



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AMAR TELIDJI – LAGHOUAT

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire de Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Thème

**Différentes approches pour l'estimation de
l'irradiation solaire en Algérie par télédétection**

Présenté par :

BENHASSINE Abir et OUAHRANI Chaima

Jury de soutenance :

SEGHIER Abdelkarim	MAA (UAT Laghouat)	Président
ROUGAB Ilyes	MAA (UAT Laghouat)	Examineur
REGUIEGUE Mourad	MCB (UAT Laghouat)	Rapporteur

Promotion : 2019-2020

ملخص

من أهم تطبيقات الاتصالات عن طريق الاستشعار عن بعد، هي مراقبة الأرض وجمع معلومات وبيانات عنها. تشكل الصور المأخوذة من القمر الصناعي Meteosat قاعدة بيانات مفيدة للغاية من أجل استغلالها في البحث العلمي، وذلك نظراً لتوفرها يوميا، مما يجعلها مصدرا لا غنى عنه لرصد وتحليل وفهم جميع ظواهر الطقس .

الهدف من عملنا هذا هو تقدير الإشعاع الشمسي في الجزائر، ومن أجل تحقيق هاته الغاية، اخترنا نموذج GisTel الذي يستخدم صور القمر الصناعي في القناة المرئية.

يستند هذا النموذج إلى تحديد مؤشر السماء لحالات مختلفة وهي: صافية ومغطاة جزئيا ومغطاة بالكامل.

استخدمنا أيضا طريقة التعلم العميق Keras وذلك باستعمال خوارزمية الانحدار الخطي لتقدير الإشعاع الشمسي الأفقي الكلي، وهذا الاختيار مبرر من خلال بساطة وكفاءة طريقة تحديد الصور من أجل حساب الإشعاع الشمسي الكلي على سطح الأرض.

اقترحنا استعمال طريقة الانحدار الخطي لتحسين جودة النتائج التي تم الحصول عليها. للتحقق من صحة نتائجنا، قمنا بمقارنة القيم المقدرة للإشعاع الشمسي الكلي بالقيم المقاسة، وكمثال أخذنا محطة الأرصاد الجوية URAER لغرداية .

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها صحة النموذج المعتمد بهوامش خطأ جيدة.

كلمات مفتاحية: الاستشعار عن بعد - الإشعاع الشمسي - GisTel - الانحدار الخطي - Keras.

Abstract

One of the most important applications in telecommunications is remote sensing. It consists in Earth observation and the collection of information and data about our planet.

The images from the Meteosat satellite MSG constitute an extremely useful database for scientific research. The daily availability of such sources of information makes them an indispensable tool for monitoring, analyzing and understanding all weather phenomena. Our present work aims at estimating solar radiation in Algeria. In order to achieve this goal, we chose a GisTel model that uses satellite imagery in the visible channel. This model is based on the determination of the sky's index for different conditions, clear sky; sky partially covered and fully covered sky.

We also used the Keras deep learning method and we chose the linear regression algorithm for a global horizontal solar radiation estimation, this choice is justified by the simplicity and efficiency of the method for determining the images in order to calculate the global solar radiation on the surface of the earth

We proposed to use the linear regression method in order to improve the quality of the obtained results. The estimated values of global solar radiation are compared with the measured values for the URAER station of Ghardaia.

The obtained results seem to be satisfactory with good margins of errors.

Keywords: Remote Sensing- Solar radiation- GisTel - Linear regression- Keras .

Résumé

La télédétection est l'une des applications les plus importantes en télécommunication.

Les images du satellite Météosat MSG constituent une base de données d'une extrême utilité pour les recherches scientifiques. La disponibilité quotidienne de telles sources d'information en fait un outil indispensable pour le suivi, l'analyse et la compréhension de tous les phénomènes météorologiques. C'est l'observation de la Terre et la collecte des informations et des données autour de celle-ci.

L'objectif de notre travail est d'estimer le rayonnement solaire en Algérie. Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi le modèle GisTel qui utilise l'imagerie satellitaire dans le canal visible. Ce modèle est basé sur la détermination de l'indice du ciel pour différentes situations : clair, partiellement couvert et totalement couvert. Nous avons également utilisé la méthode d'apprentissage approfondi Keras et nous avons choisi la méthode de régression linéaire comme méthode d'estimation du rayonnement solaire horizontal global, ce choix est justifié par la simplicité et l'efficacité de la méthode pour déterminer les images, afin de calculer le rayonnement solaire global à la surface de la Terre. Nous avons proposé d'utiliser la méthode de régression linéaire afin d'améliorer la qualité des résultats obtenus. Pour valider nos résultats, les valeurs estimées du rayonnement solaire global sont comparées aux valeurs mesurées. Nous avons pris comme exemple la station météorologique UREAER de Ghardaïa.

Les résultats obtenus montrent la validité du modèle adopté avec de bonnes marges d'erreurs.

Mots-clés : Télédétection- Rayonnement solaire- GisTel - Régression Linéaire- Keras.

Remerciements

Avant tout nous remercions ALLAH de nous avoir donné la volonté pour préparer ce travail.

Notre gratitude et notre reconnaissance que nous saurions Suffisamment exprimer vont d'abord à notre encadreur monsieur Mourad REGUIGUE qui nous a proposé suivi, dirigé et encouragé pour finir ce travail avec une très grande générosité, qu'il trouve ici l'expression de nos meilleures salutations.

Nos remerciements vont aussi :

Les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer et juger notre travail.

Nous voudrions aussi exprimer notre vive reconnaissance envers tous les enseignants de département d'électronique ainsi que tous ceux qui ont participé à notre formation.

Nous remercions sincèrement nos collègues et amis, en particulier Habiba

Et aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réaliser ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

à mes parentes (mohammed et saida) : pour leur Amour , leur tendresse, leur sacrifices , leur compréhension , leur soutiens qu'ils m'ont donné pendant tout les moments de ma vie .

À ma très chère sœur fatiha et à son mari et ma petite sœur djamila: pour toute l'ambiance dont tu m'as entouré, pour toute la spontanéité, puisse le tout puissant tenonner bonheur. et santé.

À mon frère youssef et sa femme et mon frère Ibrahim et à sa femme pour tout l'amour et la tendresse exceptionnels tout au long de ma carrière universitaire.

À mes chers enfants, ilyass, Idriss ,Islam et Walid...

À mon cher frère ali , à mon grand-père, ma grand-mère, toutes les tantes, tantes, oncles

À mes chers amis Abeer, Habiba et tout la famille

Benhassine

Tous mes amis que j'aime et que j'estime.

À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer...

GHAMMA



Dédicace

Je dédie ce rapport à mes chers parents, qui n'ont jamais cessé de me soutenir... Merci d'être toujours à mes côtés, je vous remercie pour votre amour et votre générosité.

À mes chères sœurs HABIBA et WAFIA pour leurs encouragements constants et leur soutien moral,

À mes chers frères MOUHAMED et TAHA pour leur soutien et leurs encouragements,

À tous mes amis qui m'ont apporté un soutien moral pendant ces années scolaires, LINA et HANAN et Surtout CHAIMA que j'aime tant, Je les remercie sincèrement.

À toute ma famille pour les soutenir tout au long de ma carrière universitaire.

AbiR



Table des matières

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux	IV
Liste des abréviations	V
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur le rayonnement solaire	
I .1. Introduction.....	3
I .2. Le soleil.....	3
I .3. Le rayonnement solaire	4
I.3.1. Nature du rayonnement solaire.....	4
I.3.2. Les composantes de l'irradiation	5
I.3.3. Coordonnées géographiques	5
3.3.1. La latitude θ	6
3.3.2. La longitude φ	6
3.3.3. L'altitude	6
I.3.4. Répartition géographique du rayonnement solaire.....	7
I.3.5. Caractéristique de rayonnement solaire.....	7
3.5.1. L'atmosphère.....	7
3.5.2. Masse d'air	8
I .4. mesure de l'éclairement	9
I .5. Méthodes d'estimation de l'irradiation globale solaire par satellite	11
I .5.1. Modèle analytique	11
5.1.1. Modèle d'Halpern (1984)	12
5.1.2. Modèle de Raschke et Preus (1979)	12
5.1.3. Modèle de Gautier et Mass (1980)	12
I .5.2. Modèle statique	14
5.2.1. Modèle de Brakke et Kanemasu (1981)	14
5.2.2. Modèle de Bahm (1981)	14
5.2.3. Modèles de Hanson (1976) et Nimira (1980)	14
5.2.4. Modèle de Shaltout et Hassen (1990).....	15
I .5.3. Modèle physique.....	15
5.3.1. Modèle de Hanson (1971)	15
5.3.2. Modèle d'Ellis et Von Der Haar (1976)	16

Table des matières

5.3.3	Modèle de Sorapipatana et Exell (1988)	16
5.3.4	Modèle de Nunez (1984)	16
5.3.5.	Modèle de Tarpley (1979)	16
5.3.6	Modèle de Cano et al. (1986)	16
5.3.7	Modèle de Delorme (1987)	17
I .6.	Présentation du modèle GISTEL	18
I .6.1.	Historique du modèle	18
I .6.2.	Hypothèses du modèle GISTEL	18
I .6.3.	Principe de base du modèle GISTEL	20
I .6.4.	Formulation du modèle GISTEL	21
6.4.1.	Calcul du coefficient de réflexion	21
6.4.2.	Détermination des deux images de référence	22
6.4.3.	Détermination de l'indice de clarté	22
4.4.4.	Comparaison des coefficients de réflexion	22
6.4.5.	Irradiation horaire globale G_i	23
I .7.	Conclusion	23

Chapitre 2 : La télédétection et les satellites Météosat

II .1 .	Introduction	25
II .2 .	La télédétection	25
II .2.1	Définition	25
II.2.2	Différentes étapes de la télédétection	26
II .2.3	Éléments constituant les systèmes de télédétection	27
II .2.4	Mesures de la télédétection	28
II .2.5	Domaines d'application de la télédétection	29
II .3 .	Les satellites	31
II .3.1	Définition	31
II .3.2	Orbite d'un satellite	32
II .3.3	Les différents types de satellites	34
II 4 .	Satellite météorologie	35
II .4.1	Définition	35
II .4.2	Les satellites géostationnaires	37
II .4.3	Les satellites polaires (héliosynchrones)	37

Table des matières

II .4.4 Les mesures d'un satellite météorologique	38
II .5. Les satellites Météosat Seconde Génération (MSG)	39
II .5.1 Définition	39
II .5.2 Mission principale.....	40
II .5. 3. Générations sur les satellites Météosat	40
5.3.1. MPG (Météosat Première Génération)	40
5.3.2. MSG (Météosat Seconde Génération).....	42
5.3.3. MTG (Météosat Troisième Génération)	43
II .5.4 Les images satellitaires	43
II .5.5 les images Météosat	43
II .5.6 Potentialités des images MSG	44
II .5.7 Système de prise des images	45
II .5.8 Les 12 canaux de SEVIRI	47
II .5.9 Segment de sol de MSG	50
II .5.10 EUMETSAT	50
II .6. Conclusion	51

Chapitre 3 : Résultats et interprétations

III.1.Introduction	52
III.2.Méthodologie.....	52
III.2.1.Extraction de zone d'étude.....	52
III.2.2. Méthode Gistel.....	53
III.2.3.Méthode de régression linéaire	55
III.3.Présentation des résultats.....	58
III.3.1.Estimation du rayonnement solaire horizontal global	58
III.3.2.Validation de la méthode	61
III.4 Conclusion.....	63
Conclusion Générale	64
Références bibliographiques	65

Liste des figures

Figure I. 1 Rayonnement global.....	4
Figure I. 2 Coordonnées terrestres	6
Figure I. 3 Répartition de l'énergie solaire dans le monde.....	7
Figure I. 4 le rayonnement solaire et le nombre d'air masse	8
Figure I. 5 Représentation graphique des spectres AM0 ,AM1,5.....	9
Figure I. 6 Exemple de capteurs actinométriques	10
Figure I. 7 Exemple d'une image meteosat -8.....	11
Figure I. 8 Echanges radiatifs en ciel clair dans le système atmosphère - terre.....	13
Figure I. 9 Différentes étapes du modèle de GISTE.....	20
Figure II. 1 Le cheminement de l'information	27
Figure II. 2 Le principe de base de la télédétection.....	27
Figure II. 3 Cartes de fréquence moyenne annuelle des nuages et des propriétés physiques moyennes des nuages (épaisseur optique, contenu en eau).....	29
Figure II. 4 Détection du phénomène El Niño en 1997 dans l'Océan Pacifique à partir des données topographiques de TOPEX- et des données de températures de surface de la mer mesurées par radiométrie infrarouge (NOAAVHRR –à droite-).	30
Figure II. 5 Suivi de la végétation à l'échelle planétaire	29
Figure II. 6 Orbite basse décrite par le satellite	32
Figure II. 7: Orbite moyenne décrite par le télescope spatial Hubble	33
Figure II. 8:Orbite décrite par un satellite de télécommunications	33
Figure II. 9: Satellites météorologiques.	36
Figure II.10: Couverture des satellites météorologiques géostationnaires opérationnels depuis l'espace	36
Figure II.11:Orbite géostationnaire	37
Figure II. 12: Orbite polaire	38

Liste des figures

Figure II. 13: Fonctionnement des capteurs, passif (A) et actif (B)	39
Figure II. 14: Représentation artistique du satellite MeteoSat-8	40
Figure II. 15: Une tempête sur le proche Atlantique le 18 octobre 2002. Image Météosat	44
Figure II. 16: Radiomètre SEVIRI	46
Figure II. 17: Principe de prise d'images par le radiomètre SEVIRI.	47
Figure II. 18: Distribution du rayonnement dans les 12 canaux de SEVIRI.....	48
Figure II. 19 : Images prises dans le canal visible HRV à droite et 0.6 μm à gauche	48
Figure II. 20: Image prise dans l'IR 10.8 μm	49
Figure II. 21: Images de canal vapeur d'eau 6.2 μm à gauche et 7.3 μm à droite	50
Figure III. 1 La zone d'étude extraite d'une image plein disque prise le 16 juin 2012 à 1145 UTC	53
Figure III. 2 Facteur de trouble de Linke moyennes mensuelles	54
Figure III. 3 Les deux images de référence à droite : l'image de ciel nuageux, à gauche : l'image de ciel clair	55
Figure III. 4 Définition du modèle utilisé de Keras.....	56
Figure III. 5 Entraînement du modèle utilisé de Keras	57
Figure III. 6 Programme pour la prédiction.....	58
Figure III.7 : Rayonnement solaire horizontal global horaire mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour différents jours de l'année 2015 pour le site de Ghardaia	59
Figure III. 8 GHI pour les jours 01 et 10 de mois (09,10,11) 2015, de même site.....	60
Figure III. 9 Evolution de l'erreur MAE pour le rayonnement solaire horizontal global	62
Figure III. 10 Evolution de l'erreur RMSE pour le rayonnement solaire horizontal global	63

Liste des tableaux

Tableau II. 1 Les principales caractéristiques du radiomètre de METEOSAT 41

Tableau II. 2 Bande spectrale des douze canaux du satellite MSG 42

Tableau III. 1 Coefficients de calibration correspondant au canal visible VIS008..... 55

Tableau III. 2 Le MAE et RMSE entre les données mesurées et les données simulées ... 62

NOMENCLATURE

LISTE DES ABREVIATIONS

API	Application Programming Interface
CEPMMT	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
ESA	Agence Spatiale Européenne
GEO	Geostationary Earth Orbit
GMS	Geostationary Meteorological Satellite
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GOMS	Geostationary Meteorological Satellite
GPS	Global Positioning System
HRIT	High Rate Information Transmission
URAER	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables
HRV	High-Resolution Visible
INSAT	Indian National Satellite System
IR	Infra-Red
LEO	Low Earth Orbit
MAE	Erreur Moyenne Absolue.
MEO	Medium Earth Orbit

NOMENCLATURE

MPG	Météosat P remière G énération
RMSE	Erreur M oyenne Q uadratique,
MSG	Meteosat S econd G eneration
MTG	Météosat T roisième G énération
NOAA	Administration Nationale O céanique et A tmosphérique
OMM	Organisation M étéorologique M ondiale
RELU	Unité L inéaire R ectifiée
rmsprop	propagation quadratique moyenne,
SMN	Services M étéorologiques N ationaux
SEVIRI	Spining E nhanced V isible and I nfrared I mager
val_mae	v aleur d'erreur moyenne absolue pour l'étape d'évaluation.
VIS	V isible,

LISTE DES SYMBOLES

h : constante de Planck.

c : vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

I_b : rayonnement direct

I_d : rayonnement diffus

I_G : rayonnement global reçu au sol

Z : l'angle zénithal

NOMENCLATURE

γ : la hauteur angulaire

h : la hauteur angulaire du soleil

OM : la longueur du trajet du soleil travers l'atmosphère

G_r : flux d'irradiation solaire.

G : flux global d'irradiation solaire

G_0 : valeur extraterrestre

α_b : coefficient de réflexion dû au rayonnement directe.

α_d : coefficient de réflexion dû au rayonnement diffus.

u_1 : chemin parcouru par les rayons solaires dans l'atmosphère, lorsqu'ils vont dans le sens soleil – terre.

u_2 : trajet accompli par le rayonnement solaire dans le sens terre – satellite, lors de la traversée de l'atmosphère.

$q(u_1)$ et $q(u_2)$: coefficients d'absorption atmosphérique rencontrés au cours des trajets respectifs u_1 et u_2 .

ρ_s : albédo de la surface terrestre

B : brillance de chaque pixel.

Z : angle zénithal

Ψ : angle d'azimuth

a, b, c et d : coefficients de régression

$p^t(i, j)$: albédo apparent de l'image au temps t .

$G_c^t(i, j)$: Irradiation solaire global par ciel clair

R : radiance (W/m²/sr)

CN : compte numérique

CAL_slope et CAL_offset : coefficients de calibration

Introduction Générale

Le soleil, énorme et inépuisable énergie renouvelable, rayonne sur Terre avec une puissance de 16×10^{15} kW / m² par an dans toutes les longueurs d'onde du spectre de (la lumière visible, rayons ultraviolets , rayons infrarouges). Pour connaître les sédiments, il existe trois sources d'information : les mesures de rayonnement prises dans les stations d'actinomètres, les notes des stations météorologiques et l'imagerie satellitaire [1].

Une connaissance précise de distribution de la radiation solaire à un endroit géographique donné est d'une importance majeure pour le développement des dispositifs d'énergie solaires et pour l'évaluation de leurs performances. Hélas, pour beaucoup de pays en voie de développement les mesures de l'irradiation solaire ne sont pas facilement disponibles. Il est donc, important d'élaborer des modèles d'estimation de l'irradiation solaire sur la base des données astronomiques et météorologiques.

L'Algérie est un pays de soleil par excellence. Le nombre des heures d'insolation s'élève à presque 3300 h/an. Le climat est très favorable pour l'exploitation de l'énergie solaire dans différents domaines, mais la distribution de l'irradiation solaire n'est pas bien connue [2].

Les satellites géostationnaires de deuxième génération (MSG) de Météosat fournissent des informations sur la Terre et son atmosphère avec une grande précision spatiale et temporelle.

Ainsi, ces satellites sont très utiles non seulement pour les prévisions météorologiques, mais aussi pour l'estimation des dépôts solaires qui permettent de reconstruire les cycles quotidiens et horaires du rayonnement solaire.

L'imagerie satellitaire couvre en permanence une région entière. Cependant, il ne permet une évaluation qualitative des états d'ensoleillement qu'à partir de calculs numériques qui caractérisent le rayonnement réfléchi par le système atmosphérique terrestre. D'où la nécessité de relier ces images à des mesures au sol puis de les calibrer en termes d'intensité du rayonnement solaire.

Plusieurs méthodes sont en cours de développement pour estimer le rayonnement solaire en traitant les images satellitaires une fois que les satellites Météosat sont en orbite. Parmi elles, des méthodes physiques qui ont été principalement développées en tenant compte des critères caractérisant l'absorption, la diffusion et la réflexion du rayonnement solaire par les nuages, les aérosols et la surface de la Terre [1].

La contribution à cette étude est l'estimation des sédiments solaires qui atteignent la Terre sur un plan horizontal en traitant des images MSG, et nous avons appliqué le modèle GisTel (Gisement Solaire par Télédétection), qui est un modèle physique basé sur la relation entre l'indice de clarté a été déterminé à partir des images , et le rayonnement global qui atteint le sol dans un ciel clair. Une deuxième méthode proposé utilisant un principe d'apprentissage, basé sur la régression linéaire par apprentissage approfondi (Deep learning), qu'est une technologie courante ; il approfondit sa compréhension de l'image en utilisant des concepts de plus en plus précis pour déterminer le rayonnement global à partir des images MSG [3].

Pour ce faire, on se propose de donner la présentation des notions de bases sur le rayonnement solaire ainsi que les différentes méthodes d'estimation du rayonnement par traitement d'images dans le premier chapitre.

Le second chapitre sera consacré à des notions de base sur la télédétection et les satellites météorologiques.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons et commenterons les résultats obtenus pour le modèle choisi notamment le modèle de Gistel. Nous verrons l'apport de l'utilisation de la régression linéaire par apprentissage approfondi appliquer à des images dans le calcul du rayonnement solaire horizontal global et nous terminons le présent travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur le rayonnement solaire

I.1. Introduction

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des autres énergies renouvelables. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïques, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique. Cependant, ce rayonnement est sujet à plusieurs perturbations, qui varient avec la constitution verticale de l'atmosphère terrestre (nuage, aérosol, ...etc.), qui constitue une barrière empêchant ainsi l'entière radiation solaire de passer [4].

La puissance rayonnée à la surface du soleil est d'environ 3,85.10²⁶ W. Cependant, une infime partie qui est de 1,9.10¹⁷ W est reçue par la terre. Il existe deux types de mesures pour déterminer le rayonnement solaire arrivant à la surface terrestre. Les mesures in-situ sont effectuées dans les stations météorologiques ou radiométriques par contre les mesures indirectes utilisent les images prises par des satellites météorologiques. Pour utiliser cette deuxième voie, il est nécessaire d'extraire les composantes utiles du rayonnement solaire en traitant les images [1].

I.2. Le soleil

Le soleil est une étoile autour de laquelle gravite la terre. Son énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5800K. La surface lumineuse habituellement visible, ou photosphère, est d'environ 100 km d'épaisseur. La chromosphère est la couche inférieure de l'atmosphère solaire, entre la photosphère et la couronne. Les taches solaires sont des taches sombres sur la surface de la photosphère qui correspondent à des zones plus froides, elles ont une très grande diversité de forme et d'étendue. Les observateurs comme Galilée, ont vu que les taches se déplaçaient au fil du temps, toujours dans le même sens, ainsi montrant la rotation du soleil. Le globe solaire limité par la photosphère à un rayon égal à 696000km, soit environ 109 fois le rayon équatorial de la terre. Sa densité moyenne n'est que de 1,41 de sorte que sa masse est seulement 333.000 fois celle de la terre, pour un volume 1300000 fois plus important. La distance moyenne de la terre au soleil est voisine de 150 millions de km. Le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour nous parvenir [5].

I.3. Le rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. On distingue donc :

> Le rayonnement direct qui est reçu du solaire, directement sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux. Ce rayonnement forme donc des ombres et peut être concentré par les miroirs.

> Le rayonnement diffus qui est constitué de la lumière diffusée par l'atmosphère, ce rayonnement est isotope c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste.

> L'albédo est la partie réfléchiée par le sol dépendant de l'environnement du site (voir Figure I.1).

Le rayonnement global est la somme de ces différentes formes de rayonnement [6].

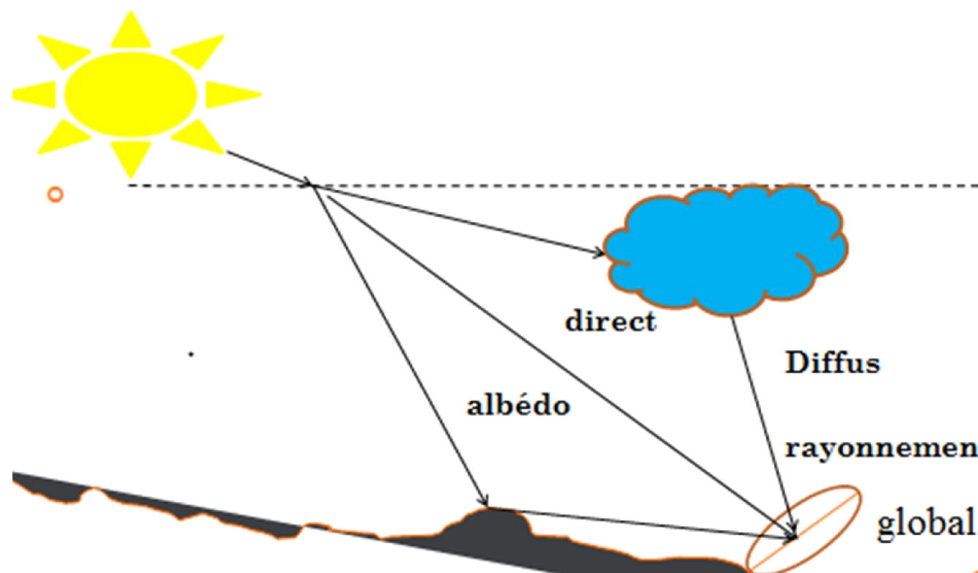


Figure I.1 : Rayonnement global [7]

I.3.1. Nature du rayonnement solaire

L'énergie émise par le soleil nous parvient sous forme de rayonnements (rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Max Planck

prévoit que tout rayonnement de fréquence (flux de La théorie corpusculaire) photons dont l'énergie élémentaire (E) est directement proportionne là cette fréquence.

$$E = hv + hc/\lambda \quad (1.1)$$

Où :

h : est la constante de Planck.

c : la vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible énergétique; la plus grande partie de l'énergie et proche infrarouge. 99,2%de l'énergie solaire hors atmosphère se trouve entre 200 nm et 4 μ m. Au sol, par suite de l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau, le spectre est limité à 2,5 μ m environ [8].

I.3.2. Les composantes de l'irradiation solaire

Le rayonnement solaire au niveau de sol est constitué principalement du rayonnement direct I_b , provenant directement du soleil, légèrement affaibli par diffusion ou absorption lors de sa traversée de l'atmosphère, et du rayonnement diffus I_d provenant de toute la voûte céleste par suite de la diffusion du rayonnement direct par les molécules et les aérosols.

Ainsi le rayonnement global reçu au sol I_G , est la somme de ces deux composantes:

$$I_G = I_b + I_d = I_b \cos Z + I_d = I_b \sin \gamma + I_d \quad (1.2)$$

Avec :

Z : l'angle zénithal

γ : la hauteur angulaire [1].

I.3.3.Coordonnées géographiques

Le rayonnement arrivant au sol dépend de la réflectance de la surface terrestre et des effets de l'atmosphère qui interviennent dans le double trajet (soleil-terre et terre-satellite). Pour connaître l'énergie reçue à un site donné, il Est nécessaire de repérer ce site sur la surface

terrestre, de localiser la position et la trajectoire du soleil dans la voûte céleste et les mouvements de la terre autour du soleil [1].

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

- **La latitude θ**

C'est l'angle θ que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial. Si $\theta > 0$, le site se trouve dans l'hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud [1].

- **La longitude φ**

C'est l'angle φ formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre -180 (vers l'ouest) et +180 (vers l'Est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes [1].

- **L'altitude**

C'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence [5].

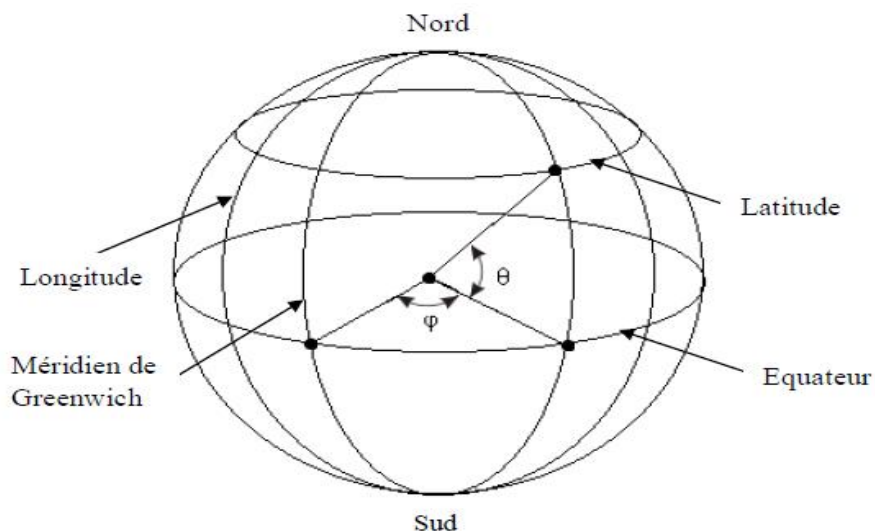


Figure I. 2 : Coordonnées terrestres[1].

I.3.4. Répartition géographique du rayonnement solaire

Au niveau géographique, l'énergie solaire reçue est inégalement répartie. Dans les régions les plus chaudes du globe, l'ensoleillement annuel peut atteindre 2300 kWh/m².an (Figure I.3). En Europe centrale, l'ensoleillement moyen est de 1100 kWh/m².an [9].

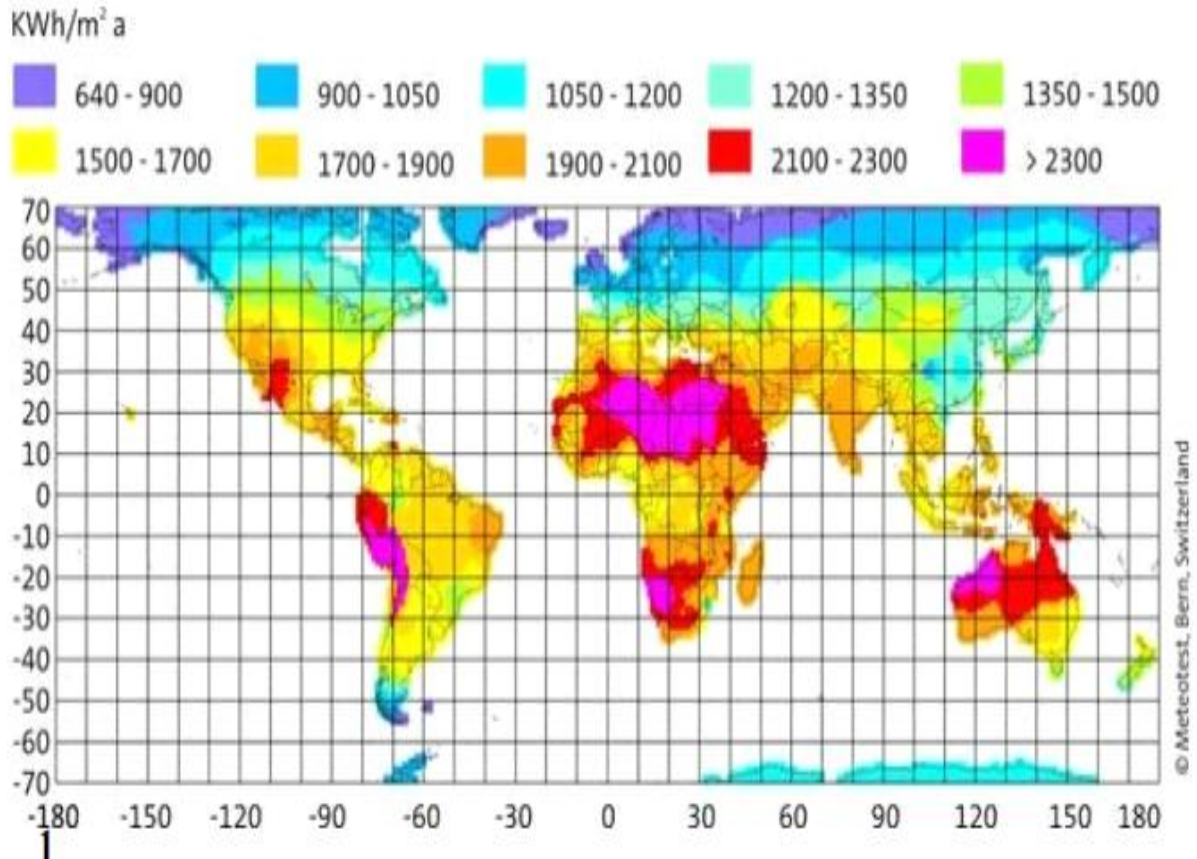


Figure I.3 : Répartition de l'énergie solaire dans le monde [9].

I.3.5. Caractéristique de rayonnement solaire

- **L'atmosphère**

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (les poussières des cendres, des micros cristaux, des micros gouttelette, des fumées de pollution industrielle dont la taille varie de 0.5 à 10 µm.) ainsi la couche d'ozone absorbe la

majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge [7].

- **Masse d'air**

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié. On appelle « masse d'air », m , la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement directe pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversé vertical au niveau de la mer. Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil (h). à l'aide des points O, A et M, on écrit la longueur du trajet du soleil travers l'atmosphère :

$$OM = OA / \sin h \quad (1.3)$$

On appelle m le rapport OM / OA , soit $1/\sin h$.

A une pression p différente de 1013 mbar et à altitude z (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre: [7]

$$m = \left(\frac{p}{1013} * \sin h\right) \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \quad (1.4)$$

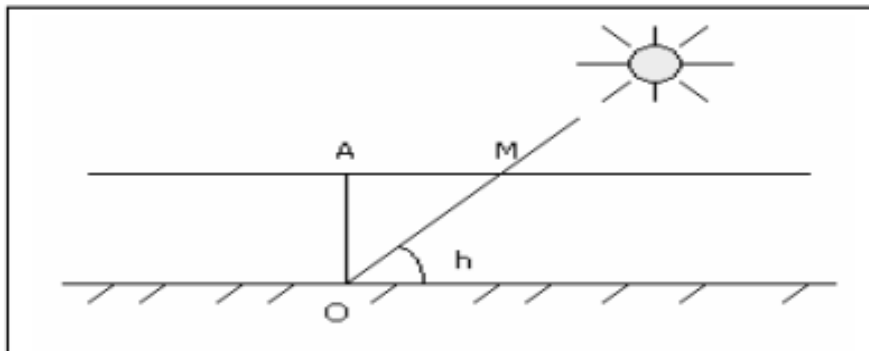


Figure I.4: le rayonnement solaire et le nombre d'air masse [7] .

Exemple :

- Soleil au zénith (au niveau de la mer) on obtient les conditions : AM1 ($m = 1/\sin 90^\circ = 1$)
- Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions : AM2 ($m = 1/\sin 30^\circ$)
- par convention AM0, désigne le rayonnement solaire hors atmosphère [7].

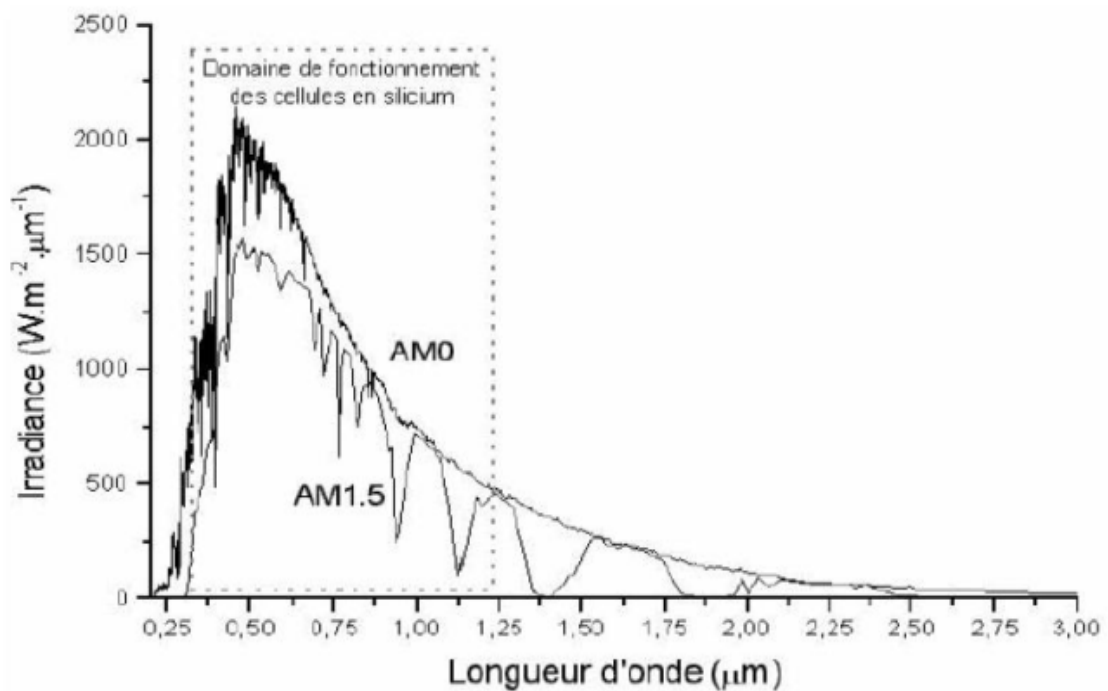


Figure I.5: Représentation graphique des spectres AM0, AM1,5 [7]

I.4. mesure de l'éclairement

Les pyranomètres mesurent l'éclairement global et les pyréliomètres l'éclairement direct (Figure I.6). L'éclairement diffus est mesuré par un pyranomètre comprenant un élément mobile masquant la direction du Soleil.

Les pyranomètres et pyréliomètres constituent le meilleur moyen pour obtenir des mesures précises de l'éclairement. Cependant, il n'y en a pas assez pour couvrir la surface du globe et de nombreuses méthodes font appel aux images acquises par les satellites météorologiques pour obtenir une estimation de l'éclairement en tout point et à tout instant[10].

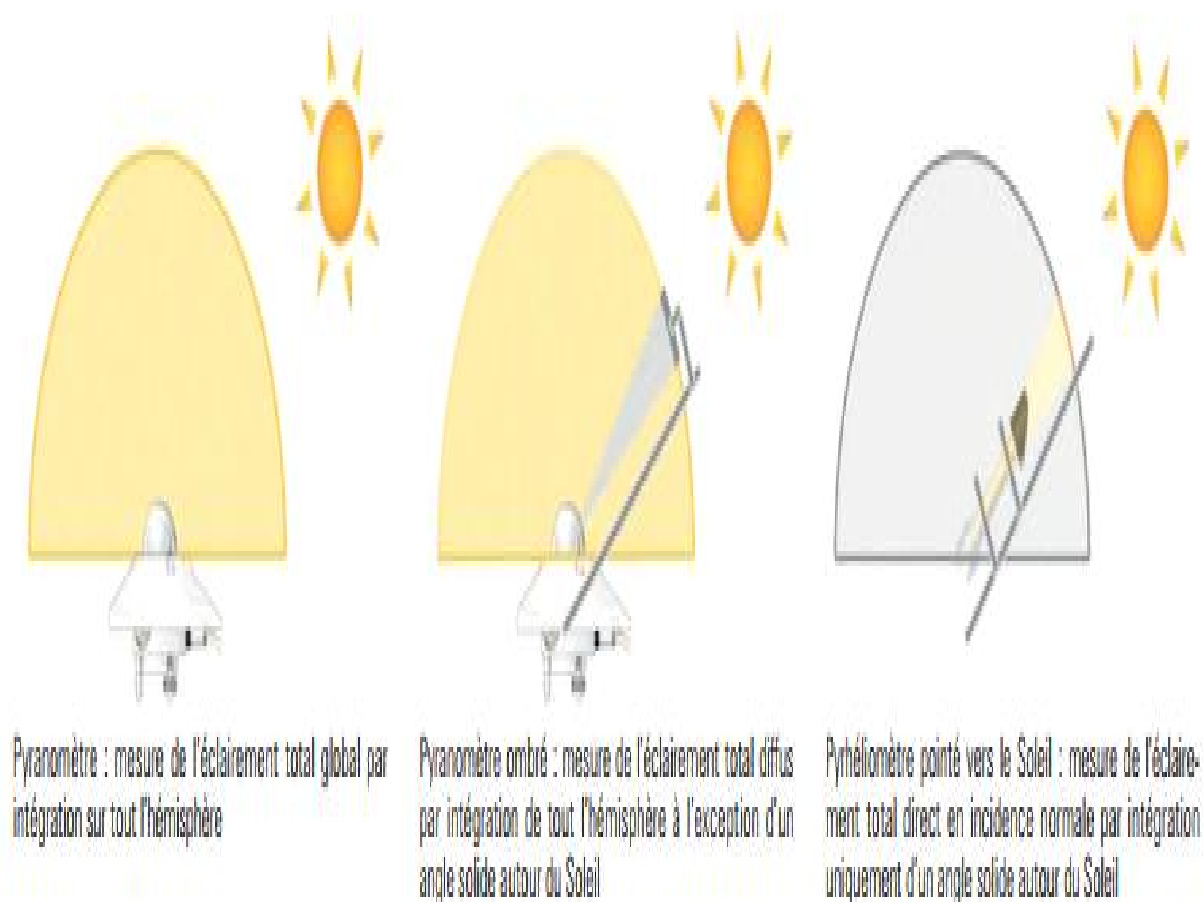


Figure I.6 : Exemple de capteurs actinométriques par ordre croissant de complexité de l'instrumentation..[10]

Les satellites météorologiques comme Meteosat Seconde Génération (MSG) produisent des images sur lesquelles on distingue bien les nuages (Figure I.7). Ces nuages sont généralement plus réfléchissants que les sols qu'ils couvrent. L'occurrence d'un nuage se traduit par une augmentation du signal perçu par le satellite par rapport à ce que ce même satellite devrait percevoir si le ciel était clair. Cette augmentation peut être liée à l'atténuation du rayonnement solaire depuis le sommet de l'atmosphère jusqu'au sol. Ce principe a été adopté par de nombreuses méthodes pour l'estimation de l'éclairement. C'est le cas de la méthode Heliosat, sans doute la plus connue et la plus adoptée et adaptée, dont la première version a été proposée par Mines ParisTech en 1980, en collaboration avec M. Perrin de Brichambaut de Météo-France.

Depuis, les méthodes ont évolué vers une représentation de plus en plus précise des interactions entre le rayonnement et les constituants atmosphériques. Météo-France a

notamment élaboré un modèle précis de détection de présence de nuages sur les images Meteosat et d'estimation de leurs propriétés optiques [10].

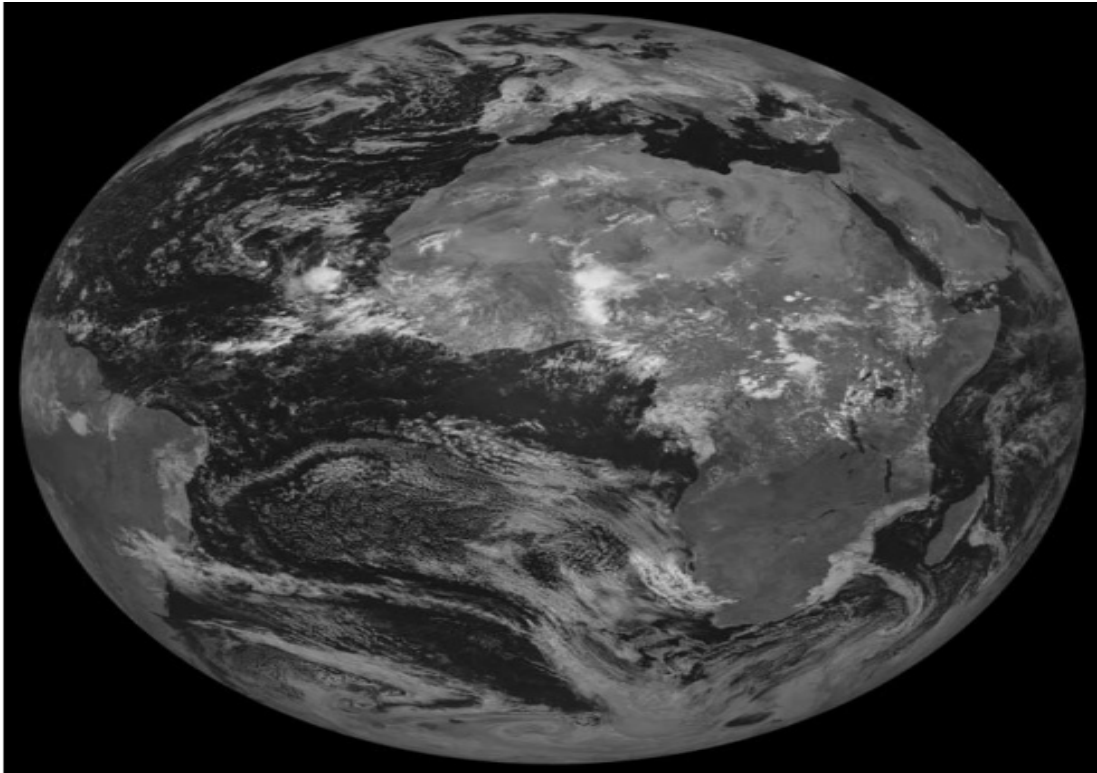


Figure I.7 : Exemple d'une image *Meteosat-8*, obtenue dans le canal visible le 7 septembre 2010 à 12 h UTC. La réflectance croît du noir au blanc, Eumetsat (2010) [10].

I.5. Méthodes d'estimation de l'irradiation globale solaire par satellite

Plusieurs méthodes proposées dans la littérature par divers chercheurs ont démontré la faisabilité de l'extraction du rayonnement solaire incident au sol par traitement d'images satellitaires. Ces méthodes peuvent être classées en trois grandes familles [11].

I.5.1. 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) [11].

Ces échanges sont alors décrits par une équation où interviennent principalement le flux d'irradiation solaire G_r qui est réfléchi vers l'espace par les couches supérieures de l'atmosphère, la partie G_a du rayonnement absorbée par l'atmosphère, le flux global d'irradiation solaire G mesuré au sol et la valeur extraterrestre G_0 de ce rayonnement.

Soient $g = G/G_0$ la fraction du rayonnement incident transmis par l'atmosphère $\rho_p = G_r/G_0$ celle qui est absorbée par l'atmosphère, $q_a = G_a/G$ l'albédo planétaire et ρ_s l'albédo de la surface terrestre [11].

- **Modèle d'Halpern (1984)**

Le flux d'irradiation solaire observé au sol et au sommet de l'atmosphère sont estimés en considérant 83 intervalles spectraux de la gamme 0,28 – 2,5 μm et 51 couches atmosphériques se superposant sur une altitude qui va de 0 à 50 kms [11].

- **Modèle de Raschke et Preus (1979)**

Dans ce modèle, la gamme 0,2 – 3,6 μm est subdivisée en 87 intervalles spectraux et l'atmosphère est décomposée en 70 couches, ayant chacune une épaisseur de 1km [11].

- **Modèle de Gautier et Mass (1980)**

Ce modèle se compose de deux équations décrivant les échanges radiatifs dans le système atmosphère-terre dans le cas d'un ciel clair et d'un ciel nuageux.

Dans le cas d'un ciel clair, l'énergie reçue par le satellite est la somme de deux termes.

L'un est dû à la réflexion par l'atmosphère et l'autre, à la réflexion par la surface terrestre.

Le second terme tient compte des processus d'absorption et de diffusion au cours des trajets

$$G_r = G_0 \cdot \alpha_b \cdot [1 - \alpha_b] \cdot [1 - q(u_1)] \cdot [1 - q(u_2)] \cdot [1 - \alpha_d] \cdot \rho_s \tag{1.5}$$

Où :

α_b : Est le coefficient de réflexion dû au rayonnement directe.

α_d : Est le coefficient de réflexion dû au rayonnement diffus.

u_1 : Est le chemin parcouru par les rayons solaires dans l'atmosphère, lorsqu'ils vont dans le sens soleil – terre.

u_2 : Est le trajet accompli par le rayonnement solaire dans le sens terre – satellite, lors de la traversée de l'atmosphère.

$q(u_1)$ et $q(u_2)$: Sont les coefficients d'absorption atmosphérique rencontrés au cours des trajets respectifs u_1 et u_2 .

L'albédo de la surface terrestre est alors donné par :

$$\rho_s = \frac{G_r - G_r \alpha_b}{[1 - \alpha_b] \cdot [1 - q(u_1)] \cdot [1 - q(u_2)] \cdot [1 - \alpha_d]} \quad (1.6)$$

Le rayonnement observé au niveau de sol est la somme des composantes directe et diffuse, il est alors égal à : [11]

$$G = G_0(1 - \alpha_b) \cdot (1 - q(u_1)) \cdot (1 + \alpha_d \cdot \rho_s) \quad (1.7)$$

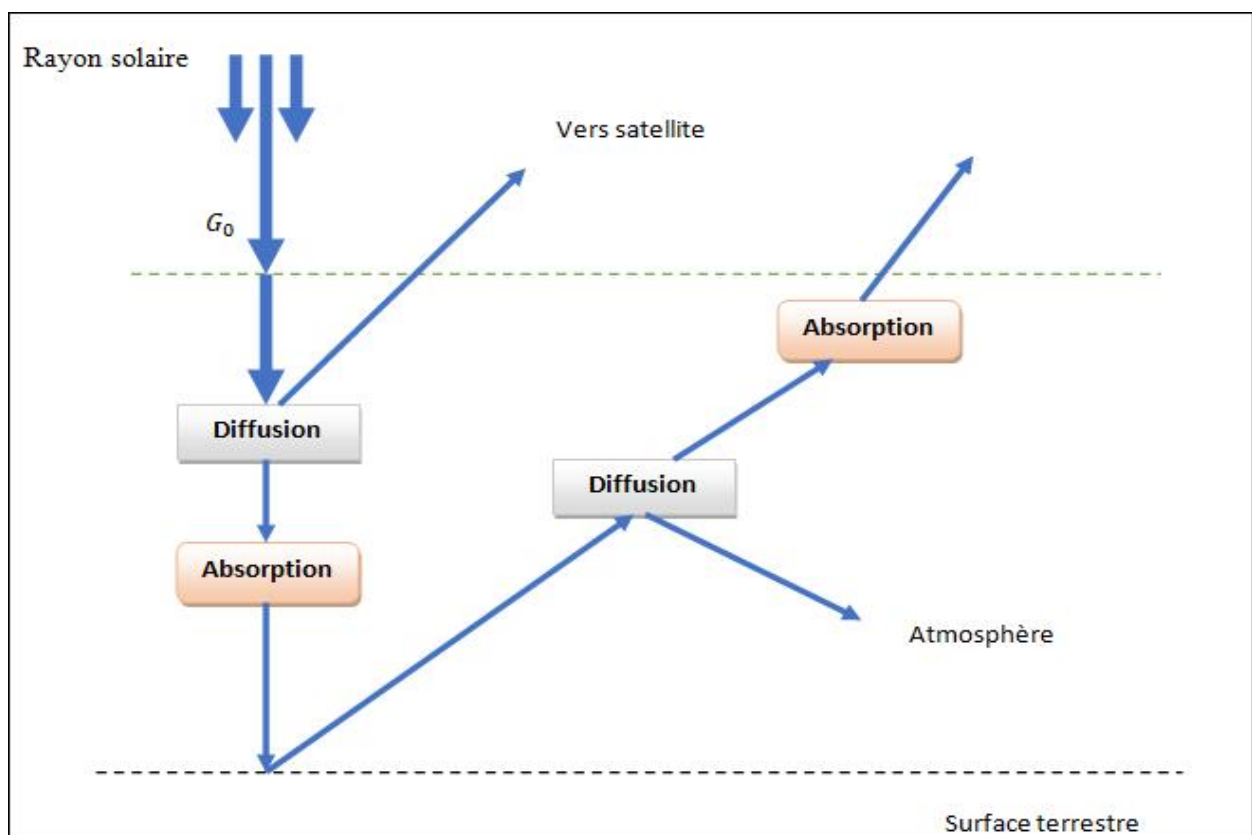


Figure I.8 : Echanges radiatifs en ciel clair dans le système atmosphère – terre [11].

Dans le cas d'un ciel nuageux, le calcul du rayonnement solaire incident est plus compliqué du fait de l'absorption et la diffusion au-dessus et au-dessous de la couche nuageuse. Dans ce cas, l'énergie rayonnée vers le satellite, se compose de trois termes représentant respectivement le rayonnement diffusé de l'atmosphère vers le satellite, l'énergie solaire réfléchie par les nuages vers le satellite et celle traversant les nuages, puis réfléchie par l'atmosphère vers le satellite [11].

I.5.2. Modèle statique

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, Les principales méthodes statistiques sont : [11]

- **Modèle de Brakke et Kanemasu (1981)**

C'est l'expression de l'irradiation solaire en fonction du niveau de gris et l'angle zénithal. [11]

- **Modèle de Bahm (1981)**

Il exprime l'irradiation solaire en fonction du niveau de gris et la latitude [11].

- **Modèles de Hanson (1976) et Nimira (1980)**

Ces modèles ont mis en jeu la relation existante entre l'irradiation solaire et le taux d'ennuagement. Ce dernier est déduit de la couverture nuageuse estimée après une néphanalyse des données satellitaires. Ces modèles ont été d'abord appliqués à des données satellitaires typiques des îles se trouvant au large des côtes indiennes dans le but d'avoir une certaine homogénéité des types de nuages et d'indice d'ennuagement. Le modèle de Nimira a été ensuite adapté aux caractéristiques de l'Afrique.

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

$$n(x, y, j, h) = \left[1 - \frac{pg}{pc} \right] n^*(x, y, j, h) \quad (1.8)$$

$n(x, y, j, h)$ est l'ennuagement calculé dans l'infrarouge [11].

- **Modèle de Shaltout et Hassen (1990)**

Les relations de régression sont établies entre la moyenne mensuelle des composantes globale et diffuse de l'irradiation solaire et la brillance observée dans les gammes visible, infrarouge et vapeur d'eau. Les relations utilisées pour chacune de ces bandes sont, soit linéaire, soit du deuxième ordre ou du troisième.[11]

I.5.3.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.

En divisant les quantités G , G_r et G_a par G_0 , cette équation s'écrit :

$$g = \frac{1 - \rho_p - q_a}{1 - \rho_s} \quad (1.9)$$

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

C'est pour cela que l'équation (1.9) sert de base à l'élaboration de divers modèles physiques dont on citera :[11]

- **Modèle de Hanson (1971)**

Ce modèle est basé sur une équation de régression de la forme :

$$\rho_p = a + b.g \quad (1.10)$$

En comparant celle-ci à l'équation (1.8), on trouve que : $a = 1 - q_a$ et $b = - (1 - \rho_s)$.

La constante solaire étant connue, l'albédo ρ_p est estimé en traitant les niveaux de gris qui composent les images satellitaires. Ensuite, la quantité G_a est calculée en fonction du chemin optique déterminé par l'angle zénithal, de la quantité de vapeur d'eau associée aux précipitations et de l'indice de l'ennuagement [11].

- **Modèle d'Ellis et Von Der Haar (1976)**

Ce modèle est dérivé de celui de Hanson, mais dans lequel l'indice d'ennuagement et l'albédo terrestre sont estimés par traitement des données satellitaires. L'albédo planétaire est ensuite calculé en considérant que celui-ci est une fonction linéaire de l'indice d'ennuagement[11].

- **Modèle de Sorapipatana et Exell (1988)**

Ce modèle est basé sur les mêmes principes que ceux ayant permis d'établir les deux modèles précédents[11].

- **Modèle de Nunez (1984)**

Ce modèle est similaire à celui de Hay et Hanson, mais dans lequel le calcul des coefficients a et b a été amélioré dans l'équation (1.9) en faisant intervenir des bandes d'absorption typiques des aérosols [11].

- **Modèle de Tarpley (1979)**

Pour élaborer son modèle, Tarpley a estimé des irradiances solaires aux échelles horaires et journalières par le traitement des images prises par le satellite GOES dans les grandes plaines des Etats-Unis. Son étude est basée sur une équation de régression multivariée qui lie les niveaux de gris, mesurés par la brillance B de chaque pixel, à l'angle zénithal z et à l'angle d'azimuth ψ (exprimer dans l'équation (2.3)) du satellite par rapport au soleil. Cette équation est de la forme :

$$B = a + b \cdot \cos z + c \cdot \sin z \cdot \cos \psi + d \cdot \sin z \cdot \cos^2 \psi \quad (1.11)$$

Les coefficients de régression a , b , c et d sont estimés en procédant à une classification des niveaux de gris à l'aide de deux seuils. Cette classification fait correspondre respectivement le pixel à un ciel dégagé, à un ciel partiellement couvert ou un ciel totalement couvert [11].

- **Modèle de Cano et al. (1986)**

Ils ont élaboré la méthode Heliosat. C'est une méthode qui déduit le rayonnement solaire à partir de la luminance perçue par le satellite. Elle réunit un modèle de calcul du rayonnement

par ciel clair en tout point géographique et à tout moment, et un modèle d'extinction du rayonnement obtenu et dû à la présence des nuages. Elle a été développée à l'école des MINES Paris Tech en collaboration de plusieurs partenaires européens et est considérée comme l'une des plus performantes parmi les différentes méthodes utilisant des images du spectre visible des satellites météorologiques

A partir du compte numérique (CN) de chaque pixel (i, j) d'une image météosadonnée, l'albédo apparent $\rho^t(i, j)$ de l'image au temps t peut être déduit suivant l'équation :

$$\rho^t(i, j) = \frac{CN - CN_0}{G_c^t(i, j)} \quad (1.12)$$

$G_c^t(i, j)$: Irradiation solaire global par ciel clair.

CN_0 : Représente l'offset du capteur

A partir de l'albédo apparent, on déduit l'indice d'ennuagement $n^t(i, j)$ qui est le rapport entre ce qui est observé par le capteur $\rho^t(i, j)$ et ce qui serait observé si le ciel était clair $\rho_{ground}^t(i, j)$

$$n^t(i, j) = \frac{\rho^t(i, j) - \rho_{ground}^t(i, j)}{\rho_{cloud}^t(i, j) - \rho_{ground}^t(i, j)} \quad (1.13)$$

$\rho_{cloud}^t(i, j)$: Est l'albédo des nuages

L'indice d'ennuagement est lié à un indice de ciel clair $k_c^t(i, j)$ par :

$$k_c^t(i, j) = 1 - n^t(i, j) \quad (1.14)$$

L'indice de ciel clair est défini comme le rapport entre l'irradiation solaire globale $G^t(i, j)$ et l'irradiation solaire globale par ciel clair. Ce qui nous permet d'obtenir l'irradiation globale au niveau du sol :[11]

$$k_c^t(i, j) = \frac{G^t(i, j)}{G_c^t(i, j)} \quad (1.15)$$

- **Modèle de Delorme (1987)**

Delorme a élaboré le modèle GISTEL (Gisement Solaire par Télédétection) pour l'estimation d'irradiation solaire à l'échelle journalière à partir des images B2 (moindre

résolution) collectées par le satellite météosat. Ce modèle sera détaillé dans les paragraphes qui suivront [11].

I.6.Présentation du modèle GISTEL

I.6.1.Historique du modèle

Le modèle GISTEL (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. Il a été appliqué :

– en France en 1987 à des images B2 collectées dans le canal visible par Météosat-2 et ensuite testé en 1992 sur des images Wefax reçues régulièrement à Carpentras, à raison de quatre images par jour.

– 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. Il a été aussi appliqué à des images MSG en 2011

Son principe général est d'établir une correspondance entre la brillance $B_i(x,y,j,h)$ de chaque pixel de position (x, y) sur l'image du jour j à l'heure h et l'irradiation globale $G(x, y, j, h)$ reçue au point de coordonnées géographiques (X, Y) au sol au même moment de prise de l'image. Cette brillance est comparée avec deux images de référence : l'une caractérise le ciel clair et l'autre un ciel couvert par des nuages opaques.[11]

I.6.2.Hypothèses du modèle GISTEL

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. Ces hypothèses sont [11] :

- **Brillance**

La brillance est la somme de deux composantes : L'une est la composante atmosphérique (B_{ia}) liée essentiellement à la diffusion de Rayleigh par les molécules présentes dans l'atmosphère. L'autre est la composante de base (B_{ib}) 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) [11].

La brillance B_i est donnée par l'équation suivante :

$$B_i(x, y, j, h) = B_{ia}(x, y, j, h) + B_{ib}(x, y, j, h) \quad (1.16)$$

- **Surfaces lambertiennes**

Si nous assimilons la base à une surface lambertienne² qui rayonne comme un corps noir, la brillance B_{ib} s'écrit :

$$B_{ib}(x, y, j, h) = K \cdot R_{ib}(x, y, j, h) \cdot G_c(x, y, j, h) \cdot T_i(x, y, j, h) \quad (1.17)$$

Avec :

K : Un facteur numérique qui tient compte du coefficient de calibration du détecteur du canal visible de satellite météosat

R_{ib} : Le coefficient de réflexion de la base

G_c : Le rayonnement global au sol obtenu en ciel clair

T_i : Le coefficient de transmission du rayonnement direct entre la base et le satellite [11].

- **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.

Dans le cas d'une couverture nuageuse opaque : à partir d'un seuil caractéristique de coefficient de réflexion, le rayonnement solaire atteignant le sol vaut en moyenne 20% de la valeur qu'il aurait eu en ciel clair au même endroit et au même instant [11].

I.6.3.Principe de base du modèle GISTEL

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 suivant :

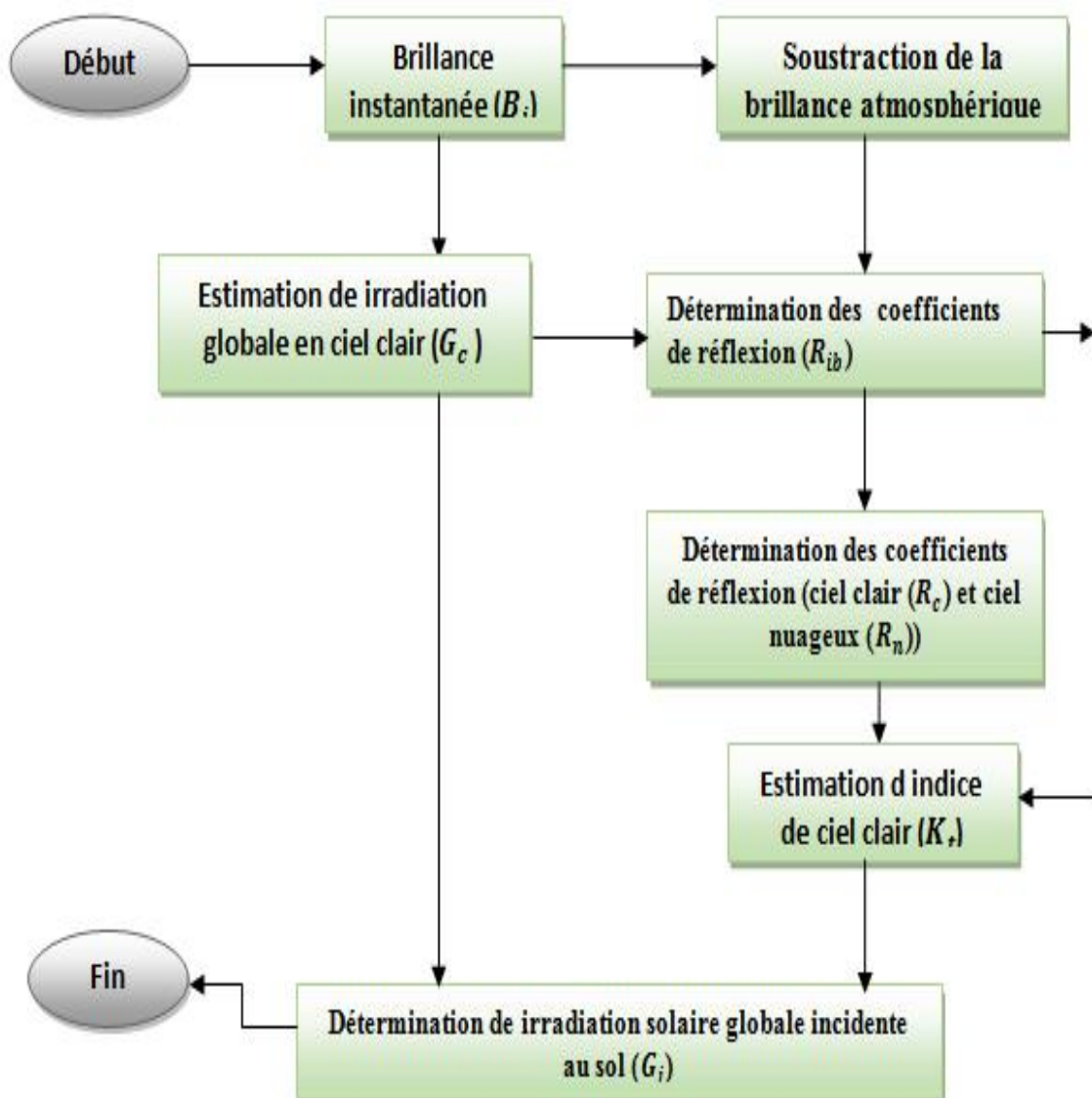


Figure I. 9 : Différentes étapes du modèle de GISTEL[11]

I.6.4 .Formulation du modèle GISTEL

- Calcul du coefficient de réflexion

Les coefficients de réflexion représentent la réflexion du rayonnement solaire sur la base du satellite. En transformant la brillance de chaque pixel $Bi(x, y, j, h)$ en coefficients de réflexion Rib , ces coefficients se calculent en remplaçant l'équation (1.16) dans l'équation (1.17) :

$$Bi(x, y, j, h) = Bia(x, y, j, h) + k. Rib(x, y, j, h). Gc(x, y, j, h). Ti(x, y, j, h) \quad (1.18)$$

Ou :

$$Rib(x, y, j, h) = \frac{Bi(x, y, j, h) - Bia(x, y, j, h)}{k. Gc(x, y, j, h). Ti(x, y, j, h)} \quad (1.19)$$

Les coefficients Gc et Ti sont calculés par un modèle synthétique adopté par l'O.M.M et sont donnés par les équations suivantes :

Le coefficient Gc :

$$Gc = \varepsilon(1300 - 57. T_L). [\sin(hs)]^{\left[\frac{36+T_L}{33}\right]} \quad (1.20)$$

Avec :

T_L : Facteur de trouble de Linke;

hs : Angle de hauteur solaire

ε : Facteur de correction de la distance terre-soleil

$$\varepsilon = 1 + 0,034 \cos (0,986(j - 3)) \quad (1.21)$$

j : Numéro de jour de l'année à partir du 1er Janvier

Le coefficient T_i

$$T_i = \frac{1390 - 31 \cdot T_L}{1367} \cdot \exp\left[-\frac{T_L}{12.6 \cdot \sin(hv + 2)}\right] \quad (1.22)$$

hv : est l'angle de la hauteur du satellite, donné par

$$hv = \sin^{-1}\left(\frac{1.826 \cdot \cos \theta \cos \varphi - 0.274}{\sqrt{3.41 \cdot \cos \theta \cos \varphi}}\right) \quad (1.23)$$

θ et φ : sont respectivement la latitude et la longitude [11].

- **Détermination des deux images de référence**

Pour déterminer les deux images de référence claire et nuageuse, on obtient une séquence des images qui, prises pour une longue période (plus de 30 jours). On prend les valeurs minimales de coefficients de réflexion obtenues de ces séquences d'images pour former l'image de référence de ciel clair **Rc**. D'autre part, l'image de référence de ciel nuageux **Rn** est construite en prenant les valeurs maximales de coefficients de réflexion avec couvert. les mêmes séquences d'images [11].

- **Détermination de l'indice de clarté**

L'indice de clarté est le rapport de la valeur horaire du flux global d'irradiation solaire $G_i(x, y, j, h)$ par sa valeur maximum $G_c(x, y, j, h)$ il est donné par l'équation suivante:[11]

$$K_t = \frac{G_i(x, y, j, h)}{G_c(x, y, j, h)} \quad (1.24)$$

- **Comparaison des coefficients de réflexion**

Cette étape consiste à comparer les coefficients de réflexion décrivant chaque image de la base de données, pixel par pixel et heure par heure de chaque image aux deux images de référence pour les classer dans l'un des trois états du ciel :

$$\text{Ciel clair} \quad Rib \leq Rc \quad K_t = 1 \quad (1.25)$$

$$\text{Ciel partiellement couvert} \quad Rc < Rib < Rn \quad K_t = 1 - (1 - K_0) \frac{Rib - Rc}{Rn - Rc} \quad (1.26)$$

$$\text{Ciel totalement couvert} \quad Rib \geq Rn \quad K_t = K_0 \quad (1.27)$$

Avec K_0 est l'indice par un ciel nuageux est égal à 0,20 [11]

- **Irradiation horaire globale G_i**

On obtient l'irradiation solaire globale pour chaque pixel à partir de l'équation en conditions de ciel clair : [11]

$$G_i(x, y, j, h) = K_t \cdot G_c(x, y, j, h) \quad (1.28)$$

I.7.Conclusion

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

L'aspect aléatoire de cette source d'énergie montre l'importance et la nécessité de connaître le potentiel solaire avant de procéder à l'installation de n'importe quel système solaire. Le meilleur moyen d'identifier ce potentiel sur un site donné est de disposer d'une bonne série de mesures de différents paramètres de rayonnement au sol [4].

Pour ces raisons, nous avons présenté dans ce chapitre quelques méthodes d'estimation du rayonnement solaire par traitement d'images satellitaires.

Dans le prochain chapitre, nous allons donner quelques généralités sur les satellites, les images satellitaires et la télédétection.

CHAPITRE II :

La télédétection et les satellites Météosat

II.1. Introduction

Les premières tentatives de photographie de la Terre depuis un ballon, vers le milieu du 19^{ème} siècle, ont sans aucun doute marqué le début de l'observation de la Terre.

Les missions aériennes de ce vingtième siècle ont ensuite permis de constituer une remarquable photothèque, mais il fallut attendre 1972 pour assister à la mise sur orbite du premier satellite de télédétection, LANDSAT 1, capable d'offrir des images de la Terre vues depuis l'espace, à une altitude de 900 km environ.

Très vite de nombreuses nations ont saisi l'intérêt de pouvoir disposer de moyens d'observation embarqués à bord des satellites. En effet, la télédétection est à la fois un outil d'inventaire (en occupation des sols, par exemple), d'analyse (en météorologie, par exemple) et d'aide à la prévision (en agriculture, par exemple) Les principaux enjeux de l'observation de la Terre depuis l'espace sont donc scientifiques, économiques et stratégiques et les missions en dépendent [12] .

Les images satellitaires sont des mesures du rayonnement solaire réfléchi ou émis par la surface terrestre et les nuages, ou absorbé par l'atmosphère dans différentes bandes spectrales. Ces images sont fournies par différents satellites tel que les satellites météorologiques.

II.2. La télédétection**II.2.1. Définition**

La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information.

Le développement des techniques de la télédétection résulte de la conjonction entre l'invention des vecteurs, ballons, avions ou satellites, permettant de s'éloigner de la surface du

sol ou de la Terre dans son ensemble, et le constant perfectionnement des capteurs, c'est à dire des appareils permettant d'enregistrer le rayonnement électromagnétique pour reconstituer les caractéristiques de la surface (terre ou océan), ou de l'atmosphère [13].

II.2.2. Différentes étapes de la télédétection

a) Une source d'énergie ou d'illumination (A)

En télédétection dite passive, le soleil constitue la principale source d'énergie. En télédétection dite active, la source est fabriquée par homme.

b) Interactions rayonnement-atmosphère

Interactions entre le rayonnement et l'atmosphère tout au long du trajet source cible et cible capteur **(B)**.

c) Interactions avec la cible(C)

Ces interactions sont de trois types : La transmission, la réflexion et l'absorption.

L'émission est à considérer comme un phénomène à part.

d) Enregistrement du signal par le capteur (D)

Le capteur enregistre le signal reçu.

e) Transmission, Réception, et Traitement (E)

Le satellite transmet les signaux vers des stations de réception au sol ou à des satellites relais. Au niveau de ces stations, les informations sont décodées et enregistrées sous forme d'images ou de photographies.

f) Traitements, analyses, interprétation et applications (F et G)

Les traitements se basent sur des théories et techniques souvent complexes et servent à extraire les informations utiles. Ces informations sont ensuite utilisées pour caractériser la cible étudiée [14].

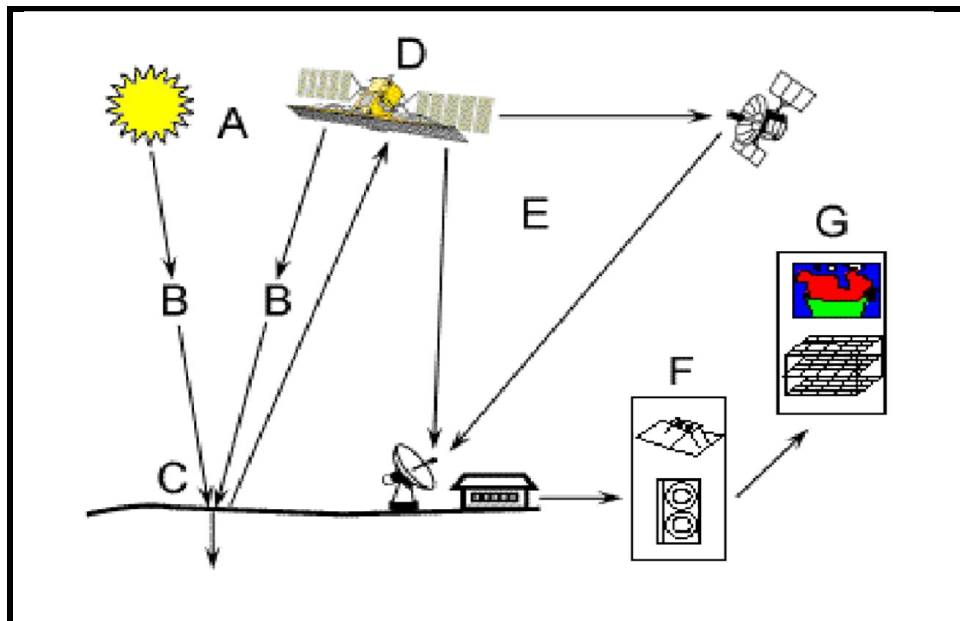


Figure II. 1: Le cheminement de l'information

II.2.3. Éléments constituant les systèmes de télédétection

Un système de télédétection est un ensemble comprenant un vecteur, un ou plusieurs capteurs, et un ensemble de moyens de contrôle du système et d'exploitation des données acquises.

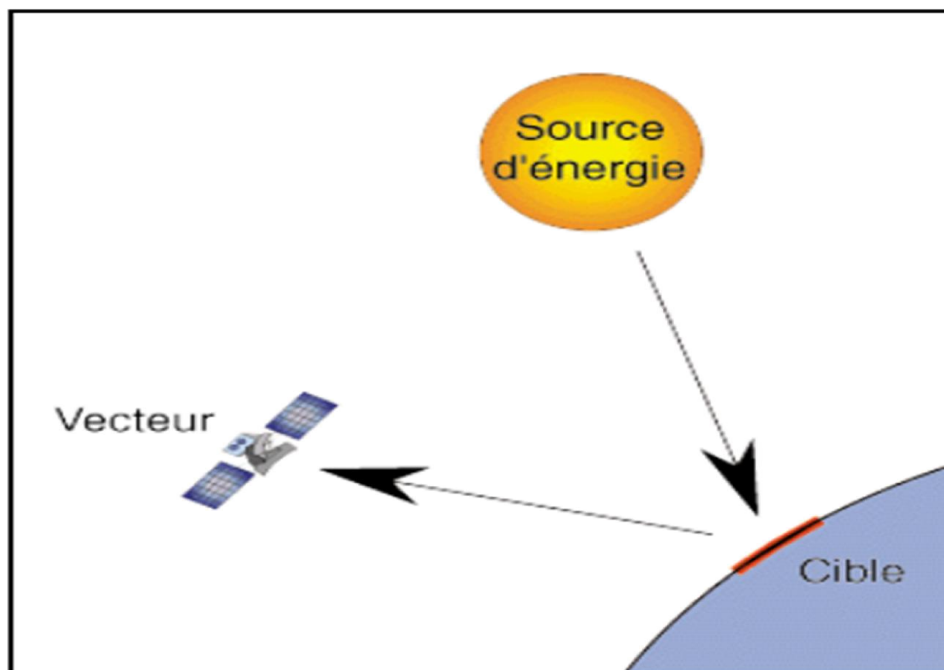


Figure II. 2: Le principe de base de la télédétection [15]

a) La cible

est la portion de la surface terrestre observée par le satellite. Sa taille peut varier de quelques dizaines de Km² à plusieurs milliers [15].

b) La source d'énergie

La source d'énergie est l'élément qui "éclaire" la cible en émettant une onde électromagnétique (flux de photons). Dans l'immense majorité des cas que nous aborderons ici, la source d'énergie est le soleil. Néanmoins, la technologie RADAR nécessite qu'un émetteur soit embarqué sur le satellite, dans ce cas le satellite lui-même est source d'énergie. Il est également possible de mesurer la chaleur qui se dégage à la surface de la cible (infrarouge thermique), auquel cas c'est la cible qui est source d'énergie (bien qu'il s'agisse d'énergie solaire stockée et réémise) [15].

c) Le vecteur

ou plate-forme de télédétection mesure l'énergie solaire (rayonnement électromagnétique) réfléchi par la cible. Le vecteur peut-être un satellite ou un avion, dominant la cible de quelques centaines de mètres à 36 000 kilomètres. Les capteurs embarqués sur le satellite mesurent le rayonnement électromagnétique réfléchi, puis un Lorsque le satellite ne fait que capter le rayonnement réfléchi, on parle de télédétection passive et lorsque le satellite émet une onde vers la cible et en mesure l'écho, on parle de émetteur renvoie l'image sur Terre vers des stations de réception[15].

II.2.4. Mesures de la télédétection

La mesure par la télédétection étant la seconde alternative dans le domaine et se présente comme l'unique moyen permettant une couverture continue et ce dans l'espace et dans le temps de l'atmosphère. L'une des applications les plus importantes de la télédétection est l'observation météorologique et climatologique. En effet, cette application permet de suivre l'évolution spatio-temporelle de la couverture nuageuse et l'étude du bilan énergétique terrestre.

Actuellement, les satellites géostationnaires collectent des données toutes les 15 minutes avec une résolution spatiale de moyenne à faible tandis que les satellites à défilement fournissent une résolution spatiale plus élevée mais avec au deux prises quotidiennes d'images [4].

II.2.5. Domaines d'application de la télédétection

Le premier grand domaine d'application de la télédétection a été l'étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie). L'intérêt de la télédétection dans ce domaine est d'assurer une couverture globale et très fréquemment répétée de la planète.

Les satellites en orbite géostationnaire, à 36 000 km de la Terre, permettent d'obtenir une image couvrant près d'un cinquième de la surface terrestre toutes les demi-heures ; cinq satellites de ce type assurent une couverture globale de l'atmosphère terrestre, à l'exception des pôles.

Ce système est complété par des satellites en orbite polaire, à 900 km d'altitude, qui offrent plus de précision. Les capteurs utilisés permettent d'observer les nuages et leur déplacement, de mesurer des températures ou le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère.

Parallèlement au système opérationnel de veille météorologique, la météorologie est un domaine très actif de la recherche en télédétection ; des capteurs encore expérimentaux, utilisant les micro-ondes, effectuent de véritables sondages de l'atmosphère et mesurent la composition de la stratosphère (ozone) ou les termes du bilan radiatif.

Le traitement des données par les physiciens a pour but d'obtenir des paramètres géophysiques susceptibles d'être intégrés dans des modèles numériques de prévision météorologique ou de l'évolution climatique future.

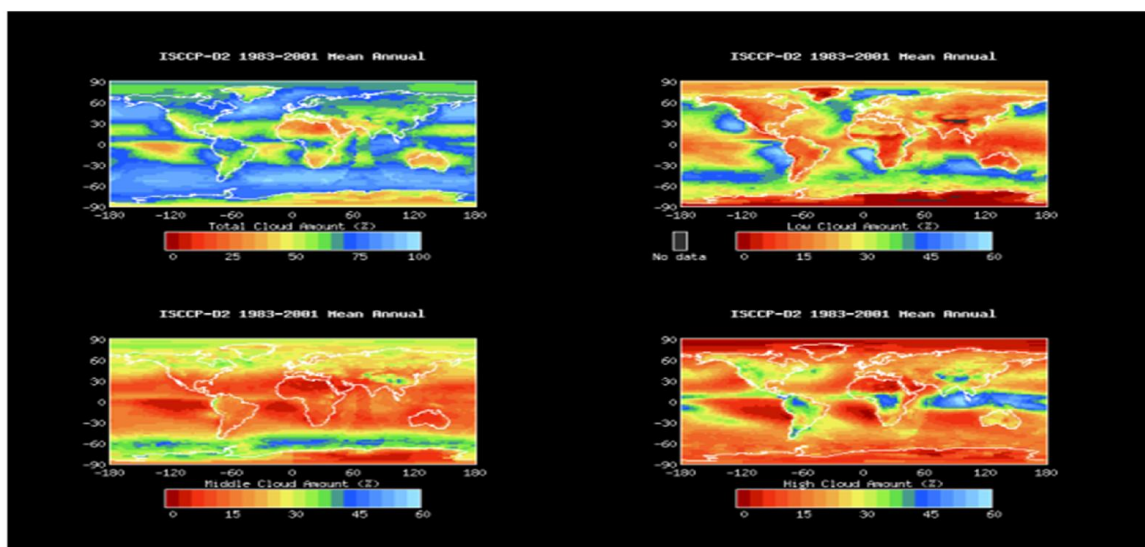
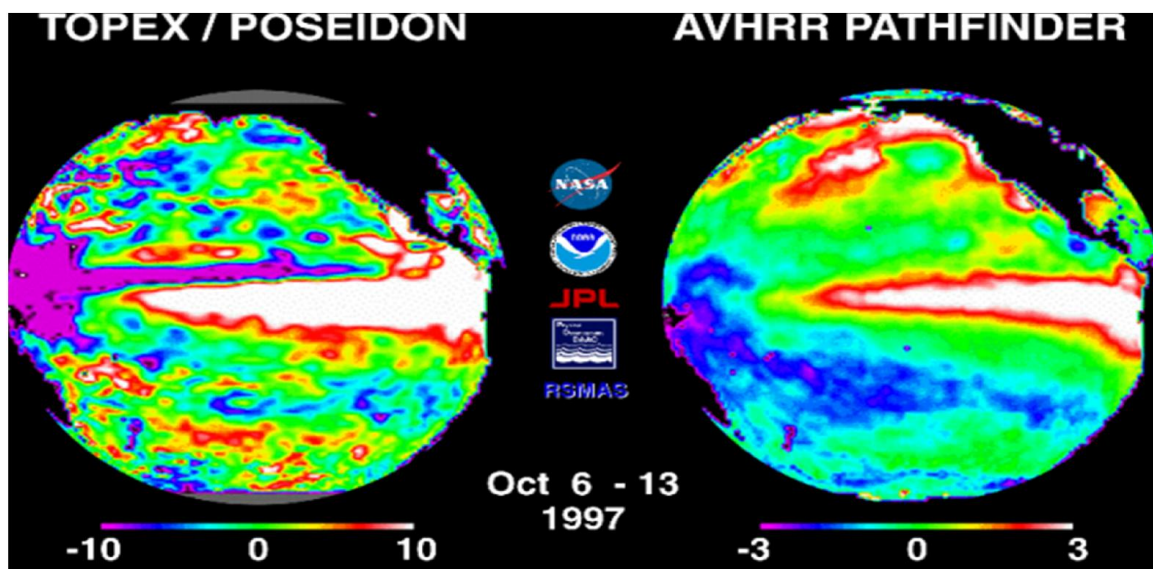


Figure II. 3: Cartes de fréquence moyenne annuelle des nuages et des propriétés physiques moyennes des nuages (épaisseur optique, contenu en eau) [13].

En océanographie, la télédétection offre l'avantage de permettre une vision synoptique de vastes régions qu'il est impossible d'obtenir par les moyens traditionnels (bateaux). Pour certaines études à petite échelle, les données des satellites météorologiques sont largement utilisées en océanographie (températures de surface de l'océan) ; pour les études côtières, ce sont les satellites de télédétection terrestre, équipés de capteurs à haute résolution, qui sont les plus utiles. Des satellites spécialisés à vocation océanographique ont volé dans un passé récent (Nimbus, Seasat) ou volent depuis le début des années 90 (ERS-1 de l'Agence Spatiale Européenne, TOPEX-Poseidon). Les types de capteurs utilisés pour l'océanographie sont très variés. Les radiomètres utilisant le rayonnement visible analysent la couleur de l'océan, qui permet de mesurer la production biologique (plancton) et la turbidité; les radiomètres infrarouges ou microonde mesurent la température de surface de la mer. La répartition des températures ou des turbidités est un indice des courants océaniques. Les radars embarqués sur des avions ou certains satellites ont l'avantage d'être insensibles aux nuages; ils permettent d'observer les phénomènes ondulatoires présents sur l'océan, les vagues en particulier. Enfin, certains types particuliers de capteurs, radars-altimètres ou diffusion mètres sont utilisés pour mesurer avec une très grande précision l'altitude de la surface de la mer qui est un reflet de la dynamique océanique (courants généraux), ou la vitesse du vent sur la mer. Parmi les applications océanographiques de la télédétection, citons enfin l'étude des glaces de mer en régions polaires.



Les applications terrestres de la télédétection sont extrêmement variées. La photographie aérienne, sous toutes ses formes, est encore, sans doute pour peu de temps, le moyen le plus usuel de télédétection ; les photographies aériennes sont de plus en plus utilisées sous forme numérique de façon à permettre leur correction géométrique (orthophotos) et leur intégration dans les Systèmes d'Information Géographique. En télédétection spatiale, ce sont surtout les radiomètres optiques à haute ou très haute résolution qui sont utiles pour les applications terrestres. Depuis 1972, les progrès dans ce domaine sont remarquables : on est passé d'une résolution de 80 m (MSS de Landsat), à 30 m (Thematic Mapper) et à 2010 est 2,5m (HRV de SPOT). En géologie ou pour l'étude de la végétation, les radars imageurs, surtout aéroportés, sont aussi très utilisés. Le champ des utilisations de la télédétection ne cesse de s'élargir : cartographie, géologie et prospection minière, mais aussi surveillance des cultures ou du couvert forestier, urbanisme, aménagement, génie civil, etc [13].

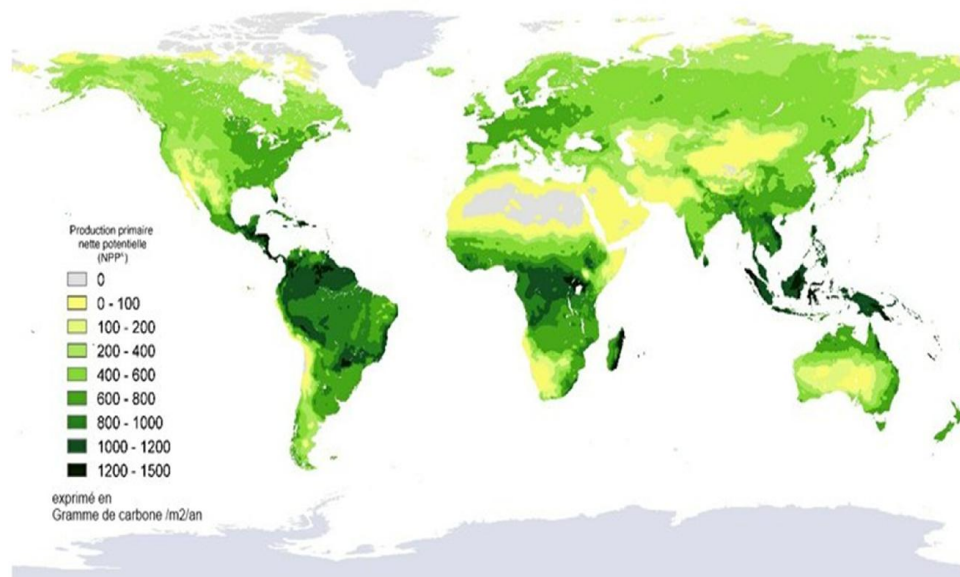


Figure II. 5 : Suivi de la végétation à l'échelle planétaire [12].

II.3. Les satellites

II.3.1. Définition

On définit un satellite comme un objet gravitant autour de la Terre ou d'une autre planète. Il est utilisé en télédétection pour surveiller de la Terre, étudier sa forme, la densité de l'atmosphère, le rayonnement spatial, le climat et les modifications planétaires en enregistrant tous ses rayonnements émis ou réfléchis. Une fois placé sur une orbite il est stabilisé par rotation.

L'alimentation en énergie est fournie par des cellules solaires réparties sur le pourtour du satellite. La charge utile est destinée aux mesures de champ magnétique, d'ondes et de particules[4].

II.3.2. Orbite d'un satellite

Les satellites utilisent la force gravitationnelle de notre planète afin de se maintenir à une position et à une distance déterminée de la terre.

L'orbite est la trajectoire idéale que suit un satellite en l'absence de perturbations. Les orbites sont habituellement classées en fonction de leurs altitudes moyennes et de leurs synchronisations avec la terre ou le soleil. On peut ainsi distinguer deux types d'orbites différentes : l'orbite circulaire, et les Orbite elliptique. Chacune ayant des caractéristiques différentes des autres. On peut aussi classer ces orbites selon leur altitude ; dans ce cas on distingue trois types : l'orbite géostationnaire, les orbites moyennes altitude et les orbites basses altitude [16].

a) Orbites basses altitude LEO (Low Earth Orbit)

Orbite basse située entre 180 et 400 km environ, souvent plus ou moins circulaire avec une inclinaison par rapport à l'équateur suivant la mission du satellite. Une orbite basse qui a une inclinaison qui lui permet un survol des régions proches des pôles est appelée orbite polaire.

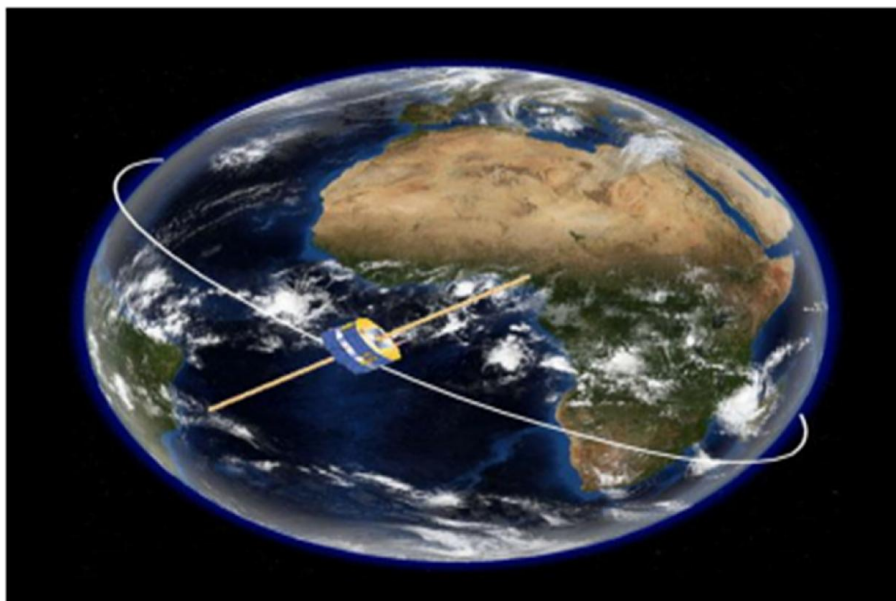


Figure II. 6: Orbite basse décrite par le satellite [17].

b) Orbites moyennes altitude MEO (Medium Earth Orbit)

Orbite offrant les mêmes caractéristiques que la LEO mais avec une altitude plus élevée, comprise entre 400 et 10 000 km.



Figure II. 7: Orbite moyenne décrite par le télescope spatial Hubble [17].

c) Orbite géostationnaire GEO (Geostationary Earth Orbit)

Orbite circulaire située à environ 36 000 km inclinée à environ 0° par rapport à l'équateur. Depuis la Terre, un satellite placé sur cette orbite paraît fixe. Il avance à la même vitesse que celle de la rotation de la Terre. C'est l'orbite des satellites de communications et de télévision essentiellement mais également météorologiques. [17].

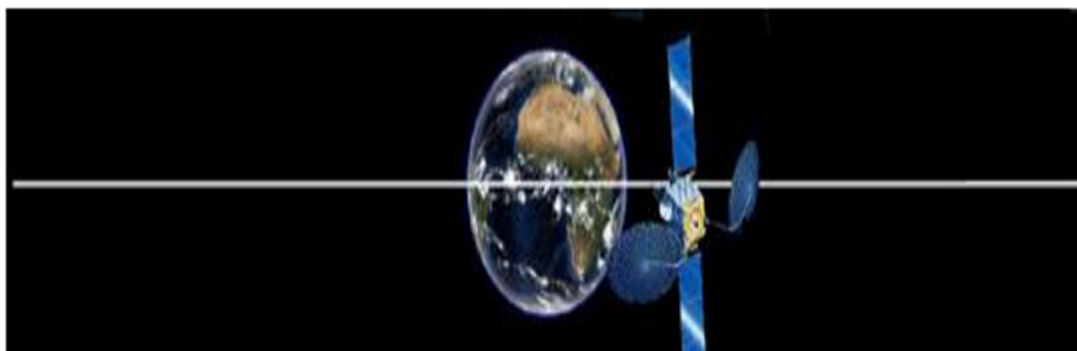


Figure II. 8:Orbite décrite par un satellite de télécommunications [17].

II.3.3. Les différents types de satellites

Il existe différents types de satellites que l'on peut classer selon leurs domaines d'utilisation. Citons par l'exemple :

a) Les satellites de télécommunication

Ces satellites sont utilisés pour la transmission de l'information d'un point à l'autre de la Terre, notamment pour les communications satellitaires, les communications téléphoniques, les programmes télévisés, ...etc. Le premier satellite équipé d'un réémetteur radio embarqué était le "Spoutnik 1" Russe, tandis que le premier satellite Américain à relayer des communications se dénommait "Project Score"[17].

b) Les satellites de télédétection

Ces satellites ont pour missions d'observer la Terre, afin d'accomplir des intérêts scientifiques (température de la mer, sécheresse, ...), économiques (ressources naturelles, ...) ou militaire (rôle majeur dans les guerres). Le spectre d'observation est vaste : optique, radar, infrarouge, ultraviolet, ... Citons quelques satellites de cette famille :

- SPOT : utilisé pour observer le sol Terrestre ;
- METEOSAT : employés pour la météorologie ;
- CRYOSAT-2 : permettent de mesurer l'épaisseur et la circonférence des calottes polaires et de la banquise [18].

c) Les satellites de positionnement

Ces satellites permettent de connaître la position (ou localiser) d'objets à la surface de la Terre, dans les airs (avions, missiles) et dans l'espace.

- GPS : système américain ;
- GALILEO : futur système européen ;
- GLONASS : système russe [18].

d) Satellites d'observation spatiale

Ces satellites observent l'espace au-dessus de l'atmosphère (par exemple HUBBLE) et permettent aux astronomes d'avoir accès à des domaines de longueurs d'onde non visibles

depuis le sol ou d'exploiter les mêmes gammes de longueurs d'onde que les télescopes au sol, mais avec des performances accrues. L'écran de l'atmosphère terrestre dégrade toujours les signaux astronomiques [18].

e) Stations spatiales

Ces satellites sont destinés à être habités par l'homme et a un but scientifique. Après les stations Saliout et Mir russes et la station Skylab américaine, la station spatiale internationale est en orbite depuis 1998 et est habitée en permanence depuis 2002 [18].

II.4. Satellite météorologie

II.4.1. Définition

Les satellites météorologiques sont des plates-formes en orbite à partir desquelles des instruments peuvent détecter le rayonnement et l'énergie thermique de l'atmosphère et des surfaces sous-jacentes.

Ces satellites sont devenus indispensables, à la fois pour la météorologie et la climatologie, ils consistent un système perpétuel d'observation de l'atmosphère terrestre et permet de générer des images de la planète entière. De plus, ces satellites peuvent déterminer la température et le contenu de la vapeur d'eau à diverses altitudes dans l'atmosphère...

Les observations effectuées par ces satellites, consistent un apport essentiel aux systèmes de prévisions météorologiques numériques et aident également les prévisionnistes à reconnaître le développement de phénomènes météorologiques susceptibles de causer des sinistres. Les capteurs à bord des satellites réagissent à deux types d'énergie rayonnante de base :

- Le soleil, qui produit la lumière visible réfléchiée par les surfaces de la Terre et des nuages vers le satellite .
- L'énergie infrarouge ou thermique, émanant de surfaces dont les températures se situent dans la gamme de celles des surfaces Terrestres ou aquatiques de la Terre et des sommets de nuages.

Le premier satellite météo, Tiros 1, a été lancé par les Américains en 1960. Les images de l'atmosphère qu'il transmettait n'étaient pas vraiment exploitables. Mais, depuis cette date, la

technique a beaucoup progressé. De nos jours, il existe deux familles de satellites météorologiques : les défilants et les géostationnaires.

Les satellites météorologiques sont souvent géostationnaires. Ils sont principalement METEOSAT maintenu par l'Europe (Eumetsat), GOES par les EtatsUnis, GMS par le Japon, FY par la Chine, GOMS par la Russie et INSAT par l'Inde.

Ces satellites météorologiques (voir figures II.9, II.10) peuvent en outre remplir les fonctions de satellites de collecte de données météorologiques dans le cadre du système mondiale de télécommunications.

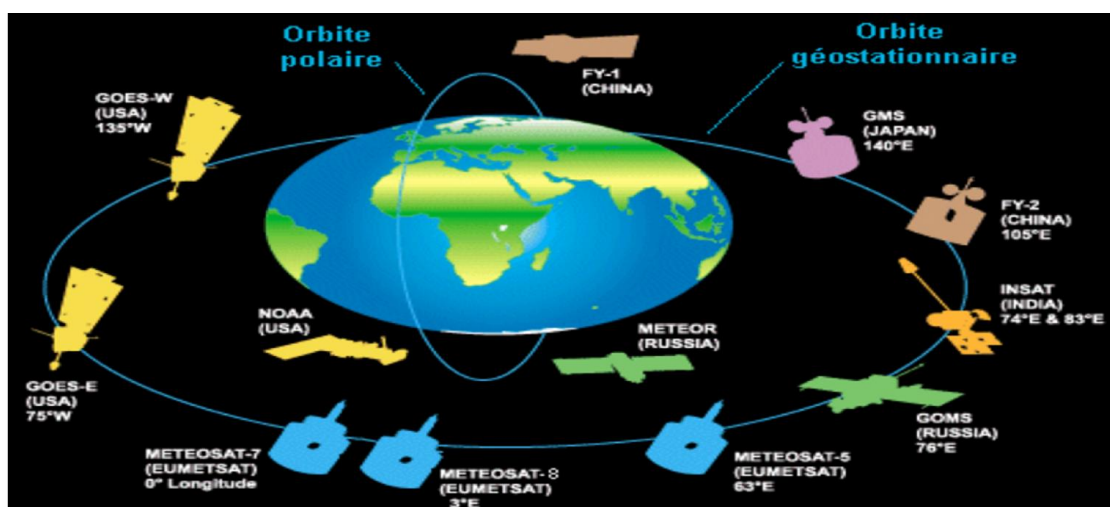


Figure II. 9: Satellites météorologiques[19].

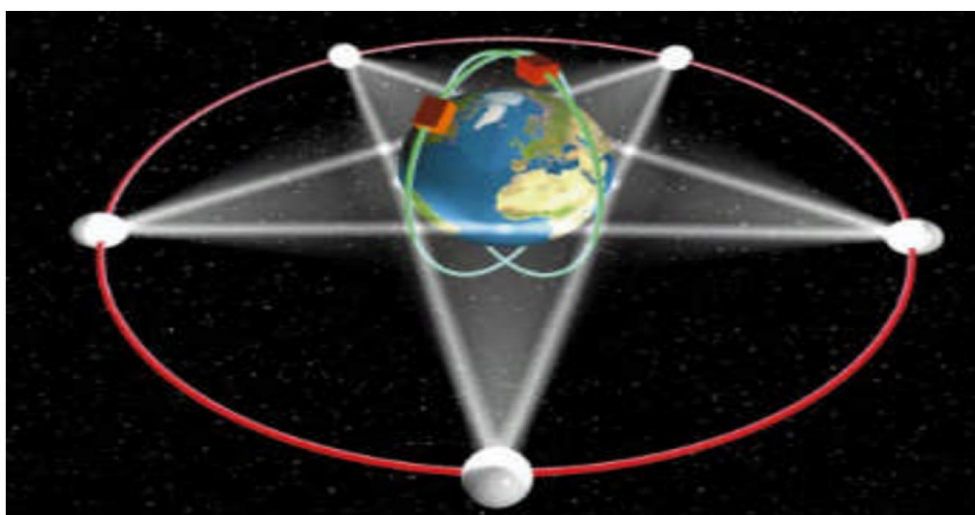


Figure II. 10: Couverture des satellites météorologiques géostationnaires opérationnels depuis l'espace [19].

Avec chaque nouvelle génération, les senseurs à bord de ces satellites deviennent plus performants et divisent l'information en plus de canaux de telle sorte qu'on peut les utiliser pour différencier les divers phénomènes météorologiques : nuages, précipitations, vents, brouillard, etc. Il y a deux types géostationnaire et polaire [20].

II.4.2. Les satellites géostationnaires

Leur altitude voisine de 36 000 Km leur permet d'avoir une vitesse angulaire de rotation autour de l'axe polaire identique à celle de la terre elle-même ; ils nous paraissent donc fixes.

Plusieurs satellites géostationnaires sont en opération autour de la terre pour permettre une étude à l'échelle mondiale des perturbations atmosphériques. Deux ont été utilisés pour mettre au point méthodologies de détermination du Gisement Solaire : GOES en Amérique et METEOSAT en Europe .[21]

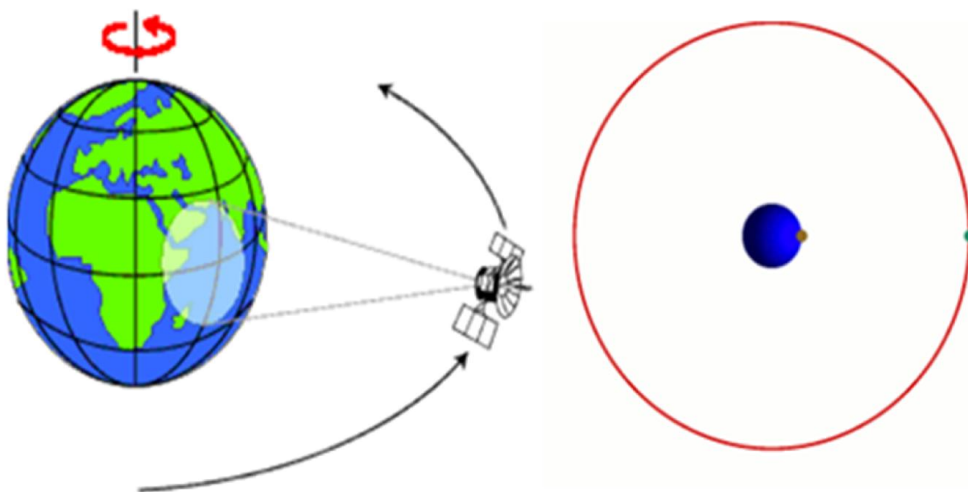


Figure II. 11:Orbite géostationnaire [21]

II.4.3. Les satellites polaires (héliosynchrones)

Ces satellites sont dit polaires ou défilement se situent à une altitude variant entre 500 km et 900 km, la plupart suivent une orbite quasi-polaire à ensoleillement constant (c-à-d que Le satellite passe au-dessus de l'équateur et de chaque latitude à la même heure chaque jour).

Ils sont généralement utilisés pour l'inventaire des ressources terrestres et permettent de couvrir l'ensemble de la surface du globe dans un intervalle de temps qui varie d'une demie journée à quelques dizaines de jours .

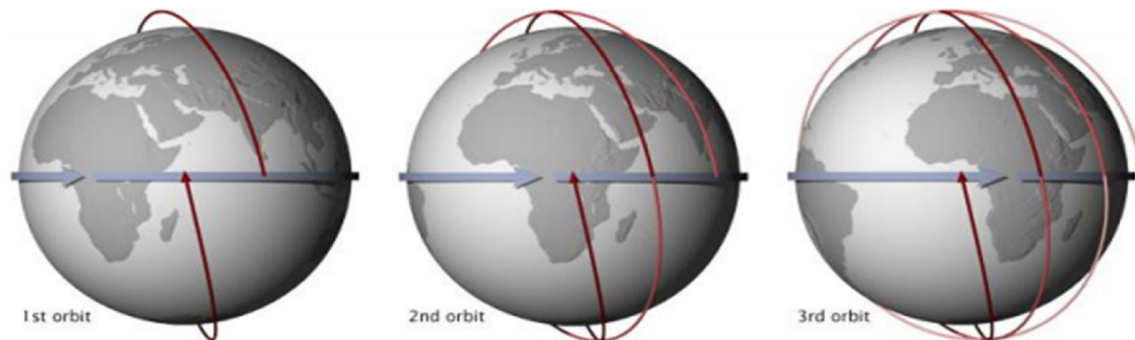


Figure II. 12: Orbite polaire (Document NASA)

II.4.4. Les mesures d'un satellite météorologique

Chaque satellite météorologique fournit plusieurs milliers de données très diverses tous les jours. Ces informations sont ensuite utilisées par les météorologues pour suivre en temps réel l'évolution de la météo et en extraire des données dérivées (température et albédo). L'avantage du satellite est qu'il peut, contrairement à un autre moyen de mesurer des données n'importe où sur terre, même au milieu de l'océan. Mais le satellite ne reçoit pas directement des images ou des données de température, de vitesse ou d'humidité, il analyse les ondes électromagnétiques provenant des différents objets et en déduit, par les caractéristiques de ces ondes, différents paramètres météorologiques .En effet, chaque corps n'a pas le même albédo ce qui permet au satellite de différencier eau et terre par exemple. Suivant le but recherché, chaque satellite n'analyse pas dans la même longueur d'ondes, ils opèrent dans différentes bandes spectrales, dans différents canaux. Pour établir ses mesures à distance, le satellite météorologique utilise des capteurs passifs (par exemple les radiomètres), sont ceux qui reçoivent le rayonnement de la terre, qu'il soit émis par celle-ci ou reflété, c'est la télédétection passive. Ou alors, il peut utiliser des capteurs actifs par exemple les radars, qui émettent une onde électromagnétique et analysent le signal réfléchi par le sol: C'est la télédétection active (Figure . II.13) .[22]

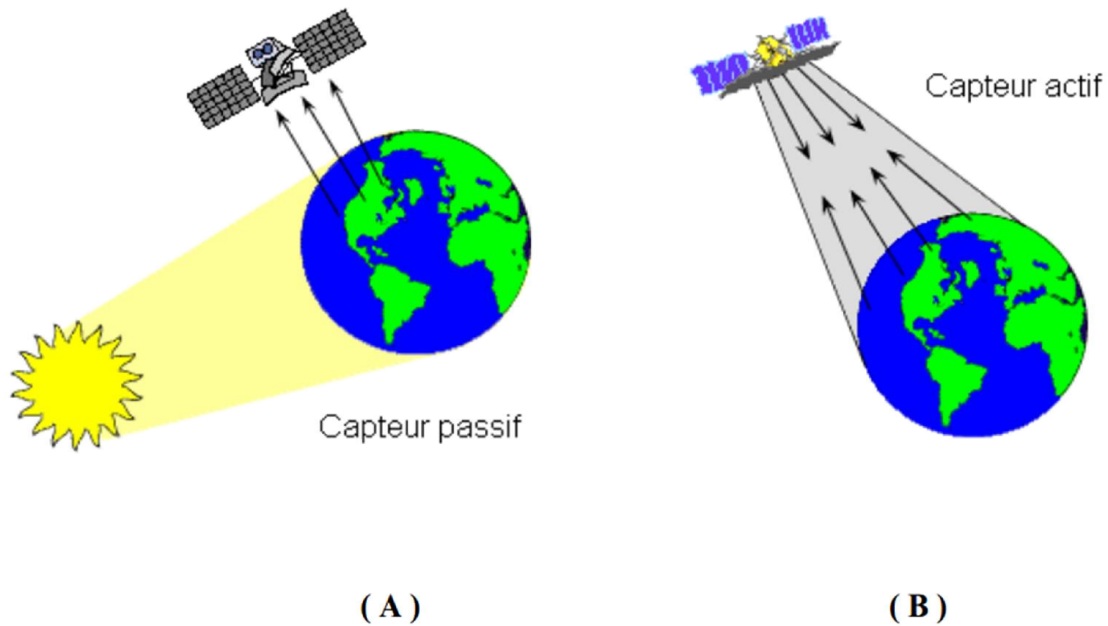


Figure II. 13: Fonctionnement des capteurs, passif (A) et actif (B) [22]

II.5. Les satellites Météosat Seconde Génération (MSG)

II.5.1. Définition

Les satellites Météosat sont des satellites européens dont le propriétaire et l'opérateur sont EUMETSAT. La première utilisation de ses images est évidemment destinée à la prévision météorologique. Cependant d'autres utilisations sont facilement envisageables. Ils ont une vitesse de rotation angulaire identique à celle du globe terrestre, ce qui fait qu'ils sont immobiles au-dessus d'un point unique de la terre : ce sont des satellites géostationnaires.

Ils sont situés à environ 36000 km d'altitude au-dessus de l'équateur. Le champ visuel couvre l'Afrique, l'Europe et les extrémités de l'Asie et de l'Amérique méridionale. Les images acquises couvrent toujours la même zone du globe terrestre durant un intervalle de temps fixé à l'avance.[23].

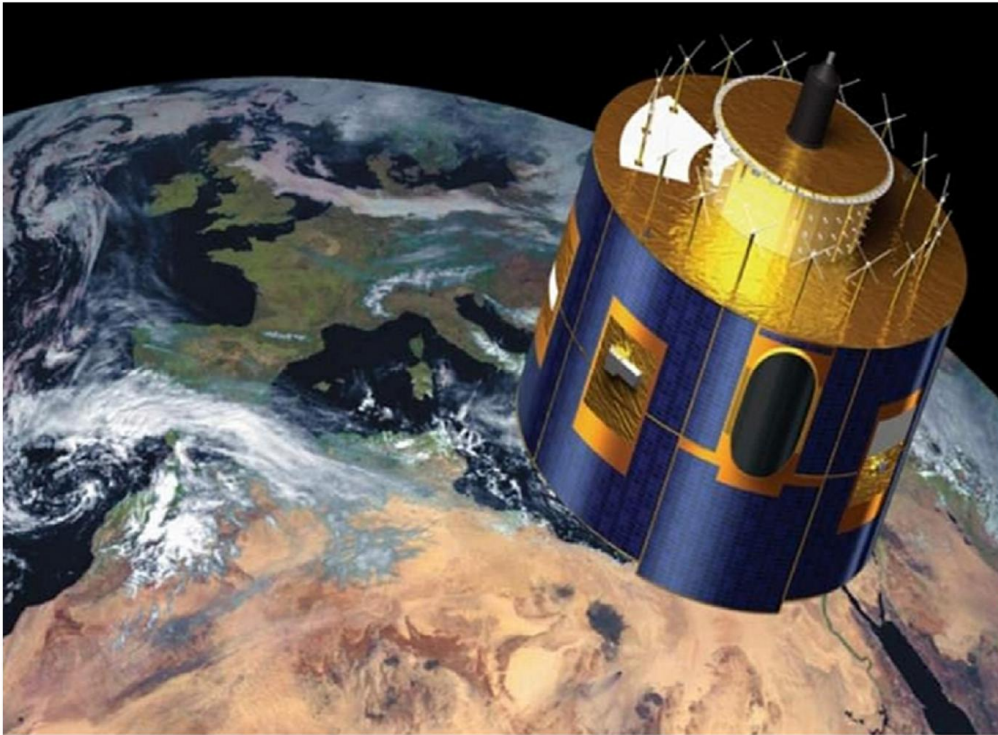


Figure II. 14: Représentation artistique du satellite MeteoSat-8 [19]

II.5.2. Mission principale

Depuis les premiers lancements à la fin des années 1970, la mission principale des satellites Météosat est d'acquérir des images des systèmes nuageux, jour et nuit, de façon à permettre aux météorologues d'effectuer les prévisions quotidiennement. Les données transmises sont également essentielles pour anticiper les phénomènes météorologiques extrêmes comme les tempêtes, les orages violents, les inondations,...,et pour suivre l'évolution du climat de la planète sur le long terme .[23]

II.5.3. Générations sur les satellites Météosat

a) Météosat première génération MPG

Le premier satellite, Météosat 1, a été lancé le 23 novembre 1977. En 1995, l'EUMETSAT (organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques) a officiellement pris la responsabilité de l'exploitation des satellites Météosat et de la diffusion de leurs données.

Le radiomètre multi spectral de METEOSAT balaye, en rotation dans le sens Est-Ouest, la surface de la terre ligne par ligne par la rotation du satellite à 100 tours/minute. Chaque ligne

consiste en une série d'images élémentaires ou pixel. Les lignes successives sont obtenues par décalage du télescope d'une ligne vers le nord à chaque tour du satellite.

Pour chaque pixel, le radiomètre mesure l'énergie radiative dans différentes bandes spectrales. Cette mesure est numérisée, puis transmise à une station au sol où elle est traitée, avant d'être envoyée à la communauté des utilisateurs.

Le radiomètre de METEOSAT possède 3 canaux pour l'imagerie : un canal visible, un canal dans l'infrarouge thermique et un canal vapeur d'eau.

Chaque canal de METEOSAT correspond à une bande spectrale. Le tableau ci-après résume les principales caractéristiques du radiomètre de METEOSAT.[24].

Tableau.1 : Les principales caractéristiques du radiomètre de METEOSAT [24]

Canal d'Eau (WV)	Visible (VIS)	Vapeur	Infrarouge (IR)
Fenêtre Spectrale (µm)	0,45 - 1,0	5,7 – 7,1	10,5 – 12,5
Nombre de détecteurs (+redondants)	2 (+2)	1 (+1)	1 (+1)
Lignes par image	5000	2500	2500
Résolution spatiale au Pixels par lignes	5000	2500	2500
Point sub-satellite	2,5 km	5 km	5 km

b) Météosat de seconde génération (MSG)

Le 28 août 2002 a été lancé le premier satellite MSG, Météosat de Seconde Génération. Cette famille de satellites dispose de radiomètres imageurs plus sophistiqués, 12 canaux contre 3 pour la précédente génération, et fournissent des images tous les quarts d’heure, deux fois plus fréquemment.

Depuis 1977, 9 satellites de la famille Météosat ont été mis en orbite autour de la terre, dont 2 satellites MSG. Le dernier lancement en date, celui de MSG 2, a été effectué le 21 décembre 2005 le principale avantage de météosat deuxième génération c'est les cadences de scans est doublées (48 scans par jour) par rapport les première générations et la qualité d'images été amélioré. [24]

Les caractéristiques des différents capteurs du satellite MSG sont illustrées dans le tableau 2.

Tableau.2 : Bande spectrale des douze canaux du satellite MSG [24]

Canal	Bande spectrale
Visible : canal 0.6	0,56 à 0,71 μm
canal 0.8	0,74 à 0,88 μm
Proche Infrarouge : canal	1.6 1,5 à 1,78 μm
Infrarouge moyen : canal 3.9	3,48 à 4,36 μm
Vapeur d’eau : canal 6.2	5,35 à 7,15 μm
canal 7.3	6,85 à 7,85 μm
Infrarouge : canal 8.7	8,3 à 9,1 μm
canal 9.7	9,38 à 9,94 μm
canal 10.8	9,8 à 11,8 μm
canal 12.0	11 à 13 μm
canal 13.4	12,4 à 14,4 μm
HRVIS (Visible) Haute Résolution	0,56 à 0,71 μm

c) MTG (Météosat Troisième Génération)

Les exigences du nouveau système MTG ont été définies au travers d'un processus de consultation des usagers et d'experts des États membres d'EUMETSAT, mandatés par le Conseil. Engagée en 2002 et soutenue par l'Agence spatiale européenne (ESA), cette démarche a intégré l'évolution des besoins anticipée par les usagers pour la période 2015-2035, en tenant compte des recherches en cours et des stratégies de développement des systèmes de prévision des Services météorologiques nationaux (SMN) des États membres d'EUMETSAT et du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMET). Le programme MTG a pour priorité d'assister la prévision immédiate et à très courte échéance, grâce à des améliorations majeures de la mission d'imagerie de Météosat, dont la fréquence passera à 10 minutes pour le disque complet (au lieu de 15 avec MSG) et à 2,5 minutes pour l'imagerie rapide (au lieu de 5 actuellement) au-dessus de l'Europe et des mers adjacentes. Le nombre de canaux spectraux passera de 12 à 16, produisant une information supplémentaire sur les cirrus semi-transparents, la microphysique des nuages, les aérosols et les feux de forêts. Dernier point et non des moindres, la résolution des pixels augmentera pour atteindre, selon les canaux, entre 500 m et 1 km au point sous-satellite. Enfin, un imageur de la foudre permettra d'observer l'activité électrique des nuages (et en particulier les décharges internes). [25]

II.5.4. Les images satellitaires

Une image satellitaire est constituée de nombreux carrés appelés pixels. Chaque pixel d'une image a une valeur, cette valeur correspond à l'intensité du rayonnement réfléchi par l'objet. Parmi les images satellitaires nous avons :

- **Images HR (High-Resolution)** : est une image de taille 5000 x 5000 pixels pour le canal visible et 2500 x 2500 pixels pour celui infrarouge
- **Images B2 (Reduced-Resolution)** : Elle est de format 416 x 416 pixel.
- **Les images WEFAX (Weather Facsimile)** : Elle compte 8000 x 8000 pixel [11].

II.5.5. Les images 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 en est un exemple.

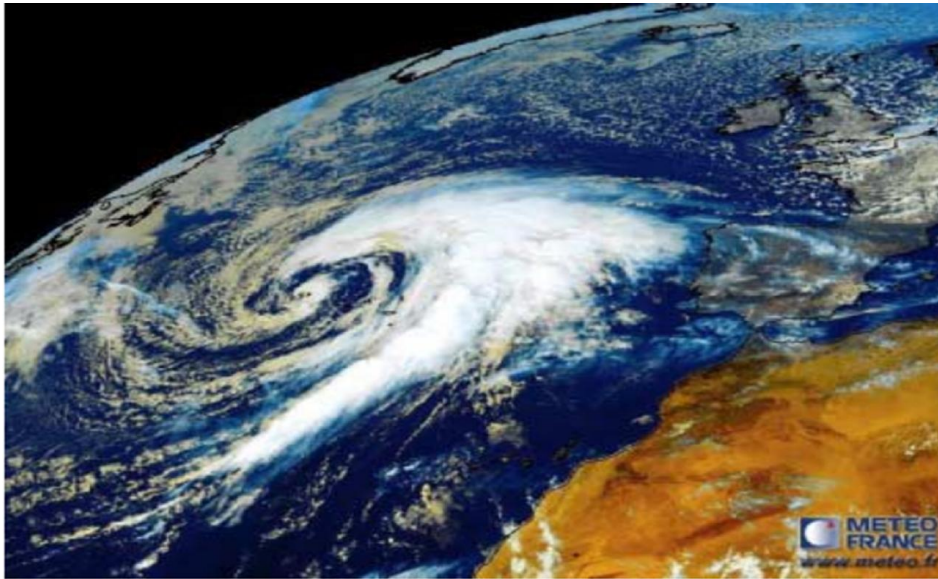


Figure II. 15 Une tempête sur le proche Atlantique le 18 octobre 2002. Image Météosat [26]

II.5.6. Potentialités des images MSG

Pour améliorer notre compréhension du climat et des prévisions météorologiques, il est crucial de connaître la répartition des températures de surface des océans (TSM). Depuis une quarantaine d'années, les satellites opérant dans l'infrarouge thermique ont considérablement enrichi nos connaissances en permettant de repérer les structures océanographiques qui ont une signature thermique à la surface. Utilisées comme traceurs naturels de la dynamique des océans, les structures thermiques superficielles permettent des applications dans des domaines nombreux et variés, qui vont de la recherche sur le climat, la météorologie, l'océanographie marine.

De nombreuses perspectives et applications du spatial s'ouvrent ainsi à la recherche, tant dans les domaines de la climatologie que des activités connexes de surveillance de l'environnement telles que :

- Etude des changements climatiques
- L'hydrologie et précipitations
- L'agriculture,
- Le suivi des espaces urbanisés lien interne Environnement urbain,
- L'halieutique à travers la cartographie des températures de surface des océans
- L'étude des phénomènes éruptifs, une meilleure estimation des vents
- L'évolution du couvert végétal

- Les sécheresses
- La détection des incendies de forêts
- Suivi des nuages de poussières en cas de catastrophes industrielles,
- Cartographie de la radiation solaire
- etc.

La radiance spectrale par ciel clair MSG est actuellement utilisée par l'ensemble des grands centres météorologiques mondiaux dans l'assimilation de données pour améliorer l'état initial des paramètres météorologiques utilisé comme entrée par les modèles numérique de prévision du temps. Les travaux de recherche sont pied d'œuvre pour l'assimilation des radiances MSG en présence de nuages. L'image MSG est devenue une donnée indisponible dans le domaine de la recherche pour de nombreuses disciplines[27].

II.5.7. Système de prise des images

L'instrument destiné à cette fonction est le radiomètre imageur SEVIRI (Spining Enhanced Visible and Infrared Imager), transmet des images des structures météorologiques tous les 15 minutes à une résolution de 3 Km pour tous les canaux à l'exception du canal visible haute résolution (HRV) qui a une résolution d'un Km (1 km). Ses 12 canaux permettent de procéder à ce qu'on appelle un "pseudo sondage". La fréquence de son cycle de vue rapide, avec une nouvelle image toutes les 15 minutes, permet de suivre les phénomènes météorologiques à évolution rapide, ce qui s'avère d'une grande utilité pour les prévisionnistes qui peuvent ainsi reconnaître et prévoir les phénomènes météorologiques dangereux, orages, pluies violentes, brouillards ou le développement de dépressions aussi petites qu'intenses susceptibles d'aboutir à des tempêtes dévastatrices

Le capteur SEVIRI est un radiomètre à balayage et c'est la rotation du satellite autour de son axe principal d'inertie qui est utilisée pour réaliser l'acquisition des images[22].

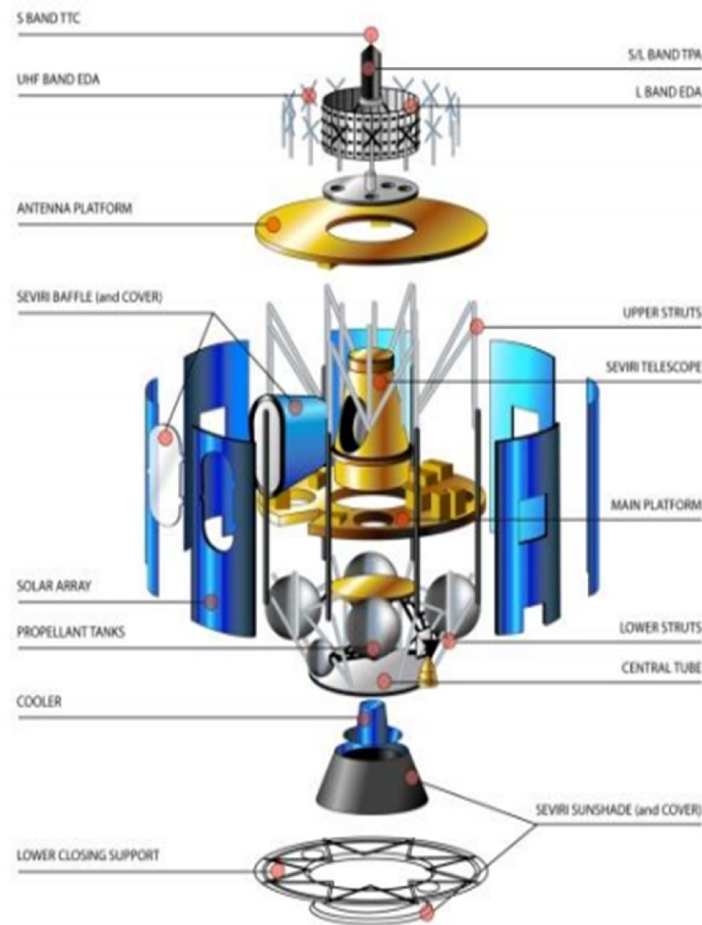
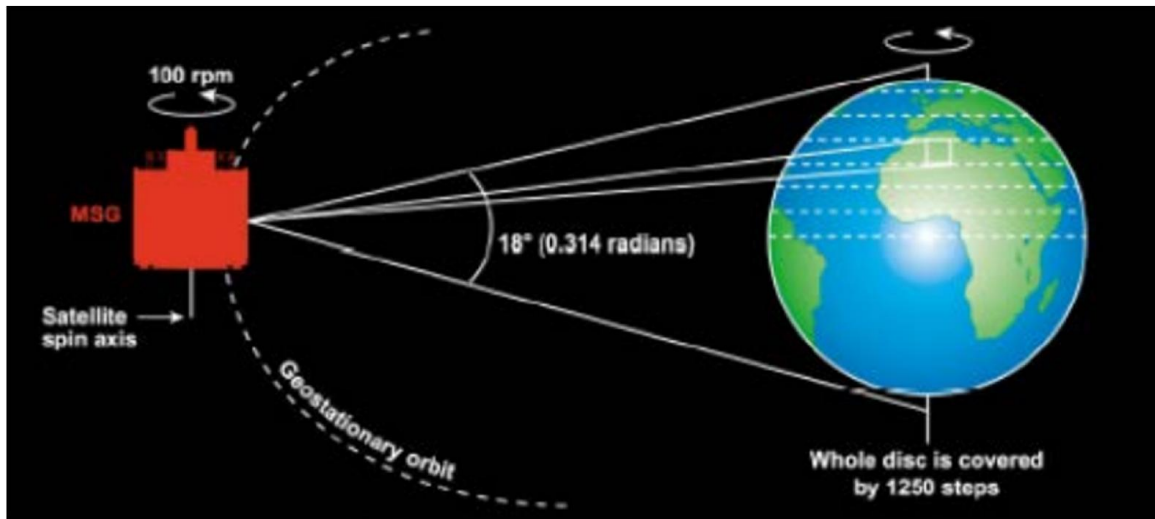


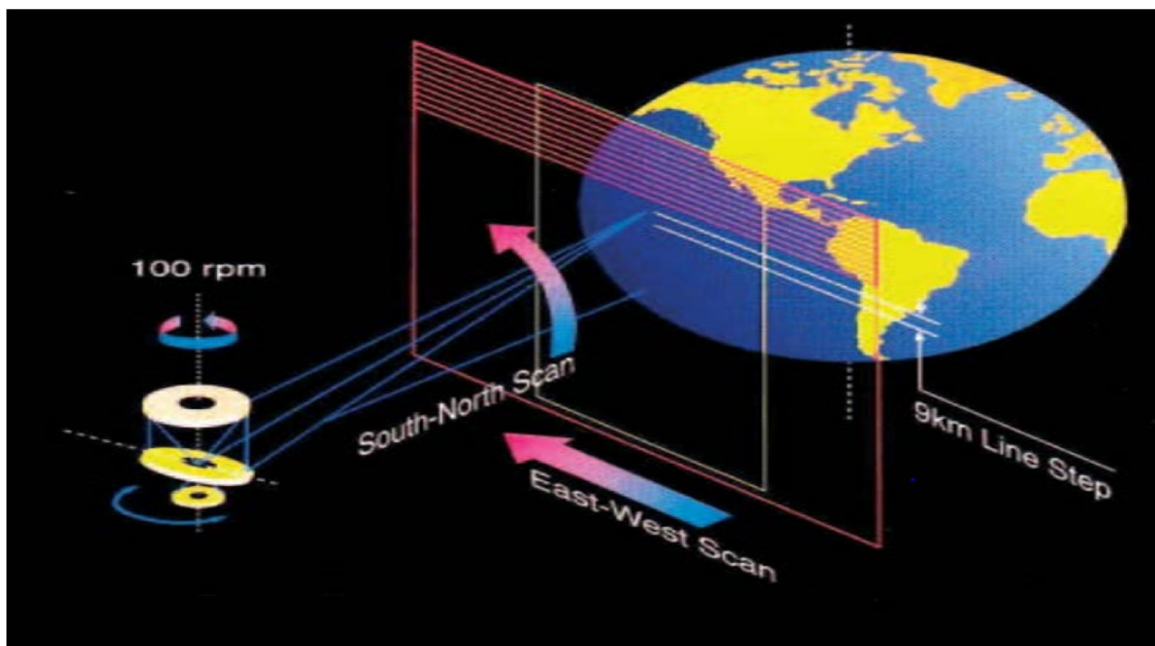
Figure II. 16: Radiomètre SEVIRI [28]

Le satellite tourne à 100 tours par minute autour d'un axe parallèle à l'axe Nord-Sud de la terre. Le télescope du radiomètre SEVIRI vise la terre par l'intermédiaire d'un miroir et balaie à chaque révolution du satellite une étroite bande de la surface de la terre. L'angle de balayage correspondant à 18° . Il est décrit en 30 ms. Pendant les 570 ms suivantes, le télescope vise l'espace et cette durée est mise à profit pour modifier l'orientation du miroir de façon qu'au tour suivant, il balaie au sol une bande contiguë à la précédente mais plus au nord de 3kms (voir fig.12 a et b). Le balayage d'une ligne d'est en ouest est assuré par la rotation du satellite. Le balayage du sud au nord est réalisé par un mouvement pas à pas d'un miroir de balayage couvrant le disque terrestre d'environ 1250 tours ; ceci fournit 3750 lignes d'image pour les 11 canaux disposant de 3 détecteurs chacun. Pour le HRV, 9 détecteurs sont utilisés pour le balayage d'une ligne. Pour fournir une image plein disque, le télescope balaie la totalité de la surface de la terre en 12 mn et 30 s. les 2 mn 30s suivantes sont consacrées au retour du miroir à sa position initiale, et il reprend le balayage de l'image suivante. La phase

de non acquisition des images est consacrée au calibrage des canaux infrarouges par référence au rayonnement du corps noir inséré dans le chemin optique de télescope. Chaque 15 mn, le satellite produit une image de 3712 lignes et de 3712 pixels codée sur 10 bits dans les 11 canaux, et une image de 11136×5568 pixels pour le HRV [1].



(A)



(B)

Figure II. 17: Principe de prise d'images par le radiomètre SEVIRI. [1]

II.5.8. Les 12 canaux de SEVIRI

Pour chaque pixel, le radiomètre SEVIRI mesure l'énergie radiative dans différentes bandes spectrales. Ces bandes sont la bande visible, vapeur d'eau et l'infrarouge thermique. Le positionnement des 12 canaux de SEVIRI dans ces trois bandes est résumé par la figure suivante :

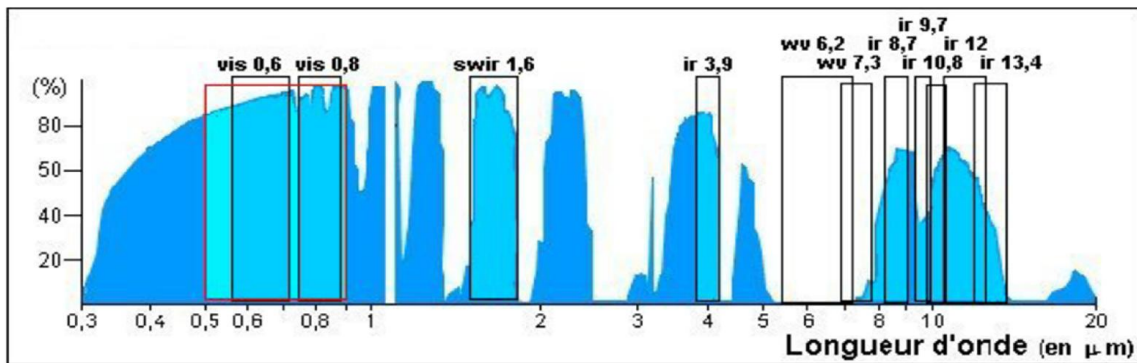


Figure II. 18 Distribution du rayonnement dans les 12 canaux de SEVIRI

a) Les canaux visibles (VIS 0.6, VIS 0.8, NIR 1.6 et HRV)

Les images visibles représentent la quantité de lumière visible rétro diffusée par les nuages ou la surface de la terre. Les nuages et la neige apparaissent en blanc et les zones sans Les canaux visibles (VIS 0.6, VIS 0.8, NIR 1.6 et HRV) Les images visibles représentent la quantité de lumière visible rétro diffusée par les nuages ou la surface de la terre. Les nuages et la neige apparaissent en blanc.[27]

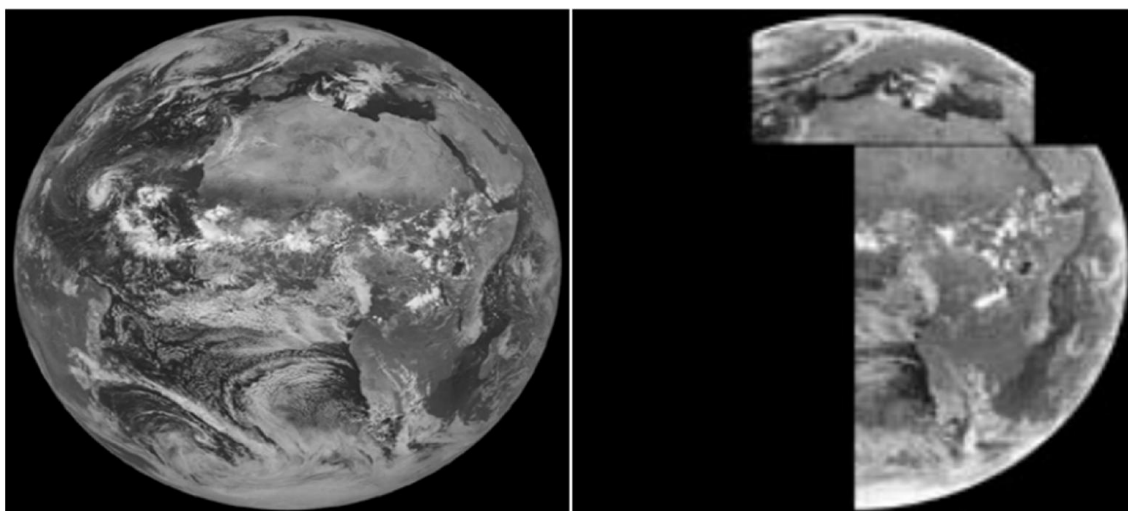


Figure II. 19 : Images prises dans le canal visible HRV à droite et 0.6 μm à gauche [27]

b) Les canaux infrarouges (3.9, 8.7, 9.7, 10.8, 12.0 et 13.4)

Les images infrarouges représentent une mesure du rayonnement infrarouge émis par le sol ou les nuages. Ce rayonnement dépend de la température. En mode inversé, Plus l'objet est chaud, plus il est noir et plus l'objet est froid, plus il est blanc. Les nuages élevés apparaissent plus blancs que les nuages bas car ils sont plus froids. Dans les zones sans nuages, plus le sol est chaud, plus il est sombre. [27]

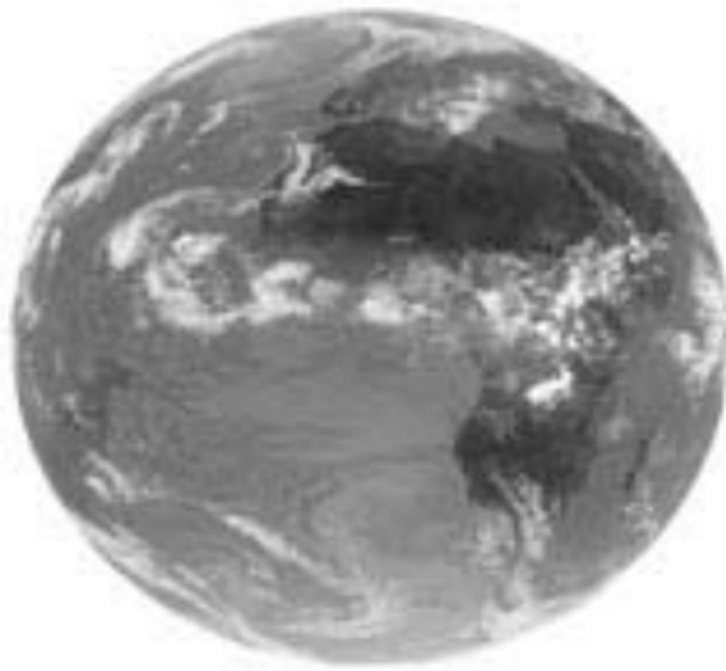


Figure II. 20: Image prise dans l'IR 10.8 μm [27]

c) Les canaux vapeur d'eau (WV 6.2 et 7.3 μm)

Les images «vapeur d'eau» représentent une mesure du rayonnement infrarouge influencée par la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Cela permet de déterminer les zones sèches et les zones humides. Lorsque l'atmosphère est pauvre en vapeur d'eau, les rayons infrarouges la traversent et parviennent au capteur WV de Météosat Seconde Génération. Au contraire plus l'atmosphère est chargée de vapeur d'eau moins ils la traversent.[27]



Figure II. 21: Images de canal vapeur d'eau 6.2 μm à gauche et 7.3 μm à droite [27]

II.5.9. Segment sol de MSG

Les données acquises à bord des satellites météorologiques opérationnels sont immédiatement transmises à la station de réception, située à Usingen, en Allemagne.

Les données sont ensuite relayées au centre de contrôle au siège d'Eumetsat, à Darmstadt, qui assure leur prétraitement, leur archivage, ainsi que l'extraction de produits météorologiques et géophysiques, avant la diffusion vers les services météorologiques nationaux des pays membres d'Eumetsat et les autres usagers, via le service EUMETCast. Le centre de contrôle assure également les activités de télécommande du satellite et de contrôle de la mission. En plus de la station d'Usingen, le segment sol du système Eumetsat comprend une station sol de réserve dans le cas d'un besoin urgent de télécommande du satellite et une station sol de soutien qui assure l'acquisition et le prétraitement des données en provenance d'autres satellites météorologiques et leur relais vers le site central à Darmstadt. Des centres relais EUMETCast assure la réception et la transmission des données vers les continents africain et américain [21].

II.5.10. EUMETSAT

EUMETSAT est une organisation intergouvernementale créée par une convention internationale (entrée en vigueur le 19 juin 1986 et implantée à Darmstadt en Allemagne) approuvée par 18 États européens : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal,

Royaume-Uni, Suède, Suisse et Turquie. Ces États financent les programmes d'EUMETSAT et sont les principaux utilisateurs des systèmes. EUMETSAT a également des États coopérants (Bulgarie, Croatie, Hongrie, Lettonie, Lituanie, Slovaquie, Hongrie, Pologne, République tchèque, la République de Serbie et Monténégro, Slovénie et la Roumanie). EUMETSAT a pour principale mission la mise en place, le maintien et l'exploitation de systèmes européens de satellites météorologiques opérationnels et une contribution à l'étude du climat et à la détection des changements climatiques.

Les données, produits et services des satellites d'EUMETSAT constituent une contribution essentielle pour la prévision du temps et le suivi opérationnel du climat et des changements climatiques à l'échelle de la planète [20].

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes caractéristiques principales de l'imagerie satellitaires MSG, ce qui a permis de mettre en évidence les propriétés spatiales, temporelles et spectrales du radiomètre imageur SEVERI

Ces images multi spectrales de haute résolution acquises par télédétection serviront de base de données pour valider les méthodes d'estimation du rayonnement solaire proposées dans ce mémoire.

Dans le chapitre suivant, nous allons décrire et faire une étude comparative des différentes méthodes d'estimation du rayonnement solaire à partir des images satellitaires MSG.

CHAPITRE III :

Résultats et interprétations

III.1. Introduction

Plusieurs méthodes d'estimation du rayonnement solaire arrivant au sol par traitement d'images existent dans la littérature. Pour notre travail, nous avons choisi deux modèles, le premier est le modèle GISTEL qui permet la reconstitution de l'évolution du rayonnement solaire à l'échelle horaire et journalière en un lieu quelconque et le deuxième est basé sur une régression linéaire par apprentissage approfondi (Deep learning). Nous avons simulé avec MATLAB et Python.

III.2. Méthodologie

Dans cette partie nous avons expliqué comment appliquer le modèle GISTEL et la régression linéaire.

III.2.1. Extraction de zone d'étude

Dans ce travail nous avons utilisées les images Météosat Seconde Génération (MSG), provenant d'EUMETSAT. Ces images qui couvrent tout le disque terrestre se composent de 3712 x 3712 pixels codés sur 10 bits, Elles ont été collectées dans le canal visible (VIS008) pendant 92 jours de juin 2015. Nous intéressons à déterminer le gisement solaire en Algérie est située dans la zone de coordonnées 18° et 38° Nord et 8 ouest et 13 est. En introduisant ces coordonnées, et par la conversion des coordonnées géographiques en coordonnées de l'image, pour cela, nous avons découpé chaque image en 605x685 pixels représentant l'Algérie.

La méthodologie adoptée pour estimer le rayonnement solaire global au sol consiste à extraire dans un premier temps la zone d'étude des images qui représente l'Algérie est localisée sur les images en faisant une correspondance entre le point de coordonnées géographiques (latitude et longitude) au sol et les coordonnées du pixel (N de ligne et M de colonne)

Notre zone d'étude est alors une image de 605x685 pixels située entre les lignes 611 et 1216 et entre les colonnes 1545 et 2230. Nous avons localisé dans un deuxième temps le site de Ghardaïa (Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables URAER) est située dans la zone de coordonnées géographiques (3,78 et 32,38°) sur le pixel 156x425 de l'image 605x685.

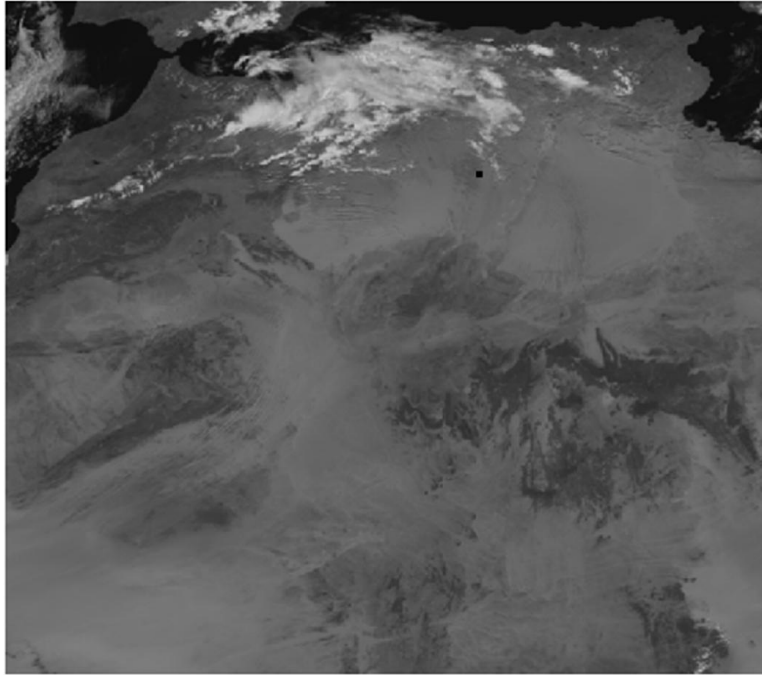


Figure III. 1 : Zone d'étude extraite d'une image plein disque prise le 01 juin 2015 à 1200 UTC

III.2.2. Méthode Gistel

A) Trouble de Linke

Le facteur de trouble de Linke permet de comparer l'atmosphère réelle à l'atmosphère idéale. Sa valeur dépend de la zone géographique de l'étude (zone industrielle ou montagneuse, rurale ou urbaine). 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 Service**.

La variation des moyenne mensuelle du facteur de trouble de Linke sur quelque sites dans différentes régions de notre pays est données sur la figure III.2, qui montre des valeurs relativement élevées au cours de la saison estivale surtout au mois d'août. Ces valeurs élevées peuvent être expliquées par la forte présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et une très faible diffusion par les aérosols (grains de sable et autres). Au mois de juin, on a constaté sur le site que la diffusion par les aérosols (grains de sables) est prépondérante et avec un faible taux d'humidité.

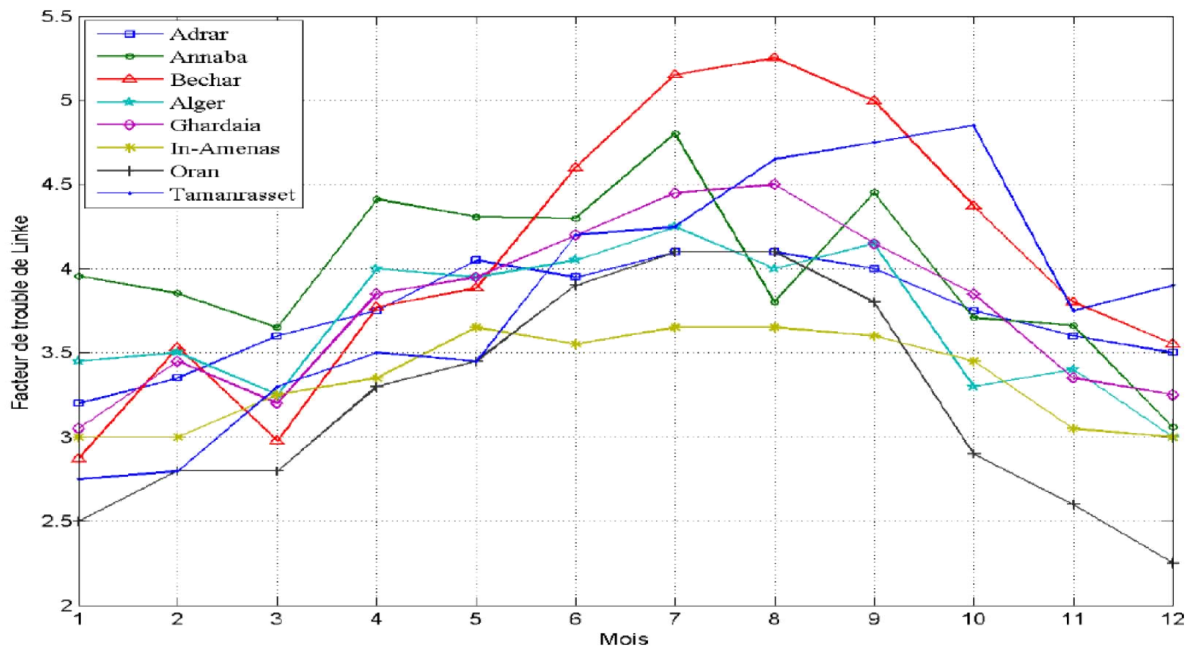


Figure III.2 : Facteur de trouble de Linke moyennes mensuelles [4]

B) Conversion des comptes numériques en radiance

Le capteur SEVIRI du satellite MSG mesure l'énergie réfléchie ou émise par le système terre atmosphère. Les valeurs obtenues pour chaque pixel de l'image sont des comptes numériques. Pour lier les comptes numériques de chaque pixel à la quantité d'énergie reçue par le satellite pour ce pixel, il faut calibrer les images. Pour cela, EUMETSAT a mis à notre disposition des coefficients de calibration et des formules pour convertir les comptes numériques en radiances exprimées en W/m²/sr.

La relation entre le compte numérique de chaque pixel et la radiance qui lui correspond est donnée par la relation ci-dessous :

$$R = CN \times CAL_slope + CAL_offset \quad (3.1)$$

Avec :

R : radiance (W/m²/sr)

CN : le compte numérique

CAL_slope et CAL_offset : des coefficients de calibration.

Les valeurs de ce Coefficients pour le canal visible VIS008 sont données dans le tableau suivant :

Tableau III. 1 : Coefficients de calibration correspondant au canal visible VIS008

	CAL_slope	CAL_offset
VIS008	0.029727	-1.516057

C) Détermination des deux images de référence

Les deux images de référence sont celles des coefficients de réflexion obtenues en ciel clair R_c et en ciel totalement couvert R_n par des nuages. Ces images sont obtenues en utilisant une séquence d'images prises pendant une période de 92 (juin, Juillet et août 2015) jours à 1200.

L'image de référence en ciel clair est obtenue en attribuant à chaque pixel, la valeur minimale du coefficient de réflexion qui apparaît au moins une fois durant la séquence d'images.

L'image de référence en ciel complètement couvert s'est faite en sélectionnant les pixels dont la valeur du coefficient de réflexion est la plus importante pendant la même séquence d'images. La figure ci-dessous illustre les deux images de référence.

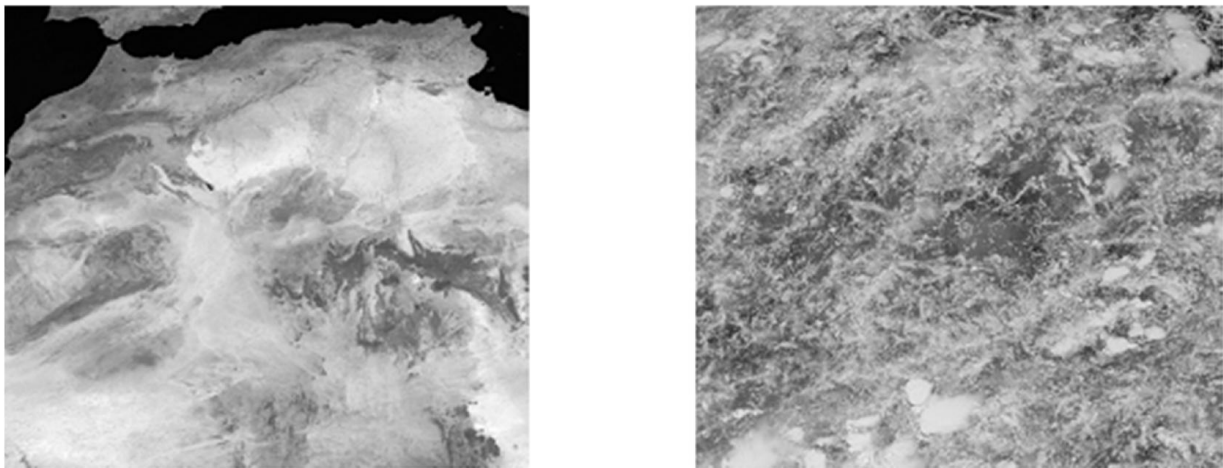


Figure III.3 : Les deux images de référence à droite : l'image de ciel nuageux, à gauche : l'image de ciel clair

III.2.3. Méthode de régression linéaire

Un modèle de régression linéaire est un modèle de régression qui cherche à établir une relation linéaire entre une variable y , dite expliquée, et une ou plusieurs variables x , dites explicatives. On parle aussi de modèle linéaire ou de modèle de régression linéaire.

Dans notre application nous avons utilisé la bibliothèque d'apprentissage approfondi Keras.

Keras a la capacité et les ressources pour s'exécuter au-dessus des bibliothèques d'apprentissage en profondeur populaires telles que TensorFlow, Theano ou CNTK. Il propose également une API (Application Programming Interface) relativement simple qui parvient à offrir également beaucoup de flexibilité. Cela rend Keras facile à apprendre et à utiliser.

Notre deuxième méthode est basée sur la régression linéaire à l'aide de Keras et Python.

Avant tout il faut mentionnée que notre base de données d'entrée est composée d'une matrice de taille de 300 lignes est de 5 colonnes.

Les lignes sans les valeurs des pixels (site URAER) prises à partir d'une série de 300 images MSG pour défirrent dates de l'année 2015 (heures, jours, mois).

Les colonnes sont les canaux : Visibles VIS006 et VIS008, proche infrarouge IR016 et infrarouges IR039 et IR108.

Alors, notre base de données d'entrée est composée de 1500 valeurs ; 70% pour l'entraînement et 30% pour l'évaluation.

La sortie est un vecteur de 300 valeurs qui contient les valeurs d'irradiation solaire GHI mesuré (site URAER), des mêmes dates que les données d'entrée.

La figure ci-dessous illustre les paramètres utilisés dans notre modèle :

```
#model definition
from keras import models
from keras import layers
def build_model():
    model = models.Sequential()
    model.add(layers.Dense(64, activation='relu', input_shape=(train_data.shape[1],)))
    model.add(layers.Dense(64, activation='relu'))
    model.add(layers.Dense(64, activation='relu'))
    model.add(layers.Dense(1))
    model.compile(optimizer='rmsprop', loss='mse', metrics=['mae'])
    return model
```

Figure III.4 : Définition du modèle utilisé de Keras

Avec :

train_data.shape[1] : nombre de colonne dans la base de données d'entraînement. Dans notre cas est égale à cinq.

relu : unité linéaire rectifiée, qui est définie mathématiquement par $F(x) = \max(0,x)$,

rmsprop : propagation quadratique moyenne,

mse : erreur moyenne quadratique,

mae : erreur moyenne absolue.

La figure III.5 montre l'étape d'entraînement et d'évaluation pour notre modèle :

```
all_mae_histories = []
num_epochs = 150
all_scores = []
model = build_model()
#model.summary()
history=model.fit(train_data, train_targets,validation_data=(test_data, test_targets),
                  epochs=num_epochs,batch_size=1,verbose=0)
mae_history = history.history['val_mae']
print(np.mean(mae_history))
#all_scores.append(val_mae)
all_mae_histories.append(mae_history)
```

Figure III.5 : Entraînement du modèle utilisé de Keras

Avec :

num_epochs : nombre d'itération, égale à 150,

train_data : données d'entraînement d'entrée,

train_targets : données d'entraînement de sortie,

test_data : données d'évaluation d'entrée,

test_targets : données d'évaluation de sortie,

val_mae : valeur d'erreur moyenne absolue pour l'étape d'évaluation (données du test).

La figure III.6 illustre la partie de programmation Python concernant l'étape de prédiction :

```

train_data1=np.array([X1, X2, X3, X4, X5])
train_data1=train_data1.transpose()
#####
mean = train_data1.mean(axis=0)
train_data1 -= mean
std = train_data1.std(axis=0)
train_data1 /= std

#####

predictions=model.predict(train_data1)
#print(CATEGORIES[int(predictions[0][0])])
#class_names[np.argmax(predictions)]
print(predictions)

train_data1.shape
[[ 441.03235]
 [ 446.9442 ]
 [ 687.768 ]
 [ 695.363 ]
 [ 917.757 ]

```

Figure III.6 : Programme pour la prédiction

Avec :

train_data1 : données pour être prédit, ces données sont constituées de 120 images nouvelles (ne sont pas utilisés dans l'apprentissage) à partir des dates et horaires différentes.

III.3. Présentation des résultats

Notre principe consiste à calculer à chaque instant de prise de vue des images, le rayonnement solaire horizontal global de site de Ghardaïa (UREAR) par deux méthodes (Gistel et régression linéaire par apprentissage approfondi), puis nous les comparant avec les données prises au sol pour les mêmes heures et dates.

III.3.1. Estimation du rayonnement solaire horizontal global

Les données solaires extraites des images satellitaires représentent l'intensité de la radiation solaire exprimée en W/m^2 ou ce qu'on appelle la radiance solaire.

Les figures ci-dessous représentent les résultats d'estimation de la radiance globale pour le site Ghardaïa (URAER) pour différents heure, jours et mois de l'année 2015.

Ces graphs illustres l'évolution de la radiance globale journalière issue des deux méthodes (Gistel et régression linéaire), comparé aux mesures au sol aux mêmes instants de prise des images.

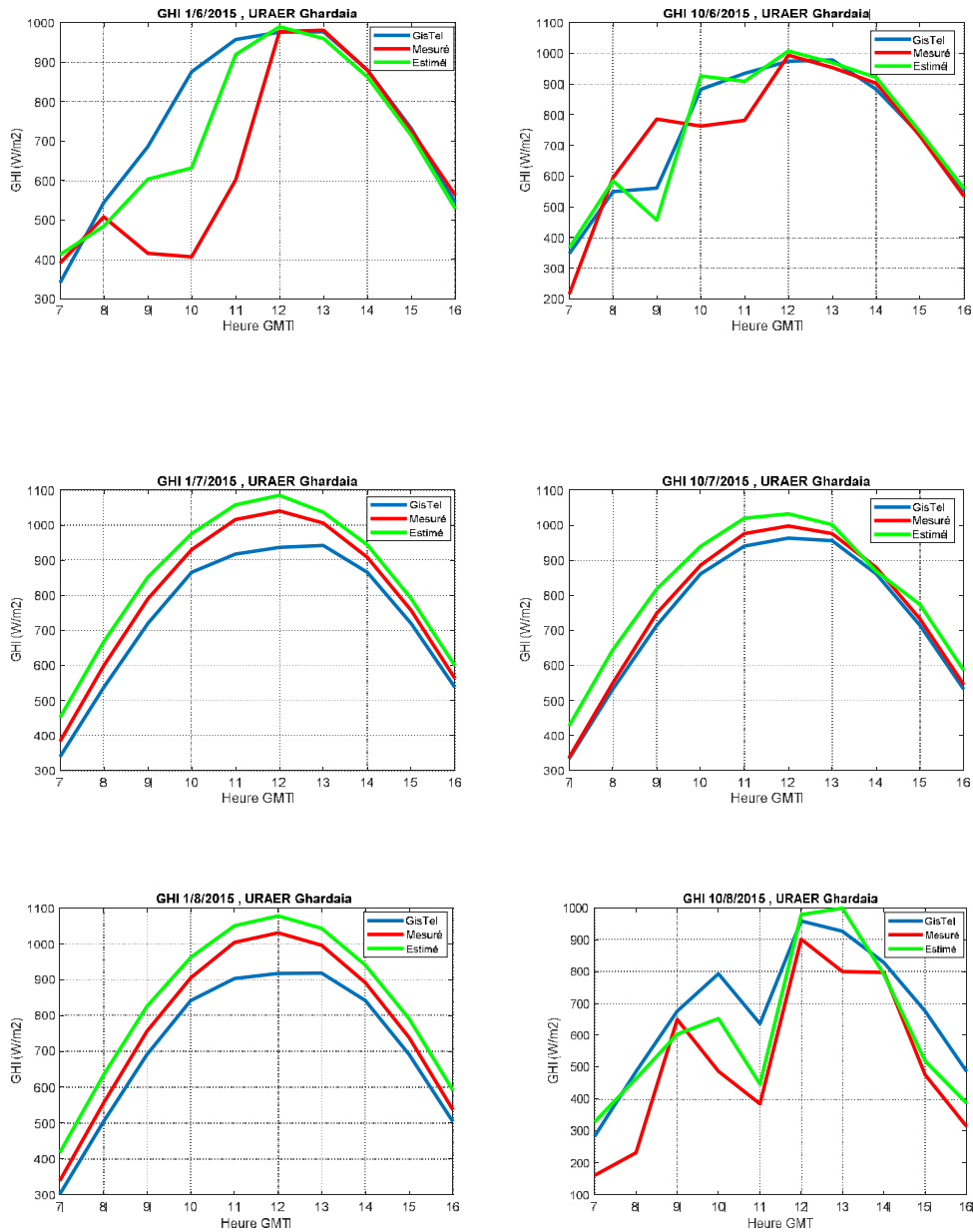


Figure III.7 : Rayonnement solaire horizontal global horaire mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour différents jours du l'année 2015 pour le site de Ghardaïa

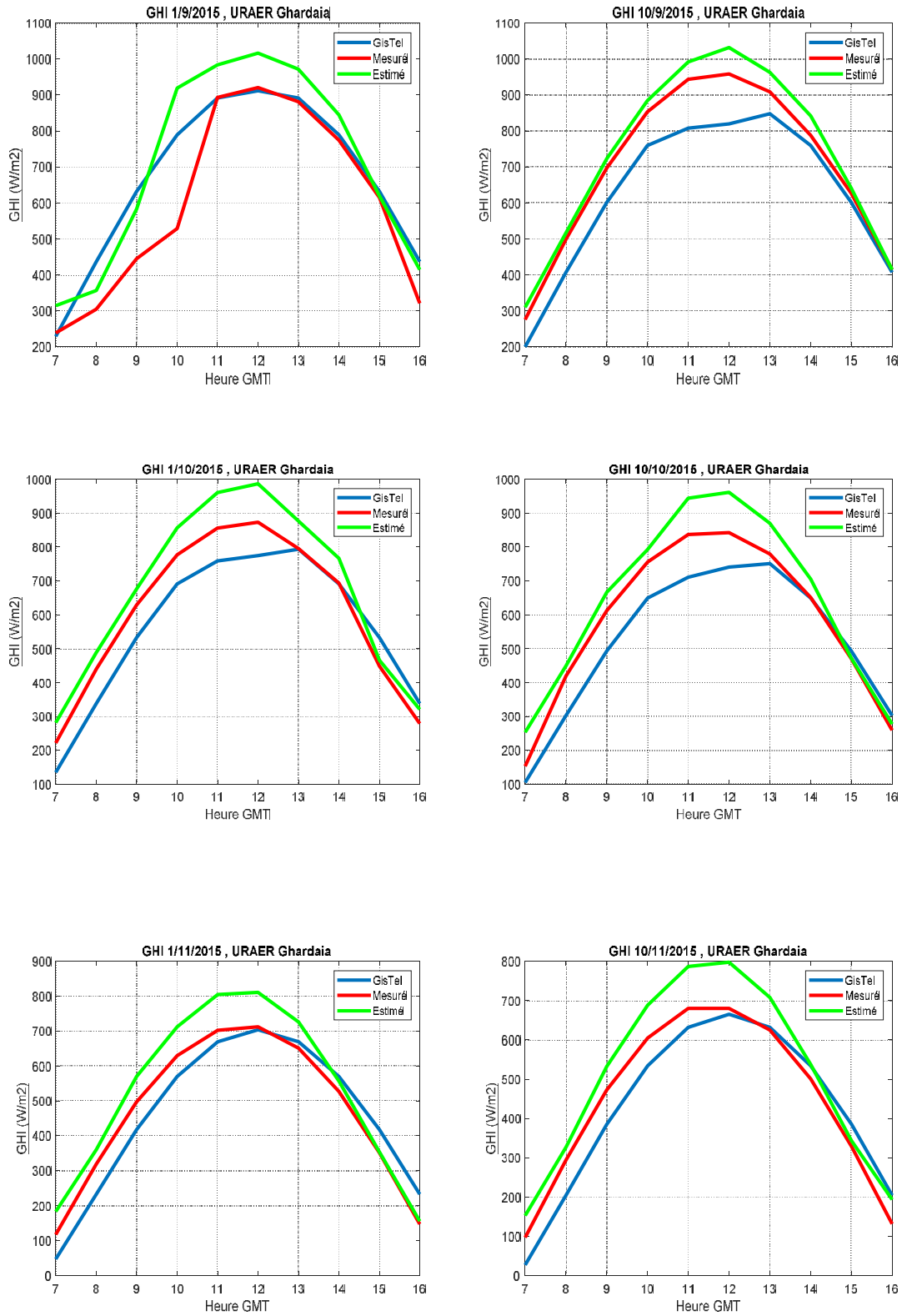


Figure III.8 : GHI pour les jours 01 et 10 de mois (09,10,11) 2015, de même site

D’après les figures ci-dessus, nous remarquons que la radiance 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.

Les Figures montrent les résultats de simulation du rayonnement solaire horizontal global de site de Ghardaïa (UREAR).

Dans toutes les figures obtenues dans la validation des résultats des modèles utilisés ; le GisTel est représenté par la courbe bleue. La courbe rouge représente les données mesurées, la courbe verte représente les données simulées par l’algorithme de la régression linéaire par apprentissage approfondi.

Pour tester l’efficacité des modèles, on a choisi deuze jours pour le site, les deux courbes sont similaires par rapport aux données mesurées. Mais, on constate que les résultats de simulation utilisant la régression linéaire par apprentissage approfondi sont plus proches à ceux mesurés.

III.3.2. Validation de la méthode

Pour valider nos résultats, nous avons effectué une comparaison entre les valeurs estimées et celles mesurées au sol. Les mesures effectuées au sol par un pyranomètre sont des irradiances (Wh/m²).

Pour comparer la simulation du rayonnement solaire global horizontal horaire par la méthode mentionnée, les deux termes RMSE (l’erreur quadratique moyenne) et MAE (l’erreur absolue moyenne) représentés dans l’équation. (3.1) et Equation. (3.2) ont été utilisés pour juger de la validité du modèle.

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (GHI_i \text{ prédictee} - GHI_i \text{ mesurée})^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

$$MAE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |GHI_i \text{ prédictee} - GHI_i \text{ mesurée}| \right] \quad (3.3)$$

La validation des résultats de la simulation de l’estimation de rayonnement solaire horizontal global horaire, représentées dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Le MAE et RMSE entre les données mesurées et les données simulées

Nombre jours	Jours	MAE		RMSE	
		Gistel	Régression	Gistel	Régression
01	01/06/2015	121.1095	87.2907	205.6736	137.9818
02	10/06/2015	75.9682	86.9718	104.8613	132.7348
03	01/07/2015	61.5771	46.9096	66.1427	48.8011
04	10/07/2015	21.7487	50.5725	23.8406	56.8023
05	01/08/2015	63.8756	58.0861	68.5758	59.3033
06	10/08/2015	154.4733	107.2117	180.6626	129.6460
07	01/09/2015	75.8427	110.1561	116.0139	147.9729
08	10/09/2015	75.4722	35.3367	86.6601	41.2503
09	01/10/2015	71.2828	66.6910	80.0666	72.3537
10	10/10/2015	71.4482	61.2323	84.2618	72.3522
11	01/11/2015	55.1266	57.9442	61.2490	67.0079
12	10/11/2015	54.9483	65.2528	61.4212	72.3635
	Moyenne	75.2394	69.4713	94.9524	86.5475

Les figures ci-dessous montrent l'évolution des erreurs MAE et RMSE en fonctions des nombres des jours pour les méthodes utilisées :

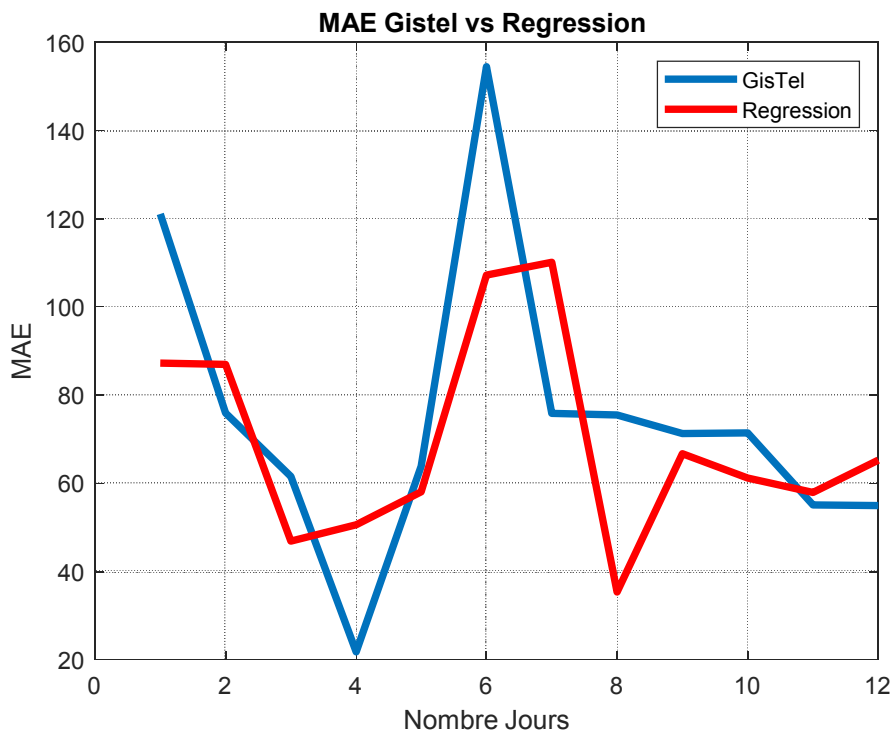


Figure III. 9 : Evolution de l'erreur MAE pour le rayonnement solaire horizontal global

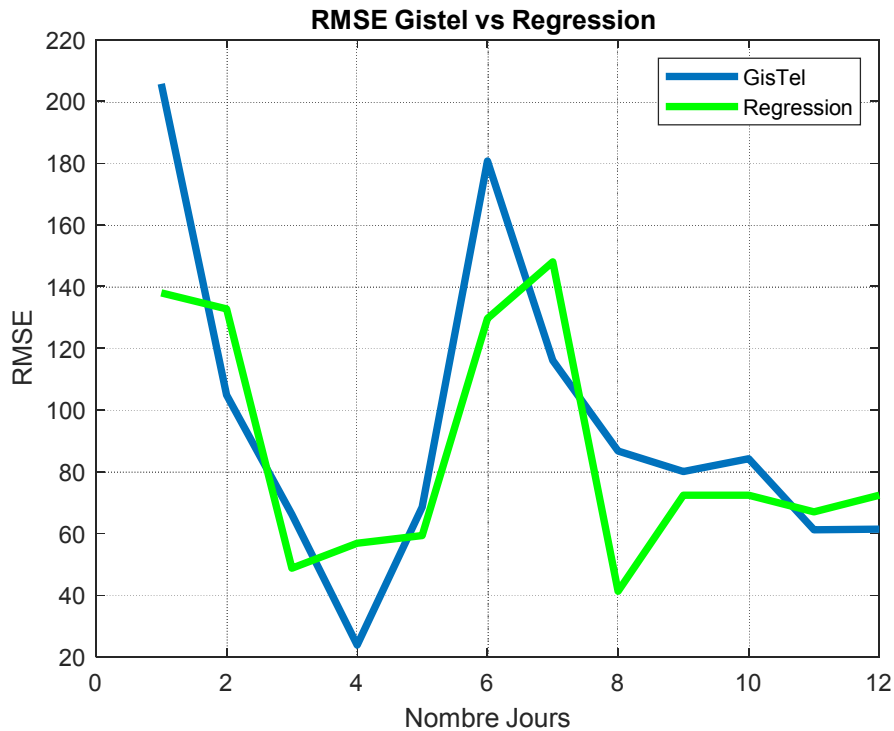


Figure III.10 : Evolution de l’erreur RMSE pour le rayonnement solaire horizontal global

En voit clairement d’après les figures ci-dessus, qui représentent les erreurs MAE et RMSE pour le rayonnement solaire horizontal global ; que la méthode par régression linéaire en apprentissage profondi est plus efficace que celle de Gistel.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes à suivre pour mettre en œuvre notre méthodologie du travail pour estimer l’éclairement solaire globale à l’échelle horaire à partir de cent vingt images, après on a validé les valeurs estimées à partir de notre méthode et celle du modèle Gistel par rapport aux mesures au sol pour le site URAER de Ghardaïa.

L’apport de la méthode de régression linéaire en apprentissage profondi permet d’améliorer la qualité des résultats obtenus. Des marges d’erreur intéressantes sont obtenues

L’exploitation des images MSG pour l’estimation du gisement solaire a l’avantage de pouvoir évaluer l’irradiation solaire en tout point et de mieux suivre l’évolution du rayonnement solaire grâce à la résolution spatiale et temporelle de ces images.

Conclusion Générale

Tout au long de ce mémoire nous avons développé une méthode d'estimation du gisement solaire atteignant le sol sur plan horizontal à l'échelle de l'heure, en utilisant les informations extraites des images MSG dans quatre canaux VIS008, VIS006, IR016 et IR039.

Premièrement, 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 avec leur application dans les différents domaines, notamment le satellite de météorologique Météosat deuxième génération MSG, d'où proviennent les images sur lesquelles nous avons réalisé notre traitement.

Puis, nous avons proposé deux approches pour déterminer l'irradiation solaire basée sur l'imagerie satellitaire pour couvrir le manque des données solaires mesurées. La méthodologie utilisée dans ce travail consiste, à estimer des données horaires globales horizontales de rayonnement solaire en utilisant le modèle Gistel, ce modèle appliqué sur des images haute résolution est validé dans plusieurs stations en France, en Tunisie et même en Algérie. La deuxième méthode proposée est basée sur l'utilisation de la régression linéaire par apprentissage approfondi (Deep learning) afin d'estimer le rayonnement solaire horizontal global.

Enfin, les résultats obtenus sont des radiances exprimées en W/m^2 . Nous avons validé les résultats obtenus pour le site URAER de Ghardaïa utilisant les mesures données par un pyranomètre pour cette même station. Des marges d'erreurs intéressantes ont été obtenues dans le présent travail ; nous avons pu améliorer les résultats obtenus par le modèle de Gistel par une moyenne d'erreur MAE de $5.76 W/m^2$, et on RMSE par $8.48 W/m^2$.

Dans un futur travail nous estimons à utiliser différents algorithmes d'apprentissage approfondi afin d'estimer le rayonnement solaire horizontal global, et aussi d'augmenter la base de données d'entraînement pour au moins une année complète ; 10 images par jours pendant 365 jours ; en total 3650 images pour un seul canal.

Références bibliographiques

- [1] Ziani, F. *Détermination du gisement solaire par traitement d'images, MSG*, Thèse de doctorat , Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [2] Rayane, M.,. *Comparaison entre les modèles d'estimation de l'irradiation solaire*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf-M'sila Faculté de technologie, 2016.
- [3] Boughaba, M., Boukhris, B. and Meflah, M., L'apprentissage profond (Deep Learning) pour la classification et la recherche d'images par le contenu, Mémoire de master, UKM Ouargla, 2017.
- [4] Bouchouicha, K. *Modelisation multispectrale des images satellitaire– Application: Quantification du bilan d'énergie Sol- Atmosphère* , Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf d'Oran, 2017.
- [5] Géométrie solaire sur site Internet.<http://www.outilssolaires.com/Glossaire/spin-geometrie.htm> (consulté le 22/05/2020).
- [6] https://www.memoireonline.com/05/12/5865/m_Etude-et-dimensionnement-dun-systeme-photovoltaque-autonome-pour-une-alimentation-permanente2.html
- [7] Yacine, F. *Etude des nouvelles generations de cellules photovoltaïques*, Mémoire de magister, USTO, 2011.
- [8] Nia, M.,. *Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire* , Thèse de doctorat, 2018.
- [9] <http://tpeeampanneauxsolaire.e-monsite.com/pages/iv-annexes/b-repartition-du-rayonnement.html> (consulté le 29/05/2020).
- [10] Blanc, P., & Wald, L. *L'estimation du rayonnement solaire au sol par la nouvelle méthode Heliosat-4*, 2015.
- [11] Zine. N, Hafsi. *A Hybridation des approches par télédétection et logique floue dans l'estimation de l'irradiation solaire* , Mémoire de master, Univesité UATL, 2018.
- [12] Masse, A. *Développement et automatisation de méthodes de classification à partir de séries temporelles d'images de télédétection: application aux changements d'occupation des sols et à l'estimation du bilan carbone* , Thèse de doctora, Université Toulouse III- Paul Sabatier, 2013.
- [13] Kergomard C. *La télédétection aérospatiale: une introduction*, Cours de télédétection, Ecole Normale Supérieure Paris, 1990.
- [14] TIR, E. *Analyse spatiale et cartographie de la régénération forestière post-incendie dans la Wilaya de Tissemsilt* , Thèse de doctora, 2016.

Références bibliographiques

- [15] Attaf. Y., *Estimation de rayonnement solaire à base d'images satellite Meteosat*, Thèse de doctorat ,Université de M.Maamri, 1995.
- [16] Kinane AA. *Optimisation de la mise à poste d'une constellation de satellites*, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2005.
- [17] Malika O., *Modélisation des vibrations au niveau des satellites lasers*, Mémoire de magister, Université de Batna, 2009.
- [18] Ammadi A, Baslam M. *Détection automatique de phénomènes présents dans une image satellitaire en composition colorée*. Mémoire de master, Université mohammed 5, 2008.
- [19] <https://www.eumetsat.int/website/home/index.html> (consulté le 01/02/2020).
- [20] Wahiba, Tekfi. *Analyse des images du satellite météoat de seconde génération (MSG)*. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2010
- [21] Tourta S, Mokhnache A, Seghiri S. *Etude de l'effet des aérosols sur l'estimation du coefficient de réflectance bidirectionnelle à l'aide de mesures satellitaires*. *Revue des Energies Renouvelables*, 2012;15(4):571-9.
- [22] Mohamed Laid BE. *Estimation de la réflectance spectrale et NDVI par le satellite MSG (Météosat Seconde Génération)*, Thèse de doctorat, UKM Ouargla, 2017.
- [23] Diop, O. *Détection de nuages de poussière dans les images Météosat à l'aide des attributs de textures et de la fusion de segmentations: application à la zone sahéenne du continent africain*, Thèse de doctorat, 2007.
- [24] Alouache, D. *Segmentation multi-résolution d'images texturés basées sur la transformation en ondelettes: Application aux images météoat* , Thèse de doctorat, Université de Tizi Ouzou-Mouloud Mammeri, 2010.
- [25] https://www.eumetsat.int/cs/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=pdf_br_prgfs01_fr&allowInterrupt=1&noSaveAs=1&RevisionSelectionMethod=LatestReleased
- [26] <http://www.meteo.fr> (consulté le 01/05/2020).
- [27] Louiza, H., & Mohamed, H. *Estimation des précipitations stratiformes et convectives en utilisant les relations CWP/taux de pluie et CTT/taux de pluie*, Thèse de doctora, Université Mouloud Mammeri, 2014.
- [28] <https://www.esa.int/> (consulté le 01/05/2020).

