

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT



Faculté de Technologie

Département d'Électronique

Mémoire de Magister

ÉCOLE DOCTORALE: ÉNERGIE RENOUVELABLE

Présentée par :

Nedjma Abdelhafidi

Estimation du Gisement Solaire en Algérie à partir des Données de Satellite Météosat

Soutenue le 06/03/2014

Devant le jury

JURY

Mme.Fatima Zohra Chouireb	MCA	U. LAGHOUAT	Présidente
M. Ali Cheknane	Pr	U. LAGHOUAT	Encadreur
Mme. Moktaria Mesri	MAA	U. LAGHOUAT	Co-Encadreur
M. Abderahmane Hamidat	MR	C. CDER	Examinateur
M. Abdelkrim Tahari	MCB	U. LAGHOUAT	Examinateur
Mme. Fatiha Benkouider	MAA	U. LAGHOUAT	Examinatrice

Remerciement

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donner le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué au département d'électronique, faculté des Technologie, sous la direction de Mr CHEKNANE Ali, Professeur à l'Université de Laghouat et Mme MERAD MESRI Mokhtaria Maitre assistant à l'Université de Laghouat.

Je leur exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir encadrer.

J'exprime mes sincères remerciements à Mme CHOUIREB Fatima., Docteur à l'université de Laghouat, d'avoir accepter de présider le Jury de cette thèse.

Je remercie sincèrement Mr. TAHARI Abdelkrim, Docteur à université de Laghouat, d'avoir accepter de faire partie du Jury.

Je remercie vivement Mr HAMIDAT Abderrahmane Maître de recherche au centre des énergies renouvelables CDER d'avoir accepter de faire partie du Jury.

J'adresse également Mme. BENKOUIDER Fatiha, Maitre assistant à université de Laghouat, d'avoir accepter de faire partie du Jury.

J'adresse mes grands remerciements à monsieur BACHARI Nour EL Islam professeur à l'USTHB, qui m'a donnés plus des informations sur mon domaine de travail.

J'adresse également mes remerciements à Mr HAURANT Pierrick docteur à l'université de Corse, pour ces aides et ces conseils judicieux sur mon travail.

Je remercie aussi tous les enseignants qui me contribuer à mon travail, surtout Mr ZIANI Mohamed charge de cours à l'université de Laghouat.

Je remercie infiniment ma sœur ABDELHAFIDI Zohra charge de cours à l'Université de Laghouat

Enfin, j'exprime mes vives reconnaissances à tous les étudiants de Magister.

Résumé, Abstract

Résumé

Une meilleure méthode a été développée pour calculer la base de données de la climatologie du rayonnement solaire en Algérie. Elle utilise des données provenant des satellites météorologiques Meteosat prise dans deux canaux (visible et infrarouge). Cette méthode est basée sur la détermination de l'indice d'enneuagement puis l'indice de ciel clair pour différents états du ciel à savoir : clair, partiellement couvert et totalement couvert, pour ensuite calculer le rayonnement solaire global incident sur la surface de la Terre. Les valeurs d'irradiations solaires globales estimées sont comparées aux valeurs mesurées effectuées dans une seule station météorologique (Oran, 35° 38'N, 00° 36'W) durant le mois d'Avril 1997. En particulier, l'erreur relative moyenne est d'environ 3% à l'échelle horaire et 4% à l'échelle quotidienne. Les résultats obtenus montrent la validité de notre méthode. Elle peut être utilisée pour le calcul de l'irradiation horaire et journalier sur les zones dans un environnement tropical.

Mots clés : Images satellite Météosat, Etalonnage, Indice d'enneuagement, Indice de ciel clair, Irradiation solaire globale.

Abstract

A better method is developed to compute a climatology database of solar radiation over Algeria. It makes use of data from the meteorological satellites Meteosat collected in two channels (Visible and Infrared). Our method is based on a cloudiness index and clearness index computing for the different sky states namely clear, partly covered and overcast in order to calculate the global solar radiation incident on the surface. The estimated global solar values are compared to the ground measurement values performed in one meteorological station (Oran, 35°38'N, 00°36'W) during April 1997. In particular, the relative mean error is about 3 % on an hourly basis and 4% on a daily basis. The obtained results show the validity of our method. It can be used for calculation of hourly and daily irradiation over areas in a tropical environment.

Keywords : Satellite Meteosat images, Calibration, Cloud-cover index, Clearness index, Global solar irradiation.

Nomenclature

Grandeurs utilisées pour décrire le temps

D_j	Durée du jour
h	Heure
j	Numéro du jour de l'année, qui varie de 1 (1 ^{er} janvier) à 365 (31 décembre) ou 366 pour une année bissextile
j_r	Angle journalier
TSM	Temps solaire moyen
TSV	Temps solaire vrai : temps défini selon les coordonnées vraies du Soleil, exprimé en heure
TU	Temps universel : temps solaire moyen du méridien de Greenwich

Grandeurs utilisées pour décrire l'espace géographique

λ	Longitude : L'angle formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu
ϕ	Latitude : L'angle que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial
z	Altitude du site : La distance verticale exprimée en mètre, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence

Grandeurs utilisées pour la position relative Terre - Soleil et angles

δ	Déclinaison solaire : angle que fait, la direction du Soleil avec le plan équatorial de la Terre
ϵ	Excentricité : correction relative de la distance Terre - Soleil (sans unité)
ω	Angle horaire : angle formé par le plan méridien passant par le centre du Soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV
h_l, h_c	Respectivement angle horaire correspondant au lever, coucher du Soleil
h_s, θ_v	Hauteur angulaire du Soleil et du satellite : angle que fait, le plan horizontal avec la direction du Soleil ou satellite
r, e, r_0	Distance Terre - Soleil, moyenne annuelle de la distance Terre -Soleil

Autres angles et quantités associées

Ω	Angle solide analogue tridimensionnel de l'angle plan. Il mesure la grandeur apparente sous laquelle un objet apparaît à un observateur, exprimée en $[sr]$
ϕ_s et ϕ_v	Angle azimutal solaire, du visé : angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du Soleil avec la direction du sud
θ_s et θ_v	Angle zénithal du Soleil et du visé : angle entre le Soleil ou bien satellite et la direction perpendiculaire à la surface de la Terre (Zénith) au point de vue

Grandeurs utilisées pour décrire les constituants atmosphériques

m_a	Masse optique : la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer
δ_m, δ_i	Épaisseurs optiques moyennes pour une atmosphère réelle et idéale
T_L	Trouble de Linke : rapport entre l'extinction du rayonnement directe traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence
T_m, T_i	Facteurs de transmission pour une atmosphère réelle et idéale

Grandeurs radiométrique associées au rayonnement

Φ	Flux énergétique d'une source de rayonnement, exprimé en $[W]$
B_0	Offset du détecteur du satellite
B_i	Image de brillance du pixel (compte numérique) : Propriété d'une surface de remettre de la réflexion spéculaire. Cette propriété est liée à la macro géométrie de l'état de surface (lisse ou rugueux)
B_{ia}	Composante atmosphérique
B_{ib}	Composante de base
B_c, B_n	Respectivement image de brillance minimale, maximale
C_s	Constante de calibration du détecteur $[W/m^2 sr]$
E_{oh}	Éclairement au sommet de l'atmosphère sur un plan horizontal
G, I et D	Désignent respectivement l'éclairement global, direct et diffus, exprimé en $[W/m^2]$
G_{skc}, I_{skc} et D_{skc}	Désignent respectivement l'éclairement global, direct et diffus en ciel clair, exprimé en $[W/m^2]$
I	Intensité lumineuse d'une source ponctuelle, exprimé en $[W/Sr]$
I_0	Constante solaire : est le flux énergétique reçu par une surface unité reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. Dans notre cas la valeur qui a été retenue est $I_0 = 1367 W/m^2$.
I_{0met}	Constant solaire dans le canal visible
l	Luminance (radiance), exprimé en $[W/m^2 Sr]$
M	Éxitance d'une source étendue, exprimé en $[W/m^2]$

Grandeurs utilisées pour la propagation du rayonnement électromagnétique

K_t	Taux de la transmittance atmosphérique total (indice de clarté) : rapport entre l'éclairement observé et l'éclairement incident au sommet de l'atmosphère
ρ	Albédo planétaire (la réflectance vue par le satellite) : Fraction d'un rayonnement incidente diffusé ou réfléchi
ρ_M	Coefficient de réflexion par ciel nuageux
ρ_m	Coefficient de réflexion par ciel clair
ρ_s, ρ_n	Albédo de la surface, albédo du nuage
ρ_{atm}	Réflectance intrinsèque de l'atmosphère
ρ_{eff}	Albédo efficace
ρ_{ib}	Coefficient de réflexion de base
τ_{clair} et τ_{cloud}	Respectivement la transmittances claire et nuageuse
K	Anisotropie du diffus
K_c	Indice de ciel clair : rapport entre l'éclairement observé et l'éclairement qu'on devrait obtenir si le ciel était clair
n	Indice d'ennuagement : taux de la couverture par nuage
s	Albédo sphérique : la diffusion de la radiation réfléchi par l'atmosphère vers le sol
T_s, T_v	Taux de la transmittance total après diffusion dans les deux trajets (Soleil - surface et surface terrestre - satellite)

Grandeurs associe au traitement d'images

COR	Coefficient de corrélation entre deux images
COV, VAR	Respectivement la covariance, variance entre deux images
IM	Images entrées
MOY	Image moyenne
V, VL	Respectivement l'image variance, variance locale

Glossaire

Bande spectral	Étendue de longueur d'onde à laquelle est sensible un capteur de satellite
Capteur	Dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable
Cartographie	L'art de la science qui s'occupe de la création de cartes
CDER	Centre des Énergies Renouvelables (Alger)
ESA	(European Space Agency) : Agence Spatiale Européenne
ESRA	(European Solar Radiation Atlas) : Modèle d'estimation du rayonnement solaire en ciel clair
EUMETSAT	(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) : Organisation européenne chargée de l'établissement et de l'exploitation de systèmes opérationnels de satellites météorologiques
géostationnaire	Satellite dont la vitesse de révolution est égale à la vitesse angulaire de la Terre : il apparaît fixe dans le ciel
HELIOSAT	Modèle d'estimation du rayonnement solaire par traitement d'image satellite
Infrarouge	Domaine du spectre électromagnétique correspondant à des rayonnements de longueurs d'onde supérieures à celles de la lumière visible et inférieures à celles du domaine submillimétrique (micro-ondes)
METEOSAT	Météorological Satellite.
MPG	Météosat première génération
MSG	Météosat seconde génération
MTG	Météosat troisième génération
Méridien	Plan passant par le pôle céleste et par le zénith
NASA	National Aeronautics and Space Administration
O.N.M	Office National de la Météorologie.
Orbite	Trajectoire d'un corps qui se déplace autour d'un autre grâce à la gravitation.
Pixel	C'est la plus petite surface homogène d'une image numérique
Polaire	L'orbite est polaire quand le satellite passe au-dessus des pôles N et S (inclinaison de 90°)
Radar	(Radio Détection And Ranging) Détection et télémétrie par radio
Satellite	Objet orbitant autour d'un plus grand objet comme une planète
SBDART	(Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) : modèle de transfert radiatif
SoDa	Solar irradiation Database
SOLARMET	(Solar Radiation METosat) modèle d'estimation par traitement d'image satellite
TIFF	(Tagged-Image File Format) : Format d'image.
Télédétection	La mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié

Valeur radiométrique	Valeur d'un pixel correspondant à la numérisation de la luminance selon un codage sur 8 bits et selon un pas d'échantillonnage en lignes et en colonnes
Vapeur d'eau	Bande spectrale de 5,5 à 7,1 μ m où l'absorption atmosphérique par l'eau est très forte. Ce canal ne permet pas d'observer la surface de la Terre, mais les grandes masses nuageuses
Variance	Moyen des carrés des écart d'une grandeur par rapport à la valeur moyenne, caractérisant sa fluctuation ou sa dispersion
Visible	La lumière visible, appelée aussi spectre visible ou spectre optique est la partie du spectre électromagnétique qui est visible pour l'œil humain
WEFAX	Format des images METEOSAT et NOAA reçues par les petites stations
Zénith	Point de la voûte céleste situé directement au-dessus de notre tête

Table des matières

Introduction générale	1
1 Généralités sur le rayonnement solaire	3
1 Introduction	4
2 La source principale : le Soleil	4
2.1 Position du Soleil par rapport à la Terre	4
2.1.1 Coordonnées géographiques	5
2.2 Distance Terre -Soleil	5
2.3 Paramètres de temps	6
2.4 Trajectoire apparente du soleil	6
2.4.1 Coordonnées équatoriales	7
2.4.2 Coordonnées horizontales	7
3 Interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère	9
3.1 Paramètres atmosphériques	9
3.1.1 Masse atmosphérique	9
3.1.2 Épaisseur optique de l'atmosphère	9
3.1.3 Facteur de trouble de Linke	10
4 Composantes du rayonnement solaire	10
5 Mesure du rayonnement	10
6 Zone d'étude et données utilisés	11
6.1 Zone d'étude	11
6.2 Réseau de stations météorologiques algérienne	12
6.3 Données utilisées	13
6.3.1 Données satellitaires	13
6.3.2 Données au sol	13
7 Conclusion	13
2 Acquisition, Transmission et Exploitation des Données Satellitaires	14
1 Introduction	15
2 Observation météorologique par satellites	15
2.1 Définition de la télédétection	15
2.2 Principe de base de la télédétection	15

2.3	Techniques de la télédétection	16
2.3.1	Télédétection passive	16
2.3.2	Télédétection active	16
3	Satellites d'observation météorologique	16
3.1	Satellites à défilement	17
3.2	Satellites géostationnaires	17
4	Satellite Météosat	17
4.1	Généralités	17
4.2	Satellite Météosat MPG	18
4.3	Imagerie Météosat	19
5	Images satellitaires, notions et prétraitements de base	20
5.1	Constitution des images	20
5.2	Codage des données de la banque des images utilisées	20
5.3	Opérations sur les images METEOSAT	21
5.3.1	Analyse algébrique	21
5.3.2	Variance	22
5.3.3	Corrélation	23
5.3.4	Brillance satellitaire	23
6	Conclusion	26
3	Approche satellitaire	27
1	Introduction	28
2	Bases physiques utiles pour les modèles satellitaire	28
3	Approches satellitaire	29
3.1	Modèle inverse	29
3.1.1	Modèle statistique	29
3.1.2	Modèle physique	30
3.1.3	Modèle analytique	30
3.2	Modèle directe	30
4	Présentation de quelques modèles issus de la littérature	30
5	Prise en compte de l'ennuagement	35
5.1	Conversion de l'image (constituée de comptes numériques) en indice d'ennuagement	36
5.2	Conversion de l'indice d'ennuagement en éclairement	36
6	Présentation des modèles adoptés	37
6.1	Modèle de GISTEL	37
6.1.1	Historique du modèle	37
6.1.2	Hypothèses du modèle	38
6.1.3	Principe de base du modèle	38
6.1.4	Formulation du modèle GISTEL	39
6.1.4.1	Brillance instantanée	39
6.1.4.2	Coefficients de réflexion de base	39
6.1.4.3	Indice de ciel clair	40
6.1.4.4	Éclairement solaire global	40
6.2	Modèle de BACHARI	40
6.2.1	Définition du modèle	40
6.2.2	Principe de base du modèle	41
6.2.3	Formulation du modèle de BACHARI	41

6.2.3.1	Indice d'ennuagement	41
6.2.3.2	Calcul de l'albédo de la surface	41
6.2.3.3	Calcul de l'albédo du nuage	42
6.2.3.4	Composants des éclairements	42
6.3	Modèle d'HELIOSAT-2	43
6.3.1	Définition du modèle	43
6.3.2	Principe de base du modèle	43
6.3.3	Formulation du modèle HELIOSAT-2	43
6.3.3.1	Indice d'ennuagement	43
6.3.3.2	Albédo apparente	44
6.3.3.3	Albédo apparent du sol	44
6.3.3.4	Albédo apparente des nuages	44
6.3.3.5	Indice du ciel clair	45
6.3.3.6	Éclairement global	45
7	Conclusion	45
4	Application des modèles d'estimation du rayonnement solaire à partir des images satellites	46
1	Principe	47
2	Méthodologie du travail	47
2.1	Paramètres d'entrées	48
2.1.1	Trouble de Linke	48
2.2	Modèle d'exploitation des données satellitaires	49
2.2.1	Extraction de la zone d'étude	49
2.2.2	Détermination du premier point de l'image	49
2.2.3	Localisation des sites d'études sur l'image satellitaire	49
2.2.4	Conversion des comptes numériques en radiance	50
2.3	Modèle astronomique	51
2.3.1	Détermination des positions relatives du Soleil et du satellite	51
2.4	Modèle synthétique	51
2.4.1	Estimation de l'éclairement solaire en ciel clair	51
2.4.1.1	Influence du trouble du Linke	52
2.5	Modèle de sortie	53
2.5.1	Présentations du modèle proposé	53
2.5.1.1	Indice d'ennuagement	54
2.5.1.2	Indice de ciel clair	54
2.5.1.3	Éclairement solaire global	54
2.5.2	Application du modèle proposé aux images Météosat	55
2.5.2.1	Obtention des images références ciel clair et ciel nuageux	55
2.5.2.2	Calcul de l'indice d'ennuagement	56
2.5.2.3	Calcul de l'indice de ciel clair	58
3	Présentations des résultats	59
3.1	Estimations des radiances	60
3.2	Estimations des radiances journalières moyennes	61
3.3	Estimation d'irradiation horaire	61
3.4	Estimation d'irradiation journalière	62
4	Conclusion	63

5	Analyse de la performance de notre modèle GISMOD	64
1	Introduction	65
2	Étude comparative entre les modèles adoptées	65
2.1	Comparaison entre l'irradiation globale estimée par les modèles et celle mesurée	65
2.2	Comparaisons entre irradianations globales estimées et irradianations issues de la base de données de la NASA	67
2.3	Validation du modèle proposé	67
3	Conclusion	70
	Conclusion Générale	71
	Annexe A	79
1	Grandeur radiométrique associe au rayonnement	79
	Annexe B	81
1	Interaction de rayonnement par l'atmosphère	81
	Annexe C	82
1	Organigramme qui fait la conversion des coordonnées	82
	Annexe D	85
1	Estimation de l'éclairement solaire global en ciel clair	85
1.1	Modèle de l'O.M.M	85
1.2	Modèle de l'E.S.R.A	86
	Annexe E	87
1	Méthode d'interpolation	87
	Annexe F	88
1	Interface graphique	88
	Annexe G	92
1	Indicateur statistique	92

Table des figures

1.1	Mouvement de rotation de la Terre (d'après Perrin et Vauge [7]	4
1.2	Coordonnées géographiques.	5
1.3	Représentation de la variation de l'équation du temps au cours d'une année.	6
1.4	Trajectoire du soleil.	7
1.5	Représentation de la variation de la déclinaison du Soleil au cours d'une année.	7
1.6	Représentation de la variation de la hauteur du Soleil au cours d'une journée.	8
1.7	Représentation de la variation de l'azimut du Soleil au cours d'une journée.	8
1.8	Interaction du rayonnement solaire avec les constituants de l'atmosphère[10].	9
1.9	Pyrhéliomètre Eppley.	11
1.10	Pyranomètre équipé d'un pare-soleil.	11
1.11	Répartition géographique des stations météorologiques algériennes.	12
1.12	Image visible	13
1.13	Image infrarouge	13
2.1	Le principe de base de la télédétection	15
2.2	Télédétection passive	16
2.3	Télédétection active	16
2.4	a) Orbite polaire, b) Orbite géostationnaire.	17
2.5	Météosat de première génération [w5].	18
2.6	Exemple d'image prise dans le visible par le satellite Météosat première génération le 3ème avril 1997 à 9h00.	20
2.7	Deux images brutes prises à 9h00.	21
2.8	Images résultante à partir des différentes opérations algébriques.	21
2.9	Images résultante à partir des différentes opérations algébriques.	22
2.10	a) Image satellitaire brut. b) Image variance.	23
2.11	Procédure de calcul de la brillance maximale des images correspondant à une même heure. . . .	24
2.12	Trois images de brillance minimales pour les trois heures de prise de vues (à 9h00, à 12h00 et à 15h00) dans le canal visible.	24
2.13	Trois images de brillance minimales pour les trois heures de prise de vues (à 9h00, à 12h00 et à 15h00) dans le canal visible.	25
2.14	Trois images de brillance maximales pour les trois heures de prise de vues (à 9h00, à 12h00 et à 15h00) dans le canal infrarouge.	25

2.15	Trois images de brillance minimales pour les trois heures de prise de vues (à 9h00, à 12h00 et à 15h00) dans le canal infrarouge.	25
3.1	Interaction du rayonnement solaire par l'atmosphère.	28
3.2	Procédure d'estimation de l'éclairement solaire global au sol (modèle de GISTEL)	38
3.3	Procédure d'estimation de l'irradiation solaire globale au sol (modèle de Bachari et <i>al.</i>)	41
3.4	Procédure d'estimation de l'éclairement solaire global au sol (modèle d'HELIOSAT-2).	43
4.1	Organigramme du travail.	48
4.2	Localisation des sites d'étude sur l'image satellitaire.	50
4.3	Variation de la hauteur du Soleil pendant une journée typique pour les différents sites d'étude (le 7 avril)	51
4.4	Influence du trouble de Linke sur les diagrammes de rayonnements.	52
4.5	Évaluation de l'éclairement solaire pour la station d'Oran le 12 avril 1997.	53
4.6	Relation entre l'indice d'ennuagement et l'indice de ciel clair.	54
4.7	Images références dans le canal visible, ciel clair à gauche, ciel nuageux à droite.	55
4.8	Images références dans le canal infrarouge ciel clair à gauche, ciel nuageux à droite.	55
4.9	Image brutes prises le même jour et la même heure dans les deux canaux à 12h00 (le 07/04/1997).	56
4.10	Image de l'albédo des nuages le 7 avril (à gauche) et image de l'albédo du sol (à droite).	56
4.11	Image ennuagement (à gauche), Image ennuagement corrigée (à droite).	57
4.12	Indice d'ennuagement pour chaque site d'études.	58
4.13	Schéma décrivant la procédure de la validation d'un modèle.	60
4.14	Évaluation des radiances journalières moyennes pour chaque site d'étude.	61
4.15	Évaluation d'irradiations horaires pour les sites d'études, le 10 avril 1997.	62
4.16	Évaluation d'irradiations horaires pour les sites d'études, le 10 avril 1997.	62
4.17	Évaluation d'irradiations journalières pour les sites d'études	63
5.1	Irradiations horaires estimées en fonction des mesures mesurées sur le site d'Oran.	68
5.2	Irradiations horaires estimées en fonction d'irradiations journalières mesurées sur le site d'Oran.	68
5.3	Irradiations journalières estimées en fonction d'irradiations extraites par le NASA sur le site d'Oran.	69
5.4	Variation des irradiations mesurées au sol et estimées à partir des données satellites pour le mois d'avril 1997.	70
A.1	Intensité lumineuse.	79
A.2	Emittance énergétique.	80
A.3	Luminance énergétique.	80
F.1	Page d'accueil.	88
F.2	Menu principale.	89
F.3	Barre à outils figure.	90
F.4	Boite de calendrier.	90
F.5	Boite de convertisseur.	91
F.6	Boite de choix de l'extension de l'image.	91

Liste des tableaux

1.1	Stations automatiques qui assurent le rayonnement.	12
1.2	Caractéristiques des images utilisées.	13
2.1	Trois canaux de l'imageur Severi de MPG et leurs utilisations.	19
2.2	Radiométrie en quelques points.	25
2.3	Radiométrie du sol, mer et nuages [19]	26
3.1	Constantes solaires par les différentes versions du Météosat première génération [22].	29
3.2	État de l'art des modèles satellitaire	32
3.3	Avantages et inconvénients des modèles inverses [44].	35
4.1	Trouble de Linke	49
4.2	Correspondance entre les coordonnées géographiques et les coordonnées de l'image.	50
4.3	Valeurs des albédos des nuages moyens et les albédos du sol.	57
4.4	Classification de l'état du ciel pour les différents sites d'études.	59
4.5	Radiances estimées au cours de la période d'étude pour les différents sites (en W/m^2) (le 7 ^{ème} jour de la séquence).	60
5.1	Erreurs obtenus par comparaisons entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées au sol. . .	69
5.2	Erreurs obtenus à partir d'une comparaison entre les valeurs estimées et les valeurs extraites de la NASA.	69

Introduction générale

LE gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique.

Pour connaître le gisement solaire, il existe trois sources d'information : les mesures de rayonnement effectuées dans les stations actinométriques, les observations des stations météorologiques et l'imagerie satellitaires.

L'Algérie est un pays vaste dont la topographie est accidentée et le climat variant du Sud vers le Nord. Son réseau de mesures radiométriques est de faible densité, ce qui est insuffisant pour tenir compte des variations radiatives à petite échelle [1], et ne permet donc pas une cartographie précise du potentiel énergétique. Les inconvénients d'un réseau de stations météorologiques peu fourni peuvent être partiellement compensés par l'utilisation d'observations satellite. En effet, un satellite météorologique prend régulièrement des images de la surface terrestre et de son atmosphère. C'est ainsi que depuis 1979, des images haute résolution ont été fournies quotidiennement toutes les demi-heures, par des satellites géostationnaires tels que Météosat (au-dessus de l'Afrique et de l'Europe) ou Goes (au-dessus de l'Afrique) ont permis de cartographier le potentiel solaire de nombreuses régions.

Les images satellites couvrent en permanence tout un territoire. Mais ne permettent qu'une appréciation qualitative des états d'ensoleillement de celui-ci à partir de comptes numériques caractérisant le rayonnement réfléchi par le système sol - atmosphère. D'où, la nécessité d'associer ces images aux mesures au sol pour ensuite les calibrer en termes d'intensité de rayonnement solaire.

D'une façon générale, l'approche satellitaire s'est traduite par un ensemble des modèles pouvant être classés suivant trois grandes catégories : les modèles statistiques, physiques et analytiques. Les modèles statistiques sont essentiellement basés sur les équations de régression qui permettent d'étalonner la brillance des pixels de l'image en terme d'intensité de radiation solaire, permettant ensuite d'évaluer le flux d'irradiation solaire arrivant au sol en chaque point. Les modèles physiques et analytiques sont basés sur la résolution de l'équation de transfert ra-

diatif. Ces derniers modèles nécessitent des calculs lourds et complexes.

Plusieurs travaux ont montré la possibilité d'estimer le rayonnement solaire global d'une surface horizontale au sol à partir des mesures satellitaires [2][3][4][5]. Ces méthodes ont pour principe général commun de considérer que le rayonnement surfacique dérive du rayonnement hors atmosphère ou du rayonnement en conditions de ciel clair modulé par des paramètres rendant compte des conditions atmosphériques.

Dans cette étude, nous avons mis en œuvre trois modèles pour évaluer le gisement solaire en Algérie à l'échelle horaire et journalier par traitement des images satellitaires. Ces modèles sont basés d'une part sur la détermination de l'indice d'ennuagement et d'autre part sur les formules des éclairagements solaires estimées en ciel clair développées par l'O.M.M ou E.S.R.A. Cette étude a donné naissance à un nouveau modèle (appelé GISMOD) dont l'objet est de réduire les erreurs moyens pour une meilleure estimation de rayonnement solaire global.

Pour ce faire, le premier chapitre de ce manuscrit est consacré à une description des caractéristiques du rayonnement solaire et de son interaction avec l'atmosphère. En outre, nous y présenterons la base des données utilisée dans notre travail ainsi que les réseaux météorologiques et la zone d'étude. Le second chapitre de ce mémoire est un aperçu général sur la télédétection, les caractéristiques du satellite Météosat et les notions de base sur les images et leur traitement. Le chapitre trois portera sur une étude descriptive des approches satellites issues de la littérature. Le quatrième chapitre est dédié à l'application des modèles et l'estimation du rayonnement solaire global horaire et journalier au sol. Ainsi que la présentation des résultats et les discussions que nous avons obtenus.

Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale et des perspectives portant sur le présent travail.

Généralités sur le rayonnement solaire

LE rayonnement solaire au niveau du sol est formé principalement du rayonnement direct et du rayonnement diffus. L'ensemble forme le rayonnement global. L'exploitation de cette énergie solaire dans tout secteur d'activité nécessite la connaissance exacte de ses caractéristiques. Pourtant en Algérie, où cette ressource est très abondante, les réseaux de stations de mesures directes du rayonnement solaire présentent une densité encore très faible, compte tenu de leurs coûts et surtout de la complexité des manipulations.

1 Introduction

Le Soleil est l'origine principale de l'énergie disponible sur Terre. Ceci inclut l'énergie thermique directe, l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique.

La connaissance de la position du Soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée [6]. Les heures du lever et du coucher, ainsi que la trajectoire du Soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer des grandeurs, telles que la durée maximale d'insolation ou l'éclairement hors atmosphère.

Lors de sa traversée dans l'atmosphère, le rayonnement solaire est atténué par des phénomènes d'absorption et de diffusion par les molécules gazeuses, la vapeur d'eau et les aérosols. Elle varie aussi avec la longueur de la trajectoire des rayons solaires à travers l'atmosphère. La longueur de cette trajectoire est caractérisée par la masse atmosphérique.

Dans ce chapitre, nous présenterons une simple étude concernant les caractéristiques du rayonnement solaire et leur mécanisme d'interaction avec le système Terre -atmosphère. Nous mettrons l'accent aussi sur la zone d'étude et la base de données utilisées au cours de notre travail.

2 La source principale : le Soleil

Le Soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km. Le Soleil est composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium.

2.1 Position du Soleil par rapport à la Terre

La Terre décrit autour du Soleil une orbite elliptique d'une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique (Figure (1.1)).

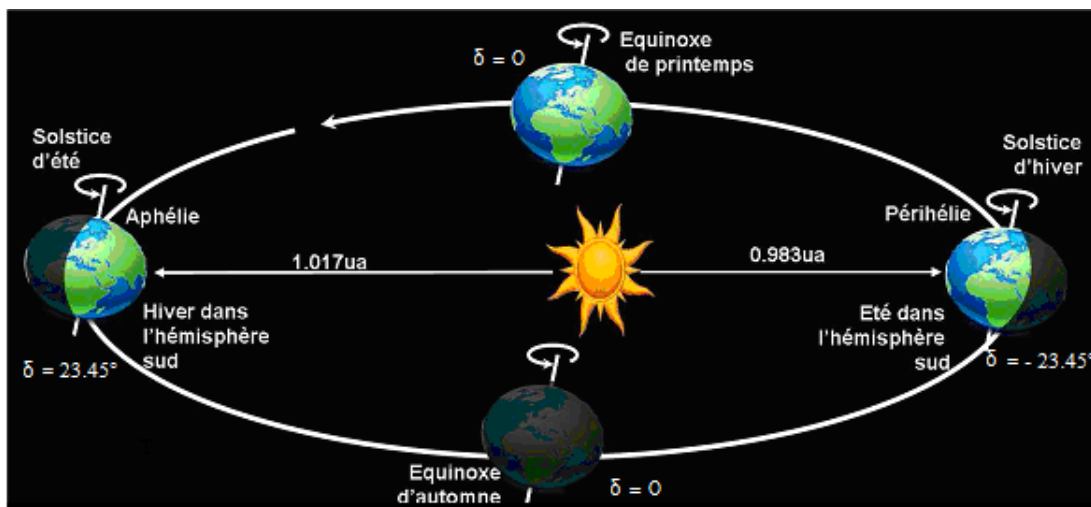


Figure 1.1 – Mouvement de rotation de la Terre (d'après Perrin et Vauge [7])

La Terre subie deux types de déplacements :

- La révolution de la Terre autour du Soleil est à l'origine des saisons.
- La rotation de la Terre sur elle-même autour de l'axe des pôles (24 h), qui est à l'origine de la succession des jours et des nuits.

Il est possible de calculer la position du Soleil sur la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la Terre.

2.1.1 Coordonnées géographiques

Pour repérer la position d'un lieu sur la Terre, on définit les grandeurs suivantes (Figure 1.2) :

- **La latitude ϕ** : est l'angle que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial. Elle varie entre valeur de 0° à l'équateur à 90° aux pôles.
- **La longitude λ** : est la distance angulaire entre le méridien associé d'un point situé à la surface de la Terre et le méridien d'origine "Greenwich". Elle est toujours comprise entre 0° et 180° .
- **L'altitude du site z** : est l'élévation verticale d'un lieu ou d'un objet par rapport à un niveau de base. C'est une des composantes géographiques qui explique la répartition de la vie sur Terre.

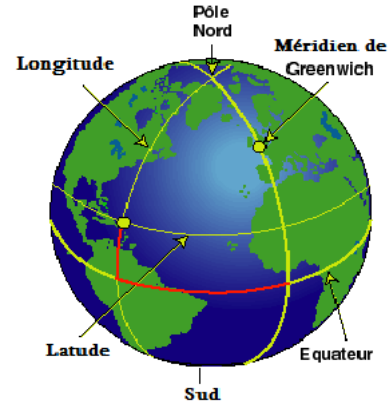


Figure 1.2 – Coordonnées géographiques.

2.2 Distance Terre -Soleil

La distance Terre-Soleil varie au cours de l'année (Figure 1.1)). Elle vaut en moyenne annuelle 1ua (unité atmosphérique), soit 149598103 km. Elle atteint son maximum peu après le solstice d'été (1,017ua) et le minimum au solstice d'hiver (0,983ua). Elle dépend du numéro du jour j de l'année, qui varie de 1 (1^{er} janvier) à 365 (31 décembre) ou 366 pour une année bissextile. Pour une année quelconque, l'angle journalier jr , en radian, est défini comme suit [8] :

$$jr = \frac{2\pi \cdot j}{365.2422} \quad (1.1)$$

L'angle journalier est quasi-nul le 1^{er} janvier (0,0172), égal à π le 1^{er} juillet et à 2π le 31 décembre. La distance Terre-Soleil est donnée par :

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + \epsilon \quad (1.2)$$

avec r_0 et r sont respectivement la distance Terre-soleil moyen et actuel. La correction relative ϵ est peut être exprimé par :

$$\epsilon = 0.0344. \cos(jr - 0.049) \quad (1.3)$$

2.3 Paramètres de temps

La rotation régulière de la Terre sur elle-même autour de l'axe des pôles détermine la succession des jours et des nuits. Une rotation complète de la Terre correspond à 24 h, en moyenne. Le temps ainsi défini est appelé temps solaire moyen et noté (TSM). Le temps est exprimé généralement en heure. Chaque heure correspond à un écart angulaire de 15° . La référence de temps est le temps universel (TU), qui est le temps (TSM) à 0° de longitude. Pour une longitude donnée, TU est lié à TSM par :

$$TSM = TU + \frac{\lambda}{15} \quad (1.4)$$

La rotation de la Terre autour du Soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai TSV qui donnée par la relation suivante :

$$TSV = TSM + Et \quad (1.5)$$

où Et est l'équation du temps. Le temps Et est varié de -14,5 minutes (du 10 au 15 Février) à +16,5 minute (du 25 au 30 Octobre) (Figure (1.3)). Une bonne approximation du temps Et est donnée par l'expression suivante [8].

$$Et = -0.128 \sin[j - 0.04887] - 0.165 \sin(2.j + 0.34383) \quad (1.6)$$

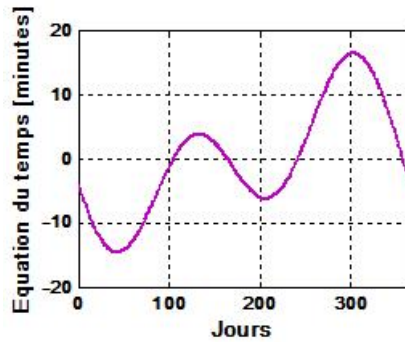


Figure 1.3 – Représentation de la variation de l'équation du temps au cours d'une année.

2.4 Trajectoire apparente du soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le Soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend des coordonnées géographiques du lieu où il se trouve (Figure (1.4)).

Le position du Soleil dans la voûte céleste est repéré à tout instant de la journée par deux systèmes des coordonnées.

2.4.1 Coordonnées équatoriales

Ce sont des coordonnées 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 les deux angles qui sont :

- **L'angle horaire**, noté ω , étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du Soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV :

$$\omega = 15(12 - TSV) \quad (1.7)$$

- **La déclinaison du Soleil** δ est l'angle que fait, le plan de l'écliptique avec le plan équatorial de la Terre [9] :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left[\frac{360}{365}(j + 284)\right] \quad (1.8)$$

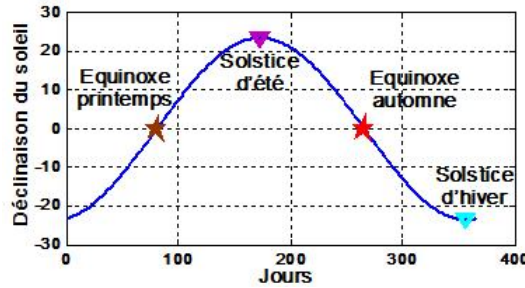


Figure 1.5 – Représentation de la variation de la déclinaison du Soleil au cours d'une année.

La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année (Figure (1.5)) Elle est nulle aux équinoxes ($j = 80$ et 263) et varie de $-23,44^\circ$ au solstice d'hiver ($j = 354$) à $+23,44^\circ$ au solstice d'été ($j=171$).

2.4.2 Coordonnées horizontales

Ces coordonnées dépendent étroitement des coordonnées géographiques du lieu d'observation :

- **La hauteur du Soleil** h_s est l'angle entre le plan horizontal au lieu d'observation et la direction Terre-Soleil. La hauteur du Soleil varie entre $+90^\circ$ (zénith) -90° (Nadir). h_s

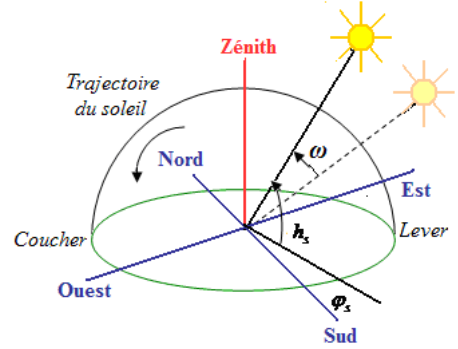


Figure 1.4 – Trajectoire du soleil.

peut-être calculé à partir de la relation :

$$\sin(h_s) = \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta) \quad (1.9)$$

La figure (1.6) représente la variation de la hauteur du Soleil h_s au cours d'une journée. Elle est nulle au lever et au coucher du Soleil et atteint son maximum à midi TSV .

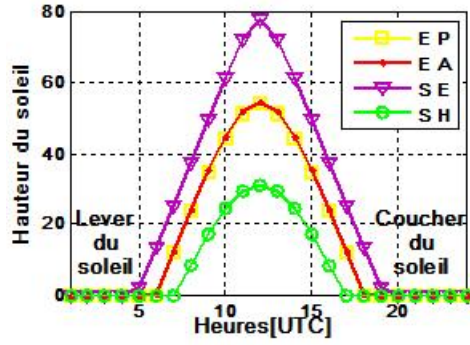


Figure 1.6 – Représentation de la variation de la hauteur du Soleil au cours d'une journée.

L'angle de la hauteur du Soleil est plus élevée au solstice d'été (SE) et très petit à solstice d'hiver (SH).

- **L'azimut du Soleil** φ_s est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du Soleil avec la direction du sud. L'azimut est compris entre $-180^\circ \leq \varphi_s \leq 180^\circ$. Il est défini par la relation suivante :

$$\cos(\varphi_s) = \frac{\cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\phi) - \sin(\delta) \cos(\phi)}{\cos(h_s)} \quad (1.10)$$

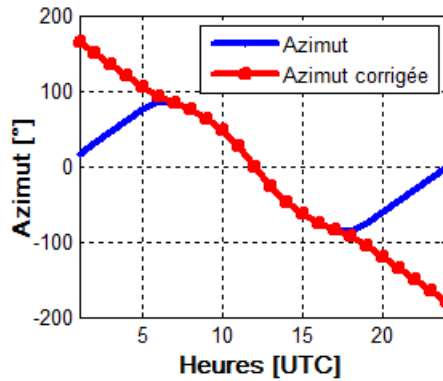


Figure 1.7 – Représentation de la variation de l'azimut du Soleil au cours d'une journée.

La figure (1.7) représente la variation de l'azimut du Soleil au cours d'une journée. Elle est nulle à midi TSV .

3 Interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère

Lors de sa traversée dans l'atmosphère, le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Ce rayonnement est atténué par des phénomènes d'absorption par l'ozone, la vapeur d'eau et d'autres molécules gazeuses telles que : O_2 , CO_2 et CH_4 , et de diffusion par l'air, les aérosols (particules de poussière) et les nuages (Annexe A). La figure (1.8) résume la transformation de l'énergie solaire et rappelle les différents processus du bilan radiatif terrestre.

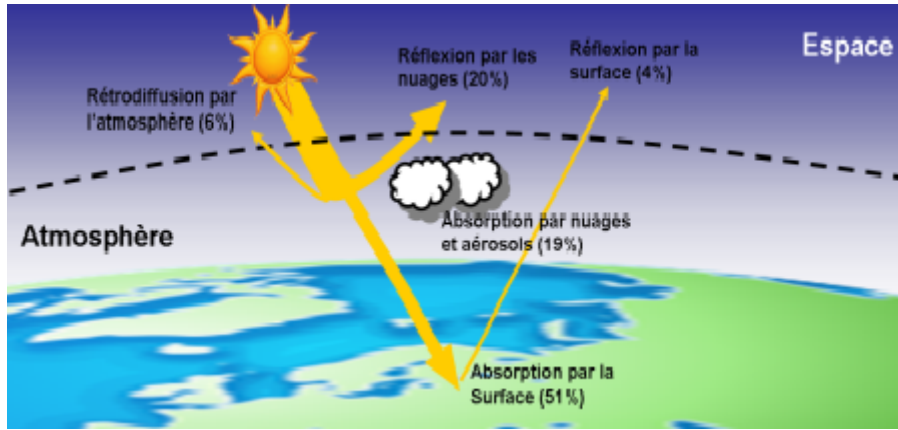


Figure 1.8 – Interaction du rayonnement solaire avec les constituants de l'atmosphère[10].

3.1 Paramètres atmosphériques

3.1.1 Masse atmosphérique

On appelle masse d'air m_a la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (en conditions de ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer [11]. Plus le Soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformations [12]. Elle est définie par la relation suivante [13] :

$$m_a = \frac{1}{\sin(h_s) + 9.4 * 10^{-4} [\sin(h_s) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (1.11)$$

3.1.2 Épaisseur optique de l'atmosphère

L'épaisseur optique de Rayleigh est l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols [9]. Il est défini par la formule pyrhéliométrique de Kasten [13] comme suit :

$$(\delta_r)^{-1} = 9.4 + 0.9m_a \quad (1.12)$$

Dans cette expression la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte. Par contre l'absorption par les gaz atmosphériques permanents CO_2 , O_2 , NO_2 et le CO n'est pas prise en compte.

3.1.3 Facteur de trouble de Linke

Le facteur de trouble atmosphérique de Linke T_L est le rapport entre l'extinction du rayonnement directe traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence [9]. Ce facteur peut être défini comme étant le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle [14].

$$T_L = \frac{\delta_m \log(T_m)}{\delta_i \log(T_r)} \quad (1.13)$$

où δ_m , δ_i sont les épaisseurs optiques moyennes sur l'ensemble du spectre respectivement pour une atmosphère réelle et pour une atmosphère idéale et T_m , T_i les facteurs de transmission pour une atmosphère réelle et idéale respectivement, que l'on peut calculer à partir des formules données lors de la description des modèles analytiques [15]. L'avantage du facteur de Linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser.

4 Composantes du rayonnement solaire

La surface terrestre émet elle aussi de l'énergie électromagnétique vers l'atmosphère. C'est la radiation terrestre. L'atmosphère émet, à son tour, dans toutes les directions : vers la surface et vers l'espace. Cette dernière constitue l'énergie perdue par le système Terre-atmosphère. La radiation terrestre ainsi que la radiation atmosphérique est elle aussi réfléchiée et absorbée. De façon générale, la caractérisation du rayonnement solaire en un lieu donné et un instant donné, consiste à connaître la distribution du rayonnement dans les différentes directions, et sa répartition spectrale au voisinage du sol. Les composantes du rayonnement sont :

- **Éclairement direct I** : On appelle rayonnement solaire direct celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion. Il est donc nul lorsque le Soleil est occulté par les nuages.
- **Éclairement diffus D** : Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. L'éclairement solaire diffus n'est nul que la nuit.
- **Éclairement globale G** : On appelle rayonnement global le rayonnement solaire parvenant au niveau du sol sur une surface horizontale, soit directement, soit après diffusion. C'est la somme des composantes directes et diffuses.

5 Mesure du rayonnement

La mesure du rayonnement se fait essentiellement à partir de l'énergie transportée par ce rayonnement. Les grandeurs radiométriques sont donc des flux d'énergie ou flux radiatifs (voir

l'annexe B), c-à-d des quantités d'énergie (mesurées en Joules) émises, transportées ou reçues par unité de temps. L'unité de flux radiatif est le Watt.

Ces mesures sont faites à l'aide d'instruments placés dans les stations météorologiques et radiométriques et permettent de collecter d'une part l'insolation et d'autre part, les composantes du rayonnement solaire.

Dans la plupart des cas, la mesure de la composante directe de l'éclairement solaire est mesurée au moyen d'un pyrhéliomètre (Figure (1.9)). Cet appareil monté en atmosphère sèche est en permanence orienté vers le Soleil et ne mesure que le rayonnement provenant du disque solaire.

Le rayonnement capté est absorbé par une surface noire dont différence de température avec le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement direct.

La mesure de la composante globale est faite par un pyranomètre simple (Figure (1.10)). Cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie, en prévenance d'un angle solide de stéradians. Ce rayonnement est converti en chaleur par la surface.

La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global ; elle est mesurée par une thermopile montée en série. La mesure du rayonnement diffus est faite à l'aide du même instrument, auquel on a adjoint une bande pare-Soleil parallèle au un plan équatorial, occultant le rayonnement solaire directe.

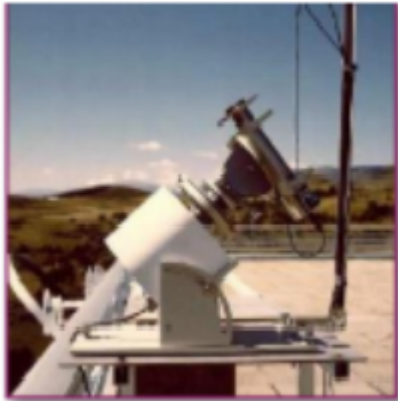


Figure 1.9 – Pyrhéliomètre Eppley.



Figure 1.10 – Pyranomètre équipé d'un pare-soleil.

6 Zone d'étude et données utilisés

6.1 Zone d'étude

L'Algérie est de par sa superficie, le plus vaste pays du continent africain, du monde arabe, et du pourtour méditerranéen. Dans sa partie sud, il comprend une part notable du Sahara. Géographiquement, elle est située dans la zone de coordonnées $18^{\circ}S$ et $38^{\circ}N$ et $12^{\circ}E$ et $10^{\circ}O$. Durant l'été, le mois le plus chaud, à Alger, est août. Au sud, le climat est sec. Le Sahara est

une région très ventée et aride. Les amplitudes thermiques sont généralement considérables à cause de la sécheresse de l'air. En Algérie, le temps est généralement ensoleillé, il avoisine 3 650 heures de Soleil par année

6.2 Réseau de stations météorologiques algérienne

Bien qu'il existe un réseau de 78 stations d'évaluation du gisement solaire qui mesure la durée d'insolation par l'Office National de la Météorologie (O.N.M) (Figure (1.11)), seules trois stations assuraient d'une manière régulière la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal depuis 2011 (Oran, Tamanrasset et Ksar Chellala).

Huit autres stations automatiques mesurent le rayonnement depuis 2009 : (Alger (aéroport), Oran (Sénia), In animas, Ghardaïa, Annaba, Tamanrasset, Tlemcen et Constantine)(tableau (1.1)). La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de l'O.N.M à cause de la facilité de sa mise en oeuvre.

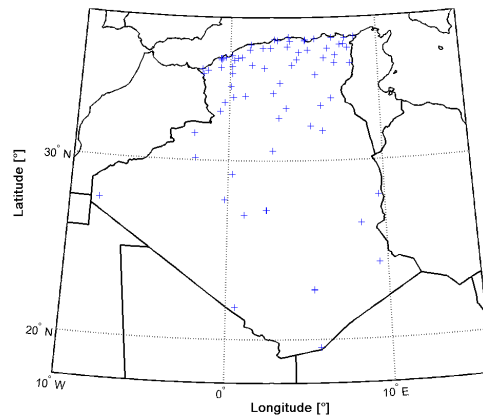


Figure 1.11 – Répartition géographique des stations météorologiques algériennes.

Tableau 1.1 – Stations automatiques qui assurent le rayonnement.

Site	Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	Alger(Dar-El-Beida)	36°43N	3°15E	25
2	Tlemcen (Zenta)	35°01N	1°27W	249
3	Annaba	36°43N	7°49E	3
4	Ghardaïa	32°24N	3°48E	468
5	Ain amenas	28°03N	9°38E	561
6	Oran (Senia)	35°63N	0°38W	90
7	Constantine	36°17N	6°37E	694
8	Tamanrasset	22°48N	5°27E	1362

6.3 Données utilisées

6.3.1 Données satellitaires

Les données satellitaires utilisées sont les images numériques fournies par le satellite météorologique géostationnaire **Météosat Première Génération (MPG)**. Ces images, codée sur 8 bits, couvrent le disque terrestre, représentant donc des niveaux de gris de 0 à 255 (tableau (1.2)). Elles sont collectées dans les canaux visibles et infrarouges (**Vis - IR**) durant le mois d'avril 1997, à raison de 3 images par jour (9h, 12h et 15h T.U.).

Tableau 1.2 – Caractéristiques des images utilisées.

Taille de l'image	974 × 776 dans le canal Visible 487 × 388 dans le canal Infrarouge
Format	TIFF (Tagged Image File Format)
Codage compte numérique	[0-255] bytes
Format d'image	Météosat Image HR de format DZ

Pour notre zone d'étude, les figure (1.12) et (1.13) donne un exemple de deux images numériques HR acquises le 10 avril 1997 à 12h T.U. dans le canal visible et infrarouge par Météosat-1.

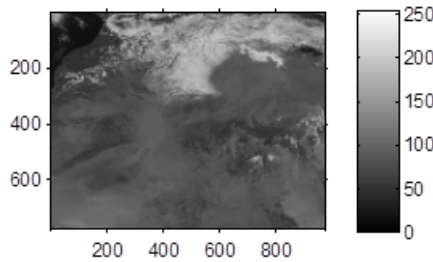


Figure 1.12 – Image visible

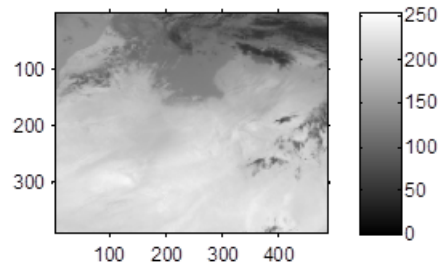


Figure 1.13 – Image infrarouge

6.3.2 Données au sol

Pour même instant de prise de vues d'images satellites, nous avons utilisé deux types des données : les valeurs horaires et journalières de l'éclairement solaire global d'un plan horizontal mesurées au sol et les valeurs journalières extraites de la base des données de **NASA**.

7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était la présentation du sujet de notre étude ainsi que celle des données utilisées et la zone d'étude choisie dans ce cadre. Nous avons commencé par une description des caractéristiques principales de rayonnement solaire, leur mécanisme d'interaction avec la surface de la Terre et l'atmosphère et leurs composantes. Dans la suite de cette étude, nous allons décrire quelques définitions et principes de base de l'observation de la terre par le satellite météorologique de la télédétection

Acquisition, Transmission et Exploitation des Données Satellites

LE premier grand domaine d'application des images du type Météosat est l'étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie). Néanmoins elles peuvent être utilisées dans d'autres domaines tels que l'océanographie et diverses applications terrestres. Elles permettent aussi d'étudier le gisement solaire. Mais comment acquérir, transmettre et exploiter des images satellites dans cet optique ? La réponse à cette question est présentée dans ce qui suit.

1 Introduction

Les satellites de télédétection représentent un intérêt dans plusieurs domaines comme la météorologie et la climatologie (l'étude de l'atmosphère), la cartographie ou la géographie, l'océanographie, la foresterie, l'agriculture, la géologie etc.

Les satellites météorologiques opérationnels constituent depuis plusieurs décennies une composante essentielle de la veille météorologique mondiale, en fournissant des observations continues et cohérentes de l'atmosphère et des surfaces sous-jacentes [16]. Ce type d'observations peut permettre de mesurer les luminances réfléchies par le système Terre-atmosphère à des heures très différentes sur une vaste zone géographique quasiment au même instant.

Dans un premier temps dans ce chapitre, nous décrirons le principe de base de la télédétection et leurs techniques. Par la suite, les caractéristiques principales des satellites météorologiques seront exposées. Les images Météosat étant utilisées dans le cadre de nos travaux, les satellites Météosat première génération, mis en place par l'agence européenne **EUMETSAT**, seront plus particulièrement présentés. Enfin, nous décrirons les notions de base des images satellites et les prétraitements utiles ayant pour but l'extraction d'informations nécessaires utilisées pour déterminer l'irradiation solaire incidente au sol.

2 Observation météorologique par satellites

2.1 Définition de la télédétection

Toute technique qui permet, par l'acquisition d'images d'obtenir à distance de l'information sur la surface (Terre, mer, etc.) appelée télédétection (en anglais « *remote sensing* »). La télédétection peut donc être définie comme étant un ensemble des connaissances et des techniques permettant par l'étude d'images d'identifier divers éléments d'un environnement à partir de l'observation de leurs caractéristiques spectrales [1].

2.2 Principe de base de la télédétection

Le principe général de la télédétection réside dans la mesure par un radiomètre embarqué par un satellite du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchis par le système sol-atmosphère. Ce rayonnement véhicule alors de nombreuses informations sur ce système. Le principe de base s'identifie donc à celui de la vision de l'homme.

La télédétection est le fruit de l'interaction entre trois éléments fondamentaux (Figure (2.1)) [w2] :

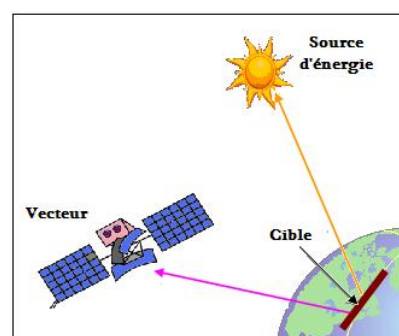


Figure 2.1 – Le principe de base de la télédétection

1. **La cible** est la portion de la surface terrestre observée par le satellite.
2. **La source d'énergie** (Soleil ou bien le satellite) : est l'élément qui éclaire la cible en émettant une onde électromagnétique.
3. **Le vecteur** (satellite ou un avion) est la plate-forme de mesure de la part d'onde électromagnétique réfléchie par la cible.

2.3 Techniques de la télédétection

Les deux principales techniques de télédétection, qui se distinguent par la nature de la source de rayonnement étudié, sont la télédétection passive et la télédétection active.

2.3.1 Télédétection passive

On parle de la télédétection passive si le capteur ne fait que recevoir le rayonnement arrivant au satellite (Figure (2.2)). Ce type de capteur utilise des propriétés de réflexion du rayonnement dans le domaine optique principalement visible et infrarouge. Le principal inconvénient de ce type de capteur est d'être inopérant si le ciel est sombre ou nuageux [17].

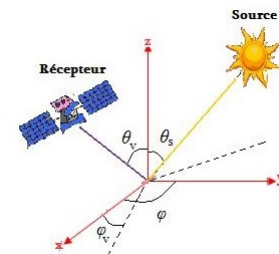


Figure 2.2 – Télédétection passive

2.3.2 Télédétection active

On parle de la télédétection active si le capteur éclaire artificiellement par l'intermédiaire de radar et de lidar la cible avant de mesurer l'énergie que cette dernière renvoie (Figure (2.3)). L'un des principaux avantages de la télédétection active radar est la possibilité de réaliser des acquisitions en tout temps, par ciel clair ou nuageux, de jour comme de nuit [17].

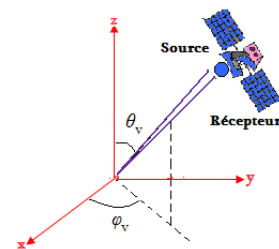


Figure 2.3 – Télédétection active

3 Satellites d'observation météorologique

Les satellites d'observation permettent à l'homme d'avoir une vision globale et précise du monde où il habite et d'étudier son environnement comme jamais il n'avait pu le faire auparavant. Un satellite météorologique est un satellite artificiel qui a comme mission principale de recueillir des données utilisées pour la surveillance du temps et du climat de la Terre [w3]. Il existe deux types de satellites météorologiques : les satellites à défilement et les satellites géostationnaires.

3.1 Satellites à défilement

Les satellites à défilement tels que **NOAA** ou **TIROS** gravitent à basses altitudes (entre 100 et 1000 km). Comme ils parcourent leurs orbites avec une vitesse de rotation plus grande que celle de la terre, ils passent périodiquement au-dessus d'une même région pendant la journée. Ainsi, par exemple, les satellites **NOAA** passent toutes les 12 h au-dessus d'une région donnée (Figure (2.4-a)).

3.2 Satellites géostationnaires

Les satellites géostationnaires tels que **Météosat** ou **GOES** sont installés sur une orbite circulaire dans le plan de l'Equateur (d'inclinaison nulle) à une altitude d'environ 35800 km. Leur période de rotation est égale à celle d'une rotation de la Terre sur elle-même (orbite géosynchrone). Ces satellites apparaissent donc stationnaires à une longitude donnée, face à l'Equateur. Le champ de vision d'un satellite géostationnaire s'étend de 60°N à 60° S en latitude sur 120° de longitude (Figure (2.4-b)).

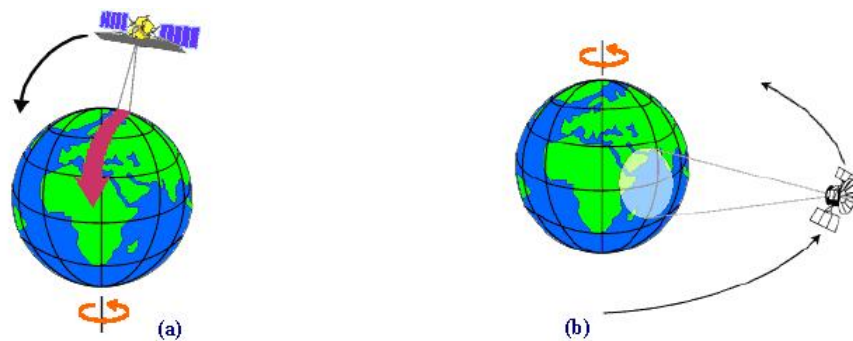


Figure 2.4 – a) Orbite polaire, b) Orbite géostationnaire.

Les satellites géostationnaires présentent un intérêt évident pour les missions de surveillance météorologiques continue d'une région donnée (en particulier, l'étude de la nébulosité, la détermination des vents etc).

4 Satellite Météosat

4.1 Généralités

Météosat est une série de satellites géostationnaires de météorologie lancés par l'Agence Spatiale Européenne maintenant gérés par **EUMETSAT** [w4]. Il existe 3 générations de satellites Météosat :

- **MPG** lancés à partir de 1977 ;
- **MSG** mis en orbite depuis l'année 2000 ;
- **MTG** dont l'appel d'offres fut lancé en 2009.

Cette nouvelle génération de satellite comporte des senseurs plus performants et capables d'effectuer des mesures sur un plus grand nombre de canaux, permettant de différencier et d'étudier divers phénomènes météorologiques (nuages, précipitations, vents, brouillard, etc.). Leur champ visuel est limité à la fraction du globe visible de son altitude de 36,000 km, à la verticale de l'intersection de l'équateur et du méridien de Greenwich. Ces satellites envoient des images brutes numériques de haute résolution à une station de base opérationnelle située en Allemagne (Darmstadt). Un premier traitement, dont l'application de corrections géographiques permettant de rendre les images superposables, est appliqué.

Dans ce que suit, nous présentons plus particulièrement les satellites Météosat Première Génération car nous en avons utilisé les images dans le cadre de nos travaux.

4.2 Satellite Météosat MPG

Météosat est un satellite géostationnaire (Figure (2.5)). Il faisant partie d'un réseau international de 5 satellites météorologiques répartis autour de l'équateur à des intervalles d'environ 70 degrés de longitude.



Diamètre	2.10 m
Masse en orbite	400 kg
Stabilisation	Par rotation (100 tours par minute)
Durée de la mission	5 ans
Acquisition des images	30 minutes

Figure 2.5 – Météosat de première génération [w5].

Le principal élément de ce satellite est radiomètre multi-spectral MVIRI opérant dans trois canaux différents, dont les caractéristiques principales sont reportées dans le tableau (2.1). Ce capteur est sensible au rayonnement émis par la surface de la Terre. Il fournit les données de base issues des rayonnements du spectre électromagnétique dans les domaines visible et infrarouge. La radiation incidente est filtrée dans le radiomètre puis transformée en signal électrique proportionnel à l'énergie de la radiation puis en signal numérique codé sur 8 bits (soit un entier entre 0 et 255). Des images correspondant à trois bandes spectrales différentes sont ainsi disponibles à chaque acquisition du satellite.

Tableau 2.1 – Trois canaux de l’imageur Severi de **MPG** et leurs utilisations.

Canal	Bande (μm)	Résolution	Utilisation
Visible	0,4-1,1	2.5	Imagerie diurne
Vapeur d’eau	5,7-7,1	5	– Détermination de la quantité de vapeur d’eau dans l’atmosphère
Infrarouge thermique	10,5-12,5	5	– L’imagerie diurne et nocturne. – Détermination des températures du sommet des nuages, la surface de l’océan et du sol en conditions de ciel clair

4.3 Imagerie Météosat

Les images et animations des satellites météorologiques sur orbite géostationnaire sont les documents de télédétection les plus diffusés auprès du grand public. L’imagerie des satellites européens de la série Météosat a plusieurs types d’applications, en particulier [w6] :

- Le suivi en temps réel des masses nuageuses et des phénomènes météorologiques ;
- L’extraction automatique de paramètres géophysiques qui sont assimilés dans les modèles numériques de prévision météorologique ;
- Le traitement en série des images archivées pour l’obtention de séries climatologiques sur la nébulosité et les pluies, la température de surface de la Terre ou de la mer.

L’exploration complète du disque terrestre de 60°N à 60° S nécessite 2500 lignes parcourues en 25 minutes de balayage. Au total, la génération et la transmission d’une image nécessitent 30 minutes au centre Européen de Darmstadt où elles subissent traitements et sont archivées ou acheminées par voie hertzienne vers les utilisateurs équipés d’une station de réception Météosat.

Trois sortes d’images satellitaires sont fournies par le Centre de Darmstadt. Ce sont [1][18].

- **Les images HR (High-Resolution)** : Ces images sont produites toutes les demi-heures. Chaque image issue du canal visible est formée de 5000 x 5000 pixels et chaque image infrarouge de 2500 x 2500 pixels. Elles sont captées au niveau de la station radiométrique de l’Office National de Météorologie.
- **Les images B2 (Reduced-Resolution)** : Ces images de format 416 x 416 pixels sont fournies toutes les trois heures par jour. Ce sont des images réduites du globe terrestre, obtenus en prenant un pixel sur 36 dans des images HR.
- **Les images WEFAX (Weather Facsimile)** : Ces images sont acquises régulièrement dans le canal visible suivant le mode analogique. Le format de ces images est de 8000 x 8000 pixels.

La transmission de ce type des images est compatible avec le standard A.P.T (Automatic Picture Transmission) sous lequel sont reçues d’autres images satellitaires.

5 Images satellitaires, notions et prétraitements de base

5.1 Constitution des images

Les images sont le résultat d'un double balayage mettant en œuvre la rotation du satellite (lignes) et le relèvement du télescope (colonnes). Un élément de l'image appelé pixel, correspond à un élément de la surface terrestre dont les coordonnées géographiques sont bien définies, moyennant un certain nombre de corrections (navigation, correction géométrique) qui la rendent superposable à une carte ou à une image de référence. Chaque pixel sera caractérisé par sa radiance, ses coordonnées géographiques et son temps d'acquisition.

5.2 Codage des données de la banque des images utilisées

Pour un meilleur accès et une meilleure identification ces dernières sont nommées avec une codification nous renseignant sur leurs dates d'acquisition et leur canal correspondant, facilitant la gestion des données de la banque d'images selon le mode suivant :

AA MM JJ HH. CCC

- **AA** : décrit l'année d'acquisition de l'image.
- **MM** : décrit le mois d'acquisition de l'image.
- **JJ** : décrit le jour d'acquisition de l'image.
- **HH** : d'écrit l'heure d'acquisition multipliée par deux.
- **CCC** : décrit le canal d'acquisition VIS ou IR.

Chaque attribut est codé par deux caractères, sauf pour le canal qui contient trois caractères pour le (VIS) et deux caractères pour l'infrarouge (IR). La figure (2.6) montre un exemple de codification

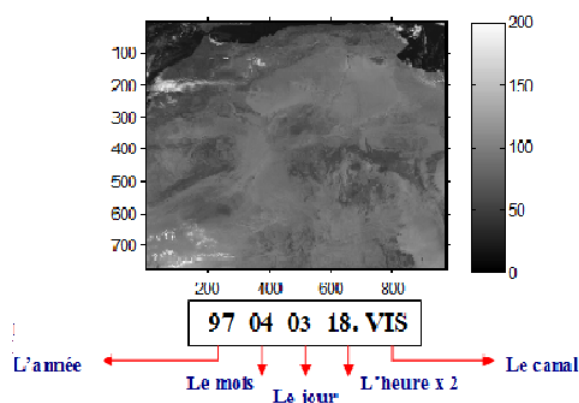


Figure 2.6 — Exemple d'image prise dans le visible par le satellite Météosat première génération le 3ème avril 1997 à 9h00.

5.3 Opérations sur les images METEOSAT

Les images Météosat n'étant pas directement exploitables, des prétraitements sont nécessaires à savoir

5.3.1 Analyse algébrique

Il s'agit d'un traitement ponctuel entre images qui peut être défini comme l'addition, la soustraction, la multiplication ou la division pixel par pixel entre les niveaux de gris de deux images de même taille et de même type. Il en résulte une image permettant d'identifier des changements survenus ou une amélioration du contraste ou de la luminosité d'une image.

Exemple d'application : Soient deux images dans le canal visible (Figure (2.7)).

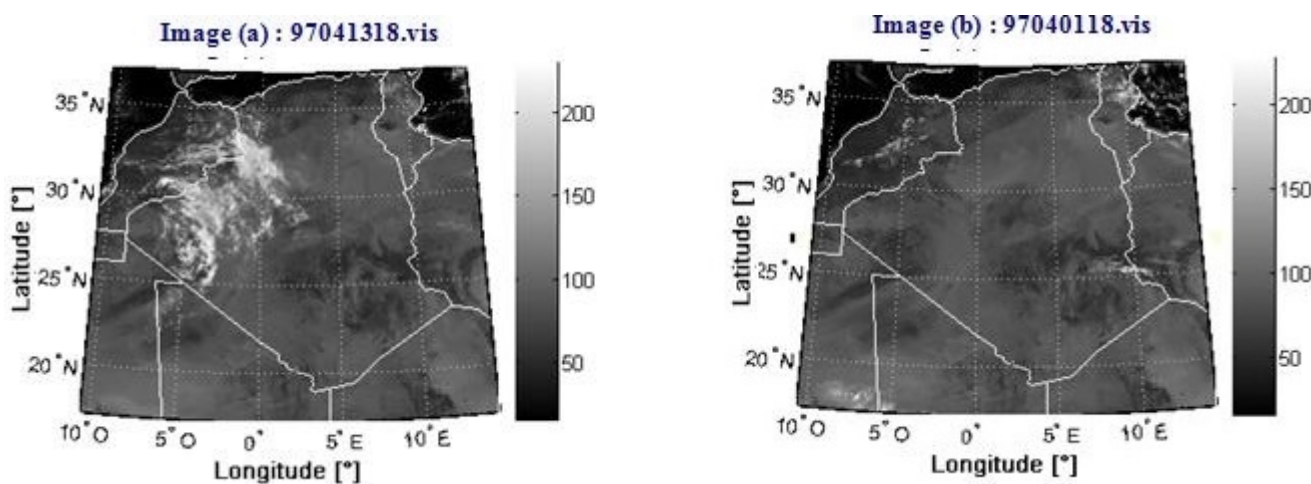


Figure 2.7 – Deux images brutes présent à 9h00.

La figure (2.8) représente toutes les opérations algébriques (somme, différence, multiplication et division) effectuées entre ces deux images.

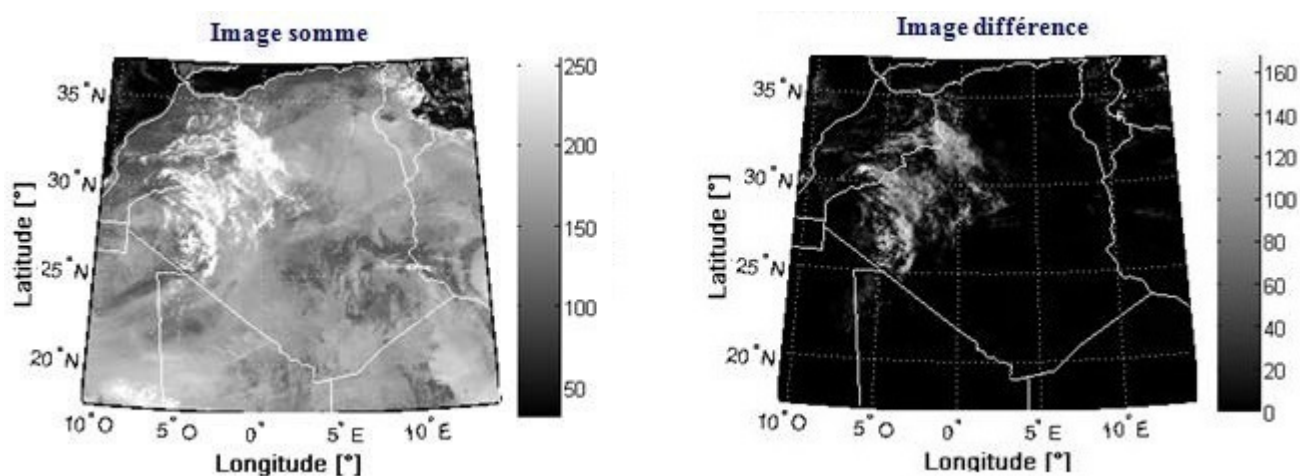


Figure 2.8 – Images résultante à partir des différentes opérations algébriques.

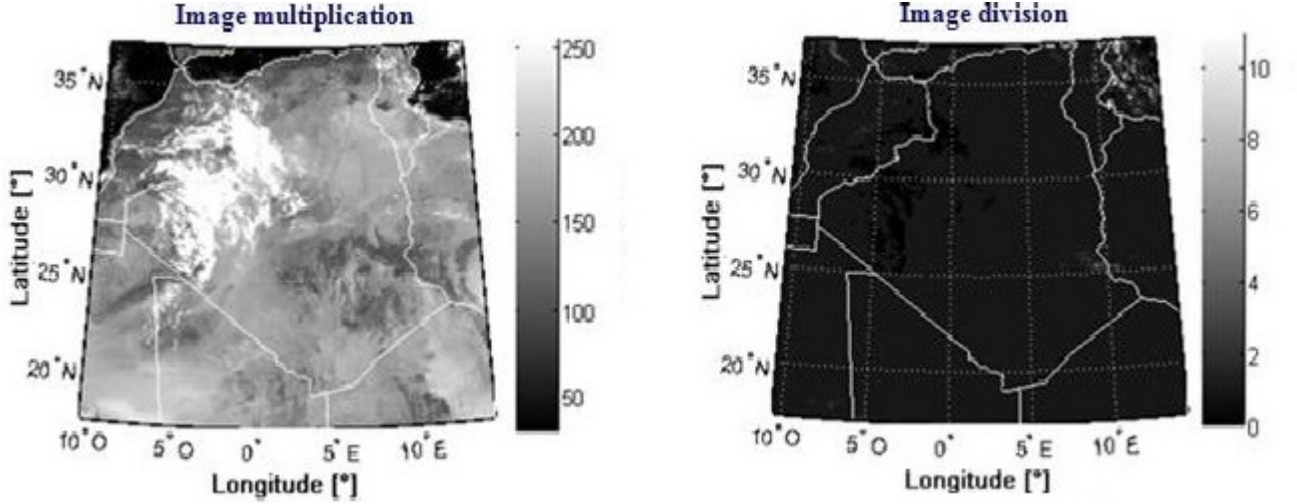


Figure 2.9 – Images résultante à partir des différentes opérations algébriques.

Parmi ces opérations algébriques, l'intérêt de calcul de différence entre deux images permettant une analyse visuelle importante. Une différence non nulle s'interprète par une évolution radiométrique par contre une différence nulle s'interprète par une radiométrie homogène entre les deux images.

5.3.2 Variance

La variance d'une image est une image calculée sur un pavé de 3 x 3 pixels (que l'on déplace sur toute l'image) centré sur le pixel considéré. Le calcul de la variance n'est autre qu'un masque numérique 3 x 3. Le calcul de variance se fait en trois étapes :

- 1^{ère} Étape : calcul de l'image moyenne $MOY(x, y)$ associée à l'image entrée.

$$MOY(x, y) = \left[\sum_{n=x-1}^{y+1} \sum_{m=x-1}^{y+1} IM(n, m) \right] / 9 \quad (2.1)$$

- 2^{ème} Étape : calcul de l'image variance locale $V_L(x, y)$.

$$V_L(x, y) = \left[\sum_{n=x-1}^{y+1} \sum_{m=x-1}^{y+1} (IM(n, m) - MOY(x, y))^2 \right] / 9 \quad (2.2)$$

- 3^{ème} Étape : calcul de l'image variance $V(i, j)$.

$$V(x, y) = \log(1 + \sqrt{V_L(x, y)}) \cdot 30 \quad (2.3)$$

Exemple d'application : Soient une image prise dans le canal visible (Figure (2.10)).

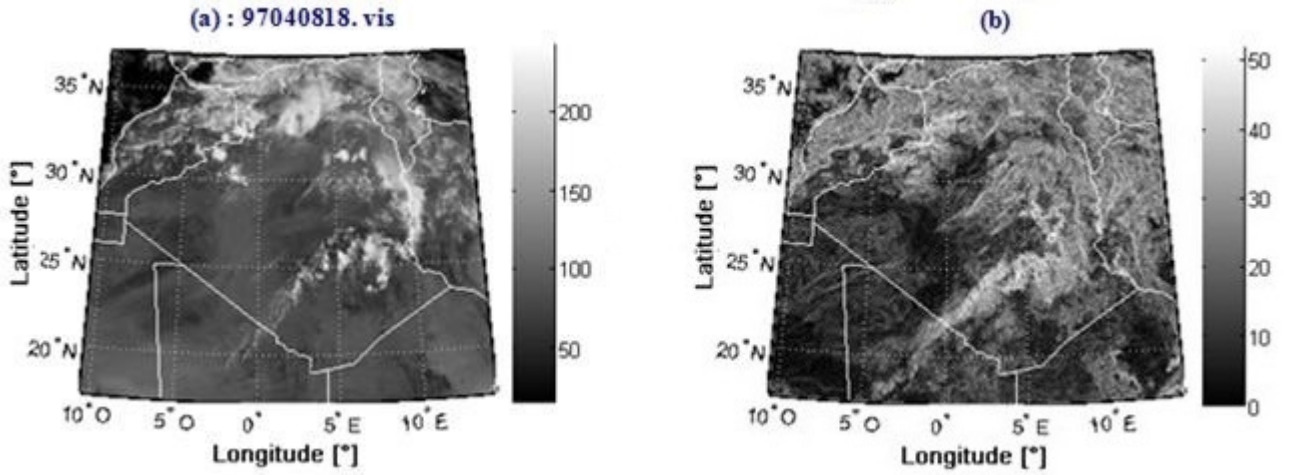


Figure 2.10 – a) Image satellitaire brut. b) Image variance.

5.3.3 Corrélation

La corrélation est une information statistique pour la comparaison entre deux images. Puisque les images satellites sont des images qui présentent le même espace, une variation du coefficient de corrélation s'interprète par une distribution de la masse nuageuse différente. Ce taux est calculé statistiquement par les trois étapes suivantes :

- 1^{ère} Étape : calcul de la covariance entre les deux images entrées IM et IM'

$$COV = \sum_{i=0}^{largeur} \sum_{j=0}^{longueur} (IM(x, y) - MOY(x, y)) * (IM'(x, y) - MOY'(x, y)) \quad (2.4)$$

- 2^{ème} Étape : calcul de la variance de chaque image :

$$VAR = \sum_{i=0}^{largeur} \sum_{j=0}^{longueur} (IM(x, y) - MOY(x, y))^2 \quad (2.5)$$

$$VAR' = \sum_{i=0}^{largeur} \sum_{j=0}^{longueur} (IM'(x, y) - MOY'(x, y))^2 \quad (2.6)$$

- 3^{ème} Étape : calcul de coefficient de corrélation

$$COR = \frac{COV}{\sqrt{VAR}\sqrt{VAR'}} \quad (2.7)$$

avec MOY et MOY' sont les images moyennes deux images IM et IM' de même taille.

5.3.4 Brillance satellitaire

Les images **METEOSAT** sont des images de taille fixe et tout élément de la matrice est dit brillance (compte numérique) codée sur 8 bits. La brillance d'un pixel est une contribution d'une brillance du sol et une brillance d'atmosphère. Soit un paquet d'images prises dans le

même spectre pour la même heure et sur une période journalière quelconque. À partir de ce paquet, nous calculons deux images dites de référence : celle de brillance maximale et celle de brillance minimale :

$$B_{min}(x, y, h) = \min[B(x, y, j, h)] \quad (2.8)$$

et

$$B_{max}(x, y, h) = \max[B(x, y, j, h)] \quad (2.9)$$

La figure (2.11) représente la procédure de calcul de la brillance minimale et la brillance maximale.

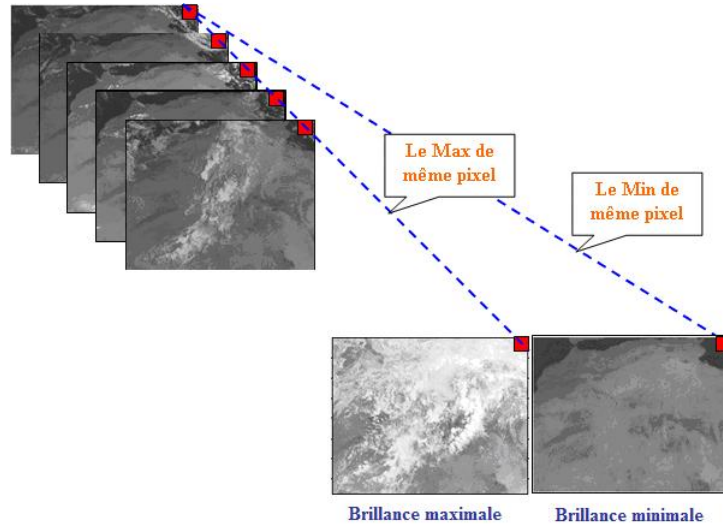


Figure 2.11 – Procédure de calcul de la brillance maximale des images correspondant à une même heure.

. **Exemple d'application** : Soient six paquets ; chaque paquet contient toutes les images prises dans le même canal (visible ou infrarouge) et prise dans la même heure. Pour chaque paquet calculer B_{min} et B_{max} .

Les résultats obtenus sont illustrés sur les quatre figures (2.12) à (2.15). Ces figures représentent les images de brillances maximales et minimales obtenues pour les trois heures de prise de vues calculées pendant la séquence d'étude dans les deux canaux.

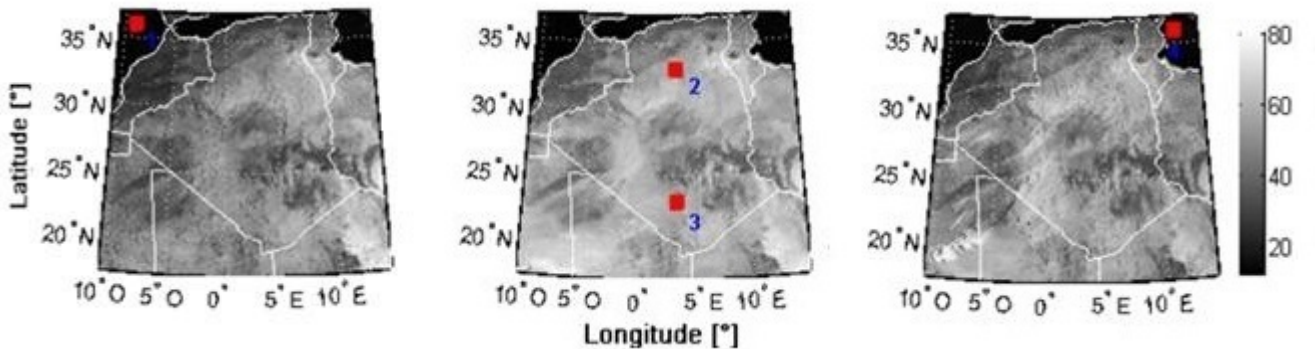


Figure 2.12 – Trois images de brillance minimales pour les trois heures de prise de vues (à 9h00, à 12h00 et à 15h00) dans le canal visible.

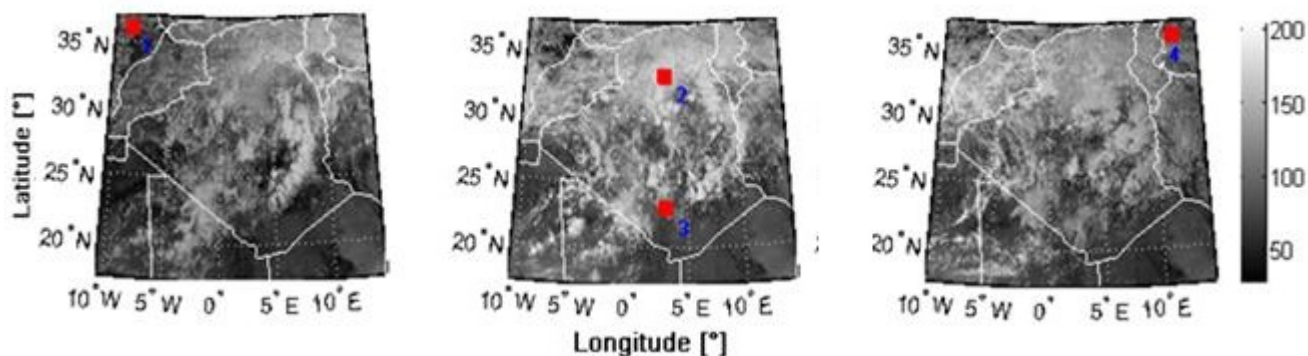


Figure 2.13 – Trois images de brillance minimales pour les trois heures de prise de vues (à 9h00, à 12h00 et à 15h00) dans le canal visible.

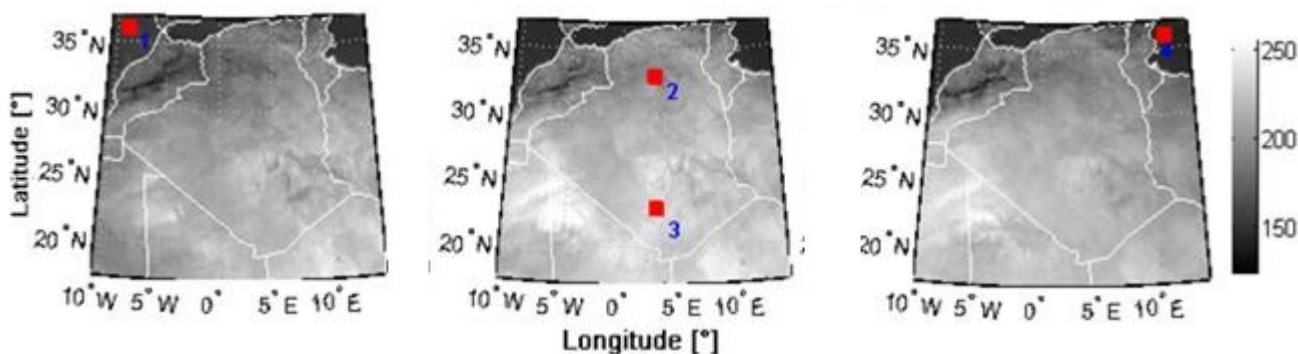


Figure 2.14 – Trois images de brillance maximales pour les trois heures de prise de vues (à 9h00, à 12h00 et à 15h00) dans le canal infrarouge.

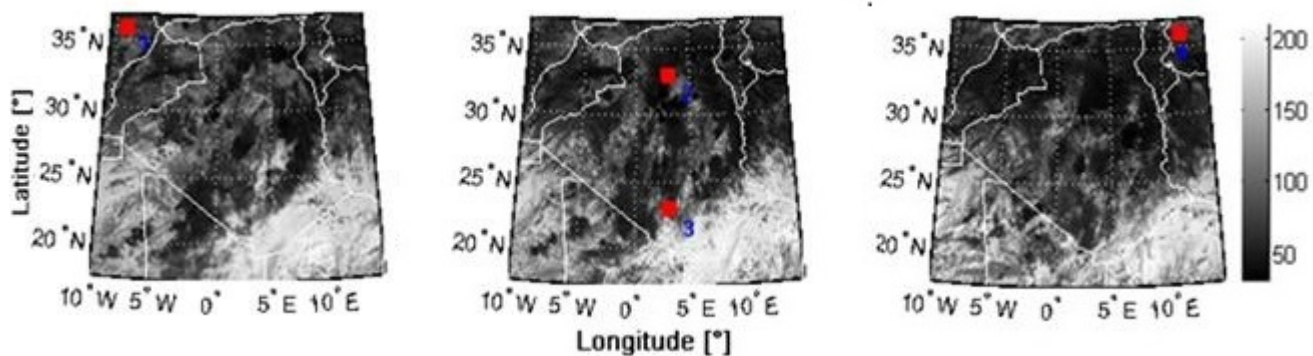


Figure 2.15 – Trois images de brillance minimales pour les trois heures de prise de vues (à 9h00, à 12h00 et à 15h00) dans le canal infrarouge.

Dans le tableau (2.2), un ensemble de points connus (1.2.3.4) qui sont représenté dans les figures précédents donne les valeurs de radiométrie suivantes :

Tableau 2.2 – Radiométrie en quelques points.

Point image dans les images VIS	1	2	3	4	Point image dans les image IR	1	2	3	4
$B_{min,VIS}$	13	40	54	13	$B_{min,IR}$	62	40	05	47
$B_{max,VIS}$	139	179	90	147	$B_{max,IR}$	149	207	238	146

L'analyse visuelle fait par **Bachari** (tableau (2.3)) nous permet de conclure que :

- Dans le cas des images visible, la brillance maximale correspond à une couverture par les nuages et la brillance minimale correspond à l'état ciel clair ;
- Dans le cas des images captées dans le infrarouge, l'inverse est vrai.

Tableau 2.3 – Radiométrie du sol, mer et nuages [19]

Radiométrie Image	Sol	Mer	Nuage et autres
Image Visible	$20 < \text{Radiométrie} < 60$	$\text{Radiométrie} < 20$	$\text{radiométrie} > 60$
Image infrarouge	$\text{Radiométrie} > 140$	$130 < \text{Radiométrie} < 140$	$\text{Radiométrie} < 130$

6 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté le principe de base de la télédétection, les données essentielles et leurs techniques d'acquisition. Ensuite, nous avons présenté les dispositifs satellitaires, notamment le satellite Météosat première génération, d'où proviennent les images sur lesquelles nous avons réalisé notre traitement.

Finalement, nous avons décrit des prétraitements nécessaires ayant pour but la préparation des images satellitaires et l'extraction d'images référentielles utiles à la détermination des paramètres atmosphériques tels que l'albédo et l'indice d'ennuagement.

Ces différentes notions de base et définitions vont nous permettre dans le troisième chapitre d'introduire les différentes approches d'estimation du rayonnement solaire au sol par le traitement d'images satellitaires.

Approche satellitaire

Sur une image satellite plusieurs thèmes présentent des comptes numériques différents, ces derniers représentent le rayonnement réfléchi par le système sol-atmosphère. Cette image, transmise à une station au sol où elle est traitée, est mise à disposition de la communauté des utilisateurs. Quelle est la relation entre l'image et le rayonnement solaire incident au sol ? Quel type de modèle existe-t-il pour estimer ce rayonnement ? La réponse à ces questions est expliquée dans le présent chapitre.

1 Introduction

Les images satellitaires résultent d'interactions entre le rayonnement électromagnétique et un radiomètre embarqué par un satellite. Pour chaque pixel balayé par le radiomètre, celui-ci mesure l'énergie radiative dans différentes bandes spectrales. La radiation qui atteint le capteur véhicule des informations sur les propriétés de l'atmosphère, de la surface terrestre, de source émettrice de la radiation et les conditions géométriques de prise d'images. Ces images peuvent donc permettre d'estimer le rayonnement solaire global au sol et l'albédo de la surface.

Pour illustrer l'approche satellitaire, nous présenterons dans ce chapitre quelques modèles d'évaluation de gisement solaire à partir des images satellitaires les plus utilisés. Finalement, nous présenterons les modèles adoptés dans notre travail.

2 Bases physiques utiles pour les modèles satellitaire

L'éclairement solaire hors atmosphère E_{oh} se décompose en trois composantes après les diverses interactions avec le système sol-atmosphère (Figure (3.1)) [20] :

$$E_{oh} = E_{aa} + E_{as} + E_r \quad (3.1)$$

où E_{aa} , E_{as} et E_r sont respectivement les éclaircements absorbé par l'atmosphère, absorbé par le sol et réfléchi vers l'espace.

L'éclairement solaire absorbé par le sol E_{as} peut s'écrire en fonction de l'éclairement incident au sol G et de son albédo ρ_g :

$$E_{as} = (1 - \rho_g)G \quad (3.2)$$

En utilisant les relations (3.1) et (3.2) on obtient :

$$G = \frac{E_{oh}}{1 - \rho_g} \left(1 - \frac{E_{aa}}{E_{oh}} - \frac{E_r}{E_{oh}} \right) \quad (3.3)$$

D'après l'équation (3.3) l'équation de conservation de l'énergie donne :

$$G = \frac{E_{oh}}{1 - \rho_g} (1 - \alpha - \rho) \quad (3.4)$$

où $\alpha = \frac{E_{aa}}{E_{oh}}$ est la fraction du rayonnement absorbée dans l'atmosphère et $\rho = \frac{E_r}{E_{oh,m}}$ est la fraction du rayonnement réfléchi vers l'espace (albédo planétaire) qui peut être déduite directement des mesures satellitaires. E_{oh} peut s'écrire aussi en fonction de l'angle zénithal et sa distance Terre-Soleil. Il est donné par l'équation suivante :

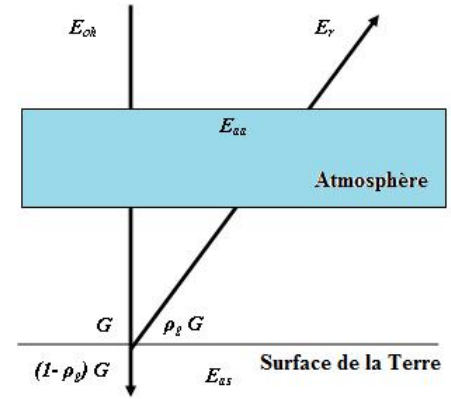


Figure 3.1 – Interaction du rayonnement solaire par l'atmosphère.

$$E_{oh} = I_0 \epsilon \cos(\theta_s) = I_0 \epsilon \sin(h_s) \quad (3.5)$$

où $I_0 = 1367W/m^2$ est la constante solaire [21].

Dans la gamme visible de Météosat, l'éclairement extraterrestre incident peut s'écrire en fonction de l'angle zénithal et sa distance Terre-Soleil. Il est donné par l'équation suivante :

$$E_{oh} = I_{0,met} \epsilon \cos(\theta_s) \quad (3.6)$$

où $I_{0,met}$ est la constante solaire corrigé par **Rigollier et al.** [22] pour la gamme $(0,3 - 1,1)\mu m$ présenté dans le tableau (3.1).

Tableau 3.1 – Constantes solaires par les différentes versions du Météosat premières génération [22].

Météosat-1	Météosat-2	Météosat-3	Météosat-4	Météosat-5	Météosat-6	Météosat-7
492.91	498.81	599.05	594.79	692.16	692.16	693.17

3 Approches satellitaire

L'estimation du rayonnement solaire au niveau du sol nécessite la prise en compte des conditions atmosphériques réelles et de l'ennuagement. L'interprétation des images satellites intervient à ce niveau. On distingue deux types de modèles utilisant les images satellites : les modèles inverses issus des méthodes de télédétection et les modèles directs [10][23].

3.1 Modèle inverse

Le modèle inverse exploite les images satellites brutes ou étalonnées en temps réel ou quasi-réel. Ces images résultent d'un ensemble d'interactions entre le rayonnement solaire et l'atmosphère dans le double trajet atmosphère-sol et sol-satellite. Ces méthodes ont pour principe de considérer qu'une variation de luminance perçue par les instruments du satellite est comme une variation de la couverture nuageuse au-dessus du pixel[23]. Une inversion du signal permet alors de déduire de ces images les rayonnements au sol [10]. Ce modèle pouvant être classé en trois grandes familles [1][24].

3.1.1 Modèle statistique

Les modèles statistiques sont des modèles qui s'articulent surtout autour de concepts tels que la corrélation entre les données satellitaires et des grandeurs météorologiques représentatives du rayonnement solaire.

3.1.2 Modèle physique

Ces modèles reposent essentiellement sur l'irradiation du rayonnement solaire avec les phénomènes physiques prévalant dans l'atmosphère et au niveau de la surface terrestre. Ces phénomènes sont liés aux processus d'absorption, de diffusion et de réflexion observés dans de tels milieux et permettent d'établir le bilan des échanges radiatifs tant du point de vue spectral que global.

3.1.3 Modèle analytique

Ces modèles sont aussi basés sur le transfert radiatif du rayonnement solaire dans le système atmosphère -Terre. Cependant, les échanges radiatifs dans ce système sont décrits analytiquement par des équations dans lesquels les grandeurs physiques sont représentées par des paramètres universels répertoriés au niveau des banques de données d'organismes internationaux (O.M.M).

3.2 Modèle directe

Contrairement aux modèles inverses, le modèle direct est en principe modéliser les différents effets atmosphériques qui agissent le rayonnement incident. On déduit alors le rayonnement au niveau de la surface du rayonnement hors atmosphère, considérant les intensités réfléchies, transmises et diffusées [10].

4 Présentation de quelques modèles issus de la littérature

Pour illustrer l'approche satellitaire, nous présentons quelques modèles illustrés par le tableau (3.2) en choisissant ceux qui sont les plus utilisés pour évoluer le gisement solaire à partir des images satellitaires.

D'après ce tableau, nous avons présenté quelques modèles d'estimation du rayonnement solaire à partir des images satellitaire. **Tarpley** a estimé des irradiances horaires et journalières par le traitement de 7 à 10 images dans le canal visible du satellite **GOES** effectuées dans la région des Grands Lacs des États-Unis [2]. L'étude est basée sur une formule de régression prenant en compte la nébulosité, les phénomènes physiques (absorption, de diffusion Rayleigh et de diffusion par l'eau). Cette méthode se trouve cependant limitée dans l'espace puisque les différents coefficients de régression ne sont valables que pour sa zone d'étude.

Toujours avec ces mêmes types d'images, **Gautier et al.**, ont proposé une méthode de détermination de l'albédo de la surface de la Terre, le liant à la luminance mesurée par le satellite [3]. Cette méthode nécessite plusieurs conditions : avoir des images en conditions de ciel clair et introduire des paramètres atmosphériques de corrections (coefficient de réflexion de

l'atmosphère, coefficient d'absorption de la vapeur d'eau). Leur modèle est basé essentiellement sur les échanges radiatifs dans le double trajet Soleil-sol-satellite.

Avec l'avènement de **METEOSAT**, les études sur le rayonnement solaire ont connu une véritable expansion. On retiendra entre autres les travaux de **Pastre**, orientés vers l'estimation des durées d'insolation en France à partir d'images du canal visible du satellite, à raison de deux images par heure [25]. La méthode est basée sur la détermination de seuil d'albédo et prend comme paramètre la nébulosité et la fraction d'insolation.

L'étude du gisement solaire sur de vastes régions a réellement débuté avec l'utilisation des images **METEOSAT** de type **B2 ISCCP** à faible résolution. Malgré l'inconvénient du nombre limité d'images exploitables dans la journée (seules 3 images par jour), ces données ont fait l'objet de plusieurs études. Ainsi, l'utilisation d'une série complète de 18 mois d'images archivées a permis de mettre au point la méthode **GISTEL** de calcul de l'irradiation solaire globale journalière, utilisée et validée en France [26].

Ces travaux sont poursuivis avec une amélioration progressive des algorithmes aboutissant ainsi à une estimation assez précise où les coefficients de corrélation entre valeurs estimées et mesurées atteignent 0.98 pour les journées homogènes et sur des sites précis comme à Tunis [27].

Cependant, cette précision baisse considérablement pour les journées non homogènes ou à faibles durées d'ensoleillement. De même, on note des valeurs plus faibles de coefficients de corrélation dans les cas d'études sur de vastes étendues [28]. Ce modèle est aussi appliqué en Algérie [29].

Pour cette même région, **Mefti et al.** et **Bachari et al.** ont proposé des modèles statistiques basés sur la détermination de l'indice d'ennuagement utilisant des images **HR** et **B2** pris par le satellite géostationnaire Météosat [29][30].

L'exploitation ces mêmes images, à raison cette fois-ci d'une image toutes les deux heures, permet avec les travaux de **Möser et Raschke** de développer un modèle analytique basé sur la résolution de l'équation de transferts radiatifs tenant compte à la fois des phénomènes d'absorptions et de dissipations par l'atmosphère [4]. Cette méthode utilise les mesures directes et aussi les images infrarouges du même satellite.

Toujours avec ces images visibles de **METEOSAT**, deux modèles similaires au modèle de **Gautier et al.** ont été développés. L'un est basé sur le calcul d'albédos planétaires (modèle de **Dedieu et al.** [31]) et l'autre sur les coefficients de transmission atmosphérique totale vers le sol et le satellite (modèle de **Marullo et al.**, [32]). En 2007, **Cogliani et al.**, ont développé un autre modèle similaire à ce dernier modèle nommé **SOLARMET** [33]. Ils ont simulé la présence de nuages et/ou d'aérosol par une seule couche diffusante et non absorbante. Les paramètres de ce modèle sont déterminés par le modèle du transfert radiative (**SBDART**[34]). On notera de même des études sur les images Wefax de Météosat avec principalement les travaux de **Amado** basés sur la détection des masses nuageuses [35].

Chapitre 3. Approche satellitaire

Tableau 3.2 – État de l’art des modèles satellite

N	Types de modèle	Auteur/année	Type de satellite	Station	Résolution km^2	Période	Erreur moyenne	Base/Hypothèse
1	Stat/Inv	Tarpley 1979	GOES (Canal Vis)	22 sites États-Unis	50 x 50	27 jours May 1977	10 %	– Classification des niveaux de gris de l’image pour la détermination des coefficients de régressions pour chaque pavé. – Prise en compte de la nébulosité, les phénomènes d’absorption, de diffusion Rayleigh et de diffusion par l’eau
2	Ana /Inv	Gautier et al 1980	GOES (Canal Vis)	3 sites Canada	12 x 12	Printemps Été 1978	9 % (J)	– Prise en compte des effets d’absorption de la vapeur d’eau et la diffusion de Rayleigh – Effets d’aérosols négligés. – Diffusion isotrope
3	Stat /Inv	Pastre 1981	Météosat-1 (Canal Vis)	France	/	/	/	– Prise en compte de la nébulosité et la fraction d’insolation pour la détermination du seuil d’albédo.
4	Ana/Inv	Möser et Raschke 1983-1984	Météosat-1 et 2 (Canal IR)	Europe Nord d’Afrique	25 x 25	Juin 1979 avril 1982	/	– Prise en compte de l’effet d’absorption d’aérosol, la vapeur d’eau et l’Ozone. – Ne nécessite pas d’étalonnage des images du satellite.
5	Stat /Inv	Cano et al (HELIOSAT-0) 1986	Météosat (Vis et IR)	27 sites Français	5 x 5	May 1979	16 % (H)	– Analyse de la relation linéaire entre l’indice d’ennuagement déduit des images et le taux de transmission mesurée au sol.
6	Ana/Inv	Marullo et al 1987	Météosat-2	14 sites Italien	/	18-7-1983 31-1-1985	8-9 %	– Tient compte de l’effet de diffusion d’aérosols et de nuages.
7	Ana/Inv	Dedieu et al 1987	Météosat (Canal Vis)	France	250 x 250	Mars, May et Juillet 1979	20 %	– Tient compte de l’effet d’absorption de la vapeur. – Effets de la réflectivité de l’eau calme devant celle de sol négligés. – Détermination d’un seuil caractéristique dans le cas d’un ciel nuageux

Chapitre 3. Approche satellitaire

8	Phy/Inv	Delorme (GISTEL) 1987	Météosat 2	France	/	1987/1992	14-44 %	– Représentation de la brillance observée par une somme de deux composantes – Effets de la réflectivité de l'eau calme devant celle de sol négligés. – Détermination d'un seuil caractéristique dans le cas d'un ciel nuageux.
9	Phy/Inv	Mechaqrane et al 1993	Météosat-2 (Canal Vis)	2 sites Marocains	5 x 5	1985	21 % (H) 15 % (J)	– Tient compte de la diffusion de Rayleigh et des absorptions gazeuses par l'ozone et par la vapeur d'eau. – Effets d'absorption par les aérosols et par les nuages négligés.
10	Stat/Inv	Beyer et al (HELIOSAT-1) 1996	Météosat	Allemagne	/	May-Juin 1993	21 %	– Mêmes relations linéaires proposées par la première version d'HELIOSAT. – Utilisation d'une discrimination de la radiation rétrodiffusée selon les différents types de diffusion (sol, nuage et l'atmosphère). – Correction de la distance géométrique entre le soleil et le satellite.
11	Phy/Inv	Rigollier et al (HELIOSAT-2) 2000-2004	Météosat	35 sites Européens	/	Janvier 1995 Avril 1995 Juillet 1994	26 % 9 % 6 %	– Même principe physique que le modèle Héliostat-1. – Calibration de la radiance mesurée par le satellite. – Utilisation d'un modèle de ciel clair (ESRA) pour la correction du rayonnement rétrodiffusé par l'atmosphère.
12	Stat/Inv	Bachari et al 2001	Météosat (Vis et IR)	2 sites Algérie	/	1986 Mars 1987 Février 1998	4 %	– Transformation des images satellites brutes en images ennuagement. Puis les images ennuagement en images éclaircissement
13	Phy/Inv	Mueller et al (HELIOSAT-3) 2002	MSG GOME/ ATSR-2	Europe	100 x 100 50 x 50	/	/	– Basé sur le modèle du transfert radiative (RTM) utilisant l'information des paramètres atmosphériques délivré par MSG (nuage et vapeur d'eau) et par GOME/ASER-2 (ozone et aérosols)

Chapitre 3. Approche satellitaire

14	Direct	Janjai et al 2004	GMS-4 GMS-5 (Canal Vis)	Thaïlande	2,5 x 2,5	1993-1998	6-8 %	– Tient compte de l'effet d'absorption et la diffusion par l'aérosol et l'absorption par la vapeur d'eau, l'Ozone.
15	Phy/Inv	Martins et al (BRASIL-SR) 2007	GOES-EAST	8 sites Brazil	/	1995/2002	/	– Basé sur la détermination de la transmittance dans les doubles trajets soleil-sol et sol-satellite.
16	Ana/Inv	Cogliani et al (SOLARMET) 2007	Météosat-7	1 site Rome-Italien	3 x 3	1996 et 2002	6-7 %	– Tient compte de l'effet de diffusion d'aérosols et de nuages. – Utilisation du modèle du transfert radiative (SBDART) pour déterminer les différents paramètres du modèle.
17	Stat/Inv	Mefti et al (SICIC) 2008	Météosat	France Algérie	2,5 x 4	1994/199	12-32 %	– Répartition des angles d'élévation solaire en plusieurs classes caractéristiques. – Classification de l'indice d'ennuagement et de l'indice de clarté selon les six classes. – Ajustement des deux seuils pour la classification du ciel (clair, couvert et partiellement couvert).
18	Direct	Deneke et al (SICCS) 2008	AVHRR	Pays bas	/	1995/2000	17 (H) 10.8 (J) 4.7 (M)	– Tient compte de l'effet de diffusion d'aérosols, gaz atmosphériques et de nuages.
19	Direct	Oumbe et al (HELIOSAT-4) 2009	MSG	8 sites Europe Afrique	3 x 3	/	10-24 %	– Exploitation d'un code de transfert radiatif. – Fourni de manière opérationnelle et en temps quasi-réel pour chaque pixels les composantes directes et diffuse de l'éclairement. – Création d'une base de données qui contiendra les caractéristiques de rayonnement.

De même, **Cano et al.**, et **Diabaté et al.**, en Afrique et en Europe ont présenté un modèle d'estimation du rayonnement global avec une approche simple basée sur la détermination de l'albédo apparent[5][36]. Ce modèle donne naissance à la famille **HELIOSAT** qui subit des modifications multiples, traduites par une numérotation croissante [37][38][39][40]. Ces trois versions d'HELIOSAT, ont en commun le fait d'être divisées en trois parties en ce qui concerne la modélisation physique : Un modèle de ciel clair (**E.S.R.A**) pour décrire le rayonnement au niveau du sol quand il n'y a aucun nuage, un modèle pour le rayonnement par ciel fortement couvert et une méthode pour combiner les résultats de ces deux modèles avec une mesure de l'état optique nuageux pour estimer le rayonnement dans le cas général.

Ces modèles que l'on appelle les modèles inverses suivi par une autre nouvelle version **HELIOSAT-4** développé par **Oumbe et al.**, [41]. Cette dernière version est au contraire une modélisation directe des interactions rayonnement-sol-atmosphère, aboutissant à l'estimation du rayonnement. D'autres modèles directs basés sur le calcul de la transmittance atmosphérique tiennent compte des différents effets atmosphériques comme dans les études faites par **Deneke et al.**, et **Janjai et al.**, L'ensemble des données utiles à la détermination des paramètres intervenant dans le calcul de la transmittance atmosphérique résulte du traitement d'images satellites [42][43].

Tableau 3.3 – Avantages et inconvénients des modèles inverses [44].

	Statistique	Physique /Analytique
Avantages	– Opérationnel (efficace) – On n'a pas besoin de données météorologiques – L'étalonnage du satellite n'est pas nécessaire.	– Générale – On n'a pas besoin de données de rayonnement solaire au sol.
Inconvénients	– On a besoin de données de rayonnement solaire au sol – Manque de généralité	– On a besoin de données météorologiques – L'étalonnage du satellite est nécessaire

L'étude comparative fait par **Noia** en 1993, nous a permis de résumer les avantages et les inconvénients des modèles suscités (Tableau (3.3)) .

Avant de présenter les modèle adoptés, nous présentons quelques études de la littérature basés sur la détermination de l'indice d'ennuagement pour obtenir l'éclairement solaire atteint le sol.

5 Prise en compte de l'ennuagement

La plupart des méthodes inverses d'extraction du rayonnement solaire incident au sol sont divisées en deux parties : conversion de l'image satellitaire brute ou étalonnée en image d'ennuagement et conversion de l'indice d'ennuagement en éclairement. Ces méthodes suivent le principe selon lequel une variation de luminance perçue par le capteur est considérée comme une variation de la couverture nuageuse au-dessus du pixel.

5.1 Conversion de l'image (constituée de comptes numériques) en indice d'ennuagement

L'indice d'ennuagement n est encore appelé luminance normalisée [45] ou coefficient de couverture effective des nuages [46]. Cet indice résulte d'une comparaison entre ce qui est mesuré par le capteur à ce qui devrait être mesuré au-dessus de ce pixel si le ciel était clair (sans nuages). Il représente en quelque sorte l'atténuation optique de l'atmosphère et peut s'exprimer comme suit [41] :

$$n = \frac{Q - Q_{clair}}{Q_{nuage} - Q_{clair}} \quad (3.7)$$

où Q_{clair} et Q_{nuage} sont respectivement des quantités minimales et maximales des comptes numériques déterminés par l'analyse statistique des images satellitaire, le terme Q s'agit soit :

- de la radiance mesurée par le capteur ou réfléchi par l'atmosphère [30] [45][46].
- de l'albédo planétaire (la réflectance vue par le satellite) comme dans les méthodes **HELIOSAT** [5][36][37] [39][47] la méthode de **SICIC** [29] et la méthode d'OSSI SAF [48].
- directement des nuances de gris des images [49][50].

5.2 Conversion de l'indice d'ennuagement en éclairement

L'estimation de l'éclairement global horaire se fait :

- à partir de l'indice de clarté [5][36][51], soit lié par une relation affine et de façon empirique à l'indice d'ennuagement :

$$K_T = an + b \quad (3.8)$$

avec a et b sont les coefficients du régression.

Où l'indice d'ennuagement est divisé en trois classes grâce à deux seuils (n_c) et (n_a) qui sont ajustées en fonction de la hauteur du Soleil [29].

$$\begin{aligned} n \leq n_c &\rightarrow K_T = 1 - b_c(h_s)n(h_s) \\ n_c < n < n_o &\rightarrow K_T = 1 - [b_c(h_s) + b_{pc}(h_s)]n_c(h_s) - b_{pc}(h_s)n(h_s) \\ n \geq n_o &\rightarrow K_T = [b_c(h_s) + b_{pc}(h_s)]n_c(h_s) - [b_c(h_s) + b_o(h_s)]n_o(h_s) + b_o(h_s)n(h_s) \end{aligned} \quad (3.9)$$

où b_c , b_{pc} et b_o étant les paramètres de régression obtenus par ajustements linéaires des couples de données (K_T, n) . Ces indices sont définis comme le rapport d'éclairement global horizontal mesuré au sol G et l'éclairement solaire hors atmosphère E_{oh} :

$$K_T = \frac{G_h}{E_{oh}} \quad (3.10)$$

L'éclairement horaire est ensuite déterminé par une multiplication avec l'éclairement extraterrestre :

$$G = K_T E_{oh} \quad (3.11)$$

avec E_{oh} est l'irradiation extraterrestre.

- ou bien à partir des transmittances claire et nuageuse dérivées des paramètres climatologiques et de la position géographique [46].

$$G = E_{oh}[\tau_{clair}(1 - n) + \tau_{cloud}n] \quad (3.12)$$

avec $\tau_{clair} = G_{clair}/E_{oh}$ et $\tau_{cloud} = G_{cloud}/E_{oh}$

- ou bien à partir de l'indice de ciel clair [37] :

$$K_c = 1 - n \quad (3.13)$$

- ou par **Rigollier et al.**[39] (expliqué ci-après).

L'éclairement au sol G est ensuite déterminé par multiplication avec l'éclairement par ciel clair

$$G = G_{skc}k_c \quad (3.14)$$

- ou bien à partir de l'indice d'ennuagement donné par **Bachari et al.**[30] (expliqué ci-après).

Particulièrement dans notre travail, trois modèles ont été choisis. L'un statistique et les autres physiques, basé essentiellement sur l'estimation du rayonnement solaire en conditions de ciel clair. Ces modèles sont présentés dans la section suivante.

6 Présentation des modèles adoptés

6.1 Modèle de GISTEL

6.1.1 Historique du modèle

Le modèle **GISIEL** (Gisement Solaire par Télédétection) a été élaboré, pour la première fois, par **Delorme** en 1987 pour estimer le flux global d'irradiation solaire à l'échelle de la journée à partir d'images satellitaires [26]. Il a été appliqué :

- en France en 1987 à des images **B₂** collectées dans le canal visible par **Météosat-2** [26] et ensuite testé en 1992 sur des images **Wefax** reçues régulièrement à Carpentras, à raison de quatre images par jour [52][53].
- en Tunisie en 1992 à des images archivées **B₂**, à raison de trois images par jour [54] et des images **HR** durant la période de juin à juillet 1995 [55] et testé sur des images **Wefax** [56][57].
- en Algérie en 2007 à des images Météosat de type **B₂** et des images **HR** à raison de 9 images par jour et testé sur des images **Wefax**, collectées de mars à juin 1990 à raison de quatre images par jour [1]. Il a été aussi appliqué à des images **MSG** en 2011 [58].

6.1.2 Hypothèses du modèle

Pour établir le modèle **GISTEL**, certaines hypothèses ont été faites permettant de passer de l'image originale de brillances où une valeur radiométrique est associée à chaque pixel, à une image synthétique composée de valeurs réelles : image de coefficients de réflexion.

1. **Brillance** : la brillance est la somme de deux composantes : L'une est la composante atmosphérique liée essentiellement à la diffusion de Rayleigh par les molécules présentes dans l'atmosphère. L'autre est la composante de base liée à la réflexion du rayonnement solaire par le sol, les nuages ou les deux interceptés par le cône de visée du satellite dans les trois cas du ciel (clair, couvert et partialement couvert).
2. **Surfaces lambertiennes** : l'assimilation de la base de découpée par le cône de visée par une surface lambertienne (réflexion sans direction privilégiée).
3. **Cas particuliers** :
 - L'effet négligeable de la réflectivité de l'eau calme devant celle de sol. Dans ce cas, la brillance observée est égale à la composante atmosphérique.
 - A partir du seuil caractéristique du coefficient de réflexion, le rayonnement incident au sol vaut en moyenne de 20% de la valeur rayonnement reçu au sol en conditions de ciel clair au même endroit et même instant.

6.1.3 Principe de base du modèle

La méthodologie **GISTEL** est basée sur la comparaison de la brillance observée par le satellite pour chaque pixel avec deux brillances de références. Ces deux brillances seuils permettent de distinguer trois états atmosphériques correspondant à un ciel clair, un ciel partiellement couvert et un ciel complètement couvert par des nuages. La procédure de ce modèle est représentée par la figure (3.2).

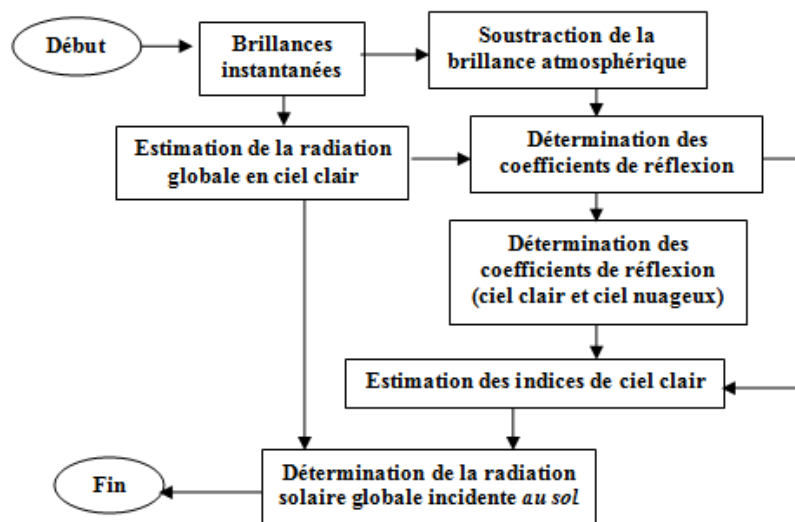


Figure 3.2 – Procédure d'estimation de l'éclairement solaire global au sol (modèle de GISTEL)

6.1.4 Formulation du modèle GISTEL

6.1.4.1 Brillance instantanée

La première hypothèse permet d'écrire la brillance mesurée par le satellite pour chaque pixel à un instant (j, h) comme suit :

$$B_i(x, y, j, h) = B_{ia}(x, y, j, h) + B_{ib}(x, y, j, h) \quad (3.15)$$

où B_{ia} est la composante atmosphérique et B_{ib} est la composante de base. Cette dernière composante dépend de la composition, de la couleur et de la texture de la base, de la réponse spectrale du détecteur mais aussi de la position relative du Soleil et du satellite par rapport à la surface au sol. La deuxième hypothèse nous fait donc ressortir la contribution du rayonnement solaire sur la valeur radiométrique de chaque pixel. On peut donc écrire sous la forme d'un produit de quatre facteurs :

$$B_{ib}(x, y, j, h) = C_s G_{skc}(x, y, j, h) T_v(\theta_v) \rho_{ib}(x, y, j, h) \quad (3.16)$$

où C_s est le coefficient de calibration du détecteur, ρ_{ib} est le coefficient de réflexion de la base, G_{skc} et T_v sont respectivement le rayonnement global en condition de ciel clair et le coefficient de transmission d'un rayonnement direct entre le sol et le satellite (ou encore appelé, transmittivité atmosphérique sol-satellite). Ces deux facteurs sont déterminés par un modèle symétrique adopté par l'Organisation Mondiale de la Métrologie (O.M.M.).

D'après les deux équations (3.15) et (3.16), la brillance délivrée par le capteur peut être écrite comme suit :

$$B_i(x, y, j, h) = B_{ia} + C_s G_{skc}(x, y, j, h) T_v(\theta_v) \rho_{ib}(x, y, j, h) \quad (3.17)$$

L'évolution de la distribution de base des brillances observées en conditions de ciel clair au niveau de pixels d'images Météosat localisés en mer, montre que la valeur de la brillance atmosphérique B_{ia} varie entre 14 et 22 selon l'heure de prise de vue, la valeur la plus fréquente à 12h00 UTC, étant 16 [1].

6.1.4.2 Coefficients de réflexion de base

Pour une image à l'heure h d'une journée j de l'année, le coefficient de réflexion pour chaque pixel des coordonnées (x, y) est donné par la relation suivante :

$$\rho_{ib}(x, y, j, h) = \frac{B_i(x, y, j, h) - B_{ia}}{C_s G_{skc}(x, y, j, h) T_v((x, y, j, h))} \quad (3.18)$$

Les coefficients de réflexion sont calculés pour les deux conditions du ciel :

- En conditions de ciel clair, les rayons solaires atteignent le sol avant de repartir vers le

satellite. Dans ce cas, la surface découpée peut être terrestre ou maritime et nous parlerons alors *de coefficient de réflexion ciel clair* ρ_m .

- En condition de ciel totalement couvert, les rayons atteignant le satellite résultent de la réflexion sur les sommets des nuages opaque. On parlera alors de *coefficient de réflexion ciel couvert* ρ_M .

6.1.4.3 Indice de ciel clair

Soit G , la valeur de l'éclairement solaire global (estimé ou mesuré) et G_{skc} , sa valeur maximum obtenue par ciel clair. L'indice de ciel clair est par définition :

$$K_c(x, y, j, h) = \frac{G(x, y, j, h)}{G_{skc}(x, y, j, h)} \quad (3.19)$$

Pour chacune des images, la comparaison, pixel à pixel, des coefficients de réflexion $\rho(x, y, j, h)$ avec ρ_m et ρ_M permet de distinguer trois états du ciel permet de distinguer. Ensuite, l'indice de ciel clair est estimé à partir d'un système de trois équations, soit :

$$\begin{aligned} \rho_{ib}(x, y, j, h) \leq \rho_m(x, y) &\rightarrow K_c(x, y, j, h) = 1 \\ \rho_m(x, y) < \rho_{ib}(x, y, j, h) < \rho_M(x, y) &\rightarrow K_c(x, y, j, h) = 1 - (1 - K_o) \frac{\rho_{ib}(x, y, j, h) - \rho_m(x, y)}{\rho_M(x, y) - \rho_m(x, y)} \\ \rho_{ib}(x, y, j, h) \geq \rho_M(x, y) &\rightarrow K_c(x, y, j, h) = K_o \end{aligned} \quad (3.20)$$

où K_o est la fraction d'éclairement reçu par ciel complètement couvert lorsque seul le rayonnement diffus atteint le sol. Dans ce cas, on a choisi la valeur retenue par **Delorme et al.** $K_o = 0,20$ [53].

6.1.4.4 Éclairement solaire global

Pour chaque pixel, l'éclairement solaire G est calculé par une multiplication du K_c par la valeur théorique du rayonnement en conditions de ciel clair

$$G(x, y, j, h) = K_c(x, y, j, h) G_{skc}(x, y, j, h) \quad (3.21)$$

6.2 Modèle de BACHARI

6.2.1 Définition du modèle

Le modèle de **Bachari et al.**, a été élaboré à partir des images du format **B₂** (durant deux mois de l'année 1998 et trois mois de l'année 2000) et **B₁** (durant toute l'année de 1986 et les trois premiers mois de l'année 1987) du satellite Météosat, collectées dans le visible et infrarouge pour estimer l'éclairement global au sol à l'échelle horaire et journalière. Il a été appliqué à deux sites algériens à savoir : Oran et Tamanrasset [30].

6.2.2 Principe de base du modèle

La méthodologie est basée sur la transformation des images brutes en images d'ennuagement. Ces images d'ennuagement sont ensuite transformées en images de potentiel énergétique à différents niveaux de gris. On peut schématiser cette procédure d'estimation de l'éclairement global par la figure (3.3).

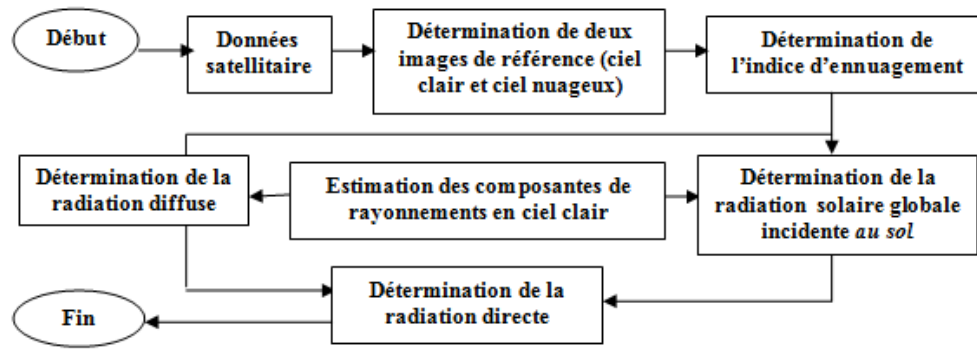


Figure 3.3 – Procédure d'estimation de l'irradiation solaire globale au sol (modèle de Bachari et *al.*)

6.2.3 Formulation du modèle de BACHARI

6.2.3.1 Indice d'ennuagement

Pour chaque pixel (x, y), le taux de couverture d'un pixel par les nuages est défini par la relation précédente (3.6). Précisons que le terme Q correspond ici à la brillance ou le compte numérique enregistré pendant le jour à l'heure et les termes Max et Min sa valeur maximale (B_n) et minimale (B_c) déterminées pendant tout le mois pour le même pixel. Cette équation devient donc

$$n^*(x, y, j, h) = \frac{B_i(x, y, j, h) - B_n(x, y)}{B_c(x, y) - B_n(x, y)} \quad (3.22)$$

Bachari et al., ont ajusté la relation précédente d'après une analyse bispectrale en utilisant le contraste entre les radiances mesurées en infrarouge et les différents albédos calculés à partir des images visible.

$$n(x, y, j, h) = [1 - \frac{\rho_g}{\rho_c}] n^*(x, y, j, h) \quad (3.23)$$

où ρ_c est l'albédo du nuage et ρ_q est l'albédo du sol.

6.2.3.2 Calcul de l'albédo de la surface

L'albédo de la surface est le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface à l'énergie solaire incidente. Cet albédo est très variable selon la nature et l'état de la surface (et selon la longueur d'onde incidente et la hauteur du Soleil). Cet albédo peut être défini par :

$$\rho_g(x, y) = \frac{E_{sat}E_{atm}}{G_{skc}(x, y, i, h)T_v(\theta_v) + s(E_{sat}E_{atm})} \quad (3.24)$$

6.2.3.3 Calcul de l'albédo du nuage

La diffusion de la lumière visible qui rencontre les nuages entraine la réflexion d'une partie significative du rayonnement solaire visible vers l'espace. La présence de nuages modifie sensiblement l'importance des composantes du rayonnement (diffus et direct), les nuages jouant un rôle de milieu diffusant. Ce phénomène est l'origine d'albédo des nuages qui représente une part importante de l'albédo total terrestre. Cet albédo des nuages varie de 0,4 à 0,9 selon leur nature, leur épaisseur, la hauteur du Soleil, etc. Elle est définie par la relation ci-dessous :

$$\rho_c(x, y) = \frac{E_{sat}}{G_{skc}(x, y, j, h)T_v(\theta_v)} \quad (3.25)$$

où E_{sat} est la radiance mesurée par le satellite, E_{atm} est la radiance atmosphérique, s est l'albédo sphérique, G_{skc} et T_v sont respectivement la radiation par ciel clair et la transmittivité atmosphérique totale vers le satellite utilisant le modèle de l'O.N.M [59].

6.2.3.4 Composants des éclairagements

La présence des nuages dans la double trajectoire du rayonnement soleil - sol et sol - satellite est très complexe à mettre en évidence. Après une analyse statistique des données mesurées au sol, **Bachari et al.**, ont proposé les relations suivantes :

– **Éclairement diffus**

$$D(x, y, j, h) = D_{skc}[1 + 0.65K(x, y, j, h)n(x, y, j, h) \exp(2.5n(x, y, j, h))] \quad (3.26)$$

– **Éclairement global**

$$G(x, y, j, h) = G_{skc}[1 + n(x, y, j, h)] + I_{skc}[1 - \exp(0.225n(x, y, j, h))] \quad (3.27)$$

avec D_{skc} et I_{skc} les rayonnements diffus et directs en condition de ciel clair et K l'anisotropie du diffus définis par la relation :

$$K(x, y, j, h) = \frac{\sin(\phi)}{K_d + \sin(\phi) + (K_c - 1)(1 - Y)} \quad (3.28)$$

où ϕ est latitude du lieu, K_d et K_c sont respectivement la part de radiation diffuse sur la radiation directe et l'indice de clarté en ciel clair.

- **Éclairement direct** est calculé à partir des irradiances globales et diffuses obtenues par les formules (3.26) et (3.27).

$$I(x, y, j, h) = \frac{G(x, y, j, h) - D(x, y, j, h)}{\cos(\theta_s)} \quad (3.29)$$

où θ_s est l'angle zénithal solaire.

Remarque : Dans notre travail, nous allons estimer que l'éclairement global car nous n'avons pas des mesures pour les autres composantes d'éclairements.

6.3 Modèle d'HELIOSAT-2

6.3.1 Définition du modèle

Le modèle physique noté **HELIOSAT-2** de **Rigollier et al.**, permet l'estimation du rayonnement solaire en tout point géographique de l'Europe à partir des images prises dans le canal visible de Météosat [39]. Son modèle origine est le modèle statistique **HELIOSAT-0**, élaboré par la première fois par **Cano et al.**, en 1986.

6.3.2 Principe de base du modèle

Ce modèle est basé sur le même principe physique appliqué par le modèle **HELIOSAT-1**, sauf que les radiances mesurées par le satellite sont calibrées. Il consiste à déterminer l'indice de ciel clair à partir de l'indice d'ennuagement déduit des images satellitaires. Puis un modèle en ciel clair (**E.S.R.A** [21]) est appliqué pour la correction du rayonnement rétrodiffusé par l'atmosphère. La relation entre ces deux facteurs permet alors d'avoir le rayonnement global incident au sol. On peut schématiser cette procédure d'estimation de l'irradiation globale à partir de la figure (3.4).

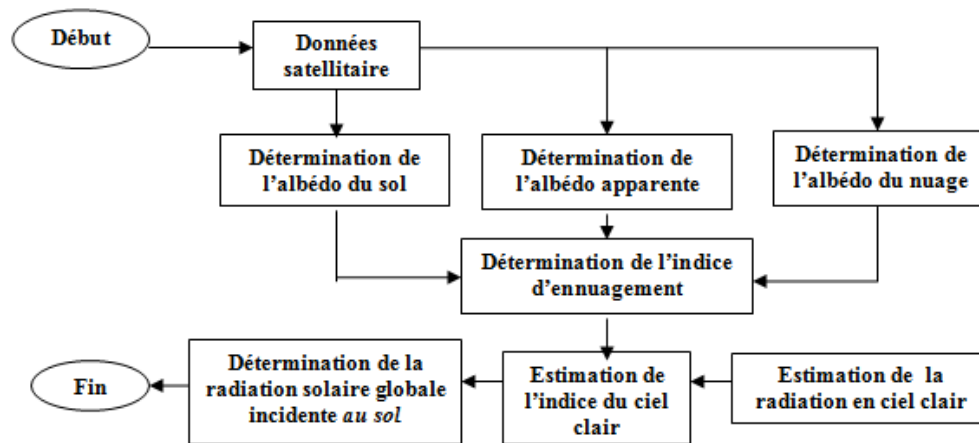


Figure 3.4 – Procédure d'estimation de l'éclairement solaire global au sol (modèle d'HELIOSAT-2).

6.3.3 Formulation du modèle HELIOSAT-2

6.3.3.1 Indice d'ennuagement

Pour chaque pixel (x, y) , le taux de couverture d'un pixel par les nuages est défini par la relation (3.6). Précisons que le terme Q correspond ici à l'albédo apparent observé par satellite

(ρ) calculé pour chaque pixel pendant le jour à l'heure. Donc, cette équation devient :

$$n(x, y, j, h) = \frac{\rho(x, y, j, h) - \rho_g(x, y)}{\rho_c - \rho_g(x, y)} \quad (3.30)$$

où ρ_g est l'albédo du sol et ρ_c est l'albédo moyen des nuages déterminées pendant tout le mois pour le même pixel.

6.3.3.2 Albédo apparente

L'albédo apparent est déterminé à partir des comptes numériques donné par l'image Météosat. A l'heure h et pour chaque pixel (x, y) de l'image,

$$\rho(x, y, j, h) = \frac{\pi E_{sat}(x, y, j, h)}{I_{0met} \epsilon \cos(\theta_s)} \quad (3.31)$$

où I_{0met} est le constant solaire dans le canal visible, ϵ , le facteur de correction de la distance moyenne Terre-soleil, θ_s est l'angle azimutale et E_{sat} est la radiance mesurée par le satellite.

Cette réflectance peut être écrite en fonction de l'angle zénithal du soleil θ_s et de satellite θ_v , la déférence entre les angles azimutaux du soleil et du satellite ψ et l'albédo apparente du sol ρ_g^* :

$$\rho(x, y, j, h) = \rho_{atm}(\theta_s, \theta_v, \psi) + \rho_g^*(x, y) T_s(\theta_s) T_v(\theta_v) \quad (3.32)$$

où T_s et T_v sont les coefficients du transmission de l'atmosphère vers le sol et vers le satellite respectivement. ρ_{atm} , la réflectance intrinsèque de l'atmosphère est déterminée par la relation suivante :

$$\rho_{atm}(\theta_s, \theta_v, \psi) = \frac{\pi E_{atm}(\theta_s, \theta_v, j, h)}{I_{0met} \epsilon \cos(\theta_s)} \quad (3.33)$$

6.3.3.3 Albédo apparent du sol

Utilisant l'équation (3.32), on peut définir l'albédo apparente du sol par :

$$\rho_g^*(x, y) = \frac{\rho(x, y, j, h) - \rho_{atm}(\theta_s, \theta_v, \psi)}{T_s(\theta_s) T_v(\theta_v)} \quad (3.34)$$

L'albédo du sol s'obtient en reprenant la valeur minimale de l'albédo apparente du sol pour toute la séquence.

6.3.3.4 Albédo apparente des nuages

L'albédo apparent du nuage est défini par **Cano et al.** par la valeur typique de la brillance du nuages

$$\rho'_c = \frac{\rho_{eff}(x, y) - \rho_{atm}(\theta_s, \theta_v, \psi)}{T_s(\theta_s) T_v(\theta_v)} \quad (3.35)$$

où ρ_{eff} est l'albédo efficace. Cet albédo est défini comme suit

$$\rho_{eff}(x, y, j, h) = 0.78 - 0.13[1 - \exp(-4 \cos(\theta_s)^5)] \quad (3.36)$$

6.3.3.5 Indice du ciel clair

Pour chacune des images, la comparaison, pixel à pixel, de l'indice d'ennuagement par les trois seuils proposé par **Rigollier et al**, permet d'estimer l'indice de ciel clair à partir d'un système de quatre équations suivantes :

$$\begin{aligned} n(x, y, j, h) < -0.2 &\rightarrow K_c(x, y, j, h) = 1.2 \\ -0.2 < n(x, y, j, h) < 0.8 &\rightarrow K_c(x, y, j, h) = 1 - n(x, y, j, h) \\ 0.8 < n(x, y, j, h) < 1.1 &\rightarrow K_c(x, y, j, h) = 2.0667 - 3.667n(x, y, j, h) + 1.667(n(x, y, j, h))^2 \\ n(x, y, j, h) > 1.1 &\rightarrow K_c(x, y, j, h) = 0.05 \end{aligned} \quad (3.37)$$

6.3.3.6 Éclairement global

L'éclairement solaire global est obtenu à partir de calcul de l'éclairement en conditions de ciel clair appliquant la relation (3.21).

7 Conclusion

L'exploitation des images satellitaires brutes ou étalonnées en temps réel ou quasi-réel montre la fiabilité de l'extraction du rayonnement solaire incident au sol. La plupart des méthodes existantes ont pour principe de considérer qu'une variation de luminance perçue par le capteur est une variation de la couverture nuageuse au-dessus du pixel. Ces modèles permettent d'évaluer le rayonnement solaire au sol à l'échelle horaire et journalier.

Le chapitre suivant portera sur l'application des modèles au images satellite.

Application des modèles d'estimation du rayonnement solaire à partir des images satellites

La surface de la terre n'absorbe pas totalement le rayonnement solaire incident, une partie de ce rayonnement est renvoyée (réflexion ou albédo) vers l'atmosphère et l'espace, en étant de nouveau diffusée et absorbée lors de sa traversée de l'atmosphère. Le réchauffement du sol et l'énergie stockée en surface dépendent de cette partie absorbée. Certains satellites tels que Météosat, sont équipés d'instruments pour mesurer le rayonnement réfléchi par la Terre et les nuages, de bandes spectrales situées dans le visible et dans l'infrarouge.

1 Principe

Une image numérique Météosat est une matrice de l lignes et de c colonnes. Une matrice de 5000 lignes et 5000 colonnes définit le disque terrestre entier dans le canal visible, tandis que dans les canaux infrarouges et vapeur d'eau, il n'y a que 2500 lignes et 2500 colonnes (selon les résolutions présentées dans le Chapitre 2). Un élément de l'image (pixel), correspond à un élément de la surface terrestre dont les coordonnées géographiques sont bien définies, moyennant un certain nombre de corrections (navigation, correction géométrique) la rendant superposable à une carte ou à une image de référence.

A chaque pixel est affectée une valeur radiométrique de 0 à 255 (codée sur 8 bits) que nous appelons brillance du pixel. Cette brillance est fonction de la radiation incidente, de l'albédo du sol et de la réflexion atmosphérique. Le problème qui se pose est de relier la brillance d'un élément de la surface du sol au rayonnement solaire qui y parvient. Le calcul de ce rayonnement consiste alors à déterminer la brillance par ciel clair et par ciel nuageux.

Pour réaliser ce travail, nous utilisons des images dans le canal visible et infrarouge prises par le satellite Météosat-1 durant le mois d'avril 1997 qui couvre une grande partie du nord de l'Afrique.

2 Méthodologie du travail

La méthodologie adoptée pour estimer le rayonnement solaire global au sol suit les étapes suivantes :

- Extraction de la zone d'étude sur les images en faisant correspondre les points de coordonnées géographiques (latitudes et longitudes) au sol aux coordonnées des pixels (lignes et colonnes) sur l'image satellite.
- Détermination du premier point de l'image
- Localisation de tous les sites faisant l'objet de l'étude sur l'image satellites.
- Extraction des valeurs des comptes numériques de chaque site d'étude.
- Conversion des comptes numériques en radiances.
- Calcul des différents paramètres astronomiques du Soleil.
- Estimation du rayonnement solaire en condition du ciel clair.
- Calcul des différents paramètres d'entrées du modèle adopté.
- Estimation du rayonnement solaire global en tout point et pour chaque instant de prise de vues des images satellitaires.

Cette méthodologie est résumée par l'organigramme de la figure (1.1), regroupée en 5 sous-modèles.

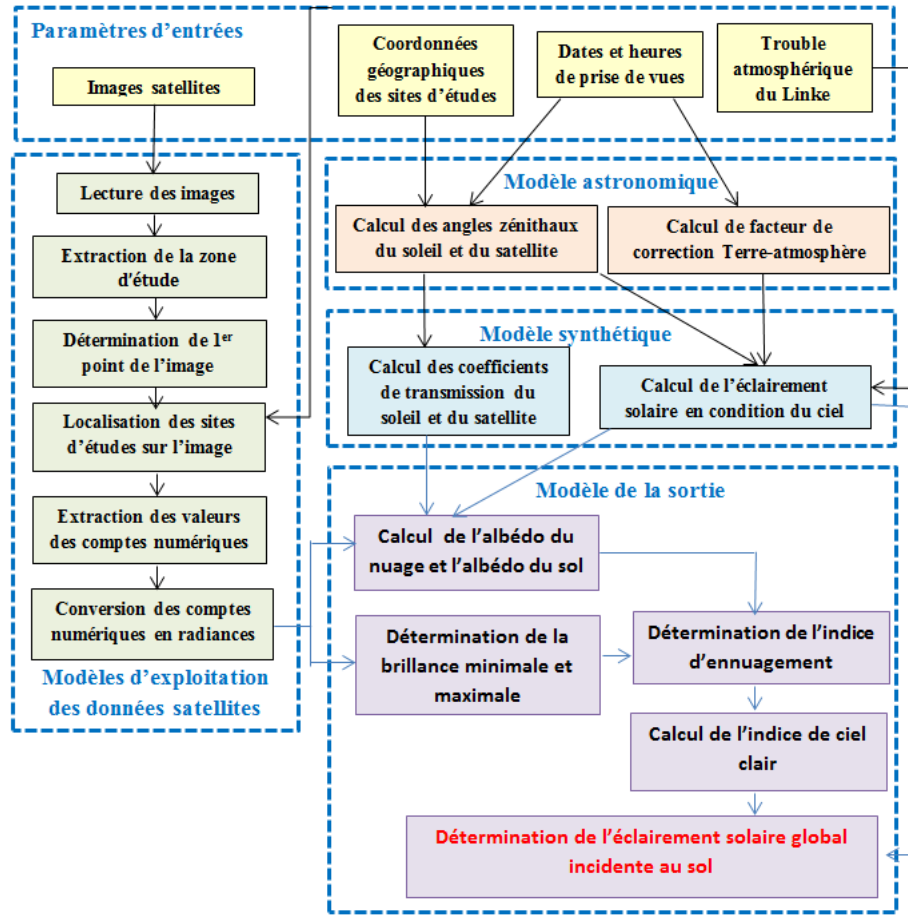


Figure 4.1 – Organigramme du travail.

2.1 Paramètres d'entrées

Nous disposons d'une séquence de 16 jours du mois d'avril 1997 à raison de trois images par jour correspondant respectivement à 9h00, 12h00 et 15h00 (T. U.). Nous adoptons les notations suivantes :

- Un jour quelconque de la séquence noté j , j variant de 1 à 16
- L'heure de la prise de vue notée h .
- Un pixel de brillance (nombre de 0 à 255 sur l'image numérique), défini par sa ligne x , et sa colonne y pour un jour j à l'heure h .

2.1.1 Trouble de Linke

Le facteur de trouble de Linke permet de comparer l'atmosphère réelle à l'atmosphère idéale où n'existent que la diffusion Rayleigh par les molécules d'azote, d'oxygène et l'absorption par l'ozone (Chapitre 1). Sa valeur dépend de la zone géographique de l'étude (zone industrielle ou montagneuse, rurale ou urbaine) et varie sensiblement au cours de l'année. La connaissance de ce facteur en tout point pour chaque site est difficile à déterminer, nous avons utilisé les valeurs moyennes extraites de la base de données **SoDa** précisée dans le tableau (4.1).

Tableau 4.1 – Trouble de Linke

	Alger	Mostaganem	Oran	Djelfa	Ghardaïa	Tamanrasset	Béchar	Adrar
Trouble du Link	4	3.4	3.3	3.4	3.9	3.4	3.7	3.7
Type de la zone	urbain	urbain	urbain	urbain	rural	rural	rural	rural

2.2 Modèle d'exploitation des données satellitaires

Le rôle de ce modèle est d'extraire les informations utiles pour la détermination des paramètres d'entrées du chaque modèle adopté pour le traitement d'images satellitaire. Il assure la correspondance géométrique entre l'image et la surface au sol et permet de calculer les coordonnées géographiques (longitude et latitude) de chaque pixel.

2.2.1 Extraction de la zone d'étude

Comme nous avons vu dans le premier chapitre, les images utilisées sont de format DZ, couvrent une grande partie du Nord de l'Afrique et sud de l'Europe (47° N et 19° S ; -16° E et 16° O), tandis que notre zone d'étude se situe entre 38°N et 18°S ; 12°E et 10° O. La conversion faisant correspondre les points de coordonnées géographiques (latitudes et longitudes) au sol aux coordonnées de pixels (lignes et colonnes) sur l'image satellite se fait à partir des programmes du centre de Darmstadt fournis par **EUMETSAT** [w8].

2.2.2 Détermination du premier point de l'image

Suivant l'organigramme décrit dans l'annexe C, nous avons déterminé le premier point de l'image. Le couple noté (x_0, y_0) a pour valeurs (4144, 2922) pour le canal Visible et (2072, 1461) pour le canal Infrarouge.

2.2.3 Localisation des sites d'études sur l'image satellitaire

Vu la difficulté d'obtenir des mesures, nous avons sélectionné un site représentatif de chaque zone climatique du territoire national (Figure (4.2)).

- Alger, Mostaganem et Oran comme sites côtiers ;
- Djelfa dans les steppes ;
- Ghardaïa et Tamanrasset au Nord et au sud Sahara Adrar et Béchar dans l'Ouest.

Le tableau (4.2) présente les coordonnées géographiques, latitudes et longitudes des lieux ainsi que les coordonnées des pixels de chaque site d'étude.

Tableau 4.2 – Correspondance entre les coordonnées géographiques et les coordonnées de l'image.

Site	Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Image Vis		Image IR	
					n°de colonne	n°de ligne	n°de colonne	n°de ligne
1	Alger	36.71	3.22	25	16	544	8	272
2	Mostaganem	35.88	0.12	137	426	44	213	22
3	Oran (USTO)	35.63	- 0.60	90	50	400	25	200
4	Djelfa/Tletst	34.33	3.38	1180	556	102	278	51
5	Ghardaïa	32.40	3.30	468	166	564	87	278
6	Tamanrasset	22.8	5.43	1362	566	658	283	333
7	Béchar/Ouakda	31.5	-2.25	809	328	204	164	104
8	Adrar /Touat	27.82	-0.18	279	414	342	207	177

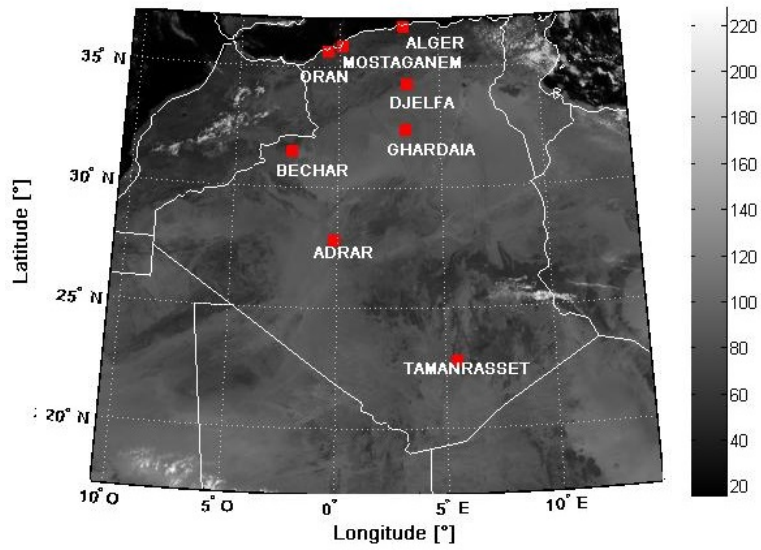


Figure 4.2 – Localisation des sites d'étude sur l'image satellitaire.

2.2.4 Conversion des comptes numériques en radiance

Le satellite reçoit le rayonnement qui se propage dans sa direction et mesure donc une luminance. Or, les détecteurs du satellite Météosat n'étant pas étalonnés, les comptes numériques fournis ne représentent pas directement la radiance reçue. Ainsi, un calibrage des images satellites est nécessaire pour lier les comptes numériques de chaque pixel à la quantité d'énergie reçue par le satellite. Dans le modèle de transfert radiatif tenant compte des propriétés optiques de l'atmosphère et de la surface du sol, la radiance mesurée par le satellite est exprimée par [w8].

$$E_{sat} = \pi C_s (B_i - B_0) \quad (4.1)$$

avec B_i est le compte numérique (brillance) du pixel, $B_0 = 4.29$ est l'offset et $C_s = 0.586$ est la constante de calibration du détecteur [W/m² sr].

2.3 Modèle astronomique

Les conditions géométriques du système soleil-sol-satellite se calculent à partir des formules astronomiques présentées dans le chapitre 1 en introduisant les coordonnées géographiques (longitude et latitude) et la date d'acquisition de l'image (heure et jour).

2.3.1 Détermination des positions relatives du Soleil et du satellite

Nous avons obtenu l'angle horaire par l'utilisation de l'équation (1.7), la déclinaison en appliquant la relation (1.8), puis la hauteur solaire donnée par l'équation (1.9). La figure (4.3) représente la hauteur solaire en fonction du temps pendant le 7^{ème} jour de la séquence.

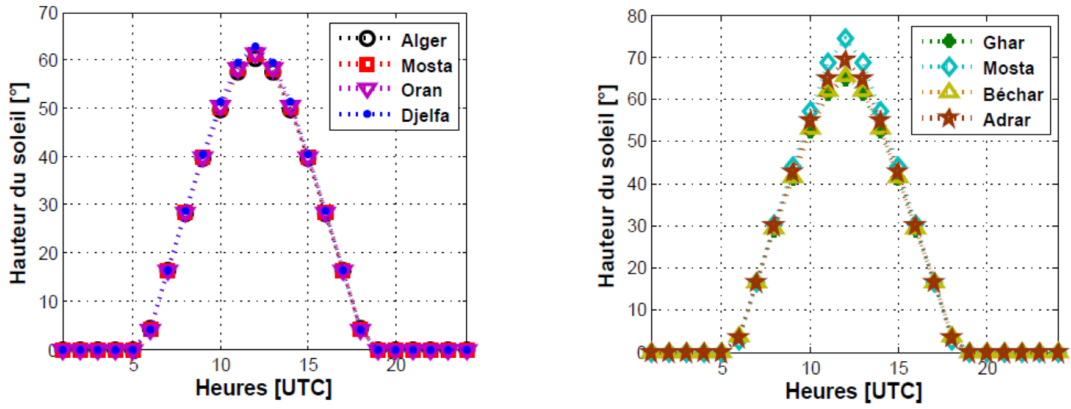


Figure 4.3 – Variation de la hauteur du Soleil pendant une journée typique pour les différents sites d'étude (le 7 avril)

Dans un premier temps, on remarque que les graphes obtenus après simulation donnent des angles de hauteur solaires formant des gaussiennes centrées à une même heure, quelle que soit la journée faisant l'objet du calcul. On retrouve pour ces différentes gaussiennes des amplitudes et des largeurs variables suivant la date et le site considéré.

La hauteur du soleil peut atteindre un angle de l'ordre de 75° pour le site du Tamanrasset, 70° pour le site d'Adrar et de 65° pour les sites de Béchar et Ghardaïa, et 60° pour les autres trois sites.

2.4 Modèle synthétique

Ce modèle atmosphérique permet le calcul de l'éclairement théorique (global, direct et diffus) en conditions de ciel clair et le coefficient de transmission atmosphérique (T_s) à partir facteur de trouble de Linke (T_L), de l'angle zénithal du soleil et l'angle de visée.

2.4.1 Estimation de l'éclairement solaire en ciel clair

Les modèles adoptées utilisent les formules de l'**W.O.M** (World Meteorological Organisation) [56] et **E.S.R.A** (European Solar Radiation Atlas) [21] pour calculer l'éclairement solaire

en conditions de ciel clair (Annexe D).

2.4.1.1 Influence du trouble du Linke

Les formules du rayonnement en conditions de ciel clair utilisées dépendent de l'angle zénithale et des valeurs du facteur de trouble du Linke. Dans la figure (4.4), nous avons choisi trois valeurs du trouble du Linke comprises entre 3 et 5 considérées comme normales.

La figure (4.4) illustre l'influence du trouble du Linke sur l'éclairement global dans le site d'Oran. Nous remarquons que le rayonnement solaire global varie avec la variation d'unité du trouble du Linke,

- de l'ordre de 60 W/m^2 pour le modèle d'E.S.R.A ;
- de l'ordre de 50 W/m^2 pour le modèle d'O.M.M.

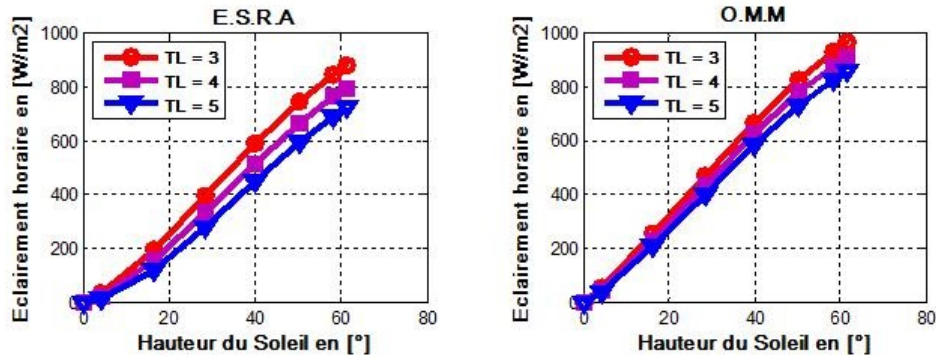


Figure 4.4 – Influence du trouble de Linke sur les diagrammes de rayonnements.

La comparaison entre ces deux modèles montre qu'il y a une différence proche de 100 W/m^2 pour chaque cas de T_L , cette différence est justifiée par la multiplication par 1,2 faite dans le modèle HELIOSAT-2 (voir la première équation (3.36)). Les modèles d'estimation de l'éclairement solaire global incident au sol étudiés s'appuient sur le calcul du rayonnement en conditions de ciel clair. Ainsi, la précision de l'estimation dépend de la quantité du modèle de ciel clair utilisé. Pour ce faire nous avons choisi le modèle de ciel clair **E.S.R.A**, l'exemple ci-dessus justifie notre choix de modèle et les valeurs de trouble de Linke.

Exemple de justification de notre choix : Considérant un jour de ciel clair issu de la séquence étudiée. La figure (4.5) montre l'évolution du rayonnement en ciel clair pour $T_L = 3.3$ appliqué aux deux modèles de ciel clair, nous avons choisi les valeurs extraites de la base des données Soda [w7]. Les résultats des simulations sont comparés aux valeurs mesurées de même jour.

D'après les comparaisons pour ce jour précis (Figure (4.5)), nous remarquons que le modèle de l'**E.S.R.A** se rapproche des mesures que l'autre et notre choix pour les valeurs du trouble de Linke est valable. Cette comparaison entre les modèles de ciel clair permet de conclure que le modèle d'E.S.R.A mieux que l'autre. Il sera adopté dans notre modèle.

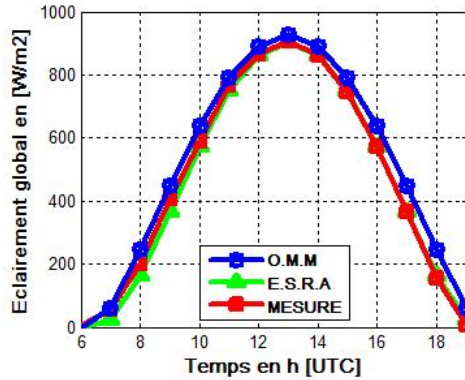


Figure 4.5 – Évaluation de l'éclairement solaire pour la station d'Oran le 12 avril 1997.

2.5 Modèle de sortie

Ce modèle permet d'obtenir l'éclairement solaire au tout point et pour chaque instant de prise de vues, pour toutes conditions d'ennuagement.

Nous avons vu précédemment (chapitre trois) que le calcul de l'éclairement se fait :

- directement à partir de calcul de l'indice d'ennuagement (modèle de **Bachari et al**).
- ou bien à partir de calcul de l'indice de ciel clair (modèle de **Régolier et al** et **Delorme et al**).

Ces modèles sont pris comme références pour apprécier notre modèle proposé qui tout simplement une combinaison entre deux, appelé GISMOD (GIStel MODifie). Il sera expliqué dans le paragraphe suivant.

2.5.1 Présentations du modèle proposé

Une analyse préliminaire des images Météosat de notre base de données fait apparaître trois type d'atmosphère analogues à ceux considérés dans **GISTEL**, à savoir, ciel clair, ciel partiellement couvert et ciel complètement couvert. Cependant, pour tenir compte de la variabilité horaire et journalier du rayonnement solaire, ces trois catégories d'atmosphère sont identifiées en divisant l'ensemble des indices d'ennuagement en trois classe grâce a deux seuils (B_c et B_n). Suivant l'état de ciel, nous pouvons alors de calculer l'indice de ciel clair (Figure (4.6)). Ce dernier nous permet de calculer l'indice d'éclairement global incident aux sol. la section suivante explique clairement les étape de calcul qui sont :

- Détermination des images de références en conditions de ciel clair et ciel nuageux.
- Calcul de l'indice d'ennuagement en utilisant les images de canal infrarouge.
- Ajustement de l'indice d'ennuagement par le calcul de l'albédo du sol ρ_g et l'albédo du nuage ρ_c dans le visible.
- Calcul de l'indice de ciel clair.
- Évaluation de l'irradiation solaire horaire et journalière issus de la séquence étudiier.

2.5.1.1 Indice d'ennuagement

Pour chaque pixel (x, y) , l'indice d'ennuagement est défini par la relation (3.23) qui nous rappelons :

$$n(x, y, j, h) = [1 - \frac{\rho_g}{\rho_c}] n^*(x, y, j, h) \quad (4.2)$$

où $n^*(x, y, j, h)$ est l'ennuagement calculé dans l'infrarouge par la méthode de brillance maximale et minimale.

2.5.1.2 Indice de ciel clair

Pour chaque image, la comparaison pixel à pixel entre la brillance observée $B_i(x, y, j, h)$ et les deux brillances de référence (B_c et B_n) permet de distinguer les trois états du ciel (Figure (4.6)). Les nouvelles relations établies sont les suivantes :

– **Ciel clair**

$$B_i(x, y, j, h) \leq B_c(x, y) \rightarrow K_c(x, y, j, h) = 1 + K_o \quad (4.3)$$

– **Ciel partiellement couvert**

$$B_c(x, y) < B_i(x, y, j, h) < B_n(x, y) \rightarrow K_c(x, y, j, h) = (1 + K_o) - n(x, y, j, h) \quad (4.4)$$

– **Ciel totalement couvert**

$$B_i(x, y, j, h) \geq B_n(x, y) \rightarrow K_c(x, y, j, h) = K_o \quad (4.5)$$

K_o représente la fraction d'éclairement reçu par ciel complètement couvert où seul le rayonnement diffus atteint le sol. Dans ce cas $K_o = 0.20$.

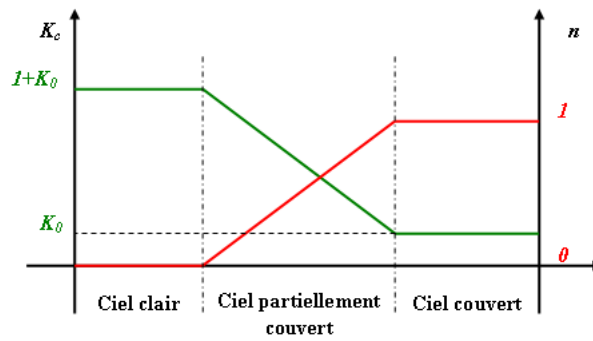


Figure 4.6 – Relation entre l'indice d'ennuagement et l'indice de ciel clair.

2.5.1.3 Éclairement solaire global

Après avoir calculer l'indice de ciel clair K_c , nous pouvons maintenant calculer l'éclairement global $G(x, y, j, h)$ par une multiplication du par la valeur théorique du rayonnement en conditions de ciel clair G_{skc} .

2.5.2 Application du modèle proposé aux images Météosat

2.5.2.1 Obtention des images références ciel clair et ciel nuageux

Dans le canal visible, la brillance par ciel clair et la brillance par ciel nuageux sont définies respectivement par les brillances minimales et maximales des pixels observées au cours de la séquence considérée. A l'inverse, les brillances par ciel clair sont les brillances maximales dans le canal infrarouge (Chapitre 2).

Appliquant la procédure de trie minimum/maximum pour les image visible/infrarouge [30], nous construisons alors pour chaque canal deux images composites composées de pixels de brillances maximales d'une part, minimales d'autre part : ce sont respectivement les images références ciel nuageux et ciel clair.

Exemple d'application : Les quatre images suivantes représentent image référence ciel nuageux et image référence ciel clair calculées pour la séquence d'étude pour les canaux visibles et infrarouges. Les figures (4.7) et (4.8) représentent ce type de calcul.

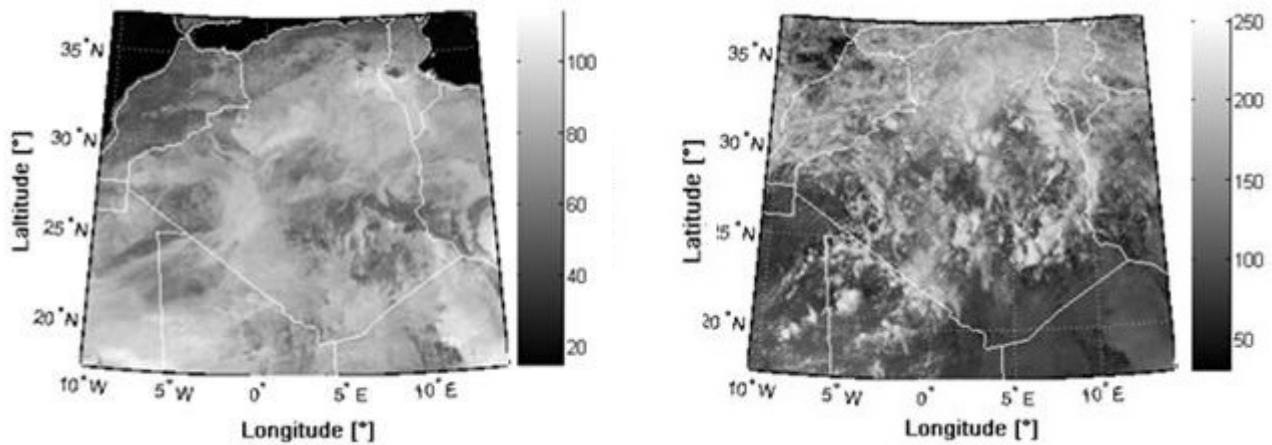


Figure 4.7 – Images références dans le canal visible, ciel clair à gauche, ciel nuageux à droite.

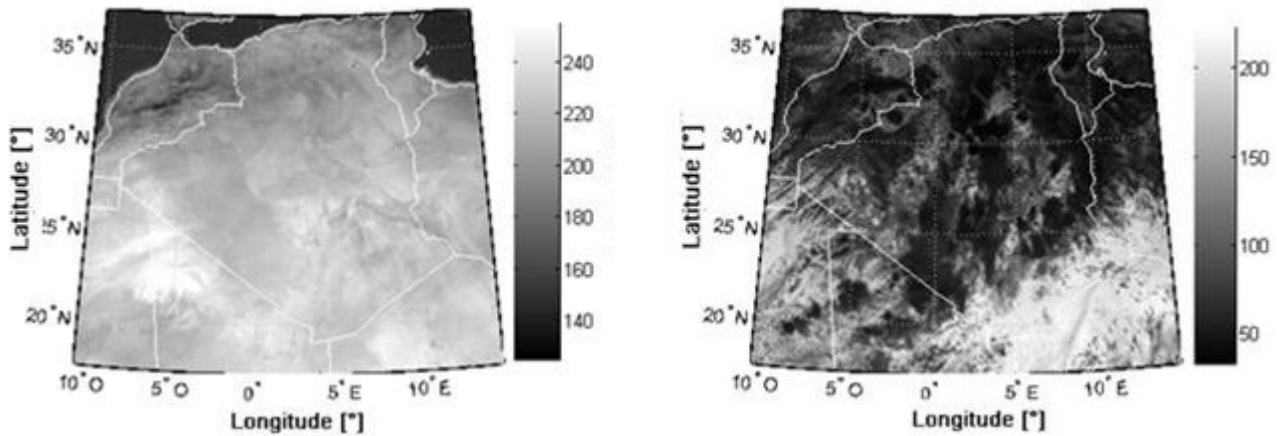


Figure 4.8 – Images références dans le canal infrarouge ciel clair à gauche, ciel nuageux à droite.

2.5.2.2 Calcul de l'indice d'ennuagement

Rappelons que l'indice d'ennuagement est défini comme étant le taux de recouvrement d'un pixel par les nuages. nous avons vu que cet indice peut être calculé par les réflectances (albédos) ou bien par les radiances. Dans notre modèle, nous avons calculé l'image ennuagement pour chaque instant à partir d'une image brute et deux images de référence appliquant l'équation ((4.2)).

Exemple d'application : Soit deux paquets, le premier contient toutes les images prises dans le canal visible, le second contient toutes les images prises dans le canal infrarouge.

Pour chaque canal, il s'agit de :

- calculer des images de la brillance minimales et maximale ;
- calculer l'albédo du sol et l'albédo du nuage moyen de la séquence ;
- calculer l'ennuagement associé pour chaque image.

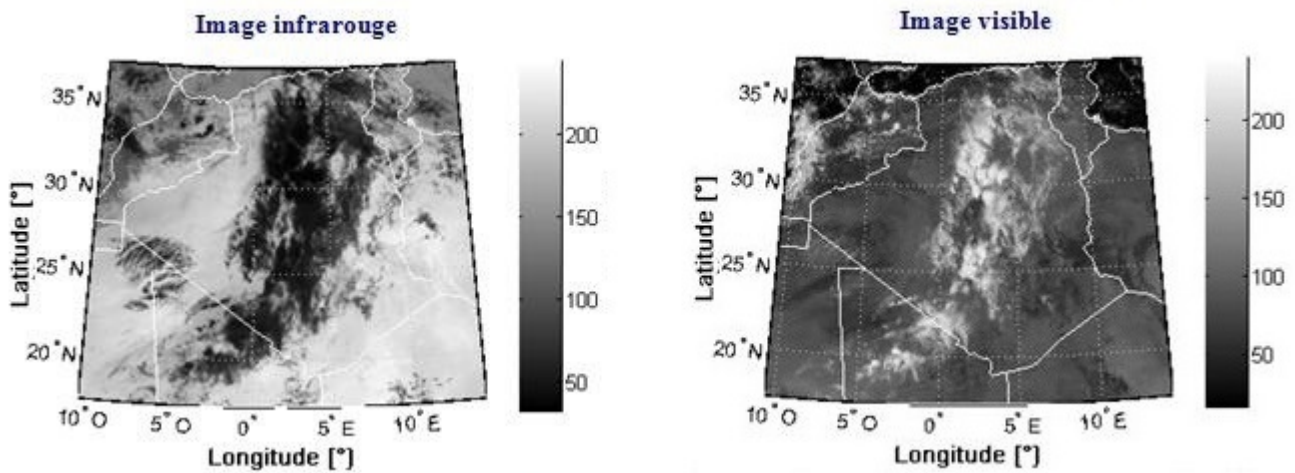


Figure 4.9 – Image brutes prises le même jour et la même heure dans les deux canaux à 12h00 (le 07/04/1997).

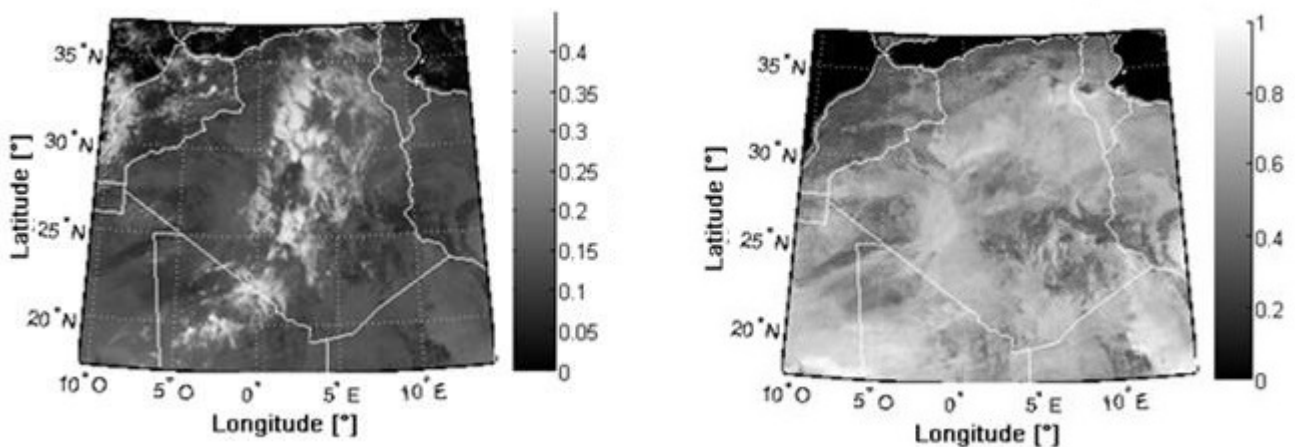


Figure 4.10 – Image de l'albédo des nuages le 7 avril (à gauche) et image de l'albédo du sol (à droite).

La figure (4.10) présente les albédos calculés dans deux configurations. A gauche, l'albédo du nuage d'une image brute issue des images de l'échantillon est visible : il s'agit des albédos proches de 0,5, tandis qu'à droite est présentée l'image composite présentant les valeurs de l'albédo du sol.

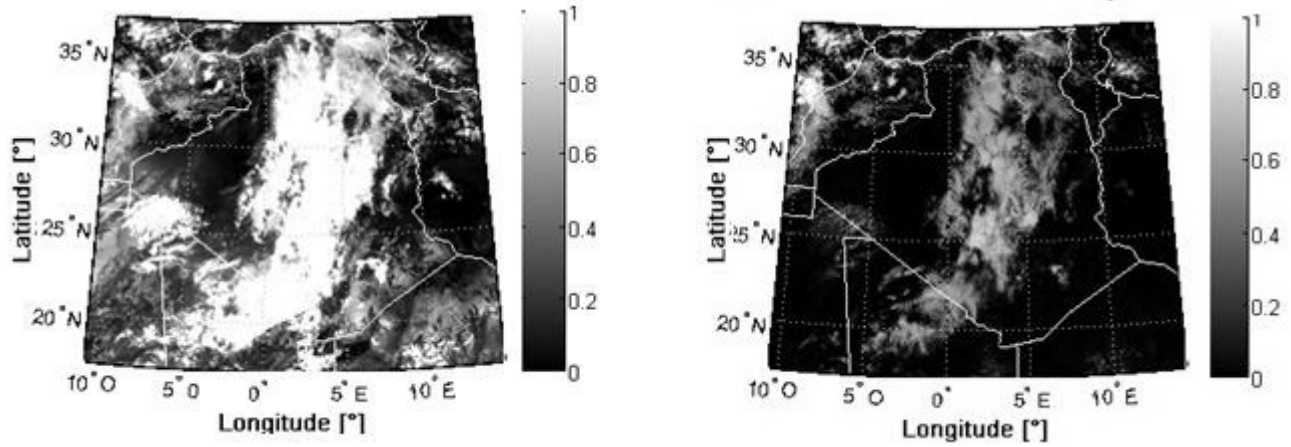


Figure 4.11 – Image ennuagement (à gauche), Image ennuagement corrigée (à droite).

La figure (4.11) représentent l'enuagement corrigé d'une image brute sélectionnée parmi les images de l'échantillon (Figure (4.9)). Cette image d'enuagement est calculée en utilisant le contraste entre les radiances mesurées en infrarouge (4.11-a) et les différents albédos calculés à partir des images visible (figure (4.10)). Ainsi, chaque image brute peut être présentée par une image ennuagement.

Application sur les sites d'étude : Soient toutes les images prises du canal visible entre 01/04/1997 et 16/04/1997. Il s'agit de

- transformer les coordonnées cartésiennes (lignes - colonnes) en coordonnées géographiques ;
- calculer l'angle zénithal solaire ;
- calculer l'éclairement solaire réel arrivant au sommet de l'atmosphère ;
- calculer la valeur de la radiation solaire globale atteignant le sol ;
- calculer l'albédo du sol ρ_g et l'albédo du nuage ρ_c de la séquence pour les huit pixels correspondant aux stations ;
- calculer l'indice d'enuagement associé aux huit pixels ;
- calculer les indices d'enuagement moyens de chaque jour.

Les résultats obtenus sont présenté dans le tableau (4.3).

Tableau 4.3 – Valeurs des albédos des nuages moyens et les albédos du sol.

	Alger	Mostaganem	Oran	Djelfa	Ghardaïa	Tamanrasset	Béchar	Adrar
Albédo du nuage	0.8072	0.6692	0.6004	0.8861	0.8710	0.5056	0.7757	0.7805
Albédo du sol	0.2421	0.2476	0.2031	0.2934	0.3568	0.2312	0.3312	0.2271

Le calcul des albédos en utilisant ces méthodes est d'une grande utilité pour vérification de l'efficacité des corrections.

La figure (4.12) montre le taux l'ennuagement en % en fonction des jours de prise de vues (1 à 16).

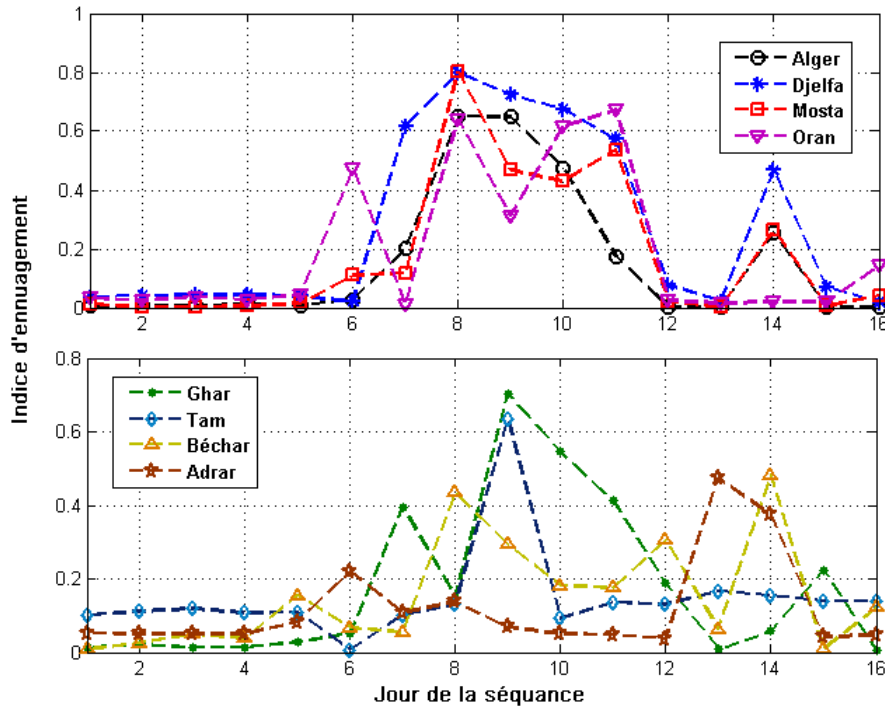


Figure 4.12 – Indice d'ennuagement pour chaque site d'études.

D'après la figure (4.12), Nous remarquons une faible variation d'ennuagement jusqu'au sixième jour de la séquence dans tous les sites, tandis qu'entre le sixième jour et le douzième jour, une grande augmentation de cet indice est observable pour tous les sites sauf à Adrar, Béchar et Tamanrasset. Concernant les autres jours de la séquence, nous remarquons de faibles variations, entre 0 et 0,2.

2.5.2.3 Calcul de l'indice de ciel clair

L'indice de ciel clair qui est le rapport entre le rayonnement global arrivant à la surface terrestre et le rayonnement global en condition de ciel clair, permet de distinguer les différents états par lesquels peut le ciel clair. La comparaison pixel à pixel de la brillance par les deux seuils pour chaque instant de prise de vues des images permet de voir les différents états de ciel observés pendant une journée.

Dans le tableau (4.4) présente les classes de l'état de ciel pour six journées de la séquence pour les différents sites d'étude à partir de l'indice de clarté calculé à partir les trois équations (3.20) (chapitre 3).

Tableau 4.4 – Classification de l'état du ciel pour les différents sites d'études.

		Adrar	Bachar	Alger	Djelfa	Ghardaïa	Mostaganem	Oran	Tamanrasset
1 avril 1997	à 9h00	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC
	à 12h00	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC
	à 15h00	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC
3 avril 1997	à 9h00	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC
	à 12h00	CPC	CTC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CTC
	à 15h00	CPC	CTC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC
7 avril 1997	à 9h00	CPC	CPC	CPC	CPC	CTC	CPC	CPC	CPC
	à 12h00	CPC	CPC	CPC	CTC	CTC	CPC	CPC	CPC
	à 15h00	CPC	CPC	CPC	CC	CPC	CC	CC	CPC
9 avril 1997	à 9h00	CPC	CPC	CTC	CTC	CTC	CPC	CPC	CTC
	à 12h00	CPC	CPC	CPC	CPC	CTC	CPC	CPC	CTC
	à 15h00	CPC	CPC	CPC	CTC	CTC	CTC	CPC	CTC
12 avril 1997	à 9h00	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC
	à 12h00	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC
	à 15h00	CC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC
15 avril 1997	à 9h00	CPC	CPC	CTC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC
	à 12h00	CC	CC	CC	CPC	CPC	CC	CPC	CPC
	à 15h00	CPC	CC	CC	CPC	CPC	CPC	CPC	CPC

Avec CC : Ciel Clair, CPC : Ciel Partiellement Couvert, CTC : Ciel Totalelement Couvert.

3 Présentations des résultats

L'estimation du gisement solaire en tout point au sol en Algérie a été réalisé par un programme de traitement d'images satellites mis en place sous Matlab (Annexe F), reprenant la méthodologie de chaque modèle adopté.

La validité des modèles est testée pour la station d'Oran. Les données utilisées pour cela sont celles mise en disposition par cette station. Ces données sont stockées dans un serveur et archive sous forme de fichiers au format .txt. La validation des modèles choisis est suivie par les étapes présentées dans la figure (4.13).

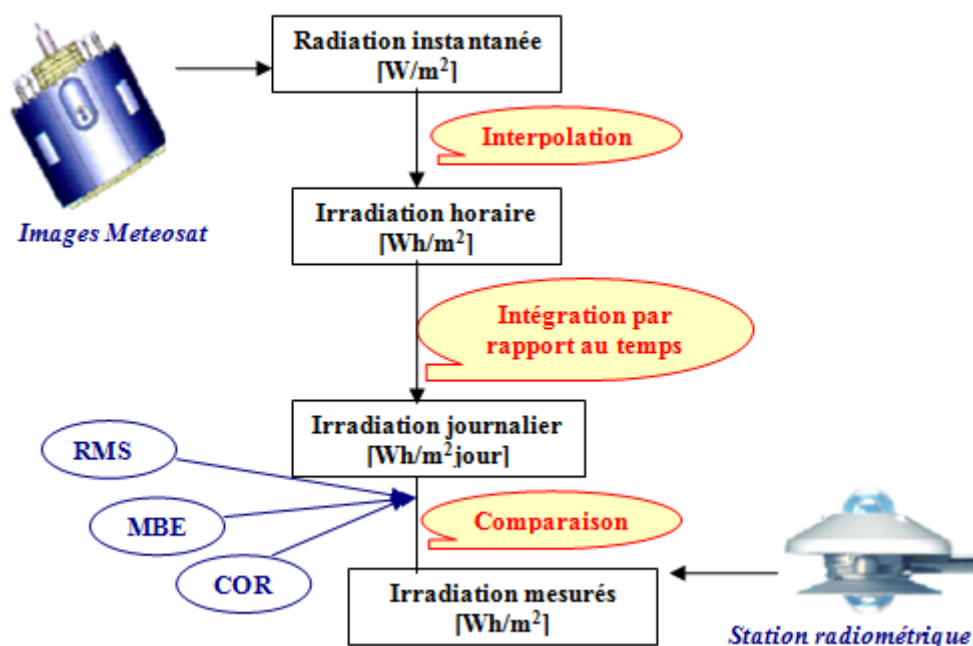


Figure 4.13 – Schéma décrivant la procédure de la validation d'un modèle.

3.1 Estimations des radiances

Après le calcul du rayonnement solaire en conditions de ciel clair aux mêmes instants que les prises de vues des images satellitaires, nous avons estimé la radiance solaire horaire pour les huit sites d'études connaissant que trois valeurs par jour (9h00 - 12h00 - 15h00, en gris dans le tableau (4.5)). Les estimations pour les heures ne bénéficiant pas d'images satellites ont été obtenu par des méthodes mathématique d'interpolation (Annexe E). Les radiances obtenues sont représentées dans le tableau (4.5).

Tableau 4.5 – Radiances estimées au cours de la période d'étude pour les différents sites (en W/m^2) (le 7^{ème} jour de la séquence).

Site	Heure	8h00	9h00	0h00	11h00	12h00	13h00	14h00	15h00	16h00
Dar El Beida		153	153	131	108	86	76	66	56	56
Mostaganem		83	83	106	128	150	126	102	78	78
Oran		59	59	70	81	92	77	62	47	47
Djelfa		196	196	215	234	253	239	225	212	212
Ghardaïa		196	196	215	234	253	239	225	212	212
Tamanrasset		66	66	79	93	106	93	80	68	68
Béchar		56	56	70	84	97	94	92	89	89
Adrar		112	112	118	124	130	119	107	95	95

3.2 Estimations des radiances journalières moyennes

Les radiances journalières moyennes sur chaque pixel s'obtient par sommation des radiances estimées de chaque jour. Les figures (4.14) montrent l'évolution des radiances journalières moyennes au cours de mois d'avril 1997.

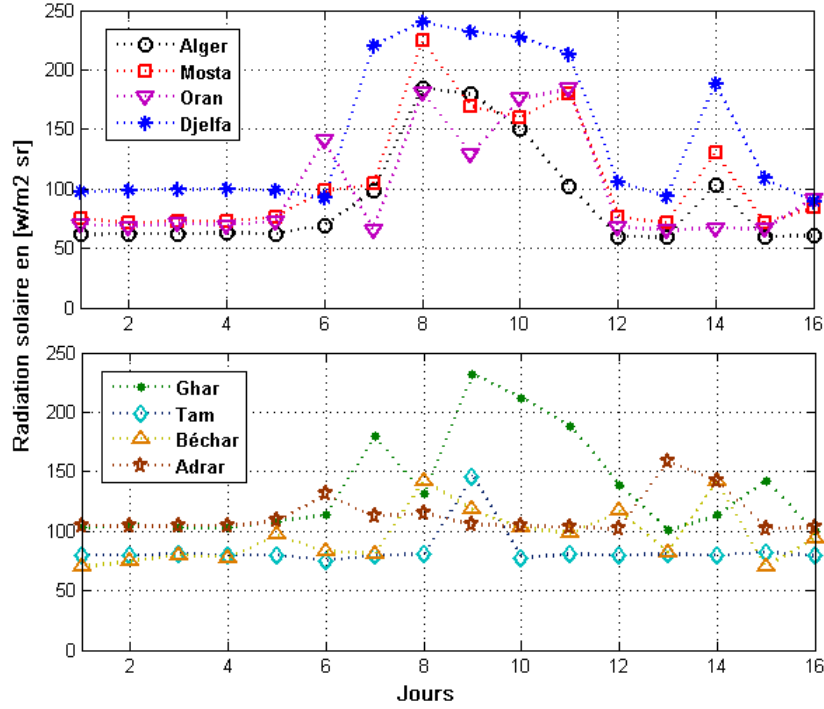


Figure 4.14 – Évaluation des radiances journalières moyennes pour chaque site d'étude.

D'après les graphes représentés par la figure (4.14), nous remarquons que l'évaluation de la radiance journalière moyenne varie entre 250 et 50 W/m^2 . D'après cette analyse, nous remarquons aussi que une forte variation de la radiance est situées entre le 7^{ème} jour et le 11^{ème} jour, et le 14^{ème} jour de la séquence dû à la présence du nuage et autres.

3.3 Estimation d'irradiation horaire

L'application de la méthode d'interpolation entre chaque deux images successives permet d'estimer les valeurs d'irradiations horaires du lever au coucher du soleil. Les graphes de la figure ci-dessous montre l'évolution horaire d'irradiation au cours du la 7^{ème} journée pour des différents sites.

D'après les figures (4.15) et (4.16) , nous remarquons que la radiation solaire varie au cours de la journée. Elle est faible au voisinage du lever et du coucher du Soleil et elle atteint le maximum au milieu de la journée si le ciel garde le même état pendant une journée. Par contre, si le ciel passe d'un état à un autre, des fluctuations importantes se produisent sur l'irradiation. Ces fluctuations sont dues essentiellement à la présence des nuages. Elles dépendent aussi de la nature du site et la saison.

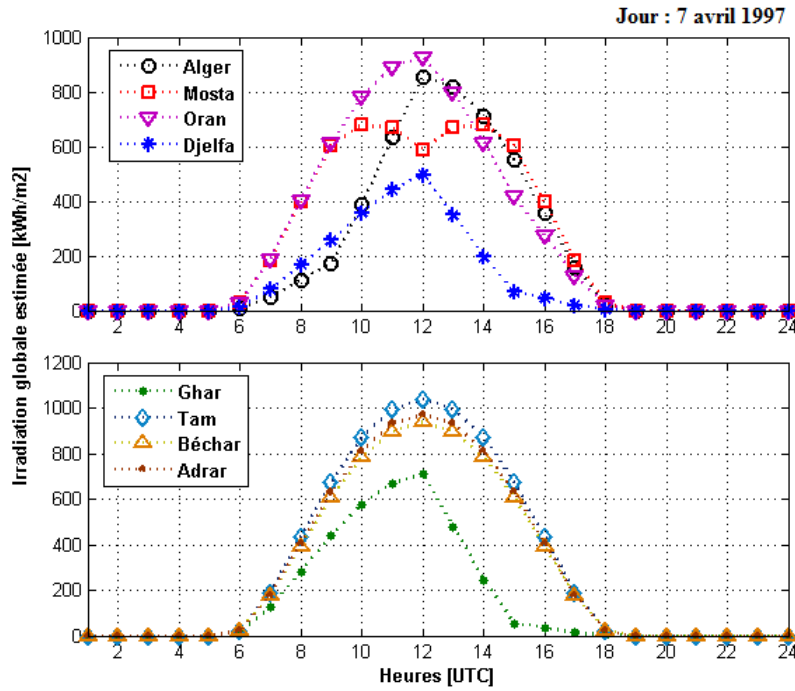


Figure 4.15 – Évaluation d'irradiations horaires pour les sites d'études, le 10 avril 1997.

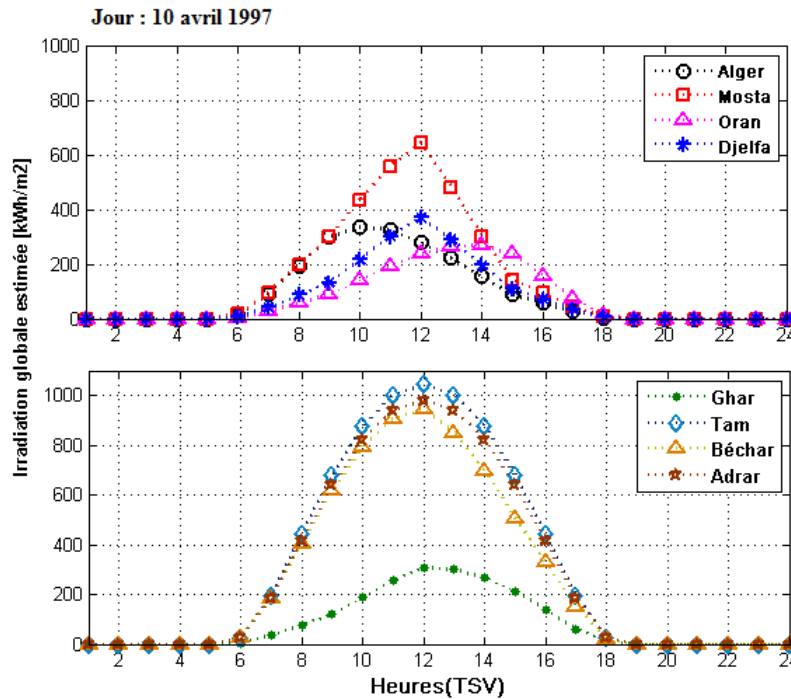


Figure 4.16 – Évaluation d'irradiations horaires pour les sites d'études, le 10 avril 1997.

3.4 Estimation d'irradiation journalière

L'irradiation journalière sur chaque pixel s'obtient par intégration des irradiations horaires estimées de chaque jour. La figure (4.17) montrent l'évolution de l'irradiation journalière au cours de mois d'avril 1997.

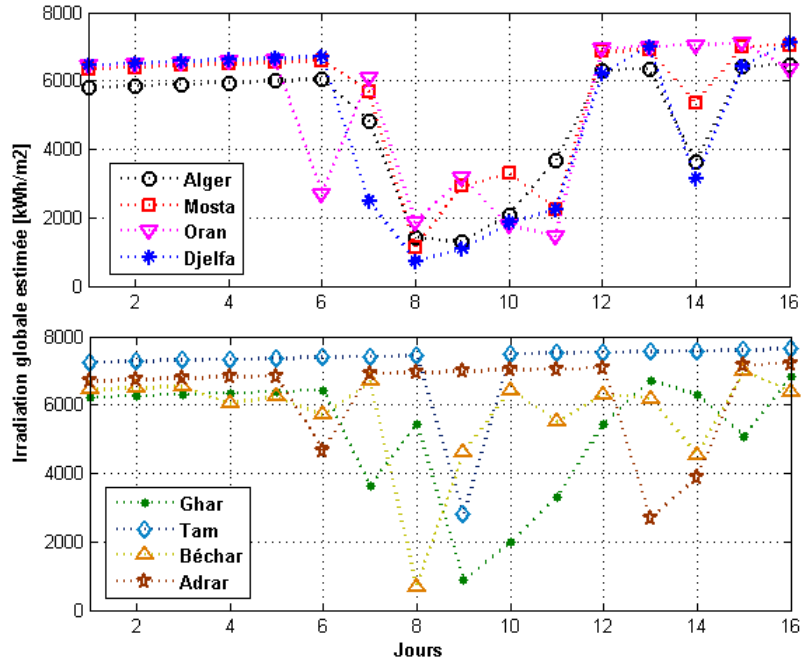


Figure 4.17 – Évaluation d'irradiations journalières pour les sites d'études

D'après les graphes représentés par les figures (4.17), nous remarquons que l'évaluation de l'irradiation journalière varie entre 6 et 2 kWh/m^2 dans l'intégralité des sites sauf que dans les sites d'Adrar et de Béchar qui est entre 6 et 3 kWh/m^2 . D'après cette analyse, nous remarquons aussi que les faibles variations d'irradiation sont situées entre le 7^{ème} jour et le 11^{ème} jour, et le 14^{ème} jour de la séquence dû à la présence du nuage et autres.

4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes à suivre pour mettre en oeuvre notre méthodologie du travail pour estimer l'éclairement solaire global à l'échelle horaire et journalière à partir de trois images par jours en se basant sur le calcul de rayonnement solaire en condition du ciel clair.

Après que nous ayons prouvé la validité de notre modèle grâce au traitement des images HR présent dans les deux canaux visibles et infrarouges de la période de 16 jours de mois d'avril 1997, il nous reste d'une part, à apprécier la performance de ce modèle comparativement à celle des modèles adoptés.

Analyse de la performance de notre modèle GISMOD

Seules trois images Météosat par jour ont été utilisées pour calculer les radiances solaires horaires et journalières sur un plan horizontal à partir des modèles éprouvés. Les performances de ces modèles sont quantifiées en termes d'erreurs et de corrélations grâce à des mesures in-situ pour répondre à la problématique initiale : quel modèle est le plus performant pour cartographier le gisement solaire en Algérie.

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les performances des estimations du rayonnement solaire obtenus par l'application de notre modèles GISMOD à partir des images METEOSAT prise dans les deux canaux visibles et infrarouges, et en se basant sur les trois modèles *Bachari et al.*, *GISTEL*., et *HELIOSAT-2*, nous avons calculer le rayonnement solaire horaire et journalier reçu au niveau de quelques sites en Algérie.

Pour apprécier les précisions de notre méthode, nous avons fait deux études comparatives : l'une consiste à comparer les valeurs mesurées au sol et les valeurs estimées pour chaque modèle, l'autre est une comparaison entre les valeurs estimées et les valeurs extraites de la base des données de la **NASA**. Cette dernière base de données fournit des estimations de références d'irradiations au niveau de sites qui ne disposent pas de stations de mesures ou qui ne dispose pas de mesures disponibles pour l'année d'étude.

2 Étude comparative entre les modèles adoptées

Maintenant, nous voulons savoir comment se positionne le modèle GISMOD par rapport aux modèles adoptes. A partir de calcule de trois paramètres statistiques (voir l'annexe G), nous avons procédé à deux études comparatives :

- Une comparaison entre les valeurs estimées et celles mesurées au sol. Les mesures effectuées au sol par un pyranomètre sont des irradiations collectées au site d'Oran.
- Une autre comparaison entre les valeurs estimées à l'échelle journalière et les valeurs extraites de la base des données de la NASA [w10]. Ce type des données permettent de valider les modèles dans les stations qui ne nous fournissent pas des mesures au sol.

NASA, à travers son programme de recherche en sciences de la Terre soutient depuis longtemps des systèmes satellitaires et de recherche fournit des données importantes pour l'étude du climat et les processus climatiques. Ces données comprennent des estimations à long terme de quantités météorologiques et l'énergie solaire à la surface. Ces produits satellitaires sont basée sur un modèle peut être suffisamment et précis (SSE : Surface meteorology and Solar Energy) pour fournir des données solaires et météorologiques fiables sur les régions où des mesures à la surface sont rares ou inexistantes, les paramètres SSE sont disponibles via un portail convivial basé sur le Web conçu en fonction des besoins de l'utilisateur. Cette description montre notre choix des données de la NASA.

2.1 Comparaison entre l'irradiation globale estimée par les modèles et celle mesurée

L'importance de la corrélation entre les valeurs estimées et mesurées et de l'effet de biais est mise en évidence par les diagrammes des figures (5.1) et (5.2). Ils donnent les valeurs

des irradiances estimées à l'aide des modèles en fonction des valeurs mesurées, heure par heure et jour par jour, pour le mois d'avril 1997. nous voyons que les nuages de points sont fortement dispersés pour les faibles valeurs d'irradiations (entre 0 et 300 W/m²). Les trois modèles surestiment ces valeurs. Pour des grandes valeurs des irradiances, nous avons vu des meilleures distributions du nuage de points. Ces résultats montrent qu'en moyenne la précision obtenue est de l'ordre de celle d'un pyranomètre bien étalonné et entretenu.

Par comparaison entre les modèles, une dispersion plus importante des points pour le modèle de Bachari et al., confirmé par un coefficient de corrélation plus faible (94%). Par contre pour les deux autres modèles, nous avons trouvé un coefficient de corrélation proche de 96% (Tableau (5.1)).

La figure (5.4) montre la comparaison entre les irradiances globales journalières mesurées au sol et celle estimées à partir des images satellitaires. Nous remarquons que les modèles donnent des bons résultats pour les jours clairs et partiellement couvert (entre 6 et 8 kWh/m²). Par contre, pour des journées nuageuses, nous avons des valeurs plus loin à la droite idéale. Ces trois modèles surestiment ces valeurs.

Les écarts obtenus entre les valeurs estimées à partir des données satellites et mesurées au sol (station d'Oran) sont illustrées dans la figure (5.4), nous remarquons qu'il y a des écarts importants entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées. Ces écarts peuvent être attribués, d'une part à la différence spatiale et temporelle entre les deux types des mesures : la mesure satellitaire est instantanée et chaque pixel couvre une vaste zone géographique alors que la mesure au sol est intégrée sur l'heure et correspond à un point de localisation géographique précise. D'autre part, en présence des nuages, les effets directionnels sont très complexes et la mesure satellitaire qui se fait dans une direction privilégiée est assujettie aux variations aléatoires selon la structure des nuages et les positions du Soleil et du satellite. De plus, les effets de l'ombre sont à considérer.

En général, la présence des nuages et l'effet d'ombre constitue un problème major dans les modèles d'estimation à partir des données satellitaires. Par comparaison entre les modèles, nous avons conclu pour chaque état du ciel :

- Pour des journées partiellement couverte, des valeurs proches entre les valeurs estimées par les trois modèle (le 7^{ème} et le 9^{ème} jour)
- Pour des journées nuageuses, nous remarquons que le modèle de GISTEL donne des meilleurs résultats que les autres (le 6^{ème} jour et le 8^{ème} à 11^{ème} jour).
- Pour des journées claires, une forte corrélation entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées appliquant le modèle d'HELIOSAT due à la précision des formules d'ESRA (les restes des jours).

Le tableau (5.1) montre les coefficients des corrélations COR et les erreurs quadratiques moyennes RMSE et l'erreur de biais MBE obtenus par applications de chaque modèle, les écarts obtenus sont notablement supérieurs dans le cas ou le ciel est complètement couvert par les nuages. Nous avons obtenus une erreur moyenne proche de 7% pour le modèle de **Bachari**

et al., de 4% pour **HELIOSAT-2** et de 5% pour **GISTEL**.

2.2 Comparaisons entre irradiations globales estimées et irradiations issues de la base de données de la NASA

Une autre comparaison faite à partir des données extraites de la base des données NASA.

Dans le tableau (5.2), nous avons reporté les valeurs numériques de l'écart RMSE, de l'erreur MBE et du coefficient de corrélation COR obtenues à l'échelle journalière. Nous avons obtenu :

- A) Pour le modèle de **GISTEL** : Les coefficients de corrélations sont situés entre 83 et 97%, les écarts quadratiques moyens sont situés entre 1 et 6 %, et des erreurs de biais entre 2 et -19%.
- B) Pour le modèle de **Bachari** : Les coefficients de corrélations sont situés entre 82 et 94%, les écarts quadratiques moyens sont situés entre 1 et 5% et des erreurs de biais entre 2 et -23%.
- C) Pour le modèle d'**HELIOSAT** : Les coefficients de corrélations sont situés entre 83 et 97%, les écarts quadratiques moyens sont situés entre 1 et 5 % des erreurs de biais entre 6 et -17%.

Ces derniers résultats montrent que le modèle physique (modèle de Delorme et al. et modèle de Rigollier et al.) et mieux que les modèles statistique (modèle de Bachari et al.).

2.3 Validation du modèle proposé

A fin de voir l'importance de chaque modèle adopté d'estimation de rayonnement solaire, il nous reste de comparé les données obtenues par notre méthode aux données mesurées. Les graphes des figures (5.1-d) et (5.2-d) représentent respectivement les valeurs d'irradiations estimées en fonction des valeurs des irradiations mesurées obtenus, heure par heure et jour par jour, pour notre séquence. Nous voyons clairement qu'une meilleure répartition des points autour de la droite idéale (à 45°).

Ces diagrammes mettent en évidence un bon accord entre les mesures et les estimations d'irradiation solaire globale par notre approche.

Par comparaison entre les modèles (figure (5.4)), nous voyons une diminution remarquable des écarts entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées.

En effet, avec l'application de notre méthode, les valeurs des coefficients de corrélation COR sont beaucoup plus fortes tandis que les écarts rRMSE et rMBE sont beaucoup plus réduits (voir le tableau (5.1)). En outre, notre modèle accuse une légère sous-estimation des données d'irradiation solaire.

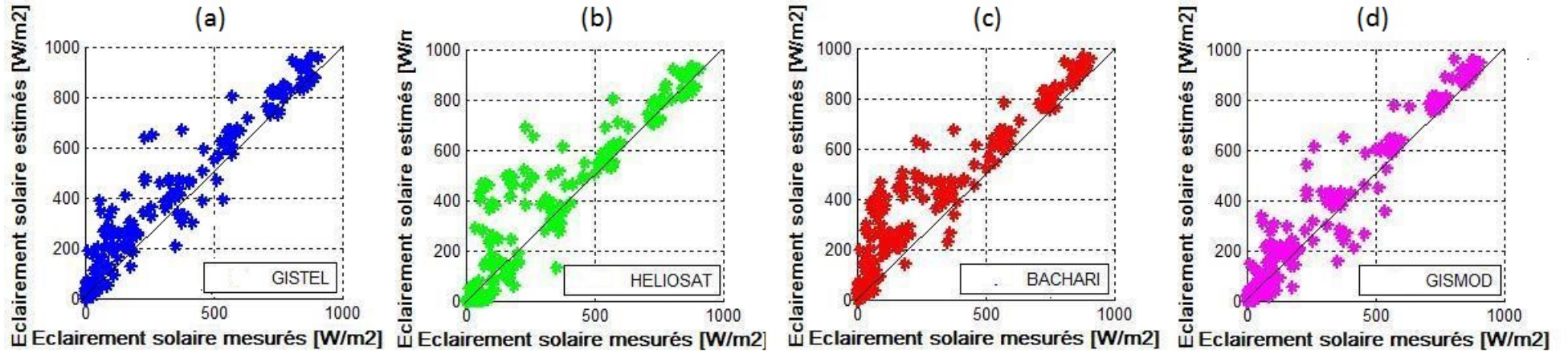


Figure 5.1 – Irradiations horaires estimées en fonction des mesures mesurées sur le site d’Oran.

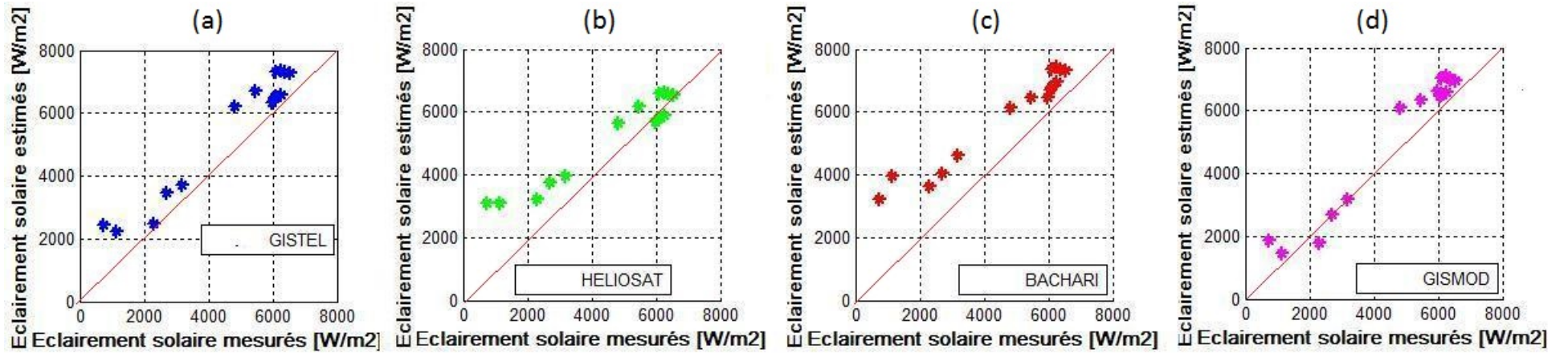


Figure 5.2 – Irradiations horaires estimées en fonction d’irradiations journalières mesurées sur le site d’Oran.

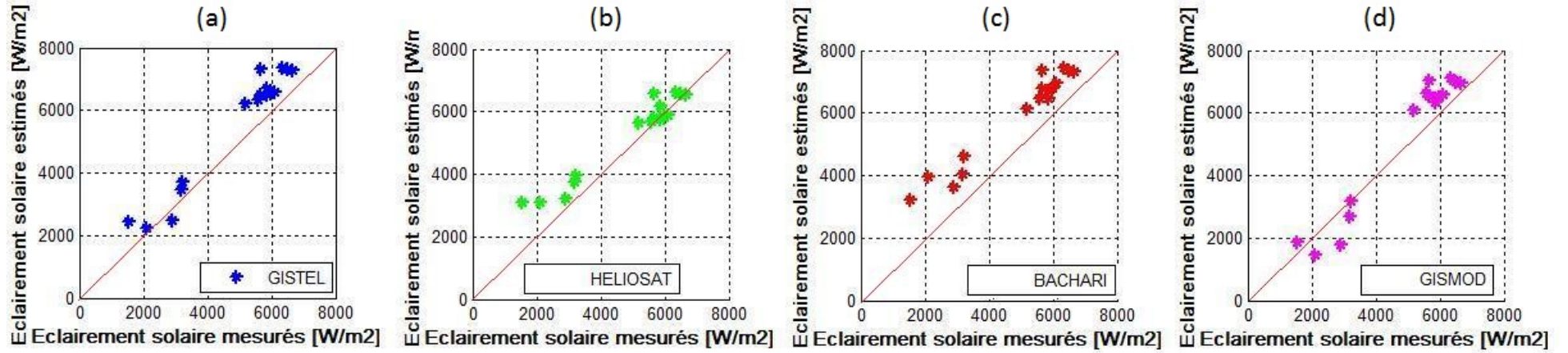


Figure 5.3 – Irradiations journalières estimées en fonction d’irradiations extraites par le NASA sur le site d’Oran.

Tableau 5.1 – Erreurs obtenus par comparaisons entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées au sol.

	COR				rRMSE (%)				rMBE (%)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
Journalier	0.9683	0.96q18	0.9448	0.9743	5.3083	3.6904	7.1698	0.1418	-25.83	-22.01	-31.50	-6.7038
Horaire	0.9625	0.9561	0.9675	0.9808	0.8121	0.8049	0.8127	0.5740	-37.03	-50.56	-60.56	-19.0264

Tableau 5.2 – Erreurs obtenus à partir d’une comparaison entre les valeurs estimées et les valeurs extraites de la NASA.

	COR				rRMSE (%)				rMBE (%)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
Adrar	0.9319	0.8351	0.8200	0.9429	0.20	0.43	1.03	0.55	2.01	-6.88	1.71	-2.73
Béchar	0.8986	0.7605	0.7649	0.9112	0.72	5.47	5.41	1.125	-4.29	-9.9	-8.391	-5.16
Dar-el-beidha	0.9562	0.9661	0.9689	0.9714	2.62	5.37	2.73	3.23	3.39	6.1	0.847	3.12
Djelfa	0.8964	0.9744	0.9721	0.9546	0.37	1.24	1.77	2.15	-23.48	-15.20	-16.47	-35.25
Ghardaïa	0.8328	0.9299	0.9315	0.9052	0.907	0.94	0.78	1.09	-17.81	-16.64	-11.69	-15.15
Mostaganem	0.9317	0.9355	0.9321	0.9417	2.85	1.07	1.72	0.9682	-14.42	-15.09	-17.14	-11.64
Oron	0.9463	0.9600	0.9542	0.9848	2.87	1.27	2.80	2.22	-19.00	-15.59	-19.30	-13.98
Tamanrasset	0.8827	0.9508	0.9709	0.8901	4.47	2.82	0.11	5.58	-3.19	-9.54	2.48	-4.12

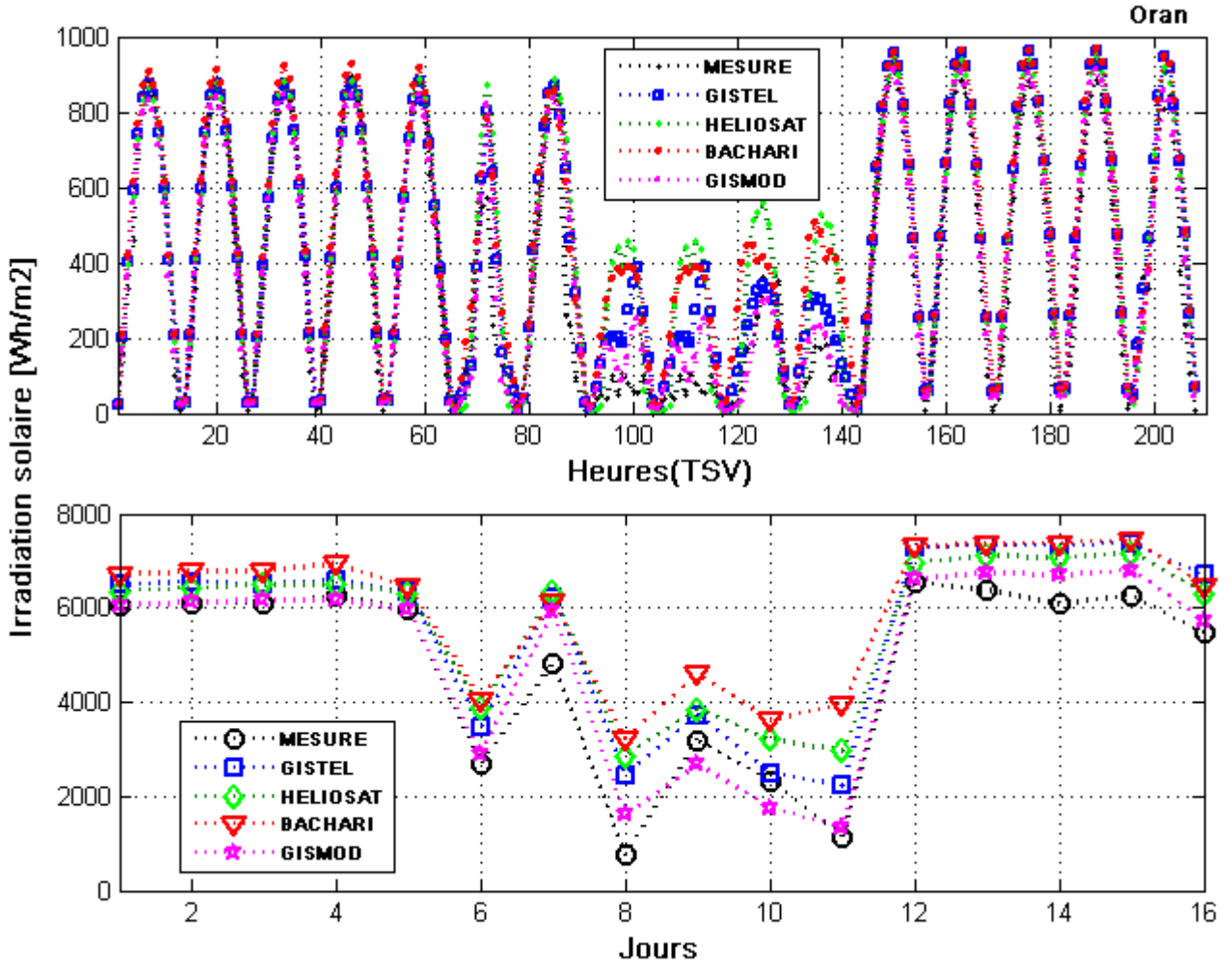


Figure 5.4 – Variation des irradiances mesurées au sol et estimées à partir des données satellites pour le mois d’avril 1997.

3 Conclusion

L’estimation du rayonnement solaire à pour but d’exprimer les radiances obtenues en irradiances pour chaque heure de chaque jour à partir de la séquence d’images satellites METEOSAT utilisée.

A partir de 3 images quotidiennes, l’irradiation journalières sont obtenues par intégration par rapport au temps, après qu’une interpolation ait permis d’estimer les valeurs horaires obtenues au cours de la journée, du lever au coucher du soleil.

D’après une étude comparative, les résultats obtenus par l’application des modèles sont satisfaisantes. Elles sont validées pour la station d’Oran.

Cette étude permet la mise en ouvre de notre approche, qui tout simplement des combinaisons entre les modèles adoptés.

Les résultats obtenus avec l’application de notre modèle mettent une évidence une amélioration sensible de l’évaluation d’irradiation globale arrivant sur une surface horizontale.

Conclusion Générale

Trois modèles satellitaires de types différents ont été adoptés. L'un est statistique et les deux autres sont physiques, permettent d'estimer l'irradiation solaire en n'importe quel point de l'Algérie, à l'échelle de l'heure et de la journée. Le modèle de GISTEL (Gisement Solaire par Télédétection), s'appuie sur la classification du ciel pour chaque pixel de l'image (ciel clair, partialement couvert et totalement couvert) à partir laquelle en déterminant les coefficients de réflexions qui caractérise la composante globale du rayonnement solaire incident à la surface de la Terre, cette classification est en principe à déterminer l'indice du ciel clair qui est ensuite utilisé pour déterminer l'éclairement solaire global incident au sol. Le modèle de BACHARI basé sur la conversion des images brutes en indices d'enneuagement puis en éclairement. Ce modèle utilise le contraste entre les radiances mesurées en infrarouge et les différents albédos calculés en visibles. Le modèle d'HELIOSAT-2 utilise les formules des albédos apparents pour calculer l'indice d'enneuagement à partir laquelle en déterminant les indices de ciel clair, ce dernier relie l'éclairement solaire global incident au sol par l'éclairement solaire global en ciel clair.

L'approche que nous avons développée est une combinaison entre les modèles adoptés, elle consiste à déterminer les indices du ciel clair sous trois états du ciel (analogues à ceux considérés dans GISTEL) utilisant l'indice d'enneuagement proposé par le modèle de Bachari et al., au lieu des coefficients de réflexion. Ces indices sont ensuite multipliés par l'éclairement en ciel clair pour déterminer l'éclairement solaire global atteint le sol en utilisant le modèle de ciel clair E.S.R.A (adopté par le modèle d'HELIOSAT).

Ces modèles reposent sur le traitement d'images collectées dans le canal visible et le canal infrarouge par le satellite Météosat. À la différence des modèles basés sur le traitement statistique des mesures au sol, l'approche satellitaire offre l'avantage de produire une distribution du rayonnement solaire avec une répartition régulière des points de mesures et une meilleure résolution spatiale. Mais elle ne permet pas d'estimer la composante globale du rayonnement solaire

que lorsque cette dernière est reçu sur une surface horizontale.

L'estimation du rayonnement solaire à pour but d'exprimer les radiances obtenues en irradiation pour chaque jour et chaque heure depuis la séquence utilisée sachant que trois valeurs de radiance par jour extrait à partir de trois images. Cette transformation se fait à partir d'une intégration par rapport au temps, après une interpolation mathématique permettant d'estimer les valeurs horaires obtenues au cours de la journée de levée à couchée du Soleil. D'après une étude comparative, les résultats obtenus par l'application des modèles sont satisfaisants. Elles sont validées pour la station d'Oran.

D'après l'application du modèle proposé GISMOD, nous avons obtenu par application de notre modèle, un coefficient de corrélation de l'ordre de 97% en moyen à l'échelle horaires et de l'ordre de 96% à l'échelle journalier cela prouve qu'il existe une forte corrélation entre les mesures satellites et les mesures in-situ, une autre comparaison a été faite entre les résultats obtenus par l'application des modèles adoptés montre que ces modèles sont satisfaisants.

D'une façon générale, les résultats obtenus avec notre approche mettent en évidence une amélioration sensible de l'évaluation d'irradiation globale arrivant sur une surface horizontale. Cette amélioration est exprimée, à la fois, par les fortes valeurs des coefficients de corrélation entre les mesures et les estimations et par réduction de l'écart RMSE et de l'erreur de biais qui apparaît nettement tout aussi bien à l'échelle horaire qu'à l'échelle journalière.

Pour exploiter un tel modèle en temps réel et améliorer l'estimation de l'irradiation solaire, des images prises dans deux canaux différents acquises à tous les quarts d'heures sont maintenant utilisés par des organismes de recherche comme le CDER. Cette nouvelle génération du Meteosat (MSG), rend possible la génération de données solaires à des échelles du temps plus courtes que l'heure ou la journée. Il sera de diffuser cette application à un ensemble de données plus considérable (une année et plus) et dans d'autres stations météorologiques, si l'on tient compte de la disponibilité des mesures pyranométrique au sol.

En tout cas, des cartes solaires seront obtenues d'après l'application de l'approche satellites qui permettra aux concepteurs des systèmes énergétiques solaires de réaliser les projets d'installations des panneaux photovoltaïques dans les sites isolés.

Références bibliographiques

- [1] Mefti. A., (2007). Contribution à la Détermination du Gisement Solaire par Traitement de Données Solaire au Sol et d'Image Météosat. Thèse de doctorat : Université d'Alger - Houari Boumediene, p. 96-105. [1](#), [15](#), [19](#), [29](#), [37](#), [39](#)
- [2] Tarpley. J.D. (1979). Estimating Incident Solar Radiation at the Surface from Geostationar Satellite Data. J. Appl. Meteorol, vol. 18, p.1172-1181. [2](#), [30](#)
- [3] 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. Applied Meteorology, vol. 19, p. 1005-1012. [2](#), [30](#)
- [4] Möser. W., and Raschke. E., (1983). Mapping of Global and Cloudiness from Meteosat Data Meteor. J. Rundsch, vol. 36, p. 33-41. [2](#), [31](#)
- [5] Cano. D., Monget. J.M., Albuissou M., Guillard H., Regas N., and Wald L., (1986). A Method for the Determination of the Global Solar Radiation from Meteorological Satellite Data. J. Solar Energy, vol. 37, p. 31-39. [2](#), [35](#), [36](#)
- [6] Yaïche. M.R, et S.M.A. Bekkouche, (2009). Conception et Validation d'un Programme Sous Excel pour l'Estimation du Rayonnement Solaire Direct en Algérie. Cas d'un Ciel Clair. J. Revue Internationale d'Héliotechnique, n°39, p. 50 - 55. [4](#)
- [7] Perrin. C., et Vauge. C. (1982). Le Gisement Solaire : Evaluation de la Ressource Energétique. Technique et Documentation. Librairie Lavoisier, Paris, France. [xiii](#), [4](#)
- [8] Wald. L., (2007). Chapter Solar radiation energy (fundamentals), In Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO. EOLSS Publishers, Oxford, UK, <http://www.eolss.net>. [5](#), [6](#)
- [9] Mefti. A., Bouroubi. M.Y., et Khellaf A., (1999). Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie, ANEP, Rev. Energ. Ren. Vol. 2. p 69-85 [7](#), [9](#), [10](#)
- [10] Haurant. P. (2012). De la sélection multicritère de parcs photovoltaïques à la cartographie et l'étude de l'intermittence de la ressource : modélisations appliquées à l'île de Corse. Thèse de doctorat : Université de Corse - Pasquale Paoli, p.64 - 72. [xiii](#), [9](#), [29](#), [30](#)

- [11] Labouret. A. (2005). Energie Solaire Photovoltaïque, Edition. Dunod, France, p. 302. [9](#)
- [12] Yettou. F., Malek. A., Haddadi M., et Gama A. (2009). Etude Comparative de deux Modèles de Calcul du Rayonnement Solaire par Ciel Clair en Algérie, Revue des Energies Renouvelables, vol. 12, n°2, p. 331 - 346. [9](#)
- [13] Kasten. F., (1980). A Simple Parameterization of Two Pyrheliometric Formula for Determining the Linke Turbidity Factor. J. Meteorology Rdsch, vol. 33, p. 124 - 127. [9](#)
- [14] Bouhadda. Y., et Serrir. L., (2006). Contribution à l'étude du trouble atmosphérique de Linke sur le site de Ghardaïa. J. Revue des Energies Renouvelables, vol. 9, n°4. p. 277 - 284. [10](#)
- [15] Delorme. C., (1987). Gisement Solaire, Tome 1 et 2, Cours de troisième cycle, Groupement de développement de la télédétection aérospatiale, Toulouse, p. 177. [10](#)
- [16] Ratier. A., Roquet. H., Schmetz. J., et Sénési. S., (2003). L'imagerie géostationnaire et son évolution. J. La Météorologie - n° 40, p.74-79. [15](#)
- [17] Thiao. W., (1988). Contribution a L'estimation des Précipitations au Sahel par L'imagerie Satellitaire. Thèse du doctorat : Université - Blaise Pascal, p. 16-17. [16](#)
- [18] Chaabane. M., Ben Djamaa. A., Kossentini. A., (1996). Daily and hourly global irradiances in Tunisia extracted from Meteosat Wefax images. J. Solar Energy, vol. 57, n°6, p. 449 - 457. [19](#)
- [19] Bachari. N., (1999), Méthodologie d'analyse des Données Satellitaires en Utilisant des Données Multisources, Thèse de Doctorat d'État, U. S. T. Oran. [xv](#), [26](#)
- [20] Hanson. J., (1971). Studies of Cloud and Satellite Parameterisation of Solar Irradiation at the Earth's Surface. Proc. Miami Workshop on Remote Sensing, U. S. Dept. of Commerce, p. 133-148. [28](#)
- [21] Freohlich. C., Brusa. R.W., (1981). Solar radiation and its variation in time. Sol. Phys, vol. 74, p. 209-251. [29](#), [43](#), [51](#)
- [22] Rigollier. C., Lefèvre. M., Blanc. P., and Wald. L., (2002). The Operational Calibration of Images Taken in the Visible Channel of the Meteosat Series of Satellites, J. American Meteorological Society, vol. 19, p. 1285-1293. [xv](#), [29](#)
- [23] Oumbe A., (2009). Exploitation des Nouvelles Capacités d'Observation de la Terre pour Evaluer le Rayonnement Solaire Incident au Sol. Thèse de doctorat : Ecole nationale supérieure des mines de Paris. [29](#)
- [24] Hay. J.E., (1993). Satellite based estimates of solar irradiance at the earth's surface, modelling approaches, J. Renewable Energy, vol. 3, p. 381-393. [29](#)
- [25] Paster. C., (1981). Développement d'une Méthode de Détermination du Rayonnement Solaire à Partir des Données de Météosat, J. La météorologie, vol. 1, 24, 5. [31](#)
- [26] Delorme. C., et Gros N. (1987). A propos de GISTEL solaire à l'aide des images numériques de Meteosat, J. Veille Climatique Satellitaire, 18,24-30. [31](#), [37](#)

- [27] Ben Djamaa. A., et C. Delorme. (1992). Détermination quotidienne, en tous les points d'une région, de l'évolution de l'éclairement solaire utilisable à partir d'images de Météosat, J. Phys. III France 2, p. 847-858. [31](#)
- [28] Delorme C., Mohamed. C., et Otmani. M., (1989). Détermination d'une Irradiation Solaire Journalière à Partir de Trois Irradiations Horaires à 9, 12 et 15 h, Revue Phys. Appl. Vol. 24, p. 1023-1027. [31](#)
- [29] Mefti. A., Adane A., Bouroubi. M.Y. (2008). Satellite Approach Based on Cloud Cover Classification : Estimation of Hourly Global Solar Radiation from Meteosat Images. Energy Conversion and Management, vol. 49, pp. 652-659. [31](#), [36](#)
- [30] Bachari. N., Benabadji. N., Razagui. A. et Belbachir . A. H., (2001). Estimation et Cartographie des Différentes Composantes du Rayonnement Solaire au Sol à Partir des Images Météosat, J. Rev. Energ. Ren. vol. 4, pp. 35-47. [31](#), [36](#), [37](#), [40](#), [55](#)
- [31] Dedieu. G., Deschamps Y., and Kerr. Y.H., (1987). Satellite Estimation of Solar Irradiance at the Surface of the Earth and the Surface Albedo using a Physical Model Applied to Meteosat Data. J. Climate. Appl. Meteor, vol. 26, pp. 79-87, [31](#)
- [32] Marullo ; S., Dalu G., Viola A. (1987), Incident Short ' Wave Radiation at Surface from Meteosat Data. Il Nuovo Cimento 10C, p. 77-90. [31](#)
- [33] Cogliani. E., Ricchiazzi. P., Maccari. A., (2007). Physical model SOLARMET for determining total and direct solar radiation by Meteosat satellite images. J. Solar Energy, vol. 81, p. 791-798. [31](#)
- [34] Ricchiazzi. P., Yang. S., Gautier. C., and Sowle. D., (1998). SBDART : A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere', J. American Meteorological Society, vol. 79, n°10, p. 2101-2114. [31](#)
- [35] Amado. J., (1982). Cartographie de l'Albédo et du Gisement Solaire à Partir des Données du Satellite Météosat. Thèse de Doctorat : Université - Paul Sabatier, Toulouse, p. 120. [31](#)
- [36] Diabaté. L., Demarcq. H., Michaud-Regas. N., and Wald. L., (1988). Estimating incident solar radiation at the surface from images of the earth transmitted by geostationary satellites : the Heliosat project. J. Solar Energy, 5 :261-278, [35](#), [36](#)
- [37] Beyer H.-G., Costanzo C., and Heinemann. D., (1996). Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. Solar Energy, 56 :207-212, [35](#), [36](#), [37](#)
- [38] Rigollier C., Bauer O., Wald L. (2000). On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. J. Solar Energy, 68(1), 33-48. [35](#)
- [39] Rigollier. C., Lefèvre. M., and Wald. L., (2004). The method Heliosat-2 for deriving short-wave solar radiation from satellite images. J. Solar Energy, vol. 77 :pp. 159-169. [35](#), [36](#), [37](#), [43](#)

- [40] Mueller R., Dagestad K., Ineichen P., Schroedter M., Cros S., Dumortier D., Kuhlemann R., Olseth J., Piernavieja G., Reise. C., Wald. L., and Heinnemann D., (2004). Rethinking satellite based solar irradiance modelling - the SOLIS clear sky module. *J. Remote Sensing of Environment*, vol. 91, p. 160-174. [35](#)
- [41] Oumbe. A., Blanc. Ph., Ranchin. T., Schroedter-Homscheidt. M., Wald. L., A new method for estimating solar energy resource. In *Proceedings of the ISRSE*, vol. 33, 64p. [35](#), [36](#)
- [42] Deneke. H., Feijt. A. et Roebeling. R., (2008). Estimating surface solar irradiance from METEOSAT SEVIRI-derived cloud properties. *J. Remote Sensing of Environment*, vol. 112 n°6, p. 3131-3141. [35](#)
- [43] Janjai. S., Pankaew. P., and Laksanaboonsong. J., (2009). A model for calculating hourly global solar radiation from satellite data in the tropics. *J. Applied Energy*, vol. 86, n°9, p. 1450-1457. [35](#)
- [44] Noia. M., Ratto. C.F., and Festa. R., (1993). Solar Irradiation from Geostationary Satellite Data - I. Statistical Models, *J. Solar Energy*, 51, p. 449-456. [xv](#), [35](#)
- [45] Möser. W., and Raschke. E., (1984). Incident Solar Radiation over Europe Estimated from Meteosat Image Data. *J. Applied Meteorology*. vol. 23, n°1, p. 166 - 170. [36](#)
- [46] Martins. F., Pereira. E. and Abreu. S., (2007). Satellite ' derived Solar Resource Maps for Brazil under SWERA Project. *J. Solar Energy*, vol. 81 n°4, p. 517-528. [36](#), [37](#)
- [47] Lefèvre. M., Bauer. O., Iehle A., and Wald. L., An Automatic Method for the Calibration of Time-series of Meteosat Images. *Remote Sensing*, vol.21, n°5,p. 1025-1045. (2000). [36](#)
- [48] Brisson, A., Le Borgne, P., et Marsouin, A. (1999).Development of algorithms for surface solar irradiance retrieval at OδSI SAF low and mid latitudes. (Internal project report). Lannion, France : Météo-France - Centre de Météorologie Spatiale. [36](#)
- [49] Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., et Vignola, F. (2002). A new operational model for satellite-derived irradiances : description and validation. *Solar Energy*, 73(5), p. 307-317. [36](#)
- [50] Illera. P., Fernández. A., and Pérez. A., (1995). A simple model for the calculation of global solar radiation using geostationary satellite data. *J. Atmospheric Research*, vol. 39, n°1-3, p. 79-90. [36](#)
- [51] Grautier. W., Guillard. H., Moser. W., Monget. J., Palz. W., Raschke. E., Reinhardt. R., Schwarzmman. P., and Wald. L., (1986). *Solar Energy R&D in the European Community, Chapter Solar Radiation Data from Satellite Images. Serie F, Vol. 4, D, Riedel Publishing Company. The Netherlands*, p. 100, [36](#)
- [52] Moussu G., Diabaté L., and Wald L., (1988). A method for the mapping of the apparent ground albedo brightness using visible images from geostationary satellites, *Remote Sensing of Environment*. [37](#)
- [53] Delorme. C., Mefti. A., Mevel. S., et Quiichini. V. (1996)., Utilisation quotidienne des images Wefax pour le suivi des systèmes énergétiques, *J. Veille Climatique Satellitaire*, vol. 58, p. 90-96 [37](#), [40](#)

- [54] Delorme C., Gallo A., and Olivieri J.. (1992). Quick use of Wefax images from Meteosat to determine daily solar radiation in France, J. Solar Energy, 49, 191-197. . [37](#)
- [55] Chaabane M., and Ben Djamaa. A., (2002). Use of HR Meteosat images for the mapping of global solar irradiation in Tunisia :Preliminary results and comparison with Wefax images. Renewable Energy 25 p. 139-151. [37](#)
- [56] Chaabane. M., and Ben Djamaa. A., (1998). Comparison between tree years of daily global radiation measurement in tree Tunis sites against assessment for Meteosat Wefax images. J. Renewable Energy, vol. 14, p. 213-219. [37](#), [51](#)
- [57] Chaabane. M., and Ben Djamaa. A., (1998). Preliminary results in the estimation of global solar radiation in Tunisia from High Resolution Meteosat images. In : Proceedings of the World Renewable Energy Congress WREC, vol, p. 19-25. [37](#)
- [58] Meziani. F., (2011). Détermination du Gisement Solaire par Traitement d'Image MSG. Thèse de Magister : Université Mouloud Maammeri de Tizi ouzou. [37](#)
- [59] O.M.M. (W.O.M.), (1981). Meteorological aspects of the utilisation of solar radiation as an Energy source. [42](#)

Webographie

- [w1] Wikipédia, (2012). Coordonnée géographiques, [Consulté en septembre 2012]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es_g%C3%A9ographiques
- [w2] Bulletin de l'information géographique appliquée aux activités de recherche-. développement. Initiation à la télédétection, [Consulté en avril 2012].http://www.cnes.fr/automne_modules_files/standard/public/p7774_9f5e71f0025c698de2ef82085d1c0e20big_3.pdf 5
- [w3] Wikipédia, (2012). Satellite météorologique, [Consulté en décembre 2012]. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Satellitemétéorologique/> 15
- [w4] EUMETSAT, (2013). Meteosat First Generation User Handbook [Consulté en janvier 2013] http://www.eumetsat.int/groups/ops/documents/document/pdf_td06_marf.pdf. 16
- [w5] Wikipédia, Météosat, (2012). [Consulté en janvier 2013]. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Météosat/> 17
- [w6] Kergomard. C. La Télédétection Aéro-spatiale : Une Introduction. Document disponible à la bibliothèque de l'école normale supérieure de Paris (E.N.S). <http://www.geographie.ens.fr/IMG/file/kergomard/Teledetection/CTeledetection.pdf> xiii, 18
- [w7] SoDa, (2013). Solar Energy Services for Professionals. [Consulté en avril 2013].http://www.soda-is.com/eng/services/service_invoke/gui.php?xml_descript=soda_tl.xml#parameters 19
- [w8] EUMETSAT, (2013). Meteosat First Generation User Handbook [Consulté en mars 2012] http://www.eumetsat.int/groups/ops/documents/document/pdf_td06_marf.pdf 52, 82
- [w9] EUMETSAT, (2010). Meteosat VIS Channel Calibration Information Consulté en mars 2012]. http://www.eumetsat.int/groups/ops/documents/document/pdf_ten_vis-channel-calib.pdf 49, 50, 82
- [w10] NASA, (2013). Surface meteorology and Solar Energy [Consulté en avril 2013].<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/> 65

1 Grandeur radiométrique associe au rayonnement

La matière est capable d'émettre de transmettre et/ou absorber de l'énergie électromagnétique. Plusieurs facteurs caractérisent ce rayonnement telles que sa gamme spectrale, son intensité, sa direction ainsi que certaines propriétés intrinsèques à la matière.

a) Flux énergétique : Le flux énergétique Φ d'une source de rayonnement est la puissance qu'elle rayonne, exprimé en [W] :

$$\Phi = \frac{dE(t)}{dt} \quad (\text{A.1})$$

b) Intensité : L'intensité lumineuse I d'une source ponctuelle est le flux rayonné dans l'unité d'angle solide centré autour d'une direction d'émission, exprimé en [W/Sr] :

$$I = d\Phi/d\omega \quad (\text{A.2})$$

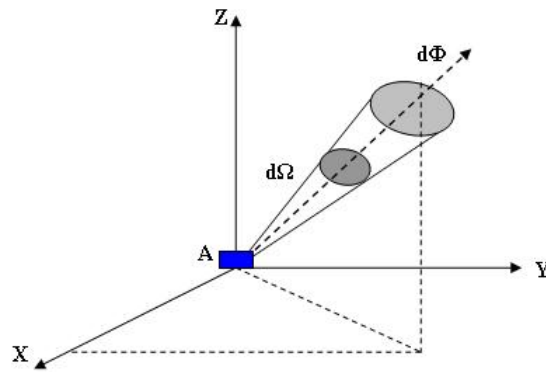


Figure A.1 – Intensité lumineuse.

c) Émittance énergétique : L'émittance (éclairage) M d'une source étendue est le flux énergétique rayonné par unité de surface dS en [W/m²] dans toutes les directions de l'espace extérieur à la source et dépend des propriétés physico-chimiques de la surface émettrice :

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (\text{A.3})$$

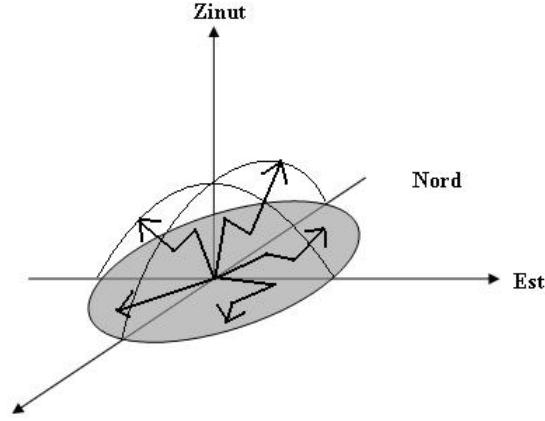


Figure A.2 – Emission énergétique.

d) Luminance énergétique : La luminance (radiance) L est la puissance émise ($d\Phi$) par unité d'angle solide ($d\Omega$) et par unité de surface apparente ($dS \cos \theta$) d'une source étendue dans une direction donnée, exprimé en $[W/m^2Sr]$:

$$L(\theta) = \frac{d\Phi}{d\omega dS \cos \theta} \quad (A.4)$$

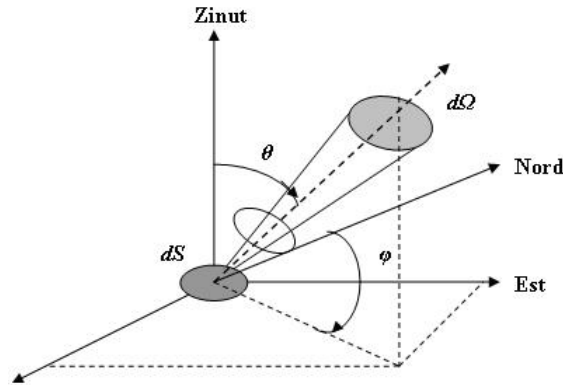


Figure A.3 – Luminance énergétique.

Lorsque nous nous préoccupons que de la lumière visible, la luminance d'une source est quelque fois appelée brillance.

1 Interaction de rayonnement par l'atmosphère

Lors de sa traversée atmosphérique, le rayonnement solaire peut interagir avec les particules et molécules gazeuses présentes dans l'atmosphère qui constituent des obstacles à la propagation de l'énergie. Ce rayonnement électromagnétique peut être réfléchi, absorbé ou diffusé

Réfléchi, par la surface terrestre, c'est-à-dire renvoyé dans une direction privilégiée (réflexion dite spéculaire) ou de manière diffuse. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière diffuse et anisotrope.

Absorbé, par les composants gazeux de l'atmosphère. Cette absorption est dite sélective, car elle s'opère pour des valeurs de longueur d'onde bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau, à l'ozone, au dioxyde de carbone et, à un degré moindre, à l'oxygène.

Diffusé, C'est-à-dire dévié dans toutes les directions. Ce phénomène dont la nature dépend de plusieurs paramètres : la longueur d'onde du rayonnement, la densité et la taille des particules et des molécules atmosphériques et l'épaisseur de la couche atmosphérique à traverser. Selon ces paramètres, on distingue ainsi trois types de diffusion : la diffusion de Rayleigh, la diffusion de Mie et la diffusion non sélective.

a) La diffusion de Rayleigh : La diffusion de Rayleigh est due aux molécules gazeuses présentes dans l'atmosphère (O^2 , N^2 , CO^2 vapeur d'eau, etc.) ou aux fines particules de poussière. Elle se produit lorsque la taille des molécules diffusantes est très inférieure à la longueur d'onde du rayonnement.

b) La diffusion de Mie : Lorsque les particules ont une taille suffisamment grande devant la longueur d'onde incidente (les aérosols), la diffusion de Rayleigh ne se produit plus et laisse la place à la diffusion de Mie (la diffusion de Rayleigh est un cas limite de la théorie de Mie).

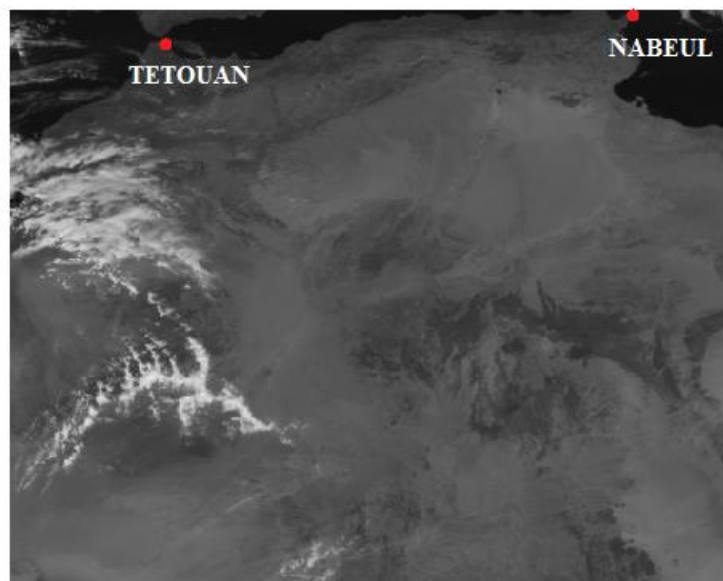
c) La diffusion non sélective : La diffusion non sélective se produit lorsque la taille des particules atmosphériques est beaucoup plus grande que la longueur d'onde du rayonnement. Elle est due notamment aux gouttelettes d'eau que l'on trouve dans les nuages et les brouillards.

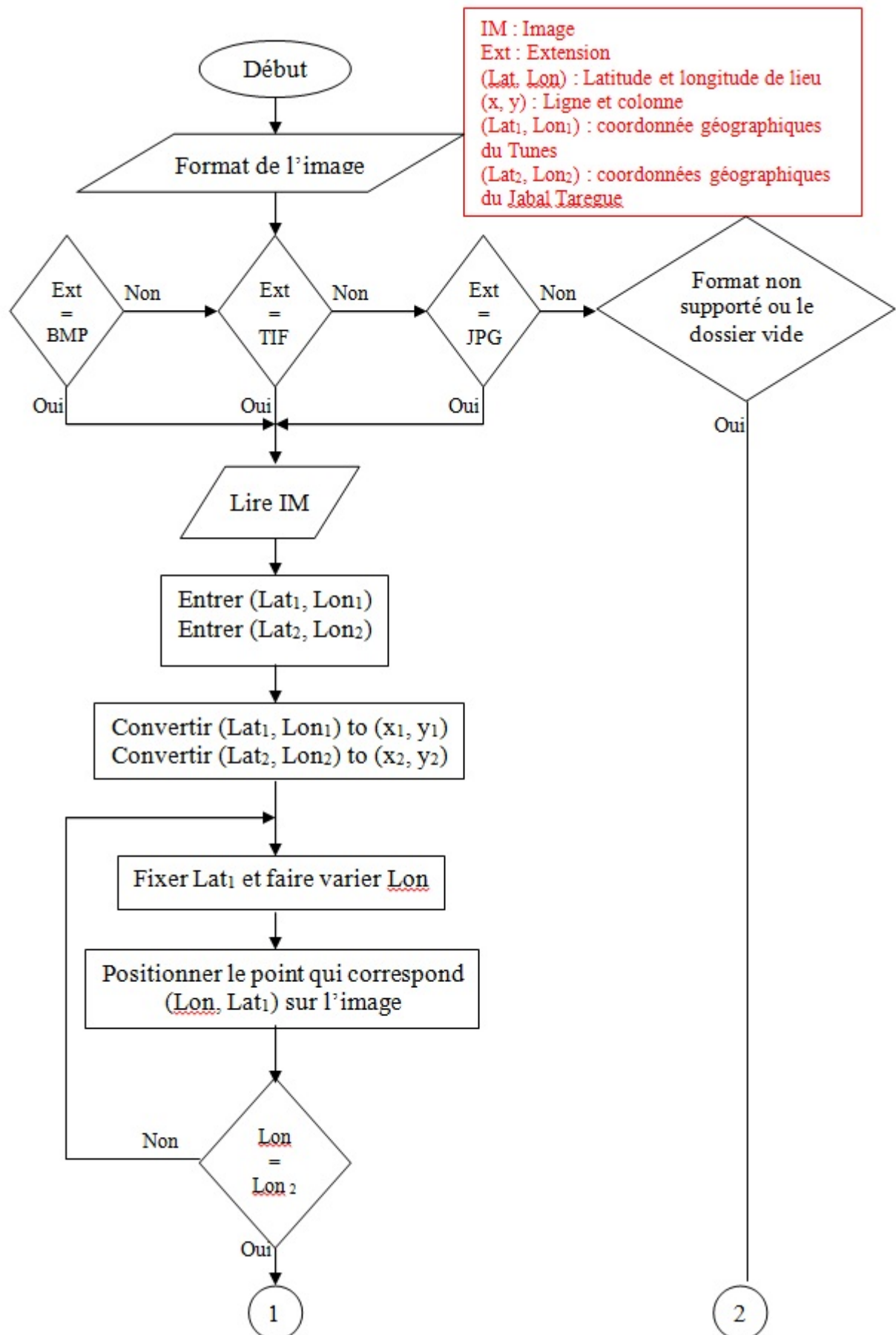
1 Organigramme qui fait la conversion des coordonnées

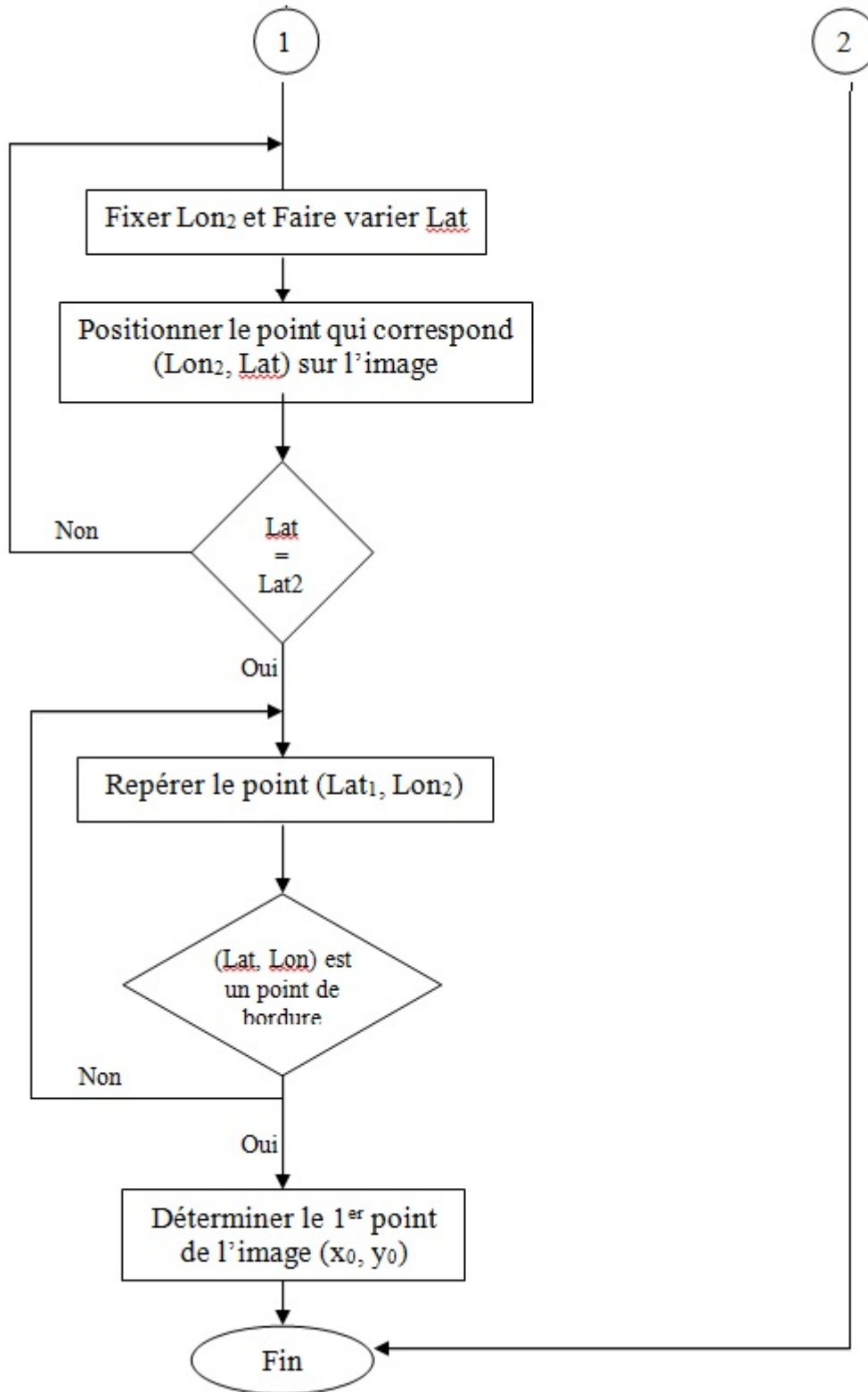
Choisissant deux point sur l'image satellitaire de cordonnees géographiques (Lat_1, Lon_1) et (Lat_2, Lon_2) , qui sont clair sur l'image satellitaire, ces deux coordonnées sont extraite de la base des données **SoDa** [w7].

Le positionnement de ces points sur l'image se fait à partir de l'application des algorithme de conversion de coordonnées géographiques en coordonnées de pixels [w8] Une fois déterminer le pixel de chaque point, on suppose a la fois que le couple (x_i, y_i) est le point de départ de l'image (x_0, y_0) , puis on positionne les deux points sur l'image.

On fait varier à la fois latitude (ou bien la longitude) et en fixant la longitude (ou bien la latitude) puis visualisé les deux points choisis sur l'image jusqu'à trouver le vrai point de départ de l'image. L'organigramme suivant permet d'expliqué cette procédure de calcul.







1 Estimation de l'éclairement solaire global en ciel clair

L'estimation de l'éclairement solaire global incident au sol par les modèles adoptés nécessite la connaissance du rayonnement par ciel clair. La précision de l'estimation de l'éclairement solaire consiste l'élévation de la quantité du modèle de ciel clair.

1.1 Modèle de l'O.M.M

Les formules d'éclairements dépendent de l'angle zénithale solaire et le facteur atmosphérique de trouble de Linke. Ce facteur est variable dans le temps et l'espace.

a) Composante globale

$$G_{skc} = (1297 - 57T_L)\epsilon \cos(\theta)^{(T_L+36)/23} \quad (D.1)$$

b) Composante directe

$$I_{skc} = (1390 - 31T_L)\epsilon \exp\left[\frac{-T_L}{12.6 \cos(\theta)}\right] \quad (D.2)$$

c) Composante diffus

$$D_{skc} = 383\epsilon \exp\left(\frac{-4}{T_L} \cos(\theta)^{(T_L+57)/30}\right) \quad (D.3)$$

où T_L : Facteur de turbidité de Linke.

ϵ : Facteur de correction astronomique de distance Soleil-sol.

θ : Angle zénithal (direction 1 : du Soleil ou bien direction 2 : du visé du satellite)

Le coefficient de transmission atmosphérique total vers (le Soleil ou satellite) est défini comme suit :

$$T(\theta) = \frac{1390 - 31T_L}{I_0} \epsilon \frac{-T_L}{12.6 \cos \theta} \quad (D.4)$$

1.2 Modèle de l'E.S.R.A

a) **Composante directe** : La radiation solaire directe reçue sur plan horizontal par ciel clair est obtenu par l'équation ci-dessous :

$$I_{skc} = I_0 \epsilon \sin(h_s) \exp[-0.8662 T_L m_a \delta_r(m_a)] \quad (D.5)$$

b) **Composante diffuse** : La radiation diffus D_{skc} arrivant au sol sur plan par ciel clair dépend aussi du facteur de trouble de Linke et de la hauteur solaire

$$D_{skc} = I_0 \epsilon T_{rd} m_a \delta_r F_{rd}(h_s, T_L) \quad (D.6)$$

c) **Composante globale** : La radiation globale G_{skc} arrivant à la surface terrestre sur plan horizontal par ciel clair est obtenue par la sommation de la radiance directe et diffuse.

$$G_{skc} = D_{skc} + I_{skc} \quad (D.7)$$

où I_0 : Constante solaire, égale à 1367 W/m^2

ϵ : Facteur de correction de la distance Terre-Soleil.

h_s : Angle de la hauteur solaire.

T_L : Facteur de trouble de Linke.

m_a : Masse d'air optique relative.

δ_r : Epaisseur optique.

F_{rd} : Fonction angulaire du rayonnement diffus.

Le coefficient de transmission atmosphérique total vers (le Soleil ou satellite) est défini comme suit :

$$T(\theta_s) = T_{rb}(\theta_s) + T_{rd}(\theta_s) \quad (D.8)$$

$$T(\theta_v) = T_{rb}(\theta_v) + T_{rd}(\theta_v) \quad (D.9)$$

où T_{rb} , T_{rd} sont respectivement les coefficients de transmission direct et diffus au azimuth qui sont définis par les deux équations :

$$T_{rb}(\theta_s) = \exp(-0.8662 T_L (AM) m_a f_c(n)) \quad (D.10)$$

$$T_{rb}(\theta_v) = T_{rd}(T_L(AM_l) F_D(\theta_s, T_L(AM))) \quad (D.11)$$

1 Mèthode d'interpolation

L'interpolation polynomiale de Lagrange est une approximation d'un ensemble des données ou d'une fonction connue seulement en certains points par un polynôme simple à évaluer. En d'autres termes, $(x_i, f(x_i))$ étant donné un ensemble de points (obtenu, par exemple, à la suite d'une expérience), on cherche un polynôme qui passe par tous ces points

Théorème : Soit f une fonction définie sur l'intervalle $[a, b]$, le problème consiste à trouver un polynôme f approchant sur la base de principe d'interpolation. On considère $n + 1$ points $(x_0, y_0), (x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$ deux à deux distincts réel tel que dans le même intervalle $[a, b]$. On cherche alors un polynôme de degrés au plus vérifiant pour $i = 0$ à n , ce polynôme s'écrit alors comme suit :

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) L_i(x) \quad a \leq x \leq b \quad (\text{E.1})$$

Où $L_i(x)$ est le polynôme de Lagrange donné par l'équation suivante :

$$L_i(x) = \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (\text{E.2})$$

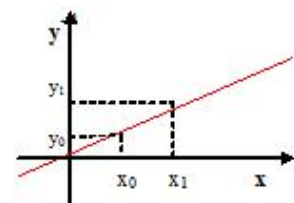
Propriété : Les polynômes vérifient les propriétés suivantes :

1. $L_i(x)$ est de degré n pour $i = 0$ à n .
2. $L_i(x) = \delta_{ij}$

Exemple : Pour $n = 1$, on connaît deux points $(x_0, y_0), (x_1, y_1)$ On cherche la droite $y = ax + b$ (polynôme de premier degré) qui passe par les deux points. On détermine les deux polynômes de Lagrange L_0 et L_1

$$L_0(x) = \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} \quad \text{et} \quad L_1(x) = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

y s'écrit alors $y = y_0 L_0 + y_1 L_1$



1 Interface graphique

Page d'accueil : La page d'accueil est la page principale de notre application. Elle permet d'accéder au menu principal (bouton « Ok »), ou quitter totalement l'application (bouton « Quitter »).



Figure F.1 – Page d'accueil.

Menu principale : Elle contient les différentes étapes de traitement effectué dans le cadre de notre travail. Elle comporte sept boutons, trois barres et une liste :

- bouton « **Sélect date** » permet d'ouvrir le calendrier ;
- bouton « **Sélect site** » permet de charger tout les sites d'études ;
- bouton « **Suivant** » permet de sélectionner la prochaine étape ;
- bouton « **Précédent** » permet de sélectionner la précédente étape ;
- bouton « **Exécuter** » permet de démarrer exécution ;
- bouton « **Exit** » permet de revenir à la page d'accueil ;
- barre d'attente permet d'afficher le pourcentage de l'exécution.

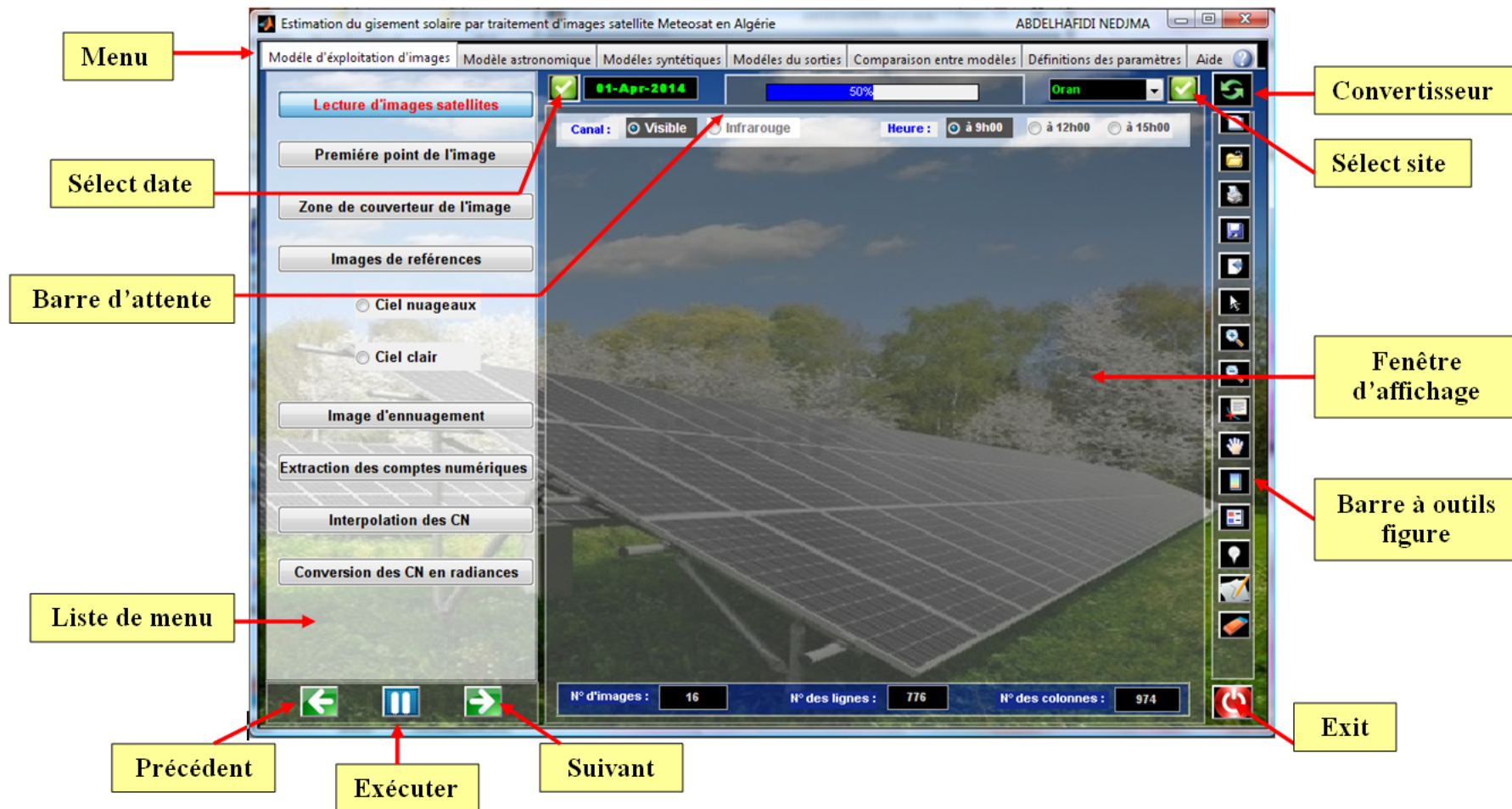


Figure F.2 – Menu principale.

- barre de menu permet d’afficher les modèles utilisés dans notre études ; elle contient aussi l’aide et définitions des paramètres solaire ;
- barre à outils figure permet d’afficher tous les boutons (ouvrir, enregistrer, zoom,) ;
- liste de menu change à partir de menu qui contient tout les étapes à suivre pour chaque modèle.

Barre à outils figure : permet d’afficher tous les boutons (ouvrir, enregistrer, zoom, ...)

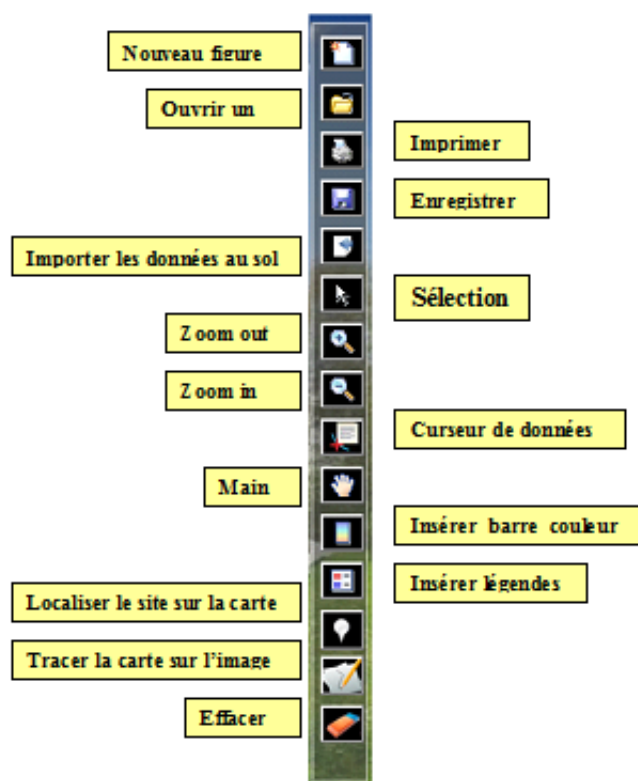


Figure F.3 – Barre à outils figure.

Boîte de calendrier : Cette boîte s’ouvre en cliquant sur le bouton « **Sélect date** », elle permet de charger la date de la simulation.

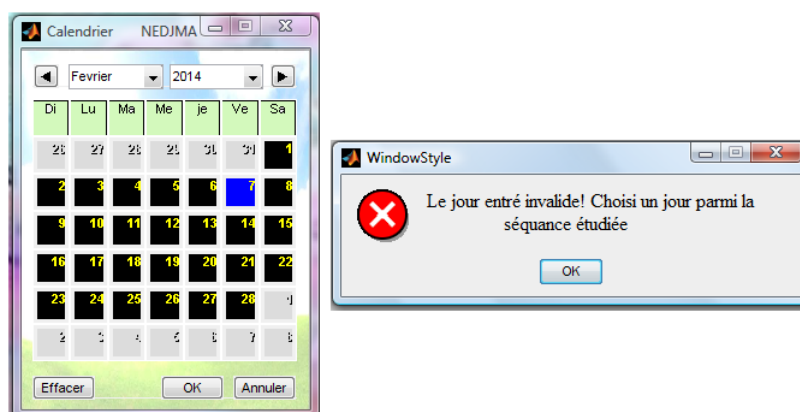


Figure F.4 – Boîte de calendrier.

Boîte de convertisseur : Cette boîte s'ouvre en cliquant sur le bouton « Convertisseur », elle permet de convertir les coordonnées selon nos besoins.

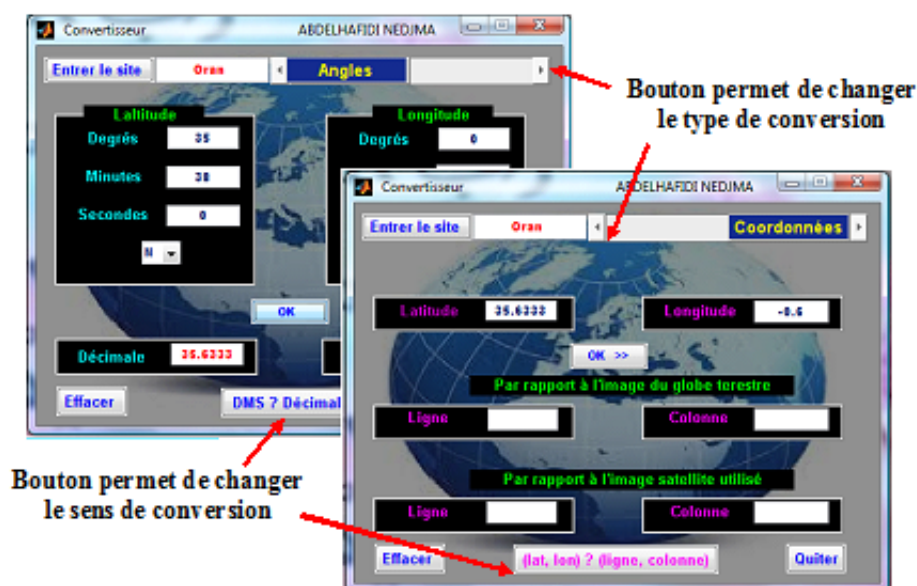


Figure F.5 – Boîte de convertisseur.

Choix de type de convertisseur :

- **Convertisseur des angles** Cet outil vous permet de convertir les coordonnées décimales en Degrés - Minutes - Secondes et inversement (voir la figure, à gauche)
- **Convertisseur des coordonnées** Cet outil vous permet de convertir les coordonnées géographique (latitude, longitude) en coordonnées de l'image (ligne, colonne) et inversement (voir la figure, à droite).

Cliquer sur le bouton « **Entrer le site** » pour charger leurs coordonnées (latitude, longitude).

Boîte de choix de l'extension de l'image : Cette boîte permet de choisir l'extension des images satellitaire.

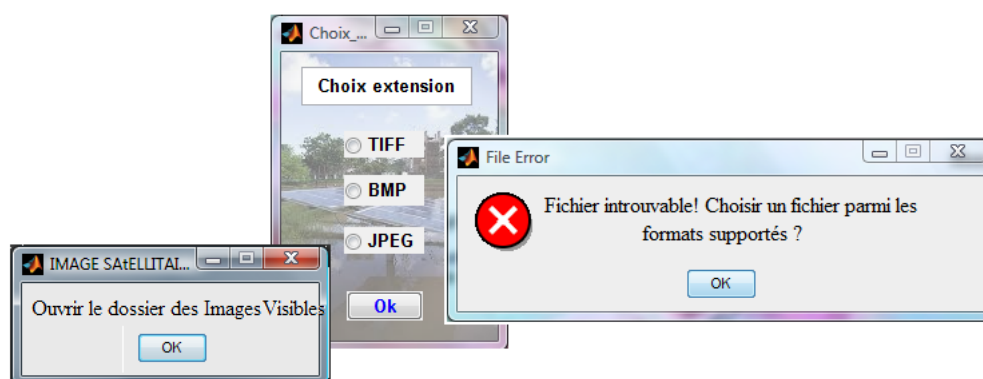


Figure F.6 – Boîte de choix de l'extension de l'image.

1 Indicateur statistique

Plusieurs indicateurs statistiques, ont été dans la littérature, pour évaluer les performances des modèles d'estimation de l'irradiation solaire. Les indicateurs les plus populaires et les plus utilisés sont :

RMSE (Root Mean square error) : racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=0}^n (V_{mes}(i) - V_{est}(i))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (F.1)$$

La RMSE, est une mesure de la variation des valeurs prédites autour des valeurs mesurée. Plus la valeur est petit plus le modèle est meilleur.

MBE (Mean Bias error) : erreur de biais moyen.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n (V_{mes}(i) - V_{est}(i)) \quad (F.2)$$

La MBE donne une indication sur la deviations moyenne des valeurs prédites par rapport aux valeurs mesurées correspondants. Une valeur positive indique une surestimation dans l'irradiation globale prédite et une négative une sous-estimation.

COR : coefficient de corrélation

$$COR = \frac{\sum_{i=0}^n (V_{mes}(i) - \overline{V_{est}(i)})((V_{mes}(i) - \overline{V_{est}(i)}))}{\sum_{i=0}^n (V_{mes}(i) - \overline{V_{est}(i)})^2} \quad (F.3)$$

Ce coefficient mesure combien les valeurs prédites se rapprochent-elles des valeurs réelle. Clairement, une valeur du coefficient de corrélation plus proche de l'unité implique une meilleure prévision. Avec N : le nombre d'exemple utilisé dans la base d'entraînement ou de test.

- Valeur estimée par le modèle.
- Valeur mesurée au sol.
- Valeur moyenne estimée par le modèle.
- Valeur moyenne mesurée au sol.

Estimation du Gisement Solaire en Algérie à partir des Données de Satellite Météosat

UNE meilleure méthode a été développée pour calculer la base de données de la climatologie du rayonnement solaire en Algérie. Elle utilise des données provenant des satellites météorologiques Meteosat prise dans deux canaux (visible et infrarouge). Cette méthode est basée sur la détermination de l'indice d'enneuagement puis l'indice de ciel clair pour différents états du ciel à savoir : clair, partiellement couvert et totalement couvert, pour ensuite calculer le rayonnement solaire global incident sur la surface de la Terre. Les valeurs d'irradiations solaires globales estimées sont comparées aux valeurs mesurées effectuées dans une seule station météorologique (Oran, 35° 38'N, 00° 36'W) durant le mois d'Avril 1997. En particulier, l'erreur relative moyenne est d'environ 3% à l'échelle horaire et 4% à l'échelle quotidienne. Les résultats obtenus montrent la validité de notre méthode. Elle peut être utilisée pour le calcul de l'irradiation horaire et journalier sur les zones dans un environnement tropical.

Mots clés : Images satellite Météosat, Etalonnage, Indice d'enneuagement, Indice de ciel clair, Irradiation solaire globale.

Estimating Solar Field in Algeria from Meteosat Satellite Data

A Better method is developed to compute a climatology database of solar radiation over Algeria. It makes use of data from the meteorological satellites Meteosat collected in two channels (Visible and Infrared). Our method is based on a cloudiness index and clearness index computing for the different sky states namely clear, partly covered and overcast in order to calculate the global solar radiation incident on the surface. The estimated global solar values are compared to the ground measurement values performed in one meteorological station (Oran, 35°38'N, 00°36'W) during April 1997. In particular, the relative mean error is about 3 % on an hourly basis and 4% on a daily basis. The obtained results show the validity of our method. It can be used for calculation of hourly and daily irradiation over areas in a tropical environment.

Keywords : Satellite Meteosat images, Calibration, Cloud-cover index, Clearness index, Global solar irradiation.
