



**UNIVERSITE KASDI MERBAH
OUARGLA**

**Faculté des mathématiques et sciences de la
matière**

N° d'ordre :

N° de série :

DEPARTEMENT PHYSIQUE

Master

Spécialité: Physique

Option: Physique et Météorologie de l'environnement aride

Par : Mohamed Laid BELALEM

Thème

**Estimation de la réflectance spectrale
et NDVI par le satellite MSG
(Météosat Seconde Génération)**

**Soutenu publiquement
le 29 mai 2017**

Devant le jury :

Président :	Khalffallah BENBELKACEM	MAA	Université Kasdi Merbah Ouargla
Examineur :	Abdellali FEKIH	Cadre	Office National de la Météorologie - Ouargla-
Encadreur :	Mohamed Tahar NAKES	MAA	Université Kasdi Merbah Ouargla
Co-encadreur	Abdelhak REZAGUI	Cadre	Centre de Développement des Energies Renouvelables - Alger -

Année universitaire : 2016/2017



Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A l'âme de mon père, que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.

Ma Méré pour son affection et le bien qu'elle a toujours voulu pour moi.

Ma sœur, mes frères, ma femme, mes enfants Farah, Batoul, Ali Chemse Eddine, Imad Eddéine et à toute ma famille.

A tous ceux qui me sont chers et qui m'aiment.



Mohamed Laïd

Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance et ma profonde gratitude à mes encadreurs ; Monsieur NAKES Mohamed Tahar et Monsieur RAZAGUI Abdelhak, d'abord pour m'avoir donnée l'honneur de travaillé avec eux, ensuite pour leur remarques, leur conseils, leur encouragements, leur disponibilités, et pour le suivi permanent de la présente étude, ce qui m'a permis de bénéficier largement de leur expérience.

Je tiens à remercier vivement les membre de jury, Messieurs Khalfallah BENBELKACEM et Abdellali FEKIH d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examineur et pour l'honneur qui'ils m'ont fait d'avoir assister à ma soutenance.

J'exprime mes remerciements au corps professoral de département physique qui a contribué avec opiniâtreté afin de nous faire acquérir ces quelques connaissances.

Je tiens à remercier vivement Monsieur SALMI Abdelkader; Directeur du département métrologique régional Sud-Est, pour m'avoir permis de suivre mes études dans des meilleures conditions, pour sa confiance et pour ses conseils.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues de classe Master Physique et météorologie de l'environnement aride et à tous mes collègues de travail en particulier Hizi et Khenfer.

Mes remerciements vont à tous qui m'ont aidé de près et de loin.

Table des matières

Dédicace	ii
Remerciements	iii
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Acronymes et Abréviations.....	xi
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Télédétection et Rayonnement Electromagnétique

1.1	Introduction	4
1.2	Le processus de la télédétection	4
1.3	Principe de base de la télédétection	6
1.3.1	La cible.....	6
1.3.2	La source d'énergie.....	7
1.3.3	Le vecteur.....	7
1.4	Le rayonnement électromagnétique	8
1.5	Le spectre électromagnétique.....	9
1.6	Propriétés des ondes électromagnétiques.....	10
1.6.1	Emission.....	11
1.6.2	Réflexion	11
1.6.3	Absorption.....	11
1.6.4	Transmission	11
1.6.5	Diffusion	12
1.7	La mesure du rayonnement.....	12
1.8	Les interactions rayonnement / matière	13
1.9	Loi de kirchhoff.....	13

1.10	Applications de la télédétection.....	15
1.10.1	Agriculture	15
1.10.2	Géologie:	15
1.10.3	Hydrologie.....	16
1.10.4	Météorologie et le climat.....	16
1.11	Conclusion.....	17

Chapitre 2 : Les Satellites MSG (Météosat Seconde Génération)

2.1	Introduction.....	19
2.2	Satellites météorologiques.....	19
2.3	Différents types de satellites	20
2.3.1	Les satellites polaires (héliosynchrones)	20
2.3.2	Les satellites géostationnaires	20
2.4	Les mesures d'un satellite météorologique.....	21
2.5	Les images Météosat.....	22
2.6	Les satellites Météosat Seconde Génération (MSG).....	22
2.6.1	Le programme MSG.....	23
2.6.2	Mission principale	23
2.6.3	Potentialités des images MSG	23
2.6.4	Génération sur les satellites Météosat.....	25
2.6.5	Principales améliorations des satellites MSG.....	27
2.6.6	Système de prise des images	27
2.7	Segment sol de MSG	30
2.8	Bandes spectrales de MSG	30
2.8.1	Le visible.....	31
2.8.2	Le proche infrarouge	32
2.8.3	Le moyen infrarouge	33
2.8.4	L'infrarouge thermique.....	33

2.9	Les compositions colorées (RGB) des canaux de SEVIRI	35
2.9.1	Pseudo couleur et composition colorée	35
2.9.2	La représentation «niveaux de gris»	35
2.10	Missions élargies.....	36
2.11	Conclusion.....	38

Chapitre 3 : Les propriétés spectrales des végétions

3.1	Introduction.....	40
3.2	Identification des objets au sol	40
3.3	Caractéristiques spectrales des sols	41
3.4	Caractéristiques spectrales de la végétation	41
3.5	Propriétés optiques des feuilles	42
3.5.1	Les pigments foliaires	42
3.5.2	La structure cellulaire des feuilles.....	43
3.5.3	L'influence de la teneur en eau	44
3.5.4	Comportement spectral.....	44
3.6	Structure du couvert végétal	45
3.7	L'indice de surface foliaire	46
3.8	Les indices de végétation.....	46
3.9	Le principe	47
3.10	Les principaux indices de végétation	48
3.10.1	Les indices simples.....	49
3.10.2	Les indices prenant en compte l'influence des sols	51
3.10.3	Les indices prenant en compte les effets de l'atmosphère	52
3.10.4	Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère	53
3.10.5	Les indices prenant en compte la température de surface	54
3.11	Conclusion.....	57

Chapitre 4 : Exploitation des images MSG pour l'identification des végétations

4.1	Introduction	59
4.2	Le choix de l'indice de végétation	60
4.3	Données et méthodologie	60
4.3.1	Les données satellitaires utilisées	60
4.3.2	Diagramme de la méthodologie.....	61
4.4	Radiation mesurée par le radiomètre SEVIRI	61
4.5	Calcul de La réflectance pour les canaux (VIS0.6, VIS0.8)	63
4.6	Affranchissement des nuages	64
4.7	Calcul de l'indice de végétation normalise NDVI	67
4.8	Résultats	68
4.9	Conclusion	71
	Conclusion générale et perspective	72
	Bibliographie	74

Liste des tableaux

<u>Tableau 2.1</u> : Les satellites Météosat	26
<u>Tableau 2.2</u> : Les douze bandes spectrales de SEVIRI.....	31

Liste des figures

Figure 1.1 :	Processus de la télédétection.....	5
Figure 1.2 :	Le principe de base de la télédétection.....	7
Figure 1.3 :	Le Champ électromagnétique.....	8
Figure 1.4 :	Le spectre électromagnétique.....	10
Figure 1.5 :	Réflexion de l'énergie.....	11
Figure 1.6 :	Modes d'interaction.....	13
Figure 2.1 :	Orbite polaire.....	20
Figure 2.2 :	Orbite géostationnaire.....	20
Figure 2.3 :	Fonctionnement des capteurs, passif (A) et actif (B).....	21
Figure 2.4 :	Le satellite Météosat.....	22
Figure 2.5 :	Zone géographique couverte par les satellites MSG.....	25
Figure 2.6 :	Mise en orbite du satellite MSG.....	26
Figure 2.7 :	Radiomètre SEVIRI.....	28
Figure 2.8 :	Les douze bandes spectrales de SEVIRI.....	29
Figure 2.9 :	L'ensemble des douze bandes spectrales de MSG réparties sur le spectre électromagnétique depuis les longueurs d'onde du visible jusqu'à l'infrarouge thermique.	30
Figure 2.10 :	Image MSG acquise le 23 mars 2013, 12h00 TU -canal HRV / canal VIS 0.6.....	32
Figure 2.11 :	Image MSG acquise le 23 Mars 2013, 12h00 TU – VIS 0.8 et IR 1.6....	32
Figure 2.12 :	Image MSG acquise le 23 Mars 2013, 12h00 TU - canal IR 3.9.....	33
Figure 2.13 :	Image MSG acquise le 23 Mars 2013, 12h00 TU - canaux WV 6.2 à gauche et WV 7.3 à droite.	34
Figure 2.14 :	Image MSG acquise le 23 mars 2013, 12h00 TU – canal thermique IR10.8.....	34
Figure 3.1 :	Signatures spectrales pour différents types de sols.....	41
Figure 3.2 :	La structure cellulaire des feuilles.....	43
Figure 3.3 :	Principaux facteurs influençant la signature spectrale de la végétation dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen.....	44
Figure 3.4 :	Variations de la signature spectrale en fonction du type de végétation...	45

<u>Figure 3.5</u> :	Illustration des interactions entre le sol et la végétation, intégrées au niveau de la mesure satellitaire.....	46
<u>Figure 3.6</u> :	Répartition spectrale des réflectances dans le rouge et dans le proche infrarouge.....	48
<u>Figure 3.7</u> :	Relation simplifiée entre la température de surface et l'indice de végétation.....	55
<u>Figure 3.8</u> :	L'indice de sécheresse (TDVI) peut être estimé dans le plan Ts / NDVI par le rapport A/B.....	56
<u>Figure 4.1</u> :	Diagramme de la méthodologie de travail.....	61
<u>Figure 4.2</u> :	Transfert radiatif soleil-pixel-satellite.....	63
<u>Figure 4.3</u> :	Géométrie satellite.....	64
<u>Figure 4.4</u> :	Images à ciel clair VIS 0,6 mai [18-31] année : 2013 à 12h00TU.....	65
<u>Figure 4.5</u> :	Images à ciel clair VIS 0,6 mai [01-13] année : 2013 à 12h00TU.....	66
<u>Figure 4.6</u> :	Images à ciel clair VIS 0,8 mars [18-31] année : 2013 à 12h00TU.....	66
<u>Figure 4.7</u> :	Images à ciel clair VIS 0,8 mai [01-13] année : 2013 à 12h00TU.....	67
<u>Figure 4.8</u> :	Réflectance spectrale estimée par MSG [18 au 31 mars 2013], canal VIS0,6....	68
<u>Figure 4.9</u> :	Réflectance spectrale estimée par MSG [01 au 13 mai 2013], canal VIS0,6.....	68
<u>Figure 4.10</u> :	Réflectance spectrale estimée par MSG [18 au 31 mars 2013], canal VIS0,8...	69
<u>Figure 4.11</u> :	Réflectance spectrale estimée par MSG [01 au 13 mai 2013], canal VIS 0,8...	69
<u>Figure 4.12</u> :	Variation de l'NDVI estimée par MSG [18 au 31 mars 2013].....	70
<u>Figure 4.13</u> :	Variation de l'NDVI estimée par MSG [18 au 31 mai 2013].....	70

Acronymes et Abréviations

C

CNRS

Centre National de la Recherche Scientifique

cm

Centimètre, 1 cm = 10⁻² m

cm⁻¹

Par centimètre

E

ERS

Satellite européen de télédétection

ESA

Agence Spatiale Européenne

EUMETCast

Système de diffusion de données
Météorologiques d'EUMETSAT (utilisant des
transmissions par satellite commercial

EUMETSAT

Organisation européenne d'exploitation des
satellites météorologiques)

G

GERB

Instrument embaqué a bord de satellite pour la
détermination géostationnaire du bilan radiatif
terrestre

GNU/Linux

Système d'exploitation libre

GRADS

Système d'analyse et d'affichage de la grille

H

h

Heure ; Unité de mesure de temps

HRV

Haute Résolution dans le Visible

Hz

Hertz ; Unité de mesure des fréquences

I

IR

Infrarouge

K

Km

Multiple du mètre ; 1km=10³ m

Km²

Kilomètre carrée

LAI

Indice de Surface Foliaire

LANDSAT

programme spatial Américain d'observation
de la Terre

LAI

Indice de Surface Foliaire

LANDSAT

programme spatial Américain d'observation

de la Terre

M

m

Mètres

METEOR

Satellite météorologique Russe

Météosat

Satellites météorologiques

m/s

Mètres par seconde

mm

Millimètre, 1mm = 10⁻³ m

MSG

Météosat Seconde Génération

m²

Mètre carré

m⁻²

Par mètre carré

N

NDVI

Indice de végétation par différence normalisé

NOAA

Administration Nationale Océanique et
Atmosphérique (des Etats-Unis d'Amérique)

nm

Nanomètre, nm=10⁻⁹ m

P

PIR

Proche Infra Rouge

R

RGB

Red Green Bleu

REM

Rayonnement Electromagnétique

S

SEVIRI

Radiomètre-imageur dans le visible et
l'infrarouge rotatif amélioré

SPOT

Série de satellites artificiels pour l'observation
du sol terrestre

st

Stéradian ; unité d'angle solide

st⁻¹

Par stéradian

T

TSM

Température de surface de la Mer

TU

Temps Universel

U

URSS

Union des républiques socialistes
soviétiques

UV

Ultraviolet

V

VIS

Visible

W

WV

Water Vapour Vapeur d'eau)

W

Watt

Z

ZCIT

Zone de Convergence Inter Tropicale

µm

Micromètre ; 1µm = 10⁻⁶ mètre, unité de
mesure des longueurs d'onde

µm⁻¹

Par micromètre

Introduction générale

Introduction générale

Les satellites offrent une vision répétitive et synoptique de la Terre de grande valeur. A partir des images satellites, nous pouvons estimer les paramètres physiques du sol, le vent atmosphérique, les précipitations, les températures de surface de la Mer,... . Aussi nous pouvons suivre l'influence des activités humaine sur la nature tel que la déforestation, la désertification, l'augmentation du gaz carbonique et la diminution de la couche d'ozone. Donc les données satellites constituent une énorme source d'informations.

La surveillance de l'état de la surface terrestre est essentiellement basée sur les données fournies par divers satellites (MSG, NOAA, SPOT, LANDSAT, ERS,...). La plupart des ces satellites sont équipés des radiomètres à haute résolution permettant de mesurer en quelques microsecondes la puissance électromagnétique provenant d'un point de la surface terrestre. Aussi, grâce aux techniques spatiales, il est maintenant devenu possible d'observer en une seule prise de vue toute la région de la terre pour en déduire les caractéristiques du sol ou mieux suivre l'état de l'atmosphère. Les premiers satellites d'observation météorologique sont les satellites GOES lancés par la NOAA (National Océan and Atmosphère Administration) aux Etats Unis d'Amérique et les satellites METEOR lancés par l'ex-URSS. Puis, il y eut le lancement de toute une série de satellites pour observer l'atmosphère et l'évolution du climat.[31]

Les systèmes de télédétection actuels, contrairement à ceux du début du développement de ces technologies ont connu des changements importants, en particulier dans la dernière décennie, avec une technologie essentielle dans le suivi des processus multiples qui affectent la surface et l'atmosphère de la Terre. Un impact important, en particulier, sur notre planète, tels que le changement climatique, la déforestation, la désertification,... [10]

Aussi, la présence de végétation à différents stades de développement peut influencer le bilan énergétique et hydrique des surfaces continentales. Une description précise de la couverture végétale permet d'améliorer les paramètres destinés aux modèles de prévisions numériques et aux modèles climatiques. Le bilan de la végétation est également très utile pour l'étude de l'environnement (Secheresse, désertification,...) ou l'estimation de la production agricole.

L'objectif général de la présente étude est l'estimation de la réflectance spectrale puis l'identification de la végétation terrestre à partir de l'indice de végétation normalisé (NDVI) estimé à l'aide des images du satellite MSG (Météosat Seconde Génération) dans la zone d'étude choisie (entre 30° et 38.5°N de latitude et 13°W et 15.5°E de longitude), pour y parvenir, tout d'abord, nous avons commencé par une recherche bibliographique et un état de l'art du thème choisi, ensuite nous avons procédé à l'examen et le traitement des images satellites brutes disponibles; l'élaboration des programmes en langage C pour l'extraCTION des valeurs radiométriques, l'estimation des réflectances, l'estimation de l'NDVI et cartographie de ses valeurs avec le logiciel Grads. Ce travail est effectué sous le système d'exploitation GNU/Linux. Nous avons opté l'hypothèse que les atténuations atmosphériques sont négligeables (Fig 2.9). Le canal infrarouge 10.8 μm a servi au calcul de l'image à ciel clair en utilisant la technique de brillance minimale sur une décade pour trouver les dates qui leurs correspondent, ces dates sont ensuite sauvegardées pixel par pixel et les valeurs numériques relatives à ces dates dans les canaux visibles sont extraites, constituant ainsi les images à ciel clair pour les deux canaux. Les valeurs de réflectances sont ensuite calculées dans le canal 0.6 μm et 0.8 μm et serviront au calcul de l'indice de végétation.

Ce travail est structuré en quatre chapitres distincts : le premier est consacré à un rappel sur la télédétection et certaines définitions qui concernent la théorie du rayonnement électromagnétique et ses principales caractéristiques; le deuxième chapitre est dédié à une présentation générale des satellites Météosat Première et Seconde Génération ; dans le troisième chapitre, nous abordons les propriétés spectrales des végétations et les différents indices de végétations utilisées ; dans le quatrième chapitre nous exposons la méthodologie adopté pour estimer la réflectance spectrale et l'NDVI suivi d'une analyse et interprétation des résultats obtenus, à la fin nous terminerons notre travail par une synthèse et une conclusion générale et perspectives.

CHAPITRE 1

Téledétection et Rayonnement

Électromagnétique

Chapitre 1

Téledétection et Rayonnement Electromagnétique

1.1 Introduction

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption,...) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol,...). [29]

Le principe de la télédétection peut se résumer, par une phrase de Bonn & Rochon (1992) : « En télédétection, on utilise les propriétés physique des objets observés, en particulier leurs propriétés optique, pour acquérir de l'information sur la nature des objets». [2]

Dans ce chapitre nous rappelons les principes physiques de base de la télédétection, définition du rayonnement électromagnétique et quelques grandeurs radiométriques, et on termine par un aperçu sur quelques applications de la télédétection.

1.2 Le processus de la télédétection

Comme son nom même l'indique, la télédétection est l'acquisition de l'information à distance, sans contact direct avec l'objet étudié. L'acquisition d'information à distance implique l'existence d'un flux d'informations entre l'objet observé et le capteur. Le porteur de cette information est un rayonnement électromagnétique, ce qui peut être émise par l'objet ou venir d'un autre organisme et avoir été réfléchi par celui-ci. Tous les corps (planètes, êtres vivants, objets inanimés) réagissent avec le rayonnement électromagnétique, la quantité et le type de rayonnement transmis, réfléchi ou émis dépend largement de ses propriétés spectrales. [10]

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et la cible. Le processus de la télédétection au moyen des systèmes imageurs (Figure 1.1), comporte le sept étapes que nous élaborons ci-après :

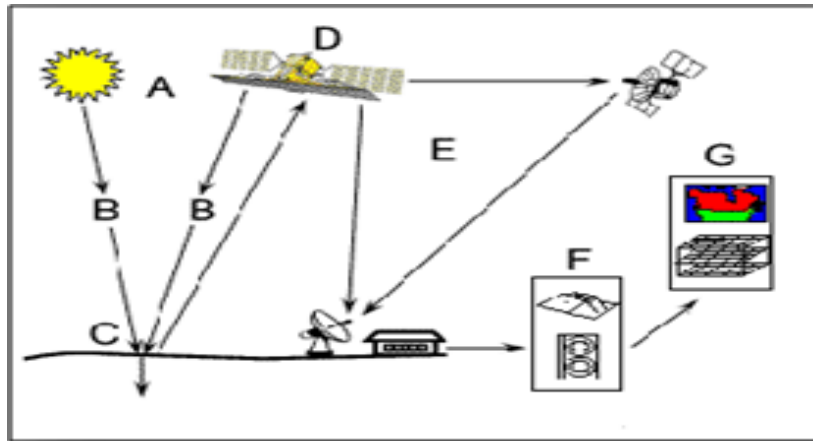


Figure 1.1 : Processus de la télédétection [29]

L'observation de la Terre par les satellites peut être décomposée en sept étapes ou processus depuis la source d'énergie qui éclaire la surface terrestre jusqu'à la réception des données par la station satellite au sol :

- ✓ **Source d'énergie ou d'illumination (A)** - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.
- ✓ **Rayonnement et atmosphère (B)** - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.
- ✓ **Interaction avec la cible (C)** - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.
- ✓ **Enregistrement de l'énergie par le capteur (D)** - Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.
- ✓ **Transmission, réception et traitement (E)** - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

- ✓ **Interprétation et analyse (F)** - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
- ✓ **Application (G)** - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

Ces **sept étapes** couvrent le processus de la télédétection, du début à la fin.[29]

On désignera par cible la portion de la surface terrestre interceptée par le champ de visé de l'instrument de captation. Imaginons d'abord qu'on enlève l'atmosphère, tout le rayonnement solaire éclairera la surface elle n'absorbera en générale qu'une partie, le reste étant renvoyé vers l'espace. Les seuls photons captés ici seront ceux de la cible, et ceux renvoyés dans la direction du satellite, et ils seront intégralement captés. Ce signal relié directement aux propriétés de la cible; c'est le signal utile, en générale c'est le cas idéal [02].

La télédétection s'appuyant sur les interactions entre rayonnement et objets, il est impératif de bien comprendre les propriétés du rayonnement électromagnétique.

1.3 Principe de base de la télédétection

1.3.1 La cible

Le principe de base de la télédétection est similaire à celui de la vision de l'homme. Notre œil est un excellent exemple d'un dispositif de télédétection, nous sommes capables d'estimer la quantité et la nature d'énergie de la lumière visible réfléchi nous parvenant dans notre champ visuel et d'en déduire des informations à propos de notre environnement. Cette énergie est produite par une source externe, en général le soleil. La télédétection est le fruit de l'interaction entre trois éléments fondamentaux : une source d'énergie, une cible et un vecteur (Satellite, Radar, Avion, ...), voir la figure 1.2.

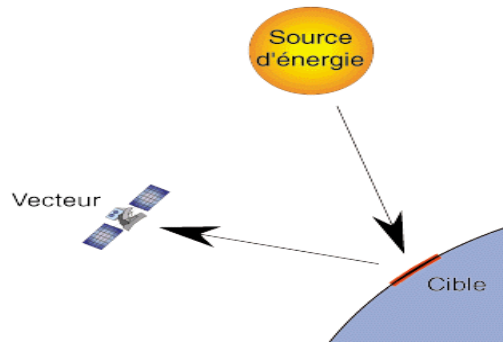


Figure 1.2 : Le principe de base de la téledétection

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

1.3.2 La source d'énergie

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

1.3.3 Le vecteur

Le vecteur est la plate-forme de téledétection qui mesure l'énergie solaire (rayonnement électromagnétique) réfléchi par la cible. Le vecteur peut-être un satellite ou un avion, dominant la cible de quelques centaines de mètres à 36 000 kilomètres. Les capteurs embarqués sur le satellite mesurent le rayonnement électromagnétique réfléchi. Lorsque le satellite ne fait que capter le rayonnement réfléchi, on parle de téledétection passive et lorsque le satellite émet une onde vers la cible et en mesure l'écho, on parle de téledétection active.

1.4 Le rayonnement électromagnétique

Une source d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique est nécessaire pour illuminer la cible, à moins que la cible ne produise elle-même cette énergie. Selon la théorie des ondes, tout rayonnement électromagnétique possède des propriétés fondamentales et se comporte de façon prévisible. Le rayonnement électromagnétique est composé d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (M). Le champ électrique varie en grandeur et est orienté de façon perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement. Le champ magnétique est orienté de façon perpendiculaire au champ électrique. Les deux champs se déplacent à la vitesse de la lumière (c), voir (Figure 1.3). [2]

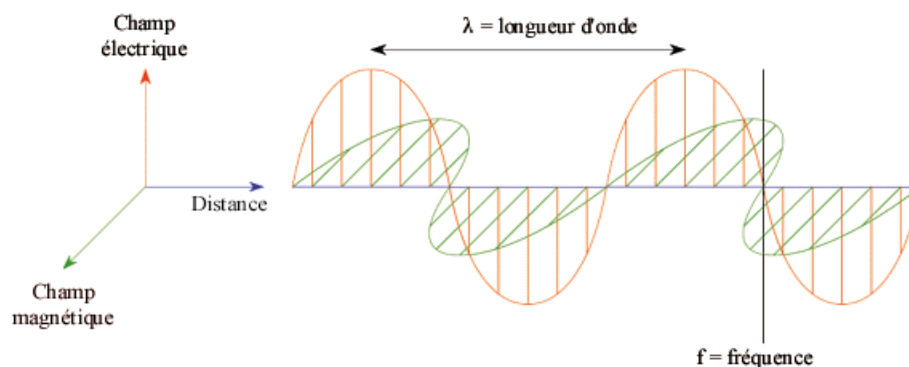


Figure 1.3 : Le Champ électromagnétique [22]

Les principales caractéristiques du rayonnement électromagnétique sont la longueur d'onde et la fréquence. La longueur d'onde est équivalente à la longueur d'un cycle d'une onde, ce qui correspond à la distance entre deux crêtes successives d'une onde. La longueur d'onde est représentée habituellement par la lettre grecque lambda (λ), elle est mesurée en mètres ou en l'un de ces sous-multiples tels que les nanomètres ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$), micromètres ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$) ou centimètres ($1\text{cm} = 10^{-2}\text{ m}$). La fréquence (ν) représente le nombre d'oscillations par unité de temps. La fréquence est mesurée en Hertz (Hz), nombre d'oscillations par seconde, ou en multiple d'Hertz.

La formule suivante illustre la relation entre la longueur d'onde et la fréquence :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad , \quad (1.1) \quad [34]$$

Où :

λ : Longueur d'onde de l'onde électromagnétique (en μm);

c : Vitesse de la lumière (en m/s), $c = 299\,792\,458$ m/s

ν : La fréquence de l'onde (en Hz).

La longueur d'onde et la fréquence sont donc inversement proportionnelles, tel que plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée, et vis-vers-ça.

1.5 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est la représentation du rayonnement électromagnétique selon la longueur d'onde λ . La longueur d'onde confère au rayonnement des propriétés spécifiques qui seront exploitées selon les besoins. Ces propriétés ont conduit également à une division du spectre en quelques grands domaines. La télédétection repose sur les parties du spectre pour lesquelles l'atmosphère présente des qualités de transparence suffisantes pour la propagation des ondes électromagnétiques. On distingue ainsi trois domaines, le visible et proche infrarouge, l'infrarouge thermique, les hyperfréquences.[25]

Contrairement à l'œil humain qui n'est capable de capter le rayonnement que dans une fenêtre très étroite du spectre électromagnétique, celle correspondant au domaine du visible (longueurs d'onde comprises entre $0,4\mu\text{m}$ et $0,7\mu\text{m}$), les capteurs satellitaires utilisent une fraction beaucoup plus étendue du spectre.

Trois fenêtres spectrales sont principalement utilisées en télédétection spatiale :

- Le domaine du visible qui s'étend de $0,4$ à $0,7$ μm et contient les trois couleurs fondamentales de la synthèse additive (Le rouge entre $0,6$ et $0,7$ μm , le vert entre $0,5$ et $0,6$ μm , le bleu entre $0,4$ et $0,5$ μm) ;
- Le proche infra-rouge (PIR) de $0,7$ à $1,5$ μm ;
- Le moyen infra-rouge (MIR) de $1,5$ à 3 μm ;
- L'infrarouge thermique 3 à 15 μm ;
- Le domaine des micro-ondes ou hyperfréquences (elles ont une importance considérable en télédétection RADAR notamment) de 1mm à 1m .

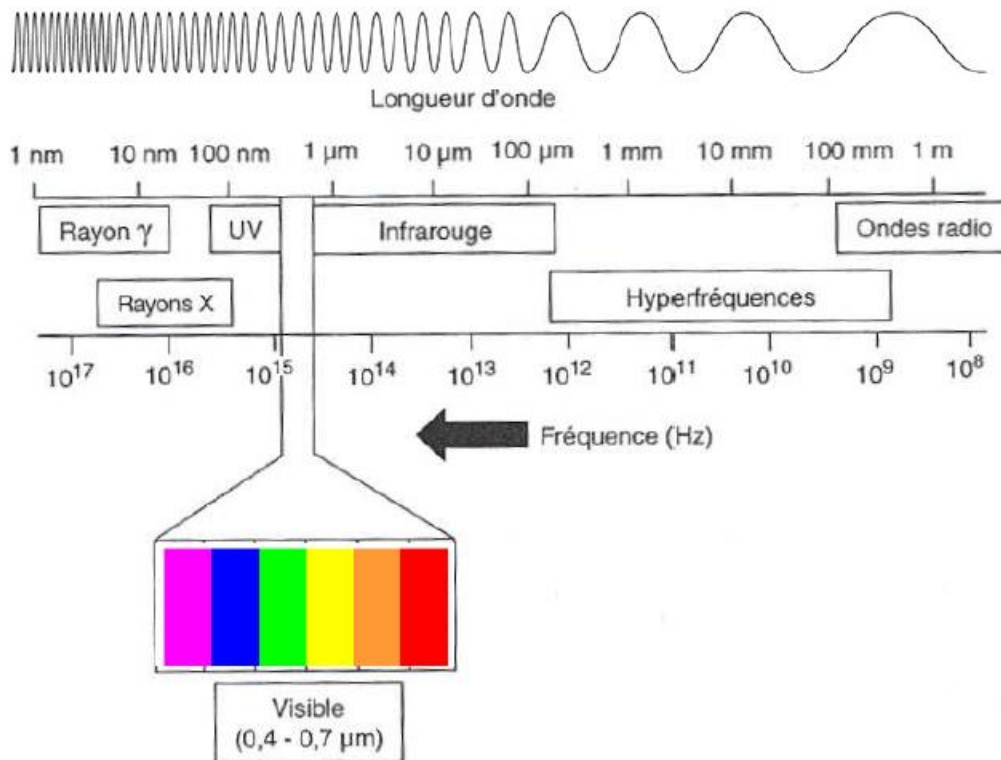


Figure 1.4 : Le spectre électromagnétique

Certains capteurs, peu nombreux, permettent de mesurer l'énergie du rayonnement ultraviolet. Ils sont utilisés principalement en astronomie pour l'étude des atmosphères planétaires ou pour mesurer la quantité d'UV atteignant la surface terrestre. En télédétection aérienne, le rayonnement proche UV 0,25-0,35 µm est utilisé pour des applications en océanographie, notamment pour l'identification et la cartographie des nappes d'hydrocarbures.

1.6 Propriétés des ondes électromagnétiques

Parmi les nombreuses propriétés des ondes électromagnétiques, certaines sont fondamentales pour la compréhension des principes de base de la télédétection. C'est le cas de la réflexion, de l'absorption, de la transmission, de la diffusion et de l'émission. Il existe de nombreuses autres propriétés, telles la diffraction, l'interférence, la polarisation ou encore l'effet Doppler qui ne sera pas abordés ici, même si elles ont une importance considérable notamment en télédétection RADAR.

1.6.1 Emission

Tout corps dont la température thermodynamique est supérieure à zéro absolu ($0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$) émet un rayonnement électromagnétique. L'émetteur, appelé aussi source, peut être le soleil, le satellite (RADAR) ou encore la cible (infrarouge thermique).

1.6.2 Réflexion

Un corps qui reçoit une quantité de REM peut en réfléchir une partie. Lorsqu'il s'agit d'énergie solaire réfléchi par une portion d'espace terrestre, on parle d'albédo. Il s'exprime en pourcentage d'énergie réfléchi. La réflexion peut être spéculaire, c'est-à-dire qu'elle est dirigée entièrement dans une seule direction, ou diffuse lorsqu'elle est dirigée dans toutes les directions.

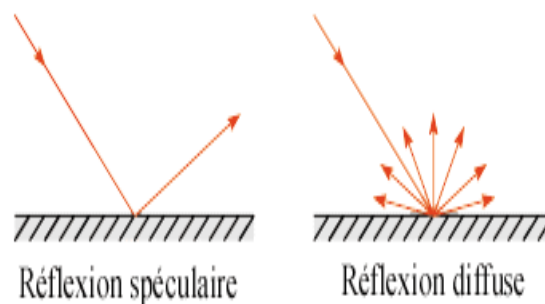


Figure 1.5 : Réflexion de l'énergie

1.6.3 Absorption

Un corps qui reçoit une quantité de REM peut en absorber une partie. Cette énergie absorbée est transformée et modifie l'énergie interne du corps. Ainsi, la température interne du corps peut augmenter ce qui va être la source d'émissions plus importantes dans d'autres longueurs d'ondes (infrarouge thermique par exemple).

1.6.4 Transmission

Un corps qui reçoit une quantité de REM peut en transmettre une partie. Un objet transparent à une transmittance élevée dans les longueurs d'ondes visibles. Une surface

d'eau pure ou les feuillages d'arbres sont des exemples de surfaces susceptibles de transmettre une partie du rayonnement électromagnétique.

1.6.5 Diffusion

Ce phénomène a une très grande importance en télédétection aérospatiale. Des particules microscopiques, comme celles contenues dans l'atmosphère, amènent la diffusion dans toutes les directions d'une partie du REM. Le REM traversant ce milieu peut alors être considérablement transformé. Le ciel nous paraît bleu car la diffusion de la lumière se fait préférentiellement dans les petites longueurs d'ondes (bleu). Si cette diffusion due à l'atmosphère n'existait pas, le ciel serait noir et les zones d'ombre seraient également d'un noir absolu. Environ 25% du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère est diffusé. Ce chiffre peut être beaucoup plus important lorsque l'atmosphère est chargée en aérosols et vapeur d'eau.

1.7 La mesure du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la surface terrestre, les océans ou l'atmosphère, est mesuré par le capteur satellitaire lorsque celui-ci lui parvient. Le flux énergétique enregistré au niveau du capteur satellitaire est ce qu'on appelle une luminance. La luminance qui s'exprime en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ dépend de plusieurs paramètres :

- ✓ La superficie de la source qui émet ou réfléchit le rayonnement (en m^2) ;
- ✓ Le champ de vision du capteur qui observe la source dans un angle solide en stéradian (sr);
- ✓ La bande spectrale (fenêtre étroite de longueurs d'onde) du capteur (en μm).

Les luminances permettent donc de différencier les surfaces sur une image. En revanche, si l'on veut étudier l'évolution d'une surface (couverture végétale par exemple) au cours du temps, on ne pourra pas comparer les luminances d'une image à une autre, car elles dépendent de l'éclairement reçu par la surface. Il faut donc convertir les luminances en une grandeur indépendante de l'éclairement incident, la réflectance.

1.8 Les interactions rayonnement / matière

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique atteint un objet, certaines longueurs d'onde sont absorbées tandis que d'autres sont réfléchies par l'objet (Figure 1.6). Une partie du rayonnement peut éventuellement être transmise à travers l'objet si celui-ci est plus ou moins transparent, avec un changement de direction de la propagation du à la réfraction. La partie du rayonnement qui est absorbée modifie l'énergie interne de l'objet et produit de la chaleur qui sera réémise sous forme d'un rayonnement à une plus grande longueur d'onde.

Le rayonnement est réfléchi par la surface dans le domaine solaire, émis dans l'infrarouge thermique; il peut être émis ou réfléchi dans le domaine des micro-ondes en fonction du caractère passif ou actif du système d'observation.

Un corps naturel n'absorbe pas tout le rayonnement qu'il reçoit. Il en réfléchit une partie. Ainsi la puissance totale reçue par le corps, par unité de surface, dénommée irradiance se décompose en trois parties:

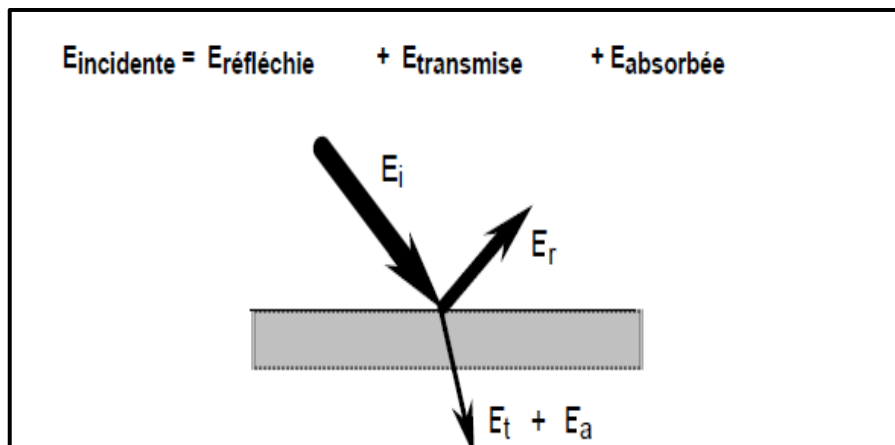


Figure 1.6 : Modes d'interaction

1.9 Loi de kirchhoff

Pour maintenir l'équilibre thermodynamique d'un corps naturel, la puissance absorbée doit nécessairement être égale à la puissance émise. En d'autres termes, **absorption = émission**. Cette propriété est exprimée par la loi de Kirchhoff. La répartition des

puissances de rayonnement dans un corps naturel s'exprime souvent en rapport avec l'irradiance. On définit de cette manière:

La réflectance **r**: coefficient de réflexion hémisphérique ou réflectivité

$$r = \frac{E_{\text{refléchi}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (1.2)$$

L'absorptance **a**: coefficient d'absorption hémisphérique

$$a = \frac{E_{\text{absorbé}}}{E_{\text{incidente}}}, \quad (1.3)$$

La transmittance **t**: coefficient de transmission hémisphérique

$$t = \frac{E_{\text{transmise}}}{E_{\text{incidente}}}, \quad (1.4)$$

L'émissivité **e**: coefficient d'émission hémisphérique ou émissivité

$$e = \frac{E_{\text{émise}}}{E_{\text{incidente}}}, \quad (1.5)$$

En référence à ces définitions, la loi de Kirchhoff s'exprime:

$$e = a = 1 - r - t, \quad (1.6)$$

Pour un corps opaque, situation la plus fréquente en télédétection, la transmittance est nulle. L'énergie électromagnétique absorbée est convertie en chaleur. Dans ce cas, la loi de Kirchhoff se réduit à:

$$e = a = 1 - r, \quad (1.7)$$

On observe tout de même certains cas particuliers :

- ✚ Un corps totalement opaque ne transmet pas le rayonnement, qui est en partie absorbé et en partie réfléchi

$$t = 0 \Rightarrow a + r = 1, \quad (1.8)$$

- ✚ Un corps parfaitement transparent ne réfléchit pas le rayonnement, mais en absorbe et en transmet une partie.

$$r = 0 \Rightarrow a + t = 1, \quad (1.9)$$

1.10 Applications de la télédétection

1.10.1 Agriculture

L'Agriculture joue un rôle primordial dans l'économie des pays développés et en voie de développement. Elle peut représenter une industrie rentable pour un pays économiquement fort ou une production élémentaire de subsistance pour un pays. Tout producteur agricole a besoin d'information pour gérer efficacement ses récoltes. Il doit disposer des outils d'information qui lui permettent de planifier ses opérations et de faire face aux multiples aléas pouvant menacer sa production, telles que des infectassions d'insectes, intempéries, sécheresses ou dommages liés au stress des végétaux, qui peuvent affecter le potentiel de sa récolte et les conditions de sa terre. Les images satellitaires et aériennes servent à classification des cultures, à l'assurance de la santé et de la viabilité des productions et à la surveillance des mesures d'intervention. Parmi les applications de la télédétection à l'agriculture en cite :

- Identifier et anticiper le montant de cultures agricoles;
- La cartographie pour identifier les zones agricoles;
- La découverte de parasites agricoles et les maladies des plantes et des arbres;
- Aide à l'élaboration d'une politique spécifique pour la conservation des zones agricoles et de la pollution par une surveillance continue;
- Lutte contre la désertification;
- Le contrôle des incendies de forêt.

1.10.2 Géologie:

La Géologie est l'étude de forme des terrains, des structures et de l'écorce terrestre, et a pour but de comprendre les processus physiques qui modifient la croûte terrestre. Elle est généralement perçue comme étant l'exploration et l'exploitation des ressources minérales et pétrolières dans le but d'améliorer les conditions de vie de la société, tels que :

- La cartographie géologique;
- La localisation des volcans et la détermination des mouvements de terrain ou le sol;
- L'exploration minière;

- La recherche de ressources naturelles et des matières premières;
- L'exploration et exploitation des agrégats (sable et gravier).

1.10.3 Hydrologie

L'Hydrologie est l'étude de l'eau sur la Terre, qu'il coule à la surface, qu'il soit gelé sous forme de glace ou de neige, ou qu'il soit emprisonné dans le sol. L'hydrologie est naturellement liée à plusieurs applications de la télédétection, particulièrement à la foresterie, à l'agriculture et à l'utilisation du sol, parce que l'eau est une composante importante dans chacun de ces domaines. Voici quelques applications de la télédétection dans le domaine de l'hydrologie:

- L'évaluation de l'humidité du sol;
- La surveillance et la cartographie de l'étendue d'une surface de neige;
- Cartographie et suivi des inondations et des cours d'eaux ;
- Détection des changements dans les rivières et les Deltas;
- Détection des fuites des canaux d'irrigation

1.10.4 Météorologie et le climat

Les applications de la télédétection dans le domaine météorologiques sont nombreuses, et on peut citer :

- Suivi du mouvement et d'évolution des nuages (Classification, Température et altitude du sommet , detection des cellules convectives, contenu en eau liquide, caractère précipitant,...);
- Surveillance du climat (Archivage de données à long terme et leur exploitation, bilan radiatif, statistiques sur les nuages et les précipitations, validation des modeles climatiques, ...);
- Observation de la surface terrestre (Température du sol , neige, glace de Mer, force et direction du vent,...)
- Etude de la pollution atmosphérique (Concentration de certains gaz (CO_2 , O_3 , ...));
- Aide à la prévision météorologique qui est de plus en plus précise ;

- Assimilation des données dans les modeles de prévisions numériques du temps.

1.11 Conclusion

Les utilisations actuelles et potentielles de la télédétection en font aujourd'hui un moyen d'identification, de prospection et d'évaluation des ressources naturelles, indispensable tant dans les pays développés que ceux en développement. La télédétection, à travers les capteurs embarqués dans les satellites artificiels et en faisant appelles aux lois physiques nous permet de surveiller et de contrôler l'environnement et les ressources terrestres, elle nous permet par exemple de suivre la dégradation des sols comme par exemple l'évolution des formations végétales et de dresser des cartes.

CHAPITRE 2

Les Satellites MSG

(Météosat Seconde Génération)

Chapitre 2

Les Satellites MSG (Météosat Seconde Génération)

2.1 Introduction

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

Dans ce chapitre, nous allons fournir des informations générales sur les satellites météorologiques avec plus précisément Météosat Seconde Génération (MSG). Nous introduisons le programme MSG et sa mission principale, à savoir la prévision météorologique. Nous abordons ensuite la mise en orbite des satellites MSG, puis détaillons les principales améliorations par rapport à la première génération. Nous poursuivons sur les missions élargies des MSG et les différentes représentations des images satellites.

2.2 Satellites météorologiques

Les satellites météorologiques donnent une vision détaillée du globe terrestre dans les canaux visible et infra-rouge avec une précision spatiale de l'ordre du kilomètre.

La mission principale des satellites météorologiques est de recueillir de données utilisées pour la surveillance du temps et du climat de la Terre. Chaque nouvelle génération des satellites comporte des capteurs plus performants et capable d'effectuer des mesures sur un plus grand nombre de canaux ce qui permet de les utiliser pour différencier les divers phénomènes météorologiques tel que les nuages les précipitations les vents, brouillard,

2.3 Différents types de satellites

2.3.1 Les satellites polaires (héliosynchrones)

Ces satellites sont dit polaires ou défilant car leur orbite circulaire passe par les pôles. Ils se trouvent à des basses altitudes d'environ 800km au-dessus de la terre, ce qui permet de fournir des informations avec une résolution spatiale élevée, leur période de révolution d'environ 102 minutes leur permet de balayer la totalité du globe deux fois par jour. Ces satellites passent toujours à la même heure solaire locale au-dessus d'un même point de la terre.

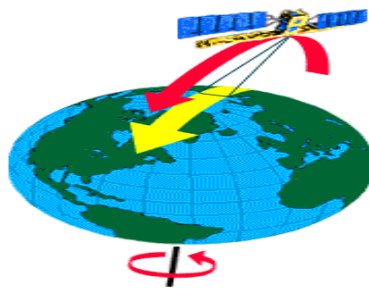


Figure 2.1 : Orbite polaire

2.3.2 Les satellites géostationnaires

Les satellites géostationnaires se trouvent à une altitude d'environ 36000km au-dessus de la terre à 0° E de longitude et 0° N de latitude . Ils paraissent immobiles car ils tournent dans le même sens et à la même vitesse angulaire que la terre. Les satellites géostationnaires peuvent donc prendre des informations en continu de la même portion du globe .Plusieurs satellites géostationnaires sont lancés et maintenus à travers le monde. Parmi eux, les satellites Météosat première et deuxième génération.

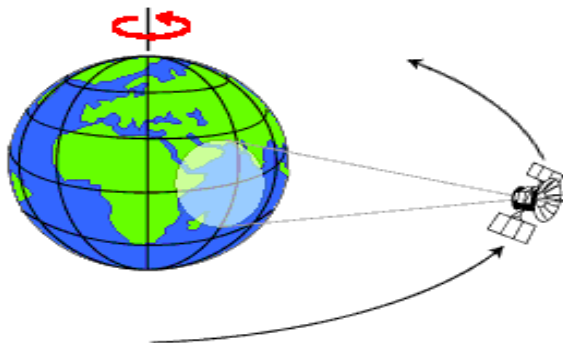


Figure 2.2 : Orbite géostationnaire

2.4 Les mesures d'un satellite météorologique

Chaque satellite météorologique fournit plusieurs milliers de données très diverses tous les jours. Ces informations sont ensuite utilisées par les météorologues pour suivre en temps réel l'évolution de la météo et en extraire des données dérivées (température et albédo). L'avantage du satellite est qu'il peut, contrairement à un autre moyen de mesurer des données n'importe où sur terre, même au milieu de l'océan. Mais le satellite ne reçoit pas directement des images ou des données de température, de vitesse ou d'humidité, il analyse les ondes électromagnétiques provenant des différents objets et en déduit, par les caractéristiques de ces ondes, différents paramètres météorologiques.

En effet, chaque corps n'a pas le même albédo ce qui permet au satellite de différencier eau et terre par exemple. Suivant le but recherché, chaque satellite n'analyse pas dans la même longueur d'ondes, ils opèrent dans différentes bandes spectrales, dans différents canaux. Pour établir ses mesures à distance, le satellite météorologique utilise des capteurs passifs (par exemple les radiomètres), sont ceux qui reçoivent le rayonnement de la terre, qu'il soit émis par celle-ci ou reflété, c'est la télédétection passive. Ou alors, il peut utiliser des capteurs actifs par exemple les radars, qui émettent une onde électromagnétique et analysent le signal réfléchi par le sol: C'est la télédétection active (Figure 2.3). [05*]

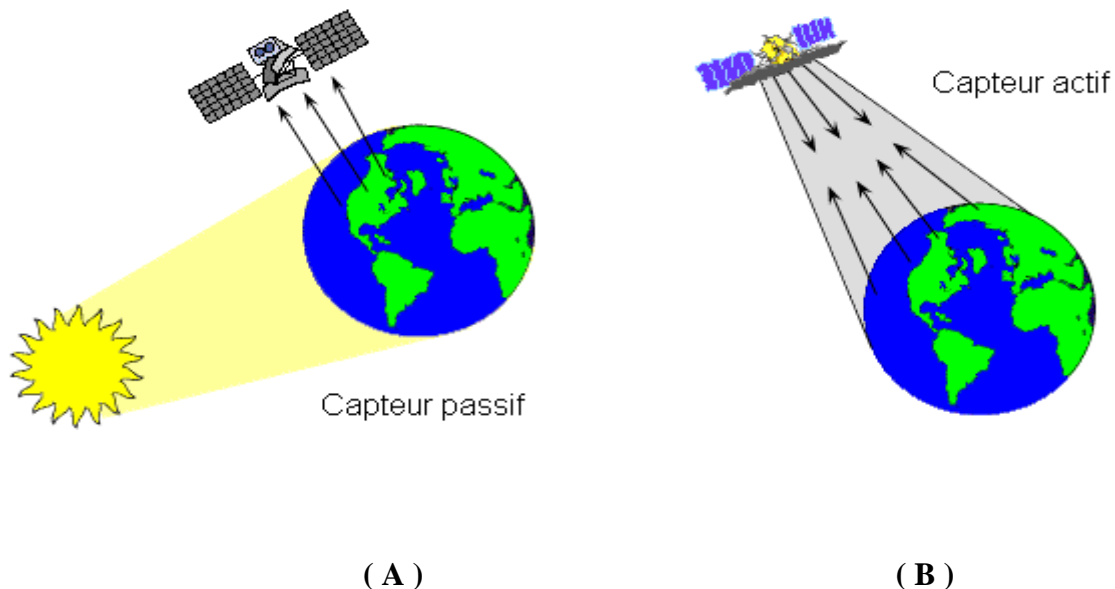


Figure 2.3 : Fonctionnement des capteurs, passif (A) et actif (B)

2.5 Les images Météosat

Les images satellites sont des mesures de rayonnement solaires réfléchis ou émis par la surface terrestre et les nuages, ou absorbées par l'atmosphère, dans différents bandes spectrales.

2.6 Les satellites Météosat Seconde Génération (MSG)

Météosat est une famille de l'agence spatiale européenne (ESA), ils permettent l'observation en continu d'une zone précise du globe. Les satellites Météosat envoient régulièrement sur terre de nombreuses images numériques de la surface terrestre qui permettent aux météorologues, à partir des observations d'anticyclones, dépressions, atmosphériques, masse nuageuse, ..., d'élaborer les bulletins météorologiques. Ces données sont également essentielles pour anticiper certains phénomènes météorologiques ravageurs tels que les ouragans, tempêtes et pour le suivi de l'évolution du climat de la planète.

Les satellites géostationnaires européens Météosat, sont placés en orbite équatoriale à 35800 km d'altitude environ, niveau d'équilibre qui les permet d'avoir la même vitesse angulaire que la terre et d'être ainsi fixés par rapport à la terre. Sa position nominale se situe à l'intersection du méridien de Greenwich et de l'Equateur, ce qui en fait un instrument particulièrement adapté à l'étude du continent africain et européen.

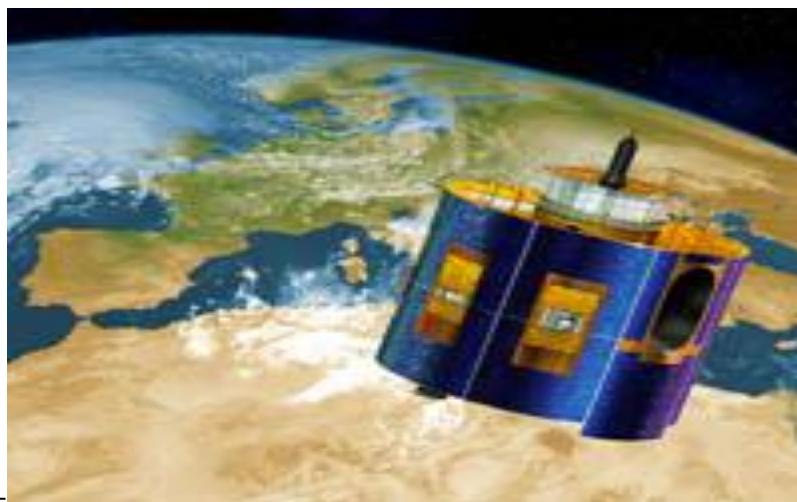


Figure 2.4 : Le satellite Météosat ©ESA

2.6.1 Le programme MSG

Le programme MSG initié en 2002 est un programme commun à l'ESA (Agence Spatiale Européenne) et à EUMETSAT (Organisation européenne d'exploitation des satellites météorologiques). La mise en place de ce programme repose sur un double constat : d'une part, l'amélioration continue des technologies spatiales et de transmission des données au cours des trente dernières années et d'autre part, des besoins accrus de la communauté scientifique en matière d'étude de l'atmosphère, du climat et de l'environnement en général. Les satellites MSG (Météosat Seconde Génération), doivent permettre d'améliorer grandement les services offerts par les satellites Météosat de première génération, en apportant une information à la fois plus riche, plus précise et plus fréquente que leurs prédécesseurs

Le segment spatial du système " Météosat Seconde Génération" comprend quatre satellites, de MSG-1 à MSG-4, qui, lancés à tour de rôle, assureront la pérennité du programme jusqu'en 2018 et permettront d'améliorer nos connaissances en météorologie et sur la surveillance du climat et de l'environnement. Après, un nouveau système d'observation spatiale, le programme Météosat Troisième Génération (MTG) devrait assurer la continuité du programme MSG. [33]

2.6.2 Mission principale

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

2.6.3 Potentialités des images MSG

Pour améliorer notre compréhension du climat et des prévisions météorologiques, il est crucial de connaître la répartition des températures de surface des océans (TSM). Depuis

une quarantaine d'années, les satellites opérant dans l'infrarouge thermique ont considérablement enrichis nos connaissances en permettant de repérer les structures océanographiques qui ont une signature thermique à la surface. Utilisées comme traceurs naturels de la dynamique des océans, les structures thermiques superficielles permettent des applications dans des domaines nombreux et variés, qui vont de la recherche sur le climat, la météorologie, l'océanographie marine.[24]

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

- ✓ Etude des changements climatiques
- ✓ L'hydrologie et précipitations
- ✓ L'agriculture,
- ✓ Le suivi des espaces urbanisés lien interne Environnement urbain,
- ✓ L'halieutique à travers la cartographie des températures de surface des océans
- ✓ L'étude des phénomènes éruptifs, une meilleure estimation des vents
- ✓ L'évolution du couvert végétal
- ✓ Les sécheresses
- ✓ La détection des incendies de forêts
- ✓ Suivi des nuages de poussières en cas de catastrophes industrielles,
- ✓ Cartographie de la radiation solaire
- ✓ etc.

La radiance spectrale par ciel clair MSG est actuellement utilisée par l'ensemble des grands centres météorologiques mondiaux dans l'assimilation de données pour améliorer l'état initial des paramètres météorologiques utilisé comme entrée par les modèles numérique de prévision du temps. Les travaux de recherche sont pied d'œuvre pour l'assimilation des radiances MSG en présence de nuages. L'image MSG est devenue une donnée indisponible dans le domaine de la recherche pour de nombreuses disciplines. [24]

2.6.4 Générations sur les satellites Météosat

Le programme Météosat est opérationnel depuis plus de trente ans, avec le lancement du premier satellite, Météosat 1, le 23 novembre 1977. Depuis, six autres satellites de première génération ont été lancés, tous avec succès. Si les cinq premiers satellites sont maintenant hors d'usage, Météosat 7, le dernier de la série mis sur orbite en septembre 1997 est toujours opérationnel, au-dessus de l'océan Indien. Météosat 6 est lui aussi en exploitation, comme satellite de réserve de Météosat 7. La première génération est relayée par les satellites Météosat Seconde Génération beaucoup plus performants.

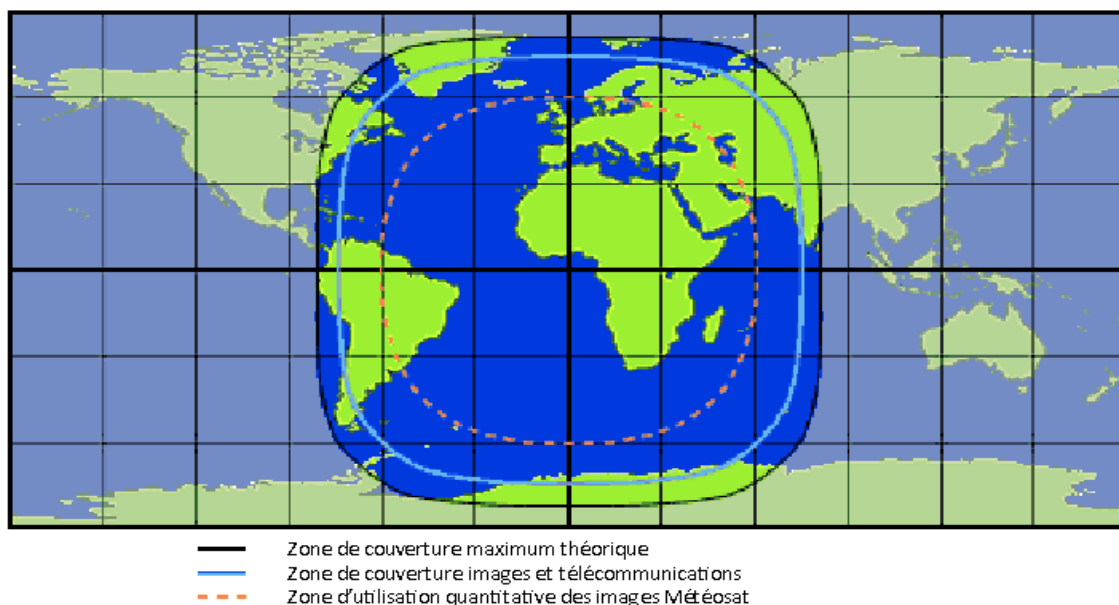


Figure 2.5 : Zone géographique couverte par les satellites MSG

Le 28 août 2002 à 22h45 UTC, le premier satellite météorologique européen de la série des Météosat Seconde Génération (MSG-1) était mis sur son orbite géostationnaire à 35800 km d'altitude par un lanceur Ariane 5 (vol 155). D'abord placé sur une orbite de transfert (périgée de 580 km et apogée de 35994 km), il a ensuite été positionné sur son orbite géostationnaire. Stabilisé par un mouvement de rotation autour de son axe principal, comme tous ses prédécesseurs, le satellite effectue un "balayage" continu du disque terrestre dans sa totalité, à l'exception des régions polaires (Figure 2.5). Sa position nominale à l'intersection du méridien de Greenwich et de l'Equateur, en fait un instrument particulièrement adapté à l'étude de l'Europe, l'Afrique et les mers adjacentes (Figure 2.6). [33]. Le satellite MSG-1 est devenu Météosat 8 le 28 janvier 2004, lors de sa mise en œuvre opérationnelle.

Un an plus tard, le 21 décembre 2005, le deuxième Météosat de Seconde Génération MSG-2, était mis sur orbite. Il est opérationnel depuis juin 2006 et a pris le nom de Météosat 9. Depuis sa mise en exploitation, Météosat 9 est devenu le satellite principal, Météosat 8 a été déplacé de sa position à la longitude de 9,5° Est et assure la fonction de satellite de réserve pour Météosat 9.[33]. MSG-2 est suivi de MSG-3 qui est en fonction depuis 2012 et MSG-4 en fonction depuis 2015.

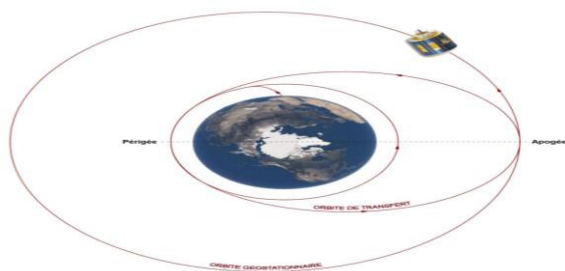


Figure 2.6 : Mise en orbite du satellite MSG

Satellites Météosat	
Initiateur	France
Origine	Projet de satellite d’observation du climat conçu par le CNRS en 1968
Participants	Pays membres de l’agence spatiale européenne (ESA)
Statut	Météosat 5, 6, 7 en cours d’exploitation MSG 1 et MSG 2 en cours d’exploitation MSG 3 et MSG 4 stockés
Société d’exploitation des satellites	Eumetsat
Objectifs	Effectuer des observations météorologiques depuis l’espace pour la prévision immédiate et l’évaluation, à long et moyen termes, de l’évolution du climat
Missions	Météosat 1 : 1977-1985 Météosat 2 : 1981-1983 Météosat 3 : 1988-1995 Météosat 4 : 1989 -1995 Météosat 5 : lancé en 1991 Météosat 6 : lancé en 1993 Météosat 7 : lancé en 1997 MSG 1 (Météosat 8) : lancé le 28 août 2002 MSG 2 (Météosat 9) : lancé le 21 décembre 2005 MSG 3 : lancé le 05 juillet 2012 MSG 4 : lancé le 15 juillet 2015
Lanceurs	MTG : Lancement prévu en 2022 Thor-Delta (Etats-Unis), Ariane 1, 4 et 5

Tableau 2.1 : Les satellites Météosat

2.6.5 Principales améliorations des satellites MSG

Si les observations faites par les satellites Météosat de la première génération ont permis des avancées spectaculaires dans le domaine des prévisions météorologiques au cours des trente dernières années, il devient nécessaire aujourd'hui, pour répondre aux besoins sans cesse croissants des utilisateurs et continuer à améliorer nos connaissances sur l'évolution dynamique de l'atmosphère, la météorologie et l'environnement, de disposer d'observations spatiales à la fois plus fréquentes et plus précises. C'est dans ce cadre que les nouveaux capteurs MSG ont été mis en orbite pour assurer l'observation continue de l'atmosphère et de la surface terrestre jusque vers 2018, où les satellites de troisième génération devraient prendre le relais.

De forme cylindrique comme les Météosat première génération, mais deux fois et demi plus gros, et bien plus performants que leurs prédécesseurs, les satellites Météosat de Seconde Génération permettent d'obtenir des images dans un plus grand nombre de longueurs d'ondes, à une résolution spatiale plus fine et à une fréquence plus élevée que la génération précédente.

Les principales améliorations de MSG tiennent aux trois instruments qu'ils emportent : le radiomètre SEVIRI décrit dans le paragraphe suivant, l'instrument géostationnaire de détermination du bilan radiatif de la Terre GERB, ainsi qu'un répéteur de «recherche et sauvetage».

2.6.6 Système de prise des images

L'instrument destiné à cette fonction est le radiomètre imageur SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager), transmet des images des structures météorologiques tous les 15 minutes à une résolution de 3 Km pour tous les canaux à l'exception du canal visible haute résolution (HRV) qui a une résolution d'un Km (1 km). Ses 12 canaux permettent de procéder à ce qu'on appelle un "pseudo sondage". La fréquence de son cycle de vue rapide, avec une nouvelle image toutes les 15 minutes, permet de suivre les phénomènes météorologiques à évolution rapide, ce qui s'avère d'une grande utilité pour

les prévisionnistes qui peuvent ainsi reconnaître et prévoir les phénomènes météorologiques dangereux, orages, pluies violentes, brouillards ou le développement de dépressions aussi petites qu'intenses susceptibles d'aboutir à des tempêtes dévastatrices.[33]

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

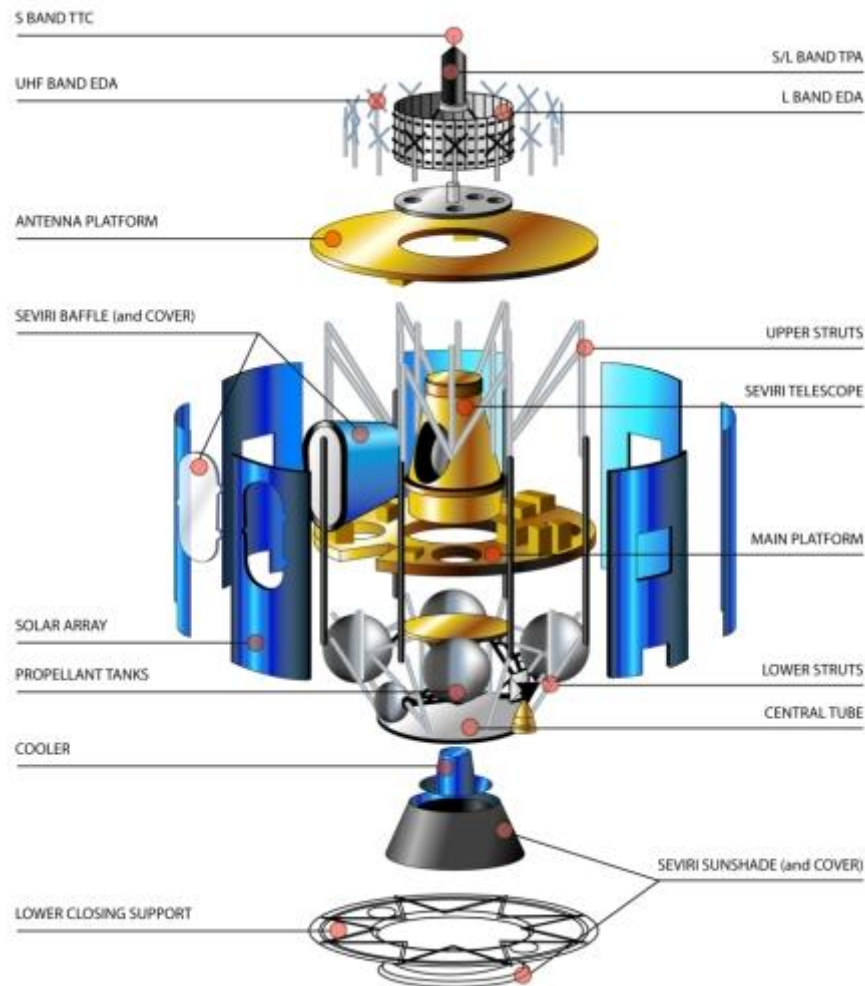


Figure 2.7 : Radiomètre SEVIRI ©ESA

Le satellite tourne à 100 tours par minute autour d'un axe parallèle à l'axe Nord-Sud de la terre. Le télescope du radiomètre de Météosat vise la terre par l'intermédiaire d'un miroir et balaie à chaque révolution du satellite une étroite bande de la surface de la terre. L'angle de balayage correspondant, de 18° . Le radiomètre est l'instrument principal dont les satellites météorologiques sont équipés. Cet instrument balaye la surface de la terre ligne par ligne. Chaque ligne consiste en une série d'images élémentaires ou pixel. Pour chaque

pixel, le radiomètre mesure l'énergie radiative dans différentes bandes spectrales. Cette mesure est numérisée, puis transmise à une station au sol où elle est traitée, avant d'être envoyée à la communauté des utilisateurs.[33]

Outre SEVIRI, les satellites MSG ont à bord l'instrument GERB de mesure du bilan radiatif de la terre qui fournit des informations précieuses sur le rayonnement de la planète, permettant aux chercheurs de calculer avec une grande précision le bilan radiatif terrestre, c'est-à-dire le rapport entre le rayonnement venant du Soleil et celui renvoyé dans l'espace. En complément de ces deux instruments, les satellites MSG sont dotés d'une charge utile de télécommunications très perfectionnée, nécessaire à l'exploitation, à ses télécommunications et à la diffusion des données aux utilisateurs. [33]

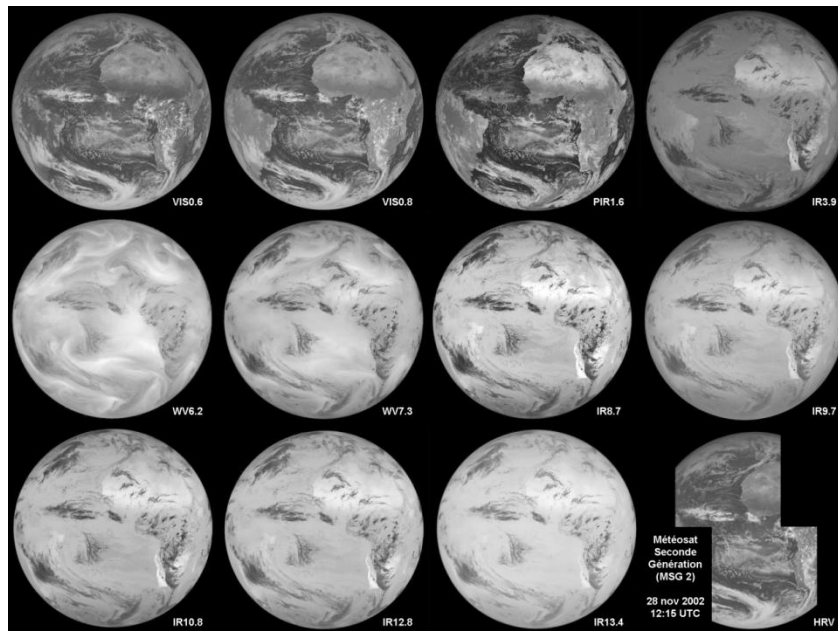


Figure 2.8 : Les douze bandes spectrales de SEVIRI

A titre de comparaison, les capteurs Météosat de la première génération ne disposaient que de trois canaux spectraux et transmettaient les images du globe toutes les trente minutes. La résolution spatiale est également améliorée, puisqu'elle est de 3km pour les bandes multi-spectrales (contre 5km pour la première génération) et de 1km pour le canal visible haute résolution HRV (contre 2,5km auparavant). Les performances de cet instrument, à la fois sur la résolution temporelle, la résolution spectrale et la résolution spatiale vont permettre aux météorologistes de décrire plus précisément les processus atmosphériques et de déceler plus aisément les phénomènes localisés à évolution rapide ou violente, tels que les orages, les tempêtes de neige ou le brouillard.

2.7 Segment sol de MSG

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

2.8 Bandes spectrales de MSG

L'instrument principal, le radiomètre imageur SEVIRI transmet des images de l'hémisphère terrestre dans des bandes spectrales différentes, du visible à l'infrarouge thermique. Les caractéristiques des 12 bandes spectrales de MSG et leurs principales utilisations sont synthétisées dans le tableau 2.2 :

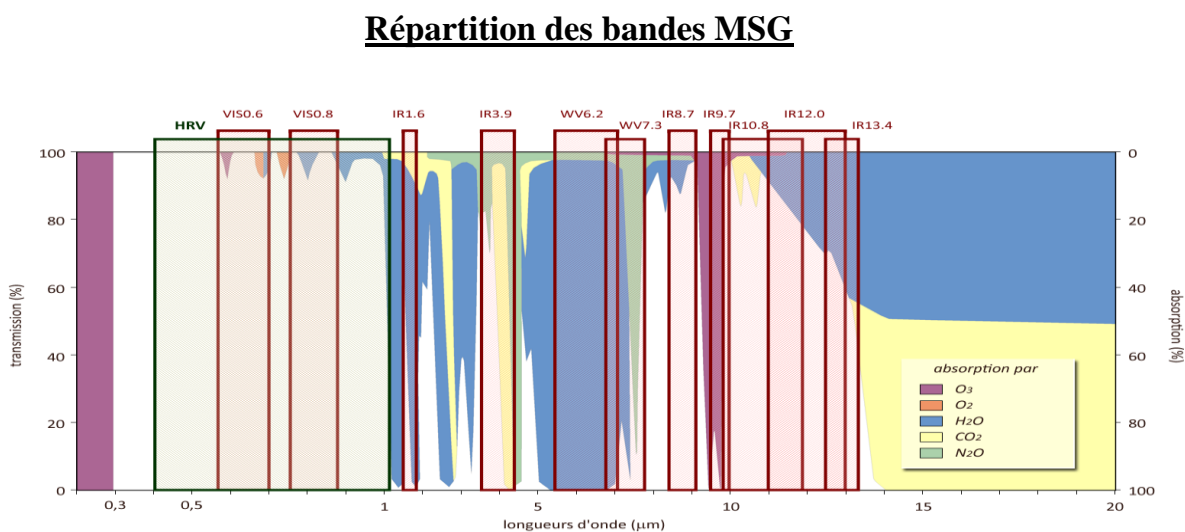


Figure 2.9 : L'ensemble des douze bandes spectrales de MSG réparties sur le spectre électromagnétique depuis les longueurs d'onde du visible jusqu'à l'infrarouge thermique.

Dans ce paragraphe, nous souhaitons simplement apporter quelques compléments sur certaines des bandes spectrales de MSG.

N° canaux	Bandes spectrales	Caractéristiques des bandes spectrales (μm)			Résolution spatiale	Utilisations
		λ min	λ	λ max		
1	VIS0.6	0.56	0.635	0.71	3 km	Détection et suivi des masses nuageuses, étude des terres émergées
2	VIS0.8	0.74	0.81	0.88	3 km	Détection et suivi des masses nuageuses, étude des terres émergées
3	PIR1.6	1.50	1.64	1.78	3 km	Distinction nuages d'eau et de glace, distinction neige / nuages chargés d'eau
4	IR3.9	3.48	3.90	4.36	3 km	Détection des nuages bas et brouillards nocturnes, températures de surface, incendies de forêts
5	WV6.2	5.35	6.25	7.15	3 km	Mesure de la vapeur d'eau dans la haute troposphère, instabilités atmosphériques et vents locaux
6	WV7.3	6.85	7.35	7.85	3 km	Mesure de la vapeur d'eau dans la moyenne troposphère, instabilités atmosphériques et vents locaux
7	IR8.7	8.30	8.70	9.10	3 km	Détection des cirrus, instabilités atmosphériques
8	IR9.7	9.38	9.66	9.94	3 km	Mesure de l'ozone
9	IR10.8	9.80	10.80	11.80	3 km	Détection des nuages, températures des surfaces terrestres et océaniques, instabilités atmosphériques
10	IR12.0	11.00	12.00	13.00	3 km	Détection des nuages, températures des surfaces terrestres et océaniques, instabilités atmosphériques
11	IR13.4	12.40	13.40	13.40	3 km	Détermination de la hauteur des cirrus, instabilités atmosphériques
12	HRV	Large bande 0.4 - 1.1			1 km	Détection et suivi des masses nuageuses, étude des terres émergées

Tableau 2.2 : Les douze bandes spectrales de SEVIRI

2.8.1 Le visible

Le canal panchromatique HRV, sensible à toutes les longueurs d'onde du visible (0,4 μm à 1,1 μm) a une résolution spatiale améliorée par rapport aux autres canaux et permet une observation bien plus détaillée des surfaces.

En complément du canal HRV, le satellite MSG possède une seule bande spectrale dans le visible. Le canal VIS0.6 centré sur le rouge, permet de distinguer les nuages, des océans et des terres émergées.

Avec une résolution spatiale de 1 km, le canal HRV permet d'observer des détails beaucoup plus fins que les autres bandes multi-spectrales. Observez le découpage du trait de côte, ainsi que les contours des nuages.

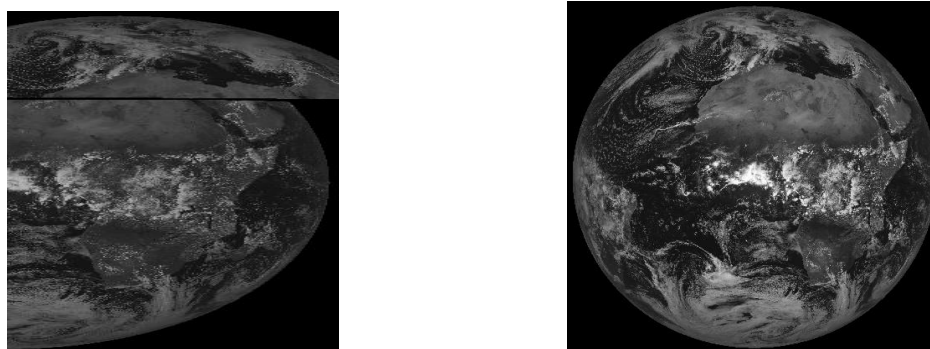


Figure 2.10 : Image MSG acquise le 23 mars 2013, 12h00 TU - canal HRV / canal VIS 0.6

2.8.2 Le proche infrarouge

L'instrument SEVIRI de MSG comporte deux bandes spectrales dans le proche infrarouge : le canal VIS 0.8 et le canal IR 1.6. Ces deux canaux permettent une meilleure distinction des surfaces émergées, car les sols et la végétation ont une réflectance plus importante dans le PIR que dans le visible (figure ci-dessous). Ces bandes spectrales sont utilisées également pour discriminer les nuages d'eau des nuages de glace, ainsi que pour détecter les surfaces couvertes de neige et de glace qui apparaissent en noir sur le canal IR1.6.

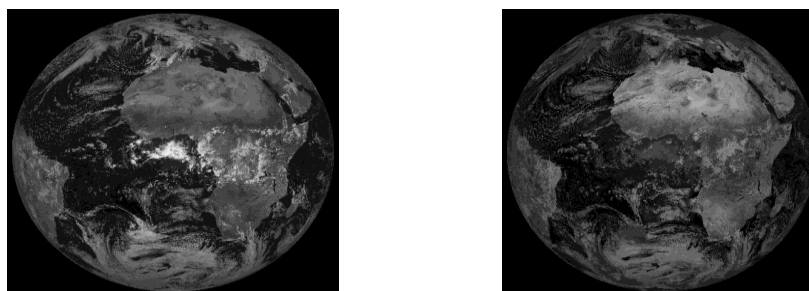


Figure 2.11 : Image MSG acquise le 23 mars 2013, 12h 00TU – VIS 0.8 et IR 1.6

Les surfaces continentales se distinguent mieux que sur la bande VIS 0.6 pour deux raisons :

- Une meilleure réflexion des sols nus et de la végétation dans le proche infrarouge
- L'eau absorbe davantage le rayonnement infrarouge que le rouge

On obtient ainsi un meilleur contraste entre les surfaces émergées et immergées.

2.8.3 Le moyen infrarouge

Dans le moyen infrarouge, le satellite MSG possède une bande centrée sur la longueur d'onde $3,9\mu\text{m}$. Le signal mesuré au niveau du canal IR3.9 provient aussi bien du rayonnement solaire réfléchi par les surfaces que le rayonnement thermique émis par ces mêmes surfaces. Il est très intéressant pour détecter les nuages bas et les brouillards, pour mesurer les températures de surface du sol et de la mer - uniquement pendant la nuit - ou encore pour détecter les incendies de forêt.

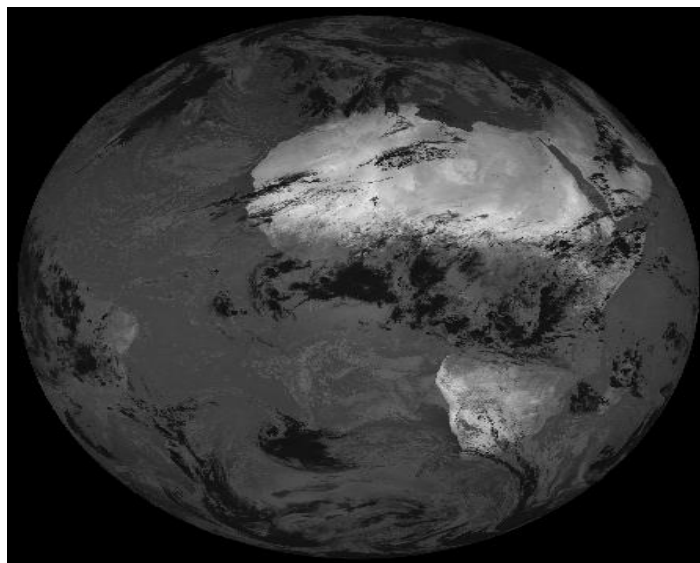


Figure 2.12 : Image MSG acquise le 23 mars 2013, 12h00 TU - canal IR 3.9

2.8.4 L'infrarouge thermique

C'est dans l'infrarouge thermique que les bandes spectrales sont le plus nombreuses. En effet, pas moins de sept canaux se répartissent entre les longueurs d'onde $6,2\mu\text{m}$ et $13,4\mu\text{m}$.

Les données acquises dans les bandes vapeur d'eau ($6,2\mu\text{m}$ à $7,3\mu\text{m}$) donnent des informations sur la teneur et la répartition verticale de l'humidité dans les hautes couches de l'atmosphère et sont très utiles pour l'analyse et les prévisions météorologiques à l'échelle synoptique.

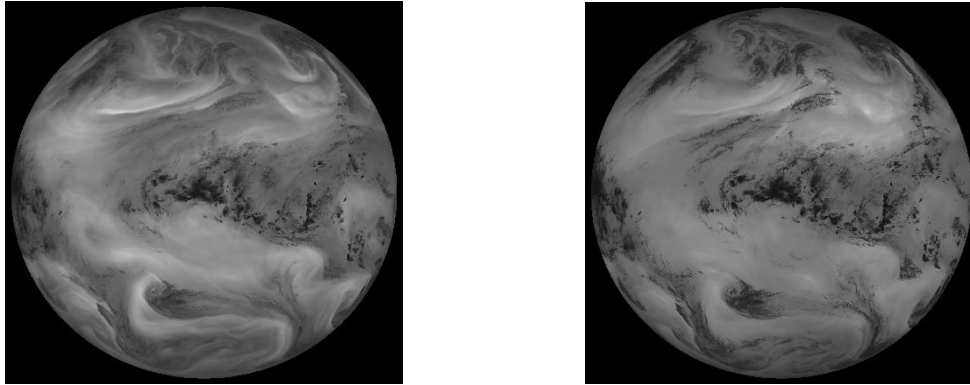


Figure 2.13 : Image MSG acquise le 23 mars 2013, 12h00 TU - canaux WV 6.2 à gauche et WV 7.3 à droite

Le canal $6,2\mu\text{m}$ renseigne essentiellement sur le contenu en vapeur d'eau des plus hautes couches de l'atmosphère, alors que le canal $7,3\mu\text{m}$ est sensible au contenu vapeur d'eau aussi bien dans les moyennes que les hautes couches atmosphériques.

Les autres bandes thermiques sont utilisées pour mesurer les températures de surface des sols, des océans et des nuages, ainsi que la teneur en ozone.

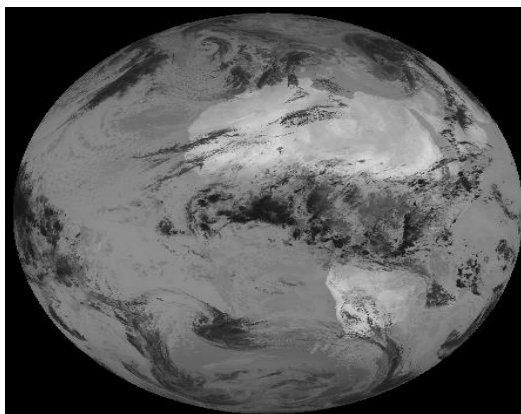


Figure 2.14 : Image MSG acquise le 23 mars 2013, 12h00 TU – canal thermique IR 10.8

2.9 Les compositions colorées (RGB) des canaux de SEVIRI

La compréhension de la perception de la couleur est une problématique complexe, en constante évolution, à la frontière de plusieurs disciplines. La manipulation des couleurs, passe tout d'abord par le choix d'un espace paramétrique, permettant différentes représentations de couleurs. Cet espace peut s'appuyer sur des grandeurs physiques, physiologiques et mathématiques. Les physiciens utilisent trois caractéristiques pour décrire les qualités d'une source de lumière polychromatique :

- la radiance (l'énergie émise),
- la luminance (l'énergie qu'un observateur humain perçoit),
- la brillance (traduit l'intensité chromatique perçue, subjective).

En tenant compte des propriétés "normales" des yeux humains, il apparaît que le spectre perceptible (d'environ 0,4 μm à 0,7 μm) est décomposable en trois couleurs primaires: rouge, bleu, et vert. La différence entre les couleurs primaires des lumières et celles des pigments est importante: pour les premières, elles sont additives (superposition); pour les secondes, elles sont soustractives (absorption d'une couleur primaire de la lumière, réflexion des deux autres), de sorte que l'on considère que les couleurs primaires des pigments sont plutôt le magenta, le cyan, et le jaune (qui sont les couleurs secondaires, c'est-à-dire mélange des primaires deux à deux, de la lumière).

2.9.1 Pseudo couleur et composition colorée

La visualisation d'une image, captée par satellite, sur un écran graphique peut soit se faire en «niveaux de gris», soit en «pseudo couleur» ou encore sous la forme d'une «composition colorée».

2.9.2 La représentation «niveaux de gris»

L'intensité des informations captées par le satellite MSG est codée numériquement à l'origine sur 10 bits. Pour des raisons de commodités, elle est codée sur l'ordinateur soit sur 8 bits (dégradation de l'information de départ) ou sur 16 bits. L'affichage en niveaux de

gris se fait par correspondance entre ces derniers, ordonnés le long d'une échelle allant du noir au blanc, et entre les valeurs enregistrées par le satellite allant d'une valeur minimale à une autre maximale. Par conséquent, lors de l'affichage d'un canal d'une image, la hiérarchie des niveaux de gris correspond à celle de l'intensité des pixels. [01]

Contrairement à l'affichage en niveaux de gris, aucun ordre parmi celles-ci ne peut être utilisé en correspondance avec la hiérarchie des valeurs des pixels. La couleur est donc principalement utilisée, dans ce cas, pour améliorer la distinction visuelle des valeurs. Elle est donc purement arbitraire et ne peut être source d'interprétation. Dans un tel contexte on parle de «pseudo couleur».

2.10 Missions élargies

Avec les satellites ‘Météosat Seconde Génération’, la mission principale reste bien entendu toujours la même, à savoir, améliorer les prévisions météorologiques quotidiennes et anticiper les phénomènes violents. Cependant les données plus nombreuses, à la fois spectralement et temporellement et de meilleure résolution spatiale, vont permettre aux chercheurs d'acquérir de meilleures connaissances des processus physiques gouvernant le climat, mais aussi des phénomènes naturels et ainsi, d'affiner et de diversifier les missions.[33]

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

- ✓ L'hydrologie ;
- ✓ L'agriculture ;
- ✓ Le suivi des espaces urbanisés ;
- ✓ L'halieutique à travers la cartographie des températures de surface des océans ;
- ✓ L'étude des phénomènes éruptifs, une meilleure estimation des vents ;
- ✓ L'évolution du couvert végétal ;
- ✓ Les sécheresses ;
- ✓ La détection des incendies de forêts ;
- ✓ L'émergence des épidémies par le suivi des nuages de poussières ;
- ✓ *etc*

Un ensemble de six missions principales et deux complémentaires a été clairement défini dans le cadre du Programme Météosat Seconde Génération :

❖ **Mission d'imagerie multi-spectrale**

La mission d'analyse des masses d'air doit utiliser les caractéristiques spectrales des canaux centrés sur la bande d'absorption de la vapeur d'eau, du gaz carbonique et de l'ozone pour surveiller l'état thermodynamique de l'atmosphère dans les basses couches.

❖ **Mission d'imagerie à haute résolution**

La mission d'imagerie à haute résolution (1 km au nadir) dans le visible doit permettre de caractériser et de suivre l'évolution des phénomènes nuageux de faible étendue spatiale, tels que les nuages convectifs.

❖ **Mission d'extraction des produits**

La mission d'extraction des produits permettra, à partir des jeux de données images d'origine, de fournir des produits météorologiques et géophysiques dérivés en temps quasi réel, comme les vents, les températures de surface de la mer et des sols, des indices d'instabilité des masses d'air, les brouillards, des indices de végétation,... . A tous ces produits viennent également s'ajouter ceux élaborés par le réseau des Centres d'applications satellitaires.

❖ **Mission de collecte des données**

La mission de collecte des données consiste à recueillir et relayer les données et autres mesures environnementales transmises par des plates-formes automatisées (bouées marines, balises terrestres, aéroportées, ...).

❖ **Mission de dissémination**

La mission de dissémination est une mission de télécommunication, puisqu'elle a pour objectif de transmettre les images et autres données météorologiques aux diverses communautés d'utilisateurs, en temps réel, via le service de distribution EUMETCast. La diffusion sera réalisée à l'aide d'un canal de transmission d'information à haut débit (HRIT pour High Rate Information Transmission) pour les principaux utilisateurs et les centres spécialisés. Un canal de transmission d'information à plus faible débit (LRIT pour Low

Rate Information Transmission) assurera la dissémination des données images aux autres utilisateurs.

❖ Missions et services complémentaires

En complément des missions citées précédemment, les satellites Météosat Seconde Génération offrent également :

Un instrument géostationnaire de détermination du bilan radiatif de la Terre (GERB) qui participera grandement à l'avancée des recherches en cours sur le réchauffement de la planète en fournissant aux chercheurs des données essentielles sur le bilan radiatif de la Terre.

2.11 Conclusion

Grâce à leur fréquence, leur précision et leur qualité, les données et images dérivées de MSG s'avèrent particulièrement précieuses pour la prévision immédiates et à courte échéance. Combinées avec les autres moyens existant, Elles permettent aux météorologues de reconnaître et de suivre le développement des phénomènes météorologiques susceptibles de devenir dangereux et de prévenir les services d'intervention et les autorités locales. Ainsi, elles contribuent ainsi à atténuer les dégâts et à protéger les vies et les biens. .[33]

Aussi, Les observations des satellites météorologiques géostationnaires servent à établir toutes sortes d'indices de végétation. Les méthodes reposent sur l'utilisation de deux canaux très sélectifs de prise d'images dans la bande visible, ayant chacun une sensibilité différente à la quantité de chlorophylle dans la végétation. Le satellite qui nous intéresse dans ce travail est le satellite METEOSAT (du Système Européen EUMETSAT).

CHAPITRE 3

Les propriétés spectrales des végétions

Chapitre 3

Les propriétés spectrales des végétations

3.1 Introduction

La végétation joue un rôle fondamental pour la vie terrestre en synthétisant de la matière organique par le processus de photosynthétique. Son développement dépend des conditions climatiques et de la richesse des sols, mais aussi des pressions exercées par la vie animale et l'homme plus particulièrement. Elle est étudiée à l'échelle mondiale grâce aux images fournies par les satellites d'observation de la terre.

La lumière émise par le soleil est en partie réfléchi par le couvert végétal puis détectée et analysée. Parce que les plantes absorbent fortement la lumière visible et très peu la lumière proche infrarouge, leurs propriétés optiques permettent de les distinguer de leur environnement.

Dans le présent chapitre, nous donnerons un aperçu général sur les propriétés spectrales des végétations, la notion de réflectance, l'indice floral et l'indice de végétation.

3.2 Identification des objets au sol

Le propos de la télédétection est notamment d'identifier des objets au sol, de reconnaître les variétés de la couverture végétale, de déterminer la nature des sols, d'établir des caractéristiques de phénomènes percevables à la surface de la terre. Tout ceci par l'analyse du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par celle-ci.

La végétation, les sols et les eaux sont les trois principaux objets examinés dans les trois domaines spectraux de la télédétection, à savoir le visible et proche infrarouge, l'infrarouge thermique et les hyperfréquences.

3.3 Caractéristiques spectrales des sols

La signature spectrale des sols est en général caractérisée par une augmentation progressive de la réflectance depuis les longueurs d'onde du visible jusqu'à celles de l'infrarouge. Les seules discontinuités observées correspondent aux bandes d'absorption de l'eau, à 1,4 μm et 1,9 μm . Fonctions à la fois de la composition minérale et organique des sols, de leur contenu en eau et de la rugosité, les propriétés optiques des sols peuvent présenter une variabilité considérable (Figure 3.1). Une augmentation de l'humidité du sol entraîne une baisse de la réflectance sur tout le spectre, de même qu'un accroissement de la rugosité (obscurcissement par effet d'ombre). [33]

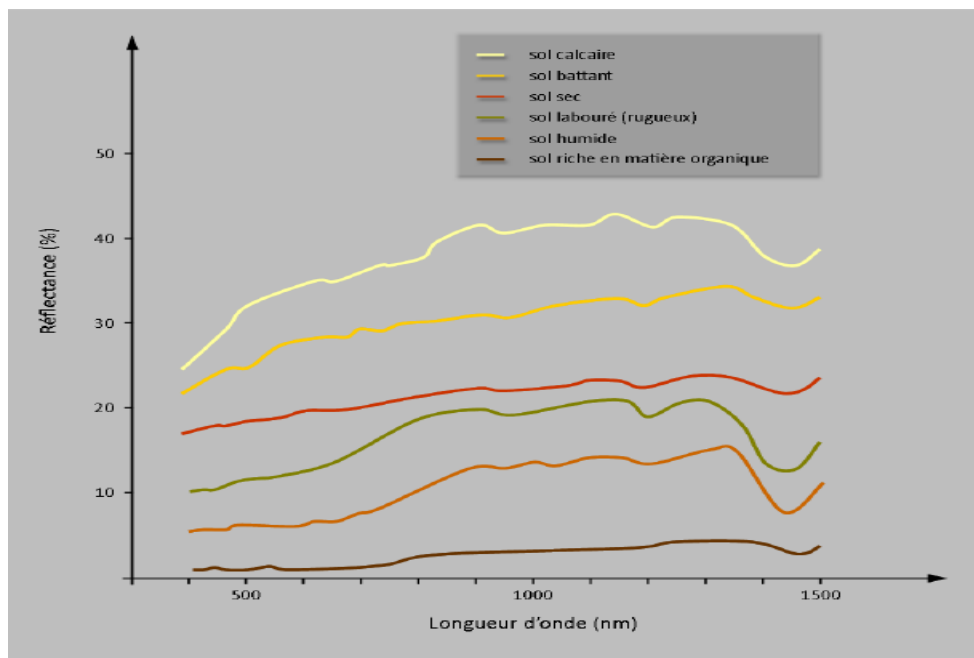


Figure 3.1 : Signatures spectrales pour différents types de sols

3.4 Caractéristiques spectrales de la végétation

Comme dans la plupart des études thématiques par télédétection, l'identification et le suivi des couverts végétaux repose sur la réponse spectrale des surfaces dans les différentes longueurs d'onde et donc sur la notion de signature spectrale. Nous rappelons simplement que la signature spectrale d'une surface correspond à la courbe de réflectance de la surface en fonction des longueurs d'onde du spectre électromagnétique, dans des conditions données. La réflectance correspond au rapport de l'intensité du rayonnement réfléchi par

une surface à celle du rayonnement incident. C'est donc une grandeur sans dimension, qu'on exprime généralement en pourcentage.

Les propriétés spectrales des couverts végétaux dépendent à la fois de la nature de la végétation qui les compose, de leur état physiologique, de leur teneur en eau (propriétés optiques des feuilles), mais aussi du sol sous-jacent qui influera d'autant plus la mesure spectrale que la végétation sera clairsemée (structure du couvert végétal). [33]

3.5 Propriétés optiques des feuilles

Les propriétés optiques des feuilles sont reliées à leurs caractéristiques biochimiques (teneur en pigments, structure cellulaire, teneur en eau, état physiologique,...). On distingue trois types d'éléments qui interviennent dans les propriétés optiques des feuilles et qui correspondent aux grands domaines spectraux du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen :

- ❖ La teneur en pigments
- ❖ L'anatomie des feuilles, leur structure cellulaire
- ❖ La teneur en eau

Ces trois éléments varient au cours du temps et entraînent par conséquent des changements dans la structure et les caractéristiques des couverts végétaux. Plutôt que de parler de signature spectrale, on va parler de comportement spectral de la végétation.

3.5.1 Les pigments foliaires

Tous les végétaux renferment des pigments : chlorophylles (pigments verts), carotènes (pigment orangés) et anthocyanes (pigments bleus rouges), les pigments chlorophylliens étant de loin les plus abondants. La chlorophylle possède deux bandes d'absorption dans le bleu (0,45 μm) et dans le rouge (0,66 μm). La présence des pigments foliaires dans les végétaux est donc responsable de la forte absorption du rayonnement visible, avec un maximum relatif de réflectance autour du vert (0,55 μm).

3.5.2 La structure cellulaire des feuilles

La structure anatomique des feuilles joue un rôle très important dans la signature spectrale de la végétation. Si les pigments chlorophylliens absorbent la majeure partie du rayonnement visible qui leur parvient, ils sont en revanche totalement transparents au rayonnement de plus grande longueur d'onde. Le proche infrarouge traverse donc la feuille jusqu'à une couche cellulaire formée de cellules irrégulières et d'espaces intercellulaires dans lesquels sont stockés les gaz échangés entre la feuille et l'atmosphère. C'est au niveau de cette couche, lieu d'échange entre l'oxygène et le dioxyde de carbone dans les processus de la photosynthèse et de la respiration, que le rayonnement proche infrarouge est fortement réfléchi (Figure 3.3). Il est d'autant mieux réfléchi que le parenchyme lacuneux est bien développé.

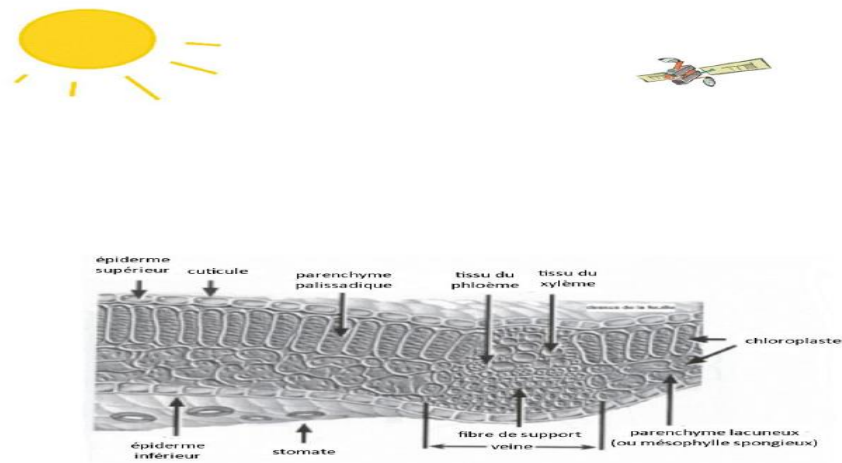


Figure 3.2 : La structure cellulaire des feuilles

Les longueurs d'onde bleue et rouge sont absorbées par la chlorophylle. Les vertes sont très faiblement réfléchies par la feuille. Le rayonnement PIR, lui, est fortement réfléchi par le parenchyme lacuneux.

La réflectance dans les bandes, rouge et proche infrarouge est donc directement liée à la biomasse végétale. Il est donc possible de déterminer radiométriquement cette biomasse en utilisant l'information contenue dans ces deux bandes spectrales, en utilisant des ‘indices de végétation’.

3.5.3 L'influence de la teneur en eau

La teneur en eau des feuilles est également un facteur qui va fortement influencer la signature spectrale de la végétation, dans les longueurs d'onde de l'infrarouge moyen. Plus la teneur en eau est forte, plus la réflectance de la végétation diminue, en particulier aux longueurs d'onde 1,45 μm et 1,9 μm qui correspondent aux bandes d'absorption de l'eau. Ce domaine de longueur d'onde est très utile en télédétection des couverts végétaux, il permet notamment de détecter les plantes en état de stress hydrique.

La figure 3.3 précise les facteurs prépondérants dans la signature spectrale d'un végétal sain, pour des longueurs d'onde allant du visible à l'infrarouge moyen.

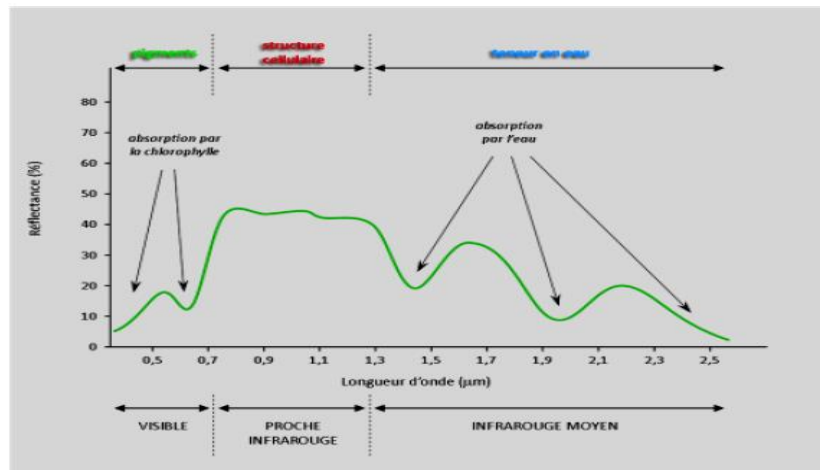


Figure 3.3 : Principaux facteurs influençant la signature spectrale de la végétation dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen

3.5.4 Comportement spectral

On parle de comportement spectral plutôt que de signature spectrale pour bien montrer que la réflectance de la végétation n'est pas constante. Elle varie non seulement en fonction des types de végétaux (les résineux par exemple, ont une réflectance moins importante que les feuillus dans le proche infrarouge), mais également selon l'état de santé d'une plante. Comme la montre la figure 3.4, la signature spectrale de la végétation dans le visible ne varie pratiquement pas quel que soit le type de végétal. En revanche, on note des différences sensibles dans le proche infrarouge, liées à la structure du parenchyme lacuneux, comme nous l'avons vu précédemment. La différence est très nette entre les

feuillus et les résineux, ces derniers ayant une réflectance bien moindre dans le proche infrarouge.

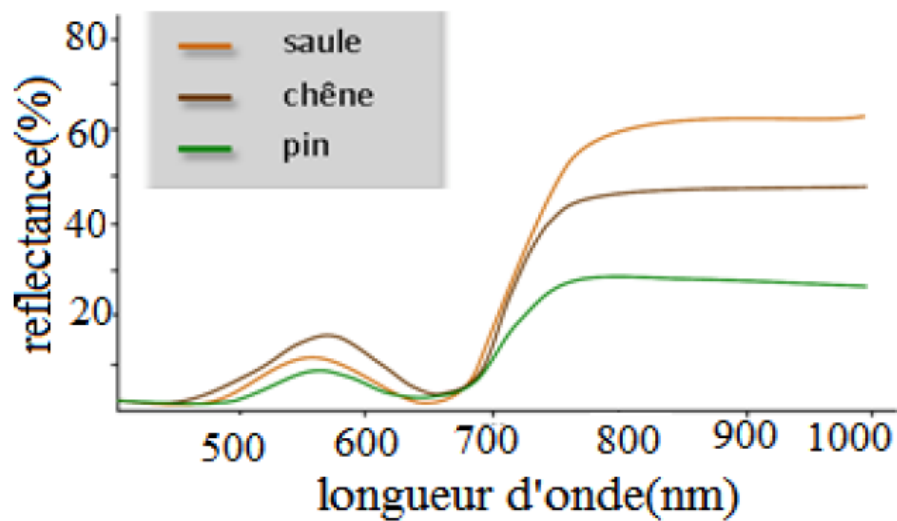


Figure 3.4 : Variations de la signature spectrale en fonction du type de végétation

Les changements physiologiques qui accompagnent la croissance d'une plante, depuis la phase de maturation jusqu'à sa sénescence, qu'elle soit naturelle (stades phénologiques) ou liée au stress, influent fortement sur la signature spectrale de la végétation. Lorsque vient l'automne par exemple, les plantes diminuent leur activité photosynthétique, les pigments chlorophylliens disparaissent laissant aux autres pigments foliaires le soin d'exprimer leurs couleurs. Les cellules entrent peu à peu en état de plasmolyse, entraînant une déstructuration des couches cellulaires. On observe par conséquent une sensible augmentation de la réflectance dans les grandes longueurs d'onde du visible (jaune - rouge) et parallèlement, une diminution de la réflectance dans le proche infrarouge.

3.6 Structure du couvert végétal

Lorsqu'on étudie la végétation par télédétection, les variations de la réflectance mesurées au niveau du capteur satellitaire sont, non seulement liées aux propriétés optiques des feuilles, mais aussi à la structure des formations végétales. La structure d'un couvert végétal n'est pas liée aux organes végétaux, mais concerne la plante ou le peuplement. Elle prend en compte à la fois des paramètres de structure de la canopée, comme l'indice de surface foliaire ou l'angle d'inclinaison des feuilles, et l'organisation spatiale des peuplements, leur agencement, leur densité, ainsi que le taux de recouvrement du sol selon

le stade phénologique. Lorsque la végétation est peu couvrante, la réponse spectrale des plantes est affectée par la réflectance des sols. Les interactions du rayonnement entre la végétation et le sol sont si complexes qu'il est très difficile de corriger l'influence perturbatrice du sol. Le signal mesuré par le capteur intègre généralement les réflectances du sol et de la végétation, comme le schématise la figure 3.5 (Huete, 1989).

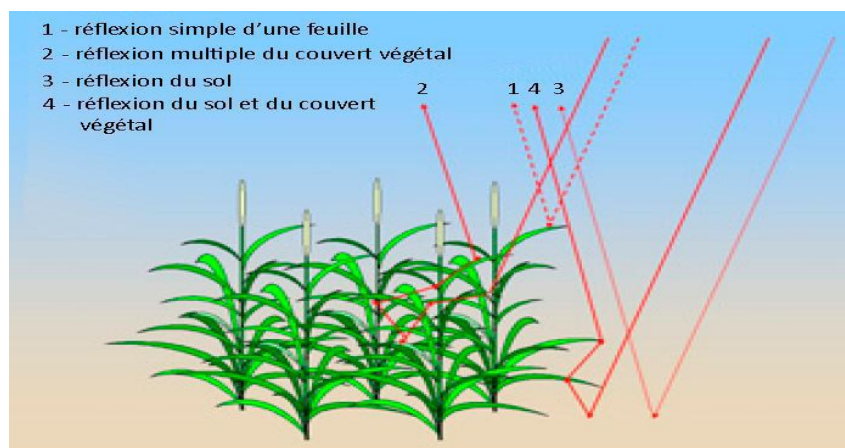


Figure 3.5 : Illustration des interactions entre le sol et la végétation, intégrées au niveau de la mesure satellitaire

3.7 L'indice de surface foliaire

L'indice de surface foliaire (**LAI**) est le ratio de la surface totale supérieure des feuilles à la surface du sol sur laquelle la végétation se développe. Le LAI est une grandeur sans dimension qui varie en général de 0 pour le sol nu à 8 pour une forêt tempérée dense. Pour des forêts tropicales très fermées ou des forêts de conifères, la valeur du LAI peut dépasser 15. C'est un bon indicateur de la croissance et de la biomasse végétale, ainsi que de la densité d'un peuplement. Le LAI est relié à l'indice de végétation par une fonction logarithmique. On observe en général un pallier à partir des valeurs de LAI de 5 ou 6, et on estime que pour un couvert végétal avec un LAI supérieur à 5, toute possibilité d'éclairement incident direct du sol sous-jacent est écarté, quelle que soit la géométrie d'éclairement.[33]

3.8 Les indices de végétation

En télédétection, les indices font parties des méthodes de traitement que l'on appelle les transformations multispectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au

niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement.

Basés sur le caractère multispectral des données satellitaires, ils permettent de décrire l'état d'un phénomène. Un indice de végétation par exemple, peut rendre compte du stade de croissance végétale à un moment donné.

Tous les indices, que ce soient les indices de végétation, les indices des sols, les indices relatifs à la colonne d'eau, ..., reposent sur une approche empirique basée sur des données expérimentales. Les indices de végétation sont très utilisés d'une part, pour identifier et suivre la dynamique de la végétation, mais aussi pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux, comme la biomasse, l'indice de surface foliaire, la fraction de rayonnement photosynthétique actif,

3.9 Le principe

Le principe consiste à relier entre-elles certaines caractéristiques de la végétation (teneur en eau, évapotranspiration, ...) et les mesures radiométriques (valeurs de réflectance et éventuellement températures de brillance) acquises dans deux ou plusieurs bandes spectrales d'un capteur. Concrètement, il s'agit de réaliser des combinaisons (différence, rapport, ...) linéaires ou non, de réflectances obtenues dans les différentes longueurs d'onde. Le calcul des indices s'appuie essentiellement sur les écarts de réflectance constatés dans les différentes bandes spectrales, ainsi que sur la variabilité des réflectances au sein d'une même bande spectrale, qui traduisent des surfaces de nature différente. Par conséquent, on utilise principalement les différences des propriétés optiques de la végétation dans le rouge et le proche infrarouge. Les réflectances dans le proche infrarouge augmentent avec la présence de la végétation (forte réflexion par le parenchyme lacuneux), tandis que celles dans le rouge diminuent (pic d'absorption de la chlorophylle).

Si l'on observe le diagramme de dispersion ou scattérogramme des bandes spectrales rouge et proche infrarouge, on constate généralement une répartition des valeurs de réflectance en forme de chapeau (figure 3.6). La base du chapeau répartie le long de la bissectrice représente la droite des sols, dépourvue de végétation. Les variations de réflectance le long de la droite des sols traduisent le caractère sec ou humide des sols. Plus

on est proche de l'origine (faibles valeurs de réflectances dans le rouge et le proche infrarouge), plus les sols sont humides et a contrario, plus on s'éloigne de l'origine, plus les sols sont secs.

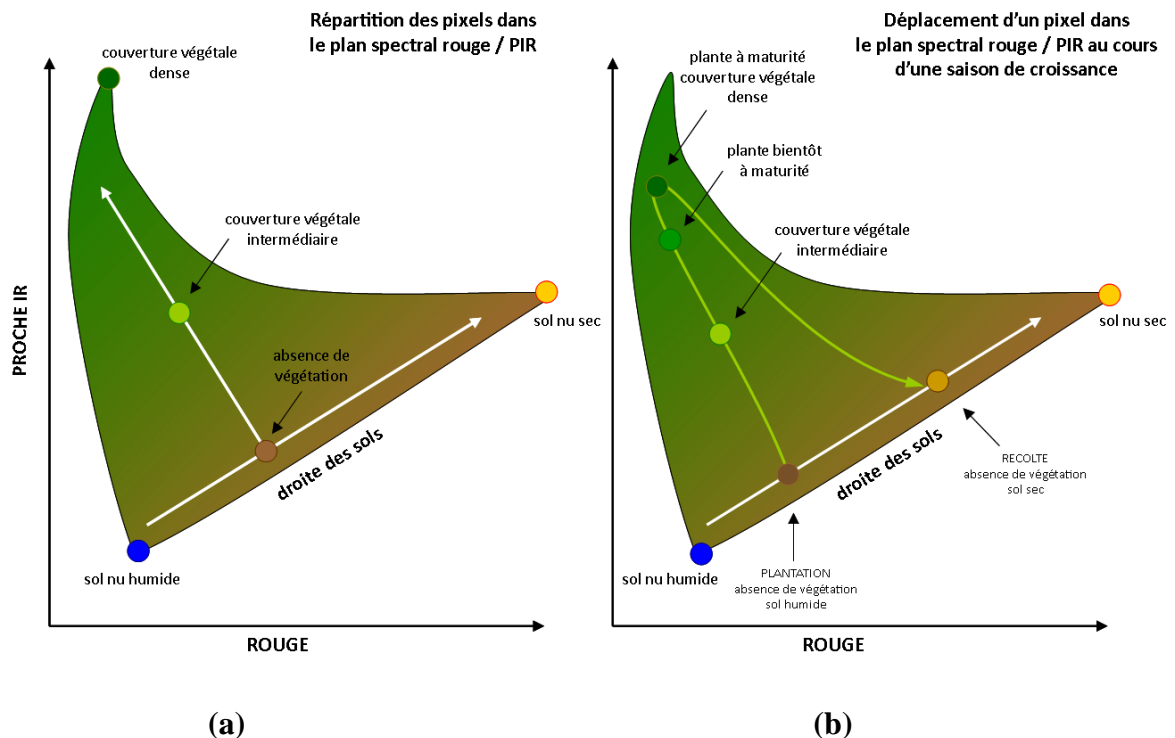


Figure 3.6 : Répartition spectrale des réflectances dans le rouge et dans le proche infrarouge.

(a) Plus la couverture végétale est dense, plus les valeurs de réflectance augmentent dans le PIR et plus elles diminuent dans la bande rouge. La droite des sols, dépourvue de végétation présente des réflectances qui varient en fonction de leur teneur en eau.

(b) exemple du déplacement d'un pixel 'agricole' dans l'espace multispectral rouge / PIR au cours d'une saison de croissance. Après la germination, la réflectance du pixel s'éloigne de la ligne des sols pour atteindre le sommet du chapeau. Après la récolte, le pixel retrouve une valeur de réflectance correspondant à un sol nu, éventuellement plus sec.

3.10 Les principaux indices de végétation

De très nombreux indices de végétation ont été construits et utilisés depuis maintenant une quarantaine d'années. Ils prennent la forme soit d'expressions très basiques (simple

différence ou simple ratio), soit de formules beaucoup plus complexes. On a l'habitude de les classer en familles d'indices selon qu'ils prennent ou non en compte les facteurs externes aux couverts végétaux, tels que l'influence de l'atmosphère, la contribution spectrale des sols, la teneur en eau des végétaux (indices de sécheresse), ... [33]

3.10.1 Les indices simples

Les indices de végétation les plus simples sont basés sur des opérations arithmétiques entre deux bandes spectrales, généralement le rouge et le proche infrarouge, mais également les bandes du proche et du moyen infrarouge.

- Parmi les indices les plus élémentaires et les plus anciens, on trouve :

- *L'indice de végétation brut, ou indice différentiel de végétation* (DVI en anglais) qui est égal à la simple différence des bandes du proche infrarouge et du rouge

$$DVI = \rho_{PIR} - \rho_R, \quad (3.1) [4]$$

Où :

ρ_R : Réflectance dans la bande rouge.

ρ_{PIR} : Réflectance dans la bande proche infrarouge.

- *L'indice de végétation par quotient* (RVI en anglais), s'exprime également de façon très simple. Il est égal au rapport entre les bandes du PIR et du rouge.

$$RVI = \frac{\rho_{PIR}}{\rho_R}, \quad (3.2) [4]$$

L'inconvénient de ces indices est qu'ils sont très sensibles aux variations atmosphériques, ainsi qu'à la contribution spectrale des sols. En outre, lorsque la végétation est très dense, la réflectance dans la bande rouge devient très faible, ce qui entraîne une saturation des valeurs de l'indice RVI.

- *L'indice de végétation par différence normalisé ou indice de Tucker* (NDVI en anglais).

L'indice le plus connu et le plus utilisé est Son expression est la suivante :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R} \quad (3.3) [4]$$

La normalisation par la somme des deux bandes permet de réduire les effets d'éclairement. Le NDVI conserve une valeur constante quelque soit l'éclairement global, contrairement à la simple différence qui est très sensible aux variations d'éclairement.

Les valeurs du NDVI sont comprises en théorie entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7 - les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

- *Les indices de stress hydrique*, comme le MSI ou le NDWI sont des indices simples dans lesquels on utilise la bande spectrale du moyen infrarouge à la place de la bande rouge. Ces indices varient en fonction de la teneur en eau des feuilles. Ils permettent de déceler lorsque les végétaux sont en état de stress hydrique et sont par conséquent très utiles pour le suivi de la végétation en zone sèche.

$$MSI = \frac{\rho_{MIR}}{\rho_{PIR}} \quad , \quad (3.4) [4]$$

$$NDWI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_{MIR}}{\rho_{PIR} + \rho_{MIR}} \quad , \quad (3.5) [4]$$

Où

ρ_{MIR} : réflectance dans la bande infrarouge moyen.

ρ_{PIR} : réflectance dans la bande proche infrarouge.

3.10.2 Les indices prenant en compte l'influence des sols

Ces indices ont été proposés avec pour objectif de corriger ou tout au moins, réduire l'influence des sols sous-jacents aux couverts végétaux sur le signal mesuré au niveau du capteur satellitaire. Trois types d'indices ont été développés : des indices orthogonaux (comme l'indice perpendiculaire de végétation - PVI), caractérisés par la distance perpendiculaire entre un point qui représente le couvert végétal dans l'espace multispectral rouge / PIR et la droite des sols. Un deuxième type d'indices qui dérivent de la formulation du NDVI (comme l'indice de végétation ajusté aux sols - SAVI). Enfin la dernière catégorie d'indices combine les deux types précédents. C'est le cas des indices TSAVI et MSAVI discutés un peu plus loin.

- *L'indice perpendiculaire de végétation* (PVI) suppose que la distance perpendiculaire est linéairement reliée à la couverture végétale. Cela a pour conséquence de produire des isolignes de végétation (couverture végétale d'égale densité) parallèles à la droite des sols, ce qui n'est pas très représentatif de la réalité. En effet, Huete (1988) a montré que les pentes des lignes de végétation croissent avec l'augmentation de la biomasse végétale.

$$PVI = \frac{1}{\sqrt{a^2+1}} (\rho_{PIR} - a\rho_R - b) , \quad (3.6) [4]$$

Où

a : Pente de la droite des sols dans l'espace (R, PIR)

b : ordonnée à l'origine de la droite des sols

- *Indice de végétation ajusté pour le sol*, le SAVI proposé par Huete (1988), qui introduit un paramètre d'ajustement, noté L , qui caractérise le sol et son taux de recouvrement par la végétation. Huete a montré que les isolignes de végétation ne sont pas parallèles à la droite des sols, mais qu'elles coupent celle-ci en un point selon la densité du couvert végétal. Le paramètre L prend la valeur de 0,25 pour une forte densité et de 1 pour une très faible densité de végétation. Pour des densités intermédiaires, il est égal à 0,5.

$$SAVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + L} (1 + L) , \quad (3.7) [4]$$

Où L est une constante égale à 0,5.

- **Indice transformé de végétation ajusté pour le sol**, TSAVI, Baret *et al.* (1989) proposent une amélioration de l'indice SAVI. Leur est basé sur la détermination préalable de la droite des sols à partir des bandes spectrales du capteur. Il utilise la pente a et l'ordonnée à l'origine b de la droite, plutôt que les valeurs arbitraires fixées pour l'indice SAVI.

$$\text{SAVI} = \frac{(\rho_{\text{PIR}} - a\rho_{\text{R}} - b)}{\rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{R}} - ab + 0.08(1 + a^2)}, \quad (3.8) [4]$$

- **Indice modifié de végétation ajusté pour le sol**, MSAVI, Qi *et al.* (1994) proposent eux aussi une amélioration du SAVI. Dans leur, le paramètre L n'est plus une constante, mais il est ajusté automatiquement aux conditions locales. L'expression de l'indice MSAVI est la même que celle de l'indice SAVI. La différence concerne le facteur L qui dépend à la fois de la droite des sols, du NDVI et de l'indice de végétation par différence pondérée (en anglais, Weighted Difference Vegetation Index, abrégé. WdVI - Richardson et Wiegand, 1977).

$$\text{MSAVI} = \frac{\rho_{\text{PIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{R}} + L} (1 + L), \quad (3.9) [4]$$

Avec $L = 1 - 2 * a * \text{NDVI} * \text{WdVI}$

Où

a est la pente de la droite des sols

$$\text{WdVI} = \rho_{\text{PIR}} - a\rho_{\text{R}}$$

3.10.3 Les indices prenant en compte les effets de l'atmosphère

Les gaz et aérosols présents dans l'atmosphère affectent le rayonnement électromagnétique par les processus de diffusion et d'absorption. La diffusion (diffusion de Rayleigh) étant davantage sélective vis-à-vis des courtes longueurs d'onde (bleu) que vis-à-vis des grandes (rouge), la correction est souvent basée sur la différence entre les bandes spectrales bleu et rouge. Kaufman and Tanré, 1992 proposent un indice permettant de réduire les effets atmosphériques en utilisant la bande bleue, l'indice ARVI.

$$\text{ARVI} = \frac{\rho_{\text{PIR}} - \rho_{\text{b}}}{\rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{b}} + L} (1 + L), \quad (3.10) [4]$$

Où :

ρ_{rb} : Est une combinaison des réflectance dans les bandes spectrales bleu et rouge.

$$\rho_{rb} = \rho_{rouge} - \gamma (\rho_{bleu} - \rho_{rouge}), \quad (3.11) [4]$$

γ : Est un facteur d'auto-correction atmosphérique qui dépend du type d'aérosols présents. Il est calculé à partir des réflectances intrinsèques de l'atmosphère dans les bandes bleue et rouge.

Pinty et Verstraete, 1992, quant à eux, proposent une relation non linéaire pour minimiser l'influence de l'atmosphère sur la mesure de l'indice de végétation, l'indice GEMI.

$$GEMI = \eta (1 - 0.25\eta) - \frac{\rho_{rouge} - 0.25}{1 - \rho_{rouge}} (1 + L), \quad (3.12) [4]$$

$$\text{Avec } \eta = \frac{2(\rho^{2PIR} - \rho^{2R}) + 1.5 + 0.5 \rho_{rouge}}{\rho_{PIR} + \rho_{rouge} + 0.5}$$

3.10.4 Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère

En combinant les indices présentés ci-dessus, notamment le SAVI et l'ARVI, il est possible d'obtenir des indices qui corrigent les effets conjugués des sols et de l'atmosphère, comme l'indice de végétation amélioré (EVI, Huete et *al.*, 1999), produit standard adopté par la NASA pour les instruments TERRA et AQUA de MODIS.

$$EVI = G * \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + C_1 \rho_R - C_2 \rho_B + L} (1 + L), \quad (3.13) [4]$$

où :

G : facteur de gain (égal à 2,5)

L : facteur d'ajustement des sols

C_1 et C_2 : coefficients de correction de la diffusion atmosphérique.

3.10.5 Les indices prenant en compte la température de surface

Plusieurs études ont suggéré l'utilisation combinée de l'indice de végétation et de la température de surface des sols mesurée dans l'infrarouge thermique, pour estimer le taux d'humidité des sols, ainsi que l'état de stress hydrique des végétaux (Jackson et *al.*, 1977; Goward et *al.*, 2002).

Parmi les techniques développées, la méthode dite 'du triangle', suppose que la température de surface des sols dépend essentiellement de la couverture végétale et de l'humidité des sols (figure 3.7).

Le côté du triangle correspondant au NDVI le plus faible représente la droite des sols nus, depuis les sols secs (températures les plus élevées) jusqu'aux sols saturés en eau (températures les plus basses).

Le sommet en bas à droite du triangle correspond à la densité maximum de végétation. La droite reliant les températures de surface les plus élevées (sols secs) au maximum de densité de la végétation est appelée 'limite sèche'.

Celle reliant les températures de surface les plus basses (sols humides) au maximum de densité de la végétation est appelée 'limite humide'.

Dans cette méthode, la température de surface des sols est reliée à l'indice de végétation par une relation linéaire décroissante. Plus la végétation a une densité importante, plus la température de surface est faible. La végétation régule la température de surface en absorbant l'énergie rayonnante et en la réémettant sous forme de chaleur latente via le processus d'évapotranspiration.

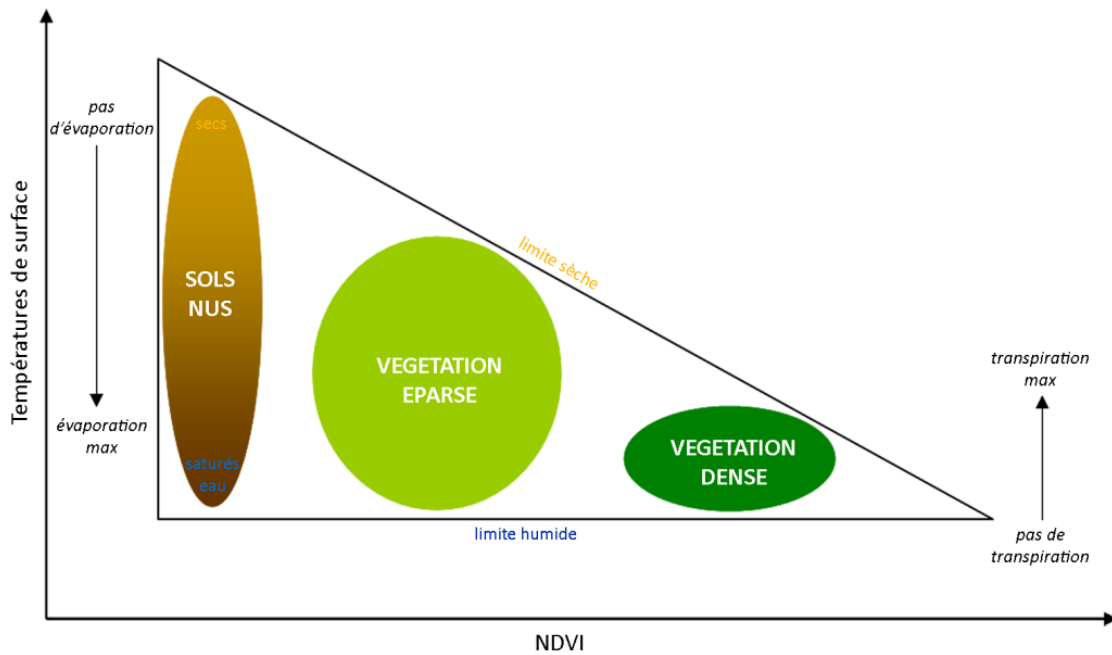


Figure 3.7 : Relation simplifiée entre la température de surface et l'indice de végétation

Les pixels de l'image ont une répartition triangulaire dans le plan $T_s / NDVI$. (adapté d'après Lambin et Ehrlich, 1996)

Sandholt et *al.*, 2002 proposent un indice de température / végétation / sécheresse (TDVI). Son expression est la suivante :

$$TDVI = \frac{T_s - T_{s(\min)}}{a + bNDVI - T_{s(\min)}} \quad (3.14) \quad [4]$$

Où :

T_s : Température de surface

(\min) : Température de surface minimum

a et b : respectivement ordonnée à l'origine et pente de la droite reliant la température de surface au NDVI maximum.

Pour une même valeur de l'indice de végétation, les températures les plus élevées correspondent aux surfaces les plus sèches (figure 3.8). Il est donc possible d'estimer le

taux d'humidité des sols et par conséquent, l'état de stress hydrique des plantes, dès lors que la température de surface et l'indice de végétation sont connus.

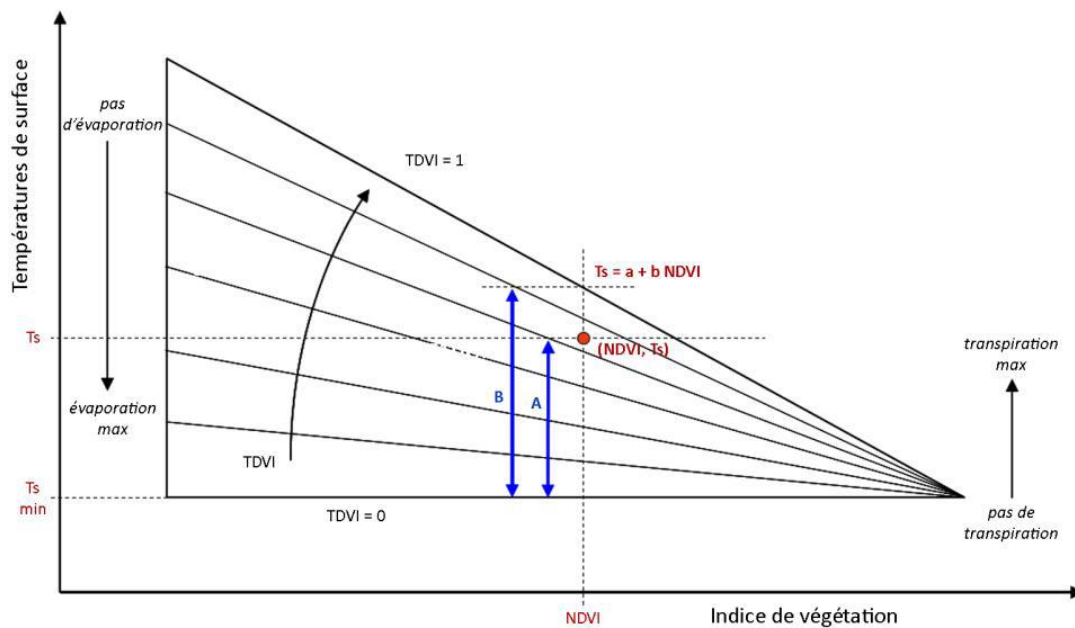


Figure 3.8 : L'indice de sécheresse (TDVI) peut être estimé dans le plan Ts / NDVI par le rapport A/B

Comme pour la végétation, il existe aussi des indices spécifiques pour les sols nus, comme l'indice de brillance. Celui-ci est construit à partir des bandes rouge et proche infrarouge selon l'expression :

$$PVI = \sqrt{\rho^2 R + \rho^2 PIR}, \quad (3.15) \quad [4]$$

Il permet de faire clairement la distinction entre les surfaces végétalisées et les sols nus. Le tableau ci-dessous résume quelques uns des indices de végétation les plus couramment utilisés; adapté de (Caloz and Puech, 1996; Gilabert et al., 2002) + Girard et Girard, 1999.

3.11 Conclusion

Les propriétés spectrales des couverts végétaux dépendent à la fois de la nature de la végétation qui les compose, de leur état physiologique, de leur teneur en, mais aussi du sol sous-jacent qui influera d'autant plus la mesure spectrale que la végétation sera clairsemée. L'instrument SEVIRI de MSG comporte les deux canaux dans le visible nécessaires pour dresser des cartes régionales du NDVI , ce qui présente plusieurs avantages, un des plus remarquables étant la stabilité des images et la facilité de réception de ces données en des lieux d'utilisation situés dans tout le champ d'observation de MSG. Ainsi, les utilisateurs peuvent construire des cartes de végétation répondant à des besoins locaux.[08]

CHAPITRE 4

*Exploitation des images MSG
pour l'identification des végétations*

Chapitre 4

Exploitation des images MSG pour l'identification des végétations

4.1 Introduction

Le recours aux observations par satellite s'est imposé comme une évidence pour surveiller l'environnement. L'étude de l'état du sol peut être réalisée par l'acquisition d'un ensemble d'images satellites et le traitement des données spectrales, ce qui permet donc, en principe, de différencier les matériaux d'un pixel, supposé homogène, selon la forme de leur courbe de réflectance.

Les principaux matériaux de la surface terrestre susceptibles de réfléchir la lumière solaire vers les satellites de télédétection sont l'eau et sa forme cristallisée, neige ou glace, la végétation, composée de matière cellulosique et de pigments, enfin les roches et les sols, assemblages plus ou moins cohérents de minéraux. La conversion des luminances mesurées au capteur en réflectance est une opération importante des prétraitements d'images en télédétection optique. Cette conversion est fondée le plus souvent sur un modèle du transfert radiatif de la source du rayonnement au capteur.

Les sols sont avec la végétation les principaux composants des surfaces terrestres observées par les satellites de télédétection. Ils sont même le composant principal lorsque la végétation est peu abondante pour des raisons climatiques ou culturelles. L'intensité de la lumière solaire réfléchiée par chaque pixel de sol terrestre, pour différentes longueurs d'onde du spectre visible et IR, est à la base de l'information qui parvient aux capteurs des satellites de télédétection en mode passif.

Dans ce chapitre, nous expliquons d'abord le choix de l'INDVI dans cette étude, ensuite nous exposons la méthodologie de travail : calcul des radiances ; estimation des réflectances et l'indice de végétation. Nous clôturons par une interprétation des résultats obtenus et une conclusion.

4.2 Le choix de l'indice de végétation

L'indice NDVI (Normalized Differential Végétation Index ou en français Indice de Végétation Normalisé) le plus connu sera utilisé dans ce travail car il est un bon indicateur de la productivité primaire de la végétation terrestre. Le NDVI reflète mieux l'état de la végétation. D'autre part, la plus forte fréquence d'utilisation du NDVI dans les travaux scientifiques par rapport à d'autres indices relève de la disponibilité des données, ce qui constitue son plus grand avantage.

4.3 Données et méthodologie

4.3.1 Les données satellitaires utilisées

Les données utilisées sont des images Météosat Seconde Génération (MSG) qui ont été acquises par la station de réception satellitaire MSG-3 au centre météorologique opérationnel de Dar El de l'Office National de la Météorologie(ONM). Les images sont prises tous les quarts d'heure. Ces images brutes qui couvrent tout le disque terrestre se composent de 3712 x 3712 pixels codés sur 10 bit avec une résolution spatiale de 3 km au nadir, représentant dans les niveaux de gris allant de 0 à 1023. Pour notre étude nous avons pris les images prises à 12H00 TU pour deux périodes différentes de l'année 2013 (du 18 au 31 Mars et du 01 au 13 Mai) qui coïncident en général avec le début et milieu de la saison agricole.

La donnée élémentaire d'une image est la valeur du pixel, appelée aussi valeur radiométrique ou numérique, celui-ci étant définie par sa position (ligne - colonne), et éventuellement son canal si la mesure est effectuée à travers plusieurs fréquences spectrales.

4.3.2 Diagramme de la méthodologie

La méthodologie de travail se résume dans le diagramme ci-dessous :

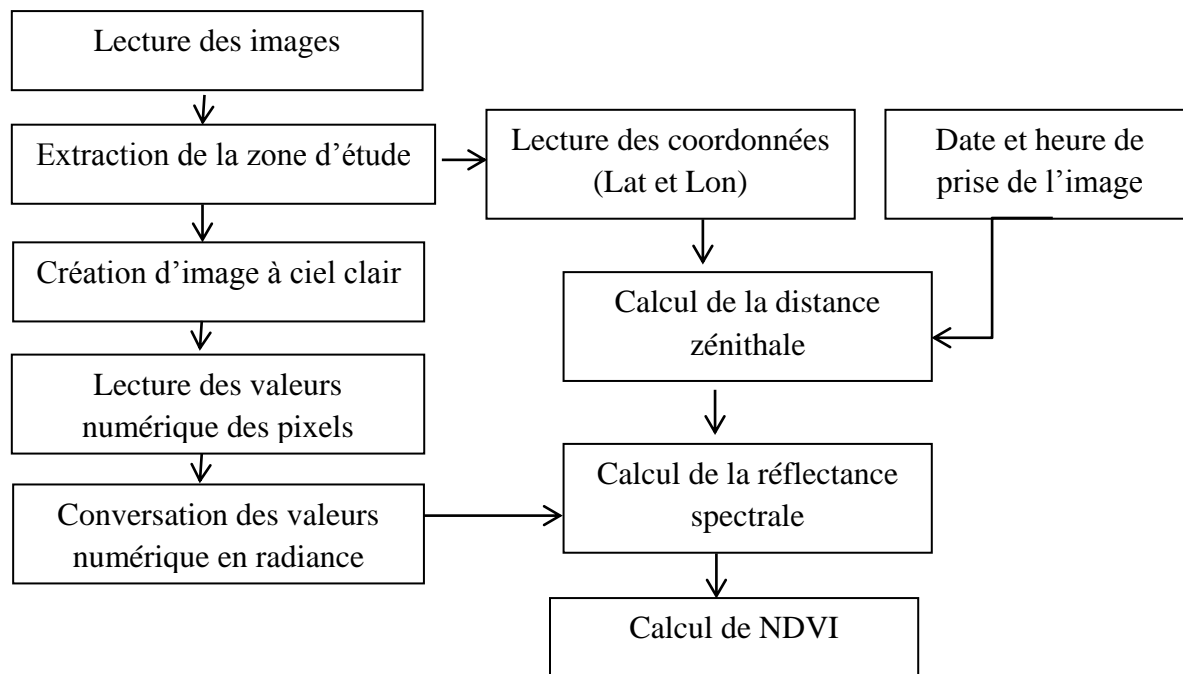


Figure 4.1 : Diagramme de la méthodologie de travail

4.4 Radiation mesurée par le radiomètre SEVIRI

L'étalonnage radiométrique vise d'une part à éliminer la différence de sensibilité entre les capteurs en assignant à chaque bande spectrale un coefficient de correction. D'autre part, le calibrage vise aussi à corriger la dégradation du signal du capteur dans le temps par l'application d'une correction linéaire qui est appliquée à chacun des coefficients de calibrage pré-lancement.

La relation entre la valeur numérique du pixel et le rayonnement physique est définie pour chaque bande spectrale par la relation:

$$R = \text{CAL_offset} + \text{CAL_slope} * \text{Count} , \quad (4.1) [24]$$

Où :

* **R** : Est la radiance spectrale mesurée par le capteur SEVIRI en ($\text{mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{cm}^{-1}$)

* **CAL_offset** et **CAL_slope** en ($\text{mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{cm}^{-1}$) sont des coefficients de calibration extraits pour chaque canal SEVIRI du fichier prologue transmis au début de chaque réception * **Count**: est la valeur numérique (0 et 1023) mesuré réellement par le satellite et extraite du fichier image brute.

Dans chaque fichier image, on trouve donc :

- ❖ Un fichier prologue : qui contiens les informations suivantes :
 - L'état du satellite.
 - L'acquisition de l'image.
 - La description de l'image.
 - Le traitement radiométrique et géométrique.
 - Les coefficients de correction.

- ❖ Un fichier épilogue : Il est réservé uniquement pour les données image MSG SEVIRI Level 1.5 crée à la fin du cycle de la prise d'image. Il contient des informations sur :
 - L'état de la constitution de l'image.
 - Les résultats de navigation spatiale du satellite (les paramètres orbitaux).
 - La qualité radiométrique et géométrique.
 - La complémentarité de l'acquisition de l'image.

- ❖ Un fichier de données : ce fichier contient les données de l'image en format binaire.

4.5 Calcul de La réflectance pour les canaux (VIS0.6, VIS0.8)

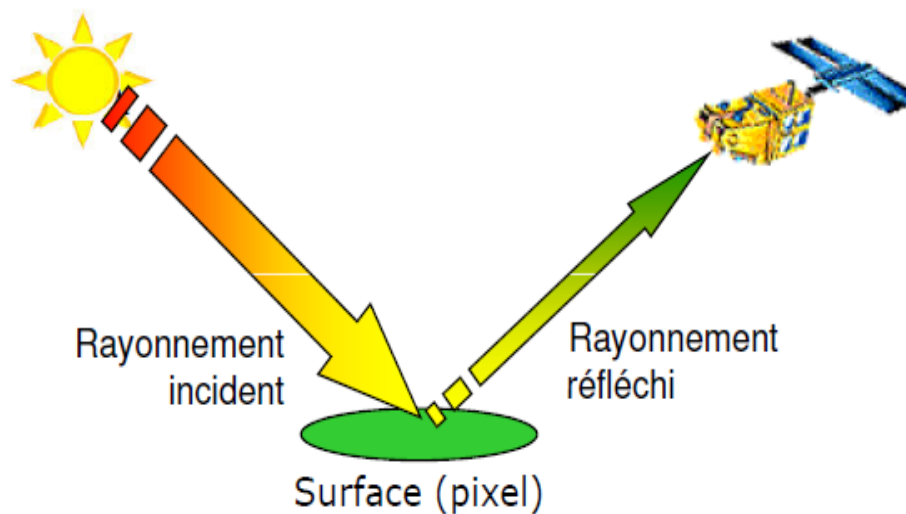


Figure 4.2 : Transfert radiatif soleil-pixel-satellite

Le rapport entre l'intensité du rayonnement réfléchi dans la direction d'observation et celui reçu (du soleil dans le cas présent) est la réflectance, qui est sans dimension et varie entre 0 et 1 (soit de 0 à 100%).

$$\text{Reflectance} = \frac{\text{Rayonnement réfléchi}}{\text{Rayonnement incident}}, \quad (4.2) \quad [24]$$

De point de vue satellite, les intensités sont mesurées dans le spectre du rayonnement solaire et la variation de ce rapport selon la longueur d'onde est la réflectance spectrale. Elle peut être mesurée de façon continue décrivant un spectre ou dans des bandes spectrales spécifiques, notamment celles des capteurs des satellites.[20]

$$\text{REFL} (i) = 100 * R (i) / \text{TOARAD} (i) / (\text{TETA}), \quad i = 1, 2, 3, 12, \quad (4.3) \quad [24]$$

* **REFL** : Réflectance [%]

* **R** : Radiance en ($\text{mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{cm}^{-1}$), calculé à l'aide de la formule 1

* **TOARAD** : (Top Of Atmospher Radiance) Constante solaire au sommet de l'atmosphère en ($\text{mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{cm}^{-1}$).

* **TETA** : Angle solaire de zénith (calculé à partir de la date, du temps, du lat., du lon.)

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

$$\text{TOARAD (i=1, VIS0.6)} = 20.76 / \text{ESD}^{**2} \dots\dots\dots(4.4)$$

$$\text{TOARAD (i=2, VIS0.8)} = 23.24 / \text{ESD}^{**2} \dots\dots\dots(4.5)$$

$$\text{TOARAD (i=3, NIR1.6)} = 19.85 / \text{ESD}^{**2} \dots\dots\dots(4.6)$$

$$\text{TOARAD (i=12, HRV)} = 25.11 / \text{ESD}^{**2} \dots\dots\dots(4.7)$$

* **ESD**: Distance terre-soleil (en unité Astronomique), qui change pendant l'année selon l'équation suivante [24] :

$$\text{ESD} = 1 - 0.167 \cos\left(\frac{2 \pi (\text{JourJulien}-3)}{365}\right) \dots\dots\dots(4.8), \quad [24]$$

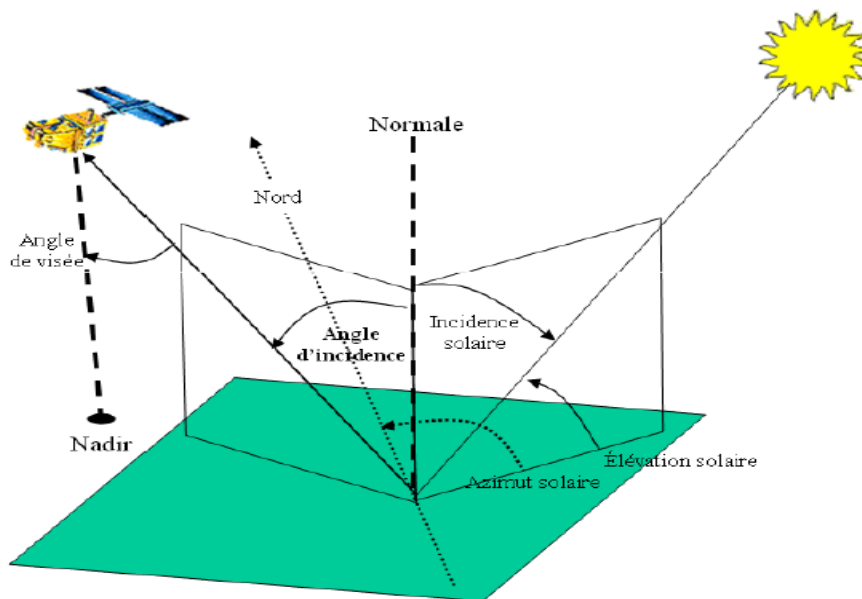


Figure 4.3 : Géométrie satellite

4.6 Affranchissement des nuages

Le premier grand domaine d'application des images Météosat est l'étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie). Néanmoins elles peuvent être utilisées dans d'autres domaine l'océanographie et les applications terrestres. En effet pour pouvoir

étudier les caractéristiques des surfaces terrestres et océanographiques nous devons créer une image à ciel clair, dégagée de toutes nuages et cela à partir d'une série d'images prises à la même heures pendant plusieurs jours, la création d'une image en ciel clair repose donc sur la technique de la brillance minimale enregistré pour un pixel donnée sur une période bien déterminée. En fait les pixels pour lesquels la brillance est forte sont ceux formant les masses nuageuses, tandis que les pixels à faible brillance sont représentatifs aux objets de la surface terrestre, à savoir la mer et les sols. [08]

Le canal infrarouge 10.8 μm a servi au calcul de l'image à ciel clair, les dates qui leurs correspondent aux brillances maximales sont sauvegardées pixel par pixel, les valeurs numériques relatives à ces dates dans les canaux visibles sont extraites, constituant ainsi les images à ciel clair pour les deux canaux. Les valeurs de réflectances sont ensuite calculées dans le canal 0.6 μm et 0.8 μm et serviront dans le calcul de l'indice de végétation.

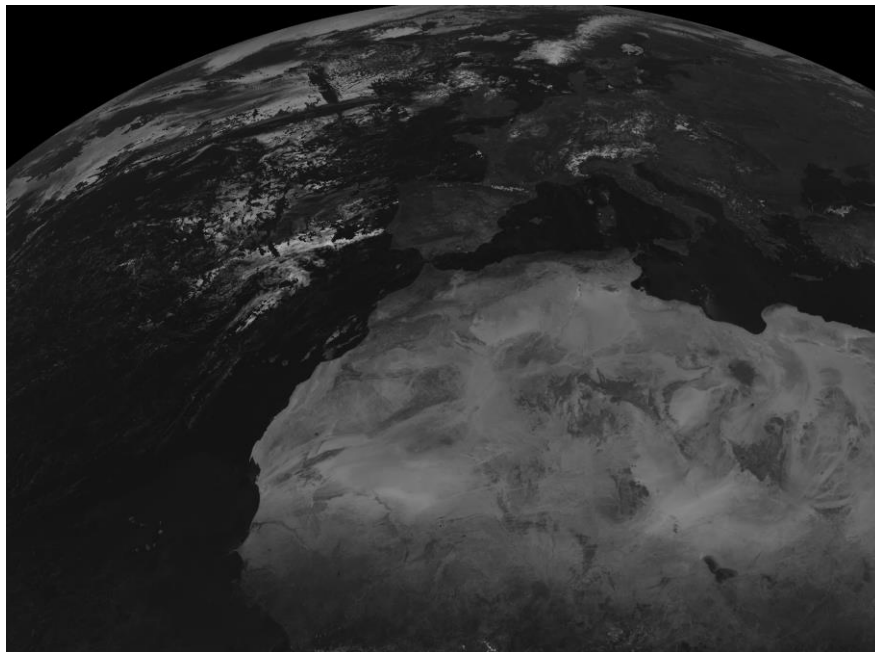


Figure 4.4 : Images à ciel clair VIS 0,6 mars [18-31] année : 2013 à 12h00TU

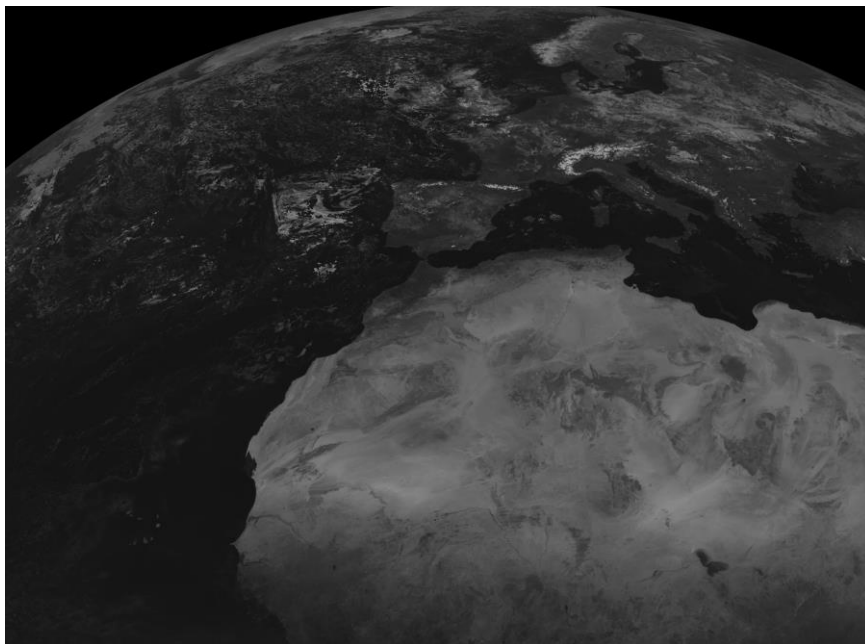


Figure 4.5 : Images à ciel clair VIS 0,6 mai [01-13] année : 2013 à 12h00TU



Figure 4.6 : Images à ciel clair VIS 0,8 mars [18-31] année : 2013 à 12h00TU

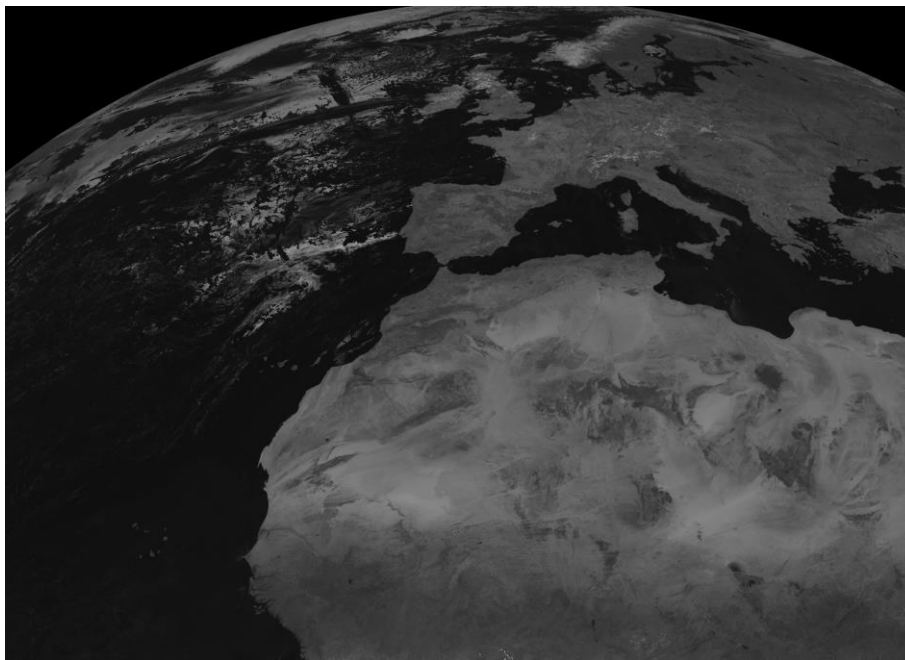


Figure 4.7 : Images à ciel clair VIS 0,8 mai [01-13], année : 2013 à 12h00TU

4.7 Calcul de l'indice de végétation normalise NDVI

L'indice de végétation est un indicateur de l'activité chlorophyllienne de la végétation, il varie entre 0 pour surface désertique et 1 pour les forêts denses. Sa formule est donnée par la formule suivante comme différence entre les réflectance dans le visible et le proche infrarouge.

$$\text{NDVI} = \frac{R(\text{PIR}) - R(\text{VIS})}{R(\text{PIR}) + R(\text{VIS})}, \quad (4.9) \quad [4]$$

Où **R (VIS)** est la réflectance dans le canal visible 0.6 μm et **R (PIR)** est la réflectance dans le canal proche infrarouge 0.8 μm , généralement cette formule utilisant la réflectance à limite de l'atmosphère est corrigée des effets d'absorption et de transmission atmosphérique.

Les images NDVI MSG ont été calculées à partir des images à ciel clair élaborés à 12h. Afin d'éliminer la contamination par les nuages.

4.8 Résultats

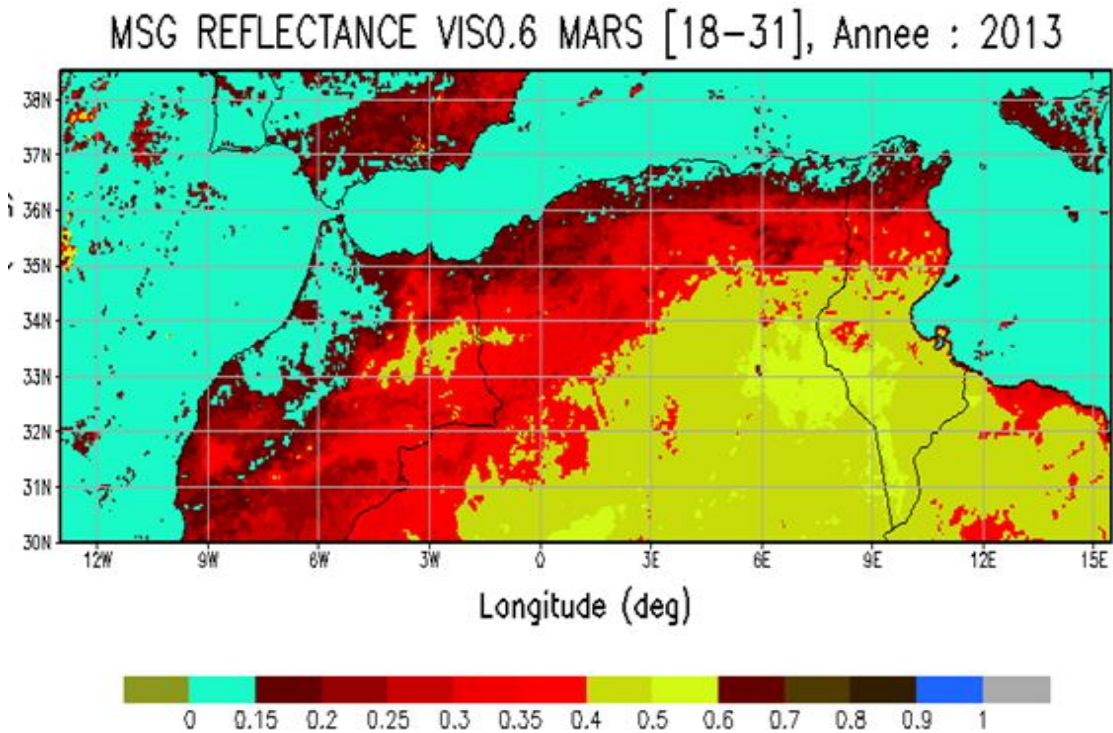


Figure 4.8 : Réflectance spectrale estimée par MSG [18 au 31 mars 2013], canal VIS 0,6

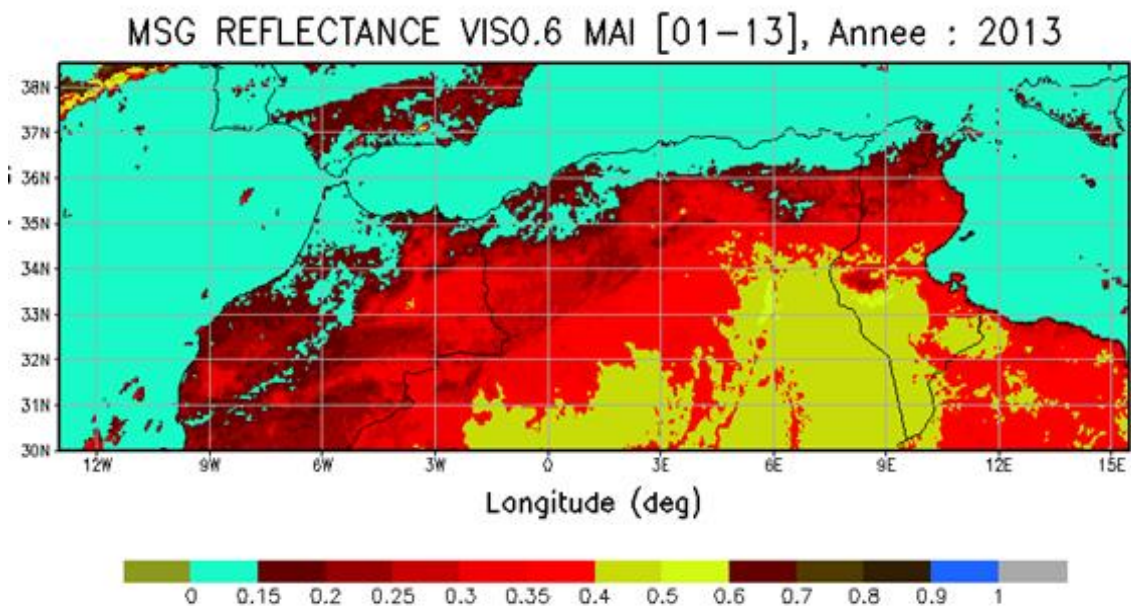


Figure 4.9 : Réflectance spectrale estimée par MSG [01 au 13 mai 2013], canal VIS 0,6

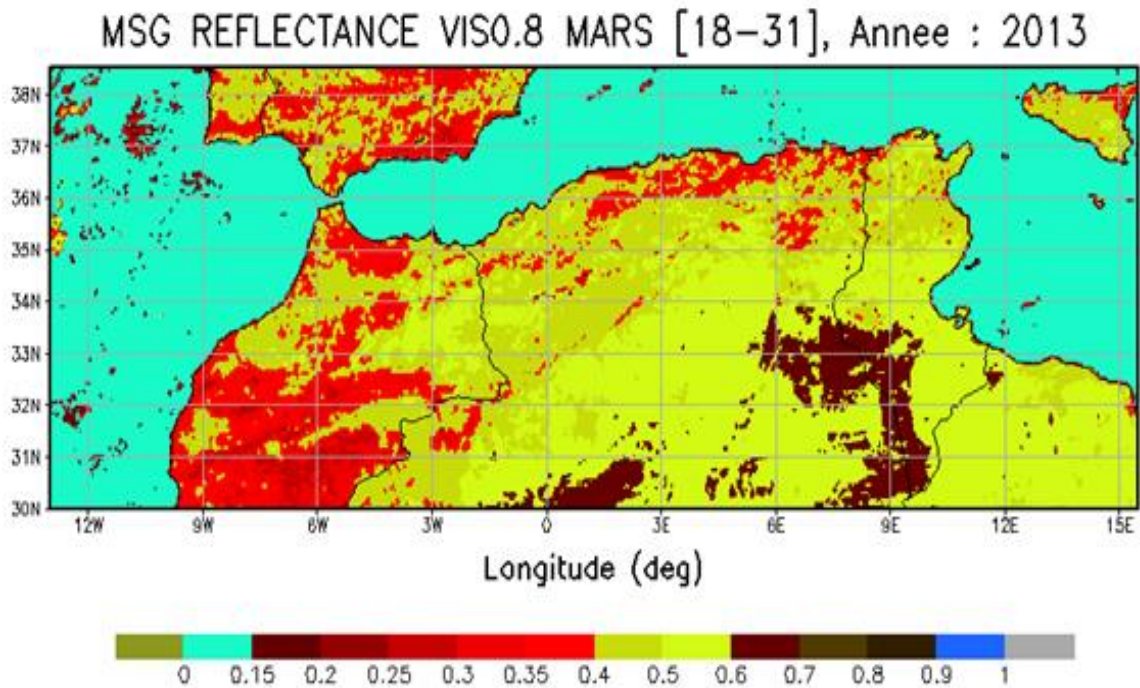


Figure 4.10 : Réflectance spectrale estimée par MSG [18 au 31 mars 2013], canal VIS 0,8

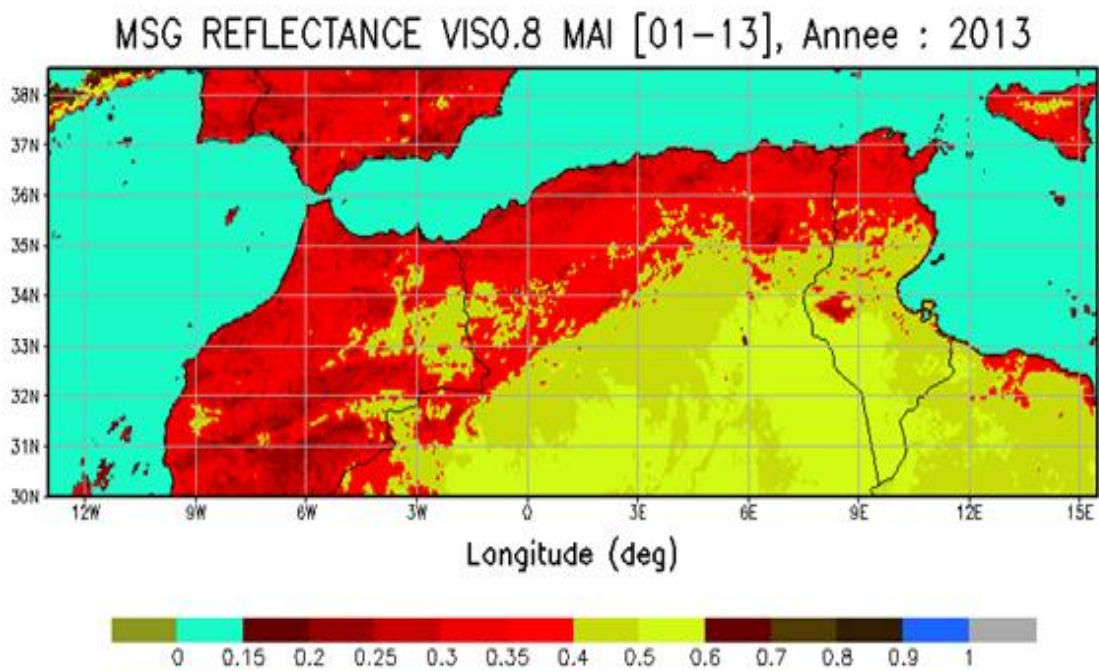


Figure 4.11 : Réflectance spectrale estimée par MSG [01 au 13 mai 2013], canal VIS 0,8

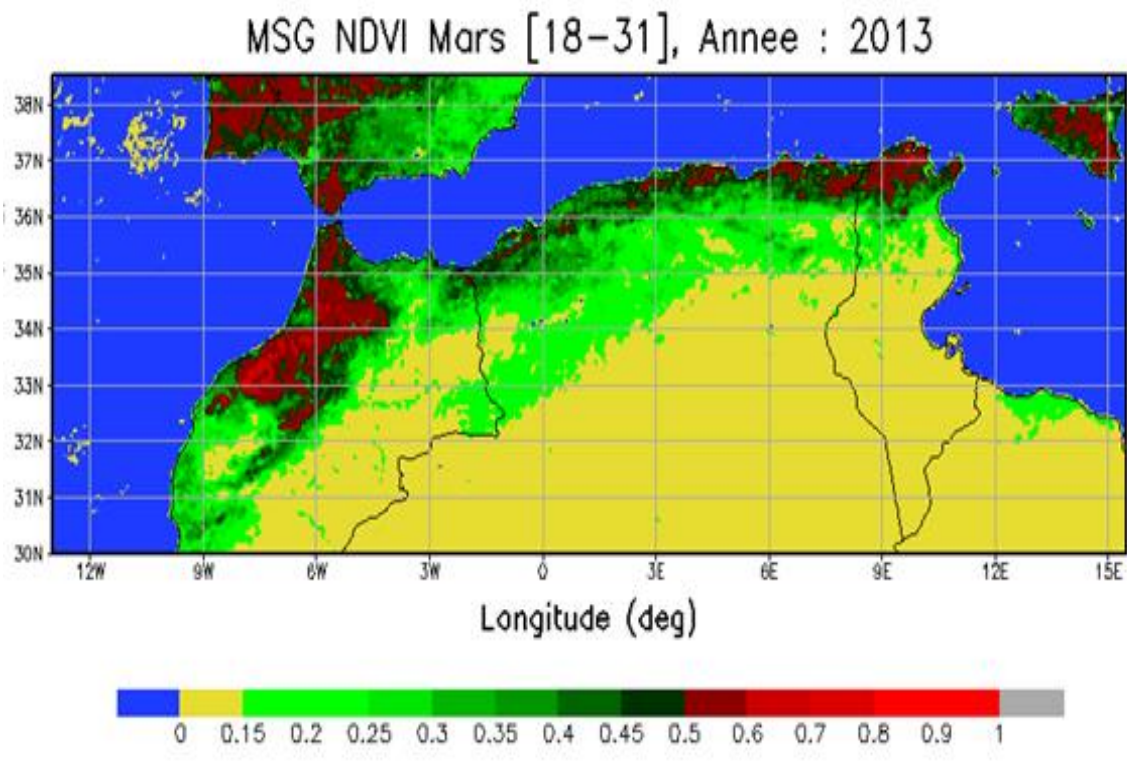


Figure 4.12 : Variation de l'NDVI estimée par MSG [18 au 31 mars 2013]

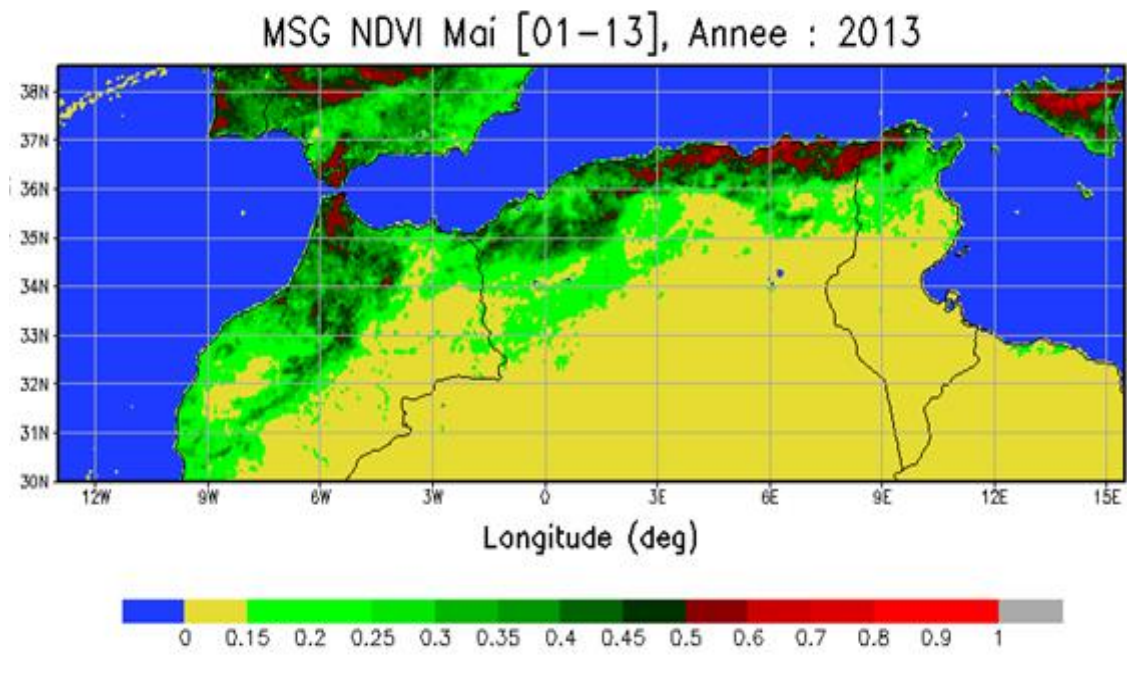


Figure 4.13 : Variation de l'NDVI estimée par MSG [18 au 31 mai 2013]

4.9 Conclusion

D'après les résultats obtenues, nous avons établi une cartographie de l'indice de végétation le plus simple et souvent utilisé en télédétection. Il constitue des combinaisons de réflectances (VIS 0.6 et PIR 0.8), il nous a permis de mettre en évidence les différences de comportement spectral entre végétation "verte" et sol nu (ou végétation sénescence) dans le visible et le proche infrarouge. Les zones à couverture végétale dense et les zones désertiques sont bien identifiées.

Les programmes réalisés dans ce travail ont été faits en langage C et la cartographie avec le logiciel GRADS sous GNU/Linux.

Conclusion générale et perspective

De cette étude il en ressort que la donnée radiométrique satellitaire en général et celle du MSG est une source d'information potentielle dans le domaine de l'environnement, à travers cette étude on a pu extraire un paramètre physique important du sol qui est l'Indice de Végétation par Différence Normalisé (NDVI).

Au début, nous avons établi les images à ciel clair pour les deux périodes considérées et à partir desquelles nous avons estimé les reflectances dans les canaux visible 0.6 μ m et proche infra-rouge 0.8 μ m, ensuite nous avons procéder à l'estimation de l'indice de végétation (NDVI) et en fin de compte une cartographie de l'NDVI sur la zone étudiée est produite.

Les résultats obtenues montrent la possibilité d'obtenir à partir du MSG des indices de végétation comme le NDVI. Toutefois, nous avons constaté que l'appel à des systèmes de télédétection autres que MSG, avec une résolution spatiale plus fine s'avère une solution adéquate pour le suivi de la dynamique du sol, dans ce cas là, il est nécessaire de promouvoir des études sur l'estimations de l'INDV par d'autres plateformes de télédétection. Il y a lieu de noter que les images MSG servent à l'établissement de divers indices comme par exemple l'indice de sécheresse, l'estimation des précipitations, le suivi des systèmes nuageux et d'autre phénomènes météorologiques.

Néanmoins, à travers ce travail nous avons pu s'initier au domaine de traitement d'image et à la télédétection spatiale, nous avons élargi nos connaissances aussi en programmation et surtout ce qui est intéressant à l'analyse et l'interprétation d'un problème d'imagerie satellite.

Bibliographie

Bibliographie

- [01] **A. AMMADI**, 2008, Informatique, Détection automatique de phénomènes présents dans une image satellitaire en composition colorée.
- [02] **A. AMIAR**, 2013, Télédétection dans le domaine de l'infrarouge (Application dans la détection des poussières par les méthodes satellitaires), Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie.
- [03] **ALHADI WEREM**, 1995, Contribution à l'étude du gisement solaire en Afrique de l'ouest à l'aide de Météosat, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- [04] **BENKAHLA NAIMA**, 2011, Identification de la végétation terrestre par radiomètre MSG-SEVIRI et suivi de son évolution temporelle, Université des sciences et de la technologie USTOMB, Oran, Algérie.
- [05] **C. CANO, J.M. MONGET, M. ALBUISSON, H. GUILLARD, N. REGAS, L. WALD**, 1986, A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. Solar Energy.
- [06] **CROS, S. MAYER, D. ANDWALD L**, 2004, the availability of irradiation data. Technical report, International Energy Agency, Vienna, Austria.
- [07] **D. ROSENFELD**, 2005, MSG Conversion from counts to radiances and from radiances to brightness temperatures and reflectance, EMEUTAST.
- [08] **DRIF NAIMA, ADANE ABDELHAMID, AMEUR ZOHRA ET AMEUR SOLTANE**, 2009 , *Construction d'une image Météosat en ciel clair*, Journées d'animation scientifique (JAS09) de l'AUF, Université Mouloud Mammeri, Tizi ouzou, Algérie.
- [09] **ERIC BAPPEL**, 2005, Apport de la télédétection aérospatiale pour l'aide à la gestion de la sole cannière réunionnaise, thèse de Doctorat, l'Université de La Réunion.
- [10] **FRANCISCO EUGENIO GONZALEZ , JAVIER MARCELLO RUIZ ET FERRAN MARQUES**, 2013, Manuel de télédétection spatiale, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- [11] **GUILLEVIC P**, 1999, Modélisation des bilans radiatifs et énergétique des couverts végétaux, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- [12] **HASSINI .A , MOHAMED BENKADA, R.BENABADJI, N.BELBACHIR**, 2009, *Acquisition et traitement des images Météosat nouvelle génération MSG*, Conférence Internationale sur les instrumentations industrielles, Oran ,Algérie

- [13] **H.OBERRANE**, le suivi des paramètres physique Sol-Mer à partir des images multi-spectrales NOAA.
- [14] **H.YAGOUB**, Identification et suivi de l'évolution du couvert végétal du sol Algérien à partir des images NOAA HRPT.
- [15] **ISKANDER BENHADJ**, 2008, Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech, thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France.
- [16] **JEAN MARIE NICOLAS**, 2012, Les bases de l'imagerie satellitaire, Paris Telecom, France.
- [17] **J. INGLADA ET E. CHRISTOPHE**, 2011, *Traitement d'images de télédétection*, AUF - Marrakech 2011, Marrakech, Maroc.
- [18] **LAURENT BOUSQUET**, 2007, Mesure et modélisation des propriétés optiques spectrales et directionnelles des feuilles, thèse de Doctorat, Université Paris 7, France.
- [19] **M.JEAN-BAPTISTE FERET**, 2009, Apport de la modélisation pour l'estimation de la teneur en pigments foliaires par télédétection, thèse de Doctorat, Université pierre et marie curie, France.
- [20] **M.BOUKHATEM MOHAMED BELKAID**, 2015, Application des techniques de cryptage pour la transmission sécurisée d'images MSG, thèse de Magistère, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Algérie.
- [21] **MERCIER .L**, 2009, Cours de météorologie satellitaire, Ecole nationale de la météorologie(ENM), France.
- [22] **NAKES M. T**, 2000, , Évaluation du gisement solaire à partie des images Météosat 7, Thèse de Magistère , Universitaire Kasdi Merbah d'Ouargla, Algérie.
- [23] **NATHALIE MICHAUD-REGAS**, 1986, Mise en œuvre et validation d'une méthode opérationnelle et automatique pour l'évaluation d'atlas solaires en Europe à l'aide de mesures satellitaires Meteosat (années 1983, 1984 et 1985) Océan-Atmosphère. Université Paris-Diderot - Paris VII, France.
- [24] **RAZAGUI .A**, 2013, Développement d'une méthodologie pour l'exploitation des images MSG pour le suivi des paramètres physiques du sol et la prévision météorologique, Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie USTOMB, Oran, Algérie.
- [25] **R. CALOZ**, Télédétection satellite, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire de systèmes d'information géographique (La SIG), France.
- [26] **REMI LECERF**, 2010, L'apport de la télédétection pour la caractérisation des surfaces végétales et la modélisation de leur fonctionnement, Météo France.

- [27] **SMAALI HAMOUDA**, 2011, Etude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et systèmes d'informations géographiques, thèse de Doctorat, Université de Tunisie.
- [28] **S. TOURTA, A. MOKHNACHE ET S. SEGHIRI**, 2014, *Utilisation des données satellitaires pour l'estimation du coefficient de réflectance bidirectionnelle réel à l'aide de mesures satellitaires*, pp4.
- [29] **SOUDANI KAMEL**, 2005, Introduction générale A La Télédétection Partie I : Bases physiques et exemples d'applications aux couverts végétaux, Université Paris-Sud XI, France.
- [30] **SYLVAIN LE MOAL**, 2014, Météorologie satellitaire pour les prévisionnistes, Centre de Météorologie spatiale de Météo France.
- [31] **SEGHIRI SARAH**, 2007, Utilisation de la télédétection pour quantifier l'influence de la hauteur solaire sur le coefficient de réflectance bidirectionnelle, Thèse de magister, Université Mentouri, Constantine, Algérie.
- [32] **TOURTA SABAH**, 2007, Etude de l'effet des aérosols sur l'estimation du coefficient de réflectance bidirectionnelle a l'aide de mesures satellitaires, Université Mentouri, Constantine, Algérie.
- [33] <http://e-cours.univ-paris1.fr>, le 03/02/2017
- [34] <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/msg/index.html>, le 16/03/2017
- [35] <http://www.memoireonline.com/04/12/5614/Detection-de-la-vegetation--partir-dune-image-satellitaire.html>, le 19/02/2017

***Estimation de la réflectance spectrale et NDVI
par satellite MSG (Météosat Seconde Génération)***

Résumé : L'imagerie satellitaire est devenue une source privilégiée d'acquisition d'information qui complètent et enrichissent celles obtenues à l'aide d'autres moyens et techniques (Réseaux de mesures sol, modèles de simulation numériques, ...). Notre étude porte sur l'utilisation du potentiel de l'image satellitaire multi spectrales enregistrée par le radiomètre SEVIRI embarqué sur le satellite Météosat Seconde Génération (MSG), pour l'estimation de la réflectance spectrale et l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) » afin de recenser le couvert végétal et suivre la dynamique de l'état du sol.

Mots-clés : Télédétection, satellite Météosat, MSG , Réflectance , Indice de végétation, NDVI

المخلص: أصبحت صور الأقمار الصناعية مصدرا مفضلا للحصول على المعلومات التي تكمل وتثري تلك التي يتم الحصول عليها باستخدام وسائل وتقنيات أخرى (شبكات القياسات على الأرض، ونماذج المحاكاة الرقمية، الخ)، دراستنا تتمحور حول استخدام صور الجيل الثاني للقمر الصناعي للأرصاد الجوية متيوسات لتقدير الانعكاس الطيفي و دليل الفرق الطيفي المتعامد (NDVI) لتحديد الغطاء النباتي و متابعة ديناميكية التربة.

كلمات البحث: الاستشعار عن بعد، متيوسات الأقمار الصناعية، الانعكاس، مؤشر الغطاء النباتي.

Abstract: Satellite imagery has become a privileged source of information acquisition that complements and enriches those obtained using other means and techniques (Soil measurement networks, digital simulation models, ...). Our study concerns the use of the potential of multi-spectral satellite imagery recorded by the SEVIRI radiometer embedded on the Meteosat Second Generation (MSG) satellite for spectral reflectance estimation and the Normalized Difference Vegetation Index NDVI to identify the vegetation cover and follow the dynamics of the soil condition.

Keywords: Remote sensing, Meteosat satellite, MSG, Reflectance, Vegetation index, NDVI.