



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE 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

**Estimation d'irradiations solaire globales horaires à partir des  
images MSG par ANN**

Présenté par :

**Bouallag Amira Aicha**

**Choul Souad**

**Jury de soutenance :**

<b>SONNE Abdlkader</b>	<b>MCA (UAT Laghouat)</b>	<b>Président</b>
<b>BIRANE Mouhoub</b>	<b>MCA (UAT Laghouat)</b>	<b>Examineur</b>
<b>REGUIEGUE Mourad</b>	<b>MCB (UAT Laghouat)</b>	<b>Rapporteur</b>

**Promo juin 2022**



## *Dédicaces*

*J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail réalisé grâce à l'aide De Dieu*

*Tout puissant*

*A mes chers **parents**, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

*A mes chères sœurs **Khadidja Safia Imane** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*A mes chères amies **Samed & Hadil & Fati & Fulla & Daduaa & Sarah***

*Sans oublié mon camarade **Ahmed Chaib silàa Allah yarhmo***



*Bouallag Amira*



## *Dédicaces*

*J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail réalisé grâce à l'aide De Dieu*

*Tout puissant*

*A mes chers **parents**, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

*A mes chères sœurs **Afaf sirine Dallal & Ikhelasse** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral*

*A mes chères frères **Adel Ali Khaled & Salem***

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*Sans oublié mon camarade **Ahmed Chaib silàa Allah yarhmo***



*Choul Souad*

## *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 REGUIEGUE** 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.*

## 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 المقدرّة للإشعاع الشمسي الكلي بالقيم المقاسة، وكمثال أخذنا محطة الأرصاد الجوية URAER لغرداية .

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

**الكلمات المفتاحية:** معالجة الصورة - الاستشعار عن بعد - تعلم عميق- Python - Gistel - Keras

## Abstract

Images from the Meteosat MSG satellite are a rich source of data for scientific research. The daily availability of these data sources makes them an indispensable tool for monitoring, analyzing and understanding all types of weather phenomena. It is the observation of the Earth and the collection of data and knowledge about it

The objective of our research is to determine the amount of solar radiation in Algeria. To achieve this goal, we used the GisTeL model, which uses satellite imagery in the visible channel. This model is based on determining the sky index in three different situations: clear, partially overcast, and completely overcast. We also used Keras's detailed learning method and chose linear regression as the method for estimating global horizontal solar radiation. This choice was justified by the simplicity and efficiency of the method for determining the images, which allowed us to calculate the global solar radiation on the surface of the Earth

We proposed to use the linear regression method to improve the quality of the results obtained. Estimated values of global solar radiation are compared to measured values to validate our results. We used the UREAR weather station in Ghardaia as an example.

The results obtained demonstrate the validity of the model used, with good margins of error.

**Keywords:** Image processing - Remote sensing – Deep learning – Python – Gistel – Keras

## ***Resumé***

La télédétection est l'une des applications les plus essentielles dans le domaine des télécommunications. Les images du satellite Météosat MSG constituent une riche source de données pour la recherche scientifique. La disponibilité quotidienne de ces sources de données en a fait un outil indispensable pour suivre, analyser et comprendre tous les types de phénomènes météorologiques. C'est l'observation de la Terre et la collecte de données et de connaissances à son sujet. L'objectif de notre recherche est de déterminer la quantité de rayonnement solaire en Algérie. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé le modèle GisTeL, qui utilise l'imagerie satellitaire dans le canal visible. Ce modèle est basé sur la détermination de l'indice du ciel dans trois situations différentes : clair, partiellement couvert, et complètement couvert. Nous avons également utilisé la méthode d'apprentissage détaillé de Keras et choisi la régression linéaire comme méthode d'estimation du rayonnement solaire horizontal global. Ce choix a été justifié par la simplicité et l'efficacité de la méthode pour déterminer les images, ce qui nous a permis de calculer le rayonnement solaire global à la surface de la Terre.

Nous avons proposé d'utiliser la méthode de régression linéaire pour améliorer la qualité des résultats obtenus. Les valeurs estimées du rayonnement solaire global sont comparées aux valeurs mesurées pour valider nos résultats. Nous avons utilisé la station météorologique UREAR de Ghardaïa comme exemple.

Les résultats obtenus démontrent la validité du modèle utilisé, avec de bonnes marges d'erreur.

**Mot clé :** Traitement d'images- Télédétection - apprentissage approfondi - Python - Gistel - Keras

# Table des Matières

Remerciement .....	I
Résumé .....	II
Liste des Abréviations .....	IV
Liste des Symboles .....	V
Liste des Tableaux .....	VI
Liste des Figures.....	VII

<b><i>Introduction Générale</i></b> .....	1
---	---

## ***Chapitre I Généralité sur le gisement solaire***

I.1. Introduction général .....	4
I.2.Source du rayonnement solaire .....	4
I.3. Rayonnement solaire hors atmosphère .....	5
I.3.1. Eclairage et constante solaire .....	5
I.3.2. Variation de l'éclairage.....	6
I.4.Rayonnement solaire à travers l'atmosphère.....	9
I.4.1. Atmosphère terrestre composition et structure.....	9
a. Structure de l'atmosphère .....	9
b. Composition de l'atmosphère .....	10
I.4.2. Atténuation du rayonnement solaire .....	11
I.4.3. Bilan énergétique du système Terre / Atmosphère.....	12
I.5. Rayonnement au sol .....	13
I.5.1. Les composant de l'irradiation solaire .....	13
I.5.2. Coordonnées géographique .....	14
I.6.Présentation du modèle GISTEL .....	15
I.6.1.Historique du modèle.....	15

# Table des Matières

I.6.2.Hypothèses du modèle GISTEL.....	15
I.6.3.Principe de base du modèle GISTEL.....	16
I.6.4 .Formulation du modèle GISTEL.....	17
I.7. Conclusion .....	20

## *Chapitre II La Télédétection et Les Images satellitaires MSG*

II.1.1. Introduction.....	22
II.1.2.Historique de la Télédétection .....	23
II.1.3. Processus de télédétection .....	23
II.1.4. Image numérique en Télédétection et ses Caractéristiques .....	25
II.1.5. Traitement numérique des images .....	25
II.2.1. Les satellites .....	26
II.2.2. Différents types de satellites .....	27
II.2.3 Satellites METEOSAT .....	28
II.2.3.1. Historique.....	28
II.2.4 Les satellites METEOSAT (Satellites 1ère Génération).....	28
II.2.4.1. Bandes spectrales de Météosat.....	29
II.2.4.2. Le système METEOSAT .....	30
II.2.4.3 Format des images METEOSAT .....	30
II.2.5. Satellites METEOSAT 2ème génération MSG .....	31
II.2.5.1 Position orbitale de MSG.....	32
II.2.5.2. Les canaux de MSG.....	34
II.2.5.3. Les services MSG.....	34
II.2.6. Système MSG .....	35
II.2.6.1. Segment spatial.....	35
II.2.6.2. Segment sol.....	36

# Table des Matières

II.2.7. Comparaison entre METEOSAT/MSG.....	38
II.2.8. Caractéristiques des images MSG.....	39
II.2.8.1. Résolution spatiale.....	40
II.2.8.2. Résolution spectrale.....	40
II.2.8.3. Résolution radiométrique .....	41
II.2.8.4. Résolution temporelle .....	42
II.9.Eumetsat .....	43
II.10. Conclusion .....	43

## *Chapitre III Résultats et interprétations*

III.1. Introduction .....	45
III.2. Réseaux de neurones convolutifs .....	45
III.2.1. Architecture de système .....	45
III.2.2. Différentes couches de CNN .....	46
a. Étape de convolution.....	46
b. Étape de pooling.....	47
c. Couche totalement connectée.....	47
III.3.Python .....	48
III.3.1. Keras.....	48
III.3.2.Tensorflow .....	50
III.4. Extraction de zone d'étude.....	50
III.5. Méthode Gistel .....	51
III.5.1. Trouble de Linke .....	51
III.5.2. Conversion des comptes numériques en radiance.....	51
III.5.3. Détermination des deux images de référence .....	52
III.6. Méthode de régression linéaire.....	52

## Table des Matières

III.7. Présentation des Résultats .....	53
III.8. Validation de la méthode .....	64
III.9. Conclusion.....	66
<b><i>Conclusion Générale</i></b> .....	68
Référence et bibliographique .....	69

## Liste des Abréviations

<b>API</b>	<b>A</b> pplication <b>P</b> rogramming <b>I</b> nterface
<b>CEPMMT</b>	<b>C</b> entre <b>E</b> uropéen pour les <b>P</b> révisions <b>M</b> étéorologiques à <b>M</b> oyen <b>T</b> erme
<b>ESA</b>	<b>A</b> gence <b>S</b> patiale <b>E</b> uropéenne
<b>GEO</b>	<b>G</b> eostionnary <b>E</b> arth <b>O</b> rbit
<b>GMS</b>	<b>G</b> eostionnary <b>M</b> eteorological <b>S</b> atellite
<b>GOES</b>	<b>G</b> eostionnary <b>O</b> perational <b>E</b> nvironmental <b>S</b> atellite
<b>GOMS</b>	<b>G</b> eostionnary <b>M</b> eteorological <b>S</b> atellite
<b>GPS</b>	<b>G</b> lobal <b>P</b> ositioning <b>S</b> ystem
<b>HRIT</b>	<b>H</b> igh <b>R</b> ate <b>I</b> nformation <b>T</b> ransmission
<b>URAER</b>	<b>U</b> nité de <b>R</b> echerche <b>A</b> ppiquée en <b>E</b> nergies <b>R</b> enouvelables
<b>HRV</b>	<b>H</b> igh- <b>R</b> esolution <b>V</b> isible
<b>INSAT</b>	<b>I</b> ndian <b>N</b> ational <b>S</b> atellite <b>S</b> ystem
<b>IR</b>	<b>I</b> nfra- <b>R</b> ed
<b>LEO</b>	<b>L</b> ow <b>E</b> arth <b>O</b> rbit
<b>MAE</b>	<b>E</b> rreur <b>M</b> oyenne <b>A</b> bsolue.
<b>MEO</b>	<b>M</b> edium <b>E</b> arth <b>O</b> rbit
<b>MPG</b>	<b>M</b> étéosat <b>P</b> remière <b>G</b> énération
<b>RMSE</b>	<b>E</b> rreur <b>M</b> oyenne <b>Q</b> uadratique,
<b>MSG</b>	<b>M</b> eteorosat <b>S</b> econd <b>G</b> eneration

## Liste des Abréviation

<b>MTG</b>	<b>M</b> étéosat <b>T</b> roisième <b>G</b> énération
<b>NOAA</b>	Administration <b>N</b> ationale <b>O</b> céanique et <b>A</b> tmosphérique
<b>OMM</b>	<b>O</b> rganisation <b>M</b> étéorologique <b>M</b> ondiale
<b>RELU</b>	<b>U</b> nité <b>L</b> inéaire <b>R</b> ectifiée
<b>rmsprop</b>	propagation quadratique moyenne,
<b>SMN</b>	<b>S</b> ervices <b>M</b> étéorologiques <b>N</b> ationaux
<b>SEVIRI</b>	<b>S</b> pinning <b>E</b> nhanced <b>V</b> isible and <b>I</b> nfread <b>I</b> mager
<b>val_mae</b>	<b>v</b> aleur d'erreur moyenne absolue pour l'étape d'évaluation.
<b>VIS</b>	<b>V</b> isible,

## Liste des Symboles

**h** : constante de Planck.

**c** : vitesse de la lumière.  $3 \times 10^8$

**$\lambda$** : La longueur d'onde.

**$I_b$** : rayonnement direct

**$I_d$** : rayonnement diffus

**$I_G$** : rayonnement global reçu au sol

**Z** : l'angle zénithal

**$\gamma$**  : 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

**$\alpha_b$**  : coefficient de réflexion dû au rayonnement direct.

**$\alpha_d$**  : 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  **$u_2$** .

**$\rho_s$**  : albédo de la surface terrestre

**B** : brillance de chaque pixel.

**Z** : angle zénithal

## Liste des Symboles

$\Psi$  : angle d'azimuth

$a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  : coefficients de régression

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

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

$R$  : radiance (W/m<sup>2</sup>/sr)

CN : compte numérique

CAL\_slope et CAL\_offset : coefficients de calibration

## Liste des Tableaux

Tableau I.1 Liste des jours types par mois.....	7
Tableau II.1 Date de lanc�e des satellites METEOSAT.....	28
Tableau II.2 Caractéristique spectrales et temporelles des images METEOSAT .....	29
Tableau II.3 Les caractéristique des satellites METEOSAT .....	38
Tableau III.1 Le MAE et RMSE entre les données mesurées et les données simulées .....	65

## Liste des Figures

<b>Figure I.1.</b> Spectre du rayonnement solaire reçu hors atmosphère [5].....	5
<b>Figure I.2.</b> Moyennes mensuelles des sommes quotidiennes de [9] .....	8
<b>Figure I. 3.</b> en fonction des mois de l'année pour chaque latitude [9].....	8
<b>Figure I.4.</b> Structure de l'atmosphère terrestre .La ligne forte représente la variation de température moyenne dans chaque couche atmosphérique [10].....	10
<b>Figure I.5.</b> Spectre du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère (couche rouge) et à la surface de la terre (jaune) .....	12
<b>Figure I.6.</b> Bilan énergétique annuelle du système "Terre -Atmosphère" [14] .....	13
<b>Figure I.7.</b> Coordonnées terrestres [16].....	14
<b>Figure I.8.</b> Différentes étape du modèle de GISTEL [18] .....	17
<b>Figure II. 1.</b> Schéma général de fonctionnement de la télédétection le rayonnement solaire [19] .....	22
<b>Figure II. 2.</b> Résumé du processus de télédétection [21].....	24
<b>Figure I.3.</b> Image numérique.....	25
<b>Figure II.4.</b> Carte satellite METEOSAT .....	26
<b>Figure II 5.</b> Satellite METEOSAT et balayage [25] .....	29
<b>Figure II.6.</b> Un schéma du système complet METEOSAT d'EUMESTAT [24].....	30
<b>Figure II.7.</b> Images WEFAX du satellite METEOSAT d'EUMETSAT [24].....	31
<b>Figure II.8.</b> Le satellite MSG [26].....	32
<b>Figure II. 9.</b> Image (canal visible) du MSG d'EUMESTAT [26] .....	32
<b>Figure II.10.</b> (a) Le balayage du satellite MSG .....	33
<b>Figure II. 10.</b> (b) Le concept de balayage du satellite MSG [EUMETSAT].....	33
<b>Figure II.11.</b> Le réseau MSG .....	38
<b>Figure II. 12.</b> Caractéristique des images MSG [27] .....	39
<b>Figure II.13.</b> La résolution spatiale [28].....	40
<b>Figure II.14.</b> La résolution spectrale [29].....	41
<b>Figure II.15.</b> La résolution radiométrique [30] .....	41
<b>Figure II.16.</b> Les mesures radiométrique en fonction de l'objet ciblé dans une image visible [31] .....	42
<b>Figure II.17.</b> Les mesures radiométriques en fonction de l'objet ciblé dans une image infrarouge.....	42
<b>Figure III.1.</b> Architecture générale d'une CNN .....	46
<b>Figure III.2.</b> Différents types de convolutions.....	46
<b>Figure III.3.</b> Exemple de description de la couche pooling .....	47
<b>Figure III.4.</b> Définition du modèle utilisé de keras.....	48
<b>Figure III.5.</b> Entraînement du modèle utilisé de Keras .....	49
<b>Figure III.6.</b> Programme pour la prédiction .....	49
<b>Figure III.7.</b> Zone d'étude extraite d'une image plein disque prise le 01 juin 2015 à 1200 UTC .....	51
<b>Figure III.8.</b> Les deux images de référence à droite : l'image de ciel nuageux , à gauche : l'image de ciel clair.....	52
<b>Figure III.9.</b> Rayonnement solaire global horaire GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée 1/1/2015.....	53

## Liste des Figures

<b>Figure III.10.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 22/1/2015 .....	54
<b>Figure III.11.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/1/2015 .....	54
<b>Figure III.12.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/2/2015 .....	55
<b>Figure III.13.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 15/2/2015 .....	55
<b>Figure III.14.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 28/2/2015 .....	56
<b>Figure III.15.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/4/2015 .....	56
<b>Figure III.16.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 15/4/2015 .....	57
<b>Figure III.17.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/4/2015 .....	57
<b>Figure III.18.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/6/2015 .....	58
<b>Figure III.19.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 15/6/2015 .....	58
<b>Figure III.20.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/6/2015 .....	59
<b>Figure III.21.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/8/2015 .....	59
<b>Figure III.22.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 15/8/2015 .....	60
<b>Figure III.23.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/8/2015 .....	60
<b>Figure III.24.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/10/2015 .....	61
<b>Figure III.25.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 15/10/2015 .....	61
<b>Figure III.26.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/10/2015 .....	62
<b>Figure III.27.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/11/2015 .....	62
<b>Figure III.28.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 14/11/2015 .....	63
<b>Figure III.29.</b> GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/11/2015 .....	63

# *Introduction Générale*

## Introduction Générale

Le soleil, source massive et inépuisable d'énergie renouvelable, brille sur la Terre avec une puissance de  $16 \times 10^{15}$  kW / m<sup>2</sup> par an, dans tout le spectre visible. Il existe trois sources d'information pour déterminer les sédiments : les mesures de rayonnement effectuées par les actinomètres, les notes des stations météorologiques et les images satellites. [1].

Pour le développement de dispositifs d'énergie solaire et l'évaluation de leur efficacité, une compréhension précise de la distribution du rayonnement solaire à un endroit géographique donné est essentielle. Malheureusement, les mesures de l'irradiation solaire ne sont pas facilement disponibles dans de nombreux pays en développement. Par conséquent, il est essentiel de développer des modèles d'estimation de l'irradiation solaire basés sur des données astronomiques et météorologiques.

L'Algérie est le pays le plus ensoleillé de la planète. Le nombre d'heures d'insolation s'élève à plus de 3300 heures chaque année. Le climat est idéal pour l'utilisation de l'énergie solaire dans une variété d'applications, cependant la distribution de l'irradiation solaire est inconnue. [2].

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

Par conséquent, ces satellites sont extrêmement utiles non seulement pour les prévisions météorologiques, mais aussi pour l'estimation des dépôts solaires, qui permet de reconstituer les cycles quotidiens et cycliques du rayonnement solaire.

L'imagerie satellitaire couvre en permanence une vaste zone. Cependant, il n'est possible de fournir une évaluation qualitative des états d'ensablement qu'à l'aide de calculs numériques qui caractérisent le rayonnement réfléchi par le système atmosphérique terrestre. Par conséquent, il est nécessaire de comparer ces photos à des mesures effectuées 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 à partir de photos satellites une fois que les satellites Météosat seront en orbite. Parmi celles-ci, des méthodes physiques ont été développées principalement pour tenir compte de l'absorption, de la diffusion et de la réflexion du rayonnement solaire par les nuages, les aérosols et la surface de la Terre. [1].

## Introduction Générale

La contribution à cette étude est l'estimation des sédiments solaires qui affectent la Terre sur un plan horizontal à l'aide d'images MSG. Nous avons utilisé le modèle GisTel (Gisement Solaire par Télédétection), qui est un modèle physique basé sur la relation entre l'indice de clarté déterminé à partir des images et le rayonnement global qui atteint le sol dans un ciel clair. Une deuxième méthode est proposée qui utilise un principe d'apprentissage basé sur la régression linéaire avec apprentissage profond (Deep learning), qui est une technologie largement utilisée ; elle permet d'approfondir la compréhension d'une image en employant des idées plus précises pour déterminer le rayonnement global à partir de photos de MSG. [3].

Pour ce faire, on se propose de donner la généralité sur le gisement 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 images satellitaires MSG.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons et commenterons les résultats obtenus pour le modèle choisi. Nous verrons l'apport de l'utilisation de la régression linéaire par apprentissage approfondi. Nous terminons le présent travail par une conclusion générale.

# Chapitre I

## Généralité sur le gisement solaire

## I.1. Introduction général

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus abondante de la planète. La plupart des autres sources d'énergie renouvelables en sont dérivées. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire de l'électricité ou de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production d'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïques. Cependant, ce rayonnement est perturbé par un certain nombre de facteurs qui varient en fonction de la composition verticale de l'atmosphère terrestre (nuages, aérosols, etc.), formant une barrière qui empêche toute l'énergie solaire de passer.

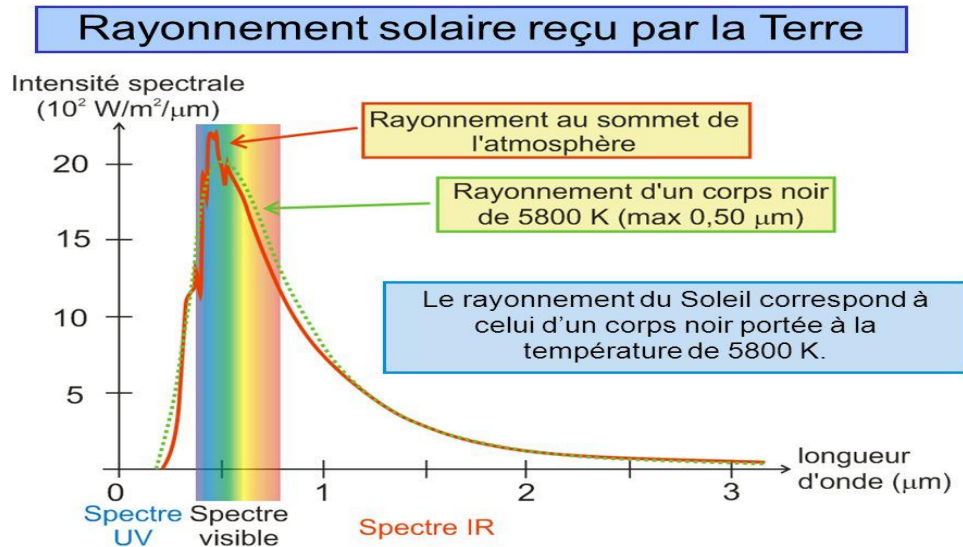
Il serait tout d'abord intéressant de connaître quelques notions sur le rayonnement solaire (caractéristique, nature, intensité...), les différents phénomènes physiques qui seront sujettes à ce rayonnement, la structure de l'atmosphère et ces effets sur le rayonnement solaire. Ainsi, la connaissance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

## I.2. Source du rayonnement solaire

Le soleil, qui se trouve à environ 150 millions de kilomètres de notre planète, est notre principale source d'énergie. Il émet un rayonnement isotrope qui, en première approximation, peut être assimilé à celui d'une substance noire (totalement émissive et parfaitement absorbante) à 5800°k. Ce rayonnement voyage dans l'espace sous forme d'onde électromagnétique et arrive sur Terre environ huit minutes après sa première émission. La gamme de longueurs d'onde comprise entre 0,25 et 3 m représente 98 % de l'énergie libérée.

Une partie de ce rayonnement atteint la Terre. L'irradiance, abrégée en éclairement, est le flux d'énergie reçu par la Terre. La constante solaire est la moyenne annuelle de cette irradiance reçue sur un plan normal au soleil au sommet de l'atmosphère [4].

**La figure I.1** illustre la distribution spectrale du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère [5]



**Figure I.1.** Spectre du rayonnement solaire reçu hors atmosphère [5]

## I.3. Rayonnement solaire hors atmosphère

### I.3.1. Eclairage et constante solaire

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

La constante solaire  $I_{sc}$  représente la moyenne annuelle de cet éclairage [6]. La valeur de  $I_{sc}$  la plus utilisée est celle adoptée par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) en octobre 1981 avec une incertitude de 1% ( $I_{sc}=1367 \text{ W/m}^2$ ).

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

$$I_0(j) = IZ \times \varepsilon(j) \quad (\text{I.1})$$

Le facteur  $\varepsilon$  représente le coefficient de correction dû à la variation de la distance terre-soleil, il varie en fonction du numéro du jour de l'année  $j$ , il est calculé par l'équation suivante [7]:

$$\varepsilon(j) = 10.0344 \times \cos\left(\frac{2\pi}{365.25} j\right) \quad (\text{I.2})$$

Si une grande précision est requise, il est possible d'envisager l'utilisation de celle issue d'un développement en série de Fourier [8]:

$$\varepsilon(j) = 1.0001 + 0.0342 \cos(d) + 0.00128 \sin(2d) + 0.000791 \cos(2d) + 0.000077 \sin(2d)$$

Avec

$$d = \frac{2\pi}{365} (j - 1) \quad (\text{I.3})$$

### I.3.2. Variation de l'éclairement

L'éclairement énergétique incident à un instant en un endroit donné au sommet de l'atmosphère sur un plan horizontal dépend de la valeur de la distance terre-soleil à ce moment, de l'inclinaison de l'axe de la terre sur l'elliptique et de la latitude du lieu considéré. L'éclairement instantané  $H_0^t$  peut être exprimé en fonction de l'angle solaire zénithal  $\theta_s^t$ , il est égal au produit de l'éclairement sur plan normal  $I_0$  par le cosinus de cette angle [9].

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

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

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

Avec :

$\omega_s$  : l'angle horaire du lever ou du coucher du soleil (en degré).

$\delta$  : L'angle de déclinaison qui représente l'angle entre la direction terre soleil et le plan équatorial de la terre, et qui est exprimées par:

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284 + j}{365} \right) \quad (\text{I.6})$$

$\varphi$  : La latitude du lieu.

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

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_0 \left\{ \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega_s \right\} \quad (\text{I.7})$$

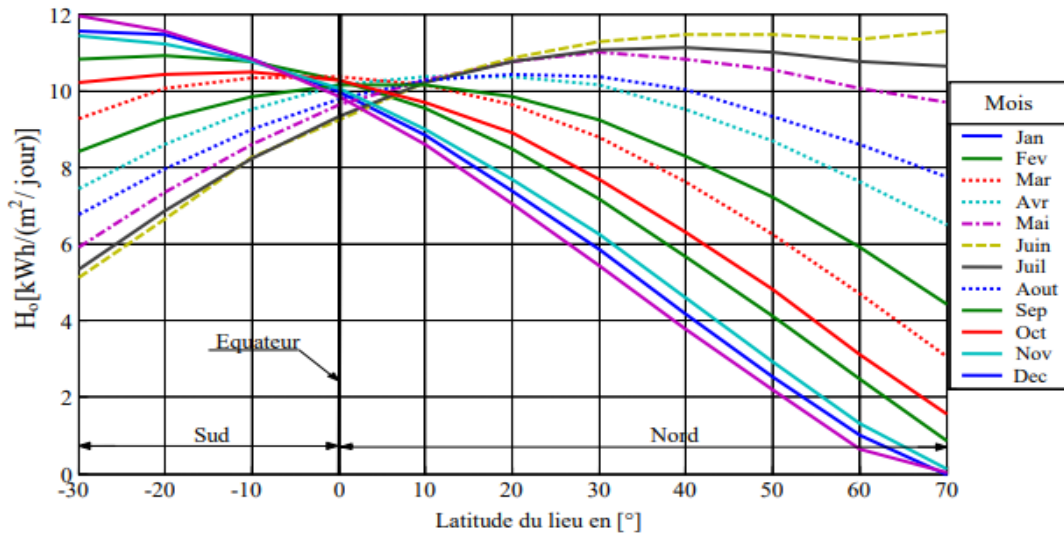
Il est possible de déterminer la journée type mensuelle (définie par une déclinaison caractéristique) et qui a une irradiation quotidienne égale à la moyenne mensuelle. Le jour recommandé pour chaque mois avec le numéro du jour correspondant de l'année sont données dans le tableau I.1. De ce fait on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

$$\overline{H_0} = H_0|_{\delta=\delta_c} \quad (\text{I.8})$$

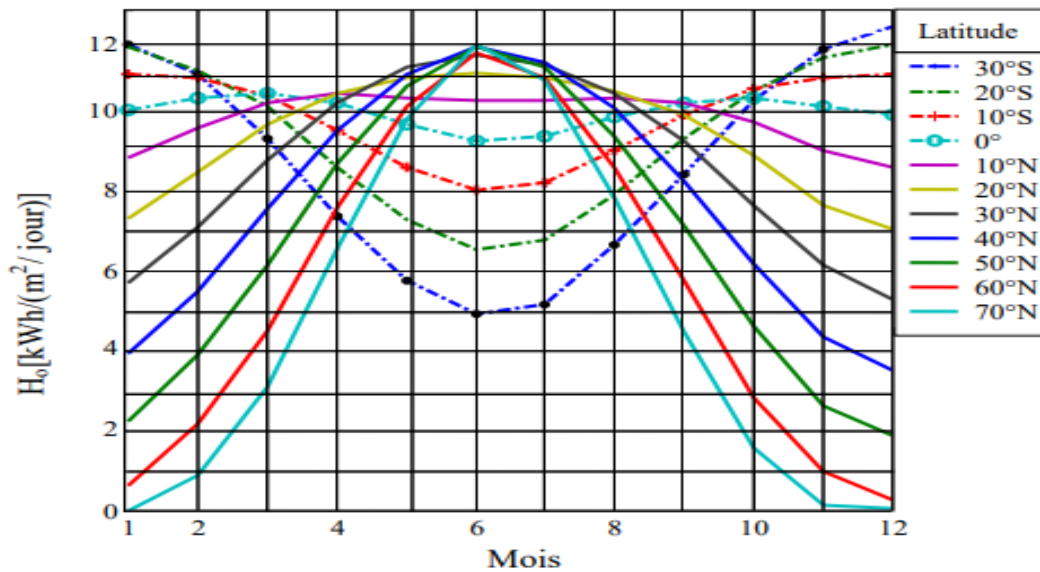
**Tableau I.1** liste des jours types par mois

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

Localement, l'éclairement varie suivant la latitude et la saison. En moyenne mensuelle, le maximum d'ensoleillement est donc atteint aux latitudes tropicales, mais il varie au cours de l'année (**Figure I.2**)



**Figure I.2.** Moyennes mensuelles des sommes quotidiennes de  $\overline{H_0}$  [9]



**Figure I.3.**  $\overline{H_0}$  en fonction des mois de l'année pour chaque latitude [9]

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

- La latitude du lieu
- La déclinaison solaire

- L'angle horaire du lever du soleil
- L'époque de l'année

### **I.4.Rayonnement solaire à travers l'atmosphère**

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

#### **I.4.1. Atmosphère terrestre composition et structure**

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

##### **a) Structure de l'atmosphère**

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches au sein desquelles la température évolue différemment en fonction de l'altitude : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère, Le passage d'une couche à une autre est matérialisé par une zone de transition qui marque les limites où s'observent les inversions thermiques : la tropopause, la stratopause et la mésopause [9].

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

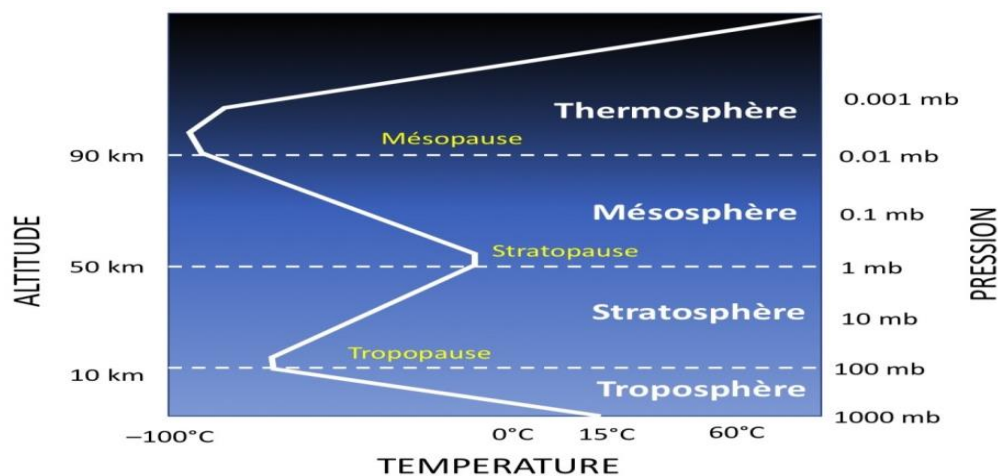
La température commence à augmenter dans la haute troposphère, et sa hauteur varie des pôles à l'équateur, ainsi que selon les saisons. La hauteur de la stratosphère varie de 8-15 km à 50 km. Autour de 25 km d'altitude, cette zone comprend une partie importante de la couche

d'ozone. La mésosphère est située entre 50 et 80 km d'altitude. La température dans cette couche commence à baisser avec l'altitude, pour atteindre  $-80^{\circ}\text{C}$  au point le plus élevé de la couche (à environ 80 km). À 800 km d'altitude, la thermosphère s'étend de 80 à 350 km. Les températures sont extrêmement élevées dans cette zone, mais la densité et la pression sont relativement faibles.

### b) Composition de l'atmosphère

En réalité, l'atmosphère est une combinaison de gaz contenant des particules liquides (gouttelettes d'eau, par exemple) et solides (cristaux de glace, poussière, cristaux de sel, par exemple) en suspension. La majeure partie de son volume est concentrée à la surface. En altitude, les molécules de gaz se raréfient et la pression diminue. Par conséquent, à mesure que l'altitude augmente, l'atmosphère devient moins épaisse [10].

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



**Figure I.4.** Structure de l'atmosphère terrestre. La ligne forte représente la variation de la température moyenne dans chaque couche atmosphérique [10]

L'atmosphère contient également des aérosols et des nuages. Les aérosols représentent une faible part de la masse de l'atmosphère (de l'ordre de  $10^{-9}$ ), mais ils jouent un rôle déterminant dans le comportement du rayonnement solaire dans l'atmosphère à travers les différents processus de réflexion, de diffusion et de l'absorption [11].

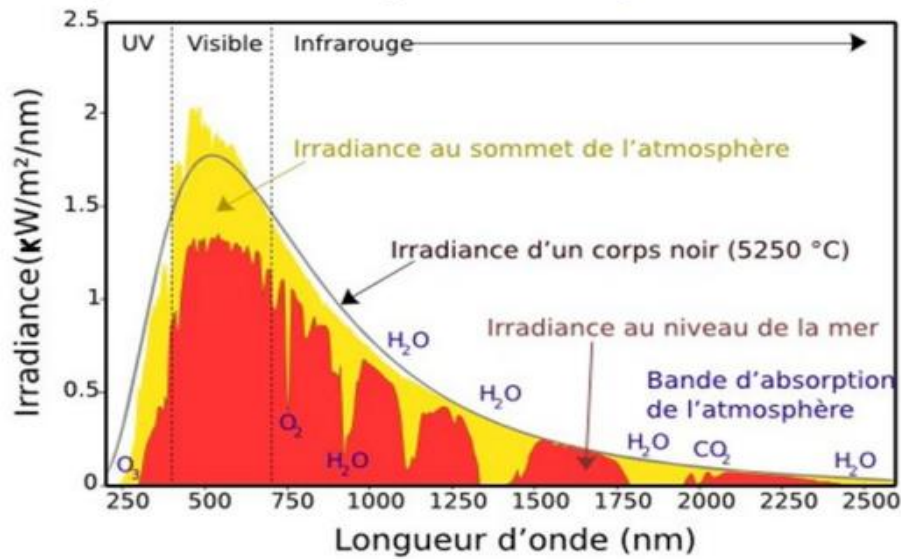
En gros, 20% du rayonnement solaire qui arrive au sommet de l'atmosphère est réfléchi vers l'espace par les nuages. L'atténuation de l'éclairement direct par les nuages dépend du type de nuages, leur épaisseur et le nombre de couches qui le constituent. Une détermination théorique de l'éclairement direct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

### I.4.2. Atténuation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est fortement absorbé par de nombreux constituants atmosphériques tels que les molécules, les aérosols, les gaz, les gouttelettes de nuages et les cristaux de glace lorsqu'il se déplace dans l'atmosphère. Les caractéristiques visuelles et physiques de chacun de ces éléments sont uniques. Les phénomènes physiques liés à l'extinction sont classés comme suit:

- L'absorption du rayonnement dans l'atmosphère par des polluants tels qu'O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> et autres gaz.
- La diffusion des photons par les particules, les molécules d'air et la vapeur d'eau est décomposée par des mécanismes de diffraction, de réfraction et de réflexion. Le rayonnement solaire ne réagit pas de la même manière à toutes les longueurs d'onde lorsqu'il traverse l'atmosphère d'environ 15 km d'épaisseur. Sur un diagramme, on peut observer que:
  - À la limite supérieure de l'atmosphère, l'ozone (O<sub>3</sub>) absorbe toutes les longueurs d'onde inférieures à 0,3 micromètre dans la région ultraviolette du spectre solaire. Sous un ciel dégagé, la lumière visible de 0,4 à 0,8 micromètre est très peu absorbée, bien que la diffusion augmente à mesure que la longueur d'onde devient plus courte.
- Le rayonnement infrarouge est absorbé par les gaz tel que CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et O<sub>3</sub> de la troposphère.

L'influence de ces éléments atmosphériques se retrouve sur la distribution spectrale du rayonnement spectral solaire, comme on peut le voir sur la **Figure. I.5**.



**Figure I.5.** Spectres du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère (couche rouge) et à la surface de la terre (jaune)

### I.4.3. Bilan énergétique du système Terre / Atmosphère

Au cours de la traversée de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est divisé en plusieurs flux dus notamment à des processus d'absorptions et de diffusions. La figure ci-dessous, illustre par des valeurs moyennes, le devenir de l'énergie solaire incidente dans l'atmosphère en pourcentage de l'énergie solaire incidente hors atmosphère [13,14].

Sur une base annuelle, l'irradiation solaire incidente au sommet de l'atmosphère devrait être d'environ 342 W/m<sup>2</sup>. Les divers composants de l'atmosphère (6 % pour l'air, 20 % pour les nuages) et les surfaces terrestres réfléchissent une partie du rayonnement atteignant le sommet de l'atmosphère (environ 30 %) vers l'espace (4 %). Ce pourcentage est exprimé par l'albédo terrestre global. Une combinaison de gaz et de particules en suspension dans l'air absorbe environ 19 % du rayonnement lorsqu'il traverse l'atmosphère (gaz, poussière et nuages). Seuls 53 % de l'énergie solaire incidente atteignent la surface de la terre. En plus des fractions réfléchies et absorbées par l'atmosphère terrestre, l'énergie disponible à la surface est déterminée par les fractions réfléchies et absorbées par l'atmosphère terrestre.

La quantité, la taille et la composition des molécules et des particules rencontrées déterminent l'atténuation du rayonnement qui traverse l'atmosphère. Elle fluctue également en fonction de la longueur du parcours du rayonnement solaire dans l'atmosphère. La " masse atmosphérique ", également appelée " masse d'air optique ", détermine cette longueur.

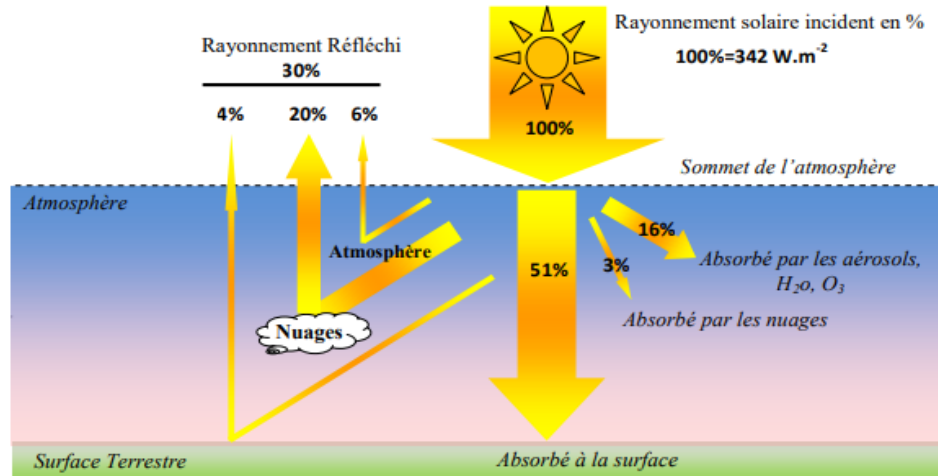


Figure I.6. Bilan énergétique annuelle du système "Terre-Atmosphère"[14]

### I.5. Rayonnement au sol

Sous forme d'ondes électromagnétiques, l'énergie solaire atteint le sommet de l'atmosphère. Elle est d'abord séparée en deux parties :

- La première est réfléchie directement vers l'espace avant de pénétrer dans l'atmosphère.
- La seconde composante traverse l'atmosphère, subit une réfraction et une diffraction avant d'être renvoyée vers l'espace ou vers la terre.
- En raison de ces facteurs, les rayons du soleil qui atteignent la terre sont divisés en trois catégories : directs, diffus et réfléchis. [15].

#### I.5.1. Les composant 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:

$$I_G = I_b + I_d = I_b \cos Z + I_d = I_b \sin y + I_d \quad (\text{I.9})$$

Avec :

Z : l'angle zénithal

$\gamma$  : la hauteur angulaire [16].

### I.5.2. Coordonnées géographique

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 [16].

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

- **La latitude  $\theta$**

C'est l'angle  $\theta$  que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial. Si  $\theta > 0$ , le site se trouve dans l'hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud [16].

- **La longitude  $\varphi$**

C'est l'angle  $\varphi$  formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre -180 (vers l'ouest) et +180 (vers l'Est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même ( $360^\circ$ ), chaque heure représente  $15^\circ$  d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes [16].

- **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 [17].

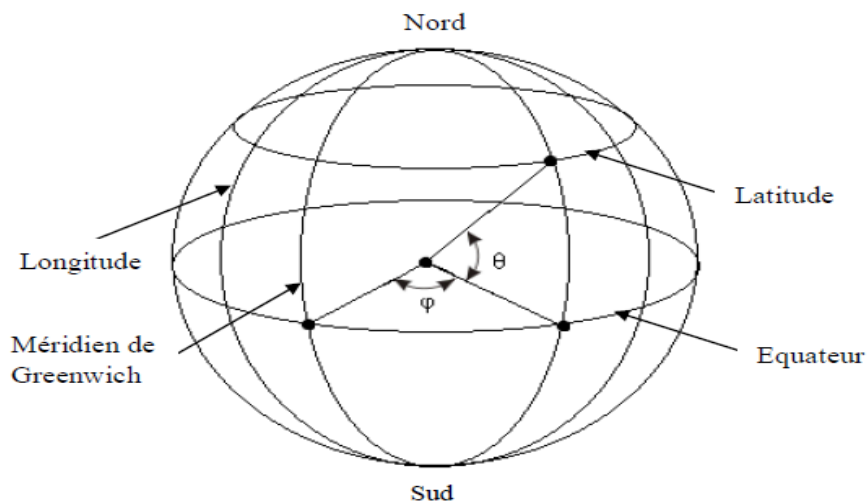


Figure I.7. Coordonnées terrestres [16]

### 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  $G(x, y, j)$  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. [18]

#### 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 [18] :

- **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) [18].

La brillance  $B_i$  est donnée par l'équation suivante :

## Chapitre 01: Généralité sur le gisement solaire

$$Bi(x, y, j, h) = Bia(x, y, j, h) + Bib(x, y, j, h) \quad (\text{I.10})$$

- **Surfaces lambertiennes**

Si nous assimilons la base à une surface lambertienne qui rayonne comme un corps noir, la brillance ( $Bib$ ) s'écrit :

$$Bib(x, y, j, h) = k Rib(x, y, j, h) \cdot (x, y, j, h) Ti(x, y, j, h) \quad (\text{I.11})$$

**Avec :**

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

$Rib$  : Le coefficient de réflexion de la base.

$Gc$  : Le rayonnement global au sol obtenu en ciel clair.

$Ti$  : Le coefficient de transmission du rayonnement direct entre la base et le satellite [18]

- **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 [18].

### 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 :

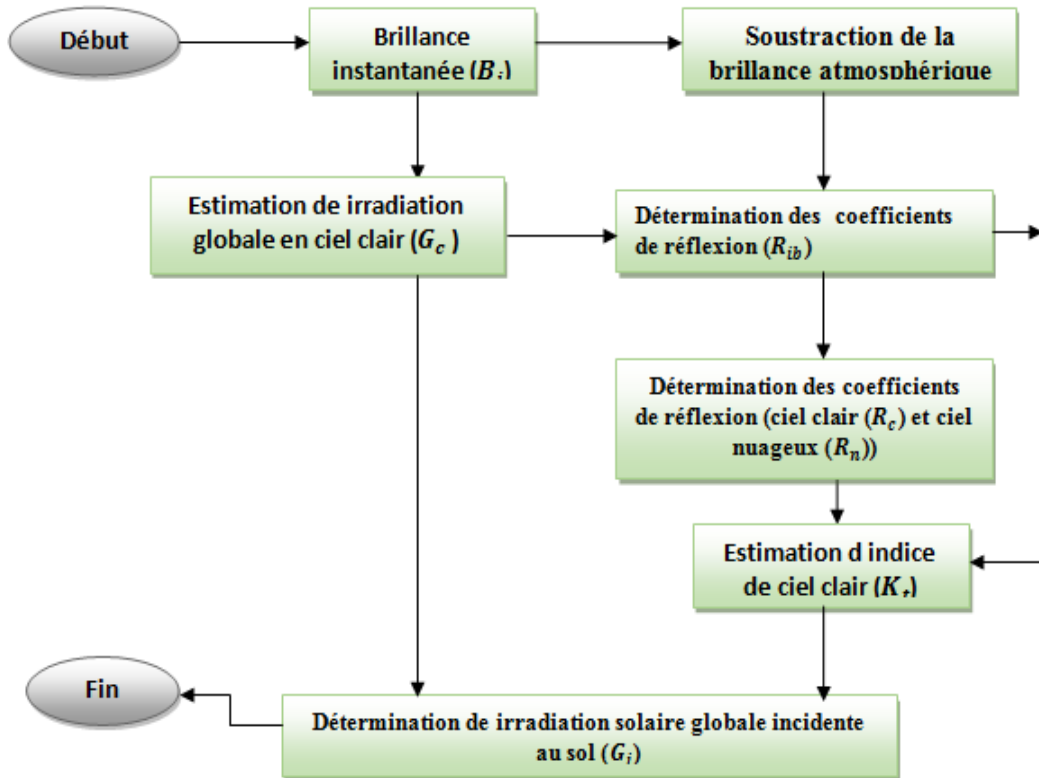


Figure I.8 Différentes étapes du modèle de GISTEL [18]

## 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  $B_i(x, y, j, h)$  en coefficients de réflexion  $R_{ib}$ , ces coefficients se calculent en remplaçant l'équation (I.10) dans l'équation (I.11) :

$$B_i(x, y, j, h) = B_{ia}(x, y, j, h) + k R_{ib}(x, y, j, h) G_c(x, y, j, h) T_i(x, y, j, h) \quad (\text{I.12})$$

Ou

$$R_{ib}(x, y, j, h) = \frac{B_i(x, y, j, h) - B_{ia}(x, y, j, h)}{k \cdot G_c(x, y, j, h) \cdot T_i(x, y, j, h)} \quad (\text{I.13})$$

## Chapitre 01: Généralité sur le gisement solaire

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

Le coefficient  $G_c$  :

$$G_c = \varepsilon(1300 - 57.T_L \cdot [\sin(hs)]^{\left[\frac{36+T_L}{33}\right]} \quad (1.14)$$

Avec :

$T_L$  : Facteur de trouble de Linke

$hs$  : Angle de hauteur solaire

$\varepsilon$  : Facteur de correction de la distance terre-soleil

$$\varepsilon = 1 + 0.034 \cos(0.986(j - 3)) \quad (1.15)$$

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

Le coefficient  $T_i$

$$T_i = \frac{1390 - 31.T_L}{1367} \cdot \exp\left[-\frac{T_L}{126 \cdot \sin(hv + 2)}\right] \quad (1.16)$$

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

$$hv = \sin^{-1}\left(\frac{1.826 \cdot \cos \theta \cos \varphi - 0.274}{\sqrt{3.41 \cdot \cos \theta \cos \varphi}}\right) \quad (1.17)$$

$\theta$  et  $\varphi$  : sont respectivement la latitude et la longitude [18].

- **Détermination des deux images de référence**

## Chapitre 01: Généralité sur le gisement solaire

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  $R_c$ . D'autre part, l'image de référence de ciel nuageux  $R_n$  est construite en prenant les valeurs maximales de coefficients de réflexion avec couvert .les mêmes séquences d'images [18].

- **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:[18]

$$K_t = \frac{G_i(x, y, j, h)}{G_c(x, y, j, h)} \quad (\text{I.18})$$

<b>Ciel clair</b>	$Rib \leq R_c$	$K_t = 1$	<b>(I.19)</b>
-------------------	----------------	-----------	---------------

<b>Ciel partiellement couvert</b>	$R_c < Rib < R_n$	$K_t = 1 - (1 - K_0) \frac{Rib - R_c}{R_n - R_c}$	<b>(I.20)</b>
---------------------------------------	-------------------	---	---------------

<b>Ciel totalement couvert</b>	$Rib \geq R_n$	$K_t = K_0$	<b>(I.21)</b>
------------------------------------	----------------	-------------	---------------

Avec  $K_0$  est l'indice par un ciel nuageux est égal à 0,20 [18].

- **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]

$$G_i(x, y, j, h) = K_t \cdot G_c(x, y, j, h) \quad (1.22)$$

### I.7. Conclusion

L'objet de ce chapitre est de traiter les notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres, le mouvement du soleil, différentes composantes du rayonnement solaire et autres. L'irradiation solaire dépend de plusieurs facteurs tels que l'ensoleillement, la température, le lieu géographique, et l'instant considéré dans la journée.

De nombreux travaux de recherche ont été développés sur l'estimation de l'irradiation solaire au sol pour faire le dimensionnement d'une installation solaire et prédire le rayonnement solaire,

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

# **Chapitre II**

La Télédétection et Les  
Images satellitaires  
MSG

### II.1.1. Introduction

La télédétection est un sujet scientifique qui englobe l'ensemble des connaissances et des techniques permettant d'observer, d'analyser, d'interpréter et de gérer l'environnement à l'aide de mesures et d'images recueillies à partir de plateformes aériennes, spatiales, terrestres et maritimes. Comme son nom l'indique, il s'agit de recueillir des données à distance, sans entrer en contact physique avec l'élément détecté.

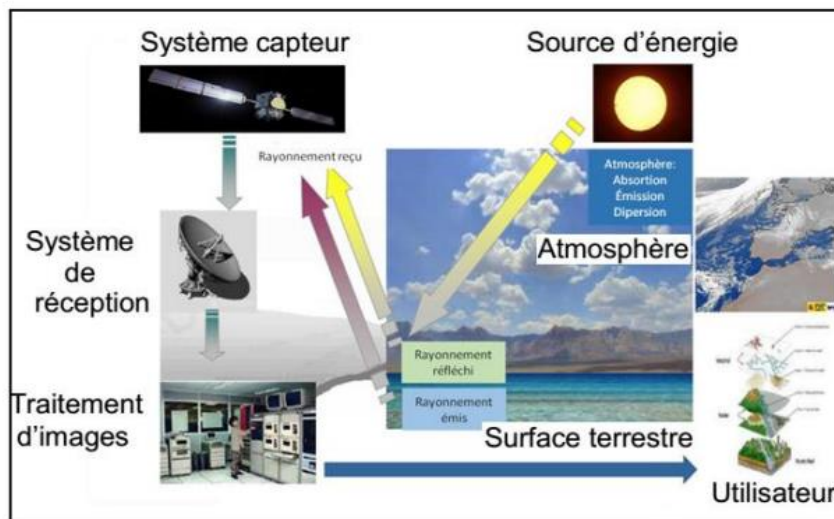
La télédétection est aussi l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci

La photographie aérienne, dont la vision large et verticale a influencé nos habitudes d'inventaire, de cartographie et de surveillance de l'environnement et des ressources depuis plus d'un siècle, a donné naissance à la télédétection moderne.

Elle intègre les développements plus récents de la recherche spatiale, de la physique et de l'informatique pour constituer aujourd'hui un outil puissant et incontournable pour la gestion des milieux, la planification, la gestion des ressources et le développement économique [19].

En général un système de télédétection comprend les éléments suivants :

1 Source énergie, 2 surface terrestre, 3 Atmosphère, 4 système capteur, 5 système de réception, 6 traitement d'image, et 7 utilisateurs comme illustré sur **la Figure II.1.**



**Figure II.1.** Schéma général de fonctionnement de la télédétection Le rayonnement solaire

[19]

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

La télédétection a pour objectif de fournir des informations sur les paysages sous la forme de données images en utilisant le rayonnement électromagnétique comme véhicule de ces informations [20, 21].

### II.1.2. Historique de la Télédétection

- 1783 : Première ascension en ballon par les frères Montgolfier
- 1839 : Invention de la photographie (Daguerre),
- 1858 : Premières photos aériennes par Nadar,
- 1957 : Entrée de la télédétection dans l'ère moderne avec le lancement de Spoutnik,
- 1972 : Lancement de Land SAT (USA),
- 1986 : Lancement de Spot 1 (France +Belgique et Suède),
- 1991 : Mise en orbite et début de l'exploitation du satellite européen ERS-1, équipé de plusieurs capteurs passifs et captifs pour l'étude de l'environnement global de la planète.
- 1999 : Lancement par la société privée Space Imaging Corp. du satellite IKONOS, offrant des images à très haute résolution spatiale (1 m).

### II.1.3. Processus de télédétection

La **Figure II.2** illustre le processus de télédétection qui se traduit généralement par : Une source (A) de rayonnement électromagnétique, comme le soleil où un capteur, illumine une cible par un rayonnement électromagnétique (le terme cible désigne une surface imagée au niveau du sol) [28]. En se propageant dans l'atmosphère (B), des phénomènes de diffusion et d'absorption apparaissent par interaction avec la cible. Ce rayonnement peut être transmis ou dévié de sa trajectoire initiale, ou même parfois bloqué avant d'arriver au sol. Après avoir franchi cette barrière atmosphérique, ce rayonnement interagit enfin avec la cible (C) qui va, l'absorber, le diffuser ou bien le réfléchir, ceci en fonction de la longueur d'onde du rayonnement mais également de la nature physique de la surface concernée. [21]

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

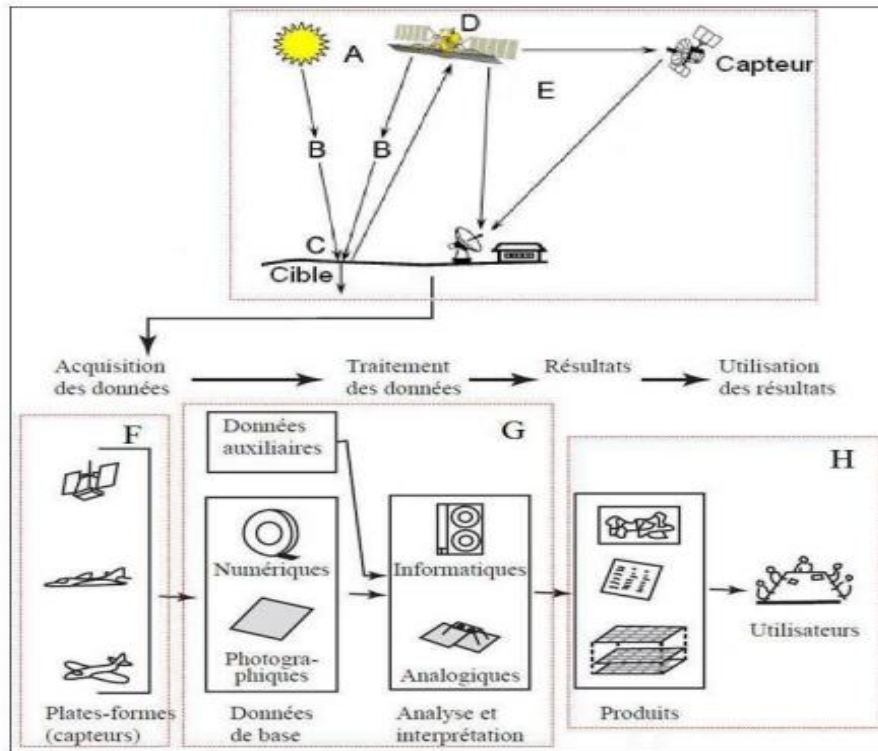


Figure II.2. Résumé du processus de télédétection [21]

Sur le trajet entre la cible et le capteur, un deuxième contact se produit, qui est capté par le capteur (D) et communiqué au sol (E) sous forme numérique. L'énergie captée par le capteur est envoyée à une station de réception, où elle est convertie en images, généralement par des méthodes électroniques (numériques ou photographiques). Après la collecte numérique de données provenant de diverses sources (capteurs) (F), l'image traitée doit être interprétée et analysée visuellement et/ou numériquement (G) afin d'extraire les informations nécessaires sur la cible. Enfin, les informations extraites de l'image sont utilisées pour mieux comprendre la cible (H), pour aider à la découverte de nouvelles caractéristiques de celle-ci, ou pour aider à la résolution d'un problème spécifique.

Une longueur d'onde est utilisée pour décrire le rayonnement électromagnétique reçu par les capteurs (D), (E) selon leurs gammes spectrales en utilisant une combinaison de filtres et un type de détecteur (ou fréquence). Le rayonnement peut avoir plusieurs noms en fonction de la longueur d'onde [21]. Parce qu'elle fait appel à des procédures qui apparaissent rapidement dans un environnement en constante évolution, ses applications potentielles ne cessent de s'étendre, et de nouveaux domaines dans lesquels elle pourrait constituer une alternative avantageuse aux approches conventionnelles établies sont identifiés.

### II.1.4. Image numérique en Télédétection et ses Caractéristiques

C'est une représentation plane d'un paysage terrestre, à tous points (x,y) du plan image on peut ajuster une valeur  $G(x,y)$  qui représente la radiométrie du point au sol. Une image de télédétection est une matrice géométrique de 2 dimensions.

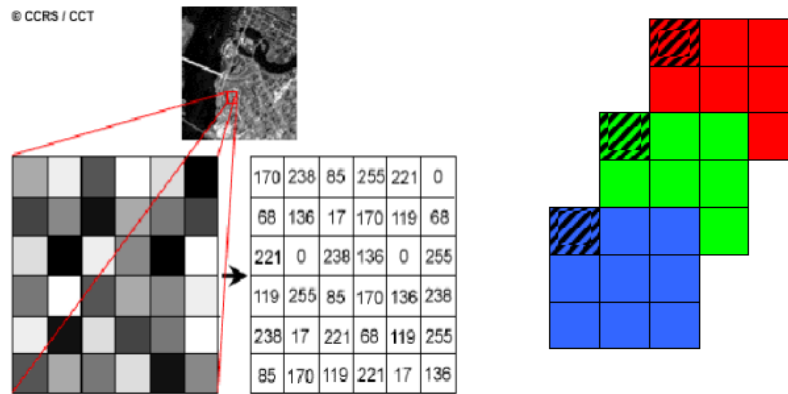


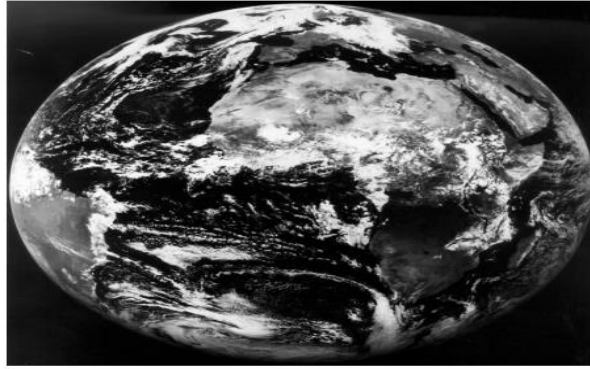
Figure II.3. Image numérique

### II.1.5. Traitement numérique des images

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

Plusieurs solutions logicielles commerciales ont été créées expressément pour le traitement et l'analyse des images de télédétection. Les fonctions de traitement d'images largement utilisées dans l'analyse d'images peuvent être divisées en quatre catégories :

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



**Figure II.4.** Carte satellite METEOSAT

### II.2.1. Les satellites

Le satellite MSG a la capacité d'observer la Terre dans 12 canaux spectraux et de fournir des images toutes les 15 minutes. Ces images multi-spectrales sont considérées comme une source riches d'informations et fiables sur l'occupation du sol, et aussi sur l'évolution détaillée des phénomènes qui se déroulent à la surface de la planète. Parmi ces différents phénomènes, nous nous intéressons à l'estimation du rayonnement solaire. C'est l'un des objectifs clés du suivi des images du satellite météorologique MSG ; il représente un objectif ambitieux pour les chercheurs scientifiques et une nécessité essentielle dans plusieurs secteurs tels que la météorologie, la géologie, l'hydrologie, l'agriculture, etc.

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 [22].

- **Orbite d'un satellite**

La trajectoire suivie par un satellite de la terre est appelée orbite. Cette orbite du satellite n'est pas aléatoire, généralement, elle a une forme quasi-circulaire. Elle est choisie en fonction de la capacité des capteurs que transportent le satellite et des objectifs de sa mission. Le choix de l'orbite est déterminé par l'altitude, l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la terre. Par cela, nous distinguons principalement deux types d'orbite concernant

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

les satellites gravitant autour de la Terre : les un empruntent une orbite autour de l'équateur, les autres autour des pôles.

Un satellite en orbite peut étudier la forme de la Terre, la densité de l'atmosphère, le rayonnement spatial, le climat et les modifications planétaires [23].

### II.2.2. Différents types de satellites

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

- **Les satellites de télécommunication** : Ces satellites sont utilisés pour la transmission de l'information d'un point à l'autre de la Terre.
- **Les satellites de télédétection** : Ces satellites ont pour missions d'observer la Terre, afin d'accomplir des intérêts scientifiques, économiques, ou militaire. 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.
- **Les satellites de positionnement** : Ces satellites permettent de connaître la position (ou localiser) d'objets à la surface de la Terre.
- **Les d'observation spatiale** : Ces satellites observent l'espace au-dessus de l'atmosphère
- **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.

### II.2.3 Satellites METEOSAT

#### II.2.3.1. Historique

La série METEOSAT de satellites géostationnaires de première et deuxième génération est une famille de satellites météorologiques européens qui surveillent et recueillent en permanence des données sur une région géographique définie. Ils sont situés à 36 000 kilomètres au-dessus de l'équateur, ce qui leur confère une couverture complète de l'Afrique.

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

L'Europe, ainsi que les régions les plus éloignées d'Asie et d'Amérique du Sud Europe, ainsi que les régions les plus éloignées d'Asie et d'Amérique du Sud. Ils ont été créés par l'Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques (EUMETSAT). Le premier satellite de la première génération a été lancé en 1977, et il a été suivi de six autres satellites après son succès. Tous les satellites de première génération ont été mis hors service. Meteosat-8 (MSG-1) a été le premier satellite de deuxième génération, lancé en août 2002, et suivi de trois autres engins spatiaux pour assurer la continuité opérationnelle des données METEOSAT. Les quatre satellites sont maintenant en fonctionnement [25]. L'historique de lancement des différents satellites METEOSAT est illustré dans le **tableau II.2.1**.

**Tableau II.1 Date de lancée des satellites METEOSAT**

Nom du satellite	Date de lancée
METEOSAT-1	23 Novembre 1977
METEOSAT-2	19 Juin 1981
METEOSAT-3	15 Juin 1988
METEOSAT-4	06 Mars 1989
METEOSAT-5	02 Mars 1991
METEOSAT-6	19 Novembre 1993
METEOSAT-7	02 Septembre 1997
MSG-1(METEOSAT-8)	28 Aout 2002
MSG-2(METEOSAT-9)	21 Décembre 2005
MSG-3(METEOSAT-10)	5 Juillet 2012
MSG-4(METEOSAT-11)	15 Juillet 2015

### II.2.4 Les satellites METEOSAT (Satellites 1ère Génération)

De METEOSAT-1 à METEOSAT-7, le satellite Météosat (1ère génération) (METEOSAT First Génération (MFG)) est l'un des satellites météorologiques géostationnaires européens actifs qui ont tous été lancés en toute sécurité. Le premier a été lancé de Cap Canaveral en novembre 1977, et le septième a été lancé en septembre 1997[24].

L'objectif principal du système Météosat est de fournir des données satellitaires à faible coût et des observations météorologiques continues et précises depuis l'orbite. Ce satellite peut envoyer et recevoir des données de n'importe quel pays de la planète, ce qui le rend véritablement mondial. Les satellites METEOSAT-1 à 7 ne sont plus opérationnels (1977 - 2017). MFG (Figure II.1) utilisait l'imageur visible et infrarouge de METEOSAT pour générer des images toutes les demi-heures dans trois canaux spectraux (visible (VIS), infrarouge (IR) et vapeur d'eau (WV)) lorsqu'il était actif (MVIRI) [25].

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

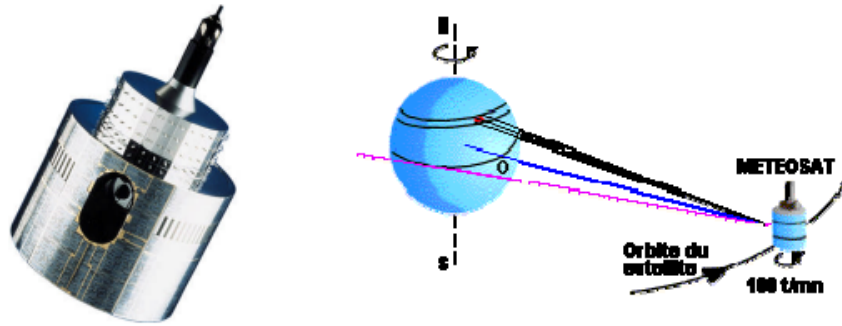


Figure II.5 Satellite METEOSAT et balayage [25]

### II.2.4.1. Bandes spectrales de Météosat

Le radiomètre Météosat est la principale charge utile du satellite. Il fournit au système Météosat des données fondamentales sous forme de radiances dans les parties visibles et infrarouges du spectre électromagnétique, qui seront utilisées pour créer des photographies de la Terre en plein disque depuis l'orbite géostationnaire (**voir tableau II.2.**). Le radiomètre dispose de trois bandes spectrales de fonctionnement :

- 1- La bande visible est utilisée pour l'imagerie tout au long de la journée. Ce canal ne peut être utilisé que lorsque l'atmosphère terrestre est claire,
- 2- La bande d'absorption de la vapeur d'eau : La bande d'absorption de la vapeur d'eau est utilisée pour estimer la quantité de vapeur d'eau présente dans la troposphère moyenne,
- 3- Le spectre infrarouge : La bande infrarouge thermique (fenêtre) est utilisée pour l'imagerie diurne et nocturne ainsi que pour déterminer les températures du sommet des nuages et de la surface des océans.

Tableau II.2 Caractéristique spectrales et temporelles des images METEOSAT

Canal	Bande spectrale	Taille du pixel	Ligne x Pixel
Visible (VIS)	0.45-1.0 ( $\mu\text{m}$ )	2.5 x 2.5 km	5000 x 5000
Vapeur d'eau (WV)	5.7-7.1 ( $\mu\text{m}$ )	5 x 5 km	2500 x 2500
Infrarouge (IR)	10.5-12.5 ( $\mu\text{m}$ )	5 x 5 km	2500 x 2500
Nombre de détecteurs (+ redondants)	2 (+2)	1 (+1)	1 (+1)
Résolution temporelle	30 minutes	→	48 images par jour

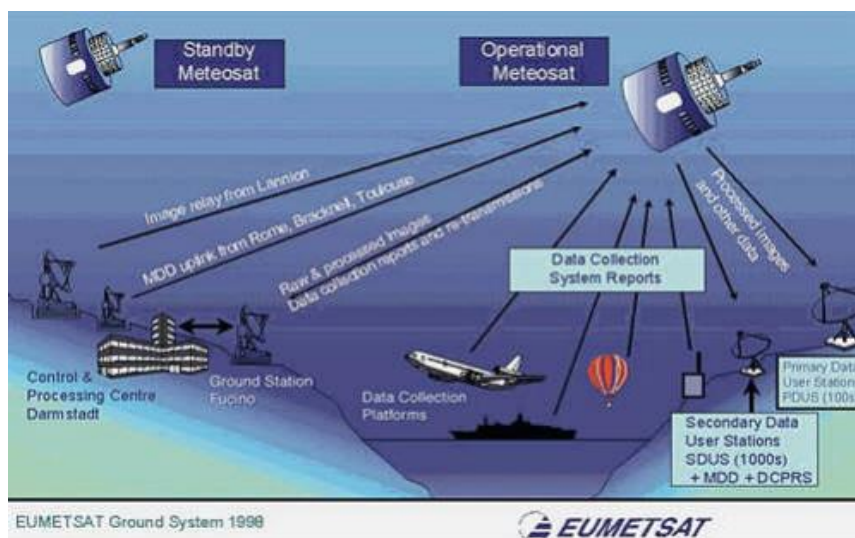
Toutes les 30 minutes, le système offrira une image mondiale du disque terrestre. Le canal visible a une résolution de 2,5 km, tandis que les canaux infrarouges et vapeur d'eau ont une résolution d'environ 5 km.

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

### II.2.4.2. Le système METEOSAT

L'objectif principal du système Météosat est de créer des photographies de la Terre qui révèlent les systèmes nuageux de jour comme de nuit, et de communiquer ces photos aux utilisateurs le plus rapidement possible. La liste complète et la présentation des missions sont disponibles ci-dessous [21].

- ✓ Des intervalles de 30 minutes entre les images du monde dans trois canaux spectraux.
- ✓ Quelques minutes après l'observation, les photos sont envoyées à deux types de stations utilisatrices : numériques et analogiques.
- ✓ Des biens météorologiques, tels que les vents dérivés du mouvement des nuages capturés par les images Météosat, sont générés et distribués.
- ✓ Les images d'autres satellites météorologiques sont acquises et diffusées.
- ✓ Des informations météorologiques, telles que des cartes et d'autres données, sont relayées vers des endroits où les systèmes de télécommunications sont inadéquats.
- ✓ Les plateformes de collecte de données recueillent des données environnementales in situ, qui sont ensuite envoyées aux consommateurs quelques minutes plus tard.



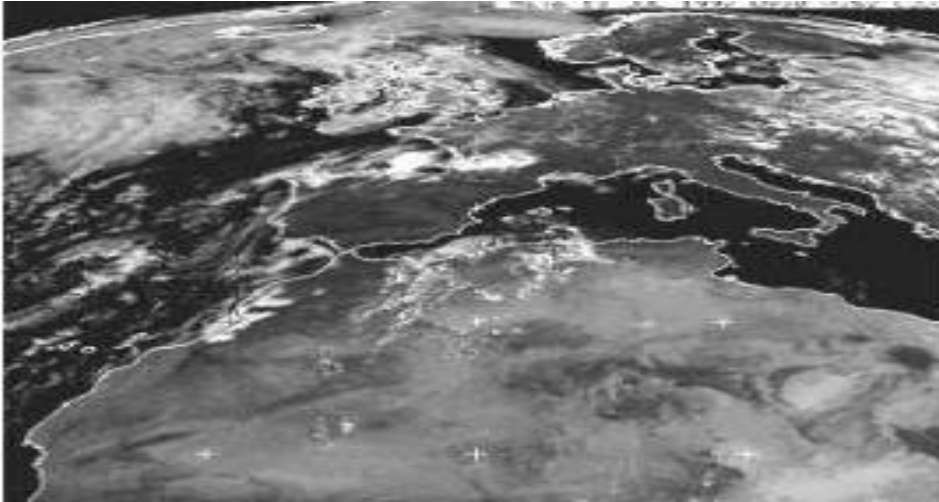
**Figure II.6** Un schéma du système complet METEOSAT d'EUMESTAT [24]

### II.2.4.3 Format des images METEOSAT

Les images METEOSAT sont fournies sous trois formes (voir Figure II.7) : haute résolution, B2, et WEFAX (Weather Fac Simile), qui est une méthode internationale de livraison d'images en format analogique. Les photos du canal visible ont une résolution de 5000 x 5000 pixels, tandis que les canaux infrarouges et vapeur d'eau ont une résolution de 2500 x 2500 pixels. Les photos à haute résolution sont compressées pour créer les images B2.

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

Elles sont sauvegardées sur bande magnétique toutes les trois heures et sont composées de  $416 \times 416$  pixels pour le disque terrestre complet. Les photos à haute résolution sont divisées en plusieurs sous-formats pour créer les images Wefax. Les S.D.U.S. (Secondary Data User Stations) reçoivent ces photos de Météosat. longueur d'onde. La lumière est la partie visible du REM, celle que l'homme capte avec ses yeux.



**Figure II.7** Images WEFAX du satellite METEOSAT d'EUMETSAT [24]

L'Office National de la Météorologie à Dar El Beida, Algérie, reçoit des photos Wefax toutes les demi-heures (Alger). L'Afrique du Nord, la mer Méditerranée, l'Europe et l'océan Atlantique sont représentés par ces images.

### II.2.5. Satellites METEOSAT 2<sup>ème</sup> génération MSG

Le premier satellite Météosat seconde génération (MSG) a été lancé avec succès Jeudi 29 Août 2002 à Kourou. MSG-1 a été placé en orbite de dérive se déplaçant dans une direction Est vers son orbite géostationnaire finale. Le MSG était attendu avec impatience par les météorologistes européens qui comptent beaucoup sur ses performances améliorées [26]

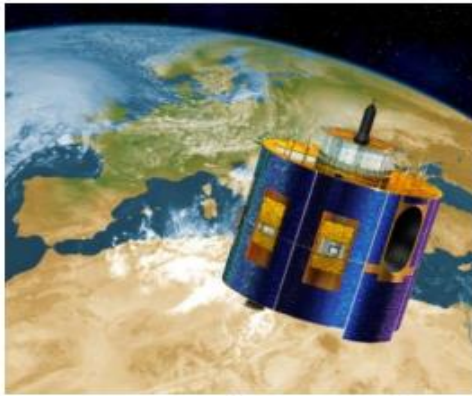
Le satellite MSG est une famille de quatre satellites météorologiques géostationnaires dotés d'un capteur principal plus avancé, le Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI), qui fournit des images de la Terre toutes les 15 minutes dans 12 bandes spectrales différentes, contre 30 minutes et trois bandes pour la première génération de METEOSAT. Les prévisionnistes peuvent suivre l'évolution rapide des phénomènes météorologiques dangereux tels que les orages et les tempêtes de neige grâce à cette mise à jour graphique rapide [27].

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

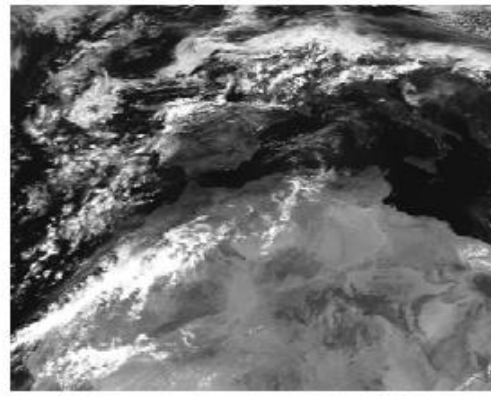
METEOSAT a été remplacé par MSG. Il présente les caractéristiques suivantes par rapport à son prédécesseur :

- Une résolution plus élevée,
- Un plus grand nombre de canaux étudiés,
- Et une capture d'images plus rapide.

Ces progrès contribueront au maintien de la veille météorologique européenne. (**Voir les figures II.8 et II.9**)



**Figure II.8** Le satellite MSG [26]



**Figure II.9** Image (canal visible) du MSG d'EUMESTAT [26]

Les satellites Météosat 2<sup>ème</sup> génération diffusent des informations et des images plus précises et de la qualité améliorée destinées aux prévisions météorologiques ainsi qu'à d'autres applications telles que l'hydrologie, l'agriculture et les études environnementales et climatiques. Les données collectées sont utilisées quotidiennement dans le cadre des études sur les changements climatiques et ce sont arrivées d'une importance vitale lors sont permises de réduire les pertes de vie humaine et de bien.

### II.2.5.1 Position orbitale de MSG

MSG-1 est un satellite de forme cylindrique de 2 000 kg, qui sera placé au-dessus de l'équateur à 35800 km d'altitude environ, à la verticale du golfe de Guinée, par zéro degré de longitude. Il s'agit d'un programme commun de l'Agence spatiale européenne (ESA) et de l'Eumetsat, l'Organisation européenne de satellites météorologiques. Sa position officielle est à la jonction du méridien de Greenwich et de l'équateur, ce qui le rend idéal pour la recherche des continents africain et européen. Une animation des photos obtenues par le satellite en lumière visible toutes les 15 minutes est présentée ci-dessous (la nuit, des images infrarouges sont relayées). Le satellite tourne à 100 tours par minute le long de son axe primaire, qui est

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

parallèle à l'axe nord-sud de la Terre. Cette rotation régulière permet à un radiomètre de balayer et de mesurer la luminosité dans trois canaux : visible, infrarouge thermique et infrarouge "bande d'absorption de la vapeur d'eau". C'est donc cette rotation qui est utilisée pour produire chaque ligne de l'image. (Voir figure II.10. a et b).

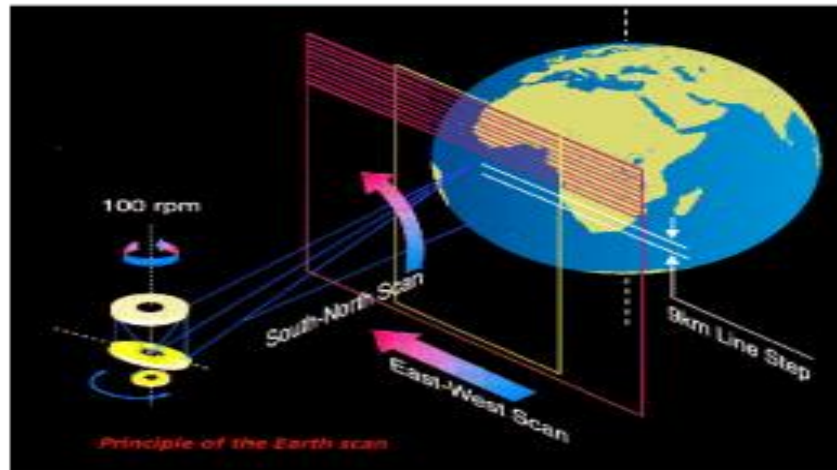


Figure II.10. (a) Le balayage du satellite MSG

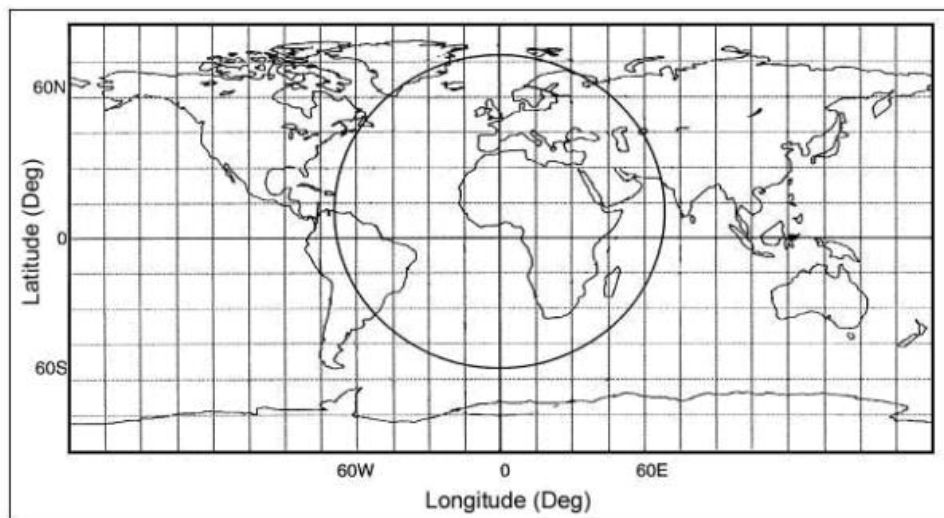


Figure II.10. (b) Le concept de balayage du satellite MSG [EUMETSAT]

MSG-1 permet à l'Europe de rattraper l'avance technologique dont bénéficient depuis des années les satellites américains et japonais correspondants. Les performances de MSG-1 seront supérieures à celles des autres satellites météorologiques. Les photographies produites sont supérieures à divers égards à celles fournies par le précédent Météosat. Tout d'abord, elles sont plus précises, permettant de voir des caractéristiques plus fines de la surface de la Terre à une distance de 1 km au lieu de 2 km.

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

De plus, la capture de cette image est plus rapide, permettant un nouvel instantané toutes les quinze minutes plutôt que toutes les demi-heures comme auparavant. Les séquences d'images satellites présentées à la télévision sont plus fluides, conséquence directe (et anecdotique) de ces images plus rapprochées.

Mais le plus important pour les prévisionnistes est sans doute le gain en « couleurs » de MSG-1. Les Météosat n'avaient jusqu'alors que trois canaux d'acquisition. C'est-à-dire que l'imageur du satellite n'était capable de détecter que trois « couleurs » dans le spectre lumineux : une couleur dans le visible et deux couleurs dans l'infrarouge. A titre de comparaison pour l'œil humain, avec un canal, une image ne peut être affichée qu'en noir et blanc, alors qu'il faut trois canaux pour afficher une image en couleur.

### II.2.5.2. Les canaux de MSG

MSG-1 capte 12 canaux au lieu des trois canaux de la première génération de Météosat. Quatre sont dédiés à la lumière visible, dont un à haute résolution, avec un détail d'un kilomètre. MSG-1 détecte huit canaux dans l'infrarouge. Cette image de l'atmosphère dans de multiples "couleurs" infrarouges (en réalité dans des bandes de différentes longueurs d'onde) donne une foule d'informations sur l'état de l'atmosphère qui étaient impossibles à détecter avec les capteurs précédents. Un canal infrarouge, par exemple, est consacré à la détection de l'ozone. D'autres sont utilisés pour détecter et classer les différentes formes de nuages, tandis que d'autres encore surveillent la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère. En mélangeant les différentes longueurs d'onde, les prévisionnistes pourront obtenir une image plus détaillée des processus qui agitent l'atmosphère : la formation des tempêtes, par exemple, devrait être détectée plus rapidement. Ces nouveaux Météosat de deuxième génération sont beaucoup plus grands : 3,2 m de diamètre, 2,4 m de hauteur et 2 000 kg de masse.

### II.2.5.3. Les services MSG

- ✓ Imagerie: images disque plein de la Terre toutes les 15 mn.
- ✓ Dissémination HRIT des images (tous les canaux).
- ✓ Dissémination LRIT.
- ✓ Collecte et relais des données environnementales des plaques d'observation vers les stations au sol.
- ✓ Distribution des données météorologiques (MDD).
- ✓ Distribution de produits météorologiques (cartes).

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

- ✓ Produits climatologiques: Programmes de recherche.
- ✓ Archives météorologiques.

### II.2.6. Système MSG

#### II.2.6.1. Segment spatial

Le segment spatial du système Météosat de deuxième génération est composé de quatre satellites stabilisés par rotation nouvellement construits qui transportent la charge utile suivante.

a) Le radiomètre rotatif d'imagerie multi spectrale, d'analyse des masses d'air et d'imagerie visible à haute résolution (SEVIRI), qui assure des missions d'imagerie multi spectrale, d'analyse des masses d'air et d'imagerie visible à haute résolution. SEVIRI dispose d'un total de 12 canaux:

- 7 canaux d'imagerie visible et infrarouge
- 4 canaux de mesure d'émission infrarouge dans les bandes d'absorption de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone et de l'ozone
- 1 canal visible à large bande avec une résolution spatiale plus fine.

Les canaux SEVIRI auront une distance d'échantillonnage de 3 km au point sub-satellite, à l'exception du canal haute résolution du domaine visible, qui aura une distance d'échantillonnage de 1 km. Toutes les 15 minutes, des images du disque terrestre complet seront disponibles dans tous ces canaux spectraux.

b) la charge utile de communication de données météorologiques en orbite de satellite géostationnaire (GMCP), qui assure des missions de diffusion et de collecte de données

c) Charges utiles supplémentaires, telles qu'un petit instrument scientifique et/ou un système géostationnaire de recherche et de sauvetage (GEOSAR) et/ou un GERB (pour autant qu'elles puissent être transportées sans affecter de manière significative la taille ou la complexité de la plate-forme, que leur coût ne soit pas déterminant et qu'elles puissent être financées par EUMETSAT).

### II.2.6.2. Segment sol

Le segment terrestre de Météosat de deuxième génération sera constitué d'un réseau d'installations au sol qui seront conçues dans un souci de fiabilité à long terme. Le nœud central du réseau, le siège d'EUMETSAT, y sera placé.

- **Le Segment sol du système d'EUMETSAT**

a) Une Station sol principale (PGS), sous le contrôle de l'opérateur des satellites (EUMETSAT), pour l'acquisition des données de télémétrie et des données brutes et le soutien de l'exploitation globale du système.

b) Une station terrestre de secours (BGS), qui peut partager un emplacement avec une SGS ou être située dans une autre station disposant déjà d'installations de contrôle par satellite, pour les opérations de contrôle à distance d'urgence.

c) Une ou plusieurs stations de soutien au sol (GSS) pour collecter et prétraiter les données provenant de satellites météorologiques supplémentaires avant de les relayer vers le site central.

d) Un Site central au Siège d'EUMETSAT pour assurer les activités de commande du satellite et de contrôle de la mission, ainsi que le traitement des données-images brutes des satellites en données de niveau 1,5 qui seront distribuées aux utilisateurs. Le Site central sera constitué de trois principaux éléments fonctionnels:

i) un Centre de commande du satellite (SCC),

ii) un Centre de contrôle de la mission (MCC),

iii) un Centre de traitement des données (DPC) pour soutenir les missions imagerie et circulation des données

e) Dans le cadre du guichet unique de données et de références météorologiques (U-MARF), une capacité d'archivage et de réintroduction des produits météorologiques du MSG pour l'archivage et la réintroduction à long terme des données d'image et des produits météorologiques choisis. Sa configuration et son emplacement (qui peut être décentralisé en un ou plusieurs endroits) sont encore inconnus.

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

- **Segment sol des applications d'EUMETSAT**

Le Segment sol des applications d'EUMETSAT comprendra toutes les infrastructures relatives à l'extraction de produits des données-images:

a) Au siège d'EUMETSAT, une installation d'extraction de produits météorologiques (MPEF) assurera les tâches de contrôle et d'administration nécessaires pour garantir la disponibilité des produits essentiels prédéfinis et des activités nécessitant des méthodes de traitement établies qui ne requièrent pas la participation des utilisateurs. Les tâches typiques du MPEF comprendront l'extraction opérationnelle de produits tels que les vecteurs vents à l'échelle synoptique (grille d'environ 100 km) et (pour diverses applications) l'analyse multi spectrale des caractéristiques de l'image entière comme base pour l'extraction des produits.

b) Un réseau de centres d'applications satellitaires (SAC) hébergés par les services météorologiques nationaux des États membres d'EUMETSAT ou par d'autres organismes météorologiques tels que le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMET).

Ces centres seront chargés d'extraire les articles qui ne sont pas disponibles par le biais du MPEF. Après un examen des demandes des utilisateurs, le Conseil définira ces biens. Le FAS sera choisi par une demande ouverte de participation. Toutes les parties de la recherche et du développement, ainsi que les activités convenues, seront couvertes par les accords conclus à cet égard.

- **Le Segment sol des utilisateurs**

Les utilisateurs feront fonctionner les stations de réception afin de collecter les données du système MSG :

a) Les stations (d'utilisateurs) à haut débit (HRUS) pour la réception des données des canaux de transmission HRIT,

b) Les stations (d'utilisateurs) à faible débit (LRUS) pour la réception des données des canaux de transmission LRIT.

La mission de distribution du MSG ne comprend pas le transfert des données brutes des équipements satellitaires vers la Terre. Conformément à la politique d'EUMETSAT en matière de données, si un État membre souhaite acheter une station capable de recevoir des données d'image brutes, cet État membre devra avoir un accès immédiat aux paramètres de traitement d'image associés extraits sur le site central.

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

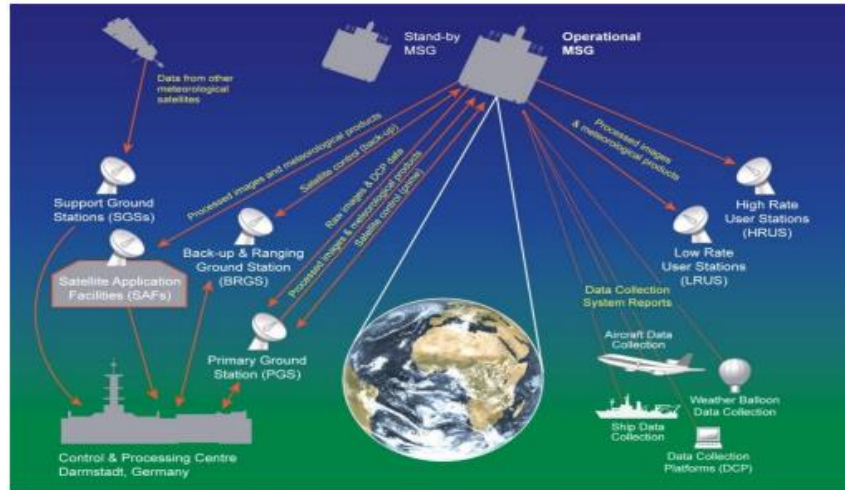


Figure II.11. Le réseau de MSG

### II.2.7. Comparaison entre METEOSAT/MSG

Le tableau ci-dessous présente les différentes caractéristiques...

Tableau II.3. Les caractéristiques des satellites Météosat

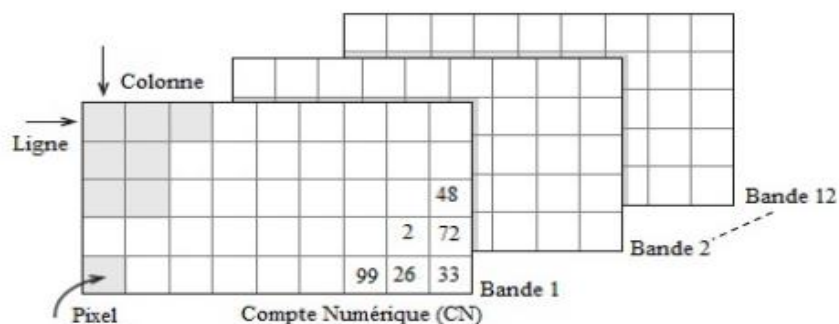
Satellite METEOSAT 1ere Génération	Satellite METEOSAT 2 <sup>eme</sup> Génération
Radiomètre imageur avec 3 canaux	Radiomètre imageur amélioré avec 12 canaux
Structure stabilisé par rotation 100 tr/mn	Structure stabilisé par rotation 100 tr/mn
Moteur d'apogée au propergol solide	Système de propulsion bi-liquide unifié
Maintien en position : 5 ans	Maintien en position : 7 ans
Puissance requise : 200 watt	Puissance requise : 600 watt
720 kg au moment du transfert en orbite géostationnaire GTO	2000 kg au moment du transfert en orbite géostationnaire GTO
Qualification pour emport sur Delta 2914 et Ariane 1, 2,3	Qualification pour emport Ariane 4 et 5, Atlas 1

## Chapitre 02 : La télédétection et Les Images satellitaires MSG

Distance d'échantillonnage: 2,25Km pour le visible (VIS) et 5Km pour l'infrarouge et vapeur d'eau (IR et WV)	Distance d'échantillonnage 1km pour HR VIS et 3Km pour les 11 canaux
La taille du pixel : 2.25Km pour le visible et de 5Km pour le IR et WV	La taille du pixel : 1,4 Km pour HR VIS et de 4.8 Km pour les autres
Diamètre télescopique : 400 mm	Diamètre télescopique : 500 mm
N <sup>bre</sup> de détecteurs : 4	N <sup>bre</sup> de détecteurs : 42
Fréquence d'acquisition : 30 mn	Fréquence d'acquisition : 15 mn

### II.2.8. Caractéristiques des images MSG

Le capteur SEVIRI mesure l'énergie électromagnétique réfléchié ou émise par la surface de la Terre, et les données de l'image satellite MSG sont plus qu'une image. Les données de l'image sont enregistrées sous la forme d'une matrice de lignes et de colonnes qui représente la totalité de la zone balayée par le capteur. Un pixel est un élément de la matrice ou un carré dans lequel la mesure est enregistrée sous forme de valeur numérique ou de comptage numérique pour chaque pixel (NC). Une image distincte (couche) est conservée pour chaque bande de longueur d'onde mesurée (**figure II.12**) [27].

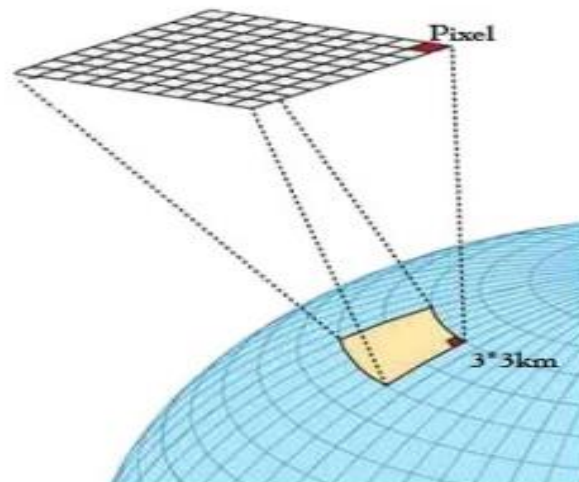


**Figure II.12.** Caractéristique des images MSG [27]

Les images MSG sont caractérisées par leurs résolutions spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle.

### II.2.8.1. Résolution spatiale

Représente la mesure des objets les plus petits discernés par le capteur SEVIRI du satellite MSG ou alors la surface du sol représentée par chaque pixel [28]. Chaque pixel représente une superficie de 1 kilomètre sur 1 kilomètre pour l'image HRV et de 3 kilomètres sur 3 kilomètres pour les autres images (**voir figure II.13**). La taille du pixel au sol est une caractéristique importante puisque c'est elle qui déterminera les éléments pouvant être distingués sur une image.



**Figure II.13** La résolution spatiale [28]

### II.2.8.2. Résolution spectrale

La résolution spectrale décrit le nombre et la largeur des bandes spectrales. L'intervalle de longueur d'onde spécifique dans le spectre électromagnétique varie d'une bande à une autre [29], par exemple l'intervalle du canal spectral VIS 0.8 = [0.74 – 0.88  $\mu\text{m}$ ]. Si l'intervalle est petit donc la résolution spectrale est fine sinon elle est grossière, par exemple l'eau ou la végétation ne nécessitent pas une résolution spectrale fine, à l'inverse des roches et minéraux qui réclament l'utilisation d'un intervalle de longueurs d'onde beaucoup plus fine (**voir figure II.14**). Si la résolution spectrale est trop grossière, il ne sera alors plus possible de bien différencier les différents minéraux. Si le capteur contient plusieurs bandes spectrales (plus de 2 et moins de 20 bandes), elles sont appelées multi-spectrales et si le nombre de bandes spectrales est exprimé en centaines, elles sont appelées hyper-spectrales

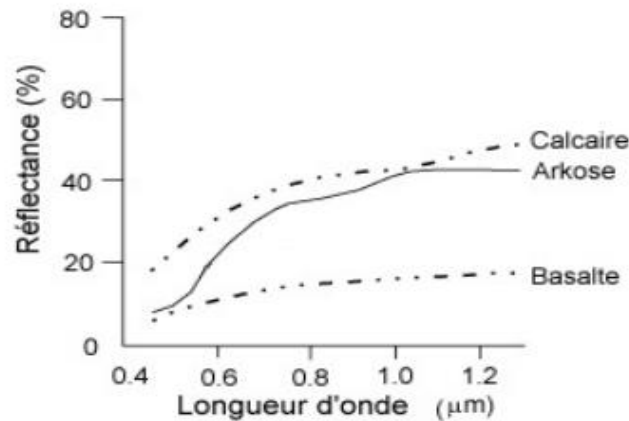


Figure II.14. La résolution spectrale [29]

### II.2.8.3. Résolution radiométrique

La résolution radiométrique [30] est la précision avec laquelle le capteur SEVIRI divise la mesure énergétique qu'il reçoit dans chaque bande, exprimée en nombre de bits par lequel l'énergie enregistrée est répartie dans le fichier image. Pour 8 bits, il existe  $2^8$  (entre 0 et 255) valeurs radiométriques possibles, chaque valeur radiométrique est représentée par un niveau de gris, la valeur 0 indique les rayons non arrivés au capteur et donc avec une couleur noir dans l'image visible, puis ce numéro varie selon l'intensité des rayons jusqu'à ce qu'atteigne un nombre numérique maximal 255 qui représente la couleur blanche (voir figure II.15).

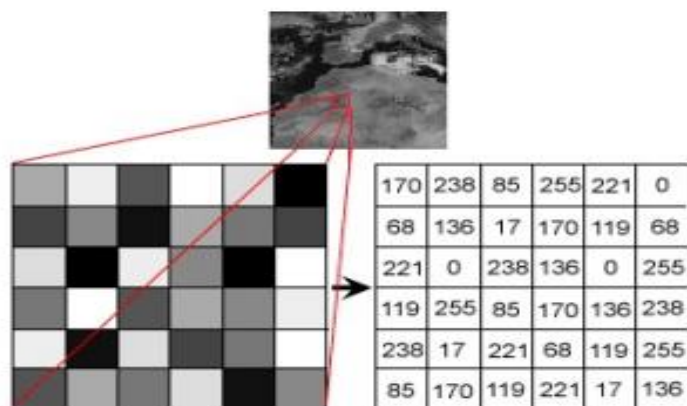
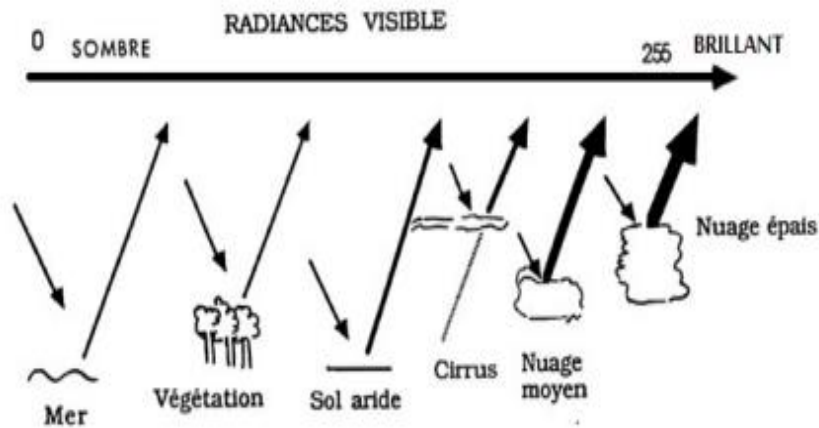
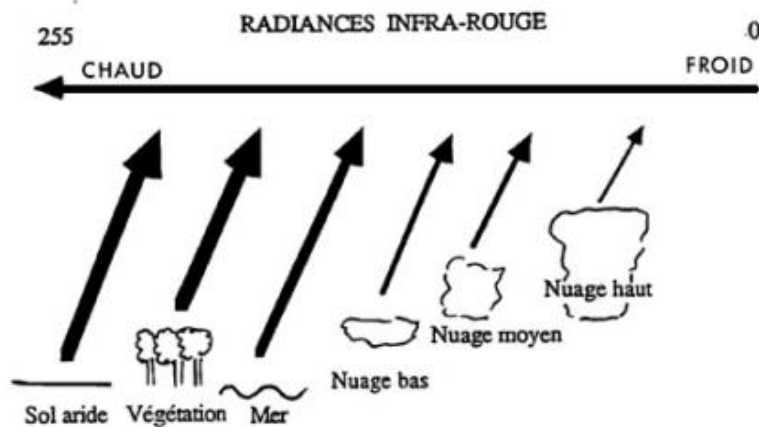


Figure II.15. La résolution radiométrique [30]

La mesure radiométrique (valeur d'un pixel) de l'image visible ou infrarouge est variée selon l'objet ciblé [31] comme montrent les deux figures (figure II.16 et figure II.17).



**Figure II.16.** Les mesures radiométriques en fonction de l'objet ciblé dans une image visible [31]



**Figure II.17.** Les mesures radiométriques en fonction de l'objet ciblé dans une image infrarouge [31]

L'intensité mesurée par le capteur SEVIRI est codée numériquement à l'origine sur 10 bits [26], pour des raisons de commodités, elle est codée sur ordinateur sur 8 bits ou sur 16 bits (comme notre cas).

#### II.2.8.4. Résolution temporelle

La résolution temporelle est une mesure de cycle ou de la fréquence de répétition avec laquelle un capteur revisite la même partie de la surface de la Terre [29], c'est-à-dire le temps entre deux acquisitions d'images successives au même endroit sur Terre, le satellite MSG peut prendre des images de la même région toutes les 15 minutes.

### II.9.Eumetsat

EUMETSAT est une organisation intergouvernementale [32] basée à Darmstadt, en Allemagne, qui a été créée par une convention internationale signée par 18 pays européens : Autriche, Belgique, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Norvège, Portugal, Espagne, Suède, Suisse, Turquie et Royaume-Uni. Ces pays contribuent aux programmes d'EUMETSAT et sont les principaux utilisateurs des satellites. EUMETSAT compte un certain nombre de pays coopérants (Bulgarie, Croatie, République tchèque, Hongrie, Lettonie, Lituanie, Slovaquie, Pologne, République de Serbie et Monténégro, Slovénie et Roumanie). L'objectif fondamental d'EUMETSAT est de créer, maintenir et exploiter des systèmes de satellites météorologiques européens opérationnels, ainsi que de contribuer à la recherche climatique et à la détection des changements climatiques. Les données, produits et services satellitaires fournis par EUMETSAT sont essentiels pour les prévisions météorologiques et la surveillance opérationnelle du climat et du changement climatique à l'échelle mondiale.

### II.10. Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre les bases de la télédétection depuis l'espace, ainsi que certains satellites météorologiques. Ceux-ci fournissent des données extrêmement précieuses pour la détection et le suivi des changements climatiques. Les images satellitaires sont un excellent outil pour suivre les changements et l'évolution de l'atmosphère. Ces images donnent des interprétations automatisées après avoir effectué les prétraitements et traitements nécessaires.

# **Chapitre III**

## Résultats et Interprétations

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter Les réseaux neuronaux convolutifs, qui ont de larges applications dans la reconnaissance d'image et vidéo, les systèmes de recommandation et le traitement du langage naturel.

Dans la littérature, il existe plusieurs façons de calculer l'énergie solaire arrivant sur la terre en utilisant le traitement d'images. Pour nos recherches, nous avons utilisé deux modèles : le modèle GISTEL, qui permet de reconstruire le développement du rayonnement solaire à l'échelle horaire et quotidienne sur n'importe quel site, et le modèle de régression linéaire basé sur l'apprentissage profond. Nous avons utilisé MATLAB et Python pour effectuer les simulations. Dans cette partie, Nous avons examiné comment utiliser le modèle GISTEL et la régression linéaire.

### III.2. Réseaux de neurones convolutifs

Les réseaux neuronaux convolutifs ont de larges applications dans la reconnaissance d'image et vidéo, les systèmes de recommandation et le traitement du langage naturel.

Les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) sont un type de réseau neuronal qui s'est révélé particulièrement efficace pour la reconnaissance et la classification des images. Les CNN se sont avérés efficaces pour reconnaître des visages, des objets, des panneaux de signalisation et des voitures autonomes. Dans la machine learning ML, un réseau convolutif est un type de réseau de neurones feed-forward, il a été inspiré par des processus biologiques .Il existe quatre (4) principales opérations illustrées dans le CNN à savoir :

- La couche convolution.
- La couche Rectified Linear Unit.
- La couche Pooling.
- La couche entièrement connectée.

#### III.2.1. Architecture de système

Pour commencer, nous allons former le réseau neuronal convolutif de base le plus simple.

En entrée, il dispose d'une base de données et de paramètres entraînaibles. Il est composé de couches de réseaux neuronaux convolutifs, une couche de mise en commun maximale suit

chaque couche convolutionnelle , puis une couche entièrement connectée. Relu sera employé comme fonction d'activation.

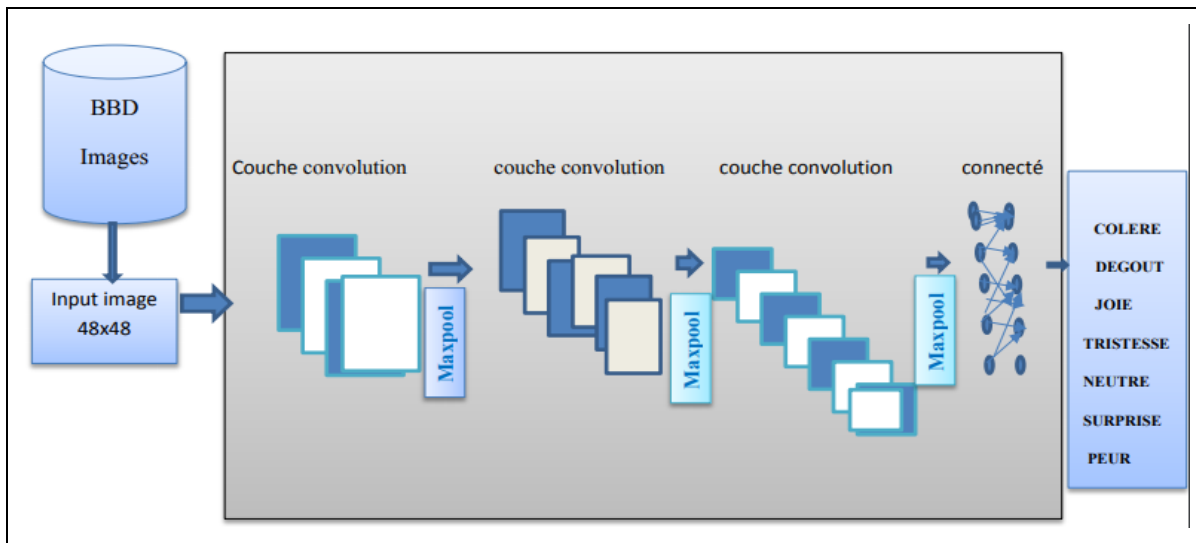


Figure III.1. Architecture générale d'un CNN

### III.2.2. Différentes couches de CNN

Il existe trois principales opérations dans le CNN, tout en ayant un rôle bien défini :

#### a) étape de convolution

La convolution est au cœur du réseau de neurones convolutifs. À l'origine, une convolution est une technique mathématique (connue sous le nom de produit de convolution) couramment utilisée dans l'édition d'images pour extraire les caractéristiques des images d'entrée afin d'appliquer un filtre efficace. Une convolution prend une image et un filtre (qui est une autre image) en entrée, effectue certains calculs, puis produit une nouvelle image (généralement plus petite).

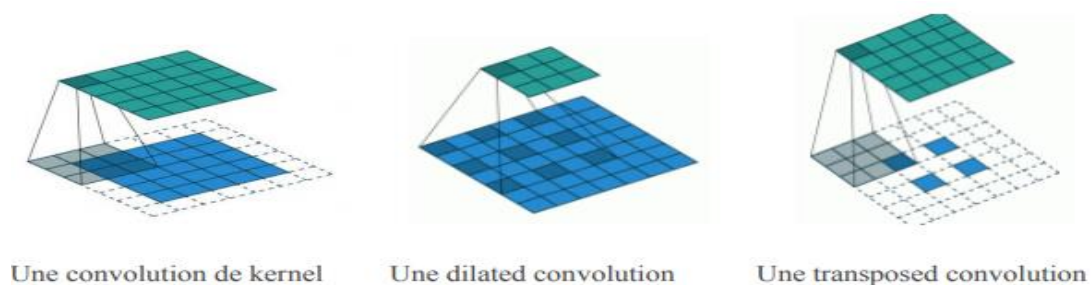


Figure III.2. Différents types de convolutions

### b) étape de pooling

Il aide à réduire la taille de chaque carte de caractéristiques tout en conservant les données les plus importantes. Il peut être de plusieurs sortes, comme le maximum, la moyenne, le total, et ainsi de suite. Dans le cas d'une mise en commun maximale, un voisinage spatial (par exemple, une fenêtre de 2) est choisi, et l'élément le plus important de cette fenêtre est sélectionné. La fonction de mise en commun réduit progressivement la taille de la carte des caractéristiques corrigées, en particulier la mise en commun :

- Rend les représentations d'entrée plus petites et plus faciles à gérer,
- Réduit le nombre de paramètres et les calculs dans le réseau ,
- Rend le réseau invariant aux petites transformations, les distorsions et les translations dans l'image d'entrée (une faible distorsion en entrée ne change pas la sortie de la Pooling - car nous prenons le maximum / valeur moyenne dans un voisinage local).

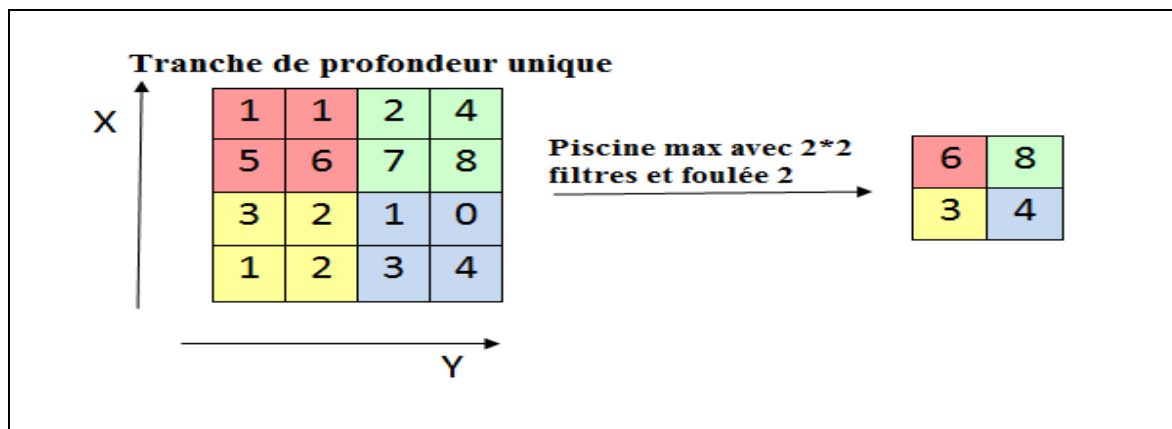


Figure III.3. Exemple de description de la couche pooling

### c) Couche totalement connectée

Dans la couche de sortie, la couche entièrement connectée est un perceptron multicouche (MLP) standard avec une fonction d'activation softmax (d'autres classificateurs tels que le SVM peuvent également être utilisés). Chaque neurone de la couche précédente est lié à chaque neurone de la couche suivante, selon l'expression "complètement connecté."

La sortie des couches de convolution et de mise en commun représente les caractéristiques de haut niveau de l'image d'entrée. L'objectif de la couche entièrement connectée est de

permettre à ces fonctions d'être utilisées pour catégoriser l'image d'entrée en groupes distincts en fonction de l'ensemble de données d'entraînement.

### III.3. Python



Python est un langage de programmation interprété et multiplateformes. Il est objet orienté. Nous l'avons utilisé comme langage de script et de développement pour la création de nos algorithmes et applications. Il est particulièrement répandu dans le monde scientifique, et possède de nombreuses bibliothèques optimisées destinées au calcul numérique. [33]

#### III.3.1. Keras

Keras est une API de réseau de neurones écrite en langage Python. Il s'agit d'une bibliothèque Open Source, exécutée par-dessus des frameworks tels que Theano et TensorFlow.

Conçue pour être modulaire, rapide et simple d'utilisation, Keras a été créée par l'ingénieur François Chollet de Google. Elle offre une façon simple et intuitive de créer des modèles de Deep Learning. [34]

```
#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]` : image de taille 7x7.

`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.

```

all_mae_histories = []
num_epochs = 200
all_scores = []
m=100
import xlswriter
import matplotlib.pyplot as plt
print("[INFO] training model...")
for j in range(m):
    history=[]
    # partition the data into training and testing splits using 75% of
    # the data for training and the remaining 25% for testing
    split = train_test_split(df, images, test_size=0.25, random_state=None)
    (trainAttrX, testAttrX, trainImagesX, testImagesX) = split

    n_train=len(trainImagesX)
    #print(trainImagesX.shape)
    trainY = trainAttrX #/ max_sortie
    testY = testAttrX#/ max_sortie
    #print(testY)

    history=model.fit(trainImagesX, trainY, validation_data=(testImagesX, testY),
                      epochs=num_epochs, batch_size=10, verbose=0)
    mae_history = history.history['val_loss']
    moy_MAE=np.mean(mae_history)
    print(moy_MAE)

```

**Figure III.5.** Entraînement du modèle utilisé de Keras

**Avec :**

num\_epochs : nombre d'epochs, égale à 200,

train\_ImagesX : données d'entraînement d'entrée,

train\_Y : données d'entraînement de sortie,

test\_ImagesX : données d'évaluation d'entrée,

test\_Y : données d'évaluation de sortie,

val\_loss : valeur d'erreur moyenne absolue pour l'étape d'évaluation (données du test)

```

#Predictions
preds = model.predict(images_eval)
preds_final=preds#*max_sortie[0]
#print(preds_final)
#(preds.shape)
p=preds_final
p=p.reshape(len(preds_final),)

a=abs(p-Y)
b=a/240
c=sum(b)
c.shape
print(c)

```

**Figure III.6.** Programme pour la prédiction

## Chapitre 03 : Résultats et Interprétations

C : données pour être prédit, ces données sont constituées de plus de 1300 images nouvelles (ne sont pas utilisés dans l'apprentissage) à partir des dates et horaires différentes.

### III.3.2. Tensorflow

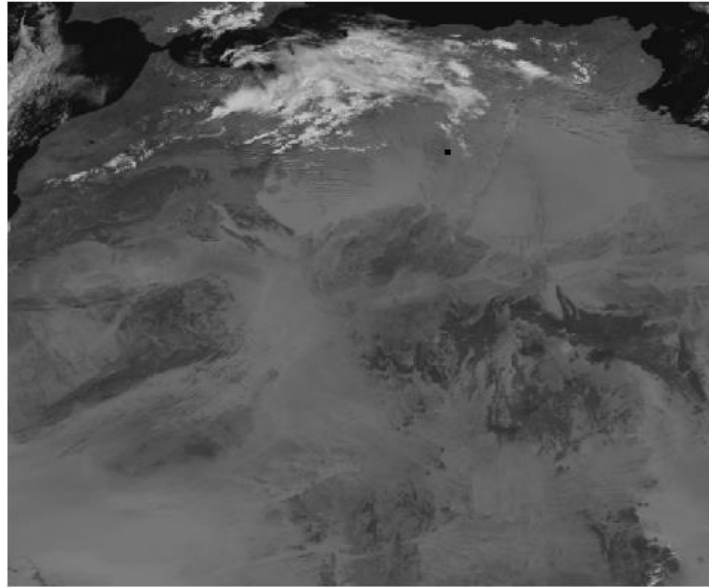
TensorFlow est une plate-forme Open Source de bout en bout dédiée à la machine learning. Elle propose un écosystème complet et flexible d'outils, de bibliothèques et de ressources communautaires permettant aux chercheurs d'avancer dans le domaine du machine learning, et aux développeurs de créer et de déployer facilement des applications qui exploitent cette technologie. [35]

### III.4. Extraction de zone d'étude

Nous avons utilisé les images Meteosat de deuxième génération (MSG) d'EUMETSAT dans cette étude. Ces images, qui englobent l'ensemble du disque terrestre, sont composées de  $3712 \times 3712$  pixels codés à 10 bits et recueillis dans le canal visible (VIS008) de tous les jours en juin 2015. On cherche à savoir où se trouve le gisement solaire en Algérie, qui se situe entre  $18^\circ$  et  $38^\circ$  de latitude nord, et  $8^\circ$  et  $13^\circ$  de longitude. En introduisant ces coordonnées, et en convertissant les coordonnées géographiques en coordonnées d'image, nous avons découpé chaque image en  $605 \times 685$  pixels représentant l'Algérie.

L'approche utilisée pour estimer le rayonnement solaire global au sol consiste d'abord à extraire la région de recherche des images, qui représente l'Algérie, en établissant une connexion entre le point au sol des coordonnées géographiques (latitude et longitude) et les coordonnées des pixels (N de la ligne et M de la colonne).

Notre région de recherche est une image de  $605 \times 685$  pixels centrée entre les lignes 611 et 1216 et les colonnes 1545 et 2230. Le site de Ghardaa (Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables URAER) a ensuite été placé sur le pixel  $156 \times 425$  de l'image extraite à proximité des coordonnées géographiques ( $3,78$  et  $32,38^\circ$ ).



**Figure III.7.** Zone d'étude extraite d'une image plein disque prise le 01 juin 2015 à 1200 UTC

### III.5. Méthode Gistel

#### III.5.1. Trouble de Linke

Pour comparer les atmosphères réelles et idéales, on utilise le facteur de perturbation Linke. Sa valeur est déterminée par la région géographique de l'étude (industrielle ou montagneuse, rurale ou urbaine). Nous avons utilisé les valeurs moyennes de la base de données du service SODA, car il est difficile de déterminer le facteur de perturbation Linke pour chaque site.

#### III.5.2. Conversion des comptes numériques en radiance

Le capteur SEVIRI du satellite MSG détecte l'énergie libérée ou réfléchiée par le système terre-atmosphère. Les valeurs obtenues sont les comptages numériques recueillis pour chaque pixel de l'image. Ces données doivent être calibrées afin de relier les comptages numériques de chaque pixel à la quantité d'énergie reçue par le satellite pour ce pixel. A cet effet, EUMETSAT a fourni des coefficients d'étalonnage et des algorithmes pour convertir les comptages numériques en radiances en  $W/m^2/sr$ .

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

$$R = CN \times CAL\_slope + CAL\_offset \quad (III.1)$$

Avec :

R : radiance ( $W/m^2/sr$ )

CN : le compte numérique

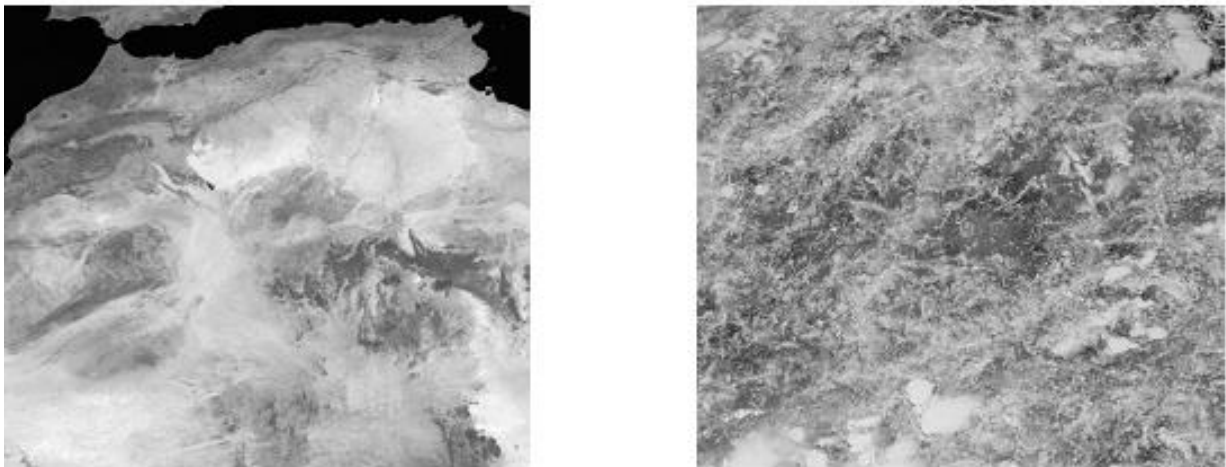
CAL\_slope et CAL\_offset : des coefficients de calibration.

### III.5.3. Détermination des deux images de référence

Les coefficients de réflexion mesurés en ciel clair  $R_c$  et en ciel totalement couvert  $R_n$  sont les deux images de référence. Ces images ont été créées à partir d'une succession prises à 12 :00 pendant 92 jours (juin, juillet et août 2015).

L'image de référence de ciel clair est créée en donnant la plus petite valeur du coefficient de réflexion à chaque pixel qui apparaît au moins une fois dans la série d'images.

Au cours de la même série d'images, les pixels présentant la valeur maximale du coefficient de réflexion ont été sélectionnés pour créer l'image de référence d'un ciel totalement couvert. Les deux images de référence sont présentées ci-dessous.



**Figure III.8.** Les deux images de référence à droite : l'image de ciel nuageux, à gauche : l'image de ciel clair

### III.6. Méthode de régression linéaire

Un modèle de régression linéaire est un modèle de régression qui tente de créer un lien linéaire entre une ou plusieurs variables  $x$ , appelées variables explicatives, et une variable  $y$ , appelée variable expliquée. Il est également connu sous le nom de modèle de régression linéaire ou de modèle linéaire. Dans notre application nous avons utilisé la bibliothèque d'apprentissage approfondi Keras.

Keras a la capacité de fonctionner au-dessus des principales bibliothèques d'apprentissage profond comme TensorFlow, Theano. Il dispose également d'une API (interface de

programmation d'applications) simple qui offre une grande polyvalence. Keras est donc simple à comprendre et à utiliser.

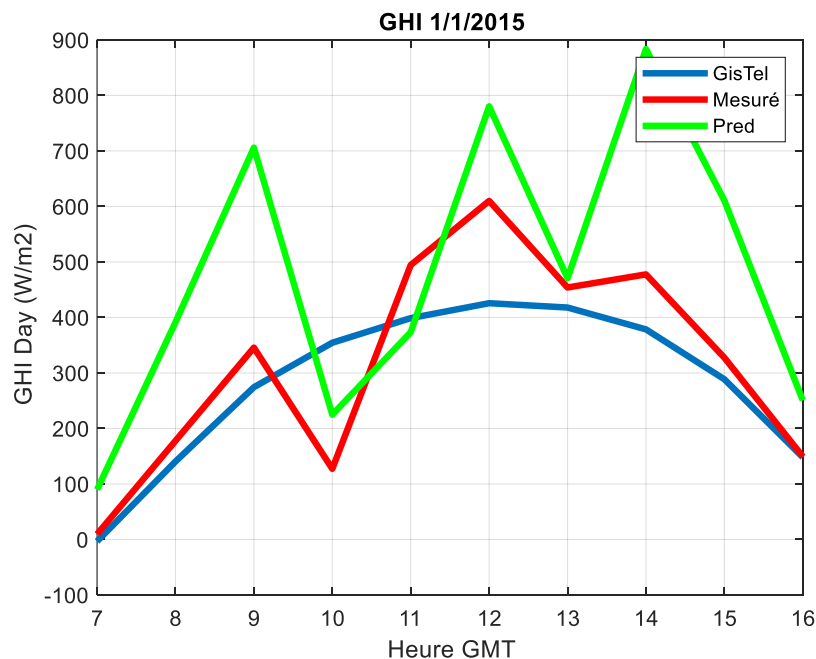
Notre deuxième méthode est basée sur la régression linéaire à l'aide de Keras et Python.

Avant tout il faut mentionnée que notre base de données d'entrée est composée d'une matrice de taille 7x7 qui représente les valeurs des pixels (site URAER) prises à partir d'une série de plus de 1300 images MSG pour défèrent dates de l'année 2015 (heures, jours, mois).

### III.7. Présentation des Résultats

Le rayonnement solaire horizontal global (UREAR) du site de Ghardaa est calculé à l'aide de deux approches (Gistel et régression linéaire par apprentissage profond), puis comparé aux données recueillies sur le terrain pour les mêmes périodes et dates.

Les figures ci-dessous montrent les résultats de l'estimation de la radiance globale pour le site de Ghardaa (URAER) à différentes heures, jours et mois en 2015.



**Figure III.9.** Rayonnement solaire global horaire GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/1/2015

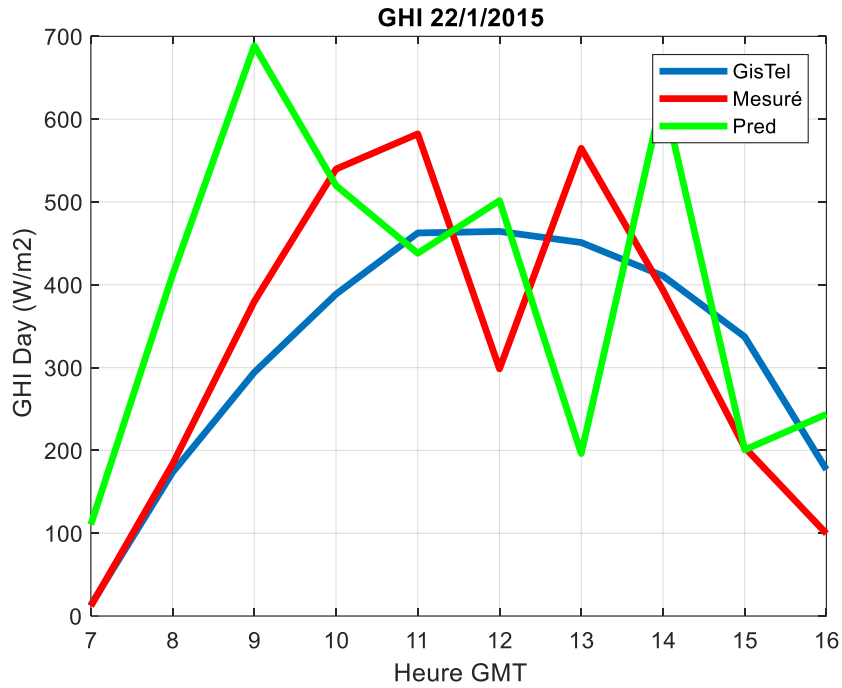


Figure III.10. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 22/1/2015

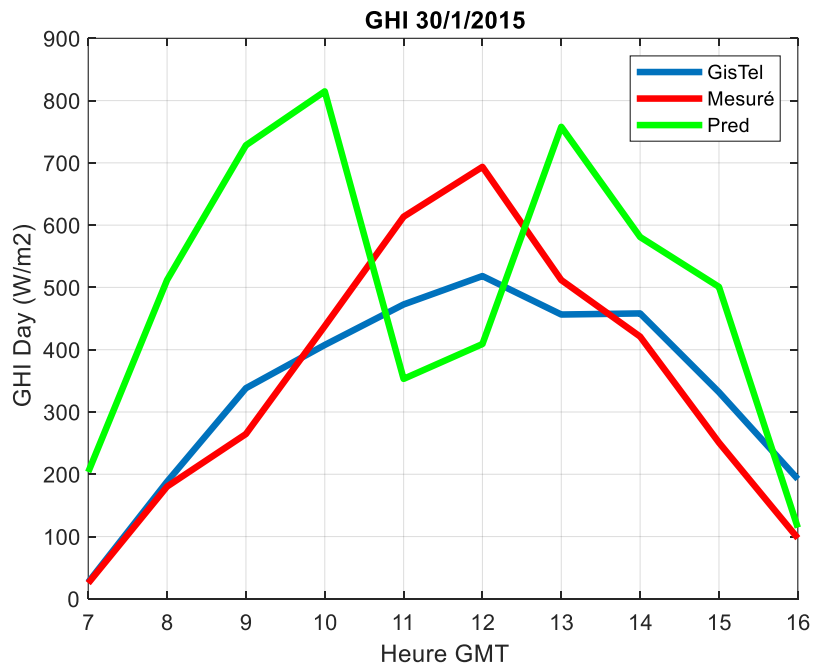


Figure III.11. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/1/2015

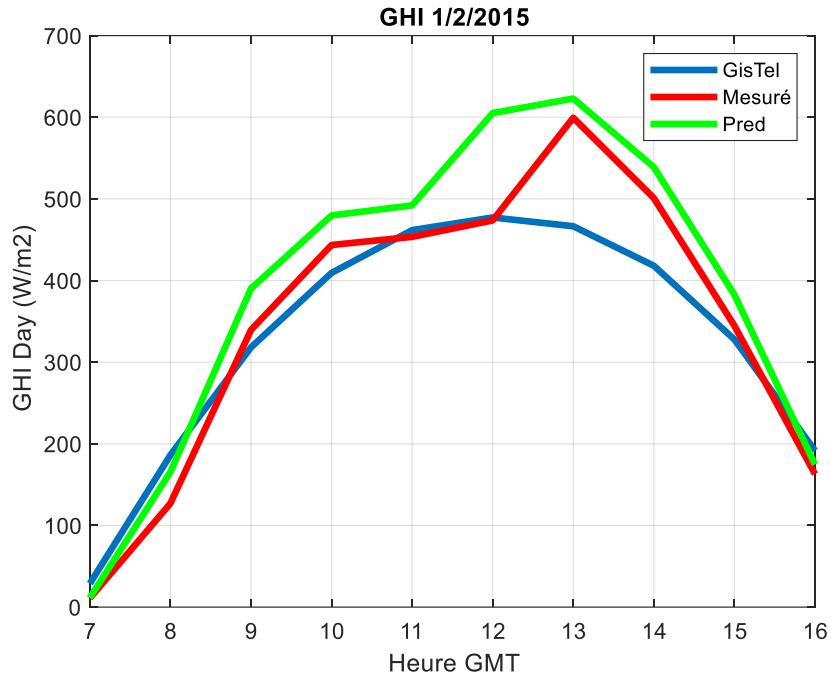


Figure III.12. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/2/2015

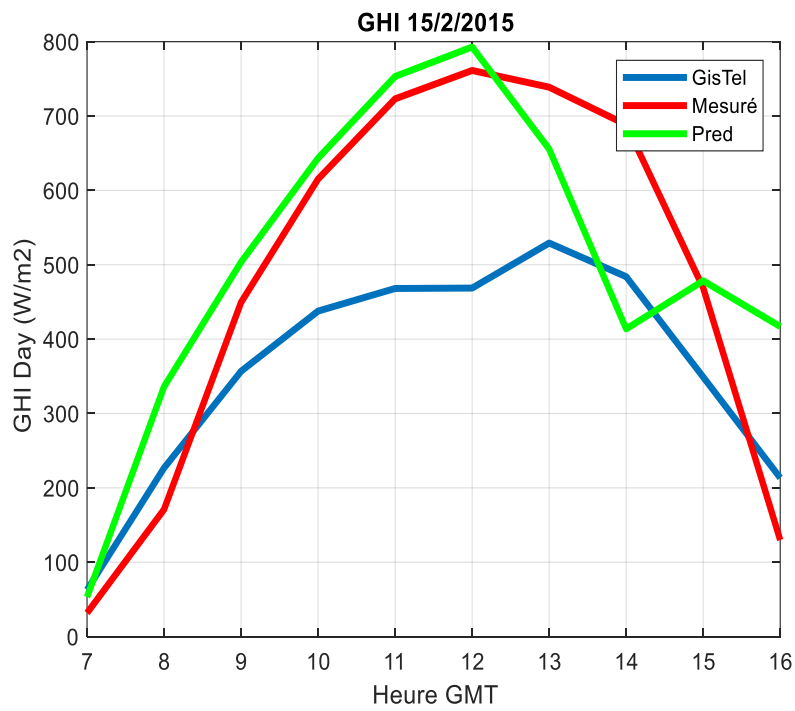


Figure III.13. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 15/2/2016

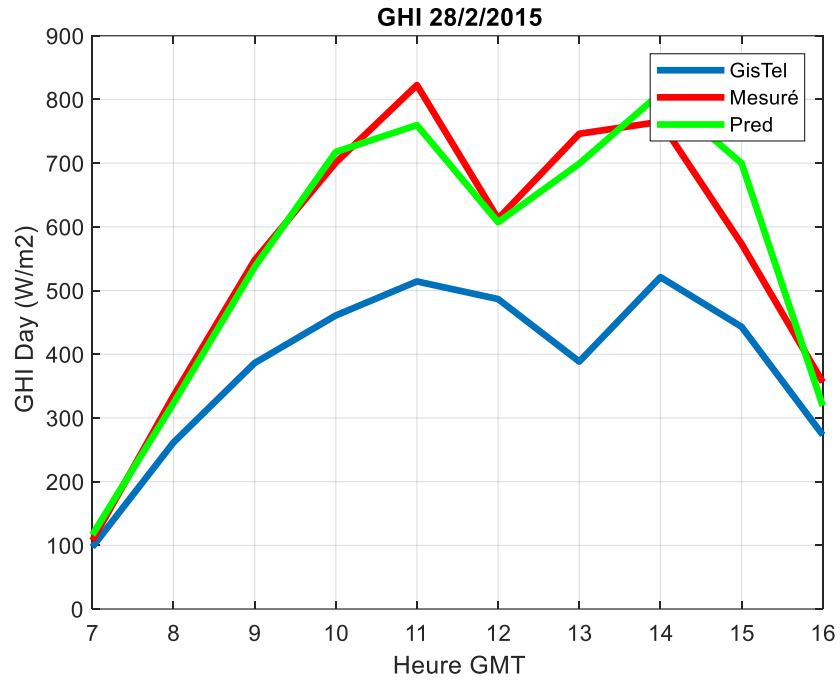


Figure III.14. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 28/2/2015

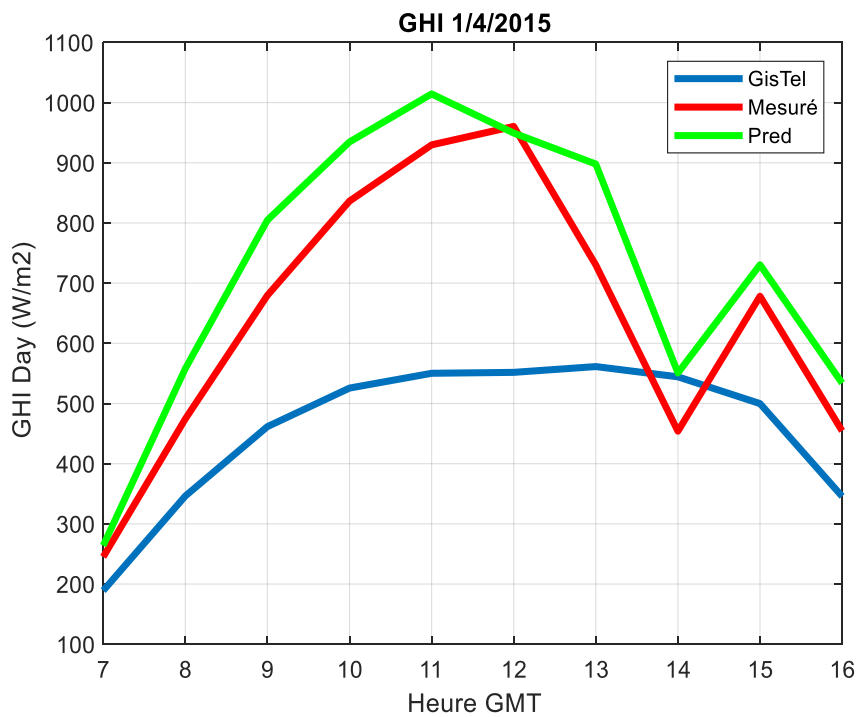


Figure III.15. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/4/2016

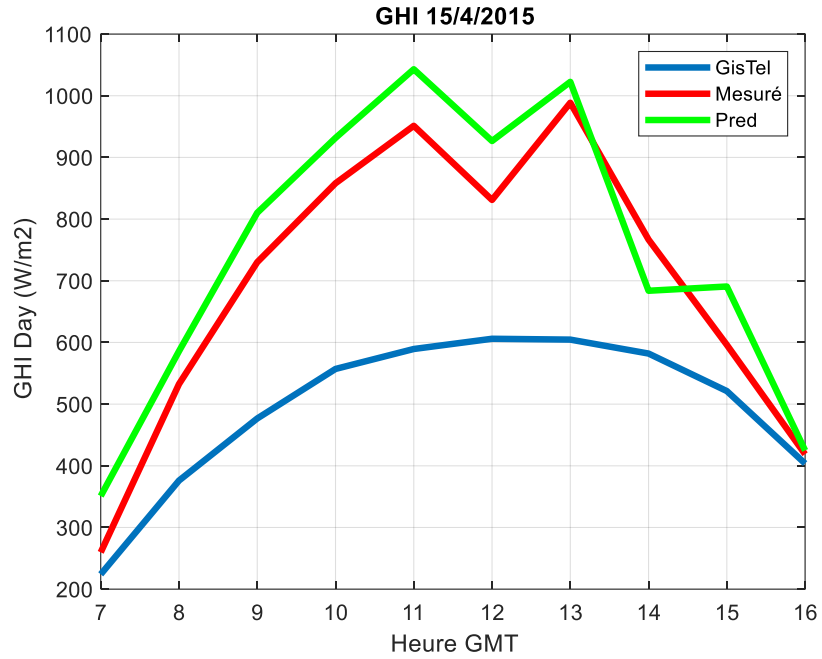


Figure III.16. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 15/4/2015

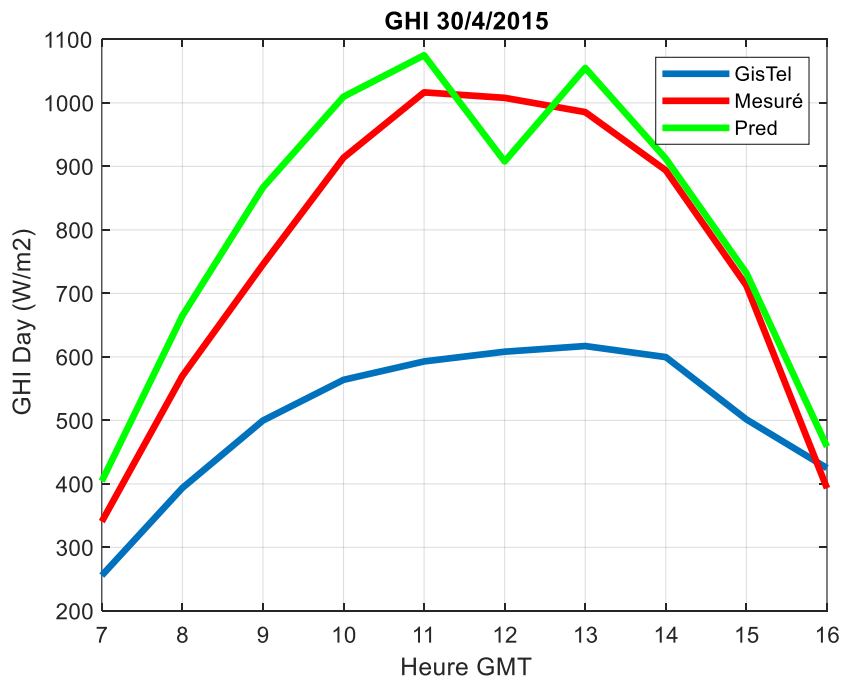


Figure III.17. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/4/2015

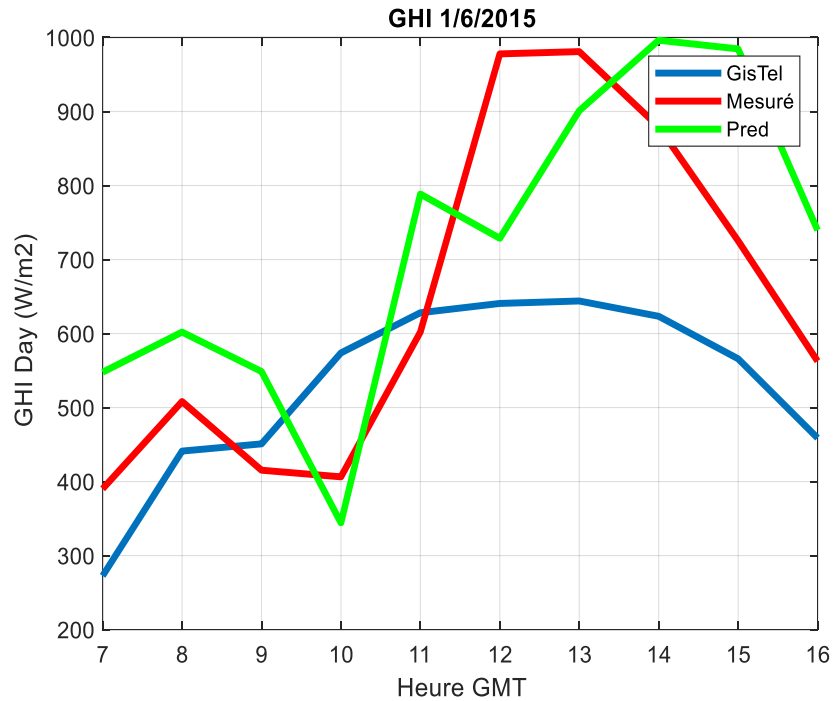


Figure III.18. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/6/2015

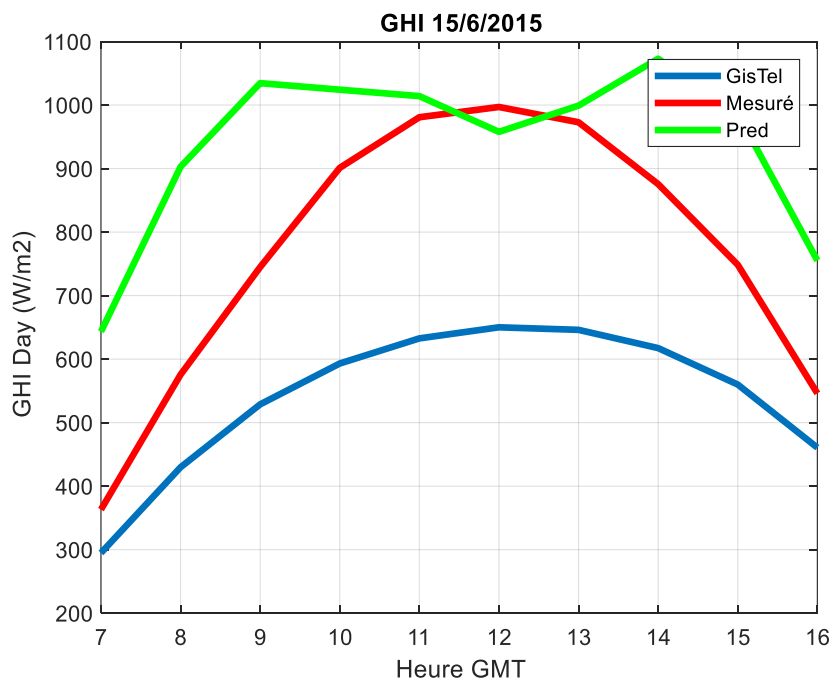


Figure III.19. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 15/6/2015

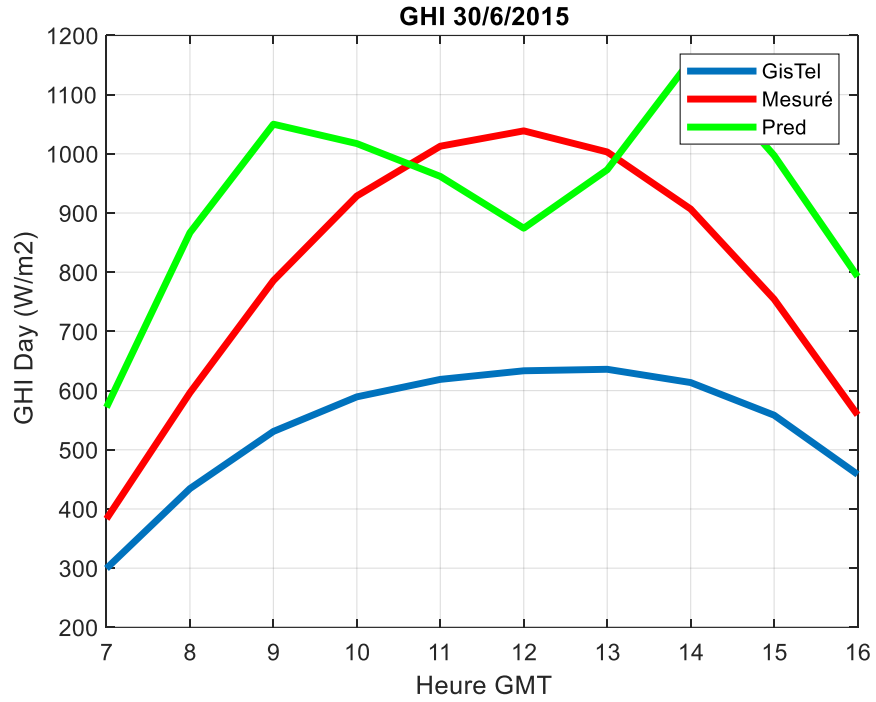


Figure III.20. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/6/2015

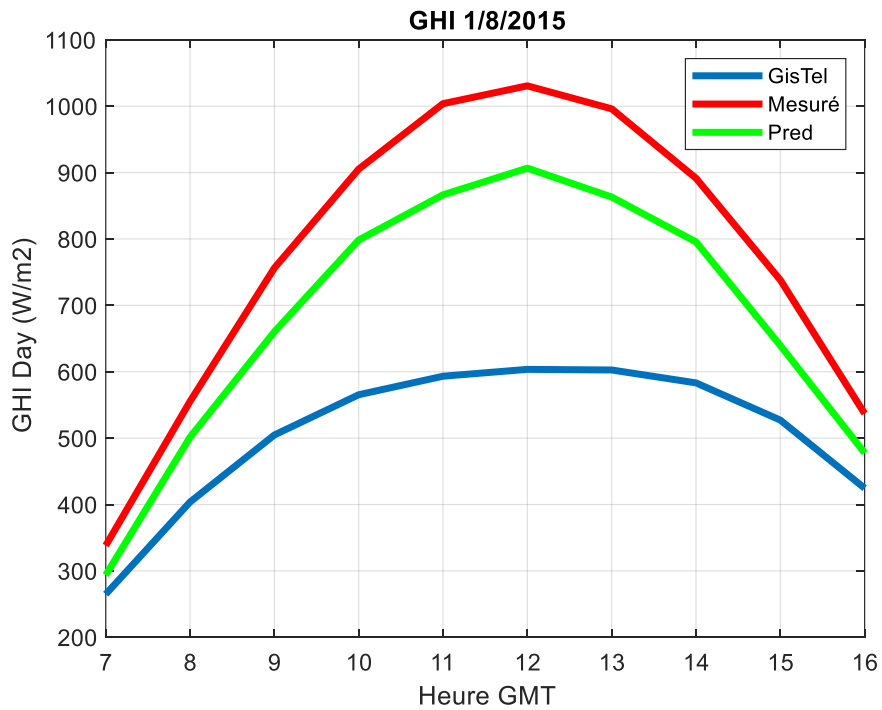


Figure III.21. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/8/2015

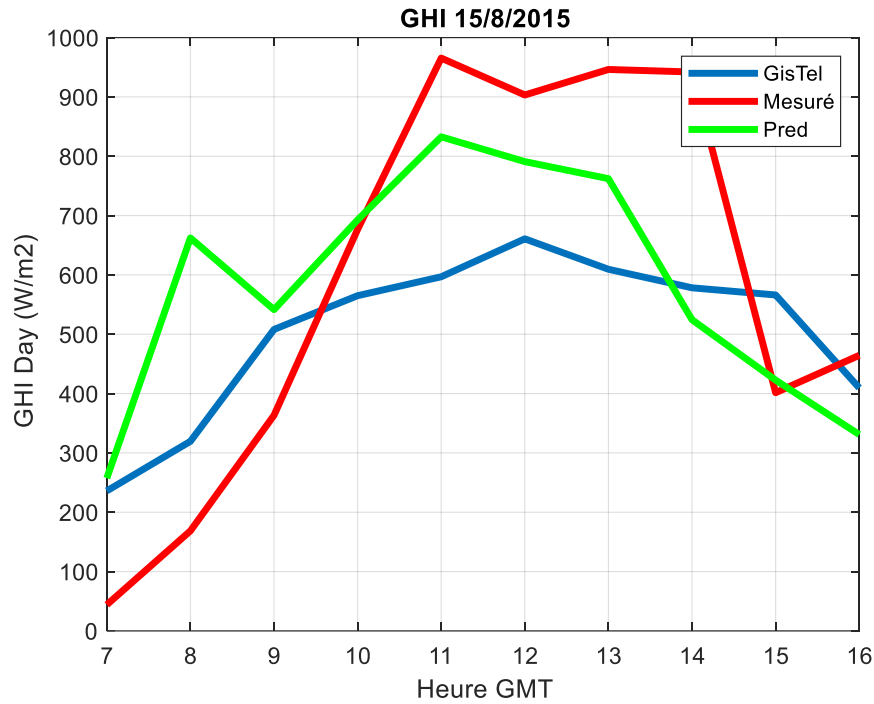


Figure III.22. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 15/8/2015

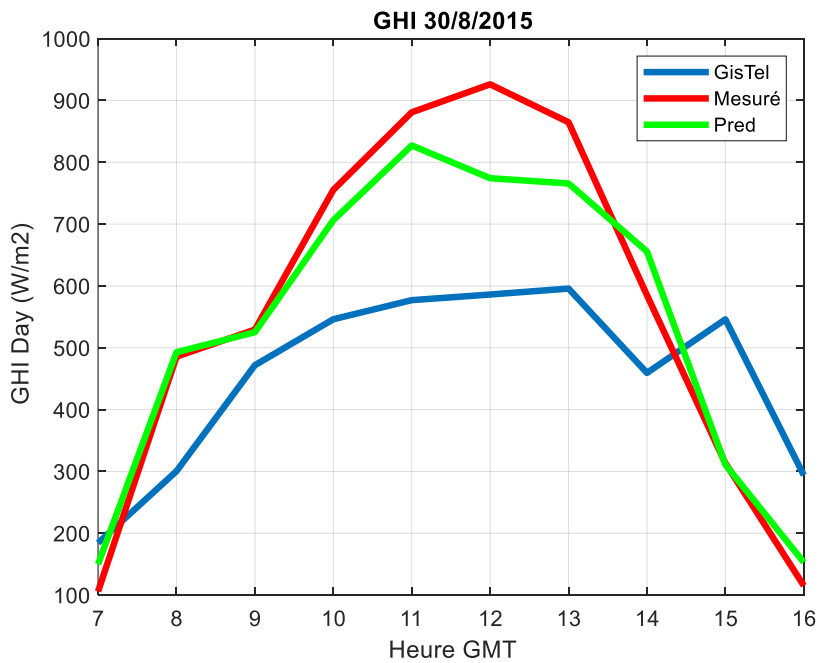


Figure III.23. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/8/2015

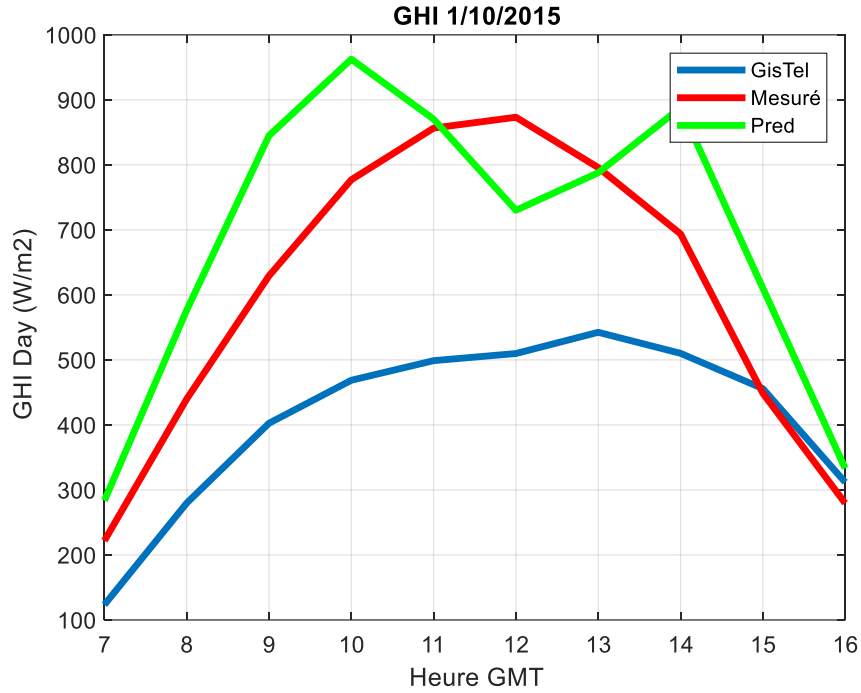


Figure III.24. III.21 mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/10/2015

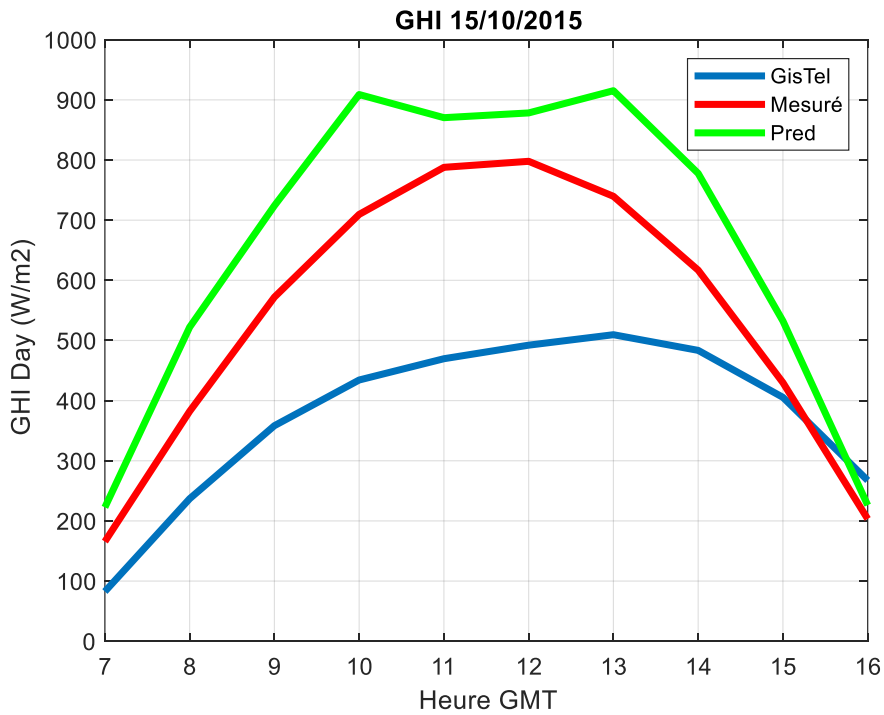


Figure III.25. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 15/10/2015

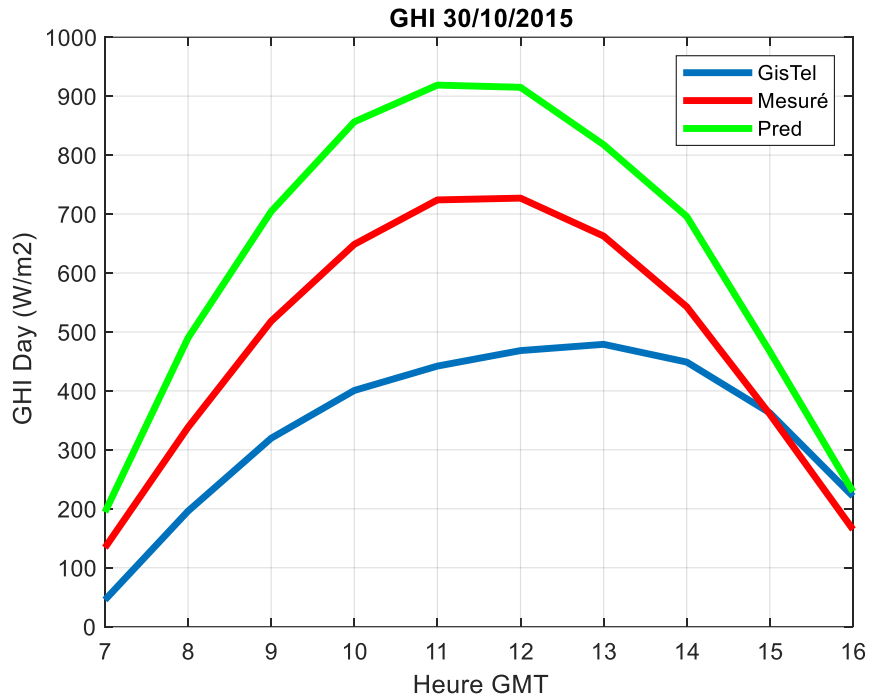


Figure III.26. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/10/2015

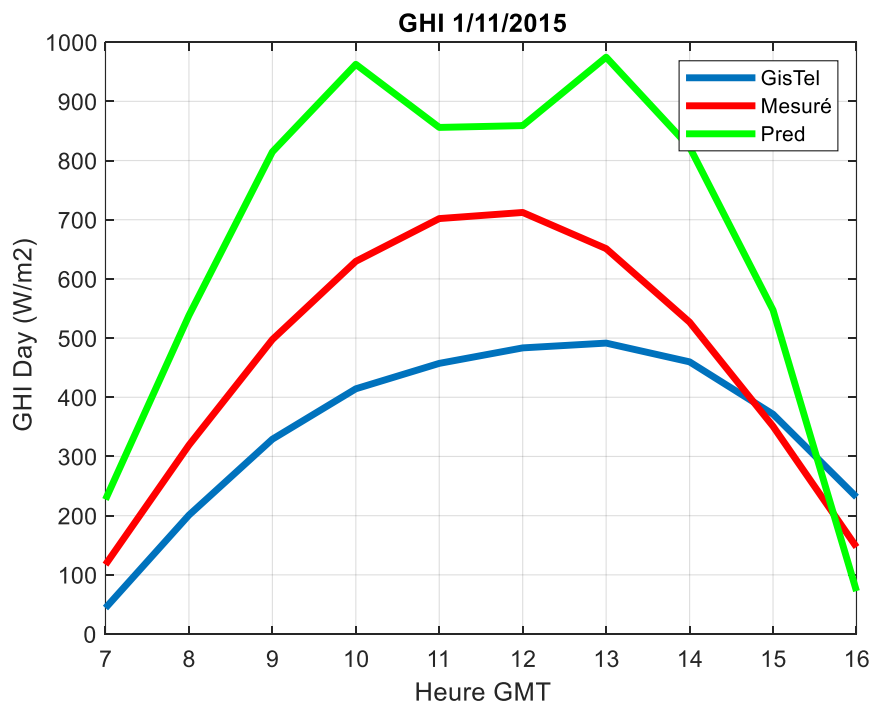
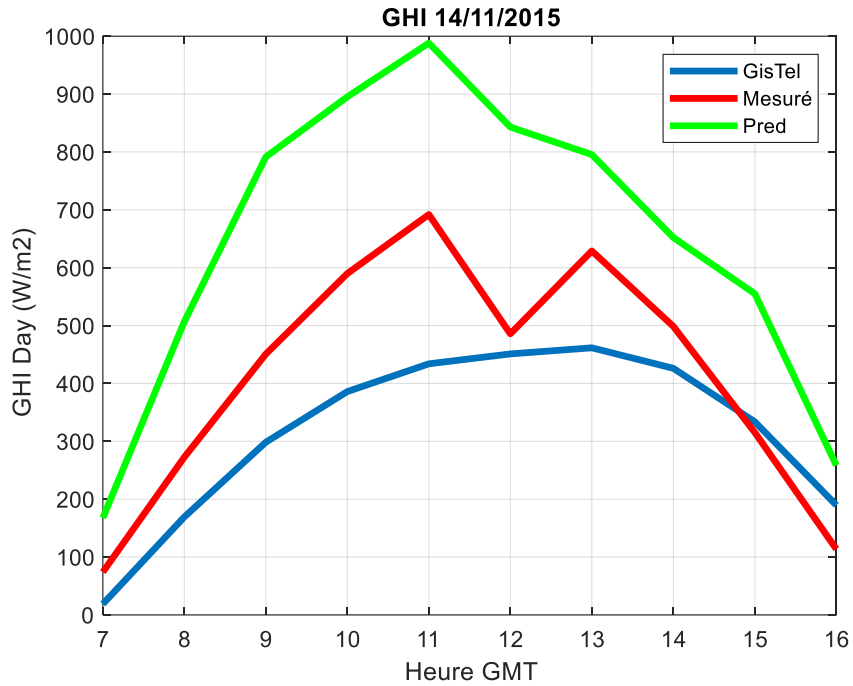
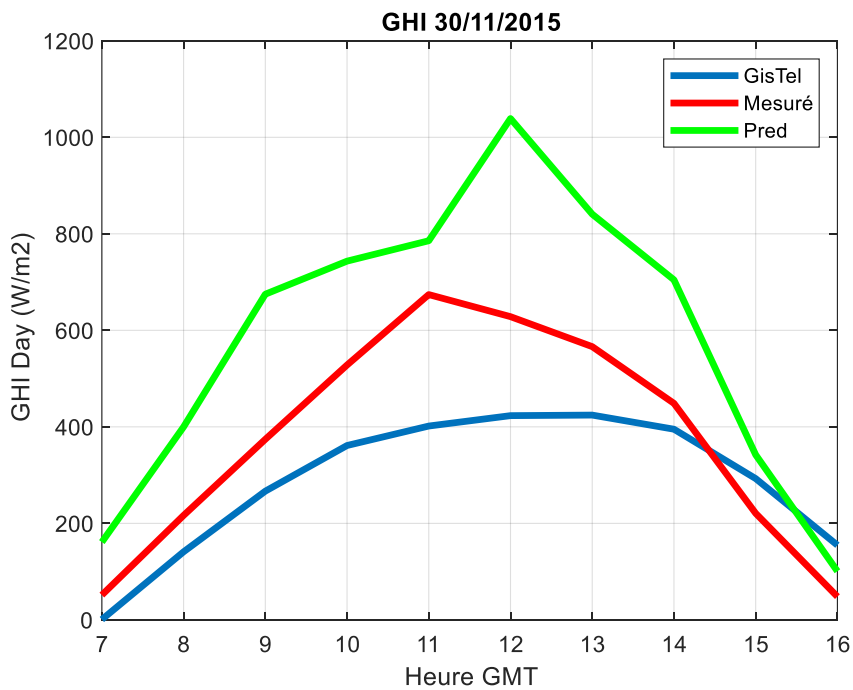


Figure III.27. GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 1/11/2015



**Figure III.28.** GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 14/11/2015



**Figure III.29.** GHI mesuré et simulé par Gistel et régression linéaire pour la journée du 30/11/2015

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).

Le GisTel est représenté par la courbe bleue dans toutes les figures acquises lors de la validation des résultats des modèles utilisés. Les données observées sont représentées par la courbe rouge, tandis que les données générées par la technique de régression linéaire par apprentissage profond sont représentées par la courbe verte.

Les résultats de la simulation utilisant la régression linéaire par apprentissage profond, en revanche, sont plus précis que celles obtenus par le modèle Gistel.

### III.8. Validation de la méthode

Nous avons comparé les valeurs projetées à celles mesurées sur le terrain pour corroborer nos conclusions. Les irradiances (Wh/m<sup>2</sup>) sont les lectures produites par un pyranomètre au sol. Pour évaluer l'exactitude du modèle, les deux paramètres RMSE (Erreur Quadratique Moyenne) et MAE (Erreur Moyenne Absolue) indiquées par les équations (III.2) et (III.3) ont été utilisées pour comparer la simulation du rayonnement solaire horizontal horaire GHI.

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

$$MAE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |GHI_i \text{ prédictee} - GHI_i \text{ mesurée}| \right] \quad (\text{III.3})$$

Le tableau suivant montre la validité des résultats de la simulation de l'estimation du rayonnement solaire horizontal global horaire :

**Tableau III.1 : Le MAE et RMSE entre les données mesurées et les données simulées**

Nombre jours	Jours	MAE		RMSE	
		Gistel	Régression	Gistel	Régression
01	01/01/2015	80.3896	185.0180	106.7630	221.4781
02	15/01/2015	126.5026	163.4851	144.8614	222.0827
03	22/01/2015	87.5361	175.4741	104.4789	207.8746
04	01/02/2015	40.5455	40.6840	55.8082	52.6223
05	15/02/2015	152.2345	98.4904	173.7617	140.7857
06	28/02/2015	173.3913	37.1788	202.8052	51.2123
07	01/04/2015	204.7516	81.7600	235.5877	92.9885
08	15/04/2015	199.2255	70.2990	234.4533	75.8626
09	30/04/2015	258.5325	70.7352	287.7585	77.6149
10	01/06/2015	160.6980	151.5575	194.2207	164.5231
11	15/06/2015	229.2472	176.3152	250.0945	206.6906
12	30/06/2015	259.6075	178.5311	283.2192	198.4277
13	01/08/2015	267.9363	94.9325	294.1512	99.9327
14	15/08/2015	213.0323	190.2547	237.3804	240.4043
15	30/08/2015	198.0062	51.9589	216.6994	68.2473
16	01/10/2015	199.1295	117.3862	232.5720	138.1535
17	15/10/2015	179.3209	117.3025	204.8402	129.1061
18	30/10/2015	155.3606	146.7655	179.1395	155.1545
19	01/11/2015	138.0328	216.9773	156.1507	235.1344
20	14/11/2015	114.1697	233.1975	136.2519	248.6191
21	30/11/2015	125.1866	203.5501	142.6341	228.4203
	<b>Moyenne</b>	<b>173.76</b>	<b>131.31</b>	<b>198.45</b>	<b>152.37</b>

D'après les résultats obtenus à partir du tableau, on a une amélioration de 42.45 W/m<sup>2</sup> dans l'erreur moyenne absolue et de 46.08 W/m<sup>2</sup> du modèle CNN par rapport au modèle physique Gistel.

Donc on peut dire que l'apprentissage approfondi donne des résultats plus importantes par rapport au celles du modèle Gistel.

### III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous définissons d'abord l'architecture utilisée, et essayons également d'expliquer les principaux concepts des réseaux de neurones convolutifs (CNN) en termes simples

Ensuite, nous avons présenté les différentes étapes à suivre afin de mettre en œuvre notre méthodologie de travail pour estimer l'irradiance solaire globale à l'échelle horaire à partir de 1320 images, et nous avons validé les valeurs estimées à partir de notre méthode et du modèle de Gistel par rapport aux mesures au sol pour le site URAER de Ghardaïa.

Dans l'apprentissage profond, l'utilisation de l'approche de la régression linéaire augmente la qualité des résultats. Il est possible d'obtenir des marges d'erreur intéressantes.

En raison de la résolution spatiale et temporelle des images MSG, leur utilisation pour estimer le gisement solaire offre l'avantage de pouvoir analyser l'irradiation solaire en tout lieu et de mieux observer la progression du rayonnement solaire.

# *Conclusion Générale*

## 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 canal VIS008.

Premièrement, nous avons présenté généralité sur le gisement solaire, les données essentielles. Ensuite, nous avons présenté le principe de base de la télédétection 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 proposé 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  $42.45 W/m^2$ , et on RMSE par  $46.08 W/m^2$ .

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 durant trois ans complète, et utiliser des mesures à partir de plusieurs stations, au moins 5 stations, 10 images par jours pendant 1095 jours ; en total 10950 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] Abbott, P. F. (1986). Guidelines on the quality control of surface climatological data.
- [5] Ahrens, D. (2000). Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere. 3ra. Edición. Brooks.
- [6] Akinoglu, B. G., & Ecevit, A. (1990). A further comparison and discussion of sunshine-based models to estimate global solar radiation. *Energy*, 15(10), 865-872.
- [7] Al-Mostafa, Z. A., Maghrabi, A. H., & Al-Shehri, S. M. (2014). Sunshine-based global radiation models: A review and case study. *Energy Conversion and Management*, 84, 209-216.
- [8] Alsamamra, H., Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D., & Tovar-Pescador, J. (2009). A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain. *Agricultural and Forest meteorology*, 149(8), 1343-1357.
- [9] Aoun, N., & Bouchouicha, K. (2017). Estimating daily global solar radiation by day of the year in Algeria. *The European Physical Journal Plus*, 132(5), 1-12.
- [10] Oumbe, A. (2009). Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la Terre pour évaluer le rayonnement solaire incident au sol (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- [11] Bachari N.I., Razagui A., (2003). Development of a methodology for determining and mapping of thermal radiation from the ground. In: proceedings of the 11th International Thermal Conference (11th JITH), Algiers-Algeria, June 21-23.
- [12] Bachari, N. (1999). 'Methodologie d'analyse des données satellitaires en utilisant des données multisources', D. Etat'', Université des sciences et technologie d'Oran.
- [13] Bădescu, V. (1987). Can the model proposed by barbaro et al. be used to compute global solar radiation on the romanian territory?. *Solar Energy*, 38(4), 247-254.
- [14] Bakirci, K. (2009). Models of solar radiation with hours of bright sunshine: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2580-2588.

## Références Bibliographiques

- [15] Bessemoulin, P., & Oliviéri, J. (2000). Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. *La météorologie*.
- [16] Burns, J. A., & Matthews, M. S. (Eds.). (1986). *Satellites* (No. 77). University of Arizona Press.
- [17] Capderou, M. (2002). *Satellites: orbites et missions*. Springer Science & Business Media.
- [18] <https://www.eumetsat.int>. URL <https://www.eumetsat.int/website/home/index.html> (consulté le 15/03/2022)
- [19] Rougier Simon. 2016. Apport des images satellites à très haute résolution spatiale couplés à des données géographiques multi-sources pour l'analyse des espaces urbaines. thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, France.
- [20] D. Ducrot. (2015), quelques bases sur les satellites, la télédétection, CESBIO (Centre d'Etude Spatiales de la Biosphère). P 2-5
- [21] Notions fondamentales de télédétection, Un cours tutoriel du Centre canadien de télédétection
- [22] Burns, J. A., & Matthews, M. S. (Eds.). (1986). *Satellites* (No. 77). University of Arizona Press
- [23] Capderou, M. (2002). *Satellites: orbites et missions*. Springer Science & Business Media
- [24] <https://www.eumetsat.int>. URL <https://www.eumetsat.int/website/home/index.html>. (consulté 16/03/2022)
- [25] Ratier, A., Roquet, H., Schmetz, J., & Sénési, S. (2003). L'imagerie géostationnaire et son évolution. *La Météorologie*
- [26] Site Internet: <http://sinfotech-sig.teledetection.fr/site/index.php>, Consulté en Mars 2019. (consulté le 16/03/2022)
- [27] DJABBAR Ameyas. Segmentation d'images MSG avec des techniques directionnelles de codage. Thèse de Magister option Télédétection en Electronique, UMMTO, 2008.
- [28] R. G. Congalton. 21 how to assess the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Manual of Geospatial Science and Technology*, page 403, 2010.
- [29] J. A. Richards and J. Richards. *Remote sensing digital image analysis*, volume 3. Springer, 1999.
- [30] J. R. Jensen. *Introductory digital image processing : a remote sensing perspective*. Prentice Hall Press, 2015

## Références Bibliographiques

- [31] Y. Arnaud. Caractérisation des nuages précipitants en fonction de leur structure spatiale et de leur évolution temporelle en milieu sahélien à partir d'images meteosat. 1992.
- [32] Gautier C., Diak G., and Masse S., (1980), « A simple physical Model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data». J. Appl. Meteor., vol.19, pp. 1005–1012
- [33] <https://www.journaldunet.fr/> (consulté le 15/06/2022)
- [34] <https://datascientest.com/keras> (consulté le 15/06/2022)
- [35] <https://www.tensorflow.org> (consulté le 15/06/2022)

