

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MÉMOIRE DE MASTER RECHERCHE

Pour l'Obtention du diplôme de Master II Recherche en Électronique
Option Télécommunication et Réseaux

THEME:

ANALYSE DES IMAGES DU SATELLITE METEOSAT DE SECONDE GENERATION (MSG)

Présenté par :

M^{elle} TEKFI Wahiba

Proposé par :

Mr AMEUR Soltane

*Soutenue le : 15/07/2010
Promotion : 2009/2010*

Remerciements

Le travail que nous avons l'honneur de présenter a été effectué simultanément au : Laboratoire d'Analyse et de Modélisation des Phénomènes Aléatoires (LAMPa) de la faculté de Génie Électrique et d'Informatique de l'Université de Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU, au sein de l'équipe traitement d'images et Télédétection sous la direction de Monsieur AMEUR S., Professeur à l'université UMMTO et Directeur du laboratoire LAMPa. Et, à l'Office Nationale de Météorologie (ONM) à Dar-El-Beïda, Alger, sous la direction de Monsieur NAILI, Directeur du département de la Climatologie.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur AMEUR Soltane, mon Directeur de Mémoire pour m'avoir guidé et encourager tout au long de l'accomplissement de ce travail de Master II, et à qui j'exprime ma profonde gratitude de m'avoir fait profiter de ses connaissances et ses précieux conseils.

Egalement, j'exprime mes sincères remerciements à Monsieur NAILI, mon Copromoteur de me faire profiter de son expérience et de m'avoir fait part de ses connaissances.

Je remercie vivement Monsieur HAMADACHE Bachir, Directeur du Département de la Prévision à l'Office Nationale de Météorologie (ONM), de m'avoir soutenue et de me faire profiter de son expérience lors des discussions que j'avais eu l'honneur d'avoir avec lui.

Je tiens à remercier Monsieur RAZAGUI A., département de la Prévision à l'ONM pour son soutien et sa disponibilité.

Je remercie Madame AMEUR née MAZOUZI Zohra, maître de Conférences à l'UMMTO, pour son soutien.

Mes derniers remerciements, les plus chaleureux, irons à ma Famille qui m'a toujours apporté son soutien moral constant, et qui a cru en moi sans cesse.

Aussi, à tous ce qui ont contribué de près ou de loin dans ce travail.

Abstract

The *Meteosat* images present a very important database for scientific research. The daily availability of such information sources is an essential tool for monitoring, analysis and understanding of all meteorological phenomena.

In this paper, after a brief review of the *Meteosat* program, we present the satellite images taken by the satellite second generation (*MSG*).

The aim of this work is to study the performance of various channels of the *MSG* *SEVIRI* imaging radiometer and the different weather products that allow us to extract images to achieve a new way to view satellite images through the *SEVIRI* channel technical merging which serves to gather the various phenomena in a single image called "composite".

Keywords: image analysis, image processing, weather satellite, *Meteosat*, *MSG* satellite, *SEVIRI* channels, meteorological products, merging channels.

Résumé

Les images du satellite *Météosat* constituent une base de données d'une extrême utilité pour les recherches scientifiques. La disponibilité quotidienne de telles sources d'information en fait un outil indispensable pour le suivi, l'analyse et la compréhension de tous les phénomènes météorologiques.

Dans ce travail, nous présentons les images satellitaires prise par le satellite *Météosat* seconde génération (*MSG-2*) et cela après un bref rappel sur le programme de *Météosat*.

L'objectif visé par ce travail est l'étude performante des différents canaux du radiomètre imageur *SEVIRI* du *MSG* et les différents produits météorologiques qui nous permettent d'extraire de ses images afin d'aboutir à une nouvelle façon de visualiser les images satellitaires et cela grâce à la technique de fusion de canaux de *SEVIRI* qui sert à regrouper les différents phénomènes dans une seule image dite composite.

Mots-clés : analyse des images, traitement d'images, satellite météorologique, satellite *Météosat*, satellite *MSG*, canaux *SEVIRI*, produits météorologiques, fusion de canaux.

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I : Généralités sur la Télédétection Spatiale et les Satellites.....	4
I.1. Préambule	4
I.2. La télédétection par satellite	4
I.2.1. Source d'énergie ou d'illumination (A)	5
I.2.2. Rayonnement et atmosphère (B).....	5
I.2.3. Interaction avec la cible (C).....	6
I.2.4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D).....	6
I.2.5. Transmission, réception et traitement (E)	6
I.2.6. Interprétation et analyse (F)	6
I.2.7. Application (G)	6
I.3. Domaine du spectre électromagnétique	6
I.3.1. Caractéristique des domaines du spectre	7
I.3.2. Le milieu perturbateur : l'atmosphère.....	7
I.4. Les satellites.....	8
I.4.1. Définition	8
I.4.2. Orbite d'un satellite.....	8
I.5. Les différents types de satellites	9
I.5.1. Les satellites de télécommunication	9
I.5.2. Les satellites de télédétection.....	9
I.5.3. Les satellites de positionnement	9
I.5.4. Satellites d'observation spatiale	10
I.5.5. Stations spatiales.....	10
I.5.6. Satellites météorologiques	10
I.5.6.1. Les satellites Géostationnaires	13
I.5.6.2. Les satellites défilants (Satellites Polaires).....	14
I.6. Les satellites METEOSAT (Satellites 1 ^{ère} Génération)	15
I.6.1. Lancement et Objectifs	16
I.6.2. Les bandes spectrales de Météosat.....	16
➤ La Bande visible.....	16

➤ La Bande vapeur d'eau	16
➤ La Bande infrarouge.....	16
I.6.3. Le Système METEOSAT	17
I.6.4. Le format des images METEOSAT	18
I.7. Les Satellites METEOSAT Seconde Generation MSG	19
I.7.1. Lancement du satellite MSG-1	20
I.7.2. Position orbitale de MSG.....	21
I.7.3. Les canaux de MSG	23
I.7.4. Les services MSG	23
I.7.5. LE SYSTEME MSG.....	24
I.7.5.1. Le Segment spatial	24
I.7.5.2. Le Segment sol.....	25
❖ Le Segment sol du système d'EUMETSAT	25
❖ Le Segment sol des applications d'EUMETSAT	26
❖ Le Segment sol des utilisateurs	27
I.8. Comparaison entre METEOSAT/MSG(1)	28
I.9. EUMETSAT	29
I.10. Discussion.....	29
Chapitre II : Etude des canaux SEVIRI	30
II.1. Préambule	30
II.2. L'image.....	30
II.2.1. Définition d'une image	30
II.2.2. Image numérique	31
II.2.2.1. Image binaire	31
II.2.2.2. Image en niveau de gris	31
II.2.2.3. Image couleur	31
II.3. Les nuages	32
II.3.1. Constitution d'un nuage.....	32
a) Les gouttelettes d'eau :	32
b) Les cristaux de glace:	33
II.3.2. L'étage des nuages.....	34
II.3.3. Observation des nuages par satellite.....	36
II.3.4. Bilan énergétique de la planète et rôle des nuages	37

II.4. Les Images des satellites MSG	38
II.4.1. Généralité	38
II.4.2. Image SEVIRI	38
II.4.2.1. Transmission des images MSG	38
a) Le système HRIT	38
b) Le système LRIT	38
II.5. Le radiomètre imageur SEVIRI.....	39
II.5.1. Les canaux SEVIRI	41
a) Le domaine visible (Canal VIS 0.6 et VIS 0.8) (μm).....	41
b) Le domaine proche et moyen infrarouge (Canal NIR 1.6 et IR 3.9) (μm)	42
i. C3 : Le canal NIR 1.6 μm	43
ii. C4 : Le canal IR 3.9 μm	43
c) Le domaine d'absorption vapeur d'eau	44
i. C5 : Le canal WV 6.2 (μm).....	45
ii. C6 : Le canal WV 7.3 (μm).....	45
d) Le domaine de l'Infrarouge.....	45
i. C7 : Le canal IR 8.7 (μm)	45
ii. C8 : Le canal 9.7 (μm)	46
iii. (C9, C10) : Les canaux 10.8 et 12.0 (μm).....	47
iv. C11 : le canal 13.4 (μm).....	47
e) Domaine Haute Résolution Visible.....	48
II.5.2. Les caractéristiques des canaux SEVIRI	50
II.6. L'instrument GERB.....	51
II.6.1. Définition.....	51
II.6.2. Mesures satellitaires du bilan radiatif de la Terre.....	51
II.7. Discussion.....	52
Chapitre III : Apport des images MSG et Produits de Canaux SEVIRI	53
III.1. Préambule.....	53
III.2. Acquisition et nature des images satellitaires.....	53
III.2.1. Numérisation : du rayonnement aux valeurs radiométriques	53
III.2.2. L'espace RVB (RGB)	54
III.3. Pseudo couleur et composition colorée	55
III.3.1. La représentation «niveaux de gris».....	56

III.3.1.1. Les différents canaux.....	56
a) Le canal visible.....	56
b) Le canal infrarouge.....	57
c) Les canaux vapeur d'eau.....	58
d) Apport du canal HRV.....	58
III.3.1.2. L'albédo	59
III.3.2. La composition colorée	59
a) La dynamique.....	60
III.3.3. Prétraitements.....	61
III.3.4. Analyse d'images.....	61
III.4. Produits de canaux de SEVIRI.....	62
III.4.1. Exemple de produits de canaux SEVIRI (Image RVB)	62
III.4.1.1 Détection des nuages bas.....	62
III.4.1.2. Le couvert végétal (la verdure)	63
III.4.1.3. Détection des cyclones	63
III.4.2. Produit d'EUMETSAT	64
III.4.2.1. Produits de MPEF	64
III.4.2.1.1. Analyse des scènes et des nuages.....	65
III.4.2.1.2. Sélection de produits du MPEF d'EUMETSAT	66
a) AMV : Vecteurs mouvement de l'atmosphère.....	66
b) CSR : Radiances par ciel clair.....	66
c) GII : Indice d'instabilité globale	67
d) TH : Humidité troposphérique	67
e) CLA : Analyse des nuages	67
f) CTH : Hauteur du sommet des nuages.....	68
g) TOZ : Ozone total	68
h) MPE : Estimation multi-détection des précipitations.....	68
III.4.2.2. Produits des SAF	69
III.4.2.2.1. Généralité	69
III.4.2.2.2. Exemples des domaines des SAF	70
a) NWC : Prévision immédiate et à très court terme.....	70
b) OSI : Océans et Glaces de Mer	71
c) NWP : Prévision numérique du temps	71

d) CM : Surveillance du climat.....	72
e) LSA : Analyses des terres émergées	72
III.5. Discussion	73
Chapitre IV : Applications et Résultats	74
IV.1. Préambule	74
IV.2. Images composites à partir de deux canaux SEVIRI	75
IV.2.1. Image composite RVB VIS 0.6, NIR 1.6.....	75
➤ Interprétation 1	76
IV.2.2. Image composite RVB VIS 0.8, IR 3.9.....	77
➤ Interprétation 2	78
IV.3. Images composites à partir de Trois canaux de SEVIRI.....	79
IV.3.1. Image composite RVB VIS 0.6, NIR 1.6, IR 3.9.....	79
➤ Interprétation 3	80
IV.3.2. Image composite RVB NIR 1.6, VIS 0.8, VIS 0.6	81
➤ Interprétation 4	82
IV.3.3. Image composite RVB VIS 0.6, NIR 1.6, IR 10.8.....	82
➤ Interprétation 5	83
IV.3.4. Image composite RVB WV 7.3, WV 6.2, WV 7.3	84
➤ Interprétation 6	85
IV.3.5. Image composite RVB WV 6.2, WV 7.3 et IR 9.7	85
➤ Interprétation 7	86
IV.3.6. Image composite RVB IR 10.8, IR 8.7, IR 12.0	87
➤ Interprétation 8	88
IV.3.7. Image composite RVB IR3.9, IR10.8, IR12.0	89
➤ Interprétation 9	90
IV.3.8. Image composite RVB VIS 0.8, IR 3.9, IR 10.8.....	91
➤ Interprétation 10	92
IV.4. Discussion	93
Conclusion	94
Annexes	96
Bibliographie	107

Introduction

Le monde d'aujourd'hui est animé par un besoin croissant de communication entre les individus. Cette communication a commencé par voie terrestre vers 1984 avec la concurrence des secteurs de télécommunications qui nous a conduits à un développement des artères filaires. Puis l'évolution des nouvelles technologies nous a amené aux satellites. Il y a vingt ans l'hypothèse était émise que le futur des télécommunications reposerait sur les satellites.

Les réseaux satellitaires aujourd'hui sont encore méconnus, bien qu'ils soient déjà utilisés dans de nombreux domaines. Les grandes sociétés se sont menées une grande guerre au début des années 1980 pour câbler notre planète, mais nous pouvons nous demander si le développement des réseaux satellitaires va révolutionner le monde des réseaux, tout comme ont pu le faire les réseaux filaires ? Nous pouvons déjà affirmer qu'ils offrent un débit important ainsi que la possibilité de transférer tout type de données. D'ailleurs, de nombreuses industries se battent pour avoir le monopole des connexions satellitaires. Chacune proposant des solutions techniques propriétaires et essayant de les imposer dans le monde des télécommunications.

Cette concurrence s'avère utile, par vertus de services offerts. Par ailleurs, elle a donné naissance à différents types de satellites (géostationnaires et défilants) qui sert à transmettre les informations et les données, ainsi que surveiller la Terre de l'espace et étudier les différents changements climatiques (ex: satellite météorologique).

Par cela, grâce à cette évolution technologique nous arrivons à en recevoir des images spatiales à partir de ses engins envoyés en espace et qui couvre actuellement tout le globe terrestre grâce à un système intercontinental entre les pays qui ont envoyés ces différents satellites (à savoir l'Europe, l'Amérique, la Russie, l'Inde et la Chine).

Parmi ces différents satellites météorologiques, on cite dans cette étude les satellites européens Météosat et MSG.

Météosat Seconde Génération (MSG) est le nouveau système européen de satellites météorologiques géostationnaires, qui a été réalisé, avec l'infrastructure sol correspondante, pour succéder à la série initiale de satellites Météosat, dont le premier a été lancé en 1977. Pendant plus de deux décennies, ces derniers ont assuré avec succès des services aux milieux météorologiques.

Ce nouveau système comprend une série de quatre satellites MSG identiques prévus pour fournir des observations et des services jusqu'en 2018, dont le premier a été lancé en 2002.

Ce système a été développé dans le cadre d'une coopération entre EUMETSAT et l'Agence spatiale européenne (ESA).

L'étude climatologique s'avère actuellement très importantes et utile dans différents domaines (maritime, aviation, militaire et autres) afin d'éviter les sinistres. D'ailleurs, les conséquences économiques et sociales entraînées par de mauvaises prévisions météorologiques peuvent s'avérer catastrophiques. Les fortes intempéries ne font pas que détruire les arbres et les maisons. Elles provoquent des bouleversements, menacent la vie humaine et ruinent des économies locales. En effet, il n'y a pas bien longtemps que nous avons vécu le drame du crash de l'avion du président Polonais et plusieurs de leurs personnalités politiques, qui s'est fait écraser lors de son atterrissage à cause de la brume, et, qui a conduit malheureusement à la mort de tous ceux qui étaient à bord de l'avion. De plus, le réveil du volcan d'Islande qui a paralysé non seulement l'Europe, mais le monde entier, où le trafic aérien s'est arrêté pour plus de deux semaines, ce qui a provoqué une grande perte pour les pays sinistrés.

Pour cela, Il nous a semblé important, presque vital sur le plan professionnel, d'essayer de s'orienter vers une approche d'interprétation automatique, ou assistée par ordinateur, des images satellitaires du MSG afin de faciliter la tâche aux prévisionnistes météorologiques et de faire progresser de manière significative la météorologie opérationnelle.

Grâce à leur fréquence, leur précision et leur qualité, les données et images dérivées 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.

Le présent travail est basé sur des études antérieures. Il ajoute aussi des techniques de combine (fusion) de canaux du radiomètre imageur de MSG qui sert d'une part d'une image d'une manière plus précise et d'autre part regroupe les différents phénomènes dans une seule image dite composite afin d'aboutir a une nouvelle façon de visualiser les images satellitaires.

Pour réaliser un tel projet, et afin de conduire et bien décrire ce travail, nous avons traité, dans notre rapport de quatre grandes parties:

Dans la première, nous donnerons les définitions et les notions de bases sur la télédétection, les satellites en général et les satellites météorologiques en particulier.

La deuxième discute la nature et la formation des nuages, et fait le point sur l'étude des douze canaux du radiomètre SEVIRI.

La troisième traite l'apport des images MSG dans les douze canaux, les techniques de prétraitement nécessaires pour l'obtention d'une image satellitaire (MSG) prête à être analysée et le développement des différents produits de canaux (combinaisons RVB) afin d'extraire les phénomènes dangereux et autres recommandés à détecter.

La quatrième partie explique les différentes techniques de fusion de canaux que nous avons mises en œuvre, et nous donnerons les principaux résultats obtenus sur des images Météosat Seconde Génération accompagnés de leur interprétations.

En fin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale et les perspectives envisagées.

Chapitre I : Généralités sur la Télédétection Spatiale et les Satellites

I.1. Préambule

La télédétection est une discipline basée sur l'analyse et l'exploitation des images numériques. Ces dernières sont fournies grâce aux radiomètres embarqués par les satellites mis en orbites. Ceux-là permettent l'observation de toutes les régions de la terre et de l'atmosphère depuis l'espace, ce qui permet, d'une part, de suivre efficacement les mouvements des nuages et prévoir les changements climatiques, et d'autre part, de surveiller l'environnement atmosphérique pour mieux comprendre les phénomènes terrestres et marins.

L'objectif visé par cette étude est de mettre au point une méthode de fusion de canaux du radiomètre imageur du satellite seconde génération MSG, afin d'extraire les différents produits météorologiques. Pour ce faire, il est important de présenter en premier lieu une étude comparative entre les satellites première et seconde génération. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons un bref rappel sur la télédétection et les domaines du spectre électromagnétique. Dans la seconde partie, nous présentons les dispositifs d'imagerie satellitaires. En effet, depuis le lancement de ces satellites, l'imagerie satellitaire a permis des améliorations significatives dans l'étude des différents phénomènes météorologiques à grande échelle. L'exploitation de ces phénomènes provient des différents capteurs embarqués sur ces satellites. Nous présentons dans ce travail, en particulier, le satellite Météosat Seconde Génération appelé MSG qui est le successeur des satellites Météosat, mis en point par l'Agence Européenne "EUMETSAT", puisque les images utilisés dans le cadre de notre travail proviennent de ce satellite.

I.2. La télédétection par satellite

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie

d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information.

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-dessous (figure I.1.). Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs.

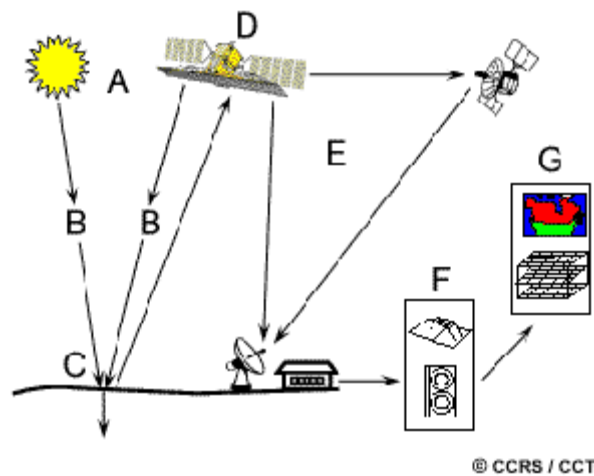


Fig. I.1. Illustration du processus de la Télédétection.

I.2.1. 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.

I.2.2. 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.

I.2.3. 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.

I.2.4. 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.

I.2.5. 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).

I.2.6. 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.

I.2.7. 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.

I.3. Domaine du spectre électromagnétique

Avant de commencer l'étude sur le spectre électromagnétique, il faut d'abord connaître ses différents domaines, savoir quelles sont les sources d'énergies utilisées et comment se comporte l'atmosphère vis-à-vis des domaines spectraux, puisque les ondes électromagnétiques ont à se déplacer dans l'atmosphère.

Aussi, il est nécessaire de connaître le comportement des objets dans différentes bandes spectrales, afin de pouvoir interpréter les enregistrements correspondants.

I.3.1. Caractéristique des domaines du spectre

Le spectre électromagnétique est divisé en plusieurs domaines. On présente ci-dessous les noms donnés aux bandes spectrales, les longueurs d'ondes les délimitant et les modes de télédétection adaptés à ces diverses bandes.

L'ultraviolet (290 - 400 nm) qui figure en tête n'est pas utilisé en télédétection, car il correspond à des longueurs d'ondes fortement absorbées par l'atmosphère.

Il est suivi par le domaine du visible (400 - 700 nm), dont les longueurs d'ondes sont perçues par l'œil humain. Ensuite, on trouve l'infrarouge, dont trois bandes seulement utilisées en télédétection (Météosat). Ce sont celles du proche infrarouge (700 - 1100 nm), de l'infrarouge moyen (3000 - 5500 nm) et l'infrarouge lointain (8000 - 14000 nm), qui ne sont pas trop absorbées par l'atmosphère.

Enfin, avec les hyperfréquences (ou Micro-ondes), on aborde les longueurs d'ondes d'ordre millimétrique, métrique et plus. Elles sont utilisées en télédétection, car elles ont une bonne propagation dans l'atmosphère, quelles soit les conditions météorologiques.

I.3.2. Le milieu perturbateur : l'atmosphère

Le rayonnement, traverse l'atmosphère est soumis à des perturbations diverses, sélectives en fonction de la longueur d'onde. Elles sont dues à :

- L'absorption plus ou moins grande par le milieu ;
- La diffusion ou diffraction ;
- L'émission propre du milieu ;
- La réfraction.

Donc seule, une partie du rayonnement solaire est transmise par l'atmosphère, et ceci pour des portions bien définies du spectre électromagnétique. C'est ce qu'on appelle, les « fenêtres de transmissions » de l'atmosphère.

L'absorption de l'énergie est due aux gaz atmosphériques. Les principaux gaz absorbants de l'atmosphère sont :

L'oxygène (O_2), l'Ozone (O_3), la Vapeur d'Eau (H_2O), le gaz carbonique (CO_2), l'Azote (N_2), l'Oxygène moléculaire (O), l'Oxyde de Carbone, le Méthane, l'Oxyde d'Azote (N_2O).

I.4. Les satellites

I.4.1. Définition

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

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

I.4.2. Orbite d'un satellite

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

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

I.5. Les différents types de satellites

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

I.5.1. Les satellites de télécommunication

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

I.5.2. Les satellites de télédétection

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

-SPOT : utilisé pour observé le sol Terrestre ;

-METEOSAT : employés pour la météorologie ;

-CRYOSAT-2 : permettent de mesurer l'épaisseur et la circonférence des calottes polaires et de la banquise.

I.5.3. Les satellites de positionnement

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

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

I.5.4. Satellites d'observation spatiale

Ces satellites observent l'espace au-dessus de l'atmosphère (par exemple HUBBLE) et permettent aux astronomes d'avoir accès à des domaines de longueurs d'onde non visibles depuis le sol ou d'exploiter les mêmes gammes de longueurs d'onde que les télescopes au sol, mais avec des performances accrues. L'écran de l'atmosphère terrestre dégrade toujours les signaux astronomiques.

I.5.5. Stations spatiales

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

I.5.6. Satellites météorologiques

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

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

Les observations effectuées par ces satellites, consistent un apport essentiel aux systèmes de prévisions météorologiques numériques et aident également les prévisionnistes à reconnaître le développement de phénomènes météorologiques

susceptibles de causer des sinistres. Les capteurs à bord des satellites réagissent à deux types d'énergie rayonnante de base :

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

Le premier satellite météo, Tiros 1, a été lancé par les Américains en 1960. Les images de l'atmosphère qu'il transmettait n'étaient pas vraiment exploitables. Mais, depuis cette date, la technique a beaucoup progressé. De nos jours, il existe deux familles de satellites météorologiques : les défilants et les géostationnaires.

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

Ces satellites météorologiques (voir figure I.2., I.3.) peuvent en outre remplir les fonctions de satellites de collecte de données météorologiques dans le cadre du système mondiale de télécommunications.



Fig. I.2. Satellites météorologiques (Source EUMETSAT).

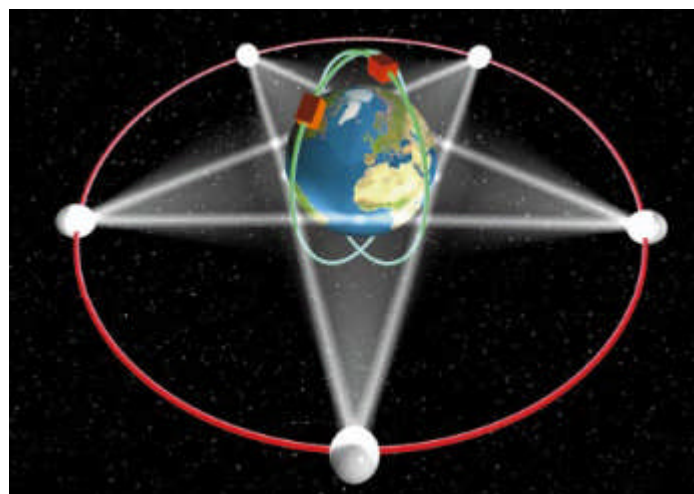


Fig. I.3. Couverture des satellites météorologiques géostationnaires opérationnels depuis l'espace. [EUMETSAT]

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

I.5.6.1. Les satellites Géostationnaires

Les satellites géostationnaires tournent dans le même sens de la Terre et avec la même vitesse de rotation. Ils sont situés à 36 000 km d'altitude (35 859 km pour METOSAT) sur une orbite au dessus de l'équateur. Leur mouvement étant synchronisé avec la rotation de la Terre (période de la rotation de terre 23h 56 mn 4.09 s) autour de l'axe des pôles, ils surplombent toujours la même partie de notre globe terrestre (voir figure I.4).

Pour la télédétection, un satellite stationnaire présente l'avantage de toujours visualiser la terre sous le même angle. Autrement dit, il peut enregistrer la même image à intervalles rapprochés. Cette propriété est particulièrement utile pour l'observation des conditions météorologiques. L'un des inconvénients des orbites géostationnaires est leur grande distance par rapport à la terre ce qui réduit la résolution spatiale.

Le système de satellites actuellement en opération comprend Météosat (EUMETSAT), GOES (Etats-Unis), GOMS (Russie), MTSAT (Japon) qui a remplacé la série de GMS et FY-2 (Chine). Ces satellites ont été conçus pour des applications météorologiques. Les sondes à bord ont des résolutions géométriques, radiométriques et spectrales très basses.

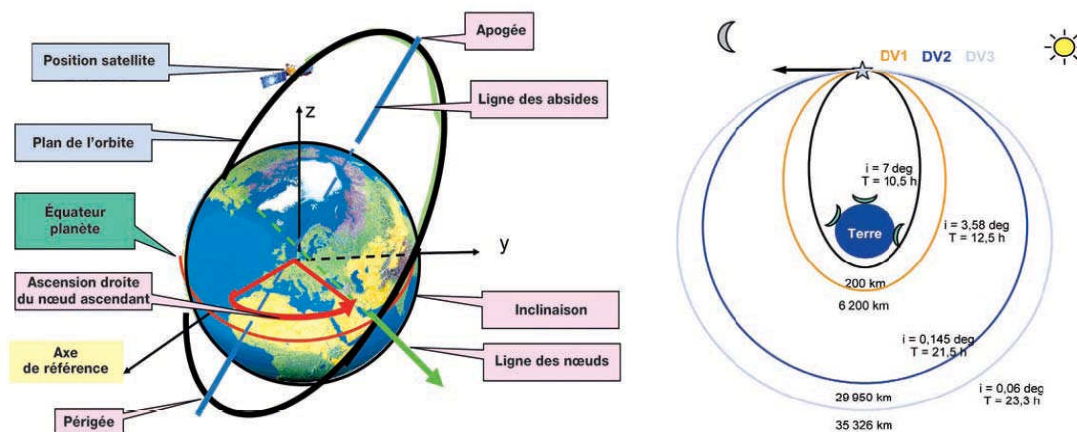


Fig. I.4. Satellite géostationnaire [EUMETSAT]

I.5.6.2. Les satellites défilants (Satellites Polaires)

Les satellites défilants tournent autour de la Terre sur une orbite quasi circulaire passant près des pôles dans des trajets Nord-Sud (NOAA pour les Américains et METOP pour les européens par EUMETSAT), (voir figure I.5.1., I.5.2.), à une altitude un peu inférieure à 1 000 km (850 km) et donnent une meilleure résolution (des détails de l'ordre de 2 km). Ils font le tour de la Terre en près de deux heures. L'orbite du satellite et la rotation de la terre permettent une couverture complète de la surface de la planète après un cycle orbital complet. Ils délivrent des informations sur une même zone 2 fois par jour. Ils sont utilisés pour alimenter les modèles de prévision à plusieurs jours d'échéance. Ils permettent surtout l'observation des régions qui ne sont pas couvertes par les satellites géostationnaires.

De plus, à chaque passe, ces satellites examinent une bande d'une largeur d'environ 1900 km qui se situe plus à l'Ouest à cause de la rotation de la Terre vers l'Est. Plusieurs heures s'écoulent entre les passes au-dessus du même endroit de moyenne ou basse altitude. Chaque satellite en orbite polaire peut observer la planète entière en 24 heures. Pour la plupart des satellites météorologiques polaires, les orbites sont choisies de telle sorte qu'elles soient héliosynchrones, cela signifie que l'orbite garde un angle constant avec le soleil durant toute l'année, donc le satellite passe au-dessus d'un endroit donné à la même heure solaire locale chaque jour.

Ces satellites nous fournissent les renseignements sur l'état du "trou" dans la couche d'ozone, les photos composites de la couverture de la neige et les températures à la surface des océans.

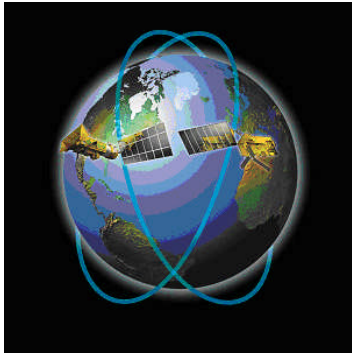


Fig. I.5.1. Le Système Polaire Commun (SAT. NOAA des USA et SAT. METOP) [EUMETSAT].

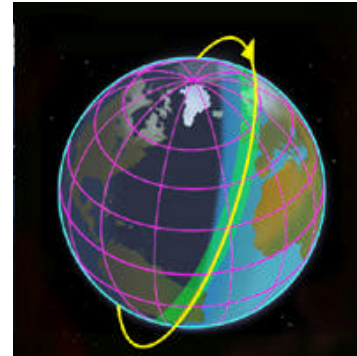


Fig. I.5.2.: l'orbite polaire [EUMETSAT]

I.6. Les satellites METEOSAT (Satellites 1^{ère} Génération)

Le satellite Météosat (1^{ère} génération) est l'un des cinq satellites météorologiques géostationnaires opérationnels Européens, qui permettent l'observation de l'ensemble du globe terrestre, à l'exception des pôles (figure I.6.). Le satellite Météosat gravite sur l'orbite géostationnaire et observe en permanence la totalité du disque terrestre incluant l'Europe et l'Afrique.

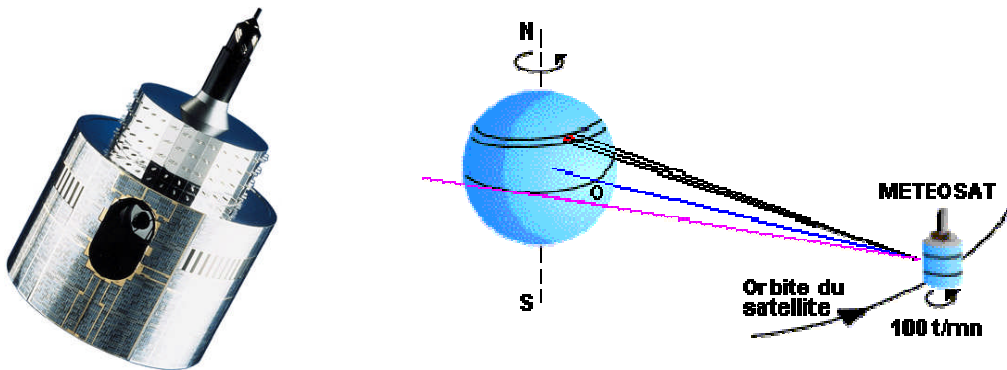


Fig. I.6. Satellite METEOSAT et balayage (source d'EUMETSAT).

I.6.1. Lancement et Objectifs

Sept satellites de la première génération du système Météosat ont été lancés, tous avec succès. Le premier l'a été en novembre 1977 depuis Cap Canaveral, le septième en septembre 1997.

L'objectif principal du système Météosat est la fourniture de données satellitaires rentables et de services annexes correspondant aux besoins des 17 Etats Membres d'EUMETSAT. Dans la mesure du possible, le système répond aux besoins exprimés par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

I.6.2. Les bandes spectrales de Météosat

Le radiomètre Météosat est la charge utile principale du satellite. Il fournit les données de base du système Météosat sous la forme de radiances dans les régions visibles et infrarouges du spectre électromagnétique, qui vont constituer des images plein-disque terrestre vues de l'orbite géostationnaire (voir tableau I.1.). Le radiomètre travaille dans 3 bandes spectrales :

➤ **La Bande visible**

est utilisée pour l'imagerie diurne. Ce canal n'est utilisable que lorsqu'il fait jour sur la Terre.

➤ **La Bande vapeur d'eau**

La bande d'absorption de la vapeur d'eau est utilisée pour déterminer la quantité de vapeur d'eau dans la moyenne troposphère.

➤ **La Bande infrarouge**

La bande de l'infrarouge thermique (fenêtre) est utilisée(e) pour l'imagerie nuit et jour et aussi pour déterminer la température du sommet des nuages et de la surface de l'océan.

Canal	Bande spectrale	Taille du pixel	Ligne x Pixel
Visible (VIS)	0.45-1,0 (μm)	2.5 x 2.5 km	5000 x 5000
Vapeur d'eau (WV)	5.7-7.1 (μm)	5 x 5 km	2500 x 2500
Infrarouge (IR)	10.5-12.5 (μm)	5 x 5 km	2500 x 2500
Nombre de détecteurs (+ redondants)	2 (+2)	1 (+1)	1 (+1)
Résolution temporelle	30 minutes $\Longrightarrow$ 48 images par jour		

Tableau. I.1. Caractéristiques spectrales et temporelles des images METEOSAT.

Le système est conçu pour fournir toutes les 30 minutes une vue globale du disque terrestre. La résolution au point sous satellite est de 2.5 km dans le canal Visible et d'environ 5 km pour l'Infrarouge et le canal vapeur d'eau.

I.6.3. Le Système METEOSAT

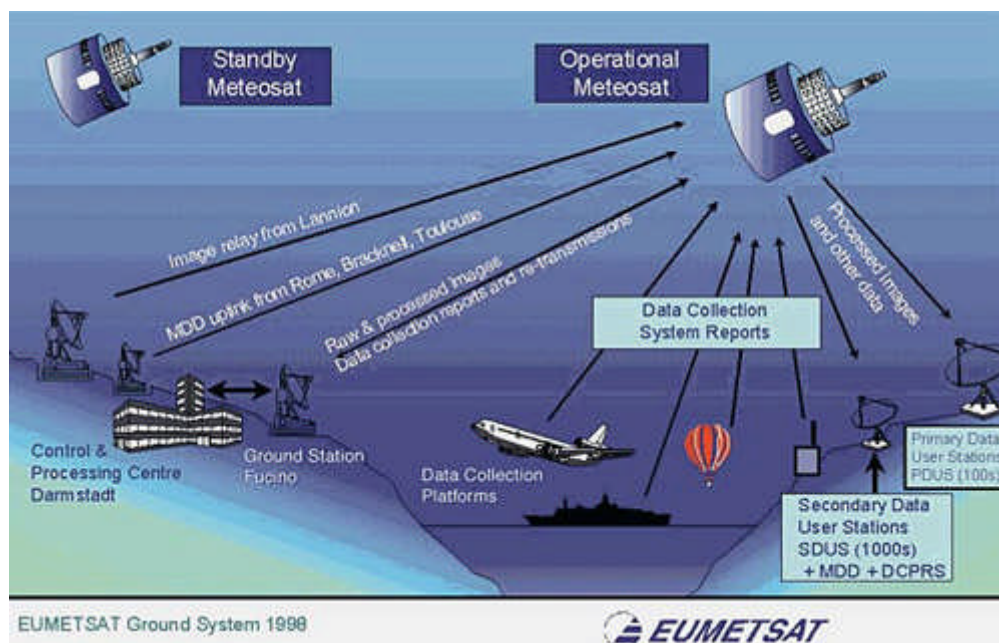


Fig. I.7. Un schéma du système complet Météosat d'EUMETSAT [EUMETSAT]

- La première mission du système Météosat est de générer des images de la Terre, montrant les systèmes nuageux aussi bien le jour que la nuit et de transmettre ces images aux usagers dans le temps le plus court possible. La gamme complète des missions est listée ci-dessous et présentée plus loin.
- Images de la terre dans trois canaux spectraux à 30 minutes d'intervalle.
- Diffusion des images à deux types de stations utilisatrices, l'un numérique, l'autre analogue, quelques minutes après l'observation.
- Génération et distribution de produits météorologiques, comme les vents dérivés du déplacement des nuages à partir des images Météosat.
- Acquisition et diffusion d'images provenant d'autres satellites météorologiques.
- Relais d'information météorologique, comme des cartes, etc., aux régions faiblement équipées en systèmes de télécommunication.
- Acquisition de données environnementales in situ à partir des Plates-formes de Collecte des Données et relais aux usagers quelques minutes plus tard.

I.6.4. Le format des images METEOSAT

Les images METEOSAT (voir figure I.8.) sont disponibles selon trois formats qui sont des images à haute résolution, B2, et WEFAX (Weather Fac Simile); qui est un système international pour la transmission d'images en format analogue. Les images à haute résolution sont formées de 5000 x 5000 pixels pour le canal visible et de 2500 x 2500 pixels pour les canaux infrarouges et vapeur d'eau. Les images B2 sont obtenues par compression des images à haute résolution. Elles sont formées de 416 x 416 pixels pour tout le disque terrestre et elles sont stockées toutes les trois heures sur bandes magnétiques. Les images Wefax résultent de la division des images à haute résolution en plusieurs sous-formats. De telles images sont transmises aux S.D.U.S. (Secondary Data User Stations) via Météosat.

WEFAX sera remplacé par un nouveau standard, appelé système de Transmission d'Information à Bas Débit (LRIT) décrit ailleurs.

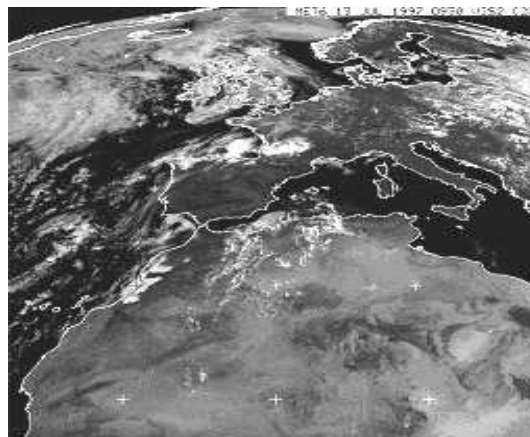


Fig. I.8. Images WEFAX du satellite Météosat d'EUMETSAT [EUMETSAT]

En Algérie, les images Wefax sont reçues toutes les demi-heures à l'Office National de la Météorologie, à Dar El Beida (Alger). Ces images représentent l'Afrique du Nord, la mer Méditerranée, l'Europe et l'océan Atlantique. La base de données utilisée pour notre étude, se compose d'une série d'images Wefax collectées dans les canaux visible et infrarouge durant le mois de Décembre 1994. Chaque image forme une fenêtre de 512 x 512 pixels, où les valeurs possibles des niveaux de gris vont de 1 à 256 et où la taille de chaque pixel est de 5 x 5 km² au point sub-satellite.

I.7. Les Satellites METEOSAT Seconde Generation MSG

METEOSAT Seconde Génération (MSG) est le successeur de METEOSAT. Il inclut des améliorations par rapport à son prédécesseur : une meilleure résolution, plus de canaux étudiés et une plus grande rapidité dans l'acquisition d'images. Ces innovations permettront de maintenir la veille météorologique européenne. (Voir figure I.9.1., I.9.2.).

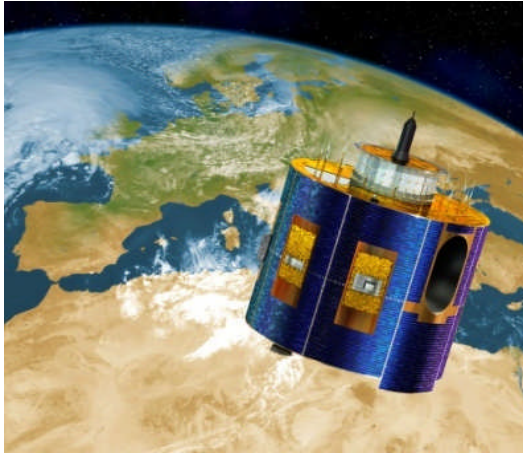


Fig. I.9.1. Le satellite MSG satellite [EUMETSAT]

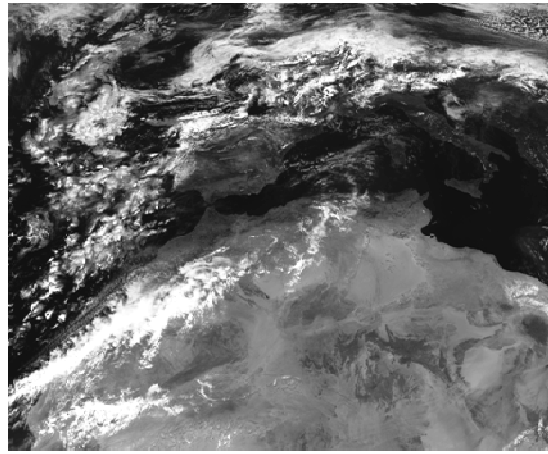


Fig. I.9.2. Image (canal visible) du MSG d'EUMETSAT [ONM]

Le programme MSG comprend un total de quatre satellites, ce qui assure l'avenir des observations et services météorologiques d'EUMETSAT depuis l'orbite géostationnaire au moins jusqu'en 2018. A partir de là, une troisième génération devra être fin prête pour prendre le relais. Un service ne saurait être pleinement opérationnel sans un satellite de remplacement disponible en orbite, prêt à prendre la relève à tout moment. C'est pourquoi deux satellites MSG sont actuellement en orbite, rebaptisés respectivement Météosat-8 et Météosat-9 en 2002 et 2005.

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

I.7.1. Lancement du satellite MSG-1

Le premier satellite Météosat seconde génération (MSG) a été lancé avec succès Jeudi 29 Août 2002 à Kourou. MSG-1 a été placé en orbite de dérive se déplaçant dans une direction Est vers son orbite géostationnaire finale. Le MSG était attendu avec

impatience par les météorologistes européens qui comptent beaucoup sur ses performances améliorées.

I.7.2. Position orbitale de MSG

MSG-1 est un satellite de forme cylindrique de 2 000 kg, qui sera placé au-dessus de l'équateur à 35800 km d'altitude environ, à la verticale du golfe de Guinée, par zéro degré de longitude. Il s'agit d'un programme commun de l'Agence spatiale européenne (ESA) et de l'Eumetsat, l'Organisation européenne de satellites météorologiques. Sa position 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. Ci-dessous une animation d'images prises par le satellite dans le domaine de la lumière visible toutes les 15 mn (la nuit ce sont des images infrarouge qui sont relayées).

Le satellite tourne à 100 tours/minutes autour de son axe principal, orienté parallèlement à l'axe nord-sud de la terre. Cette rotation régulière permet le balayage d'un radiomètre qui effectue des mesures de luminance dans 3 canaux: visible, infrarouge thermique, et infrarouge « bande d'absorption de la vapeur d'eau ». Ainsi chaque ligne de l'image est obtenue finalement grâce simplement à cette rotation. (Voir figure I.10. **a** et **b**).

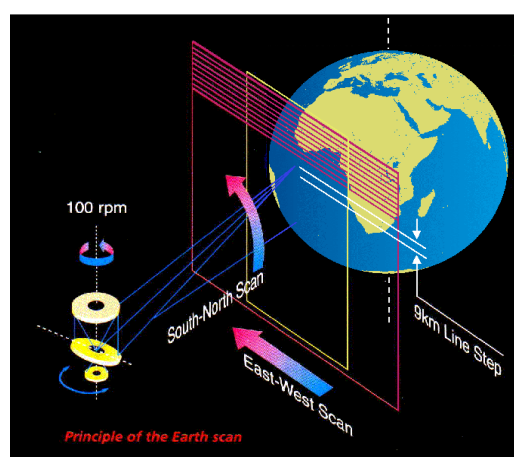


Fig. I.10. (a) Le balayage du satellite MSG [29]

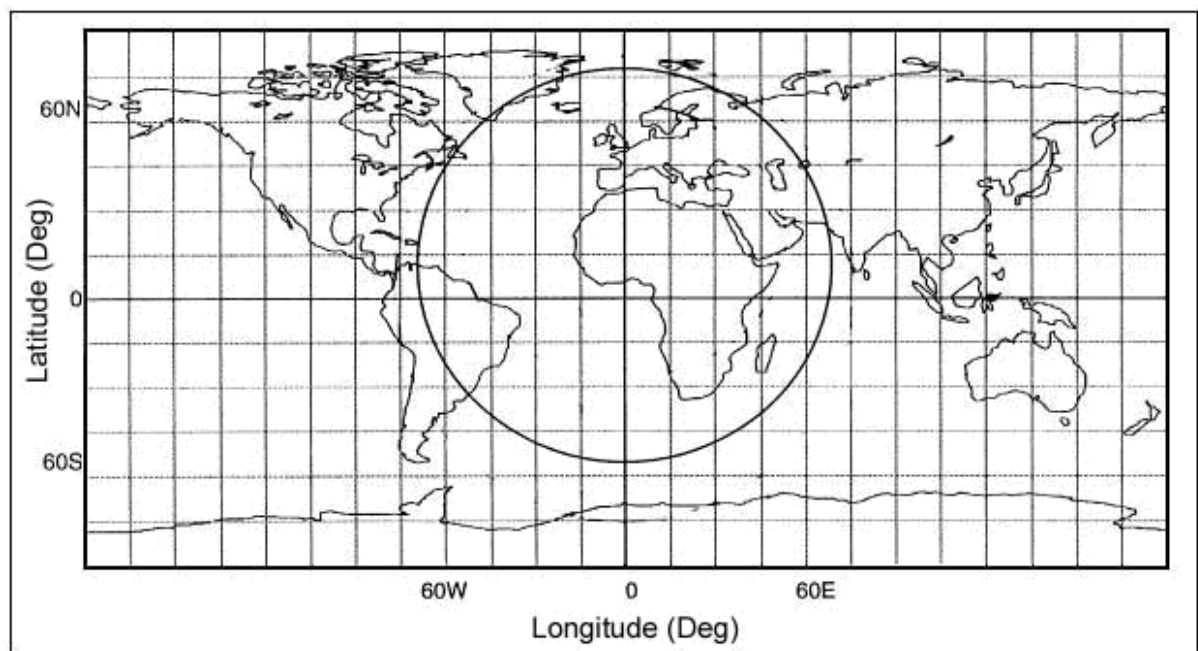


Fig. 10. (a) Le concept de balayage du satellite MSG [EUMETSAT]

Le système est conçu pour fournir toutes les 30 minutes une vue globale du disque terrestre. La résolution au point sous satellite est de 2.5 km dans le canal Visible et d'environ 5 km pour l'Infrarouge et le canal vapeur d'eau.

Avec MSG-1, l'Europe rattrape l'avance technologique qu'avaient les satellites équivalents américains et japonais depuis quelques années. Les performances de MSG-1 seront d'ailleurs meilleures que celles des autres satellites météo. Par rapport à l'ancien Météosat, les images fournies sont supérieures à plusieurs titres. Elles sont tout d'abord plus précises, et permettront de voir des détails plus fins à la surface de la Terre, 1 km au lieu de 2 km.

D'autre part, l'acquisition de cette image est plus rapide, ce qui permet de faire une nouvelle prise de vue toutes les quinze minutes, au lieu de toutes les demi-heures comme avant. Conséquence directe (et anecdotique) de ces photos plus rapprochées, les séquences d'images satellitaires montrées à la télévision sont plus fluides !

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

I.7.3. Les canaux de MSG

A la place des trois canaux de Météosat de première génération, MSG-1 enregistre 12 canaux. Quatre sont consacrés à la lumière visible, dont un en haute résolution, avec des détails aussi fins qu'un kilomètre. Dans l'infrarouge, MSG-1 voit huit canaux. Cette vision dans différentes « couleurs » de l'infrarouge (en fait dans des bandes de différentes longueurs d'onde) apporte de très nombreuses informations sur l'état de l'atmosphère qui étaient alors difficilement détectables avec la précédente génération d'instruments. Ainsi, un canal de l'infrarouge est dédié à la mesure de l'ozone. Une autre mesure la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère, d'autres encore servent à détecter et identifier les différents types de nuages. En combinant les différentes longueurs d'onde, les prévisionnistes auront accès à une description plus fine des processus qui agitent l'atmosphère. La formation des tempêtes devrait par exemple être plus rapidement détectée. Ces nouveaux Météosat de Seconde Génération affichent des dimensions bien supérieures : un diamètre de 3,2 m, une hauteur de 2,4 m et une masse de 2 000 kg.

I.7.4. Les services MSG

- Imagerie: images disque plein de la Terre toutes les 15 mn.
- Dissémination HRIT des images (tous les canaux).
- Dissémination LRIT.
- Dissémination d'images numériques (5 canaux).
- Relais d'images d'autres satellites géostationnaires.

- Collecte et retransmission de données environnementales des plates formes d'observation aux stations au sol.
- Distribution de données météorologiques (MDD).
- Distribution de produits météorologiques (cartes).
- Produits climatologiques: Programmes de recherche.
- Archives météorologiques.

I.7.5. LE SYSTEME MSG

I.7.5.1. Le Segment spatial

Le Segment spatial du système Météosat Seconde Génération repose sur une série de **quatre** satellites stabilisés par rotation de conception nouvelle embarquant la charge utile suivante:

a) Le radiomètre rotatif amélioré de prise d'images dans le visible et l'infrarouge (SEVIRI), assurant les missions de prise d'images multi-spectrales, d'analyse des masses d'air et de prise d'images à haute résolution dans le visible. SEVIRI utilise 12 canaux:

- 7 canaux imageurs dans le visible et les fenêtres de l'infrarouge,
- 4 canaux destinés à mesurer les émissions infrarouges dans les bandes d'absorption de la vapeur d'eau, du gaz carbonique et de l'ozone,
- 1 canal à large bande à résolution spatiale plus fine, dans le visible.

La distance d'échantillonnage des canaux de SEVIRI sera de 3 km au point sous satellite, à l'exception du canal haute résolution dans le visible pour lequel elle sera de 1 km. Les images du disque terrestre complet seront disponibles dans tous ces canaux du spectre toutes les 15 minutes.

b) La charge utile de télécommunications des données météorologiques à partir de l'orbite des satellites géostationnaire (GMCP), assurant les missions de diffusion et de collecte de données,

c) Des charges utiles complémentaires (dans la mesure où elles peuvent être embarquées sans conséquence importante sur la taille ou la complexité de la plate-forme, qu'elles ne seront pas déterminantes en termes de coût et qu'EUMETSAT pourra les financer), telles qu'un petit instrument scientifique et/ou un Système géostationnaire de recherche et sauvetage (GEOSAR) et/ou GERB.

I.7.5.2. Le Segment sol

Le Segment sol de Météosat Seconde Génération sera constitué d'un réseau d'installations au sol défini en tenant compte des besoins de continuité à long terme. Le nœud central de ce réseau (voir figure I.11.) sera implanté au Siège d'EUMETSAT.

❖ Le Segment sol du système d'EUMETSAT

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

b) Une Station sol de réserve (BGS), pour les opérations de télécommandes urgentes, qui pourrait partager un site avec une SGS ou être installée dans une autre station disposant déjà de moyens de contrôle des satellites,

c) Une ou plusieurs Stations sol de soutien (SGS) servant à l'acquisition et au prétraitement des données d'autres satellites météorologiques et à leur relais vers le Site central.

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

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

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

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

e) Une capacité d'archivage et de ressaisie des produits météorologiques de MSG, partie intégrante du Centre unique d'archivage et de consultation des données et produits météorologiques (l'U-MARF), pour l'archivage à long terme et la ressaisie des données-images et de certains produits météorologiques. Sa configuration et son emplacement (qui pourrait être décentralisé en un ou plusieurs lieux) restent à déterminer.

❖ **Le Segment sol des applications d'EUMETSAT**

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

a) Un Centre d'extraction des produits météorologiques (MPEF), au Siège d'EUMETSAT, où seront effectuées les tâches de contrôle et de gestion nécessaires pour assurer la disponibilité de produits-clés prédéfinis ainsi que les activités faisant appel à des algorithmes de traitement connus peu dépendantes de l'interaction avec les utilisateurs. Les tâches typiques du MPEF consisteront à extraire de manière opérationnelle à l'échelle synoptique (grille de 100 km environ) des produits tels que les vecteurs de vent et (pour des applications variées) l'analyse multi-spectrale d'éléments de l'image complète servant de base à l'extraction des produits mentionnés au Point 1d).

b) Un réseau de Centres d'applications satellitaires (SAF) situés dans les services météorologiques nationaux des Etats membres d'EUMETSAT ou auprès d'autres entités en rapport avec la communauté météorologique, telles que le CEPMMT.

Ces centres seront chargés de l'extraction de produits complémentaires de ceux du MPEF. Ces produits seront définis par le Conseil à conclusion d'une analyse des besoins des utilisateurs. La sélection des SAF se fera par le biais d'un avis de participation. Les accords conclus dans ce contexte couvriront tous les aspects de recherche et de développement ainsi que les opérations agréées.

L'affinement de la liste des produits à extraire des images de MSG sera une activité-clé de la Phase de définition détaillée du système (Phase B), tout comme l'élaboration des critères et procédures d'allocation de ces produits au MPEF et aux SAF.

❖ Le Segment sol des utilisateurs

Les stations de réception seront exploitées par des utilisateurs pour capter les données disséminées sur le système MSG:

- a) Les stations (d'utilisateurs) à haut débit (HRUS) pour la réception des données des canaux de transmission HRIT,
- b) Les stations (d'utilisateurs) à faible débit (LRUS) pour la réception des données des canaux de transmission LRIT.

La transmission vers la Terre de données brutes des instruments des satellites ne fait pas partie de la mission de dissémination de MSG. Néanmoins, si un Etat membre décide d'acquérir une station en mesure de recevoir les données-images brutes, cet Etat membre devra avoir instantanément accès aux paramètres correspondants de traitement des images extraits au Site central, conformément à la politique appliquée par EUMETSAT en matière de données.

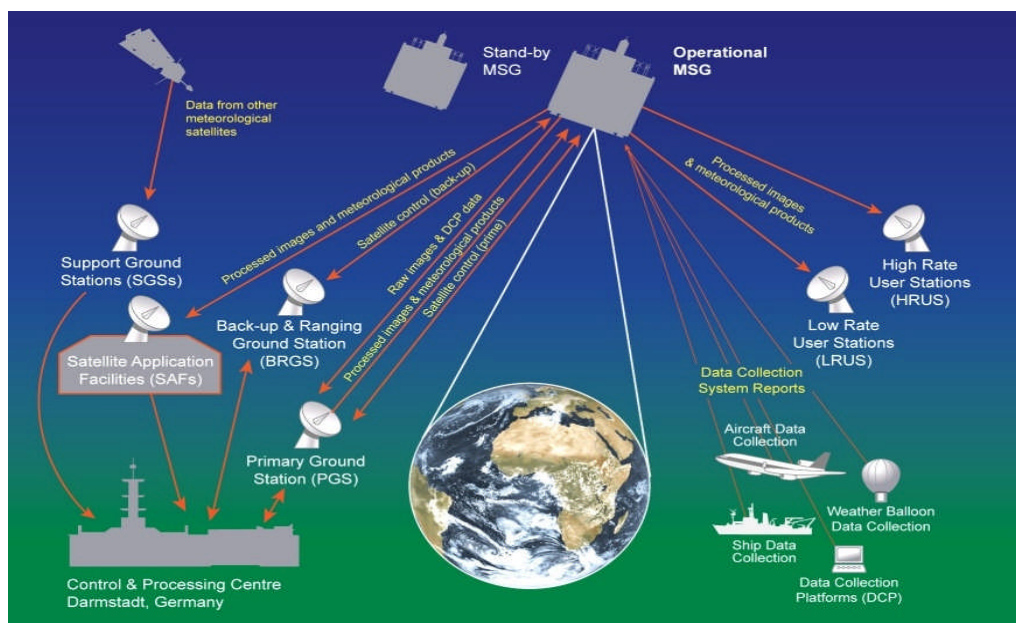


Fig. I.11. Le réseau de MSG [33]

I.8. Comparaison entre METEOSAT/MSG(1)

Satellites METEOSAT 1 ^{ère} Génération	Satellites MSG (2 ^{ème} Génération)
Radiomètre imageur avec 3 canaux	Radiomètre imageur amélioré avec 12 canaux
Structure stabilisée par rotation 100 tr/mn	Structure stabilisée par rotation 100 tr/mn
Moteur d'apogée au propergol solide	Système de propulsion bi-liquide unifié
Maintien en position : 5 ans	Maintien en position : 7 ans
Puissance requise : 200 watts	Puissance requise : 600 watts
720 kg au moment du transfert en orbite géostationnaire GTO	2000 kg au moment du transfert géostationnaire GTO
Qualification pour emport sur Delta 2914 et Ariane 1, 2, 3.	Qualification pour emport Ariane 4 et 5, Atlas 1
Distance d'échantillonnage : 2.25 km pour le visible (VIS) et 5 km pour l'infrarouge et vapeur d'eau (IR et WV)	Distance d'échantillonnage 1 km pour le HRVIS et 3 km pour les 11 canaux
La taille du pixel : 2.25 km pour le visible et de 5 km pour le IR et WV	La taille du pixel : 1.4 km pour le HRVIS et de 4.8 km pour les autres
Diamètre télescopique : 400 mm	Diamètre télescopique : 500 mm
N ^{bre} de détecteurs : 4	N ^{bre} de détecteurs : 42
Fréquence d'acquisition : 30 mn	Fréquence d'acquisition : 15 mn

Tableau. I.2. Caractéristiques des satellites Météosat.

I.9. EUMETSAT

EUMETSAT est une organisation intergouvernementale créée par une convention internationale (entrée en vigueur le 19 juin 1986 et implantée à Darmstadt en Allemagne) approuvée par 18 États européens : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Suède, Suisse et Turquie. Ces États financent les programmes d'EUMETSAT et sont les principaux utilisateurs des systèmes. EUMETSAT a également des États coopérants (Bulgarie, Croatie, Hongrie, Lettonie, Lituanie, Slovaquie, Hongrie, Pologne, République tchèque, la République de Serbie et Monténégro, Slovénie et la Roumanie). EUMETSAT a pour principale mission la mise en place, le maintien et l'exploitation de systèmes européens de satellites météorologiques opérationnels et une contribution à l'étude du climat et à la détection des changements climatiques.

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

I.10. Discussion

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe de la télédétection spatiale, ainsi que quelques satellites météorologiques. Ceux-ci donnent des informations très utiles pour la détection et le suivi des changements climatiques. Les images fournies par les satellites constituent un formidable outil pour suivre les évolutions et les progressions atmosphériques. En subissant les prétraitements et les traitements adéquats, ces images fournissent des interprétations automatiques.

Le chapitre qui va suivre, sera consacré à l'étude de techniques pertinente du radiomètre imageur de MSG « SEVIRI ».

Chapitre II : Etude des canaux SEVIRI

II.1. Préambule

Les nuages entre dans le cycle de l'eau, donc ils sont une composante essentielle du climat. D'ailleurs, ils réfléchissent une grande partie du rayonnement solaire vers l'espace, mais capte pratiquement tout le rayonnement infrarouge émis par la Terre. Ainsi, ils affectent la distribution spatiale de la température et la circulation atmosphérique. Généralement, l'observation des nuages se fait à partir du sol par les stations de météorologie. Principalement, cette observation consiste à déterminer visuellement le type du nuage, sa forme, son étendue, son opacité et l'attitude à laquelle il se trouve. Elles donnent donc des indications sur la couverture nuageuse à grande échelle spatiale. Cependant, grâce au radiomètre imageur amélioré SEVIRI du satellite MSG, nous obtenons différentes informations caractéristiques concernant les nuages (nuages d'eau liquide, nuage de glace) à partir des images obtenues par le satellite dans ses différents canaux, aussi sur les températures et autres.

L'image constitue un moyen très important de communication. Elle permet aux être humains de tout âge et de toute culture de se comprendre. Le traitement d'image est une méthode qui est née de l'idée et de la nécessité de remplacer l'observateur humain par la machine. Il désigne l'ensemble des méthodes dont l'objectif est d'améliorer la qualité de l'image en corrigeant les dégradations subites lors de son acquisition ou à extraire les informations permettant une interprétation visuelle ou automatique faisant appel à des techniques destinées à mieux exploiter les informations qu'elle contient.

Dans ce chapitre, étant donné que l'image est le moyen de communication, nous donnerons un bref rappel sur les caractéristiques de l'image, suivi des nuages et leurs caractéristiques. Ensuite, nous ferons l'étude des canaux SEVIRI.

II.2. L'image

II.2.1. Définition d'une image

Une image est une représentation bidimensionnelle d'objets tridimensionnels. Elle peut être représentée par une fonction $f(x, y)$ de brillance analogique continue

défini dans un domaine borné, tel que x et y représentent les coordonnées spatiales d'un point de l'image f est proportionnelle à l'intensité lumineuse réfléchie ou transmise en ce point (x, y) . Cette représentation est valable pour l'image monochromatique. Pour l'image couleur, l'intensité lumineuse f en un point (x, y) est une fonction de la longueur d'onde λ sous la forme $f(x, y, \lambda)$.

II.2.2. Image numérique

Une image numérique est une matrice à deux dimensions composée d'échantillons élémentaires appelés pixel. Le pixel est le plus petit point de l'image. On peut distinguer 03 types d'images numériques: image binaire, image à niveau de gris et image couleur.

II.2.2.1. Image binaire

Une image binaire est une matrice rectangulaire dont les éléments valent 0 ou 1. Lorsqu'on visualise une telle image, les 0 sont représentés par le noir et les 1 par le blanc.

II.2.2.2. Image en niveau de gris

C'est une matrice dans laquelle chaque élément est codé sur un nombre fixe de bits. Si le nombre de bits utilisé est n alors les valeurs de niveau de gris seront comprises entre 0 et $2^n - 1$. Le niveau de gris étant la valeur de l'intensité lumineuse en un point de l'image. Le nombre de niveau de gris dépend du nombre de bits utilisé pour décrire la « couleur » du pixel, plus ce nombre est important, plus les niveaux possibles sont nombreux. Par exemple si un pixel est représenté par un octet, on aura 256 niveaux de gris. Un exemple d'une image en niveau de gris donné sur la figure.

II.2.2.3. Image couleur

La sensibilité de l'œil humain aux radiations de la lumière (basse, moyennes et hautes fréquences) correspondant respectivement aux couleurs rouges (700 nm), vertes (546,1 nm) et bleues (435,8 nm) permet de produire des images couleurs. Chaque de ces trois plans de couleur est codé comme une image de niveau de gris avec des valeurs allant de 0 à 255. Ce système de référence appelé RVB (rouge, vert, bleu) est fixé par la

Commission Internationale de l'Eclairage. Il permet de décrire pratiquement toutes les couleurs à partir de ces trois couleurs (R, V, B).

II.3. Les nuages

Un nuage est un ensemble de minuscules particules d'eau liquide (gouttelettes) ou solide (glace) ou les deux à la fois en suspension dans l'atmosphère et ne touchant généralement pas le sol. Ainsi, contrairement à ce que l'on pourrait penser, un nuage n'est pas formé uniquement de vapeur d'eau (ce n'est pas elle qui nous le rend visible car la vapeur d'eau est transparente). Toutefois, le nuage peut comporter également des particules d'eau liquide ou de glace de plus grandes dimensions, des particules liquides non aqueuses (acides), des particules solides provenant de vapeurs industrielles, de poussières, de fumées, de sel.

II.3.1. Constitution d'un nuage

a) Les gouttelettes d'eau :

- Elles sont formées en atmosphère saturée (100 % d'humidité) par condensation de la vapeur d'eau (toujours présente dans l'atmosphère) en présence de particules solides en suspension appelées noyaux de condensation. Ces noyaux de condensation jouent le rôle de catalyseur et sont d'origines variées :
 - minérale : suie volcanique, cristaux de sable ;
 - marine : cristaux de sel marin arrachés des embruns par le vent ;
 - humaine : combustions industrielles, pollution ;
- Vitesse de chute des gouttelettes: de quelques mm/s à 1 cm/s sans agitation ;
- Diamètre des gouttelettes : de 2 à 200 microns (nombre de 300 à 600/m³ environ) ;
- Distance séparant deux gouttelettes : 1,4 mm soit 70 fois leur diamètre en moyenne (ce qui revient à dire un ballon de foot tous les 20 à 30 mètres) ;
- Teneur en eau des nuages :

- nuage stable : gouttelettes nombreuses mais de petit diamètre et eau condensée de l'ordre de 0,5g/kg de nuage.
- nuage instable : gouttelettes moins nombreuses mais de diamètre important (40 microns en moyenne) et eau condensée de l'ordre de 5g/kg de nuage.

b) Les cristaux de glace:

- Ils sont formés par cristallisation d'une gouttelette d'eau autour d'une particule solide appelée noyau glaçogène pour $T < 0^{\circ}\text{C}$. Ces noyaux sont issus de cendres volcaniques, suie ou sable et ont une structure cristalline analogue à la glace.
- Diamètre des cristaux : légèrement supérieur à celui des gouttelettes
- Vitesse de chute : le mm/s sans mouvement ascendant
- Distance séparant deux cristaux : voisine de celle des gouttelettes
- Nombre : variable selon la température :

-3°C : apparition de cristaux ;

-12°C : les cristaux augmentent en nombre (un cristal pour 10 m³ de nuage) ;

-32°C : augmentation marquée de leur nombre (10 pour 10 m³ de nuage) ;

-41°C : augmentation systématique et brutale (il n'existe plus d'eau en surfusion).

II.3.2. L'étage des nuages

La base du nuage détermine l'étage auquel il appartient. Ces étages varient en fonction de la latitude. Le tableau (tableau II.1.) suivant et la figure II.1 illustre ces différents étages :

Etages	Genres	Régions polaires	Régions tempérées	Régions tropicales
Supérieur	Cirrus Cirrocumulus Cirrostratus	de 3 à 8 km	de 5 à 13 km	de 6 à 18 km
Moyen	Alto cumulus Altostratus Nimbostratus	de 2 à 4 km	de 2 à 7 km	de 2 à 8 km
Inférieur	Stratocumulus Stratus Cumulus Cumulonimbus	Jusqu'à 2 km	Jusqu'à 2 km	Jusqu'à 2 km

Tableau II.1. Les étages des nuages.

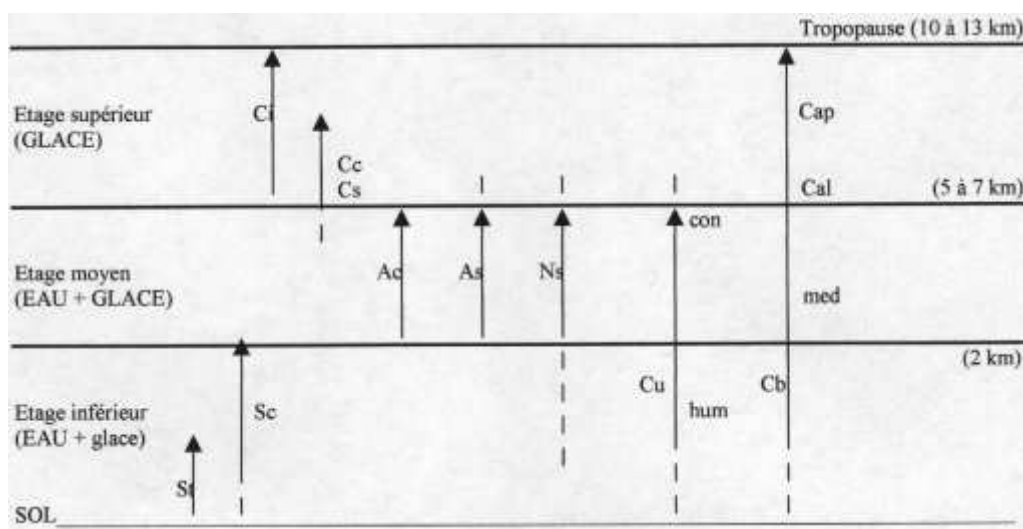


Fig. II.1. Les différents étages [OMM]

Les nuages peuvent être classifiés en fonction de plusieurs facteurs. Une classification générale et précise de chaque type de nuage permet ainsi à l'observateur d'identifier les nuages dans le ciel. La première classification aurait été tentée par le naturaliste Lamarck, mais elle fût rapidement remplacée par celle de Luke Howard en 1803. Il y a eu beaucoup d'autres chercheurs qui ensuite ont ajoutés d'autres éléments à cette classification toujours utilisée aujourd'hui et publiée par l'Organisation météorologique mondiale (voir figure II.2.). La coloration des nuages ne dépend pas de propriétés spécifiques des éléments du nuage. Les colorations cuivrées sont dues à des éclairages dépouillés des radiations absorbées par la diffusion atmosphérique; les teintes bleutées sont dues au contraire, soit à un éclairage diffusé, soit, pour les nuages lointains, à la contribution de la lumière reçue par diffusion de la tranche d'atmosphère située entre l'observateur et le nuage.

Remarque:

- Les cumulus et cumulonimbus ont leur sommet situé dans un autre étage (généralement moyen, voire supérieur pour les cumulus; supérieur pour les cumulonimbus).
- De même, en fonction de leur épaisseur, les nimbostratus peuvent avoir leur base située dans l'étage inférieur et leur sommet dans l'étage supérieur.

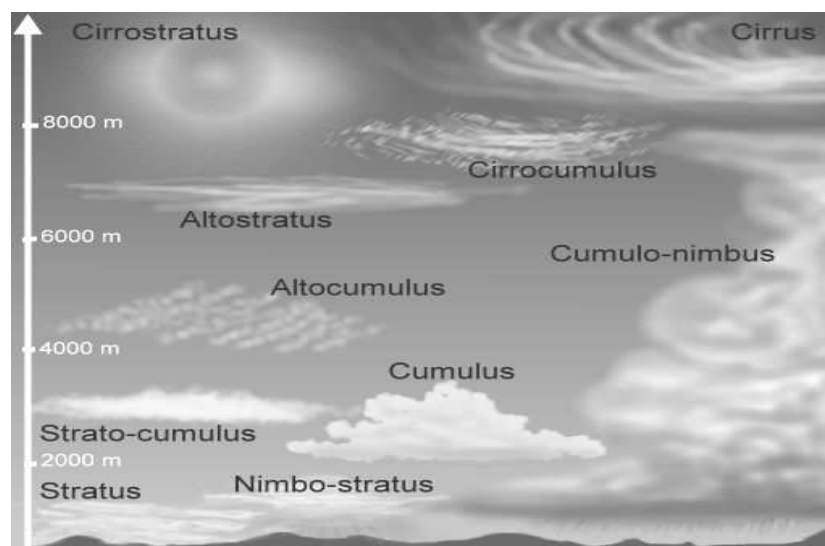


Fig. II.2. Les principaux types de nuages suivant leur altitude de base [OMM]

II.3.3. Observation des nuages par satellite

La physique de l'atmosphère, la télédétection en particulier, comme les autres sciences, est tributaire de la technique. Les phénomènes étudiés nécessitent des moyens d'observation adaptés aux questions posées ainsi qu'aux différentes échelles spatiales et temporelles concernées. Au cours des dernières décennies, les avancées dans le domaine de l'instrumentation, en particulier, la télédétection spatiale, ont permis l'accès aux grandes échelles d'observation. Les physiciens de l'atmosphère ont pendant longtemps travaillé à l'échelle locale. Puis, le développement des moyens d'observation spatiaux a profondément modifié l'échelle et la fréquence des mesures envisageables, ainsi que les méthodes de travail. Les satellites d'observation sont maintenant indispensables pour mettre en évidence les changements dans l'occupation et l'organisation de la couverture nuageuse. Les satellites ont ainsi permis d'atteindre un nouveau niveau de perception des nuages et grandement accru l'intérêt scientifique au sujet de l'organisation nuageuse aux échelles moyennes et synoptiques, précisément celles où les études "pré-satellites" étaient incomplètes.

Il faut rappeler ici que des différences existent entre l'observation par satellites et l'observation depuis la surface. Un satellite est incontestablement en mesure d'acquérir une connaissance plus complète de la répartition horizontale des nuages, de leur structure et de l'aspect de leurs régions supérieures.

Lorsqu'on observe les nuages par satellite (cf. Scorer, 1986), on observe des hétérogénéités sur une grande gamme d'échelles. L'aspect des champs nuageux nuages dépend alors essentiellement de la nature, des dimensions, du nombre et de la répartition dans l'espace de ses particules constitutives (nuages isolés, groupes); il dépend aussi de l'intensité du rayonnement reçu par le nuage, ainsi que des positions relatives du satellite et de la source du rayonnement par rapport au nuage.

Dans le spectre visible, la luminance reçue ne dépend que de la réflectivité du nuage. Cette réflectivité dépend de la composition du nuage (gouttelettes d'eau, cristaux), et de son épaisseur. Ainsi, des nuages constitués de cristaux de glace épais, apparaîtront blancs. Dans l'infrarouge thermique, que nous utiliserons par la suite, plus un nuage a un sommet élevé, plus la température du sommet est basse. Le radiomètre mesure alors l'émittance, qui est ensuite convertie en luminance, et éventuellement en température. Ainsi les images infrarouges peuvent permettre la détermination des types (ou genres) des nuages grâce à la séparation en différents niveaux d'altitude et ce, grâce à la température.

II.3.4. Bilan énergétique de la planète et rôle des nuages

L'échange d'énergie avec l'extérieur est l'un des plus importants des processus régulateurs du climat terrestre. Les nuages qui apparaissent dans le ciel, participent grandement à un tel échange d'énergie, en renvoyant une bonne partie du rayonnement solaire vers l'espace et en transmettant l'autre partie vers la surface terrestre. Comme mentionné précédemment, lors de la traversée des nuages, le rayonnement solaire subit, à la fois, des phénomènes de diffusion et d'absorption. Dans ce cas, le rayonnement arrive au niveau du sol avec une forte atténuation de son intensité. De façon générale, les échanges d'énergie dans l'atmosphère sont régis par l'équation de transfert radiatif.

Dans le système atmosphère - terre, les phénomènes mis en jeu sont essentiellement la transmission, la réflexion, l'absorption et la diffusion du rayonnement solaire par l'atmosphère et la surface terrestre. A de tels processus, il faudrait ajouter l'émission d'un rayonnement infrarouge par le globe terrestre.

La figure II.3 illustre comment se font les échanges d'énergie dans ce système et elle fait apparaître clairement le rôle des nuages au cours de tels échanges.

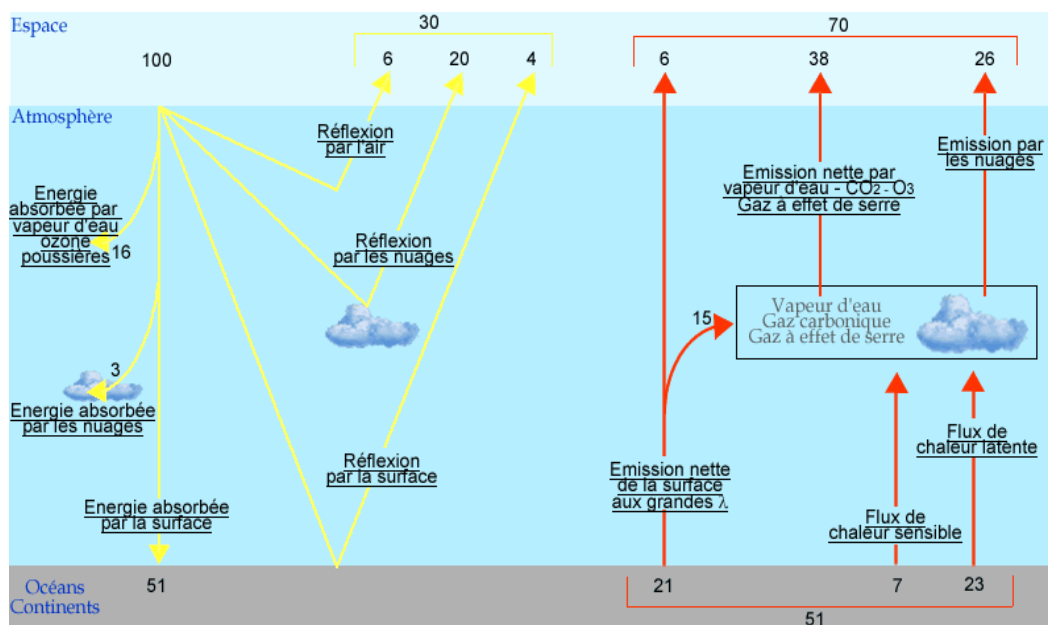


Fig.II.3. Echanges d'énergie dans le système atmosphère – Terre : Les chiffres figurant dans ce diagramme, expriment les pourcentages de rayonnement par rapport au flux incident de rayonnement solaire, mesuré au sommet de l'atmosphère [adapted from « understanding climatic change » U.S.National Academy of Sciences, Washington, D.C.(1975)], [33]

II.4. Les Images des satellites MSG

II.4.1. Généralité

Les satellites de la série Météosat Seconde Génération (MSG), dont le premier est Météosat-8, emportent deux instruments impressionnants: le radiomètre-imageur dans le visible et l'infrarouge en rotation amélioré (SEVIRI) - une version perfectionnée de l'instrument embarqué sur les satellites Météosat de la première série - et l'instrument géostationnaire de détermination du bilan radiatif de la Terre (GERB) - une innovation sur un satellite géostationnaire - destiné aux études climatiques. Ce sont des instruments complexes: SEVIRI produit dix fois plus de données que ses prédécesseurs, avec des résolutions spatiales, temporelles et spectrales plus poussées, en exploitant quatre fois plus de canaux de prise d'images.

II.4.2. Image SEVIRI

II.4.2.1. Transmission des images MSG

Le satellite MSG utilise deux systèmes de transmission de données : LRIT et HRIT.

a) Le système HRIT

C'est un système de transmission d'informations à haut débit. Il permet de transmettre les 12 canaux de SEVIRI en haute résolution spatiale et temporelle, à un débit de **1 mégabits/s** dans les 05 minutes qui suivent l'observation.

b) Le système LRIT

C'est un système de transmission d'informations à faible débit. Il permet de transmettre des données de faible résolution, à un débit de **128 Kilobits/s** aux stations de réception faible débit qui reçoivent 03 à 05 images dans les canaux de SEVIRI, par cycle de 30 minutes dans les 15 minutes qui suivent l'observation.

Le satellite MSG transmet également les images de tous les autres satellites (Américains, Japonais, Russe et Indou) géostationnaire et certaines images des satellites en orbites polaires (de la série NOAA).

Au flux de données du système LRIT s'ajoute la transmission des produits météorologiques (cartes analysées), des données météorologiques classiques (MDD) et les messages des plates-formes de collectes de données (DCP).

II.5. Le radiomètre imageur SEVIRI

Le radiomètre imageur SEVIRI avec ses 12 canaux, SEVIRI balaye le disque terrestre complet selon un cycle de 15 minutes - une cadence sans précédent - alors que celui de Météosat était de 30 minutes. Dans onze canaux, chaque pixel des images est échantillonné toutes les 15 minutes, à intervalles de 3 km au point sous le satellite, sur toute la zone montrée sur la figure II.4 (voir figure II.4.). Le douzième, le canal à haute résolution dans le visible (HRV) a un pas d'échantillonnage d'exactly 1 km, la dimension est-ouest du balayage étant limitée à la moitié de la largeur du disque terrestre.

Le radiomètre-imageur dans le visible et l'infrarouge rotatif amélioré (SEVIRI) de MSG tire pleinement parti de son angle de vue géostationnaire en fournissant des images fréquentes du disque terrestre complet. Ces images sont produites toutes les 15 minutes, jour et nuit, avec un pas d'échantillonnage de seulement 3 km au point sous le satellite pour les onze canaux. Le 12ème, le canal à haute résolution dans le visible (HRV) a un pas d'échantillonnage d'exactly 1 km, la dimension est-ouest du balayage étant limitée à la moitié de la largeur du disque terrestre. Cette capacité unique permet aux utilisateurs de toute la zone observée d'étudier, de surveiller et de comprendre la dynamique du système Terre-atmosphère, en évolution constante.

Les spécifications de SEVIRI ont été soigneusement choisies en vue de répondre aux besoins opérationnels.

Chacun des 12 canaux correspond à une ou plusieurs applications spécifiques - utilisant seulement ses données ou celles-ci combinées avec celles d'autres canaux. Chacun exploite des capacités bien établies, ce qui garantit une bonne compréhension de ses caractéristiques, pour permettre une utilisation opérationnelle des données, dans un délai minimum.

Le tableau récapitule les 12 canaux de SEVIRI, en indiquant leur longueur d'onde centrale, leur bande spectrale nominale, ainsi que leurs principales applications et capacités.

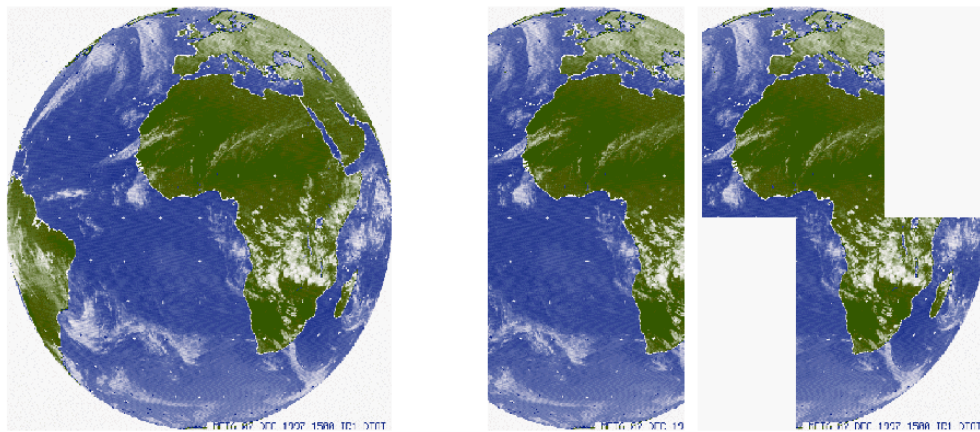
L'instrument embarqué est équipé d'un miroir de 51 cm de diamètre et de détecteurs à infrarouge, maintenus à une température de 85 ou 95 K par un refroidisseur passif.

Les images produites sont obtenues par un balayage est-ouest résultant de la rotation à 100 tours/minute de tout le satellite, combiné avec le mouvement pas à pas, du nord au sud, d'un miroir de télescope, opéré après chaque ligne de balayage. Chacun des onze premiers canaux est équipé de trois détecteurs, de telle sorte que les 1 250 lignes de balayage produisent 3 750 lignes d'image. Le canal à haute résolution dans le visible (HRV) balaye la moitié de la dimension est-ouest du disque terrestre, ses neuf détecteurs permettant un pas d'échantillonnage de 1 km.

Le champ d'observation effectif couvert par chaque pixel est de 4,8 km au point sous le satellite (1,67 km pour le canal HRV).

Le cycle d'observation nominal permet de prendre des images du disque entier sur une période d'environ 12 minutes, suivie d'une séquence d'étalonnage des canaux dans l'infrarouge et du retour du miroir de balayage en position de départ.

Au cours de ce cycle de 15 minutes, SEVIRI produit en tout environ 2,4 gigabits de données.



Cas de tous les canaux sauf HRV [29]

3712 x 3712 pixels

Cas du HRV (normal et alternative) [29]

5568 x 11136 pixels

Fig. II.4. Le radiomètre SERIVI : couverture géographique (source d'EUMETSAT).

II.5.1. Les canaux SEVIRI

a) Le domaine visible (Canal VIS 0.6 et VIS 0.8) (μm)

MSG possède deux canaux visibles : **C1-VIS 0.6** et **C2-VIS 0.8**. Aussi, MSG possède un canal (C12) visible à large bande HRV que nous allons traiter en dernier.

Ces deux canaux (C1 et C2) opérant dans le visible ont des caractéristiques bien connues, d'après l'expérience des canaux similaires de l'instrument AVHRR embarqué sur les satellites NOAA. Ils sont utiles pour la détection des nuages, leur suivi, l'interprétation des structures nuageuses, la détermination des zones observées lors de prises de vue successives, ainsi que la surveillance et l'étude de la surface terrestre et des aérosols (voir figure II.5.). Leur combinaison permet d'établir des indices de végétation.

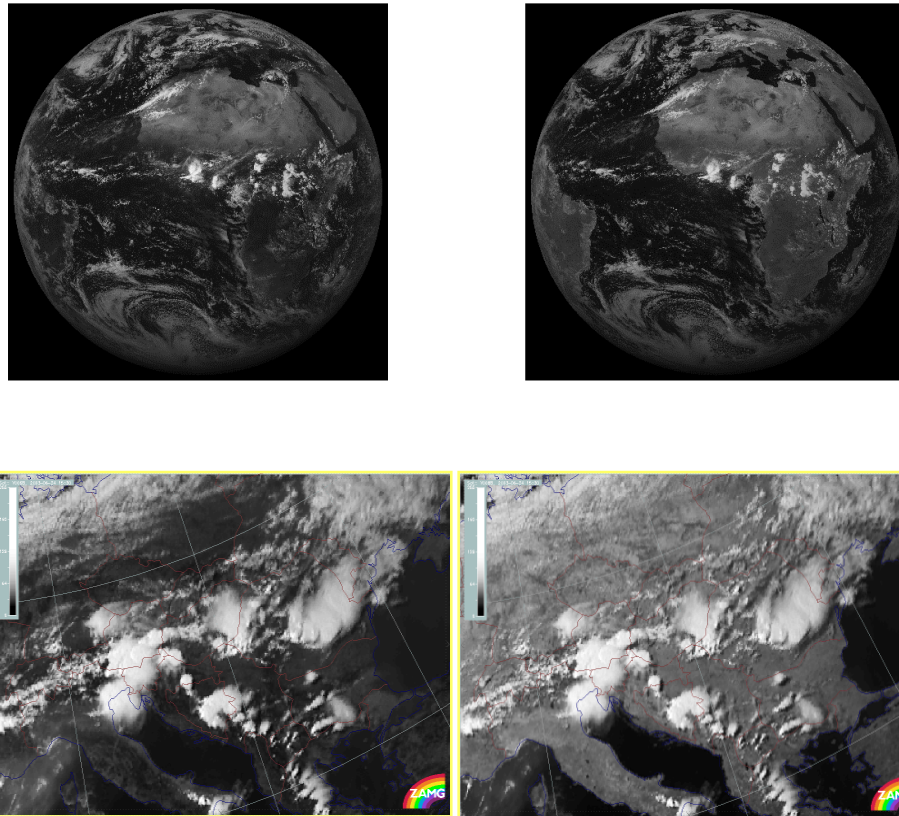


Fig. II.5. MSG-2 Image dans les canaux C1 0.6 μm et C2 0.8 μm , le 26 Mai 2010, 12: 15 UTC [ONM, 29]

On remarque d'après ces images prises par le satellite MSG-1 que les deux canaux visibles reconnaissent les nuages, et cela est grâce à la radiation solaire réfléchie (la réflectance).

Aussi, dans le canal VIS 0.8 ; il y a une meilleure reconnaissance des structures de la surface.

b) Le domaine proche et moyen infrarouge (Canal NIR 1.6 et IR 3.9) (μm)

Est constitué des deux canaux NIR 1.6 et IR 3.9 (μm).

i. C3 : Le canal NIR 1.6 μm

C'est un canal situé dans la partie dite proche infrarouge (ou near infrarouge en Anglais) du spectre électromagnétique.

Il nous permet de faire la distinction de la neige au sol des nuages, ainsi qu'entre les nuages de glace et les nuages d'eau liquide. Aussi, il nous fournit des informations sur la présence des aérosols (en dehors de la poussière Saharienne). Ses capacités sont fondées sur l'expérience de plusieurs missions préalables, dont celle utilisant le radiomètre à balayage le long de la trace (ATSR) sur les satellites ERS, (voir figure II.6.). C'est un canal qui est similaire à AVHRR des satellites de NOAA. La neige et la glace sont de faibles réflecteurs dans 1.6

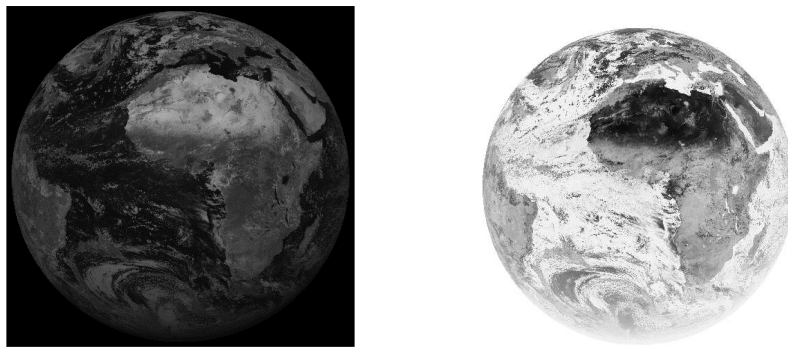


Fig. II.6. Image (non inversée et inversée) dans C3 1.6. μm , le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC [ONM]

ii. C4 : Le canal IR 3.9 μm

C'est un canal dans l'infrarouge moyen. (Voir figure II.7.).

Il est situé dans une partie électromagnétique où la lumière du soleil influe sur le rayonnement reçu. Ainsi, il s'agit partiellement d'un canal d'émission thermique. Outre, il est en partie sensible à la réflexion du rayonnement solaire. De ce fait, l'interprétation des données provenant de ce canal nécessite quelques précautions. En effet, lorsqu'il fait jour, l'énergie solaire réfléchie domine pour donner l'apparence d'une image dans la partie visible du spectre, tandis que la nuit, l'énergie ne provient que de la Terre avec les caractéristiques de la partie infrarouge du spectre.

Il est utilisé principalement pour la détection nocturne des nuages bas et du brouillard, ainsi que pour la détermination des propriétés des nuages. Aussi, il est utile pour la mesure nocturne des températures du sol et de la mer et pour la détection des feux de forêts.

Pour MSG, il a fallu élargir la bande spectrale, afin d'améliorer le rapport signal/bruit.

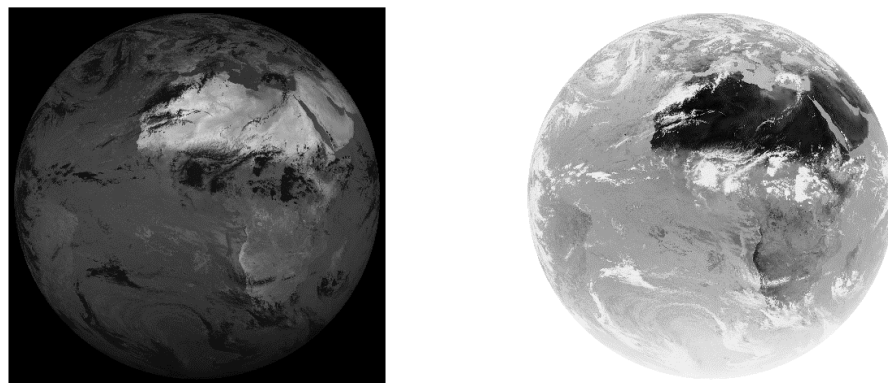


Fig. II.7. Image inversée et non inversée utilisée par les météorologues) du C4 3.9 μm , Le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC [ONM]

c) Le domaine d'absorption vapeur d'eau

Est constitué de deux canaux WV 6.2 et WV 7.3 (Voir figure II.8.). Il prend la suite du canal vapeur d'eau à large bande de Météosat, pour mesurer la vapeur d'eau à mi-atmosphère et fournir des traceurs pour le calcul des vents atmosphériques. Aide aussi à la détermination de la hauteur des nuages semi-transparents et le suivi de ces derniers, et donnent aussi des informations sur l'humidité de toutes les régions Terrestres. MSG dispose de deux canaux distincts correspondant à des couches atmosphériques différentes, au lieu d'un canal unique sur Météosat. Les deux canaux séparés permettent d'obtenir des informations sur le contenu en vapeur d'eau à différents niveaux de la troposphère.

i. C5 : Le canal WV 6.2 (μm)

Il nous renseigne sur la haute troposphère.

ii. C6 : Le canal WV 7.3 (μm)

Il nous renseigne sur la moyenne troposphère.

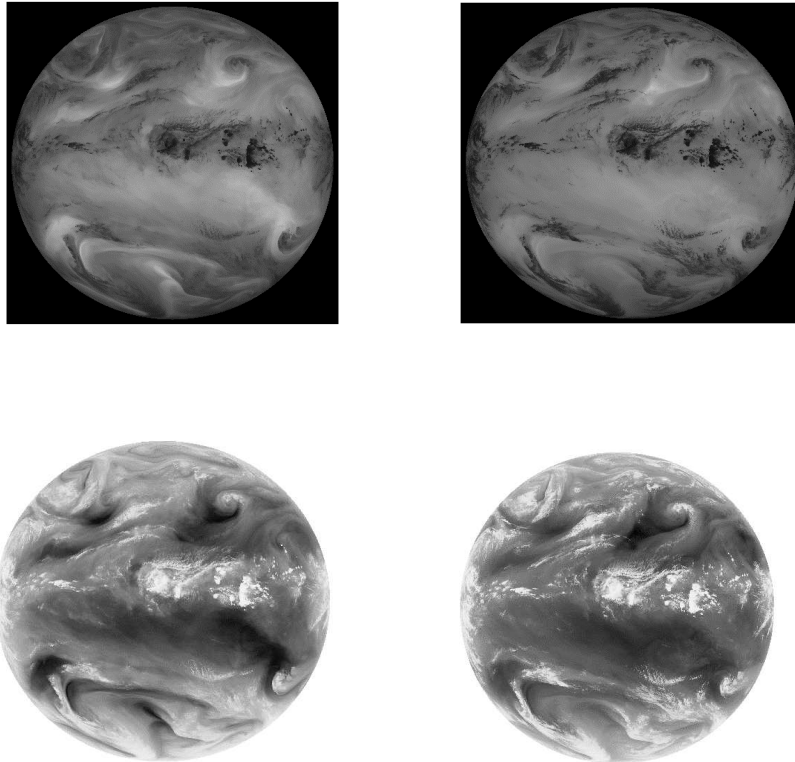


Fig. II.8. C5 6.2 et C6 7.3 (inv. Et non inv.) Le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC, [ONM]

d) Le domaine de l’Infrarouge

Il est constitué des canaux IR 8.7, IR 9.7, IR 10.8, IR 12.0 et IR 13.4 (μm).

i. C7 : Le canal IR 8.7 (μm)

C’est un canal de transparence dans l’infrarouge (Voir figure II.9.). Il est connu d’après le sondeur infrarouge à haute résolution (HIRS) des satellites NOAA.

Il est utilisé principalement pour fournir des informations quantitatives sur les masses nuageuses minces des cirrus et faire la distinction entre les nuages de glace et les nuages d'eau liquide.

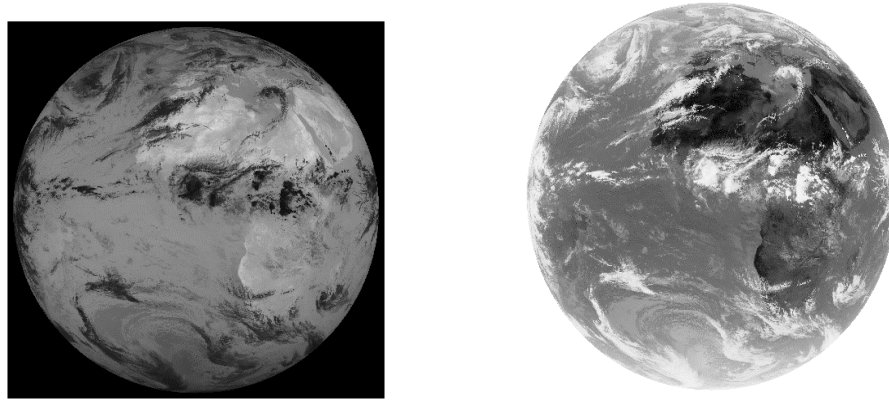


Fig. II.9. C7 8.7 (inv. et non inv. Le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC [ONM])

ii. C8 : Le canal 9.7 (μm)

C'est un canal sensible à la concentration d'ozone dans la partie basse de la stratosphère (Voir figure II.10). Il est utilisé pour surveiller et calculer l'ozone total et pour évaluer la variabilité diurne. Potentiel en matière de suivi des schémas de répartition de l'ozone, en temps qu'indicateur des champs de vent à cette altitude.

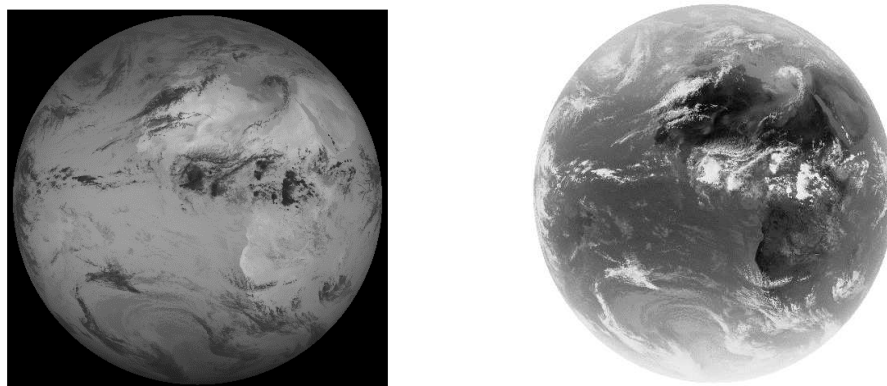


Fig. II.10. C8 9.7 (inv. Et non inv.) Le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC [ONM]

iii. (C9, C10) : Les canaux 10.8 et 12.0 (μm)

Ce sont des canaux dans l'infrarouge thermique, bien connu pour leur utilisation dans la méthode à « double fenêtres » (avec AVHRR). Chacun est sensible à la température des nuages et de la surface; leur utilisation conjointe contribue à réduire les effets d'absorption atmosphériques lors de la mesure des températures de surface et des températures au sommet des nuages. Egalement utilisés pour le suivi des nuages aux fins de calcul des vents atmosphériques et pour estimer l'instabilité atmosphérique. (Voir figure II.11).

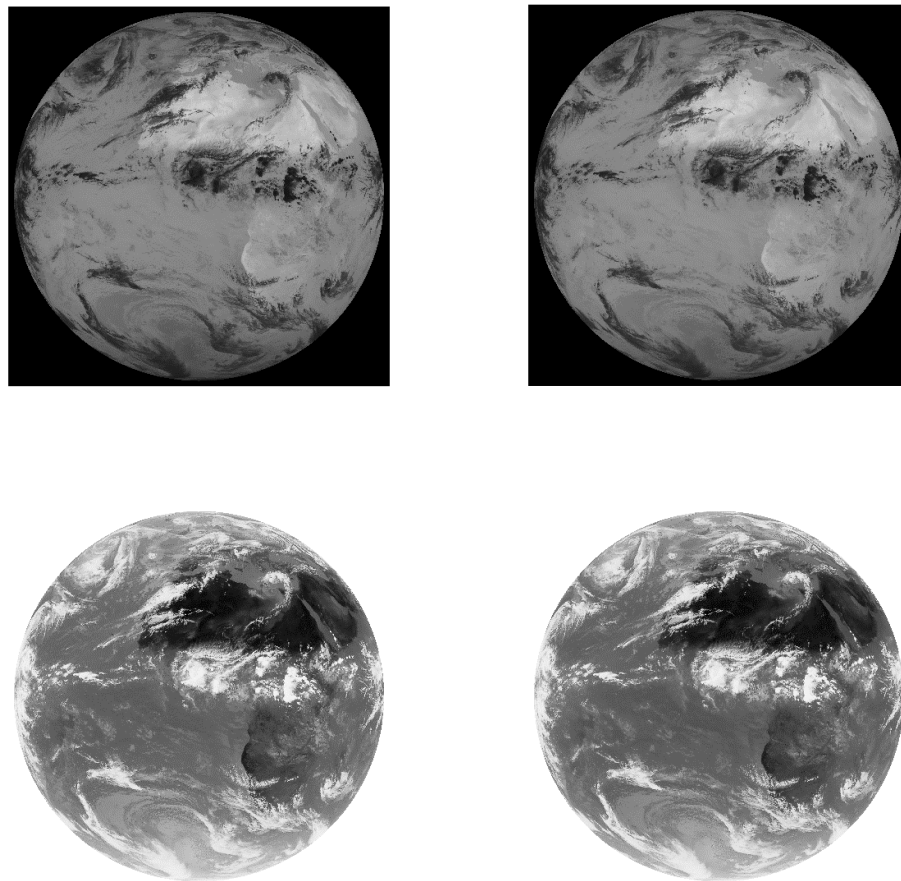


Fig. II.11. C5 10.8 et C6 12.0 (inv. Et non inv.). Le 26 Mai 2010 [ONM]

iv. C11 : le canal 13.4 (μm)

C'est le canal situé dans la partie où le rayonnement est absorbé par les molécules de dioxyde de carbone (absorption du CO_2) tel que celui utilisé sur le

sondeur GOES-VAS pour l'estimation de l'instabilité atmosphérique, ainsi que pour la fourniture d'informations sur la température de la basse troposphère. Ce canal permet aussi la mesure de la hauteur des nuages semi-transparents (Voir figure II.12).

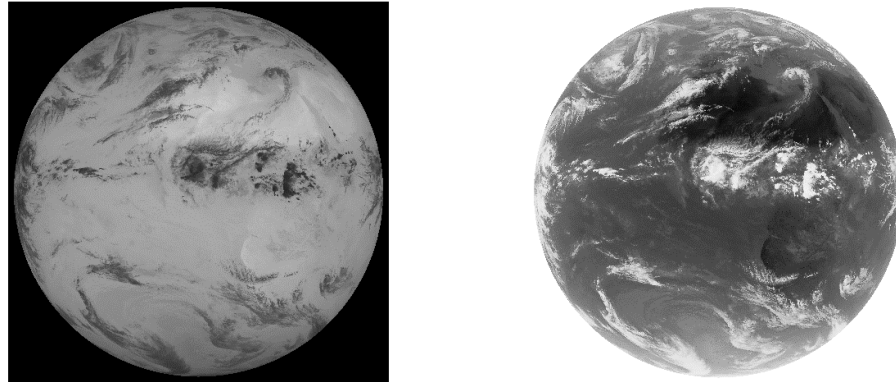


Fig. II.12. C11 IR 13.4 (inv. Et non inv.). Le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC, [ONM]

e) Domaine Haute Résolution Visible

C12 : Le canal HRVIS (Haute Résolution Visible)

C'est un canal à large bande dans le visible (Voir figure II.13), comme le canal VIS de Météosat, mais avec un pas d'échantillonnage plus fin, d'exactement 1 km (pour 2.5 km sur Météosat).

Il est utilisé pour détecter les vecteurs vents dans la haute résolution dans le visible, aussi pour le suivi de structure de petite échelle. En combinant le canal HRV au canal VIS 0.6, permet de faire la détection et le suivi des nuages, l'interprétation et l'étude des surfaces Terrestres et des aérosols. À savoir que la résolution et les domaines géographiques seront différents.

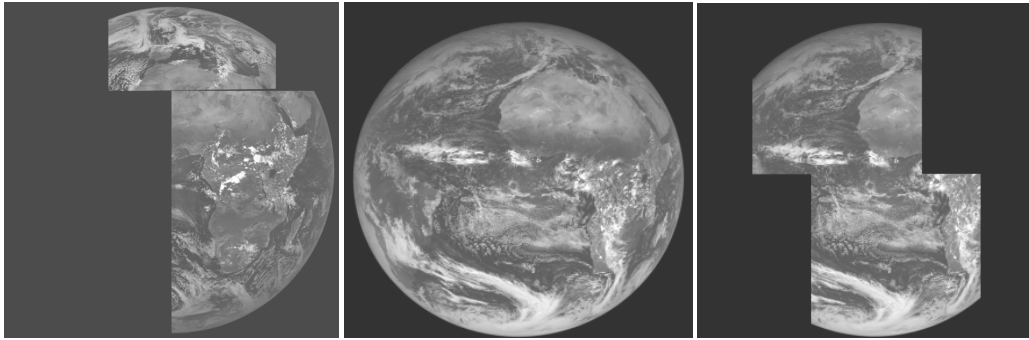


Fig. II.13. C12 HRV Le 26 Mai 2010 [OMM]

Tous les canaux du radiomètre imageur SERIVI du satellite MSG (MRIV pour Météosat) ont un champ d'observation de 12500 km. Chaque canal des 11 canaux (excepté le HVR) est équipé de 03 détecteurs, chacun de ces détecteurs peut balayer environ 1250 lignes, ce qui donne 3750 lignes d'images par canal. Pour le canal HRV, il balaye la moitié du disque EST-OUEST tout en réalisant un échantillonnage d'1 km à l'aide de 9 détecteurs.

II.5.2. Les caractéristiques des canaux SEVIRI

Le tableau suivant récapitule les différentes caractéristiques des canaux de l'instrument SEVIRI embarqué sur le satellite MSG :

Nom du canal	Domaine (µm)	Résolution spatiale	Nbre de ligne par image	Nbre de pixels par ligne	Champs d'observation	N° de détecteurs
VIS 0.6	0.56 – 0.71	3 km	3712	3712	12500 km	3
VIS 0.8	0.74 – 0.88	3 km	3712	3712	12500 km	3
NIR 1.6	1.50 – 1.78	3 km	3712	3712	12500 km	3
IR 3.9	3.48 – 4.36	3 km	3712	3712	12500 km	3
WV 6.2	5.35 – 7.17	3 km	3712	3712	12500 km	3
WV 7.3	6.85 – 7.85	3 km	3712	3712	12500 km	3
IR 8.7	8.30 – 9.10	3 km	3712	3712	12500 km	3
IR 9.7	9.38 – 9.94	3 km	3712	3712	12500 km	3
IR 10.8	9.80 – 11.80	3 km	3712	3712	12500 km	3
IR 12.0	11.00 – 13.00	3 km	3712	3712	12500 km	3
IR 13.4	12.40 – 14.40	3 km	3712	3712	12500 km	3
HRV	0.5 – 0.9	1 km	11136	5568	12500 km	9

Tableau II.2. Tableau illustrant les caractéristiques des canaux SEVIRI (MSG).

II.6. L'instrument GERB

II.6.1. Définition

GERB est le premier de ce type exploité sur un satellite géostationnaire. Il est destiné à mesurer les parties “ondes courtes” (rayonnement solaire réfléchi) et “ondes longues” (rayonnement thermique émis) du bilan radiatif, à l'échelle du disque terrestre complet présenté sur la figure 2.1.3, à des intervalles de 15 minutes. Ses observations permettront pour la première fois d'en analyser les variations diurnes, dues par exemple aux variations de la couverture nuageuse.

II.6.2. Mesures satellitaires du bilan radiatif de la Terre

Les instruments météorologiques satellitaires classiques obtiennent des images des nuages et de la couche sous-jacente par le biais de mesures de la lumière solaire réfléchie (canaux dans le visible) et du rayonnement infrarouge.

Ils peuvent être utilisés pour estimer le rayonnement ondes longues émis au sommet de l'atmosphère et le rayonnement solaire ondes courtes réfléchi. Des informations sur le bilan radiatif de la Terre peuvent donc être tirées de ces mesures, mais, de par leur nature, ces instruments opèrent dans des bandes spectrales très étroites qui n'explorent pas tout le spectre électromagnétique.

Pour surmonter cette difficulté, il faut utiliser des instruments spécifiques à large bande, embarqués sur des satellites en orbite polaire. Chaque instrument de ce type peut assurer, pour ce qui est du bilan radiatif de la Terre, une couverture quotidienne de toutes les parties du globe, mais du fait de l'héliosynchronisme de leur orbite, ils peuvent fournir uniquement des données correspondant à une heure locale fixe et pour une plage limitée de l'élévation solaire.

II.7. Discussion

Le traitement d'image est né des nouveaux besoins que les nouvelles technologies ont engendrés, et c'est grandement appuyé sur ces mêmes nouvelles technologies pour ce développé très rapidement.

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques notions essentielles sur le traitement d'une image afin d'améliorer la qualité de celle-ci en préparant une opération d'interprétation.

L'objectif de ce chapitre était la présentation des divers canaux de SEVIRI. Nous avons commencé par une description des canaux visible, infrarouge (proche et moyen), vapeur d'eau, infrarouge lointain et haute résolution visible.

Le chapitre suivant, s'appuie sur l'étude de la composition colorée RVB menée par des travaux de recherche dans le domaine de la météorologie.

Chapitre III : Apport des images MSG et Produits de Canaux SEVIRI

III.1. Préambule

L'amélioration des prévisions de crues et de sécheresse, de même que celle des dispositifs de vigilance et d'alerte devient donc une priorité pour les météorologues et bien au-delà. Les modèles hydrologiques complexes sur lesquels s'appuient les météorologues pour prévoir et évaluer les risques des phénomènes météorologiques et gérer leur impact, doivent être basés sur des prévisions très précises et des données très détaillées. Cette précision peut être améliorée de manière substantielle en recourant à des techniques d'assimilation avancées intégrant les données de diverses sources d'information telles que radars, réseaux de pluviomètres, imagerie satellitaire.

Les avancées dans les technologies de télédétection par satellite et dans la qualité des données, notamment depuis l'arrivée des données MSG, ouvrent maintenant de nouvelles possibilités de combler les trous de couverture du réseau d'observation synoptique, en intégrant des informations spatialisées sur les précipitations, le manteau neigeux et l'humidité des sols. Ces paramètres sont d'importance capitale pour les modèles de la prévision numérique. Cette qualité se base sur la combinaison des douze canaux du satellite MSG d'Eumetsat sous forme des RGB.

III.2. Acquisition et nature des images satellitaires

III.2.1. Numérisation : du rayonnement aux valeurs radiométriques

Le rayonnement parvenant sur le capteur (élément de barrette CCD par exemple) donne naissance à un signal électrique plus ou moins grand. La numérisation consiste à transformer ce signal électrique en une valeur numérique utilisable par un système informatique (voire figure III.2.1). La précision de la numérisation dépend du nombre de niveaux permis.

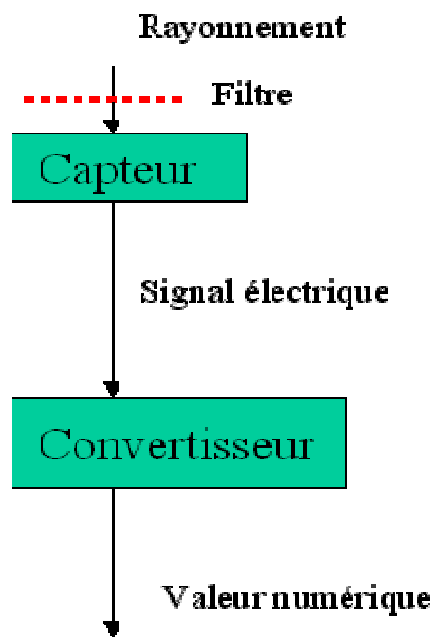


Fig. III.2.1. Illustration du la numérisation du rayonnement.

- Deux exemples :
 - Les valeurs des pixels des images Météosat ou Spot sont codées sur un octet (256 Niveaux possibles) ;
 - Les valeurs des pixels des images NOAA sont codées sur 12 bits (1024 niveaux).

III.2.2. L'espace RVB (RGB)

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 400 nm à 700 nm) 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).

L'espace RVB (voir figure III.2.2) est, par exemple, utilisé dans le domaine de l'informatique et du multimédia tandis que l'espace CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black), le complémentaire de l'espace RGB, est utilisé en imprimerie pour des raisons pratiques. L'espace de couleurs RVB demeure le plus répandu. En effet, dans cet espace, un pixel est codé par trois composantes Rouge, Vert et Bleu

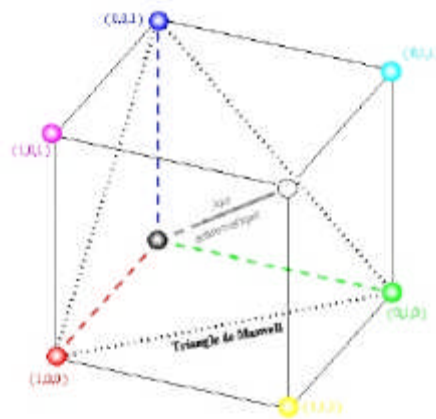


Fig. III.2.2. Cube des couleurs RVB [8]

Cet espace a été développé en fonction des connaissances liées à la vision humaine. Ce modèle est additif, ce qui signifie que toutes les couleurs sont déduites à partir du noir ($R = V = B = 0$) en ajoutant plus ou moins certaines composantes.

III.3. 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».

III.3.1. 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 (comme notre cas). 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.

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».

III.3.1.1. Les différents canaux

Toutes les 15 minutes, une scène Météosat -SEVIRI est acquise. Douze fichiers images qui correspondent aux douze canaux du satellite MSG sont enregistrés. Un canal parmi les douze a une résolution très fine d'un km (High Résolution Visible : HRV), tandis que les autres sont acquis avec une résolution de 3 Km.

a) Le canal visible

Les images visibles représentent la quantité de lumière visible rétro diffusée par les nuages ou la surface de la terre. Les nuages et la neige apparaissent en blanc et les zones sans nuages en noir. Les nuages épais sont plus brillants que les nuages fins. Il est difficile de distinguer les nuages bas des nuages élevés. Pour cela, il faut utiliser les images infrarouges. Les images visibles sont complètement noires pendant la nuit, et ne peuvent ainsi être utilisées. L'énergie de radiation (S) émise par le Soleil est très intense pour une gamme de longueur d'onde comprise entre 0,4 μm et 0,7 μm (C'est la lumière

visible que perçoit l'œil humain) et maximale pour une valeur de longueur d'onde de 0,5 μm . (Voir figure III.3.1.1.d).

Une partie plus ou moins importante de cette énergie en provenance du soleil est absorbée par les différentes formations de la surface terrestre ou proche d'elle : il s'agit pour l'essentiel des sols, des océans et des nuages. L'autre fraction (R) est réfléchie ou diffusée en direction de l'espace. Le rapport de ces énergies S/R constitue l'albédo de cette surface (nous reviendrons plus tard sur la notion d'albédo). C'est elle que le satellite Météosat capte au moyen de son détecteur sensible aux énergies de radiation comprises entre 0,4 μm et 0,9 μm .

b) Le canal infrarouge

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

La surface terrestre après avoir absorbé une fraction de l'énergie incidente rayonne à son tour restituant ainsi une partie de l'énergie emmagasinée. A la température de la terre (moyenne 15°C), ce rayonnement se fait dans une gamme de longueurs d'ondes comprise entre 3 et 50 μm avec un maximum pour 10 μm . Ces longueurs d'onde appartiennent au domaine des infrarouges IR.

Une majeure partie de ces radiations émises par la terre est absorbée par la vapeur d'eau et certains gaz (CO₂, N₂O, O₃, O₂) présents dans l'atmosphère, piègent ainsi cette énergie (effet de serre).

Cependant cette absorption atmosphérique est inégale selon les radiations émises par la terre. Les infrarouges de longueur d'onde comprise entre 8,5 μm et 13 μm traversent bien l'atmosphère. Ce sont eux, entre autres, que le satellite Météosat capte au moyen de son détecteur IR sensible aux énergies radiatives dans cette plage de longueurs d'onde.

L'émission est fonction de la température et de la nature du corps émetteur. La couverture nuageuse, selon sa nature (glace, vapeur) et son épaisseur laissera passer plus ou moins ces rayons IR.

c) Les canaux vapeur d'eau

Les images «vapeur d'eau» représentent une mesure du rayonnement infrarouge influencée par la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Cela permet de déterminer les zones sèches et les zones humides.

Les infrarouges de longueur d'onde comprise entre $5\mu\text{m}$ et $7,5\mu\text{m}$ sont particulièrement absorbés quand l'atmosphère est riche en vapeur d'eau. Ce sont eux que le satellite Météosat capte au moyen de son détecteur WV (Water Vapeur) sensible aux énergies radiatives comprises entre $5,5$ et $7,5\mu\text{m}$.

Lorsque l'atmosphère est pauvre en vapeur d'eau, ces rayons infrarouges la traversent et parviennent au capteur WV de Météosat Seconde Génération. Au contraire plus l'atmosphère est chargée de vapeur d'eau moins ils la traversent.

d) Apport du canal HRV

Il est clair que le canal Visible à Haute Résolution HRV, représente une technologie très poussée, avec un intervalle d'échantillonnage amélioré de 1 Km.

En comparant les différents canaux (visible et infrarouge), (voir figure III.4.1.1.a), on constate une nette distinction entre la neige et les nuages. Cela pourra nous être très utile pour la détection automatique et la distinction entre les phénomènes dans une image MSG.

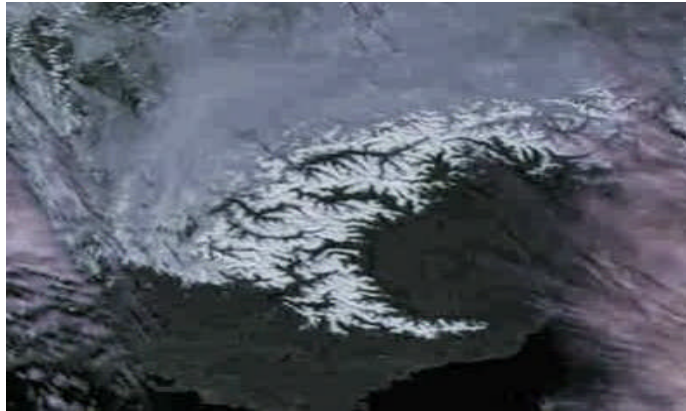


Fig. III.3.1.1.d. Image de MSG-1 du canal HRV [8]

III.3.1.2. L'albédo

Quand les rayons parviennent à la terre une partie de l'énergie qu'ils transportent est déviée par les différentes couches de l'atmosphère. Cependant l'autre partie arrive à la traverser. Celle-ci est alors réfléchiée par les nuages ou par le sol. Ce qu'on nomme albédo est le rapport entre l'énergie réfléchiée et l'énergie incidente. Ce rapport est fonction de la cible réfléchissante. Ainsi, l'albédo de la neige (0.85) n'est pas le même que celui d'une prairie (0.20). En moyenne, l'albédo de la terre est de 0.3 ce qui signifie que 70% de l'énergie que nous recevons est absorbée (30% est réfléchiée).

Toute surface absorbe une partie du rayonnement incident pour n'en réfléchir qu'une partie. Elle n'absorbe que les longueurs d'onde qu'elle ne possède pas. De plus, un rayonnement solaire se compose de plusieurs longueurs d'onde (lumière polychromatique). On peut donc émettre l'hypothèse qu'il suffit de collecter les différentes longueurs d'ondes réfléchies pour pouvoir déterminer, sur une zone donnée, la nature de l'élément réfléchissant.

III.3.2. La composition colorée

Dans le cas où on associe chacune des couleurs fondamentales (rouge, vert, bleu) à un canal de la même image, il est possible de visualiser plusieurs canaux simultanément. Cette opération s'intitule: «composition colorée». L'utilisation de la

couleur ne provoque pas dans ce cas une transformation des valeurs des pixels. L'interprétation des couleurs est donc possible.

Le résultat de la superposition des trois canaux et donc de la combinaison des niveaux d'intensité des trois couleurs fondamentales donnera une image en « vrais » ou en « fausse » couleur, selon que la couleur fondamentale associée à chaque canal correspond, ou non, à la zone du spectre couvert par ce canal. Dans le cas d'une correspondance parfaite entre les couleurs fondamentales et les canaux correspondants, on obtient une composition colorée en vraie couleur, permettant de localiser chaque phénomènes avec sa couleur tel quel apparaît dans la nature (similitude avec une photo).

a) La dynamique

La dynamique d'une image est l'étendue de la plage de couleurs utilisable. Elle est liée à la longueur du codage de chaque couleur :

- Si une couleur est représentée par un seul bit, on aura deux valeurs possibles, 0 ou 1, c'est-à-dire blanc ou noir. L'image est dite de type bitmap.
- Si une couleur est représentée sur un octet (8 bits), on aura $2^8 = 256$ couleurs possibles. C'est le cas des images dites en "fausses couleurs" ou "à palette" (format GIF par exemple) et des images en "niveaux de gris".
- Enfin, on parle de "vraies couleurs" lorsqu'on utilise un octet pour stocker chacune des composante dans l'espace de représentation des couleurs (Rouge - Vert - Bleu) on aura $2^8 * 2^8 * 2^8 = 16$ millions de couleurs possibles, mais chaque point sera codé sur 3 octets.
- La dynamique dans notre cas traduit l'étendue ou la plage de valeurs réelles parmi les 1024, qu'il faut prendre pour faire la correspondance avec celles de la couleur (ou du niveau de gris) qui est en général de 256.

III.3.3. Prétraitements

Les satellites d'EUMETSAT transmettent leurs images et données à la station de réception au sol (Centre de contrôle de Darmstadt.) ou les données seront traitées pour éliminer le bruit et faire la correction géométrique et le géo-référencement. Elles sont, ensuite retransmises aux usagers, essentiellement via le système de diffusion développé spécifiquement par EUMETSAT.

III.3.4. Analyse d'images

Le traitement d'image est né de l'idée et de la nécessité de remplacer l'observateur humain par la machine. L'image ou les signaux provenant des capteurs ont alors été codés et mémorisés sur différents supports (, la vision intervenant dans un grand nombre d'activités humaines) à revoir ce morceau de phrase car il n'a aucun sens. Le champ des applications du traitement d'images est très vaste.

Une image est composée de pixels (répartis sous forme de tableau). On attribut a chaque pixel codé sur n bits un niveau de gris (entre 0 et 255 niveaux). S'il s'agit d'une image couleur, chaque pixel a trois composantes : une composante rouge, une composante verte et une composante bleue.

A partir de ces trois composantes, il est possible de représenter plus ou moins bien la quasi-totalité du spectre visible.

Dans le cadre de ce projet, les radiances (informations de départ) des canaux sont des comptes numériques de 10 bits (1024 valeurs), alors que les images de sortie seront en couleurs et chaque niveau de gris sera codé sur un octet soit huit bits. Les valeurs de niveaux de gris varieront donc de 0 à $2^8 - 1 = 255$. Si l'image traitée est en «noir & blanc», les composantes rouges, vertes et bleues auront la même valeur pour un pixel donné.

III.4. Produits de canaux de SEVIRI

III.4.1. Exemple de produits de canaux SEVIRI (Image RVB)

III.4.1.1 Détection des nuages bas

La composition des canaux 3, 2, 1 respectivement en R, V, B permet de détecter la neige, entre autres.

Les nuages bas présentent un impact négatif pour l'aéronautique. Le satellite ne peut pas distinguer entre le cumulus, le stratus et le stratocumulus. Ils sont tous identifiés comme des nuages bas constitués de gouttelettes d'eau.

Les nuages bas peuvent réduire la visibilité jusqu'au point où un pilote ne peut pas voir les marques au sol ou les feux qui délimitent la piste ou qui balisent son axe. Statistiquement ce facteur a causé 279 accidents à l'approche et à l'atterrissage entre 1980-1996.

La détection des nuages bas se fait par les différentes combines suivantes : (C3, C2, C1), (C2, C4, C9), (C2, C3, C4), et (C10-C9, C9-C4, C9) nommées RVB-1, RVB-2, etc., respectivement.

L'image suivante présente un exemple de cette composition RVB-1 (R : C3, V : C2, B : C1).

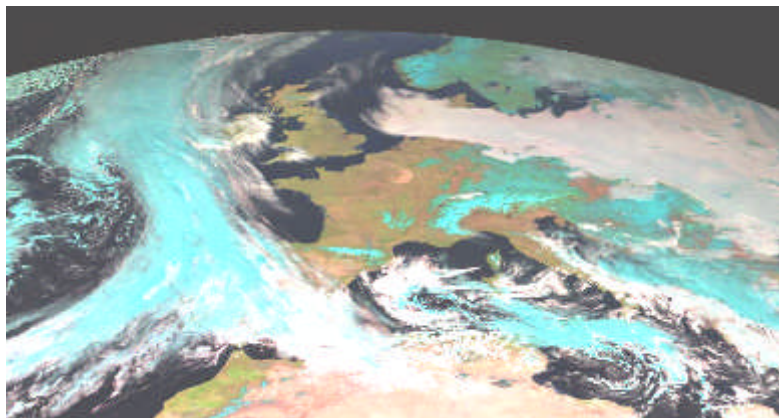


Fig. III.4.1.1. RVB-1, 18 Février 2003, 13:00 TU [8]

III.4.1.2. Le couvert végétal (la verdure)

La verdure n'est pas un phénomène météorologique. Par contre elle présente un indice majeur pour l'agriculture.



Fig. III.4.1.2. RVB-1 (3, 2, 1) JUIN 2003, 15:00 TU [8]

III.4.1.3. Détection des cyclones

Chaque année, plusieurs dizaines de cyclones se forment au dessus des océans dans les zones intertropicales. Chaque annonce de cyclone laisse prévoir de nombreux dommages et souvent de nombreuses victimes.

Avant la deuxième guerre mondiale, les informations sur les cyclones étaient transmises par les bateaux pris dans la tempête. Aujourd'hui, les stations météorologiques parviennent à détecter la formation d'un cyclone au dessus de l'océan. Par contre, il est plus difficile de prévoir sa direction.

L'arrivée des images RVB permet actuellement de tracer le chemin d'un cyclone avec une marge d'erreurs, la solution reste de suivre le cyclone instantanément.

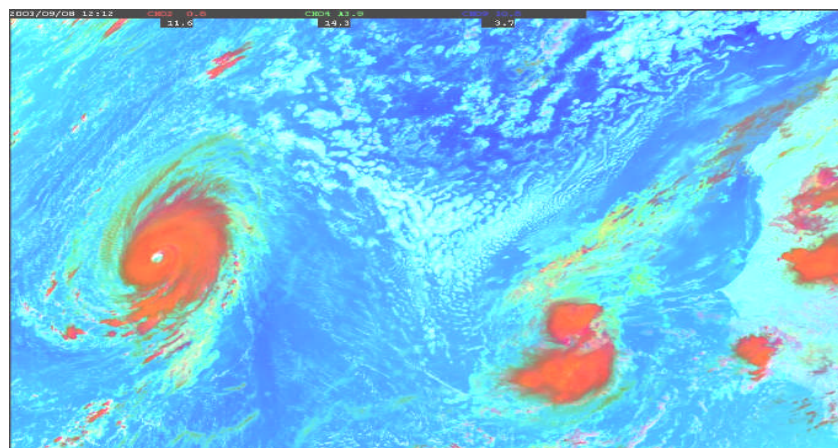


Fig. III.4.1.3. Le 8 Septembre 2003, 12:00 UTC RVB-2 [8]

III.4.2. Produit d'EUMETSAT

III.4.2.1. Produits de MPEF

MPEF : Le centre d'extraction de produits météorologiques d'EUMETSAT.

Beaucoup de canaux de SEVIRI peuvent certes être utilisés pour prendre des images aux fins d'interprétation purement visuelle, mais leur utilisation ultime est surtout l'extraction de produits à partir des données de plusieurs d'entre eux. De nombreux produits spécialisés sont élaborés par les SAF, décrits par la suite, ou sont extraits chez des utilisateurs, grâce à un logiciel réalisé localement ou par un SAF. Outre ces produits, une gamme complète est fournie par le Centre d'extraction de produits météorologiques de MSG (MPEF) situé au siège d'EUMETSAT à Darmstadt, en Allemagne.

D'une façon générale, les produits extraits par EUMETSAT sont des produits clés. Leur traitement, dont le schéma est stabilisé, implique un minimum d'intervention humaine. Ils sont nécessaires dans tout le champ d'observation de MSG. Sur cette base, le MPEF restitue un ensemble de produits météorologiques bien établis, à un niveau intégralement opérationnel. Le paragraphe suivant récapitule les produits clés du MPEF de MSG, qui étaient, pour la plupart, déjà extraits à un niveau opérationnel au cours de l'année qui a suivi le démarrage de son exploitation opérationnelle.

III.4.2.1.1. Analyse des scènes et des nuages

La première étape du traitement par le MPEF est une analyse automatique, en très léger différé, de chacune des images d'une zone, dès qu'elle est disponible à partir du Centre de traitement d'images (IMPF). Cette analyse utilise des techniques d'imposition de seuil multispectral pour affecter chaque pixel de l'image à une classe spécifique (par exemple: mer, sol (type), nuage) et pour affecter chaque pixel défini comme un nuage à un type de nuage (nuage bas, à moyenne altitude, à altitude élevée).

Ce processus donne lieu à des calculs fondés sur des modèles de transfert radiatif spécifiques au lieu et à la situation météorologique, utilisant des données d'entrée fournies par le Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMET) pour définir la contribution atmosphérique.

Les résultats de l'analyse des scènes, qui sont obtenus pour chaque pixel et pour chaque cycle de prise d'images de 15 minutes, comprennent:

- des masques de nuages, définissant les zones nuageuses et dégagées de l'image;
- la détermination du type de scène pour chacun de ces pixels.

Pour tirer parti du cycle de prise d'images de 15 minutes, les résultats relatifs à l'image précédente sont utilisés comme ébauche de l'image en cours. Cette analyse complète de chaque image constitue la base du traitement ultérieur nécessaire pour élaborer les produits du MPEF.

Vingt-quatre heures sur vingt-quatre, ce traitement est effectué en léger différé, avec un cycle de 15 minutes, les produits étant diffusés sur le Système mondial de télécommunications (SMT) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et par EUMETSAT, le service de diffusion d'EUMETSAT.

III.4.2.1.2. Sélection de produits du MPEF d'EUMETSAT

a) AMV : Vecteurs mouvement de l'atmosphère

Les vecteurs mouvements de l'atmosphère constituent le produit le plus important pour la prévision numérique. Ils fournissent des informations sur la dynamique atmosphérique qui ne sont pas disponibles à partir d'autres sources. Les traceurs comprennent les nuages dans les canaux dans l'infrarouge, le visible et à haute résolution dans le visible, les configurations de la vapeur d'eau dans les canaux WV et les configurations (expérimentales) de l'ozone du canal IR 9,7 μm .



Fig. III.4.2.1.2.a. AMV [19]

b) CSR : Radiances par ciel clair

Les radiances par ciel clair donnent les radiances moyennes des pixels dégagés (en $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}(\text{cm}^{-1})^{-1}$). La prévision numérique opérationnelle utilisera ce produit pour les analyses, avec les avantages résultant de l'utilisation de nouveaux schémas d'assimilation variationnelle quadridimensionnelle (4D-Var).

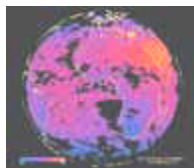


Fig. III.4.2.1.2.b. CSR [19]

c) GII : Indice d'instabilité globale

L'indice d'instabilité global est un paramètre de masse d'air donnant une indication de la stabilité de l'atmosphère. Il est calculé pour l'ensemble des images de la zone observée par MSG à une échelle d'environ 30 km.

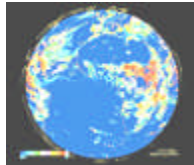


Fig. III.4.2.1.2.c. GII [19]

d) TH : Humidité troposphérique

L'humidité troposphérique, qui est tirée des données des deux canaux vapeur d'eau de MSG, indique les humidités moyennes des couches entre les altitudes géopotentielle 500 et 200 hPa d'une part, et 850 et 300 hPa d'autre part.

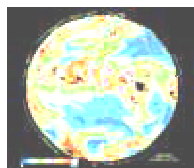


Fig. III.4.2.1.2.d. TH [19]

e) CLA : Analyse des nuages

L'analyse des nuages, qui est tirée de l'analyse des scènes, fournit directement des informations sur la couverture nuageuse, la température, la pression et la hauteur du sommet des nuages, le type et la phase des nuages. Elle renseignera aussi sur la microphysique des nuages.

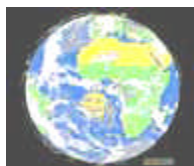


Fig. III.4.2.1.2.e. CLA [19]

f) CTH : Hauteur du sommet des nuages

La hauteur du sommet des nuages est un produit sous la forme d'images, qui indique la hauteur du nuage le plus élevé, avec la résolution d'un carré de 3 x 3 pixels. Il est utilisé en météorologie.

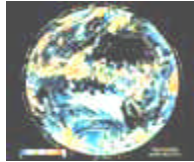


Fig. III.4.2.1.2.f. CTH [19]

g) TOZ : Ozone total

Le produit ozone total, qui utilise les données du canal dans l'infrarouge à 9,7 μm , ainsi que d'autres canaux de SEVIRI, est fondé sur un algorithme de régression. Les configurations de l'ozone peuvent être utilisées pour en tirer des informations sur les vents en altitude ou peuvent être assimilées directement dans les modèles de prévision numérique.

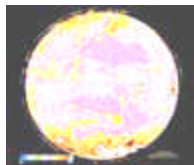


Fig. III.4.2.1.2.g. TOZ [19]

h) MPE : Estimation multi-détection des précipitations

Ce produit d'EUMETSAT utilise plusieurs sources satellitaires pour estimer le taux de précipitation en mm/heure, toutes les 3 heures. L'exemple est un produit apparenté, l'eau précipitable.

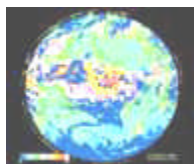


Fig. III.4.2.1.2.h. MPE [19]

III.4.2.2. Produits des SAF

III.4.2.2.1. Généralité

Les SAF, des centres d'excellence spécialisés qui font appel aux compétences de spécialistes des États membres, sont responsables du traitement des données satellitaires et forment partie intégrante du segment sol décentralisé des applications d'EUMETSAT.

Chacun des SAF est réalisé en collaboration par un consortium d'organismes (entités gouvernementales des États membres et coopérants, instituts de recherche), sous l'égide du service météorologique national d'un État membre. Les produits de leur recherche, ainsi que les données et services qu'ils fournissent complètent l'éventail des produits météorologiques de base élaborés au Siège d'EUMETSAT, à Darmstadt, en Allemagne.

EUMETSAT gère et coordonne l'ensemble des activités du réseau SAF et les interfaces entre les différents SAF, mais aussi entre les SAF et d'autres systèmes d'EUMETSAT. En outre elle supervise leur intégration dans l'infrastructure sol et leur prise en compte dans les services de son segment sol des applications. Cette centralisation permet d'offrir des services extrêmement fiables au meilleur coût.

Les SAF ont recours aux données des satellites météorologiques en orbites géostationnaire et polaire. Il existe huit SAF:

- Le SAF Prévision immédiate et à très court terme
- Le SAF Océans et Glaces de Mer
- Le SAF Surveillance du climat
- Le SAF Prévision numérique du temps
- Le SAF Analyse des terres émergées
- Le SAF Ozone, consacré à la Surveillance de l'ozone et de la chimie de l'atmosphère
- Le SAF GRAS, consacré à la météorologie à partir des données du récepteur GNSS (système mondial de navigation par satellite) de sondage atmosphérique
- Le SAF Hydrologie opérationnelle et gestion de l'eau

III.4.2.2.2. Exemples des domaines des SAF

Exemples des domaines où les SAF [EUMETSAT] s'avèrent d'une grande utilité:

- la prévision à court terme de phénomènes dangereux, et donc
- l'alerte précoce des services compétents,
- l'aviation, l'agriculture, le bâtiment, les industries du gaz, de l'eau et de l'électricité,
- la recherche des causes et effets de la pollution dans les hautes couches de l'atmosphère et de l'appauvrissement de la couche d'ozone,
- la surveillance du climat,
- l'occupation des sols, l'écologie, la surveillance des catastrophes et les prévisions agricoles,
- les transports maritimes, la pêche et l'industrie offshore,
- la prévision numérique du temps, avec la mise à disposition de progiciels destinés à des applications opérationnelles,
- les progiciels et produits offline ou en très léger différé.

a) NWC : Prévision immédiate et à très court terme

Ce centre est hébergé par l'INM à Madrid. Les produits types de ce centre en rapport avec MSG, sont :

Progiciels permettant aux utilisateurs d'extraire les catégories de produits suivantes:

- paramètres relatifs aux nuages: masque et quantité, type, température et hauteur du sommet ;
- précipitations: taux de précipitations des systèmes convectifs, nuages précipitant
- masse d'air: stabilité, eau précipitable totale et par couche, analyse ;
- vents: vecteurs vent à haute résolution ;
- orages: orages à développement rapide ;
- interprétation automatique des images satellitaires.



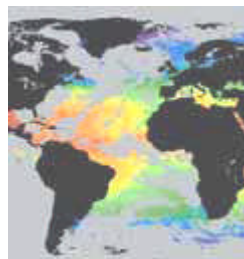
III.4.2.2.2.a. NWC [19]

b) OSI : Océans et Glaces de Mer

Ce centre est hébergé par Météo-France à Lannion. Les produits types de ce centre en rapport avec MSG, sont :

Analyses relatives à l'Atlantique, toutes les 3 heures, des produits suivants:

- températures de surface de la mer ;
- flux radiatifs des océans ;
- étendue des glaces de mer et propriétés.



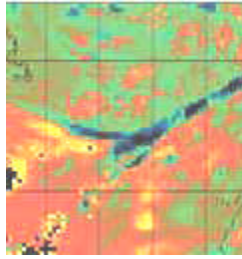
III.4.2.2.2.b. OSI [19]

c) NWP : Prévision numérique du temps

Ce centre est hébergé par le Met Office à Exeter. Les produits types de ce centre en rapport avec MSG, sont :

Axé sur les processus, les algorithmes et les logiciels, plutôt que sur les produits, par exemple:

- modèles de transfert radiatif ;
- logiciels et techniques permettant d'améliorer l'assimilation des observations satellitaires par les modèles de prévision numérique ;
- surveillance de la qualité des observations spatiales.



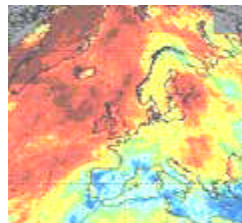
III.4.2.2.2.c. NWP [19]

d) CM : Surveillance du climat

Ce centre est hébergé par l'INM e DWD à Offenbach. Les produits types de ce centre en rapport avec MSG, sont :

Élaboration d'ensembles de données à long terme, telles que les ensembles suivants:

- paramètres de nuages (couvert, type, hauteur, etc.) ;
- composants du bilan radiatif à la surface ;
- composants du bilan radiatif à la surface au sommet de l'atmosphère ;
- produits "humidité composite".



III.4.2.2.2.d. CM [19]

e) LSA : Analyses des terres émergées

Ce centre est hébergé par l'IM à Lisbonne. Les produits types de ce centre en rapport avec MSG, sont :

Produits fondés sur les données de MSG, tels que les produits suivants:

- albédo et émissivité de surface ;
- flux de surface ondes courtes et ondes longues ;
- températures de la surface du sol ;
- humidité du sol et taux d'évapotranspiration ;
- enneigement ;
- indice de végétation et produits correspondants.



III.4.2.2.2.e. LSA [19]

III.5. Discussion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des études menées sur la détection des phénomènes météorologiques. Diverses techniques de télédétection satellitaire sont utilisées pour mesurer ou détecter les hydrométéores. Par contre, très peu d'études utilisent les techniques de reconnaissance automatique de phénomènes présents sur les images satellitaires. Les compositions colorées (RGB) sont un grand atout pour réaliser cette interprétation automatique ; combinées avec des méthodes de traitement d'images nous pouvons détecter l'hydrométéore, le confirmer et en fin le présenter tout seul sur une carte.

Chapitre IV : Applications et Résultats

IV.1. Préambule

Beaucoup de canaux de SEVIRI peuvent certes être utilisés pour prendre des images aux fins d'interprétation purement visuelle, mais leur utilisation ultime est surtout l'extraction de produits à partir des données de plusieurs d'entre eux.

Afin d'exploiter l'imagerie satellitaire, nous avons combiné différents canaux du radiomètre imageur SEVIRI dans le but d'avoir une image permettant d'extraire les différents produits météorologique (ex : mettre en évidence des différentes couches de nuages).

Les images utilisées dans ce chapitre, sont prises le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC par le radiomètre imageur de SEVIRI de du satellite européen d'EUMETSAT MSG-2. Ces images sont apportées (dans leurs formats bruts) de l'Office Nationale de Météorologie (ONM), par le biais de Monsieur NAILI, le Directeur du Département de Climatologie de l'ONM.

La région d'étude à laquelle nous avons consacré le travail dans la partie IV.3 de ce chapitre est la région d'Algérie avec la région d'Europe.

IV.2. Images composites à partir de deux canaux SEVIRI

IV.2.1. Image composite RVB VIS 0.6, NIR 1.6

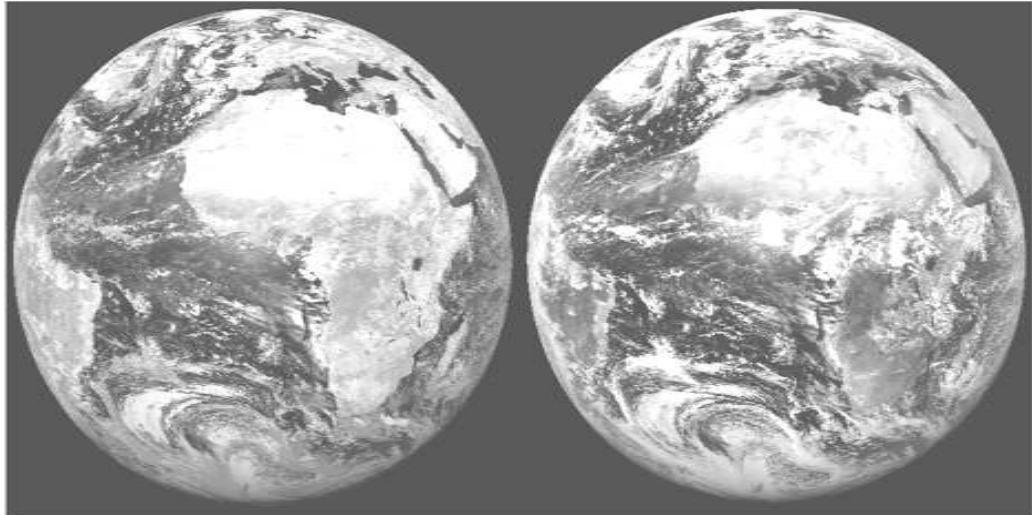


Fig. VI.2.1.1. Images des deux canaux ondes courtes de SEVIRI sont principalement sensibles au rayonnement solaire réfléchi par les nuages et la surface, prises le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC par MSG-2. Ce sont, de gauche à droite, les canaux VIS 0.6 (C1), NIR 1.6.

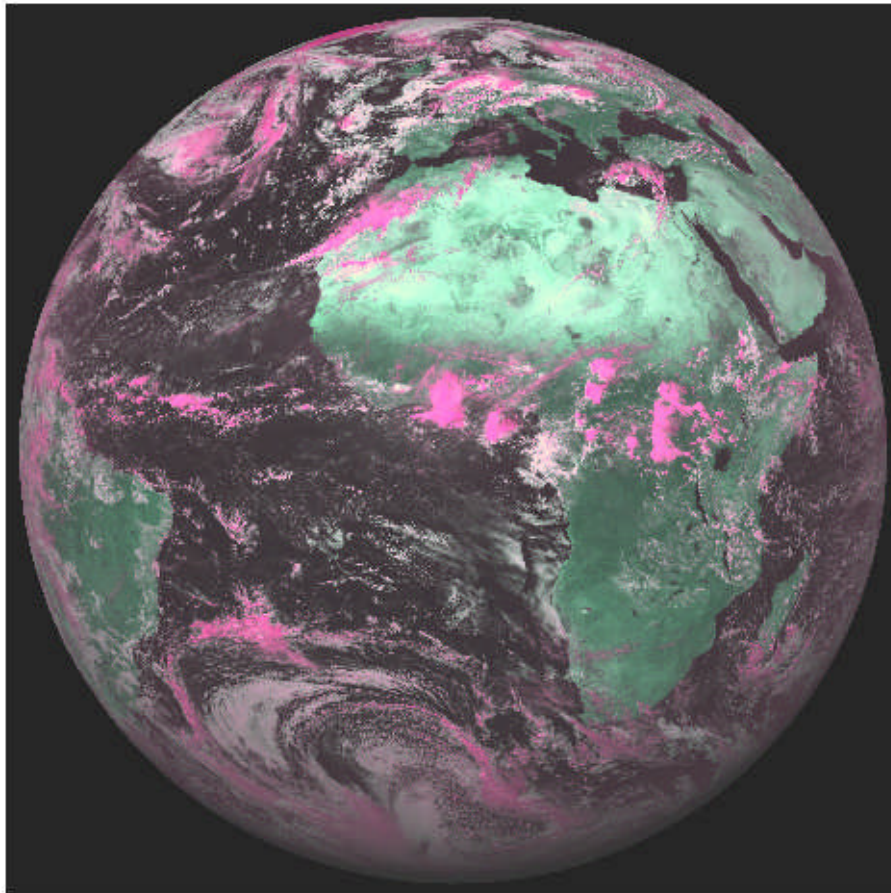


Fig. VI.2.1.2. Image composite RVB VIS 0.6 (C1), NIR 1.6 (C3), $(C1 + C3)/2$ construite à partir des canaux d'ondes courtes de SEVIRI.

➤ **Interprétation 1**

Image composite RVB construite à partir des canaux d'ondes courtes permet de mettre en évidence les différentes couches de nuages.

IV.2.2. Image composite RVB VIS 0.8, IR 3.9

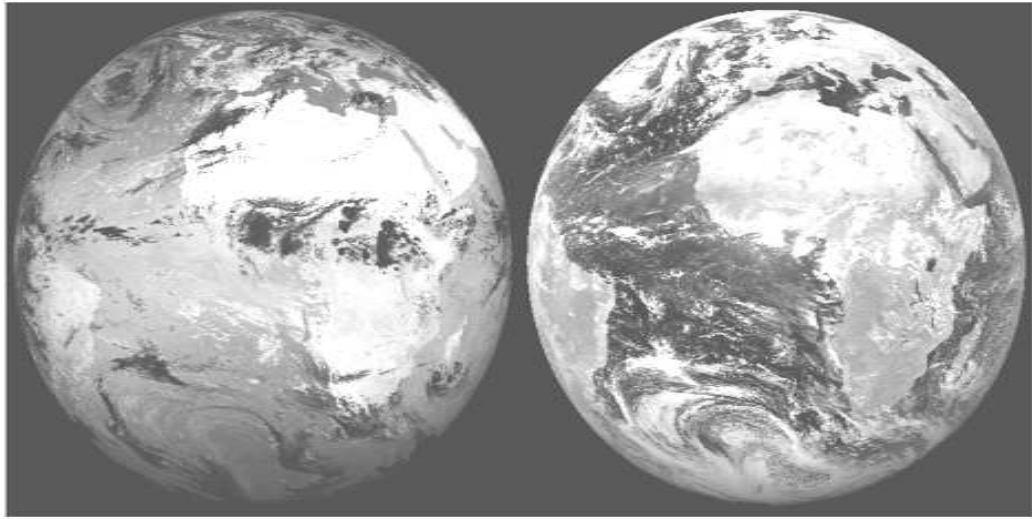


Fig. VI.2.2.1. Images des deux canaux ondes courtes de SEVIRI sont principalement sensibles au rayonnement solaire réfléchi par les nuages et la surface, prises le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC par MSG-2. Ce sont, de gauche à droite, les canaux VIS 0.8 (C1), IR 3.9 (C4). C4 est un cas particulier, car il sert aussi à détecter le rayonnement thermique émis la nuit.

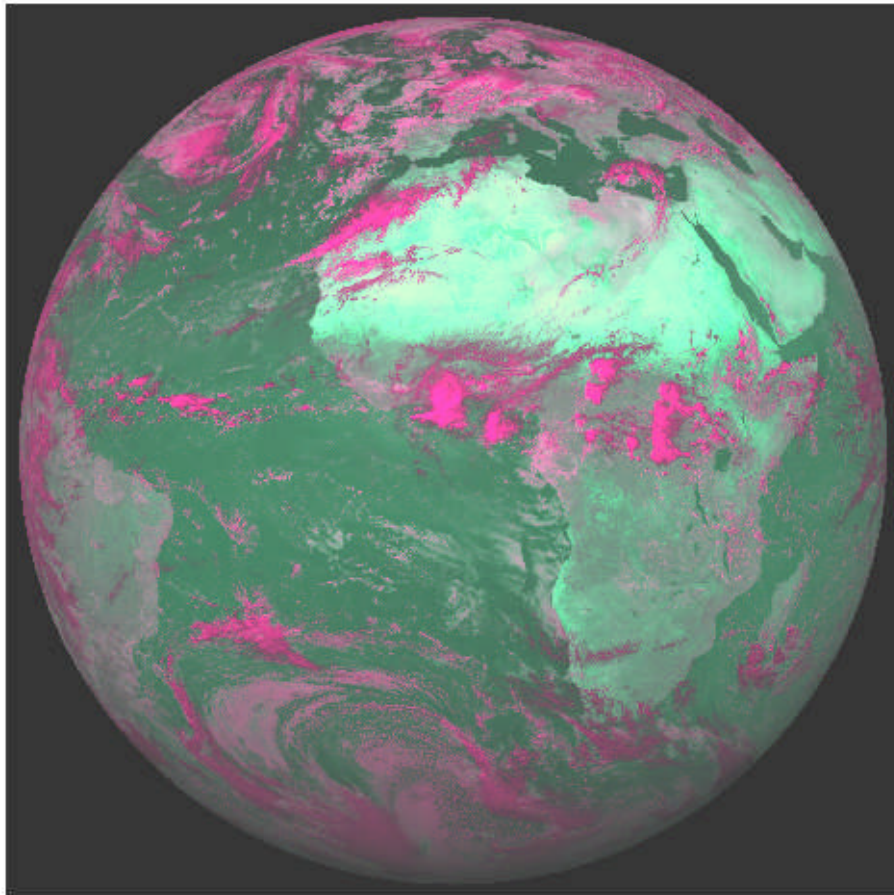


Fig. VI.2.2.2. Image composite RVB VIS 0.8 (C2), IR 3.9 (C4), $(C2+C4)/2$.

➤ **Interprétation 2**

Image composite RVB construite à partir de trois canaux ondes courtes de SEVIRI, permettant de mettre en évidence les différentes couches de nuages.

IV.3. Images composites à partir de Trois canaux de SEVIRI

IV.3.1. Image composite RVB VIS 0.6, NIR 1.6, IR 3.9



Fig. VI.3.1.1. Les Trois canaux ondes courtes de SEVIRI sont principalement sensibles au rayonnement solaire réfléchi par les nuages et la surface. Ce sont, de gauche à droite, les canaux VIS 0.6 (C1), NIR 1.6 (C3) et IR 3.9 (C4). C4 est un cas particulier, car il sert aussi à détecter le rayonnement thermique émis la nuit.

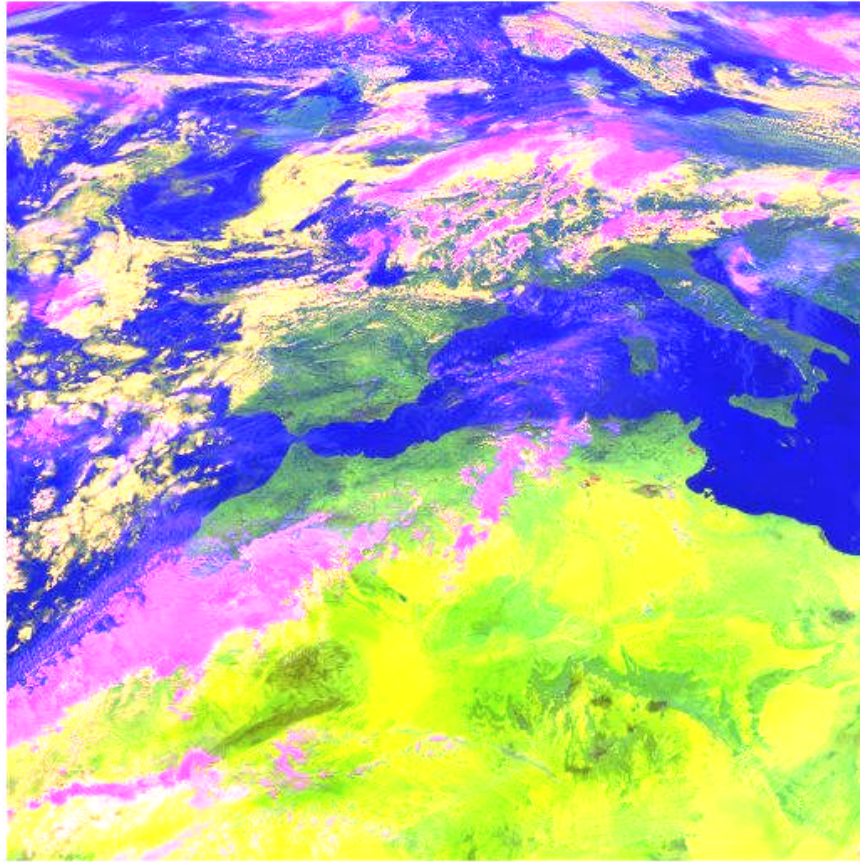


Fig. VI.3.1.2. Image composite RVB VIS 0.6, NIR 1.6, IR 3.9

➤ **Interprétation 3**

Image composite RVB VIS 0.6, NIR 1.6, IR 3.9 couleur construite à partir de trois canaux ondes courtes de SEVIRI, permettant de mettre en évidence des différentes couches de nuages. La principale application de la RVB Snow est la détection de brouillard / nuages bas et la neige pendant la journée. Dans ce jeu de couleurs de la neige apparaît en rouge en raison de la forte absorption dans la NIR1.6 et canaux IR3.9 (pas de vert et bleu), tandis que le brouillard / nuages bas apparaissent blanchâtres. Petit nuage de glace de particules est en orange, tandis que les grandes particules de glace nuage apparaît avec une plus grande composante rouge. Neige sur le terrain semble que le rouge complet, parce que ses grains sont généralement beaucoup plus grand que les particules de glace des nuages.

IV.3.2. Image composite RVB NIR 1.6, VIS 0.8, VIS 0.6



Fig. VI.3.1.1. Les Trois canaux ondes courtes de SEVIRI sont principalement sensibles au rayonnement solaire réfléchi par les nuages et la surface. Ce sont, de gauche à droite, les canaux NIR 1.6 (C3), VIS 0.8, VIS 0.6 (C1).

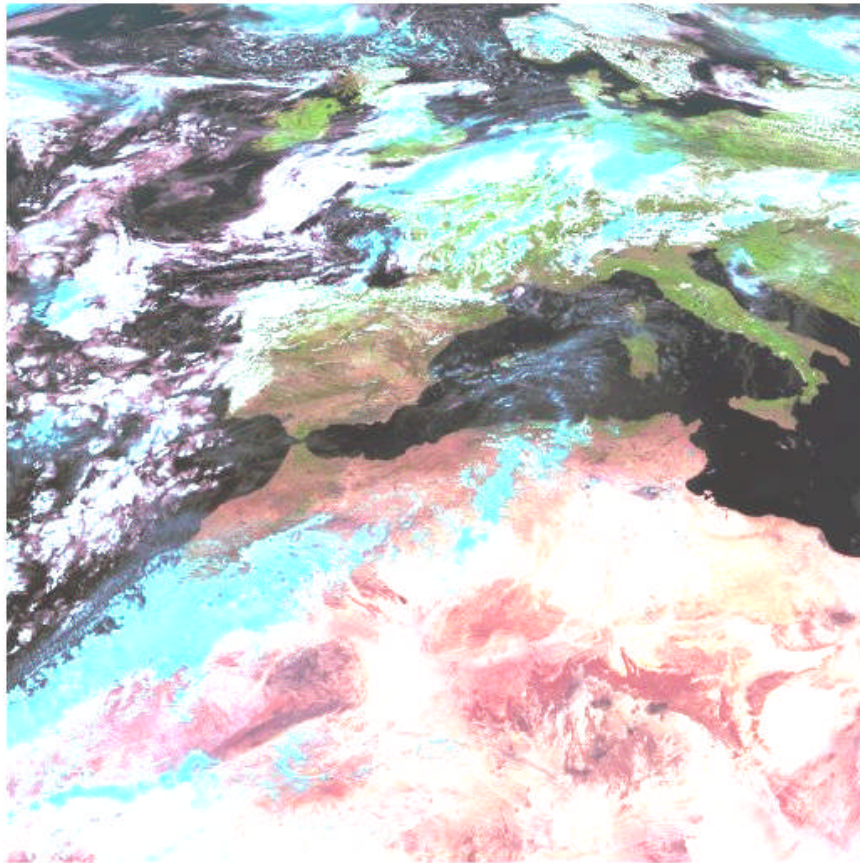


Fig. IV.3.2.1. Image composite RVB des canaux de l'énergie solaire : NIR 1.6 (C3), VIS 0.8 (C2) et VIS 0.6 (C1).

➤ Interprétation 4

Image composite RVB des canaux de l'énergie solaire : NIR 1.6 (C3), VIS 0.8 (C2) et VIS 0.6 (C1), auxquels sont respectivement affectés le rouge, le vert et le bleu. Les images composites de ce genre permettent de faire ressortir des types spécifiques et des détails de nuages. Dans ce jeu de couleurs de la végétation apparaît verdâtre en raison de sa grande réflectance dans le canal VIS0.8 (le faisceau vert) par rapport à la NIR1.6 (rouge) et VIS0.6 (faisceau bleu) canaux. Les nuages d'eau avec de petites gouttelettes ont réflectance grande à tous les trois canaux et donc aspect blanchâtre, tandis que la neige et les nuages de glace apparaissent cyan parce que la glace absorbe fortement dans NIR1.6 (pas de rouge). Le sol nu apparaît brun en raison de la plus grande réflexion dans la NIR1.6 qu'à VIS0.6, et La mer apparaît en noir en raison de la faible réflectance dans les trois canaux.

IV.3.3. Image composite RVB VIS 0.6, NIR 1.6, IR 10.8

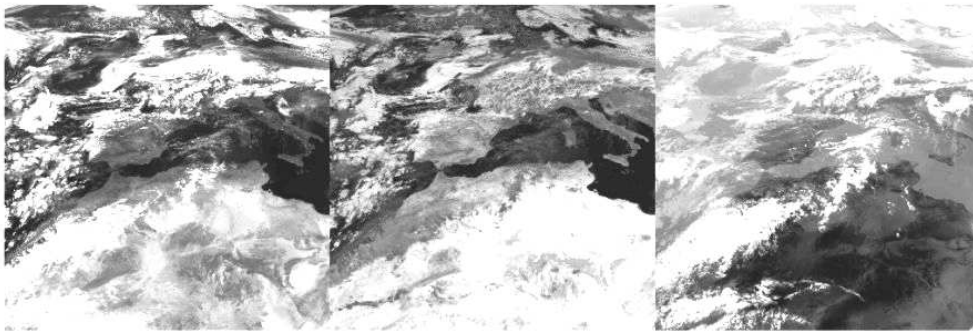


Fig. VI.3.3.1. Les Trois canaux de SEVIRI VIS 0.6, NIR 1.6, IR 10.8. Ce sont, de gauche à droite, les canaux VIS 0.6, NIR 1.6, IR 10.8.

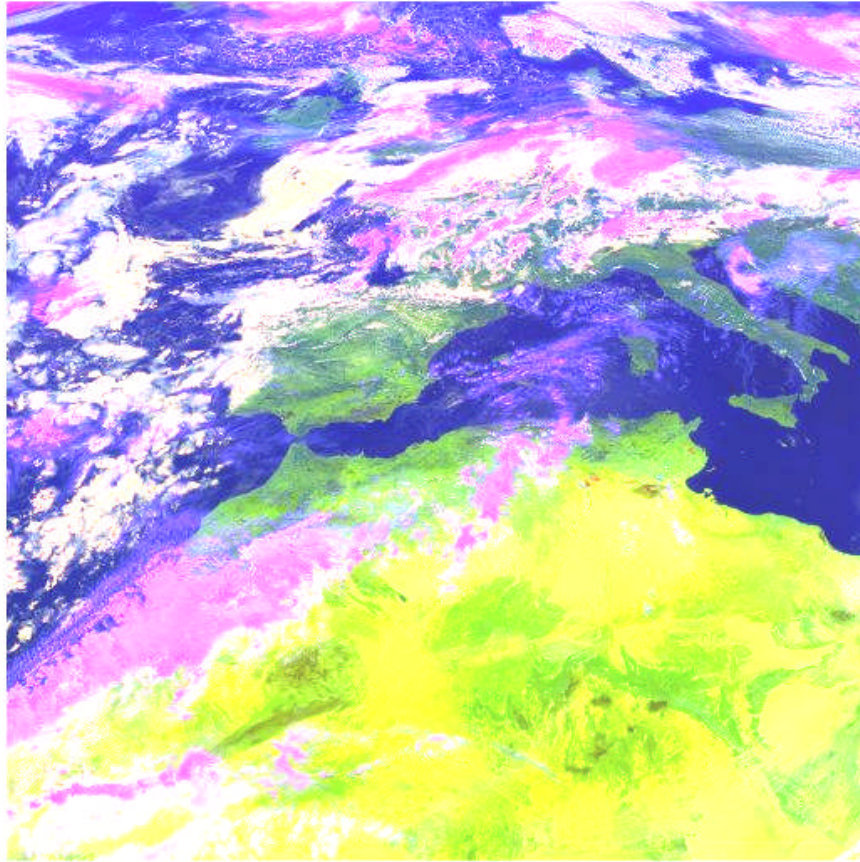
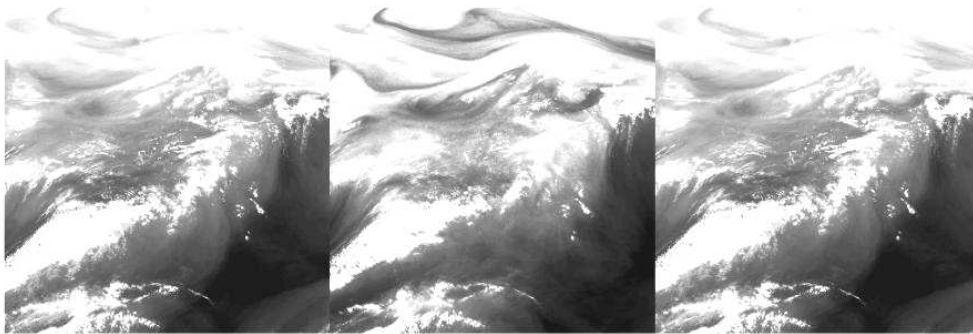


Fig. IV.3.3.2. Image composite RVB VIS 0.6, NIR 1.6, IR 10.8

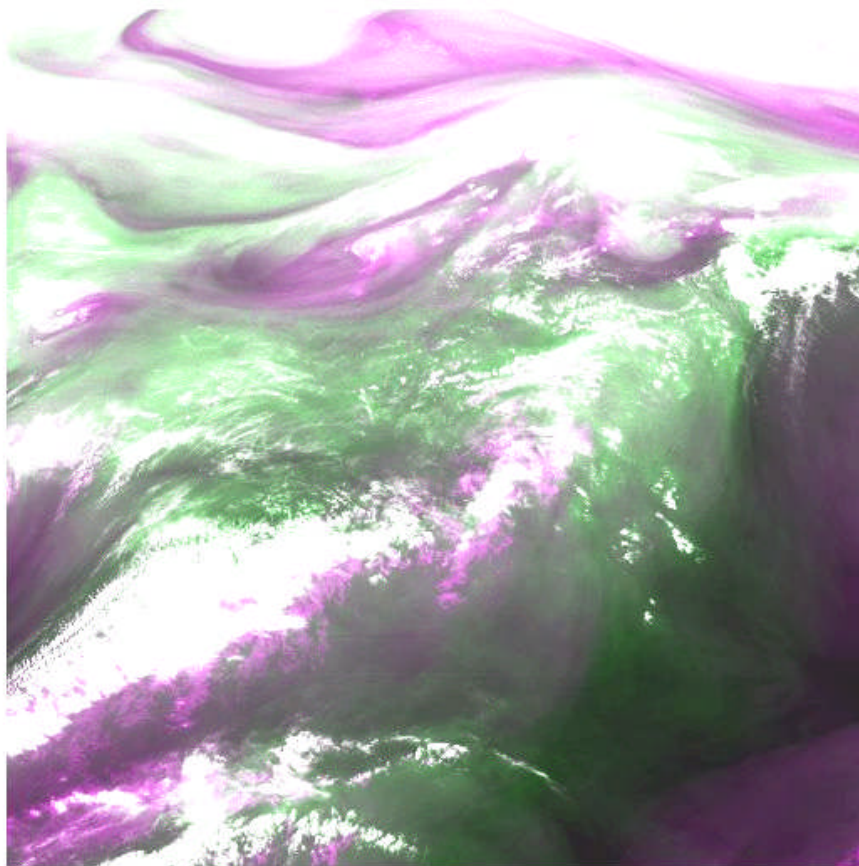
➤ **Interprétation 5**

Image composite RVB VIS 0.6, NIR 1.6, IR 10.8 prise le 26 Mai 2010 à 12:15 UTC, où le rouge, le vert et le bleu sont respectivement affectés aux canaux VIS 0.6 (C1), NIR 1.6 (C3) et IR 10.8 (C9) de SEVIRI. Les images de ce type servent à mettre en évidence des caractéristiques spécifiques des nuages.

IV.3.4. Image composite RVB WV 7.3, WV 6.2, WV 7.3



IV.3.4.1. Images des deux canaux vapeur d'eau de SEVIRI WV 6.2 (C5) et WV 7.3 (C6), représentant l'humidité troposphérique dans deux couches d'altitude différentes.

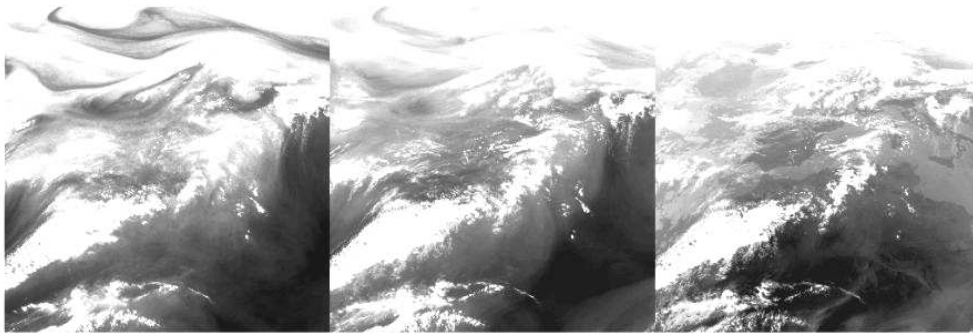


IV.3.4.2. Image composite RVB WV 7.3, WV 6.2, WV 7.3

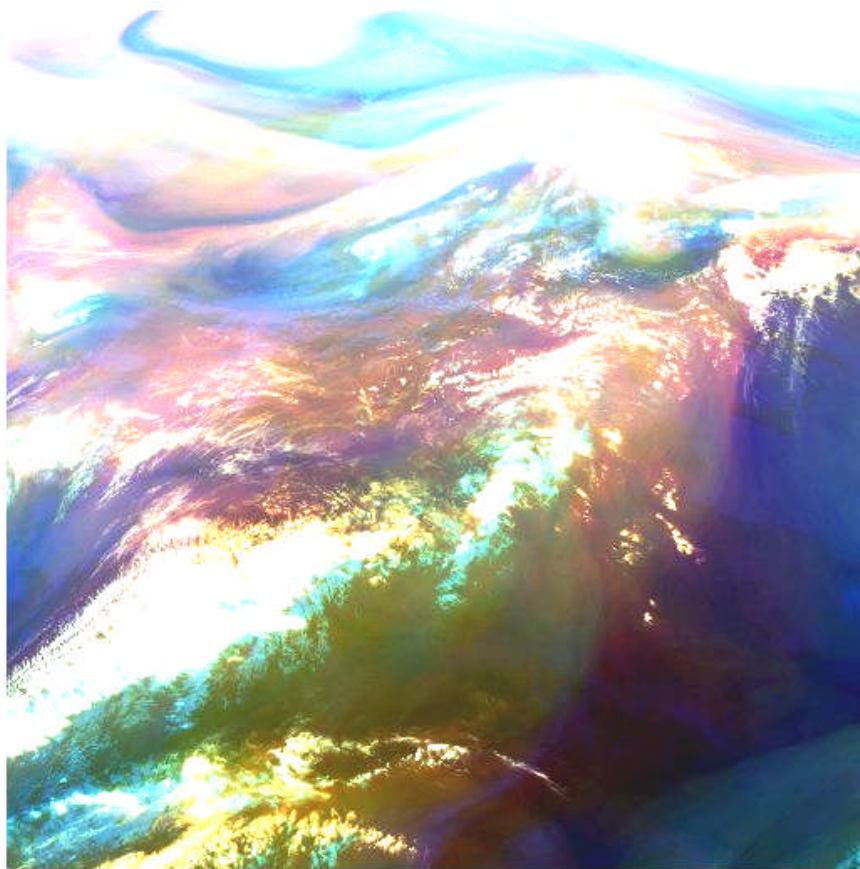
➤ Interprétation 6

Image composite RVB WV 7.3, WV 6.2, WV 7.3. L'absence d'humidité correspond à des nuances vertes en haute altitude et mauves aux basses altitudes.

IV.3.5. Image composite RVB WV 6.2, WV 7.3 et IR 9.7



IV.3.5.1. Images de trois canaux prises le 26 Mai 2010 UTC, deux canaux de vapeur d'eau de SEVIRI WV 6.2 (C5) et WV 7.3 (C6), représentant l'humidité troposphérique dans deux couches d'altitude différentes, et le canal IR 9.7 (C8).



IV.3.5.2. Image composite RVB WV6.2, WV7.3 et IR9.7.

➤ **Interprétation 7**

Masses d'air est une image composite RVB basée sur des données de l'infrarouge et les canaux vapeur d'eau de Météosat Seconde Génération. Il est conçu et mis au point pour suivre l'évolution des cyclones, en cyclogenèse rapide notamment, des stries jet et PV (tourbillon potentiel) des anomalies. En raison de la constitution de la vapeur d'eau et canaux de la couche d'ozone, son utilisation au satellite à haute angles de vision est limitée. Le RGB (RVB) masses d'air est composé à partir des données d'une combinaison des canaux de l'WV6.2, WV7.3, IR9.7 et IR10.8.

IV.3.6. Image composite RVB IR 10.8, IR 8.7, IR 12.0

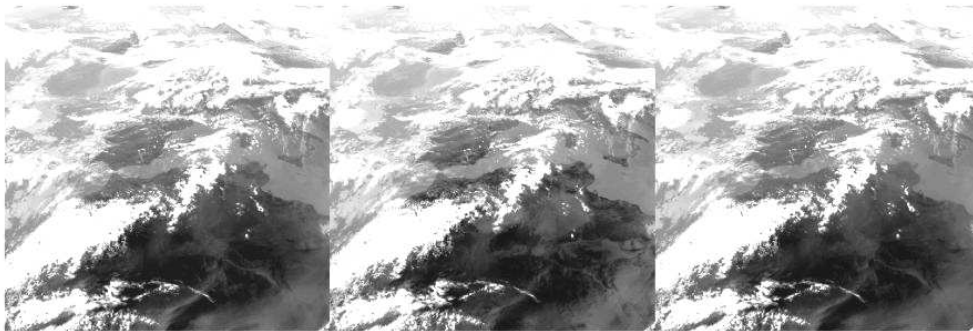


Fig. IV.3.6.1. Images des canaux de SEVIRI prises le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC. Ce sont, de gauche à droite, les canaux IR 10.8, IR 8.7, IR 12.0.

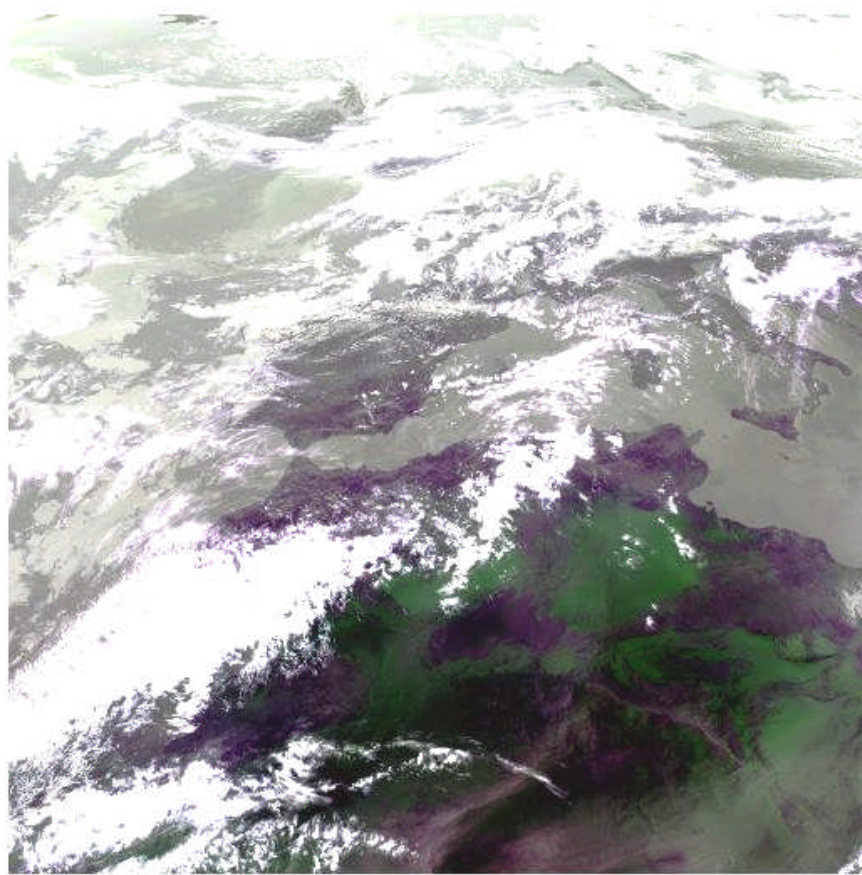


Fig. IV.3.6.2. Image composite RVB à partir des canaux IR10.8, IR8.7 et IR12.0

➤ **Interprétation 8**

La poussière est une image composite RVB basée sur les données du canal infrarouge du satellite Météosat de seconde génération. Il est conçu pour surveiller l'évolution des tempêtes de poussière pendant le jour et la nuit. Le RGB poussière est composé à partir des données d'une combinaison de l'IR10.8, IR8.7 et IR12.0.

IV.3.7. Image composite RVB IR3.9, IR10.8, IR12.0

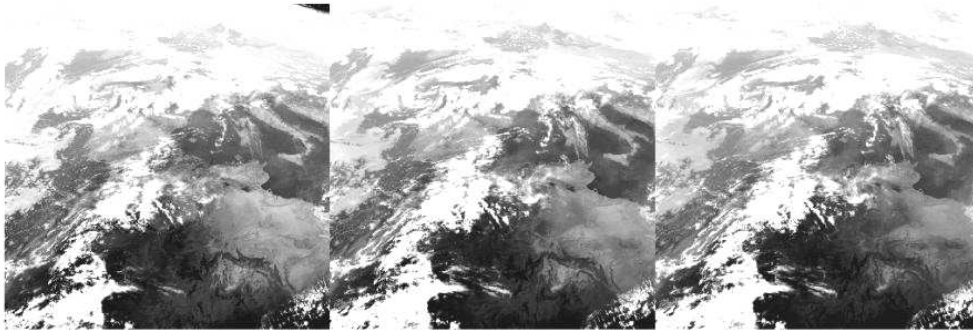


Fig. IV.3.7.1. Images des canaux de SEVIRI prises le 26 Mai 2010 à 00: 15 UTC. Ce sont, de gauche à droite, les canaux IR 3.9, IR 10.8, IR 12.0.

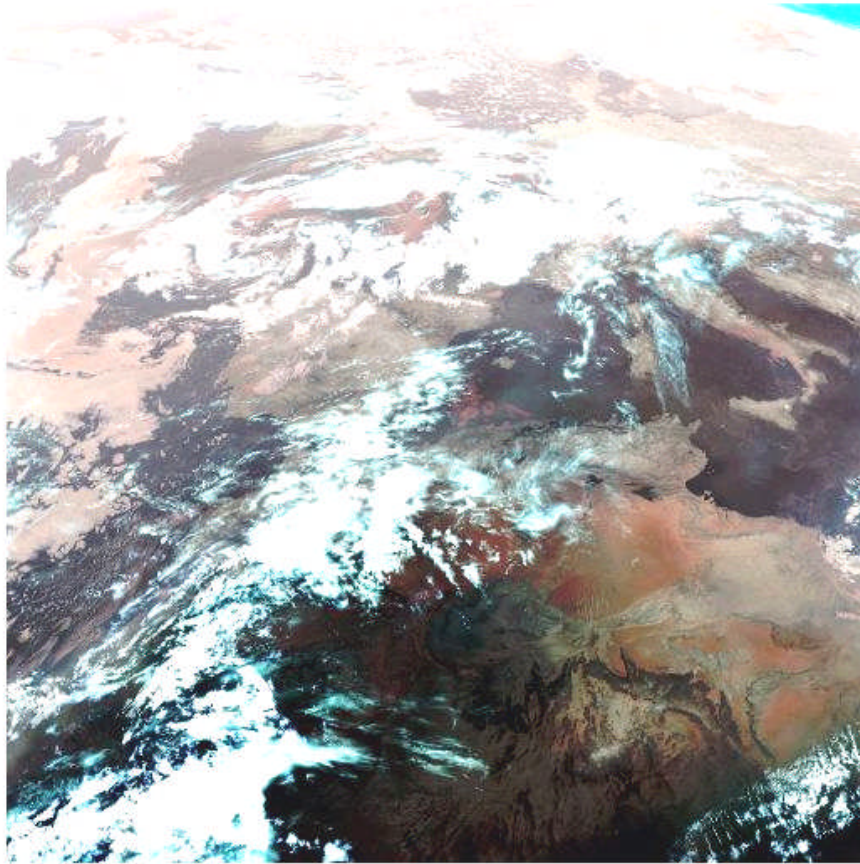


Fig. IV.3.7.2. Image composite RVB à partir des canaux IR3.9, IR10.8 et IR12.0

➤ **Interprétation 9**

Brouillard / nuages bas est une image composite RVB basée sur les données du canal infrarouge du satellite Météosat de seconde génération. Il est conçu et mis au point pour suivre l'évolution de la nuit de brouillard / stratus bas. Autres (secondaire) des applications sont la détection des incendies, les limites d'humidité à basse altitude et de classification des nuages en général. Il convient de noter que le produit est à l'écoute pour des conditions de nuit, son utilisation pendant la journée le temps est très limité. Le brouillard et les nuages bas RGB est composé à partir des données d'une combinaison de l'IR3.9, IR10.8 et IR12.0.

IV.3.8. Image composite RVB VIS 0.8, IR 3.9, IR 10.8



Fig. IV.3.8.1. Images des canaux de SEVIRI prises le 26 Mai 2010 à 12 : 15 UTC. Ce sont, de gauche à droite, les canaux VIS 0.8, IR 3.9, IR 10.8.

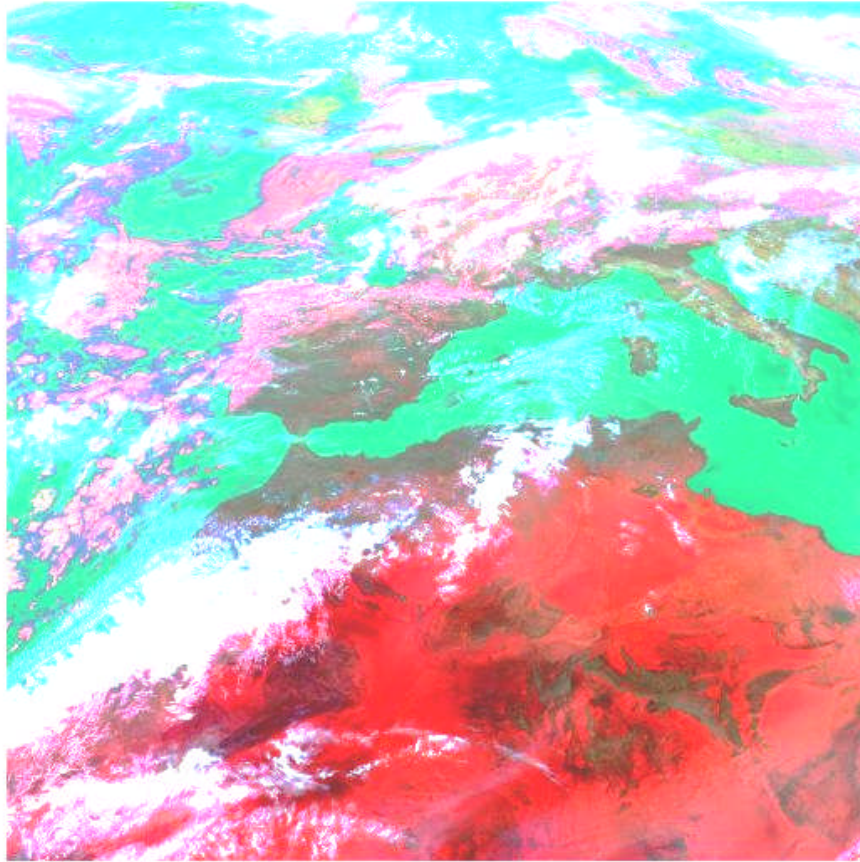


Fig. IV.3.8.2. Image composite RVB à partir des canaux VIS 0.8, IR 3.9, IR 10.8

➤ **Interprétation 10**

La Journée Microphysique RGB a été hérité de Rosenfeld et Lenski (1998): la réflectance VIS0.8 en rouge se rapproche de la profondeur optique des nuages et la quantité de l'eau des nuages et de la glace, l'IR3.9 réflectance solaire en vert est une mesure qualitative de la taille des particules des nuages et la phase, et la température de brillance IR10.8 module le bleu. Cette palette de couleurs est utile pour l'analyse des nuages, la convection, le brouillard, la neige, et les incendies. Dans les nuages couleur de cette eau régime qui ne précipitent pas apparaissent en blanc parce gouttes de nuages sont de petite taille, alors que de grosses gouttes qui sont typiques à précipiter les nuages apparaissent rose, en raison de la faible réflectance à IR3.9 manifeste que le vert

faible. Les nuages d'eau surfondue plus jaunes, parce que la température plus basse qui modulent la composante bleue. Froide et d'épais nuages avec des sommets composé de grosses particules de glace, par exemple, hauts Cb, apparaissent en rouge. Optiquement épais nuages de petites particules de glace près de leurs sommets semblent orange.

IV.4. Discussion

Les résultats obtenus récapitulent les caractéristiques de base des produits clés. Beaucoup de ces produits traités dans ce chapitre sont un héritage de produits opérationnels tirés des données du système Météosat initial, et du Centre d'extraction de produits météorologiques de MSG (MPEF) situé au siège d'EUMETSAT à Darmstadt, en Allemagne, mais ils bénéficient des caractéristiques grandement améliorées du radiomètre SEVIRI de MSG.

Conclusion

Les nombreux exemples d'application des données de MSG présentés dans ce travail montrent clairement que cette deuxième génération de satellites est capable d'apporter de nouvelles connaissances utiles dans beaucoup de disciplines - y compris, bien sûr, sa contribution à la prévision météorologique et à la surveillance climatique, qui sont les deux objectifs principaux d'EUMETSAT. Mais ses possibilités ne s'arrêtent pas là et des exemples montrent aussi son potentiel, en ce qui concerne des aspects très variés de la surveillance de l'environnement, d'un point de vue général.

Les informations présentées dans ce projet sont fondées sur des données recueillies au cours d'une journée complète d'exploitation. L'énorme potentiel de MSG est néanmoins manifeste et il est évident que beaucoup d'autres applications émergeront dans les années à venir, suscitées par les progrès accomplis quant à la compréhension de ses trains de données complexes. Quatre satellites de ce type ont maintenant été approuvés et il est probable que leurs données seront exploitées pendant les deux prochaines décennies, de nouvelles applications continuant d'émerger et les plus anciennes de s'améliorer. Outre, EUMETSAT prévoit de lancer la troisième génération de satellites météorologiques qui prétend d'être plus performantes que les ses prédécesseurs.

Consciente de l'effort qui doit être entrepris en matière de recherche et développement en télédétection spatiale, l'OMM déploie tous les moyens pour contribuer à ce grand chantier mondial. C'est dans ce contexte qu'inscrit notre travail. Il vise à tirer profit des compositions colorées de manière à faciliter l'interprétation des images RGB pour le prévisionniste.

En effet, la performance apportée par ce travail, axé sur la détection des phénomènes météorologiques à partir des compositions colorée des images MSG, est un grand pas vers une nouvelle approche de classification automatique des nuages et d'interprétation assistée. La méthode utilisée met en avant certaines techniques de traitement d'images et ouvre ainsi de nouvelles voies d'exploration.

Pour atteindre cet objectif, on a eu recours aux différents traitements, appliqué sur les composantes R, G et B d'une image en composition colorée. Les premiers résultats étaient déjà encourageant, cependant, ils étaient très tributaire du nombre de canaux (RVB) à fusionner et qui était jusqu'au là forcé à la main et de manière subjective. Ce qui nous a poussé à automatiser le choix de canaux à fusionner, et ce, de manière objectif. Pour se faire on a utilisé la méthode de l'égalisation de l'histogramme la composante monochromatique (niveau de gris), et cela pour toutes les différentes images utilisées et les résultats obtenues (image couleur). Cette technique se prête bien au rehaussement des images faiblement contrastées (cas des images utilisées dans notre travail : images brutes).

Les résultats obtenus par cette technique sont presque parfait. La méthode est très stable et elle est auto adaptée et auto réglée. Cependant, l'étude et résultats soulèvent bon nombre de questions qui s'ouvrent comme autant de perspectives pour la poursuite de travaux futurs. On peut citer certaines idées qui pourraient améliorer les performances obtenues par ce travail :

- a. Il serait intéressant de tester cette approche sur un grand nombre de situations pour faire éventuellement un réglage plus fin,
- b. les phénomènes cachés par d'autres météores seront inaperçues par le radiomètre, d'où la nécessité du réseau radar ou les radiosondes pour compléter une image dite composite,
- c. Appliqué des méthodes de segmentation afin de détecter les différents phénomènes météorologiques,
- d. Compléter l'algorithme, par un autre qui permet de détecter les phénomènes de très petites tailles (feu de forêt),
- e. Enfin d'autres méthodes (ex: segmentation) peuvent apporter de nouvelles informations.

Annexes

Annexe I

L'atmosphère

1. Présentation

Atmosphère, mélange de gaz et de particules qui enveloppe tout corps céleste (la Terre, par exemple) possédant un champ de gravitation suffisamment fort pour les empêcher de s'échapper.

2. LA COMPOSITION DE L'ATMOSPHERE

L'atmosphère est constituée principalement d'un mélange gazeux : l'air. Il comprend de :

- Dioxyde de carbone (CO₂) : 0,035 %
- Azote (N₂) 78 %
- Oxygène (O₂) 21 %
- Argon (A) 0,93 %
- Vapeur d'eau (H₂O) 0 - 4 %
- Néon (Ne) 0,0018 %
- Krypton (Kr) 0,000114 %
- Hydrogène (H) 0,00005 %
- Oxyde d'azote (N₂O) 0,00005 %
- Xénon (Xe) 0,0000087 %
- Ozone (O₃) 0 - 0,000001 %
- des quantités proportionnellement infimes, d'hélium, de méthane, de monoxyde de carbone, des composés organiques, ...

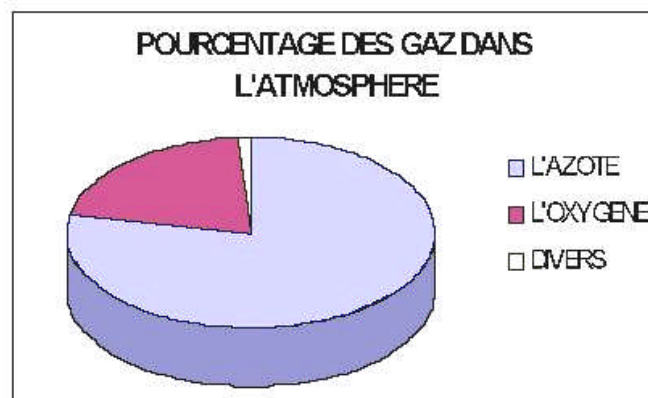


Fig. 1. Le pourcentage de gaz dans l'atmosphère.

3. Structure verticale de l'atmosphère Terrestre

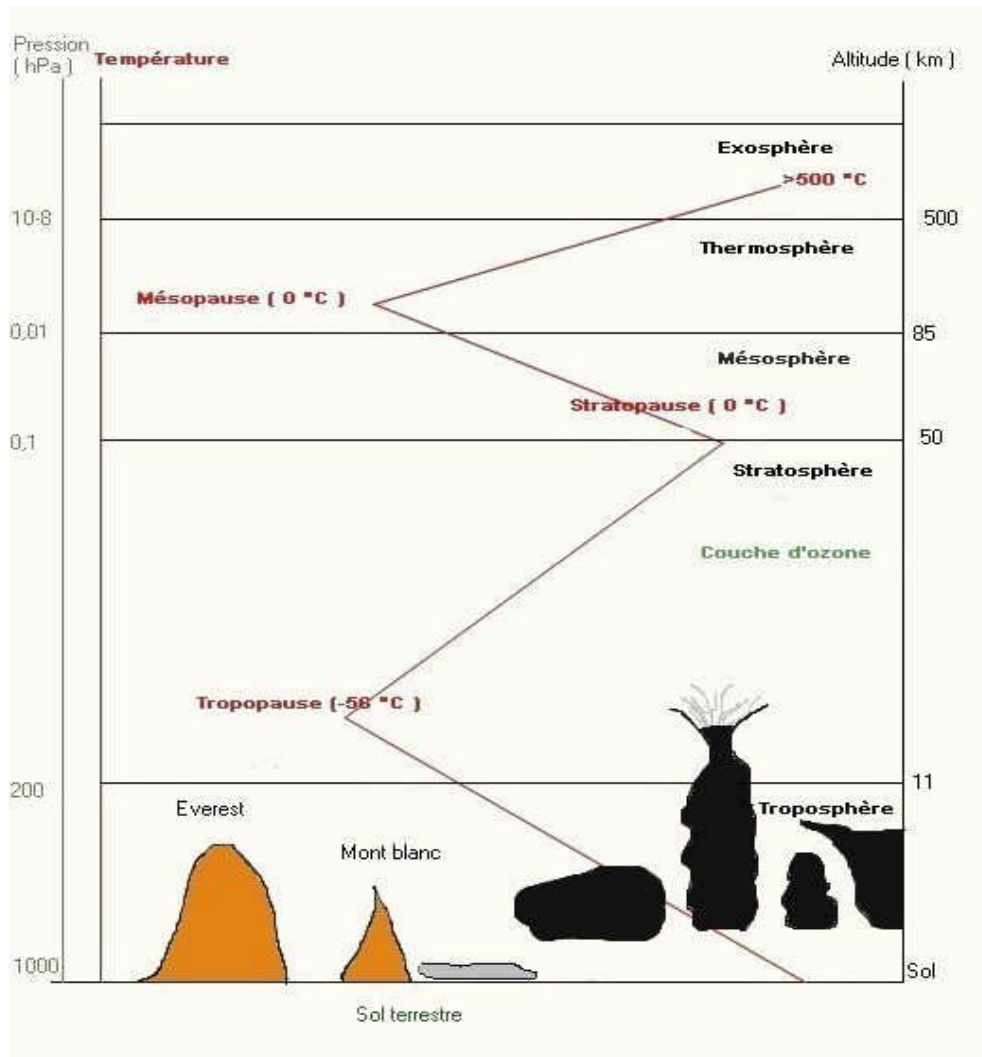


Fig.2 Les différentes coupes de l'atmosphère.

Annexe II

II. Les différents types de nuages

II.1. Présentation des nuages

Les nuages sont formés de très petites gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace (1 à 100 microns de diamètre) obtenus par l'adsorption de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère autour de minuscules impuretés appelées noyaux de condensation (cristaux de sel marin, pollens, produits polluants).

L'aspect d'un nuage est caractérisé par sa forme, sa texture, sa transparence, son opacité et ses couleurs qui varient en fonction des constituants et des conditions atmosphériques.

II.2. Les dix groupes principaux de nuages

On compte dix groupes principaux de nuages, appelés "genres".

- Les nuages les plus élevés, qui occupent l'étage supérieur de la troposphère sont constitués de millions de minuscules cristaux de glace (préfixe: Cirr ou Cirro) et comprennent les genres Cirrus, Cirrocumulus et Cirrostratus. Leur température est inférieure à - 40°C.
- Ceux de l'étage moyen (préfixe: Alto), généralement constitués de gouttelettes d'eau, parfois de cristaux de glace, comprennent les Altocumulus et Altostratus, et le Nimbostratus. L'Altostratus peut pénétrer dans l'étage supérieur; le Nimbostratus déborde généralement dans les étages supérieur et inférieur. Ils recouvrent de très grandes surfaces, parfois des centaines de kilomètres carrés. Même s'ils ne donnent que de faibles précipitations, les altostratus indiquent souvent que l'arrivée de la pluie.
- A l'étage inférieur, on trouve les genres Stratocumulus et Stratus, nuages bas. Ils sont généralement composés de gouttes d'eau liquide.
- Deux genres, enfin, les Cumulus et Cumulonimbus, nuages d'instabilité, qui ont généralement leur base dans l'étage inférieur, peuvent s'étendre à travers les deux autres étages comme en témoigne souvent leur important développement vertical.

Voici les différents types de nuages :

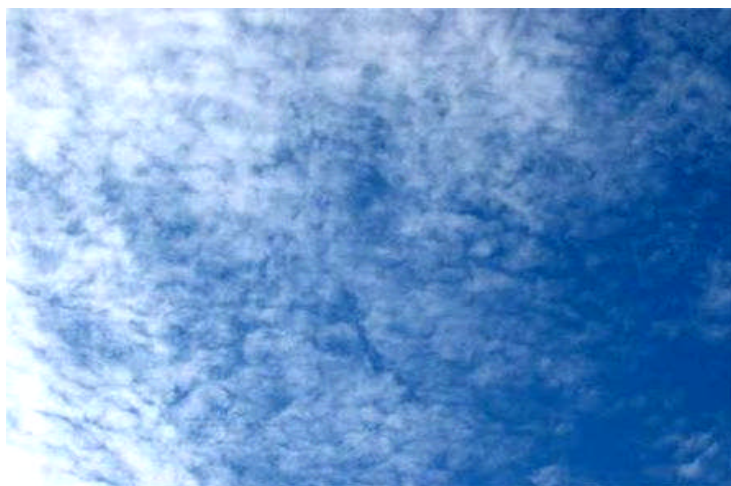
CIRRUS (Ci) - 6000 à 12 000 m d'altitude



Ces fines plumes blanches dans le ciel précèdent une série de nuages amenant une perturbation.

Leur finesse et leur transparence sont dues à la disposition des cristaux de glace qui les constituent. Ils ternissent l'éclat du Soleil ou de la Lune.

CIRROCUMULUS (Cc) - 5000 à 13 000 m d'altitude



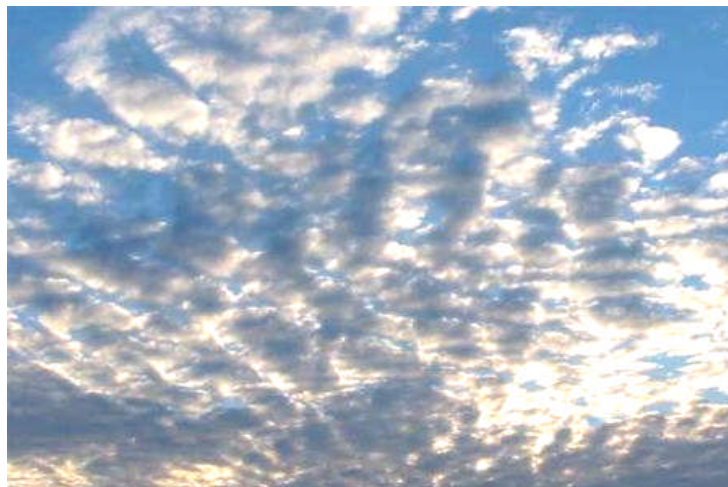
Ces nuages forment des couches de minuscules flocons blancs sous forme de granules ou rides. Ils suivent les cirrus et annoncent un changement de temps. Ils se présentent en banc, nappe ou sous la forme d'une couche mince de nuages blancs sans ombre propre. Ils accompagnent fréquemment des cirrus ou cirrostratus.

CIRROSTRATUS (Cs) - 5000 à 13 000 m d'altitude



Ces nuages forment un voile à travers lequel on voit des halos autour du soleil et de la lune. Ils indiquent un changement de temps certain.

ALTOCUMULUS (Ac) - 2000 à 6 000 m d'altitude



Ces nuages ressemblant à des galets et des rouleaux, forment un ciel pommelé. Ils ne s'accompagnent pas de précipitations mais ils annoncent un changement de temps. Ils ont leurs ombres propres et créent un phénomène de couronne autour du Soleil ou de la Lune, ou même des étoiles très brillantes.

NIMBOSTRATUS (Ns) - 2000 à 6 000 m d'altitude



Les nimbostratus sombres et épais donnent pluie et neige en hiver. Ils proviennent des altostratus. Ils ont la forme d'une immense masse constituée de rouleaux.

S'ils donnent de la pluie, leur base inférieure est ponctuellement déchiquetée, percée, d'où tombe un rideau de précipitations jusqu'au sol. Les nimbostratus sont suffisamment épais pour masquer complètement le Soleil.

ALTOSTRATUS (As) - 2000 à 6 000 m d'altitude



Ces nuages forment une nappe grisâtre ou bleuâtre d'aspect strié, fibreux ou uniforme, et couvrent entièrement ou partiellement le ciel. Ils donnent de la pluie en été et de la neige en hiver.

Ils ressemblent à un cirrostratus très épais sans phénomène de halo. Plusieurs couches d'altostratus peuvent être superposées avec des intervalles de quelques dizaines de mètres. Ils sont souvent associés aux altocumulus.

STRATOCUMULUS (Sc) - 300 à 2 500 m d'altitude



Ce sont des nuages gris-blanc des ciels d'hiver qui apparaissent sous forme de galets et rouleaux avec des parties sombres. Ils correspondent à un temps couvert, sans précipitations.

Les stratocumulus ressemblent aux altocumulus, à la fois par leur aspect et les processus qui leur donnent naissance. Ils diffèrent surtout par leur altitude et le diamètre apparent de leurs éléments constitutifs.

STRATUS (St) - 0 à 500 m d'altitude



Les stratus peuvent se présenter sous la forme d'une couche, généralement continue et grise, souvent étendue, ou sous forme de lambeaux déchiquetés, dont les contours irréguliers et les dimensions se modifient continuellement et souvent rapidement. Les stratus peuvent générer du brouillard, lorsque leur base touche le sol.

Ces nuages apparaissent fréquemment dans les grandes agglomérations à cause de la pollution.

Ils peuvent donner de faibles précipitations sous forme de bruine, de neige ou de prismes de glace.

CUMULUS (Cu) - 200 à 2 000 m d'altitude



D'un blanc éclatant, les cumulus sont des nuages de beau temps, malgré leur taille parfois imposante. Les cumulus ont des contours nets ; ils se développent en forme de mamelons, de dômes ou de tours, dont la partie supérieure bourgeonnante ressemble ordinairement à un chou-fleur. Les parties supérieures, éclairées par le Soleil sont, le plus souvent, d'un blanc éclatant alors leur base est relativement sombre.

CUMULONIMBUS (Cb) - 300 à 17 000 m d'altitude



Ce sont des cumulus porteurs d'orages, d'averses, de grêle... Ils forment d'énormes volutes au sommet en panache ou en forme d'enclume, ils peuvent déclencher des intempéries très violentes.

Annexe III

III.1. Caractéristiques d'une image numérique

L'image est un ensemble structuré d'informations caractérisé par les paramètres ci-dessous.

a) Pixel

C'est une contraction de l'expression anglaise « Picture element » qui signifie élément d'image. Le pixel est le plus petit point de l'image, c'est une entité calculable qui peut recevoir une structure et une quantification..

Dans une image couleur RVB, un pixel est représenté sur 03 octet : un octet pour chacune des couleurs : rouge(R), vert(V) et bleu(B).

b) Dimension

C'est la taille de l'image. Cette dernière se présente sous forme de matrice. Le produit du nombre de lignes de cette matrice par le nombre de colonnes nous donne la dimension de l'image qui est aussi le nombre total de pixel.

c) Résolution

Elle définit la clarté ou la finesse de détail atteint par un moniteur d'ordinateurs ou une imprimante dans la production d'image. Sur un moniteur d'ordinateur, la résolution est exprimée en nombre de pixels par unité de mesure (pouce ou centimètre).

On utilise aussi le mot résolution pour désigner le nombre total de pixels affichables horizontalement ou verticalement sur un moniteur. Plus ce nombre est grand, plus la résolution est meilleure.

d) Luminance

C'est le degré de luminosité des points de l'image. Elle est définie comme étant le quotient de l'intensité lumineuse d'une surface par l'aire apparente de celle-ci. Pour un observateur lointain, le mot luminance est substitué à l'éclat d'un objet.

e) Contraste

Si L_1 et L_2 sont les degrés de luminosité de deux zones voisines A_1 et A_2 d'une image, le contraste est défini par le rapport : $C = \frac{L_1 - L_2}{L_2}$

f) Contour

Les contours sont représentés la frontière entre les objets de l'image, ou la limite entre deux pixels dont les niveaux de gris représentent une différence significative.

g) Bruit

Un bruit (ou parasite) dans une image est considérée comme un phénomène de brusque variation de l'intensité d'un pixel par rapport à ses voisins, il peut provenir de l'éclairage des dispositifs optiques et électroniques des capteurs, ...

III.2. Le prétraitement des images en niveau de gris

L'étape du prétraitement à pour but de faciliter l'analyse d'une image en :

- i.** renforçant la ressemblance d'une même région,
- ii.** accentuant la dissemblance entre pixels appartenant à des régions différentes.

Les méthodes les plus utilisées sont :

1. La modification de l'histogramme,
2. Le rehaussement de contraste,
3. La réduction du bruit.

Le prétraitement appliqué que nous avons appliqué aux images Météosat seconde Génération est le rehaussement par égalisation de l'Histogramme.

➤ Egalisation de l'Histogramme

Dans une image brute, une majorité de pixels ont une valeur inférieure à la lumière moyenne, c'est pourquoi les détails dans les régions sombres sont difficilement perceptibles. Afin d'améliorer la visibilité de l'image, on effectue une technique appelée : « égalisation de l'Histogramme ». Cette technique Elle consiste à rendre plus le plat possible, l'Histogramme des niveaux de gris de l'image, qui donne une meilleure dynamique et un fort contraste à l'image.

III.3. Méthode de reconstitution d'une image

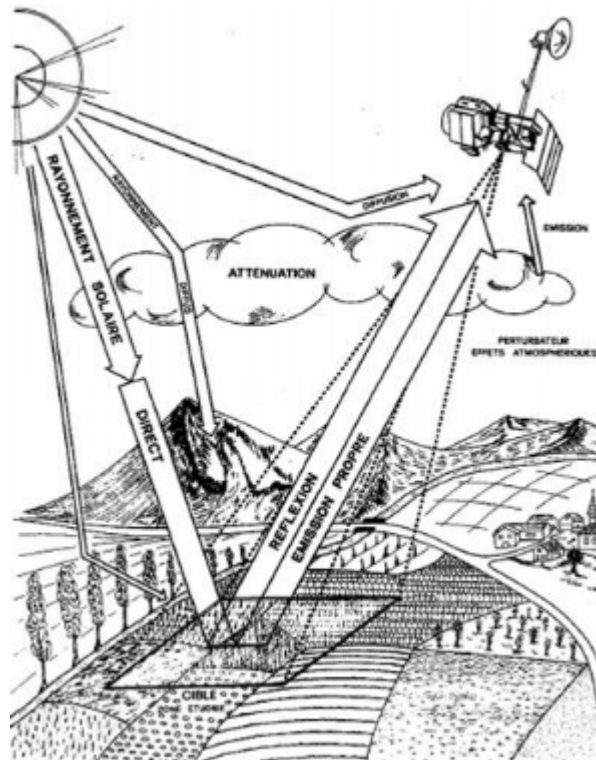


Fig. 3. Méthode de reconstitution d'une image.

Bibliographie

[1] : ABDERRAHMANI Djedjiga, KICHI Sabiha. Détection des nuages en mouvement à partir des images MSG-2. Mémoire d'Ingénieur en Électronique, UMMTO, 2007.

[2] : ADAMA SARR Mamadou , LACAZE Bernard. Caractérisation de la dynamique de la végétation en Afrique de l'Ouest : comparaison des indices NDVI de MSG-SEVIRI, SPOT-VEGETATION et NOAA-AVHRR (exemple du Ferlo, Sénégal). Sciences de l'Homme et Société/Géographie. France, version 1, 2008.

[3] : ALOUACHE Djamal. Segmentation multi-résolution d'images texturées basée sur la transformation en ondelettes : Application aux images Météosat. Thèse de Magister option Télédétection en Electronique, UMMTO, 2010.

[4] : ALLOUCHE Benjamin, CHABAL Silvère. La communication de données par satellites. Laboratoire d'informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM). DESS TNI Option Administration Réseaux et sécurité, 2004-2005.

[5] : AMAT Jean-Louis, YAHIAOUI Gérard. Techniques avancées pour le traitement de l'information : Réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génériques. 2^{ème} Edition, Toulouse, France.

[6] : AMEUR née MAZOUZI Z. Nouvelle approche de segmentation des images texturées. Thèse de Magister en Automatique Industrielle, UMMTO, 2001.

[7] : AMEUR Zohra, LAZRI Mourad, AMEUR Soltane. Identification des masses nuageuses par fusion de données images (radar – satellite). Laboratoire d'analyse et de modélisation des phénomènes aléatoires LAMPA, Département d'électronique, UMMTO, Algérie, 2007.

[8]: AMMADI Abdelaziz, BASLAM Mohammed. Détection automatique de phénomènes présents dans une image satellitaire en composition colorée. Mémoire de

master en informatique télécommunications et imagerie. Université Mohammed V, royaume du Maroc. 2008.

[9] : BADACHE Nassima. Adaptation d'une méthode d'estimation du gisement solaire à l'aide d'images du satellite Météosat. Thèse de Magister en Thermique Solaire (Energies renouvelables), Université Abou Bekr BELKAID, Tlemcen, 2009.

[10]: BAKHOUCHE Fariza, DRISS Djouher. Segmentation d'images texturées par la méthode des matrices de cooccurrences: Application à des images Météosat. Mémoire d'Ingénieur en Électronique, UMMTO, 2004.

[11]: BELDI Samir, BELKACEM Ghania. Etude comparative des méthodes de détection de contours : Application aux images Météosat Seconde Génération. Mémoire d'Ingénieur option Communication en Electronique, UMMTO, 2008.

[12] : BERGES Jean-Claude., LACAZE Bernard, SMIEJ Mohamed Faouzi. Vers un suivi en temps réel de la sécheresse au Maroc à partir des données Météosat Seconde Génération (MSG). Colloque International, Fès 15-16 Avril , 2005.

[13] : CALOZ Régis, COLLET Claude. Précis de télédétection : Traitement numérique d'images de télédétection. Volume 2, AGMV Marquis, Québec, Canada, 2001.

[14] : CHAUVIN Stéphane. Evaluation des performances du modèle bayésien de fusion appliqué à l'imagerie satellitaire. Département images, Ecole nationale des Télécommunications, Paris, France, 2001.

[15] : CIHLAR J., BELWARD A., GOVAERTS Y. Eumetsat et SAI : Meteosat Second Generation opportunities for land surface applications. Eumetsat et l'Institut d'applications spatiales (SAI) du Centre commun de recherche d'Ispra. EUM SP 01, 67 p. 1999.

[16] : DIANE Lingrand. Cours de Traitement d'Images. Rapport de recherche. France, Janvier 2004.

- [17] : RATIER Alain, ROQUET Hervé, SCHMETZ Johannes, SENESI Stéphane. L'imagerie géostationnaire et son évolution. Météo-France, La Météorologie, n° 40, février, 2003.
- [18] : DJABBAR Ameyas. Segmentation d'images MSG avec des techniques directionnelles de codage. Thèse de Magister option Télédétection en Electronique, UMMTO, 2008.
- [19] : RITSERT-CLARK Claudia (EUMETSAT). MSG: METEOSAT SECONDE GENERATION (En orbite - En service). MSG.02, version 1. EUMETSAT, Darmstadt, Allemagne, 2005.
- [20] : RITSERT-CLARK Claudia (EUMETSAT). MSG METEOSAT SECONDE GENERATION: une nouvelle ère pour le suivi du temps et du climat. EUMETSAT MSG.01, 3ème édition, français EUMETSAT, Darmstadt, Allemagne, 2006.
- [21] : RITSERT-CLARK Claudia (EUMETSAT). METEOSAT : L'observatoire du temps et le climat depuis l'orbite géostationnaire. Brochure MTS.01, v.1, EUMETSAT, Darmstadt, Allemagne, 2008.
- [22] : JOLY Gérard. TRAITEMENT INFORMATIQUE DE L'IMAGE SATELLITAIRE. Ingénieur CNRS, Laboratoire de Géographie, CNRS UA 910 Ecole Normale Supérieure, Montrouge, France.
- [23]: HASSINI Abdelatif, BENABDELOUAHED Farid, BENABADJI Nouredine, BELBACHIR HAFID Ahmed. Active surveillance des incendies de niveau 1,5 image satellite MSG Laboratoire d'Application et de l'analyse des radiations Laar, Département de physique, USTOMB, Oran, en Algérie. Université de Jean Monet, Saint Etienne, France. 2009.
- [24] : HERZIG Léa. Fusion de données pour la cartographie géologique : Images radar, hyper-spectrales et de haute résolution spatiale. Laboratoire des systèmes d'information Géographique, Département de Géographie, Ottawa, Canada.

- [25] : KERBOUA L., SAHALI N. Estimation et cartographie de l'évapotranspiration réelle à partir d'images satellitaires NOAA-AVHRR cas de: TAMANRASET. Mémoire d'Ingénieur en Géographie, USTHB, 1997.
- [26] : LACAZE Bernard. Apport de l'imagerie MSG-SEVIRI au suivi en temps réel de la dynamique saisonnière de la végétation à l'échelle du continent africain. Colloque GDR MSG-ATR, Digon, France, 13-14 Sept 2007.
- [27] : LAFONT Damien. Prise en Compte des Hétérogénéités dans la Restitution de l'Eau Nuageuse et des Précipitations par Radiométrie Micro-onde Passive. Thèse de Doctorat en physique de l'atmosphère. Université BLAISE PASCAL, U.F.R. de Recherche Scientifique et technique. Toulouse, France, 2005.
- [28] LEMIKCHI K., OUSMAAL F. Segmentation Markovienne des images multi-spectrales : MSG. Mémoire d'Ingénieur en Électronique, UMMTO, 2007.
- [29] : NAILI. DAT_2004 MSG-naili. Journée d'Etude, CNPM, Office Nationale de Météorologie (ONM), Dar-El-Beida, Alger, Algérie, 01 Mars 2004.
- [30]: OUYED Ouiza ép. MESSAOUI. Etude comparative des méthodes de compression d'images : Application aux images MSG. Thèse de Magister option Télédétection en Electronique, UMMTO, 2008.
- [31] : San EMETERIO José Luis, LACAZE Bernard, SMIEJ M.J. Application des techniques de fusion à l'imagerie Météosat Seconde Génération (MSG) : obtention de composition colorées et de l'indice NDVI à la résolution 1 kilomètre. Colloque de Dijon 13-14 Sept 2007, Météosat Seconde Génération : un nouvel instrument de suivi de l'environnement, Dijon, France, 2007.
- [32] : SAND A., DIAMENT M. L'espace, un élément clé pour comprendre et prévoir l'état de notre planète. ECOMED, Aurelie, France, 2008.
- [33] : SEDDI Farida. Estimation des précipitations en utilisant l'information multi-spectrale du satellite Météosat. Thèse de Magister option Télédétection en Électronique, UMMTO, 2009.

[34] : TREMEAN Alain, FERNANDEZ-MALOIGNE Christine, BOUTON Pierre.
Image numérique couleur : de l'acquisition au traitement. DUNOD, France, 2004.

[35]: Vincent J. Schaefer, John A. Day. L'ATMOSPHERE: Guide d'interprétation des
phénomènes atmosphériques. BROQUET, Qc, CAN, 2005.

<http://www.dunod.com>

www.eumetsat.int

www.hermes-science.com

<http://www.i3s.unice.fr/I3S/FR/>

[http:// www.meteofrance.fr](http://www.meteofrance.fr)

[http:// www.springer.com](http://www.springer.com)