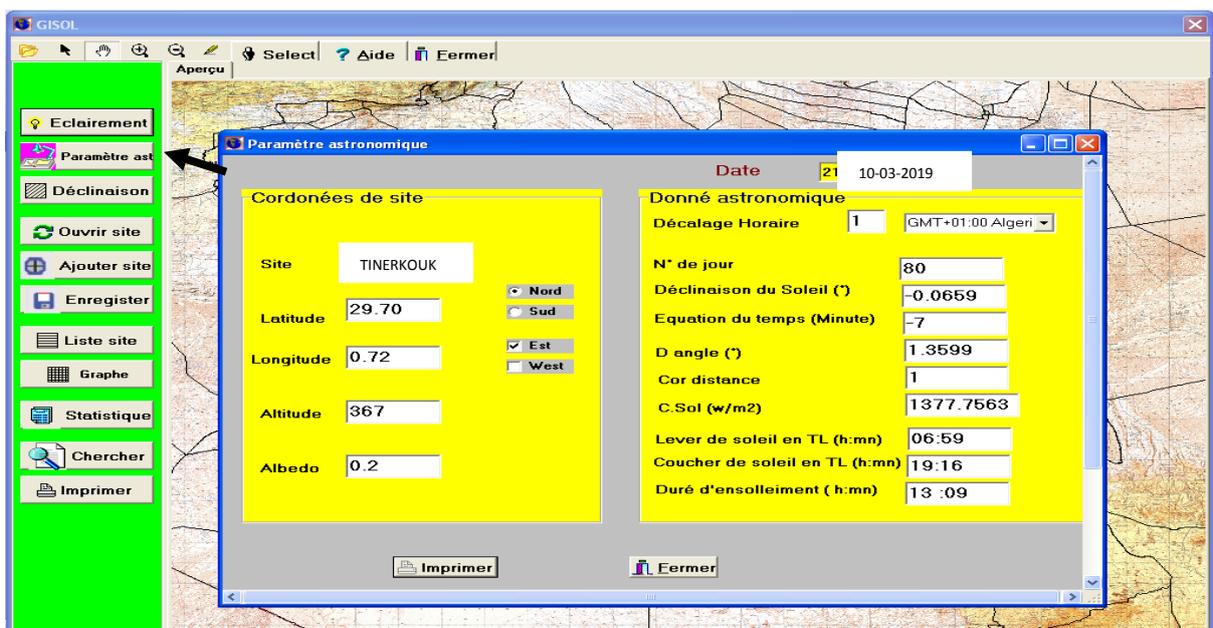


Figure C.2 : Paramètre astronomique du site (exemple : site Tinerkoug)

Le rapport (Figure C.3) est une feuille de format A4, qui représente les paramètres d'entrées et les résultats du calcul obtenus, ainsi que les graphes de variation mensuel de l'éclairement solaire

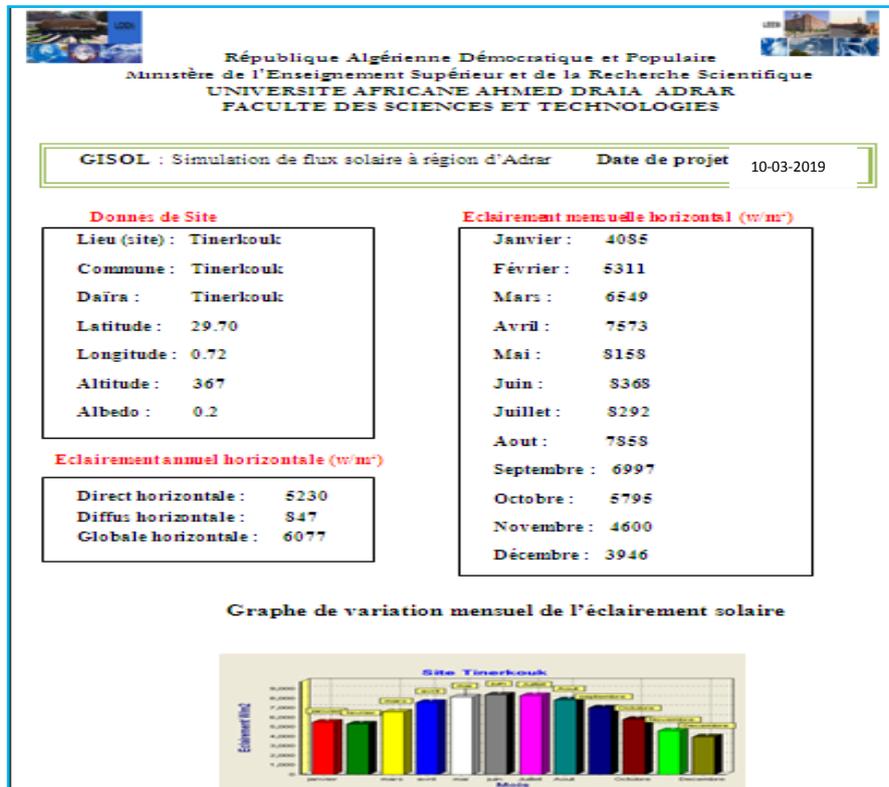


Figure C.3: Impression du rapport global du logiciel 'GISOL2'(exemple : site Tinerkoug)

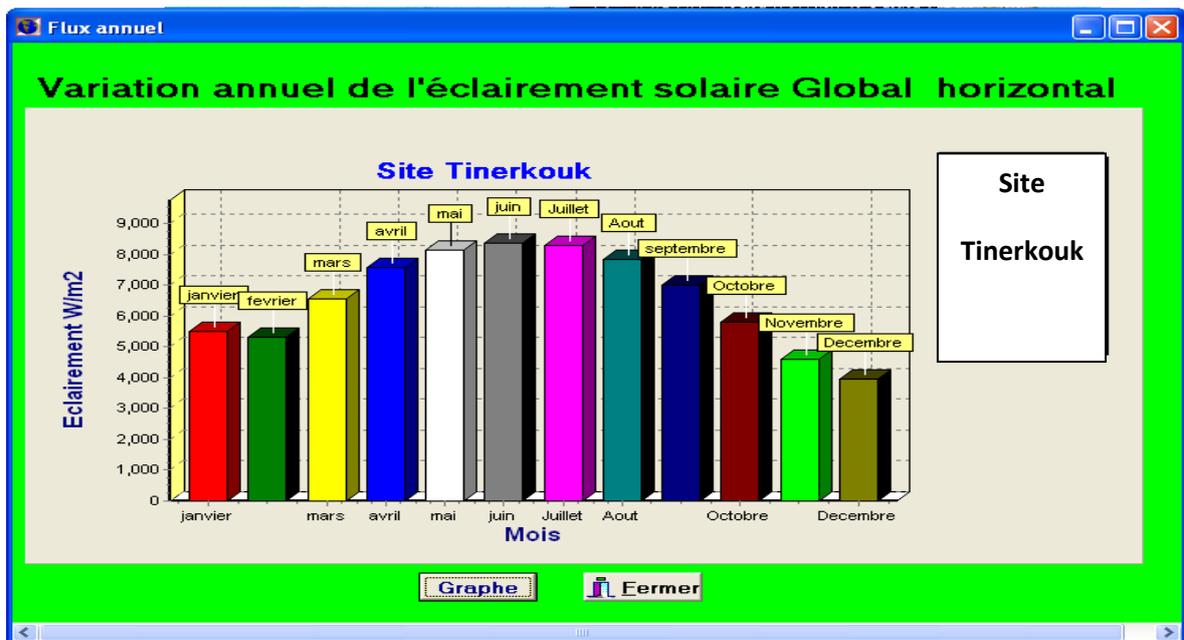


Figure C.4: Graphe de variation mensuel de l'éclairement solaire (exemple : Site Tinerkoug)

Annexe D : Réseaux de neurone (Fonction linéaire)

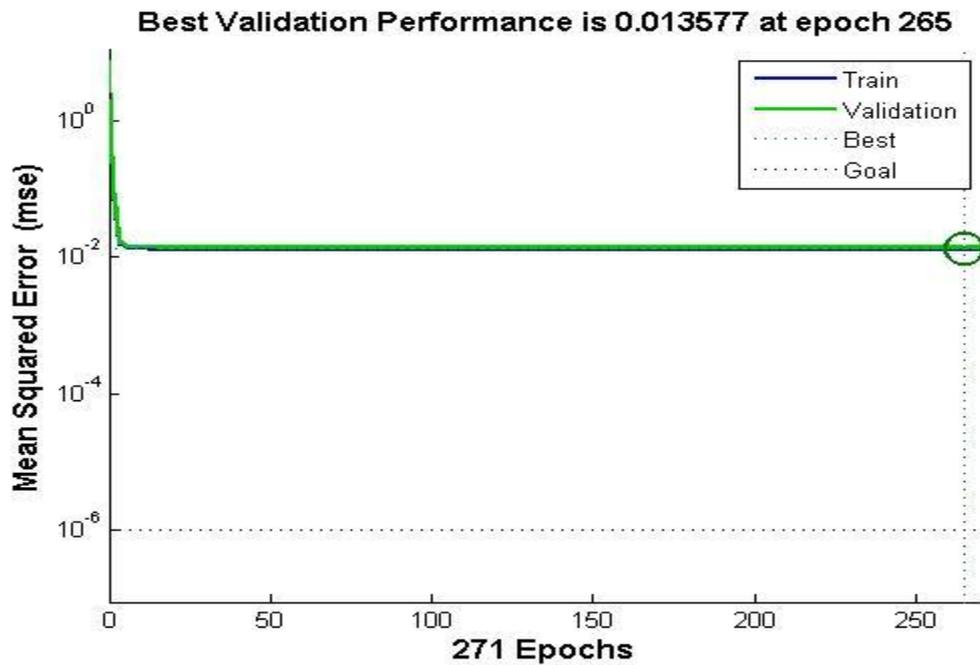


Figure D.1 : Performance du réseau ANN

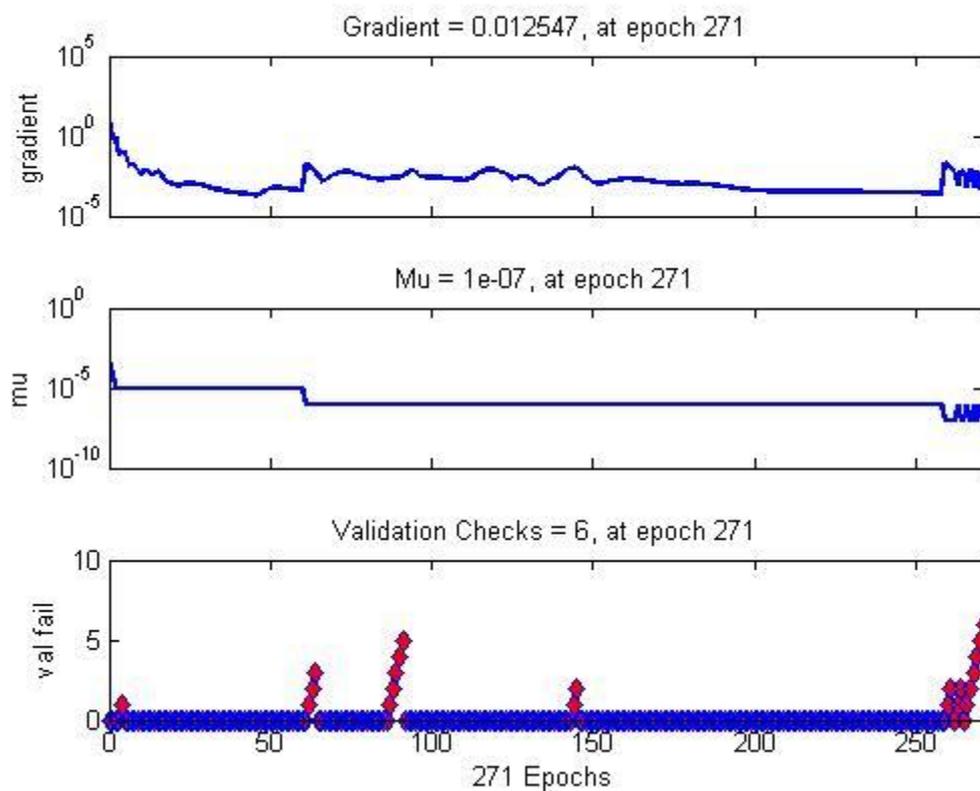


Figure D.2 : Entraînement du réseau ANN

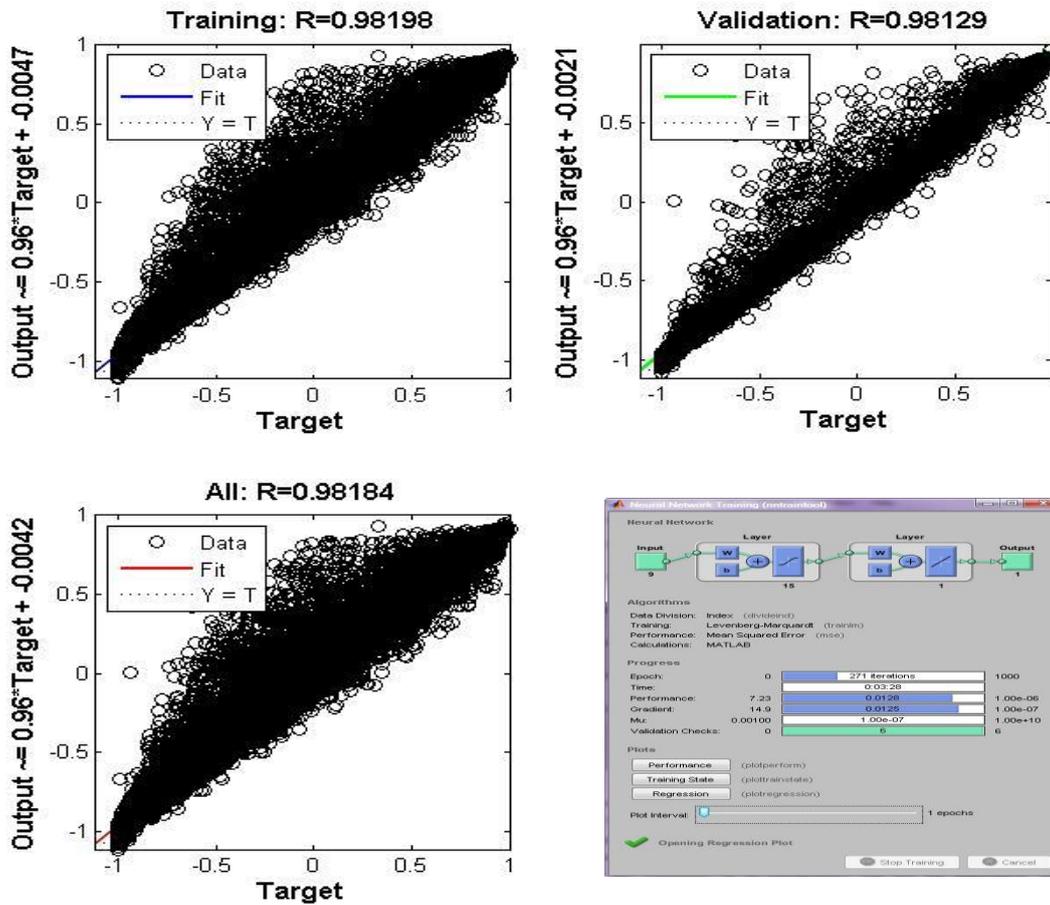


Figure D.3 : Régression du réseau ANN par la fonction linéaire

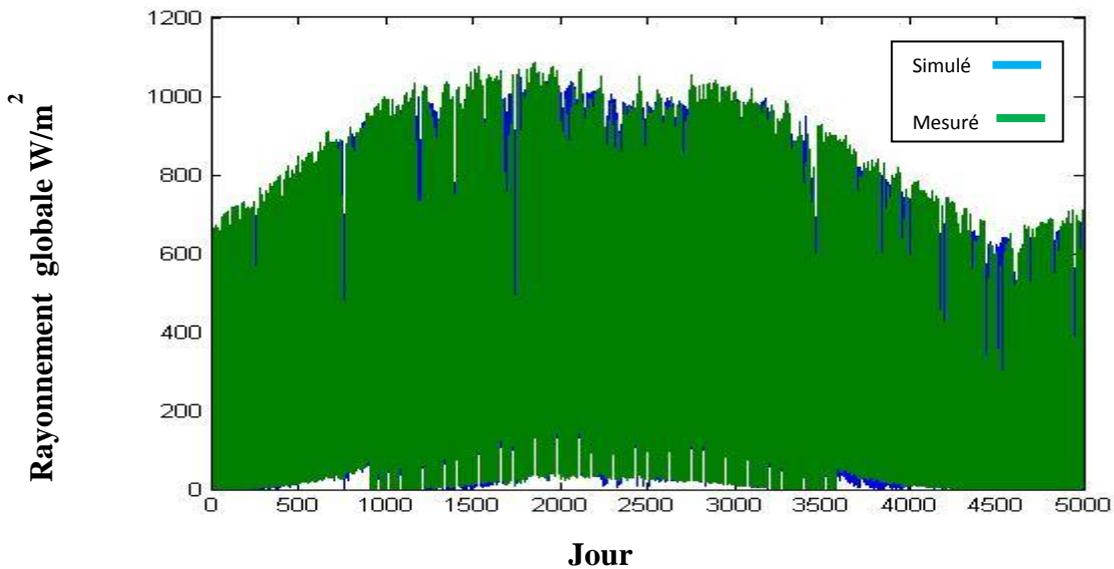


Figure D.4 : Rayonnement solaire globale journalière mesuré et simulé par ANN pour toute la période d'étude

### Annexe E : Publication de l'auteur

- ✚ **Djelloul Benatiallah**, Ali Benatiallah, Kada Bouchouicha, Bahous Nasri, “ Prediction du rayonnement solaire horaires en utilisant les réseaux de neurone artificiel ”, Algerian Journal of Environmental Sciences and Technology, [www.aljest.org](http://www.aljest.org), (Journal catégorie B), « en cours de publication ».
- ✚ **Djelloul Benatiallah**, Ali Benatiallah, Kada Bouchouicha, Messaoud Hamouda, and Bahous Nasri, (2018), “An empirical Model for estimating solar radiation in the Algerian Sahara”, American Institute of Physics (AIP). (Scopus)  
<https://doi.org/10.1063/1.5039218>
- ✚ **Djelloul Benatiallah**, Ali Benatiallah, A.Harouz, Kada Bouchouicha, (2016), “ Development and Modèleing of a Geographic Information System solar flux in Adrar, Algeria ”, International Journal of System Modeling and Simulation (ISSN Online: 2518-0959).  
<http://researchplusjournals.com/index.php/IJSMS/article/view/189>
- ✚ **Djelloul Benatiallah**, Ali Benatiallah, Kada Bouchouicha, (2017), “Model for obtaining the daily direct and diffuse solar radiations”, International Journal of Science and Applied Information Technology, Vol.7. No.1, Pages : 50-55.
- ✚ **Djelloul Benatiallah**, Ali Benatiallah, Messaoud Hamouda, Kada Bouchouicha, A.Harouz, (2017), “Model R.Sun for obtaining the daily global solar”, International Journal of Science and Applied Information Technology, Vol.7. No.1, Pages : 83-88.
- ✚ **Djelloul Benatiallah**, Ali Benatiallah, Bahous Nasri and Kada Bouchouicha, (2017), “Models for Obtaining the Daily Global Solar Radiations in Clear Sky in Sahara”, Advances in Science, Technology & Innovation (ASTI), [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4\\_439](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_439), Springer.
- ✚ Ali Benatiallah, **Djelloul Benatiallah**, T.Ghaitaoui, A.Harrouz, S.Mansouri, (2017), “Modelling and Simulation of Renewable Energy Systems in Algeria”, International Journal of Science and Applied Information Technology, 7(1), 17-22.
- ✚ B. Nasri,, A. Benatiallah, S. Kalloum, **Djelloul Benatiallah**, (2019), “Improvement of glass solar still performance using locally available materials in the southern region of Algeria”, Groundwater for Sustainable Development, 9 (2019) 100213. (Scopus)  
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100213>

- ✚ Bahous Nasri , Ali Benatiallah, Kalloum Slimane and **Djelloul Benatiallah**, (2018), “Experimental study of solar still using local material in South of Algeria”, American Institute of Physics (Scopus), [https://doi.org/ 10.1063/1.5039211](https://doi.org/10.1063/1.5039211)
- ✚ Benatiallah Ali, **Benatiallah, Djelloul**, Harrouz, A., & Mansouri, I., (2012), “Experimental study of dust effect in mult-crystal PV solar module”, International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, 3(3), 1-4.

### Conférence internationale

- ✚ **Djelloul Benatiallah**, Ali Benatiallah , Kada Bouchouicha, Bahous Nasri, Abdelkader Harouz, Hamouda Messaoud, “ Evaluation et comparaison du rayonnement solaire globale sur une surface horizontale ” , Conférence Internationale sur les Matériaux, le Patrimoine et l’Environnement en Zones Arides ICMaPEAZ19 Université Ahmed Draïa, Adrar 17 & 18 février 2019.
- ✚ **Djelloul Benatiallah**, Ali Benatiallah, Kada Bouchouicha, A. Harouz “Solar Radiation Estimate Calculated Using Two Modèles” IRSEC'16 - 4th International Renewable and Sustainable Energy Conference IEEE Conference Marrakech, MOROCCO, November 14-17, 2016.
- ✚ **Djelloul Benatiallah**, Ali Benatiallah, Kada Bouchouicha, Messaoud Hamouda “ Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair dans la région d’Adrar ”, 3rd Conference on Energy and Sustainable Development Adrar: 07 – 08 Février 2017.
- ✚ **Djelloul Benatiallah**, A. Benatiallah, K.Bouchouicha, A.Harouz “Development and Modeling of a Geographic Information System Solar flux in Adrar, Algeria” 4TH International Conference On Science, Management, Engineering & Technology 2016 (ICSMET 2016) Dubai, June 2016.
- ✚ **Djelloul Benatiallah**, A. Benatiallah, K.Bouchouicha, A.Harouz “ Estimation du rayonnement solaire en utilisant le modèle Bird et Capderou dans la région d’Adrar ” 4ème Séminaire International Sur Les Energies Nouvelles Et Renouvelables 24-25 Octobre 2016 Ghardaïa.
- ✚ **Djelloul Benatiallah**, Ali Benatiallah , M.Hamouda, K.Bouchouicha “Model R.Sun for obtaining the daily global solar”,1st Algerian Multi-Conference on Computer, Electrical and Electronic Engineering (AMCEEE'17) 24 - 27 April 2017, Algiers, Algeria

- ✚ **Djelloul Benatiallah**, A. Benatiallah, K. Bouchouicha, M.Hammouda “Model Bird for obtaining the daily global solar radiations in clear sky in south of Algeria,” 6th International Conference on Systems and Control IEEE May 7-9, 2017, University of Batna 2, Batna, Algeria .
- ✚ Ali Benatiallah, Bahous Nasri, **Djelloul Benatiallah**, A.Harrouz, “Study of Geothermal Potential Using GIS in South of Algeria”, Proceedings 5th African Rift geothermal Conference Arusha, Tanzania, 29-31 October 2014.
- ✚ Bahous Nasri, Ali Benatiallah, Kalloum Slimane and **Djelloul Benatiallah**, “Evaluation de la performance de quatre distillateurs solaires de géométries différentes” , Conférence Internationale sur les Matériaux, le Patrimoine et l’Environnement en Zones Arides ICMaPEAZ19 Université Ahmed DRAIA, Adrar 17 & 18 février 2019.
- ✚ Bahous Nasri, Ali Benatiallah, Kalloum Slimane and **Djelloul Benatiallah** “ Étude Comparative des Caractéristiques de Fonctionnement d’un Distillateur Solaire en Verre ” The 5th International Seminar on New and Renewable Energies, Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables, Ghardaïa – Alegria 24 - 25 Octobre 2018.

## Résumé

La connaissance de gisement solaire et le rayonnement reçue au sol est une tâche très important pour la conception et le dimensionnement des systèmes solaires dans différents domaines tel que la production de l'électricité, chaleur...etc. En outre, les mesures du rayonnement solaire sont limitées à quelques zones seulement dans l'Algérie. Ainsi, on a recours à des approches théoriques pour évaluer le gisement solaire sur un lieu donné. Il est préférable d'estimer la quantité du flux solaire et de généraliser le modèle pour tout les régions ayant des conditions similaire. Plusieurs méthodes existent pour estimer de manière opérationnelle le rayonnement solaire au sol à partir de l'appelle de plusieurs modèles physiques, statistiques, intelligence artificielle et par la logique Floue ...etc.

Le but de la présente thèse est la détermination du gisement solaire à travers l'étude, modélisation et simulation en particulier les modèles physique, méthodes de l'intelligence artificielle et le traitement des images satellite, la création et développement d'un système d'information géographique (SIG) permettant l'intégration des données et l'estimation du flux solaire sur les cartes géographiques. Ensuite évalue la performance de ces modèles en se basant sur la validation des résultats par les données expérimentales, qui sont essentiels pour la conception et le dimensionnement de tout système utilisent l'énergie solaire, nous utiliserons des données et images réceptionnées de Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar. Les résultats d'estimation des valeurs horaires et journalières du rayonnement solaire de certains modèles sont très satisfaisants.

**Mots clés :** Gisement solaire, Intelligence artificielle, Images satellitaire, Réseaux de neurone, CSP, SIG.

## ABSTRACT

The solar field knowledge and the radiation received on the ground is a very important task for both the sizing and the design of solar systems in different fields such as the production of electricity, heat ... etc. In addition, the solar radiation measurements of solar radiation are limited to only a few areas in Algeria. Thus, theoretical approaches are used to evaluate the solar deposit at a given location. It is most excellent to estimate the amount of solar flux and generalize the model for all regions at similar conditions. Several methods exist to estimate and predict operationally ground solar radiation from the call of several physical models, statistics, and artificial intelligence and by fuzzy logic and others.

The aim of the present thesis is the determination of the solar field through the study, modeling and simulation especially the physical models, methods of artificial intelligence and the processing of satellite images, the creation and development of a geographical information system (GIS) solar allowing the integration of the data and the estimation of the solar flux on the geographical map. Then evaluate the performance of these models based on the validation of results by experimental data, which are essential for the design and sizing of any system using solar energy, we will use data and images received from Renewable Energy Research Unit in Saharan Region of Adrar. The results of the hourly and daily solar radiation estimations of some models are satisfactory.

**Key words:** Solar field, Artificial intelligence, Satellite images, Neural networks, CSP, GIS.

## المخلص

تعتبر معرفة مجال الطاقة الشمسية والإشعاع الذي يتم تلقيه على الأرض مهمة للغاية في تحديد تصميم وتثبيت الأنظمة الشمسية في مجالات مختلفة مثل إنتاج الكهرباء والتسخين الحراري وغيرها، من جهة أخرى إن قياسات الإشعاع الشمسي تقتصر على مناطق قليلة فقط في الجزائر، وبالتالي يتم استخدام النهج النظرية لتقييم الإشعاع الشمسي في موقع معين، حيث من الأفضل تقدير كمية الإشعاع الشمسي وتعميم النموذج في جميع المناطق في ظروف مماثلة، توجد عدة طرق لتقدير وتوقع الإشعاع الشمسي الأرضي من خلال إستخدام العديد من النماذج الفيزيائية، الذكاء الاصطناعي والمنطق الضبابي وغيرها.

الغرض من هذه الأطروحة هو تحديد المجال الشمسي من خلال الدراسة، النمذجة والمحاكاة خاصة النماذج الفيزيائية، طرق الذكاء الاصطناعي ومعالجة صور الأقمار الصناعية وإنشاء وتطوير نظام معلومات جغرافي الذي يسمح بدمج البيانات وتقدير التدفق الشمسي على الخريطة الجغرافية، ثم تقييم أداء هذه النماذج بناء على التحقق من صحة النتائج الضرورية مقارنة بالبيانات التجريبية، بغية تصميم وتثبيت أي نظام يستخدم الطاقة الشمسية، سوف نستخدم البيانات والصور الواردة من وحدة الطاقة المتجددة بأدرار، لقد وجد أن نتائج تقدير الإشعاع الشمسي الساعي واليومي لبعض النماذج المدروسة جد مرضية.

**الكلمات المفتاحية:** الإشعاع الشمسي، الذكاء الاصطناعي، صور الأقمار الصناعية، الشبكات العصبية، التسخين الحراري.