

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

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



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en ELECTRONIQUE,
Option : CONTRÔLE ET COMMUNICATION

Thème

**Correction radiométrique des
images satellitaires
Application aux scènes HRV de SPOT**

Proposé par :

Mr: BOUHENNACHE

Dirigé par :

Mr: Y. ATTAF

Présenté par :

Mr: BADAQUI ALI

Mr: NAMOUS NAFA

Promotion: 2009/2010

Remerciements

Nous remercions Mr ATTAF pour avoir aidé et suivi ce travail, et orienté sa réalisation.

Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.

Enfin, que tous ceux qui nous ont assistés et encouragés (parents et amis(es)) trouvent ici l'expression de notre affection et gratitude.

Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à :

✓ *Mes très chers parents qui veillent sans cesse sur moi*

avec leurs prières et leurs recommandations

✓ *Mes très chers frères et sœurs Toute ma famille*

✓ *Mon binôme NAFA et toute sa famille*

✓ *Mes amis :*

Djamel ,Mourad ,Lyes ,Hamid , Boussad ,Mohammed

✓ *A tous ceux qui sont proches de mon cœur et que*

Je n'ai pas cité les noms.

ALI



Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à :

✓ *La mémoire de mon défunt père.*

✓ *Ma très chère mère qui n'a pas cessé de m'encourager, de me soutenir dans les moments difficiles et qui a su m'entourer de toute son affection et son amour pour que je puisse réussir,*

- ✓ *À ma défunte grand-mère*
- ✓ *À Tous mes Frères et sœurs,*
- ✓ *À Tout membre de ma grande famille,*
- ✓ *À Mon binôme ALI et toute sa famille,*
- ✓ *À Tous mes amis et collègues,*
- ✓ *À Tous ceux qui me sont chers.*
- ✓ *A Mon adorable neveu amyas.*

NAFA



Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE 1: Télédétection et imagerie spatiale	
1.1. Introduction.....	2
1.2. Les satellites artificiels.....	2
1.2.1. Les catégories de satellites	3
1.2.1.1. Les satellites géostationnaires	3
1.2.1.2 Les satellites à défilement	4
1.3. Les capteurs	4
1.3.1 Résolution d'un capteur.....	4
1.4. Le satellite SPOT	5
1.4.1 Caractéristiques orbitales	6
1.4.2 Les différentes générations de SPOT	6
1.4.2.1 1ère génération de SPOT : SPOT 1 à 3	6
1.4.2.2 2ème génération de SPOT : SPOT 4	7
1.4.2.3 3ème génération de SPOT : SPOT 5	8
1.4.2.4 La stéréoscopie	8
1.5 Satellite LANDSAT	8
1.5.1 Satellite LANDSAT 5 TM	9
1.5.2 Utilisation des images TM	9
1.5.3 Les caractéristiques orbitales de satellite LANDSAT 7	9
1.6 Les bases physiques de la télédétection	9
1.6.1 Notion d'onde d'électromagnétique	10
1.6.2 Le spectre électromagnétique	11
1.6.3 Source du rayonnement électromagnétique	11
1.6.4 Influence de l'atmosphère	11
1.6.5 Les paramètres énergétiques mesurés en télédétection	12
1.7 La signature spectrale	12
1.8 Les images satellitaires	13
1.9 Structure de l'image numérique.....	13

1.9.1 La définition	14
1.9.2 La résolution.....	14
1.9.3 Echantillonnage	14
1.9.4 Formats d'images	14
1.9.5 Numérisation	15
1.9.5.1 Mode couleur RVB	15
1.9.5.2 Mode multi niveaux (niveaux de gris)	15
1.10 Principe de visualisation d'un canal d'une l'image numérique.....	15
1.10.1 Visualisation en couleur	15
1.10.2 Visualisation en niveaux de gris.....	16
1.10.3 Histogramme d'un canal	16
1.10.3.1 Etirement de l'histogramme	17
1.10.3.2 Etirement linéaire de l'histogramme	17
1.11 Visualisation simultanée de plusieurs canaux ou composition colorée.....	18
1.12 Conclusion	19

CHAPITRE 2 : Correction radiométrique

1. Introduction	20
2. Les signatures spectrales des objets, leurs significations géochimique et leur contrôle en télé détection spatiale	20
3. Analyse des réponses spectrales.....	22
4. Modes uni temporel.....	26
4.1. Conversion de la réflectance relative en luminance (vraie).....	26
4.1.1 Données LANDSAT(TM &MSS).....	26
4.1.2 Données XS et PANCHROMATIQUE de SPOT	28
4.2 Calcul de la réflectance extra- atmosphérique (Albédo spectral planétaire)	29
4.3 Estimation de la réflectance pourcentage au niveau du sol (Albédo spectral de surface)	33
4.4 Calcul de la température hors atmosphère pour la bande TM	
(Cas du thermique)	34
4.4.1 Principe physique d'un détecteur	34
4.4.2 Quelques définitions.....	35

4.4.3 La température au niveau du satellite.....	35
5. Model multi temporel.....	36
5.1 Facteurs de variation des comptes numériques entre imagePrise à des dates différentes	37
5.2 Correction relatives des effets atmosphériques	37
6. Conclusion partielle.....	41

CHAPITRE 3 : Conception & Réalisation

1. Introduction	42
2. Introduction sur MATLAB	42
2.1. Conception de l'interface MATLAB	43
2.1.1. Présentation du GUI	43
2.1.1.1. Présentation des différents objets	43
3. Les fonctions les plus utilisées	43
3.1. Les bouton (menu)	44
3.1.1. Charger l'image.....	44
3.1.2. Histogramme	45
3.2. Décomposition de l'image brute en trois couleurs au niveau de gris	46
3.3. Programme sous MATLAB des différentes corrections radiométriques.....	49
3.3.1. Algorithmes des traitements	49
3.3.1.1. Algorithme du model uni temporel	49
3.3.1.2. Algorithme du model multi temporel.....	51
3.4. Description global de l'interface.....	53
3.4.1. Description des menus.....	53
3.5. Conclusion partielle.....	57

CHAPITRE 4 : Expérimentation et présentation des résultats

1. Introduction	58
2. Présentation de la zone d'étude	58
3. Conclusion partielle.....	63
Conclusion générale	64

Annexe

Bibliographie

Introduction Générale

Introduction générale

Après l'avènement de l'informatique, plusieurs domaines d'application se sont développés très rapidement. Parmi ces domaines, nous citerons le traitement d'images qui est désormais une science à part entière qui permet d'analyser et de traiter des images de provenances diverses. Il consiste à donner une autre écriture à l'image source pour en faire ressortir les traits ou les informations qu'elle contient.

La télédétection constitue une source de données indispensable pour le traitement d'images.

L'information enregistrée par les capteurs des satellites d'observation décrit le comportement spectral et la distribution spatiale des objets au sol. Cependant, la télédétection constitue l'ensemble de données, de connaissances et de techniques de traitement pour l'analyse, la reconnaissance et l'interprétation des objets au sol. Ses domaines d'investigation sont très divers de l'inventaire des objets au sol dont on a besoin de connaître la nature, la qualité et la dynamique à l'aménagement du territoire et la connaissance scientifique de la terre et ses progrès.

Notre étude consiste à apporter des corrections radiométriques à l'image satellitaire (pour éliminer les différentes dégradations que subit celle-ci) nécessaires à la transformation des données numériques primitives de luminance en termes de réflectance exo-atmosphérique pour permettre une souplesse de comparaison et une coordination entre données issues de différentes sources.

Nous avons réparti notre travail en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons donner quelques généralités sur la télédétection et les images satellitaires qui font l'objet de notre étude ;

Dans le deuxième chapitre, nous allons définir les différents paramètres causant les perturbations des signaux reçus au niveau du satellite et proposer les modèles de correction pour ramener l'information enregistrée par le capteur à la réalité au sol ;

Le troisième chapitre, décrira la méthode de conception adoptée pour la réalisation de notre application et présentera les algorithmes de traitements implémentés dans notre logiciel ;

Et enfin, le dernier chapitre, illustrera les résultats obtenus après expérimentation de notre logiciel sur une image prise dans la région d'ORAN.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale, annexes et bibliographie.

CHAPITRE 1

Téledétection et Imagerie Spatiale

1.1 Introduction

La télédétection est définie comme l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes.

Elle permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol,...), etc. Lorsque le satellite ne fait que capter le rayonnement réfléchi, on parle de télédétection « passive » et lorsque le satellite émet une onde vers la cible et en mesure l'écho, on parle de télédétection « active ».

En théorie, la télédétection est née de la fusion de deux inventions anciennes : la montgolfière (première plate-forme d'observation aérienne) et la photographie. En réalité, la télédétection moderne est née de la photographie aérienne, qui a connu un essor considérable au cours du 20ème siècle, surtout au cours de la seconde guerre mondiale.

L'année qui symbolise l'entrée de la télédétection dans l'ère moderne est l'année 1957 avec le lancement de Spoutnik, premier satellite artificiel à être placé en orbite autour de la Terre par l'URSS. Depuis, de nombreux pays dont les USA, le Canada, la France, puis la Russie, la Chine, le Japon ou encore l'Inde ont développé leurs propres programmes de télédétection. Aujourd'hui, des dizaines de satellites d'observation de la Terre sont en orbite et fournissent en permanence des milliers d'images pour des applications militaires, mais aussi de plus en plus pour des applications civiles.

1.2. Les satellites artificiels [2]

Les satellites artificiels sont des appareils issus de l'activité de l'homme et mis en orbite autour d'une planète par une fusée. Les satellites mis autour de la terre représentent des

plates-formes idéales pour l'observation de l'étude de celle-ci. Les conditions d'observation des satellites dépendent de leurs caractéristiques astronomiques qui sont :

- l'orbite : Courbe décrite par le satellite qui peut être circulaire ou elliptique ;
- la vitesse de rotation ;
- la hauteur de l'orbite ;
- l'angle de détection ;
- la période de révolution : Temps que met le satellite pour effectuer un tour complet autour de son orbite ;
- la résolution : Taille de la surface au sol que représentera un pixel (surface élémentaire visée par le satellite) ;
- les points d'intersection de l'orbite et du plan de l'équateur appelés « nœuds ». Ils déterminent l'inclinaison qui prend des valeurs comprises entre 0° et 180° . On dit que l'orbite est polaire lorsque l'inclinaison avoisine 90° .

1.2.1. Les catégories de satellite [2]

Deux grandes catégories de satellites artificiels de la Terre correspondent à des caractéristiques astronomiques différentes :

1.2.1.1. Les satellites géostationnaires

Les satellites géostationnaires apparaissent comme immobiles au-dessus d'un point de la Terre. Pour cela, ils doivent avoir une vitesse angulaire égale à celle de la rotation de la Terre et décrire dans le même sens une orbite circulaire dans un plan équatorial. Ils font donc un grand cercle chaque jour. Ces caractères imposent leur altitude d'environ 36000 km. Cette distance rend les documents fournis difficilement exploitables dans le domaine des sciences de la terre. Les satellites géostationnaires ou géosynchrones sont en général utilisés pour les communications et la météorologie. Il est utile de noter que, se trouvant toujours à la verticale du même point de la terre, ils observent celle-ci selon le rythme quotidien.

1.2.1.2. Les satellites à défilement

Les satellites à défilement à la différence des précédents, ne demeurent pas au-dessus du même point de la Terre, mais se déplacent à une vitesse d'environ 7 Km/seconde par rapport à la surface terrestre qui défile au-dessous d'eux. Ils décrivent une orbite presque polaire circulaire à une altitude relativement basse entre 800 et 1500 Km. Leur période de révolution est assez brève : en moyenne 1h40 et jusqu'à un peu moins de 2heures, effectuant ainsi plus d'une douzaine de fois le tour de la terre en 24 heures. Ces satellites sont habituellement héliosynchrones, c.à.d que chaque passage quotidien du satellite au-dessus d'une latitude donnée s'effectue environ à la même heure (solaire) locale.

1.3. Les capteurs

Un capteur est un instrument qui recueille de l'énergie radiative provenant de la scène visée suivant différents intervalles de longueurs d'ondes et délivre un signal électrique correspondant et mesurable. Les **capteurs actifs** sont à la fois émetteurs et récepteurs, tandis que les **capteurs passifs** sont uniquement récepteurs. La source d'énergie est le plus souvent le soleil.

1.3.1. Résolution d'un capteur

Trois types de résolution caractérisent un capteur de télédétection, au sol ou embarqué:

- La résolution spectrale : correspondant aux bandes de longueurs d'onde auxquelles les capteurs sont sensibles.
- La résolution spatiale : correspondant à la capacité de l'instrument à distinguer entre deux points au sol.
- La résolution temporelle ou répétitivité correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène.

1.3.2. Les radiomètres multi spectraux

Les satellites utilisés en télédétection passive utilisent des capteurs appelés radiomètres qui couvrent les domaines spectraux visible et infrarouge. Selon la destination des satellites, les radiomètres embarqués sont calibrés pour observer certaines bandes spectrales précises appelés canaux.

Le radiomètre mesure l'énergie électromagnétique issue de petites tâches élémentaire s'appelés pixels (abréviation de " Picture élément ") dont la taille dépend de l'altitude du satellite et de la qualité du système optique associé au capteur. Il s'agit de la résolution spatiale du satellite.

Le radiomètre analyse donc l'atmosphère ou la surface de la terre, dans chaque canal,

- soit point par point et ligne après ligne, comme dans le cas d'un radiomètre à balayage de type LANDSAT,
- soit ligne après ligne (1 ligne comprend 3000 points en mode multi spectral, 6000 en mode panchromatique) dans le cas des capteurs à haute résolution visuelle de SPOT

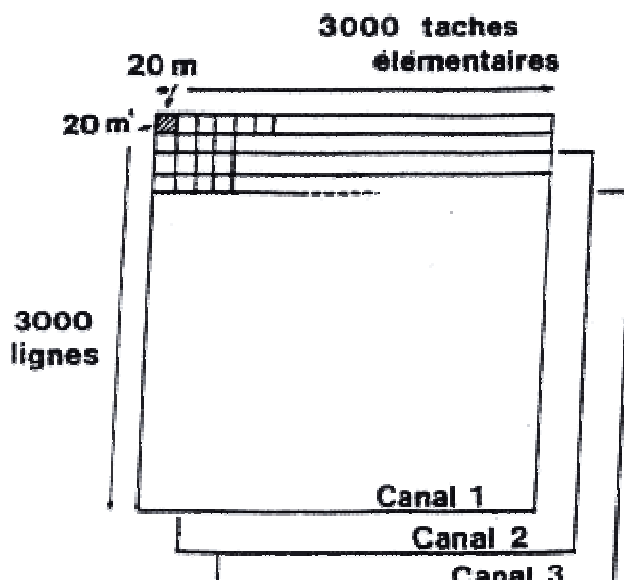


Figure 1.1 : Résolution spatiale du satellite

1.4. Le satellite SPOT

SPOT, Système pour observation de la terre, est un satellite décidé en février 1978 par la France. Le programme SPOT, qui comprend le satellite et les stations de réception a été réalisé par le CNES (Centre national d'études spatiales) en collaboration avec SSTC (Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles belges) et SNSB (Swedish National Space Board ou Agence spatiale suédoise). Il a été lancé le 22 février 1986 par une fusée Ariane 1.

Les performances des satellites Spot en font le satellite civil le plus performant de sa génération. Malgré une concurrence accrue, les données Spot constituent ainsi la première référence mondiale dans le domaine de l'imagerie satellitaire. Les informations fournies par les satellites SPOT répondent aux besoins d'applications traditionnelles comme la cartographie mais elles ont aussi trouvé leur place dans de nouvelles applications comme les télécommunications.

1.4.1. Caractéristiques orbitales

Le satellite SPOT a été placé à 822 Km d'altitude sur une orbite circulaire inclinée de $98,8^\circ$ par rapport au plan équatorial (orbite polaire), permettant de couvrir la planète du nord au sud, et donc d'accéder à l'ensemble des points du globe terrestre en conservant une altitude de prise de vue quasiment constante. Cette inclinaison particulière se traduit par un lent mouvement de précession de l'orbite d'où son caractère héliosynchrone. Ceci permet au satellite d'effectuer les survols d'une région pratiquement toujours à la même heure solaire locale. De plus il a accès en prise de vue verticale à toutes les surfaces de la terre en un cycle de 26 jours. Sa période de révolution est de 101 minutes, effectuant ainsi plus 14 fois le tour de la terre en un jour.

1.4.2. Les différentes générations de SPOT

1.4.2.1. 1ère génération de SPOT : SPOT 1 à 3

Les 3 premiers satellites étaient identiques et leur charge utile était constituée de deux instruments optiques identiques (HRV : Haute Résolution Visible), et d'un système de transmission des images vers stations de réception au sol.

Capteurs HRV :

Chaque **HRV** peut indifféremment acquérir des images en mode panchromatique (mode P : une seule large bande dans la partie visible du spectre) ou multi spectral (mode XS: les bandes verte, rouge et infrarouge du spectre électromagnétique). Les deux capteurs HRV peuvent fonctionner indépendamment ou simultanément en mode XS ou en mode P. Les 2 instruments HRV peuvent balayer chacun une bande de 60 km, la taille des images est de 60 km x 60 km. La résolution spatiale est de 10 m x 10 m pour les images panchromatiques et de 20 m x 20 m pour les images multi spectrales. Les instruments optiques des satellites Spot

peuvent effectuer des observations obliques, jusqu'à +/- 27 degrés de la verticale du satellite en modifiant l'orientation du miroir d'entrée de chaque instrument optique, permettant ainsi d'observer des régions particulières qui ne sont pas nécessairement à la verticale du satellite (Visée latérale). La résolution temporelle est ainsi ramenée de 26 à 4 ou 5 jours pour les régions tempérées.

Mode	Bande	Bande spectrale	Résolution
XS-multi spectral	XS1	0,50 - 0,59 μm	20m x 20m
	XS2	0,61 - 0,68 μm	20m x 20m
	XS3	0,79 - 0,89 μm	20m x 20m
P-panchromatique	PAN	0,51 - 0,73 μm	10m x 10m

1.4.2.2. 2ème générations de SPOT : SPOT4

La charge utile de SPOT-4 est constituée de plusieurs capteurs (deux instruments optiques identiques HRVIR : Haute Résolution Visible et I infrarouge plus le capteur VEGETATION), d'enregistreurs des données (sur bande magnétique) et d'un système de transmission des images vers les stations de réception au sol

Capteurs HRVIR :

Bien que très similaire aux HRV de la génération précédente (même résolution spatiale, possibilité d'orienter les miroirs), les capteurs HRVIR s'en différencient par :

- La présence d'une bande spectrale additionnelle dans le moyen infrarouge (1,58-1,75 μm) ;
- Le remplacement de la bande panchromatique (0,51-0,73 μm) par la bande XS2 (0,61-0,68 μm) qui peut fonctionner aussi bien en mode "10 mètres" qu'en mode "20 mètres" ;
- La superposition à bord de toutes les bandes spectrales.

Capteur VEGETATION :

L'objectif de l'instrument VEGETATION est de fournir de manière opérationnelle des mesures précises sur les principales caractéristiques du couvert végétal. VEGETATION fonctionne indépendamment du HRVIR. Il comprend un instrument de prises de vue radiométrique grand angle opérant dans les quatre bandes du spectre (bleu, rouge, proche et moyen infrarouge) avec une résolution de 1 kilomètre. Grâce à une fauchée de 2 250 kilomètres, l'instrument couvre donc en une journée la quasi-totalité des terres émergées.

1.4.2.3. 3ème générations de SPOT : SPOT5

La charge utile de SPOT 5 est constituée d'instruments imageurs de haute résolution dont les améliorations par rapport à SPOT 4 sont:

- L'instrument HRS (Haute résolution stéréoscopique) permettant d'acquérir des couples d'images stéréoscopiques quasi-simultanées sur de très vastes étendues;
- Capteurs HRG (Haute Résolution Géométrique) : Deux capteurs HRG sont capables de générer des données à quatre niveaux de résolution pour un champ d'observation de 60 Km :
 - images dans la bande Moyen infrarouge (SWIR): 20 m
 - images multi spectrales (vert, rouge et proche infrarouge): 10 m
 - images panchromatiques: 5 m
 - images panchromatiques super mode: 2.5 m
- Une résolution au sol plus élevée en mode panchromatique : 5 mètres et 2.5 mètres (10 m pour Spot 4);
- Une résolution au sol plus élevée en mode multi spectral : 10 mètres (20 m pour Spot 4) pour chacune des 3 bandes dans le visible et le proche infrarouge.

1.4.2.4. La stéréoscopie

La stéréoscopie est le procédé qui permet d'obtenir la vision du relief à partir d'un couple d'images stéréoscopiques d'un objet, prises de deux points de vue différents en visée verticale. Ces images sont exploitées ensuite pour fabriquer des modèles numériques de terrain (MNT) indispensables à de nombreuses applications (simulation aérienne en basse altitude, implantation de réseaux de téléphonie cellulaire) .

1.5. Satellite LANDSAT. [2]

Le premier satellite d'observation Landsat-1 a été lancé par la NASA en 1972. Connu à l'origine sous l'acronyme ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), Landsat avait été conçu pour tester la faisabilité d'une plate-forme multi spectrale d'observation de la Terre non habitée. Depuis, le programme Landsat a permis l'acquisition de données sur tous les coins de la planète. Le programme Landsat qui était gérée à l'origine par la NASA, est sous la responsabilité de la NOAA, en 1983. En 1985, le programme a été commercialisé pour fournir des données aux divers utilisateurs civils.

1.5.1 Satellite LANDSAT 5 TM

Le landsat 5 a été construit avec 2 types de capteurs : le MSS et le “Thématique Mapper” (TM). La transmission directe des données à des stations terrestres se fait grâce à des antennes de bande X et de bande S montées à bord du satellite. Le capteur MSS est le même que dans les landsats 1 à 3.

Le TM a été construit avec de grandes améliorations spectrales radio métrique en l'acquisition de données dans 7 bandes au lieu de 4, avec une nouvelle bande dans le visible (bleu) et 2 dans l'infrarouge. Radio métriquement, le TM permet la conversion A-D sur un intervalle de 0 à 255 (8 bits) niveaux d'ombres, au lieu de 0 à 63, ce qui permet de déceler des petits changements dans l'amplitude radio métrique à l'intérieur d'une bande et entre les différentes bandes. Géométriquement, les données TM sont enregistrées en utilisant une résolution de 30 m.

1.5.2 Utilisation des images TM

Les images TM sont utilisées dans des applications beaucoup plus variées que celles du MSS. Les MSS sont généralement mieux utilisées dans l'analyse des régions larges comme la cartographie géologique ; cependant, pour une cartographie plus détaillée de l'occupation des sols, les TM sont beaucoup plus précises grâce à leur résolution spatiale, spectrale et radio métrique, mais aussi au nombre de bandes plus élevé.

1.5.3 Les caractéristiques orbitales du satellite landsat 7

Le satellite landsat 7 évolue à 750KM d'altitude sur une orbite inclinée de 98,2° par rapport au plan équatorial. Cette inclinaison particulière se traduit par un lent mouvement de précession de l'orbite d'où son caractère héliosynchrone. Ceci permet au satellite d'effectuer les survols d'une région particulière toujours à la même heure solaire locale.

1.6. Les bases physiques de la télédétection

La télédétection utilise les propriétés du rayonnement électromagnétique pour analyser à distance la surface du sol, de l'océan ou l'atmosphère. Une bonne connaissance de la physique élémentaire du rayonnement est indispensable à l'interprétation des résultats de la télédétection.

1.6.1. Notion d'onde électromagnétique [4]

Une onde électromagnétique correspond à la vibration simultanée dans l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Une onde électromagnétique est une onde progressive et transversale ; le sens de la variation des champs est perpendiculaire à la direction de propagation (figure 1.2). L'onde électromagnétique est caractérisée par :

- la *fréquence*, désignée par la lettre f : c'est le nombre de cycles par unité de temps ;
- la *longueur d'onde* ou amplitude λ , est donnée par l'équation :

$$\lambda = c / f \quad (1.1)$$

Où c est la célérité de la lumière : $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. (1.2)

- la *polarisation*, c'est à dire l'orientation du champ électrique dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation ;
- l'*amplitude* de l'onde qui conditionne l'intensité du rayonnement ; plus l'amplitude est forte plus le flux d'énergie est intense.

Il est à noter que la fréquence d'un rayonnement électromagnétique est invariable, alors que la vitesse de propagation, et donc la longueur d'onde, peuvent être modifiées lors du passage d'un milieu à un autre. C'est la raison pour laquelle, il vaut toujours mieux caractériser le rayonnement électromagnétique par sa fréquence, même si l'utilisation de la longueur d'onde est la plus répandue.

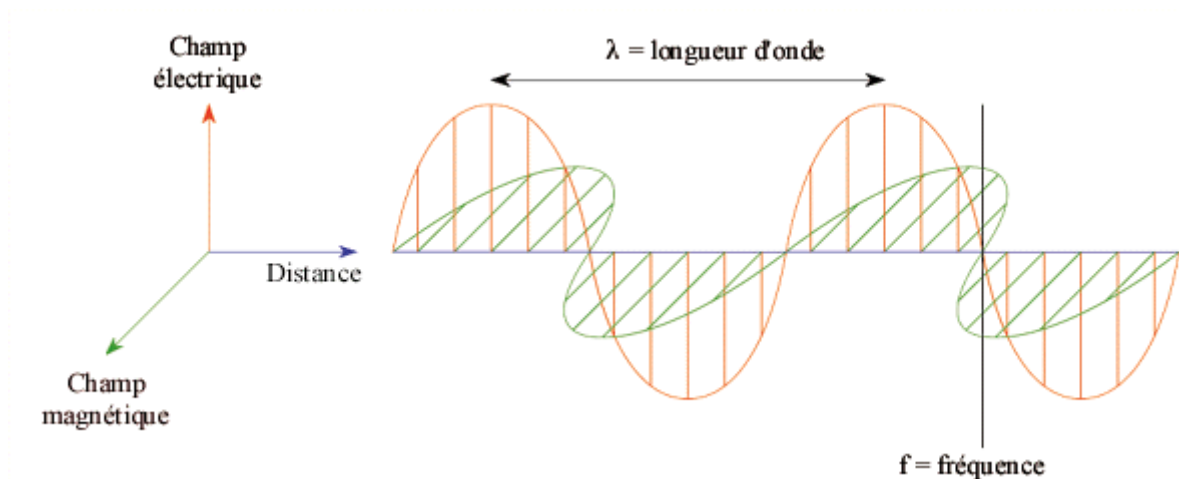


Figure 1.2 : Représentation d'une onde électromagnétique

1.6.2. Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est un diagramme représentant l'ensemble des radiations électromagnétique dont la gamme s'étend depuis les rayons gamma jusqu'aux ondes radio. Une partie très limitée de ce spectre, entre 390 nm et 700 nm, constitue la "lumière visible" à laquelle est sensible l'œil humain. Les longueurs d'onde inférieures à 390 nm ne sont pas perçues par l'œil humain ; il s'agit du rayonnement *ultra-violet*. De même, les d'onde supérieures à 700 nm, également non perçues par l'œil humain, constituent le domaine *infrarouge*. (fig1.3).

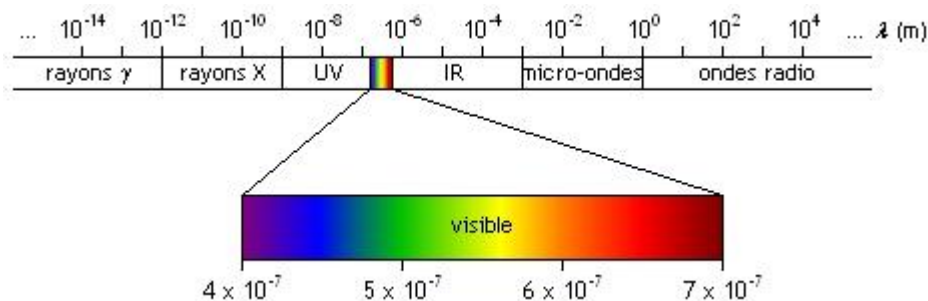


Figure1.3 : Le spectre électromagnétique

1.6.3. Source du rayonnement électromagnétique

A l'exception des capteurs actifs qui fournissent leur propre éclairage, la télédétection dépend du rayonnement des sources naturelles. Qu'il s'agisse du rayonnement solaire réfléchi ou du rayonnement émis directement par la surface et l'atmosphère de la terre. Toute matière qui est à une température plus élevée que le zéro absolu (0°C) émet d'une façon constante un rayonnement électromagnétique.

1.6.4. Influence de l'atmosphère

En traversant l'atmosphère, l'intensité des rayonnements électromagnétiques est modifiée. On appelle fenêtres d'absorption les parties du spectre électromagnétique qui sont entièrement ou partiellement absorbées, celles qui sont totalement transmises sont appelées fenêtres de transmission et sont à l'origine de la télédétection.

1.6.5. Les paramètres énergétiques mesurés en télédétection [7]

▪ La réflectance

C'est le rapport de l'intensité du rayonnement réfléchi par un objet au rayonnement incident, dans une partie donnée du spectre électromagnétique. La réflectance d'un même objet varie selon la partie du spectre électromagnétique.[5]

▪ L'albédo

C'est le même rapport qu'en réflectance, mais du point de vue spectral, l'albédo correspond à l'ensemble des rayonnements électromagnétiques. [5]

1.7. La signature spectrale

Les surfaces naturelles se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance selon la longueur d'onde. La « signature spectrale » des surfaces correspond aux variations de la réflectance spectrale (fig1.3). Elle permet de distinguer entre eux les principaux types de surfaces terrestres ou d'analyser plus finement les propriétés des ces surfaces.

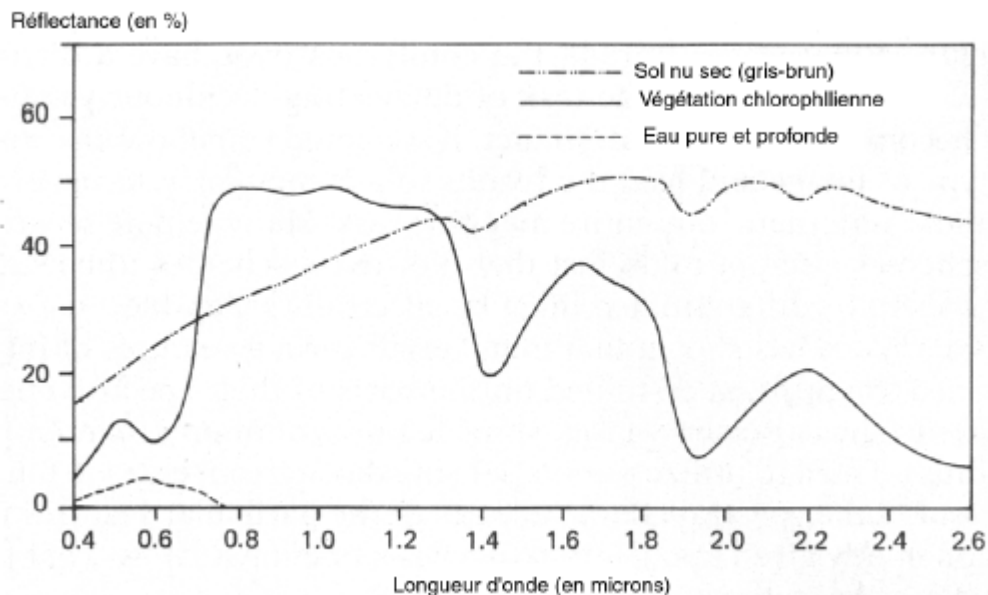


Figure1.4 : Variations de la réflectance selon la longueur d'onde.

1.8. Les images satellitaires

De nos jours, la plupart des données de télédétection étant enregistrées en format numérique, presque toutes les interprétations et analyses d'images requièrent une partie de traitement numérique. Le traitement numérique des images peut recourir à divers procédés dont le formatage et la correction des données, le rehaussement numérique pour faciliter l'interprétation visuelle ou même la classification automatique des cibles et des structures entièrement par ordinateur. Le traitement numérique de l'imagerie de télédétection exige que les données soient enregistrées et disponibles dans un format numérique convenable pour l'entreposage sur disques ou cassettes informatiques.

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

Les systèmes de télédétection satellitaire fournissent des *données numériques* plutôt que des *documents analogiques* (photographies) : elles sont disponibles soit sous forme de fichiers numériques sur support informatique (bandes magnétiques ou CD-ROM), soit sous forme de *restitutions* photographiques. Ces données sont fournies par les capteurs numériques enregistrant l'énergie lumineuse reçue qui se traduit par une intensité électrique (signal analogique). Le signal est ensuite échantillonné puis codé pour obtenir une grille de valeurs numériques appelées « comptes numériques ».

1.9. Structure de l'image numérique

La structure de l'image numérique de télédétection est en tout point semblable à celle d'un fichier en mode image tel qu'il est défini en système d'information géographique (SIG). Elle est divisée en deux parties : l'en-tête et la matrice numérique de n lignes et m colonnes.

L'en-tête contient la métadonnée, c'est-à-dire toutes les informations que le producteur de l'image juge utiles de fournir à l'utilisateur : les informations relatives aux résolutions spatiale, spectrale et radiométrique, aux caractéristiques du radiomètre, à l'orbite du satellite ainsi qu'à la date de la prise de vue. Ce fichier n'intervient que pour l'interprétation et la mise en géo référencé.

La matrice numérique est généralement formée de nombres entiers compris entre 0 et 255. Chaque élément correspond, en mode discret, à une luminance spectrale relative à une portion

élémentaire du sol, le pixel (abréviation de Picture Élément). Le pixel représente ainsi le plus petit élément constitutif d'une image numérique (image BITMAP). Chaque pixel est caractérisé par :

- son indice de ligne i ;
- son indice de colonne j ;
- son compte numérique.

1.9.1. La définition

On appelle définition le nombre de pixels constituant l'image, c'est-à-dire sa dimension informatique (le nombre de colonnes de l'image que multiplie son nombre de lignes). Une image possédant 640 pixels en largeur et 480 en hauteur aura une définition de 640 pixels par 480, notée *640x480*.

1.9.2. La résolution

La résolution des images numériques est définie par le nombre de pixels par millimètres. En télédétection, on exprime la résolution des images par la taille de la zone couverte par un pixel. Chaque pixel de l'image correspond à une partie de la surface de la terre. On parle alors de "résolution-sol".

1.9.3. Echantillonnage

L'image est modélisée par une fonction $f(x,y)$ où x et y représentent des coordonnées spatiales exprimées dans un repère arbitraire et f est l'intensité lumineuse (réflectance) émanant du point (x,y) pour une gamme de longueur d'ondes données. L'image doit être discrétisée en espace et en amplitude, pour pouvoir être traitée par un ordinateur. Nous obtenons une matrice de L lignes, C colonnes et K niveaux d'intensité de $f(x,y)$.

1.9.4. Formats d'images

Les images numériques sont mises sur le marché en de très nombreux formats. Avec de nombreuses variantes, on connaît deux modes principaux d'organisation des données d'images multi bandes : le format BSQ (Band Séquentiel) et BIL (Band Interleaved by Line). Sous le mode BSQ, les bandes spectrales sont enregistrées l'une à la suite de l'autre alors que sous BIL, on stocke d'abord la première ligne de chaque bande, puis la deuxième de chaque bande, et ainsi de suite.

La diversité des formats a pour origine le souhait de répondre de manière optimale à des situations particulières. Certains formats se sont tout de même imposés et servent surtout à l'échange de données, (parmi eux) : BMP (Bit Map), TIFF (Tagged Image File Format), GIF (Graphic Interchange Format) ...etc.

1.9.5. Numérisation

Une image peut être numérisée selon deux modes :

1.9.5.1. Mode couleur RVB

RVB est une composante du mode colorimétrique ; c'est un type d'organisation des couleurs d'une image. Une image rvb est composée de 3 couches de couleurs : rouge, verte et bleue. Chaque pixel va par conséquent être composé d'une certaine quantité de rouge, de vert et de bleu. Si chaque couleur est codée sur 8bits (256 teintes par composante). Etendu aux trois composantes de base, on obtient un codage sur 24 bits qui autorise une palette de 16777216 teintes simultanées de couleurs.

1.9.5.2. Mode multi niveaux (niveaux de gris)

Le niveau de gris est défini comme une couleur dont la valeur des trois composantes primaires : R, V, B sont égales. D'où la possibilité de définir 256 niveaux de gris.

1.10. Principe de visualisation d'un canal d'une image numérique

Le principe de visualisation d'un canal d'une image est d'associer un niveau de gris ou une couleur à chaque compte numérique. Modifier la dynamique d'une visualisation, revient à introduire une fonction de correspondance entre les comptes numériques et une gamme de couleurs, afin d'augmenter le contraste global de l'image [10].

1.10.1. Visualisation en couleur

Chaque compte numérique prend une valeur comprise entre deux bornes extrêmes qui sont le plus souvent 0 et 255 (8bits). Pour obtenir une visualisation en couleur, on utilise une palette ordonnée de couleurs attachée à l'image appelée table des couleurs. On parle alors de couleurs **indexées** : la valeur associée à un pixel renvoie à l'entrée correspondant à cette valeur dans la table, dans laquelle on dispose de la représentation complète de la couleur considérée. La table de couleurs utilisée par défaut est « arc-en-ciel » qui reprend les couleurs

du spectre par ordre croissant de longueurs d'ondes : violet, bleu, cyan, vert, jaune, orange, rouge.

1.10.2. Visualisation en niveaux de gris

On ne code ici plus que le niveau de l'intensité lumineuse, généralement sur un octet (256 valeurs). Par convention, la valeur zéro représente le noir (intensité lumineuse nulle) et la valeur 255 le blanc (intensité lumineuse maximale). Une gamme d'intensités croissante de gris correspond aux valeurs intermédiaires.

1.10.3. Histogramme d'un canal

L'histogramme des niveaux de gris ou des couleurs d'une image est une fonction qui donne la fréquence d'apparition de chaque niveau de gris (couleur) dans l'image. Il permet de donner un grand nombre d'information sur la distribution des niveaux de gris (couleurs) et de voir entre quelles bornes est répartie la majorité des niveaux de gris (couleurs) dans les cas d'une image trop claire ou d'une image trop foncée.

L'histogramme peut être utilisé pour améliorer la qualité d'une image (Rehaussement d'image) en introduisant quelques modifications, pour pouvoir extraire les informations utiles de celle-ci. L'histogramme peut avoir l'une des représentations graphiques suivantes :

- La forme « colonnes ».
- La forme « bâton ».
- La forme « graphe ».

L'histogramme peut avoir une représentation « numérique », dans ce cas il est sous forme d'un tableau présentant en entrée les valeurs des comptes numériques et en sortie le nombre de pixels associés à chacune d'elles.

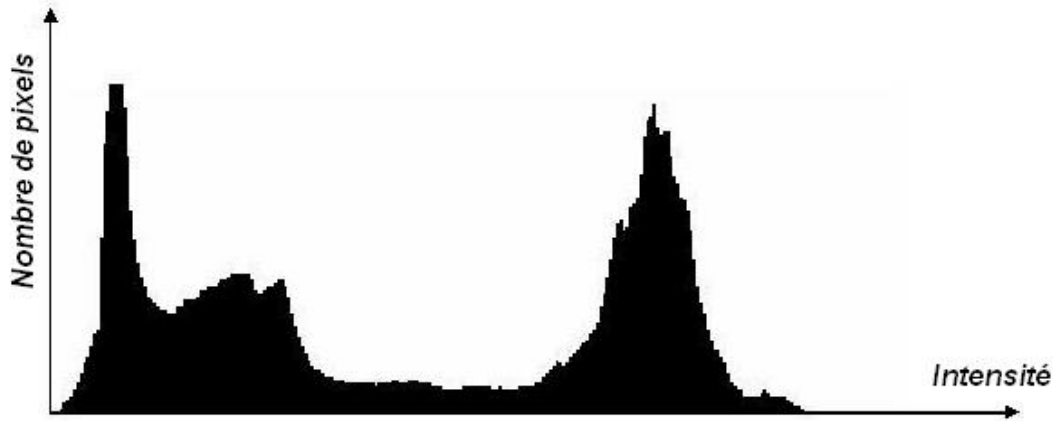


Figure1.5 : Représentation graphique d'un histogramme

1.10.3.1. Etirement de l'histogramme

L'étirement d'histogramme (aussi appelé "expansion de la dynamique") consiste à répartir les fréquences d'apparition des pixels sur la largeur de l'histogramme. Ainsi il s'agit d'une opération consistant à modifier l'histogramme de telle manière à répartir au mieux les intensités sur l'échelle des valeurs disponibles et par conséquent augmenter le contraste global de l'image. Ceci revient à étendre l'histogramme afin que la valeur d'intensité la plus faible soit à 0 et que la plus haute soit à la valeur maximale M . Cela se fait, en pratique, grâce à des tables de codage dont la valeur d'entrée représente la valeur possible du pixel et en sortie la valeur visualisée. De cette façon, si les valeurs de l'histogramme sont très proches les unes des autres, l'étirement va permettre de fournir une meilleure répartition afin de rendre les pixels clairs encore plus clairs et les pixels foncés proches du noir.

1.10.3.2. Etirement linéaire de l'histogramme

Supposons que dans une image donnée, l'intervalle des niveaux de gris utilisés ne s'étende pas de 0 à M . Soient \min et \max les niveaux de gris minimum et maximum des pixels de l'image. L'étirement de contraste consiste en l'application aux niveaux de gris de l'image d'une fonction linéaire f telle que $f(\min) = 0$ et $f(\max) = M$. On a ainsi :

$$f(x) = M (x - \min) / (\max - \min) \quad (1.3)$$

Normalement la fonction f est définie sur l'intervalle $[\min, \max]$, mais s'il faut la définir sur l'intervalle $[0, M]$, on l'étend en posant $f(x) = 0$ pour x entre 0 et \min et $f(x) = M$ pour x entre \max et M , comme illustré ci-dessous :

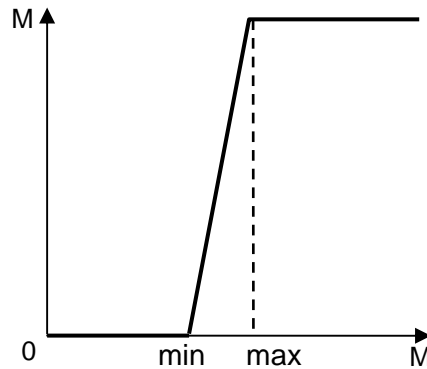


Figure1.6 : Etirement linéaire d'un histogramme

1.11. Visualisation simultanée de plusieurs canaux ou composition colorée

Le principe de visualisation de chacun des canaux est similaire au procédé de visualisation d'un canal en niveaux de gris. On commence par choisir deux ou trois canaux d'une image multi spectrale et associer à chacun d'eux une des trois couleurs primaires : rouge, vert, bleu. On réalise alors une composition colorée où la couleur de chaque pixel de cette image est une synthèse additive des couleurs présentes dans chaque canal. La composition colorée standard attribue les couleurs suivantes aux canaux SPOT: **bleu: XS1; vert : XS2: rouge XS3** [10]. La couleur infrarouge n'existant pas, il n'est pas possible d'associer à chaque canal la couleur correspondante à son domaine de longueur d'onde. On notera alors un affichage en fausses couleurs qui consiste à décaler ces domaines de longueurs d'ondes. On aura alors : [10]

<u>Longueur d'onde</u>	<u>couleur attribuée</u>
Vert	Bleu
Rouge	Vert
Proche Infrarouge	Rouge

1.12 .Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les systèmes d'observation spatiale, plus précisément le satellite SPOT et LANDSAT. Nous avons évoqué aussi les propriétés physiques de la télédétection, en particulier le rayonnement électromagnétique. Pour finir, nous avons parlé des images satellitaires, notamment les images numériques. Les différents modes de visualisation de ces images sont mentionnés ainsi que quelques définitions. Toutes ces notions et ces définitions nous permettent de mieux aborder notre travail qui porte sur les images satellitaires.

CHAPITRE 2

Correction Radiométrique

1. Introduction

Grace à la télédétection ; les satellites d'observation de la terre fournissent aux utilisateurs des mesures du rayonnement solaire réfléchi ou émis par la surface du sol. Ce rayonnement solaire interagit avec l'atmosphère, ce qui conduit à la variation de son intensité et sa direction au cours du temps.

Ces interactions constituent un bruit fluctuant qui gêne l'exploitation de l'information. C'est à ces problèmes que nous nous sommes intéressés dans ce chapitre en leur apportant des solutions correctives.

2. Les signatures spectrales des objets, leur signification géochimique et leur contrôle en télédétection spatiale

La réponse spectrale d'un objet, encore appelée « signature spectrale », correspond à la courbe représentative de l'énergie réfléchie par cet objet, par rapport, à celle qu'il reçoit dans un domaine de longueurs d'onde donné.

Les signatures spectrales peuvent être obtenues de différentes manières :

- **en laboratoire**, à l'aide d'un spectrophotomètre, il est possible d'obtenir des courbes en continu qui sont extrêmement précises.

L'enregistrement continu des spectres peut se faire en réflectance ou en absorption.

Nous avons par définition :

$$R = I_0 / I \quad \text{et} \quad A = \ln (I_0 / I) \quad (2.1)$$

I: intensité de la lumière incidente sur une gamme de longueur d'onde.

I_0 : intensité de la lumière réfléchie sur une gamme de longueur d'onde.

$0 \leq R \leq 1$ $R=0$ correspond à l'absorption totale (0% de réflexion) .

$R= 1$ correspond à la réflexion totale de radiation par l'objet (100 % de réflexion)

La figure 2.1 représente les valeurs obtenues au laboratoire par le spectrophotomètre [6].

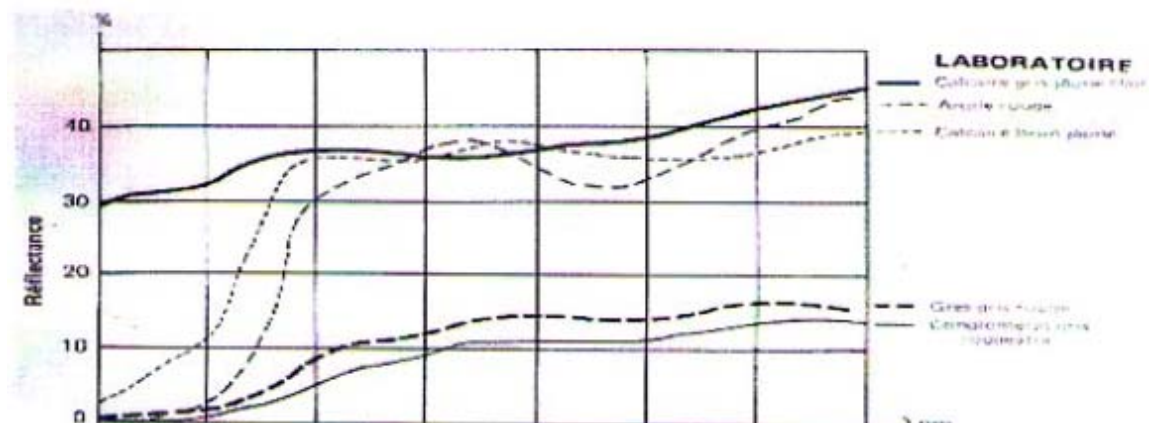


Figure 2.1 : Réflectance spectrales des roches (laboratoire).

• **Sur le terrain**, l'appareil utilisé est le radiomètre portable (type MATRA, CIME, L, etc.). Un radiomètre est un appareil réalisé en simulation des appareils embarqués sur les satellites. Il comporte donc un système optique de visée au sol (localisation de la surface observée) et un double système de mesure de l'énergie incidente (sphère intégratrice extérieure reliée à un détecteur par des fibres optiques) et de mesure de l'énergie réfléchie par la cible visée (détecteur au silicium dont le domaine spectral est limité de 400 à 1050 nm).

Les mesures de l'énergie incidente et de l'énergie réfléchie sont donc réalisées conjointement et l'appareil fournit également, dans ce cas, la mesure de réflectance de la surface étudiée [7].

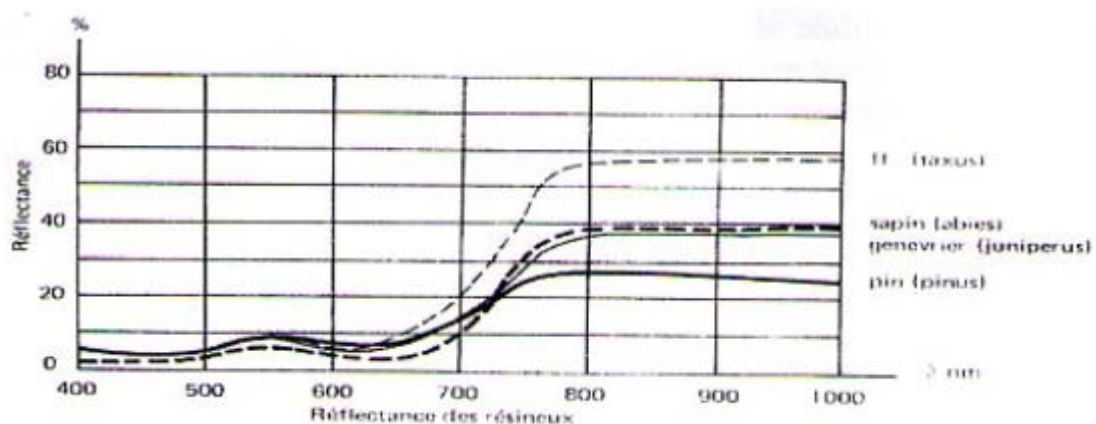


Figure 2.2 Réflectance des résineux (radiomètre terrain).

Par extraction des valeurs de luminance fournie par les données satellitaires.

Les données fournies par les capteurs satellitaires correspondent à la luminance des pixels observés par le satellite. Ces données sont codées de 0 à 255 (8 bits) ou de 0 à 127 ou encore de 0 à 64, suivant le type de capteur utilisé. En général, elles subissent des corrections qui perturbent leur véritable signification.

3. Analyse des réponses spectrales

La réponse spectrale d'un objet caractérise ce dernier. Elle demeure constante tant qu'il ne subit pas de modification dans sa structure physico-chimique.

Le diagramme représentatif d'une signature spectrale est caractérisé par des zones de faible réflectance et des zones de forte réflectance ;

➤ Classiquement, on distingue deux grands type qui provoquant l'absorption d'énergie :

1. dans le domaine du visible, il s'agit d'une absorption liée à des phénomènes de transitions électroniques se produisant dans les orbitales électroniques de certains atomes ionisés;
2. dans le domaine du Proche infrarouge et de l'infrarouge moyen, l'absorption d'énergie est provoquée par des processus vibratoires, excitation des liaisons de certains groupements anioniques tels que OH, CO₃, SO₄ [8].

Dans tous les cas, la réflectance diffère d'un objet à un autre et c'est grâce à cette information qu'on arrive à identifier les objets sur une image satellitaire.

S'il est aisé d'interpréter les réponses spectrales fournies en termes de réflectance (entre 0 % et 100 %), il est beaucoup plus aléatoire de réaliser cette même analyse en utilisant les données numériques, exprimées en terme de luminance apparente (les comptes numériques entre 0 et 255), fournies par ces différents capteurs embarqués au niveau du satellite.

De plus, les données numériques enregistrées, sont perturbées par plusieurs facteurs : Une égalisation réalisée dans le but de tenir compte du fait qu'une scène parfaitement uniforme et dont les valeurs de luminance devraient être totalement identiques, est en réalité représentée par des données numériques plus ou moins hétérogènes car elles sont affectées de manière inégale, par un bruit produit par le détecteur. Ce dernier possède également une sensibilité qui

lui est propre, vis à vis de la lumière incidente qu'il reçoit. Or une scène n'est pas générée par un seul détecteur, mais des lignes de détecteurs (6 pour le MSS, 12 pour le TM,

3000 pour le XS et 6000 pour le PANCHROMATIQUE) dont les caractéristiques (bruit + sensibilité) ne sont rigoureusement semblables [9].

L'image numérique d'une scène est donc perturbée par un certain lignage. Il est donc opportun de procéder à la recherche de coefficients d'égalsation des

Destinés à rendre la scène plus homogène. Cependant, on conçoit que dès lors, les valeurs de luminance fournies ne soient plus représentatives des phénomènes d'absorption décrits ci-dessus (voir figure 2.3 et figure 2.4)

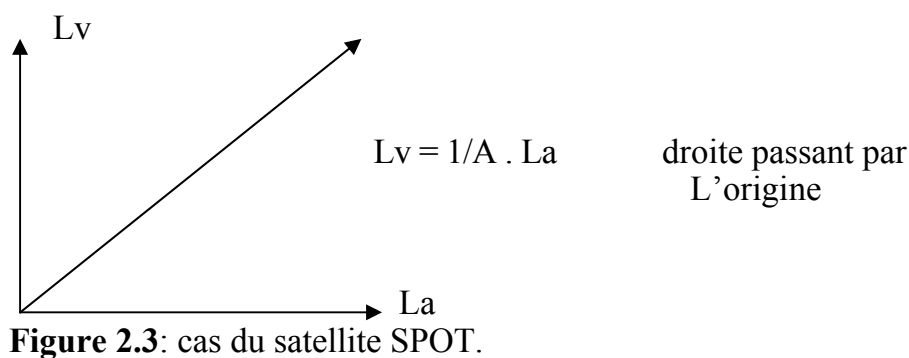
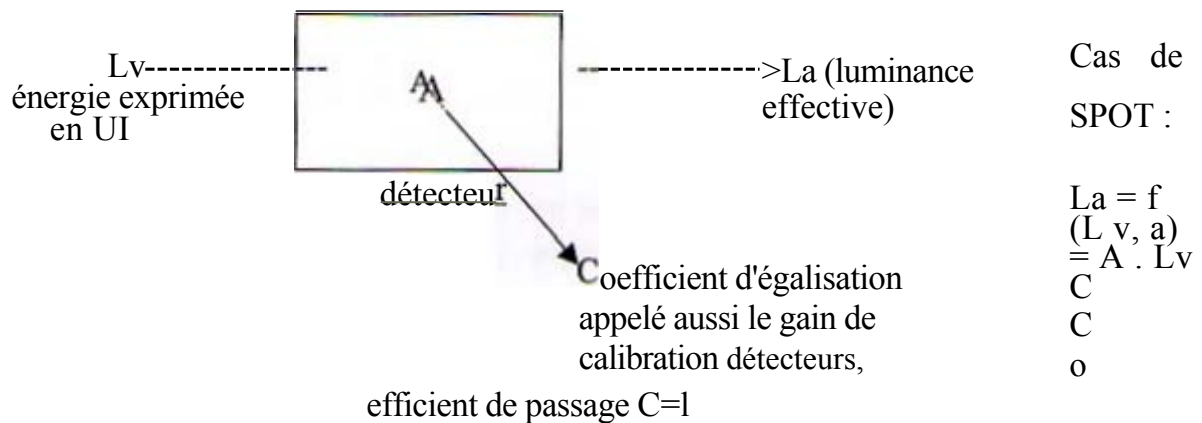


Figure 2.3: cas du satellite SPOT.

Cas de LANDSAT:

$$L_v = (A * L_a + B) / L$$

Avec :
 A = gain de calibration.
 B = calibration absolue
 appelé offset.
 L = largeur de la bande.

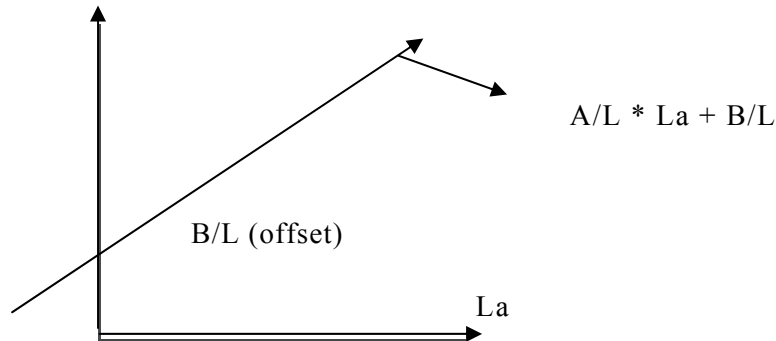


Figure 2.4: cas du satellite LANDSAT

Dans le cas de SPOT : 0 en entrée == 0 en sortie.

Dans le cas de TM : 0 en entrée == 1 signal non nul à la sortie (offset).

• Un autre problème, peu abordé actuellement, doit cependant être souligné: il s'agit du phénomène de saturation des détecteurs. Schématiquement, un détecteur donné, travaille dans une certaine plage d'énergie (caractérisée par E_{min} et E_{max}) et, pour des énergies élevées ($> E_{max}$), il est possible que la valeur numérique fournie ne soit pas représentative du phénomène d'absorption — réflexion qui se produit au sol. Ce phénomène de saturation des détecteurs se produit aussi sur des radiomètres portables, on utilise des bonnettes de filtres atténuateurs pour le radiomètre MATRA par exemple.

• Enfin, lors de son double trajet (pénétration — retour) dans l'atmosphère, un rayonnement de longueur d'onde donné va subir de nombreuses modifications au niveau énergétique, en fonction de la présence d'eau (aérosols, nuages, brouillards etc.), de gaz (CO_2 en particulier).

Ces modifications peuvent se traduire par des augmentations significatives de l'énergie réfléchie (réflectance atmosphérique des particules, des nuages) ou par des diminutions de l'énergie réfléchie (réflectance diffuse accentuée, retro réflexion) [10].

Actuellement, deux possibilités sont offertes :

1. Compte tenu du fait qu'il est toujours possible d'effectuer les corrections relatives à l'égalisation des détecteurs, c'est à dire de réaliser *un étalonnage absolu permettant d'obtenir les valeurs de luminance « vraie »* (pourcentage de réflectance) par traitement des valeurs en luminance relative (les comptes numériques entre 0 et 255) fournies par les capteurs, et en tenant compte des phénomènes résultant de la saturation des détecteurs, il ne reste plus qu'à réaliser les corrections atmosphériques. Cette correction peut être théoriquement réalisée à l'aide d'un logiciel très perfectionné (logiciel 5S, *réalisé par le laboratoire de physique atmosphérique de Lille, France*). Cependant, pratiquement, le logiciel est inutilisable car il est nécessaire de l'alimenter en données diverses, caractérisant parfaitement l'état de l'atmosphère au moment de l'observation de la *scène, telles que : les 34 levés du profil d'un radiosondage, la pression, la température, la densité en H₂O, la densité en O₃, les quantités d'eau-vapeur, etc..* Autant de données réellement nécessaires pour réaliser une très bonne correction des valeurs, mais qui sont pratiquement introuvables, dans le cas de nos applications.

2. Pour des raisons évidentes, de contrôle des résultats acquis et de possibilité de comparer les données corrigées obtenues à partir des observations satellitaires avec les mesures d'un radiomètre de terrain, il est opportun de travailler au niveau non pas des luminances (comptes numériques entre 0 et 255) mais au niveau des valeurs de pourcentage de réflectance.

Si on admet que les valeurs de réflectance pourcentage sont vraies au niveau des mesures au sol (radiomètre ou spectrophotomètre), il devient nécessaire d'obtenir également les valeurs de réflectance pourcentage à partir des données numériques fournies par les stations de réception au sol.

La conversion et la correction sont possibles en considérant les mesures réalisées hors atmosphère. En effet, il est possible d'obtenir, par mesures directes réalisées à bord des capteurs spatiaux (embarqués sur d'autres satellites), la valeur de l'irradiance solaire, à l'instant même de l'observation de la scène, et pour chaque domaine spectral des canaux utilisés et en tenant compte de l'angle zénithal solaire à ce même instant

(ces données figurent d'ailleurs dans les fichiers « entêtes » des fichiers image voir annexe).

Les corrections relatives à l'égalisation des détecteurs et à leur saturation sont assis réalisables. Les coefficients nécessaires aux calculs de ces corrections sont fournies (dans les fichiers entêtes) par le constructeur du capteur.

Finalement, on peut donc connaître la valeur exacte de l'énergie incidente, puis estimer raisonnablement celle de l'énergie réfléchie au niveau du capteur: le calcul de la réflectance pourcentage hors atmosphère est donc réalisable.

4. Model Uni temporel

4.1. Conversion de la réflectance relative en valeur luminance «vraie»

4.1.1. Données LANDSAT (TM & MSS) : La conversion de la luminance relative CN (compte numérique) à la luminance « vraie » L_λ (l'énergie qui a excité le détecteur au niveau du satellite) est obtenue avec les équations et les constantes suivantes, en connaissant les valeurs de la luminance minimale et maximale calculées pour chaque canal donné et pour chaque type de capteur (données fournies par le constructeur) Les luminances sont exprimées en milliwatts par centimètre carré par stéradian par ($\text{mw.cm}^{-2}.\text{ster}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$) [11].

$$L_\lambda = L_{\min \lambda} + (L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}).\text{CN} / (\text{Q cal max}) \quad (2.2)$$

Avec :

CN : valeur de la donnée numérique en luminance relative (compte numérique)

$L_{\min \lambda}$ { : Valeurs de luminance minimum et maximum et
 $L_{\max \lambda}$ } calculée pour un canal donné et pour chaque type de capteur
 L_λ : luminance « vraie » (exprimée en $\text{mw.cm}^{-2}.\text{ster}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$)
 $\text{Q cal max} = 255, 127, 63$ suivant les valeurs numériques fournies par les capteurs.

Les constantes de calibration radiométrique absolue à court et à long terme sont modifiées après le lancement du satellite. Ceci est du à l'inconsistance des bandes des radiomètres embarqués sur le satellite (voir tables 2.1 et 2.2).

Les tables 2.1 et 2.2 fournissent les paramètres multi spectrales $L_{\min \lambda}$ et $L_{\max \lambda}$ qui sont utilisés à des dates différentes et par différents systèmes à la N.A.S.A.₁ Les unités de la luminance spectrale dans ces tables sont données en $\text{mw.cm}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ [13,14].

La valeur maximale de *CN* après calibration nommée $Q_{\text{cal max}}$ est de 255 pour toutes les données TM et de 127 pour toutes les données MSS exceptée la bande 4 ($0.8 - 1.1 \mu\text{m}$) pour certaines périodes du temps. Les données de la bande 4 du MSS pour LANDSAT 1-3 acquises avant février 1979 et les données MSS de LANDSAT 4 traitées avant le 22 octobre 1982 sont utilisées à $Q_{\text{cal max}}=63$.

date des données du satellite	MSS 4		MSS 5		MSS 6		MSS 7	
LANDSAT 1	0.0	24.821224	0.0	20.0	0.0	17.6	0.0	15.3
LANDSAT 2								
< 16.07.75	1.0	2221.0	0.7	15.6	0.7	14.11110	0.5	13.8
2 16.07.75	0.8	26.3	0.5	17.6	0.6	15.2	0.6	13.0
LANDSAT 3								
< 01.06.78	0.4	22.0	0.3	17.5	0.3	14.5	0.1	14.7
2 01.06.78	0.4	25.9	0.5	17.9	0.5	14.9	0.1	12.8
LANDSAT 4								
< 26.08.82	0.2	25.0	0.6	18.0	0.6	15.0	0.3	13.3
26.08.82-								
31.03.83	0.2	23.0	0.4	18.0	0.4	13.0	0.3	13.3
2 01.04.83	0.3	23.8	0.5	16.4	0.5	14.2	0.4	11.6
LANDSAT 5								
< 06.04.84	0.4	24.0	0.4	17.0	0.4	15.0	0.3	11.2
06.04.84-								
08.11.84	0.3	26.8	0.3	17.9	0.4	15.9	0.3	12.3
2 09.11.84	0.3	26.9	0.3	17.9	0.5	14.0	0.4	12.3

Table 2.1 : valeur de luminance minimale et maximale pour les données MSS (en $\text{mW.cm}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)

	Avant août 1983		avant le 15janvier1984		Après le15janvier1984	
	L min λ	Lmax λ	L min λ	Lmax λ	L min λ	L max λ
TM ₁	-0.152	15.842	0.000	14.286t	-0.15	15.21
TM ₂	-0.284	30.817	0.0	29.125	-0.28	29.68
TM ₃	-0.117	23.463	0.0	22.500	-0.12	20.43
TM ₄	-0.151	22.432	0.0	21.429	-0.15	20.62
TM ₅	-0.037	3.242	0.0	3.000	-0037	2.719
TM ₆	0.20	1.564	0.484	1.240	0.1233	1.560
TM ₇	-0.015	1.700	0.000	1.593	-0.015	1.438

Tab 2.2 : valeur de luminance minimale et maximale pour les données MSS (mW.cm⁻¹.ster⁻¹.μm⁻¹)

	HRVI				HRV2			
	PAN	XSI	XS2	XS3	PAN	XSI	XS2	XS3
≤20.03.8	0.605	0.550	0.405	0.608	0.605	0.560	0.445	0.623
≤20.06.8	0.598	0.536	0.388	0.589	0.598	0.541	0.428	0.606
≤20.03.87	0.592	0.510	0.363	0.563	0582	0.512	0.407	0.586
≤520.09.	0.583	0.496	0.353	0.554	0.574	0.498	0.400	0.580

Tab 2.3 : coefficients de calibration utilisés avant le 20.09.87 pour les données SPOT (mW.cm⁻¹.ster⁻¹.μm⁻¹)

4.1.2 Données XS et PANCHROMATIQUE de SPOT : De même, les luminances « vraies » et relatives dans le cas de SPOT sont liées par la relation suivante :

$$L_{\lambda} = X_k / (A_k \cdot G_{mk}) \quad (2.3)$$

Avec : X_k : valeur de la luminance relative dans le canal

A_k : coefficient relatif à l'égilisation des détecteurs (voir table 2.3)

G_{mk} : coefficient d'égilisation (on prend $G_{mk} = 1$)

L_{λ} : luminance « vraie »

4.2. Calcul du pourcentage extra- atmosphérique (Albédo spectral planétaire)

Cette conversion est réalisée en combinant la luminance « vraie » L_λ déjà calculée, avec les valeurs de l'irradiance solaire $E_{\text{sun } \lambda}$ réalisées hors atmosphère. Ces dernières sont réalisées pour chaque domaine spectral des canaux utilisés (TM, MSS, XS, PANC), en tenant compte de l'angle zénithal.

Considérons le système terre-atmosphère comme étant une sphère. Un point P quelconque de cette sphère reçoit dans une bande spectrale donnée l'éclairement [12]:

$$E_{\text{sun } \lambda} \cdot \cos(\theta_s)$$

Avec : θ_s = angle zénithal

$E_{\text{sun } \lambda}$ = irradiance solaire spectrale extra-atmosphérique

exprimée en $\text{m W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$

On suppose que le point P réfléchit la radiation vers l'espace d'une manière isotrope.

La radiation captée sera alors :

$$\Pi \cdot L_\lambda \quad \text{avec } L_\lambda : \text{luminance « vraie » captée par le satellite.}$$

Justification du résultat précédent.

La radiation qui arrive au niveau du satellite est E_v telle que :

$$dE_v = L_\lambda \cdot d\omega$$

avec ω : angle solide sous lequel le satellite observe un pixel. En passant aux coordonnées sphériques :

$$E_v = \iint L_\lambda \cdot \sin(\theta_v) \cdot d\theta_v \cdot d\phi$$

Dans le cas isotrope (réfléchit de la même façon la radiation dans toutes les directions), c'est à dire le satellite observe une hémisphère :

$$E_v = \Pi \cdot L_v$$

La réflectance pourcentage est le rapport entre la radiation captée par le satellite et la radiation incidente sur le point P dans une bande spectrale donnée.

Ce qui donne lieu à :

$$Ra = (L_\lambda \cdot \Pi) / (E_{\text{sun } \lambda} \cdot \cos(\theta_s)) \quad (2.4)$$

La radiation dépend de la distance terre-soleil d . Ce facteur (d) représente un terme correctif du à l'hypothèse qu'on considère $E_{\text{sun } \lambda}$ comme constante solaire spectrale Calculée pour une distance astronomique égale à l'unité.

En tenant compte de ce facteur d , l'expression précédente devient :

$$Ra = (L_{\lambda} \cdot d^2 \cdot \Pi) / (E_{\text{sun } \lambda} \cdot \cos(\theta_s)) \quad (2.5)$$

Avec :

Ra : réflectance pourcentage extra-atmosphérique (Albédo spectral planétaire).

E_{sun} : valeur moyenne de l'irradiance solaire spectrale extra- atmosphérique.

Cette valeur est mesurée pour chaque bande spectrale correspondant à chaque canal des capteurs MSS, TM, PANC, et XS excepté la bande 6 de TM (thermique). Ces données fournies par le constructeur diffèrent d'un satellite à un autre (voir table 2.5 et 2.6).

L_{λ} : luminance « vraie » exprimée en $\text{mw} \cdot \text{cin}^{-2} \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \text{pm}^{-1}$.

θ_s : angle zénithal solaire (complément de l'angle de l'élévation solaire indiqué dans les fichiers entête des bandes magnétiques) (voir annexe

d : distance terre soleil exprimée en unités astronomiques(UA).

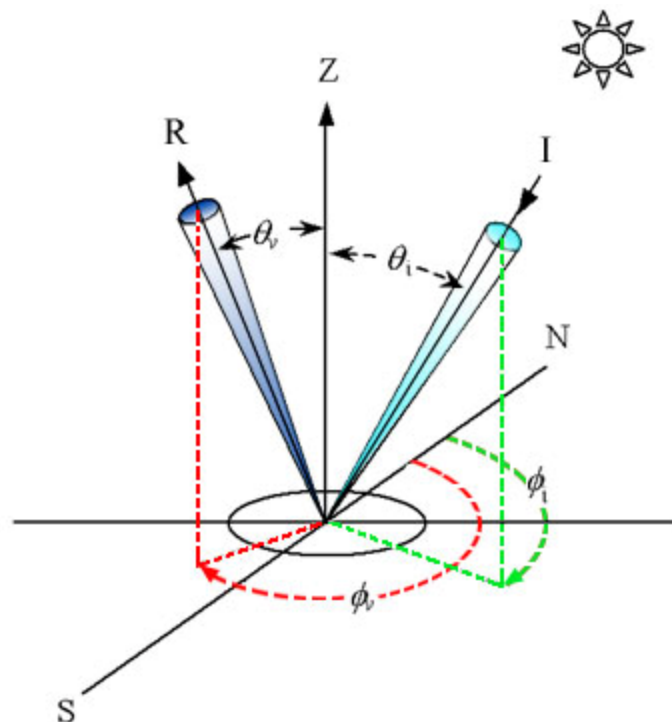


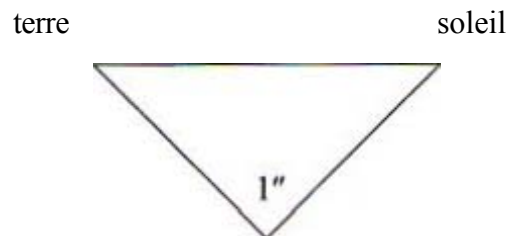
Figure 2.5. La géométrie d'illumination et de réflectivité.

Date	Parallaxe Horizontale Equatoriale	Demi-diamètre à 12 ^H UT	Distance à 0 ^H UT	
			U A	En kilomètre De kilomètres
Janv. 1	8.94	15 17.48	0.98333	14710
9	8.94	16 17.43	0.98336	11711
17	8.94	16 16.96	0.98378	11717
25	8.93	16 16.23	0.98453	11728
Fève. 2	8.92	16 15.25	0.98551	14743
10	8.91	16 13.97	0.98677	14762
18	8.90	16 12.39	0.98836	14786
26	8.88	16 10.63	0.99015	14812
Mars. 6	8.86	16 8.76	0.99205	14841
14	8.85	16 6.70	0.99419	14872
22	8.83	16 2.32	0.99641	14906
30	8.81	16 0.15	0.99868	14910
Avril. 7	8.79	15 57.96	1.00093	14974
15	8.77	15 55.83	1.00322	15008
23	8.75	15 53.88	1.00546	15042
Mai 1	8.73	15 52.06	1.00753	15072
9	8.71	15 50.36	1.00946	15101
17	8.70	15 48.89	1.01128	15129
25	8.68	15 47.70	1.01287	15152
juin. 2	8.67	15 46.72	1.01415	15171
10	8.66	15 45.96	1.01521	15187
18	8.65	15 45.53	1.01605	15200
26	8.65	15 45.41	1.01653	15207
juillet. 4	8.65	15 45.52	1.01668	15209
12	8.65	15 45.89	1.01658	15208
20	8.65	15 46.60	1.01620	15202
28	8.67	15 47.58	1.01546	15191
Août 5	8.66	15 48.74	1.01443	15176
3	8.68	15 50.16	1.01320	15157
21	8.69	15 51.84	1.01117	15153
29	8.71	15 53.67	1.00993	15108
Sept 6	8.74	15 55.67	1.00800	15079
14	8.74	15 57.69	1.00597	15049
22	8.76	15 59.90	1.00378	15016
30	8.78	16 2.10	1.00147	14982
Oct. 8	8.80	16 4.26	0.99919	14948
16	8.82	16 6.45	0.99694	14914
24	8.84	16 8.58	0.99469	14880
Nov. 1	8.86	16 10.47	0.99251	14848
9	8.88	16 12.22	0.99055	14818
17	8.89	16 13.83	0.98875	14792
Déc. 1	8.91	16 16.17	0.98714	14716
11	8.93	16 16.92	0.98470	14731
19	8.94	16 17.92	0.98392	14719

Table 2.4 : distance terre-soleil en UA (extraite de l'encyclopédie physique et spatiale, Annuaire du bureau des longitudes, Gauthier-Villars, PARIS).

1 UA = $1.49597870 \cdot 10^{11}$ m distance moyenne terre - soleil.

c'est la distance pour laquelle la parallaxe terre-soleil est égale à 1 (1 seconde d'arc)



Elle peut être calculée par interpolation, en utilisant la table de la connaissance des temps qui donne la distance par le développement en polynôme de Tchebychev. Ces distances sont publiées chaque année par le bureau de longitude (voir table 2.4).

Satellite	MSS 4	MSS 5	MSS 6	MSS 7
LANDSAT-1	185.2	158.4	127.6	90.4
	± 0.8	10.6	10.4	10.5
	185.6	155.9	126.9	90.6
LANDSAT -2	10.1	+ 0.4	10.6	10.3
	186.0	157.1	128.9	91.0
LANDSAT -3	10.3	10.6	10.5	10.6
LANDSAT -4	185.1	159.3	126.0	87.8
	± 0.2	± 0.7	± 0.3	± 1.0
LANDSAT -5	184.9	159.5	125.3	87.0
	± 0.2	± 0.3	± 0.1	± 0.7

Table 2. 5: valeur moyenne de l'irradiance solaire spectrale extra-atmosphérique (en $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)

Satellite	LANDSAT-4	LANDSAT-5
TM 1	195.8	195.7
TM 2	182.8	182.9
TM 3	155.9	155.7
TM 4	104.5	104.7
TM 5	21.91	21.93
TM 7	7.457	7.452

Table 2. 6: valeur moyenne de l'irradiante solaire spectrale extra-atmosphérique pour les bande TM

4.3 Estimation de la réflectance pourcentage au niveau du sol (Albédo spectral de surface)

Jusque là, nous avons calculé la réflectance pourcentage (pour chaque pixel de l'image) mesurée hors atmosphère. Il reste cependant à estimer la réflectance au niveau du sol pour pouvoir exploiter ces données à des fins thématiques.

La relation qui existe entre la réflectance hors atmosphère R_a et la réflectance réelle R (au niveau du sol) est donnée par [16,17] :

$$R_a = tg [R_{atm} + k \cdot R] \quad (2.6)$$

avec :

tg , R_{atm} et k sont des paramètres dépendant de l'angle zénithal et de l'état de l'atmosphère.

R_a : réflectance apparente (hors atmosphère).

tg : facteur de transmission gazeuse (qui traduit le phénomène d'absorption par le gaz).

R_{atm} : réflectance atmosphérique.

R : réflectance réelle de la cible (au niveau du sol).

K : coefficient multiplicatif qui traduit les effets de la transmission directs et diffus et les interactions multiples sol-atmosphère.

D'après les travaux sus cités, pour un ciel clair :

$-(tg \cdot Ratm)$ tend vers zéro ; $-(k \cdot tg)$ tend vers 1

Nous pouvons donc estimer raisonnablement la réflectance au niveau du sol par :

$$R = (L_{\lambda} \cdot d^2 \cdot \Pi) / (E_{\text{sun } \lambda} \cdot \cos(\theta_s)) \quad (2.7)$$

Notons que nous avons la possibilité de commander une image à ciel clair (taux de couverture nuageuse est donné dans les fichiers entêtes des fichiers images; voir annexe).

4.4 Calcul de la température hors atmosphère pour la bande TM6 (cas du thermique)

4.4.1 Principe physique d'un détecteur

La longueur électrique de sortie des détecteurs optiques est généralement un courant électrique. Le flux du signal optique reçu par le capteur crée un courant d'origine photoconducteur I_P qui s'ajoute au courant thermique I_O . Le courant I qui traverse le capteur est alors :

$$I = I_P + I_O$$

Le courant I_P est dû à la recombinaison de paires électron-trou sous l'action de l'énergie des photons $h \cdot \nu$ (h : constante de Planck et ν : fréquence de la radiation) qui composent un rayonnement électromagnétique.

Par contre, l'existence de I_O a deux origines principales :

- une origine interne qui est la libération de porteur de charge par excitation thermique;
- une origine externe qui est le rayonnement thermique à dominante infrarouge émis par le milieu environnant.

De là, nous déduisons que si le rayonnement incident sur le détecteur est visible, nous tiendrons compte uniquement de la variation de I_P , par contre I_O devient plus important si le rayonnement est thermique et nous parlerons ainsi de température de l'objet rayonnant.

4.4.2 Quelques définitions

- **La luminance spectrale d'un corps naturel.**

$$L_{\lambda}(T) = \varepsilon(T) \cdot L_{\lambda}^{\circ}(T)$$

Avec :

$L_{\lambda}^{\circ}(T)$: est la luminance du corps noir dans les mêmes conditions que le corps naturel.

$\varepsilon(T)$: l'émissivité du corps

- **Température radiométrique ou équivalente corps noir.**

C'est la température T_b d'un corps noir émettant la même luminance que le corps naturel à la même température T

(T est la température thermique) .

La température T est donnée par [15] :

$$T = c_2 / (\lambda \ln \{ \varepsilon (\exp c_2 / (\lambda T_b) - 1) + 1 \}) \quad (2.8)$$

4.4.3 La température au niveau du satellite

Dans les grandes longueurs d'ondes (cas du thermique), l'énergie qui atteint le satellite est la combinaison :

- d'une énergie émise par l'atmosphère avec une émissivité et une température T_a .
- d'une énergie émise par la terre avec une émissivité ε_s et une température T_s .

$$E_{sat} = \varepsilon_a \cdot \partial \cdot T_a^4 + \varepsilon_s \cdot \partial \cdot T_s^4 \quad (2.9)$$

∂ : constante de Stéphan Boltzman.

Cette expression explique que l'énergie captée par le satellite ne dépend que de la température du sol et celle de l'atmosphère.

L'image de la bande 6 de TM (thermique) peut de même être convertie de la luminance « vraie » L_{λ} (voir équation 2.1) en une variable physique plus pratique qui est la température émise par le système sol-atmosphère. Par analogie à l'expression (2.8), cette grandeur physique (température sol-atmosphère) peut être obtenue par l'expression ci-dessus, en utilisant les constantes de calibration [11] fournies par le

constructeur (voir table 2.7).

$$T = k_2 / \ln [(k_1 / L_\lambda) + 1]$$

avec :

T : température effective au niveau du satellite (Système sol-atmosphère) en degrés Kelvin.

K₁: constante de calibration en ° Kelvin .

K₂ : constante de calibration en $\text{mw.cm}^{-2} \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

L_λ : luminance « vraie » calculée à partir de l'équation (2. 1)

Il reste cependant à estimer la température au sol à partir de celle du système sol- atmosphère en considérant une image à ciel clair.

Satellite	Constante 1 K ₁ (k)	Constante 2 K ₂ ($\text{Mw.cm}^{-1} \cdot \text{str}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)
LANDSAT-4	67.62	1284.3
LANDSAT-5	60.776	1260.56

Table 2.7 : constante de calibration pour la bande TM6.

5. Model multi temporel : Dans le cas d'une étude d'un phénomène évolutif (déforestation, désertification, dégradation du milieu naturel etc.), l'utilisation des données prises à des dates différentes est tout indiquée. Cependant, ces données multi temporelles n'ont un sens que si elles sont calibrées entre elles. Il s'agit au fait de corriger les comptes numériques d'une image ima₂ prise à la date t₂ pour les rendre comparables à ceux de l'image ima₁ prise à la date t₁.

Ces images sont tout d'abord corrigées géométriquement; on obtient des ortho images superposables entre elles. Elles vont ensuite subir des corrections radiométriques qui nécessitent de comprendre l'influence de certains facteurs sur la valeur des comptes numériques enregistrés pour pouvoir les combiner.

5.1. Facteurs de variation des comptes numériques entre images (prise à des dates différentes) : Dans le cas d'une étude multi temporel, Entre deux images, trois facteurs principaux sont susceptibles de modifier la mesure au niveau du capteur embarqué [18]

- **L'état du milieu étudié :** afin de limiter les différences d'état (état d'un couvert végétal par exemple), difficiles à prendre en compte, les images doivent être sélectionnées. à la même période de l'année, ce qui permet de limiter la différence spectrale relative à deux saisons différentes (ex : Tous les couverts végétaux n'ont pas la même activité chlorophyllienne durant les saisons. ce qui modifie leur réponse spectrale).

- **La géométrie d'observation:** la réflectance est directionnelle et dépend de l'angle zénithal solaire θ_s , de l'angle de prise de vue θ_v et de l'azimut relatif (complément de θ_s) entre les directions d'observation et d'éclairement. En prenant des images à la même époque de l'année, l'angle d'incidence solaire sera considéré comme identique. Les effets liés aux conditions d'observation sont alors comparables pour un même pixel d'une date à une autre.

- **Les conditions atmosphériques :** vont jouer sur la réflectance apparente d'un objet car la composition très variable dans le temps de l'atmosphère (eau, aérosols etc.) modifie l'importance des phénomènes d'absorption et de diffusion par ses composants.

Rappelons que la relation entre la réflectance hors atmosphère et la réflectance réelle est donnée par l'équation (2.6).

En ce qui concerne les deux premiers facteurs, nous nous sommes placés dans des conditions comparables. Seul l'influence du troisième, les conditions atmosphériques nécessite une correction.

5.2 Correction relative des effets atmosphériques

Il s'agit donc de corriger les comptes numériques d'une image ima_2 , prise à la date t_2 pour les rendre comparables à ceux de l'image ima_1 prise à la date t_1 .

Comme nous l'avons déjà cité au paragraphe 3, la correction idéale consisterait à utiliser les paramètres atmosphériques qui sont très rarement disponibles. Nous allons proposer une méthode de correction relative basée sur la recherche d'invariants entre images à partir des seules données image et applicable sous certaines conditions, aux quelles répond le milieu étudié.

Deux hypothèses vont nous permettre de réaliser cette transformation.

Hypothèse 1 :

Les perturbations atmosphériques sur la réflectance du sol sont déjà approximées par une loi linéaire (relation 2.6). Elle va nous permettre, pour les pixels inchangés, d'établir une relation linéaire entre comptes numériques de deux images prises à des dates différentes.

En utilisant les relations (2.5) et (2.6), nous avons pour une image prise à la date i :

$$L_i = t_{gi} \cdot [\cos \theta_{si} \cdot (E_{si}) / \Pi] \cdot [R_{atm_i} + k_i \cdot R_i] \quad (2.11)$$

Les relations (2.3) et (2.2) peuvent être exprimées à leur tour (pour une date t_i) par :

$$CN_i = A \cdot L_i + B \quad (2.12)$$

Pour les capteurs MSS et TM :

$$A = 255 / (L_{\max} - L_{\min})$$

$$B = 255 \cdot L_{\min} / L_{\max} - L_{\min}$$

Dans le cas des données SPOT :

$$A = A_k \cdot L_{\lambda i}, \quad B = 0$$

Pour les peuplements inchangés

entre dates t_1 et t_2 on a :

$$R_1 = R_2 = R \quad (2.13)$$

On obtient finalement une relation linéaire, valable pour les pixels inchangés entre comptes numériques de la date t_1 et de la date t_2 à partir de (2.13), (2.11) et (2.12) :

$$CN_1 = a \cdot CN_2 + b \quad (2.14)$$

où $a > 0$

Justification du résultat :

En posant

$$\text{Date 1 :} \quad x_1 = t_{g1} \cdot \cos \theta_{s1} \quad \text{et} \quad y_1 = R_{atm1}$$

$$\text{Date 2 :} \quad x_2 = t_{g2} \cdot \cos \theta_{s2} \quad \text{et} \quad y_2 = R_{atm2}$$

Nous avons :

$$L_1 = x_1 \cdot (y_1 + k_1 R) \rightarrow R = (L_1 - x_1 y_1) / (x_1 k_1) \quad \text{avec} \quad L_1 = (CN_1 - B_1) / (A_1)$$

$$L_2 = x_2 \cdot (y_2 + k_2 R) \rightarrow R = (L_2 - x_2 y_2) / (x_2 k_2) \quad \text{avec} \quad L_2 = (CN_2 - B_2) / (A_2)$$

En combinant ces deux relations nous obtenons :

$CN_1 = [(x_1 k_1 \cdot CN_2) / (x_2 k_2)] + [B(x_2 k_2 - x_1 k_1) / (x_2 k_2)]$ avec $(x_1 k_1 \cdot CN_2) / (x_2 k_2)$ est une valeur > 0

L'équation (2.14) est aussi l'équation de normalisation de CN_2 par rapport à CN_1 pour l'ensemble des pixels :

$$CN_{2\text{normalisée}} = CN_{2n} = a \cdot CN_2 + b \quad (2.15)$$

(Avec $CN_{2n} = CN_1$ pour les pixels inchangés)

Hypothèse 2 :

Dans la réalité, les changements n'affectent qu'un pourcentage limité des thèmes à analyser.

La recherche de parcelles (ou de surfaces) invariantes qui vont servir au calcul des coefficients a et b de la relation linéaire trouvée précédemment, va se faire en deux temps :

Première étape : On considère qu'il n'y a aucun changement sur la zone étudiée.

On peut alors écrire à partir de (2.14) :

$$\mu_{f1} = a \cdot \mu_{f2} + b \quad a = (\sigma_{f1}) / (\sigma_{f2}) \quad (2.16)$$

→

$$\sigma_{f1} = a \cdot \sigma_{f2} \quad b = \mu_{f1} - [(\sigma_{f1} / \sigma_{f2})] \cdot \mu_{f2} \quad (2.17)$$

avec :

μ_{fi} et σ_{fi} représentent la moyenne et l'écart type des comptes numériques à la date t_i ($i=1,2,\dots$).

Deuxième étape : dans la réalité, quelques changements ont eu lieu. Ces derniers peuvent modifier, par rapport à une situation sans perturbation, l'écart type et la moyenne des pixels et donc les valeurs a et b obtenues par (2.17) et (2.16).

Il faut donc affiner le calcul des coefficients de normalisation (figure 2.5). Pour cela, on normalise l'image Ima_2 prise à t_2 , par rapport à l'image ima_1 prise à t_1 , en utilisant les coefficients a et b. On obtient l'image $Ima_{2\text{intermédiaire}}$.

On calcule alors la différence, pixel à pixel, entre $Ima_{2\text{inter}}$ et Ima_1 par $(CN_{2\text{inter}} - CN_1 + 128)$. L'ajout de la constante 128 permet d'éviter les valeurs négatives et de recentrer l'histogramme de l'image-résultat entre les bornes 0 et 255. Si a' et b' sont les bons coefficients de normalisation, actuellement inconnus, on a :

$$CN_{2inter} = a CN_2 + b \quad (2.18)$$

$$CN_{2n} = a' CN_2 + b' \quad (CN_{2n} = CN_{2normalisé}) \quad (2.19)$$

D'où :

$$CN_{2inter} - CN_1 + 128 = ((a/a') - 1) \cdot CN_{2n} + (CN_{2n} - CN_1) + b - (a/a') b' + 128 \quad (2.20)$$

Soit pour les pixels inchangés ($CN_{2n} - CN_1 = 0$) :

$$CN_{2inter} - CN_1 + 128 = ((a/a') - 1) \cdot CN_2 + b - (a/a') b' + 128 \quad (2.21)$$

Si la plupart des pixels n'ont pas changé, $((a/a') - 1)$ sera proche de 0 et un grand nombre de points sur l'image de différence auront une valeur proche de 128: l'histogramme de cette image présente effectivement un mode pour une valeur voisine de 128. Les valeurs qui s'écartent beaucoup de ce mode sont liées :

- ✓ soit a' un changement de radiométrie significatif;
- ✓ soit a' un problème de décalage résiduel après corrections géométriques.

On réalise donc un seuillage sur l'image différence ($Ima_{2inter} - Ima_1$) afin de ne conserver qu'environ 60% de la population autour du mode de l'histogramme de cette image. En gardant seulement les pixels qui ont une valeur comprise entre $M - \sigma$ et $M + \sigma$ (avec M et σ moyenne et écart type des comptes numériques de la différence d'images), on limite les risques de sélectionner des pixels qui ont subi un changement.

Sur l'image souillée, on va prendre une série de parcelles (une centaine) en essayant d'avoir une large gamme de valeurs pour les moyennes des comptes numériques de ces parcelles. On doit alors avoir, avec l'hypothèse de linéarité des effets atmosphériques, une relation linéaire entre les moyennes des parcelles entre deux dates :

$$\mu_1 = a' \mu_2 + b'$$

Calcul des coefficients de normalisation finale :

Les coefficients a' et b' normalement différents de a et b , sont calculés par régression linéaire sur l'ensemble des parcelles ; en utilisant la méthode des moindres carrés [19]:

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^n [y_i - \Phi(x_i, a, b)]^2 \quad (2.22)$$

Dans notre cas :

$$S(a', b') = \sum_{i=1}^n [\mu_{1i} - (a' \mu_{2i} + b')]^2 \quad (2.23)$$

$$\delta S / \delta a' = -2 \sum [\mu_{1i} - (a' \mu_{2i} + b')] \mu_{2i} = 0$$

$$\delta S / \delta b' = -2 \sum [\mu_{1i} - (a' \mu_{2i} + b')] \mu_{2i} = 0$$

avec μ_{1i} : moyenne de la $i^{\text{ème}}$ parcelle de la première image

μ_{2i} : moyenne de la $i^{\text{ème}}$ parcelle de la deuxième image

Normalisation finale :

Enfin, on va procéder à la normalisation finale :

$$CN_{2\text{normalisé}} = a \cdot CN_2 + b'$$

L'utilisation de parcelle invariants et non pas d'une série de points se justifie par :

- ✓ les erreurs de localisation des pixels après correction géométrique ;
- ✓ les erreurs d'influence de l'environnement sur le calcul des réflectances :

En effet, la réflectance d'une cible est influencée par celle de son environnement, d'où la nécessité de prendre une parcelle comme entité élémentaire à analyser [24].

Une fois les deux images sont rendues compatibles entre elles, il restera cependant, à réaliser une simple différence (pixel par pixel) entre elles pour constater le seuil ou les seuils de changeaient dans le cas d'une étude d'un phénomène évolutif (dans le temps) par une étude diachronique (multi temporelle).

Ces images « calibrées » seront injectées dans des processus de classification pour permettre au thematicien (ou à l'aménageur) de faire une mise à jour de ses cartes (et estimer le degré des changements) pour pouvoir intervenir.

6. Conclusion partielle

Les différentes phases abordées dans ce chapitre nous ont permis d'étudier les phénomènes qui causent les perturbations des données enregistrées au niveau des capteurs et de proposer les modèles de corrections. Le but de ces corrections est avant tout, d'obtenir une meilleure information au niveau de la signification physique de la mesure pour pouvoir combiner l'information reçue au niveau du satellite avec les données enregistrées par les radiomètres portables.

La deuxième partie nous a permis d'aborder largement les problèmes liés à l'utilisation des données multi temporelles clans le cas d'une étude d'un phénomène évolutif dans le temps.

CHAPITRE 3

Conception&Réalisation

1. INTRODUCTION :

Dans le chapitre précédent, nous avons expliqué les différents traitements que doit subir une image satellitaire brute pour aboutir à une image corrigée radio métriquement .Nous allons exposer dans ce chapitre ; la mise en application de l'approche adoptée, en utilisant le logiciel MATLAB.

2. Introduction sur MATLAB

MATLAB est un logiciel interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement aux autres langages de programmation.

Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps recors, qui ne représente qu'une fraction infime du temps à passer avec d'autres langages comme le C , C++ ou le Fortran. MATLAB est une abréviation de MA Trix Labo ra tory .Ecrit à l'origine, en fortran, par Cleve Mole, MATLAB était destiné à facilité l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK.

En complément de MATLAB, les outils additionnels Simulink et Symbolique sont proposés. Option venant compléter le noyau MATLAB, Simulink fournit une interface graphique pour la modélisation des systèmes dynamiques sous forme de schémas-blocs .Grace aux nombreux blocs de base fournis, il est possible de créer des modelés d'une manière claire, sans écrire une seul ligne de code. Simulink est un environnement qui permet la modélisation, l'analyse et la simulation de systèmes dynamiques d'une extrême variété.

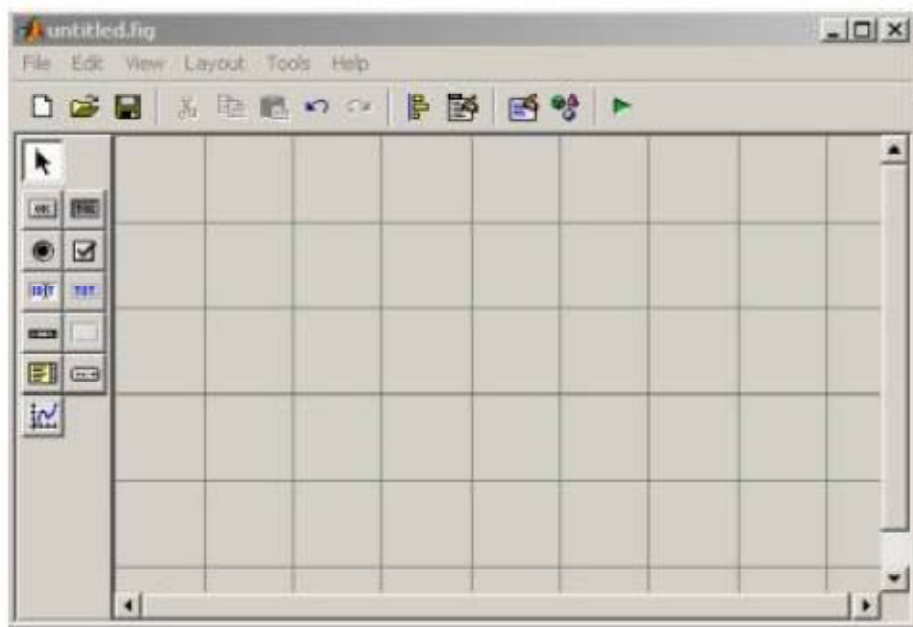
La Symbolique Math Tools box intègre les fonctions de calcul formel et le calcul à précision variable dans MATLAB. Cette boite à outils incorpore le noyau de calcul de Maple V version 5, développé par Waterloo MAPLE Software. L'Extended Symbolique Math Tools box offre l'accès à l'ensemble des fonctions de Maple, ainsi qu'à ses bibliothèques spécialisées.

Avec la Tools box Symbolique Math, les utilisateurs de MATLAB peuvent facilement associer calcul numérique et symbolique en un seul environnement sans avoir à sacrifier ni la précision, ni la vitesse d'exécution.

2.1. Conception de l'interface MATLAB GUI

2.1.1. Présentation du GUI

Le GUI (Graphical User Interface) permet de créer des interfaces où le créateur Choisit plusieurs types d'objets (*boutons*, *edit box*, *listbox*.....) appelés *handles*. Ensuite, il doit réaliser la programmation pour obtenir l'interaction qu'il souhaite obtenir entre ces différents objets. La première étape est la création d'un GUI en tapant le mot clé GUIDE dans la fenêtre de commande MATLAB. Voici la fenêtre de départ :



2.1.1.1. Présentation des différents objets

Dans nos interfaces, nous avons utilisé principalement 3 objets graphiques

- ✓ l'édit box
- ✓ la list box
- ✓ le bouton (pushbutton)

3. Les fonctions les plus utilisées

Pour chaque objet, dans le fichier .m est déclarée une fonction **Callback** précédée du nom de l'objet (modifiable grâce au champ Tag dans ses propriétés).

Le code introduit dans cette fonction correspond à l'événement qui va se produire Lors de l'action de la souris ou du curseur sur l'objet.

Par exemple :

Fonction Suivant Callback (hObject, eventdata, handles)

run Consultation;

Le bouton s'appelle *Suivant* et l'action sur ce bouton lance le fichier *Consultation*

Ensuite, pour manipuler ces objets, il existe 2 fonctions importantes :

- ✓ *get* qui permet de récupérer les valeurs
- ✓ *set* qui permet de mettre des valeurs

Par exemple, pour mettre une valeur qui se trouve dans la variable

Chaine Courante dans une *listbox* qui a pour tag *listbox2*, le code correspondant est :

```
set(handles.listbox2,'String',ChaineCourante);
```

Pour récupérer ce qu'il y a dans un *édit box* qui a pour tag *nom* :

```
Nom = get(handles.nom,'String')
```

3.1. Les boutons (ou menus)

3.1.1. Charger l'image (ouvrir)

Ce bouton permet d'accéder à la fenêtre de dialogue 'Sélectionner l'image', dont le rôle est de sélectionner une image à traiter.

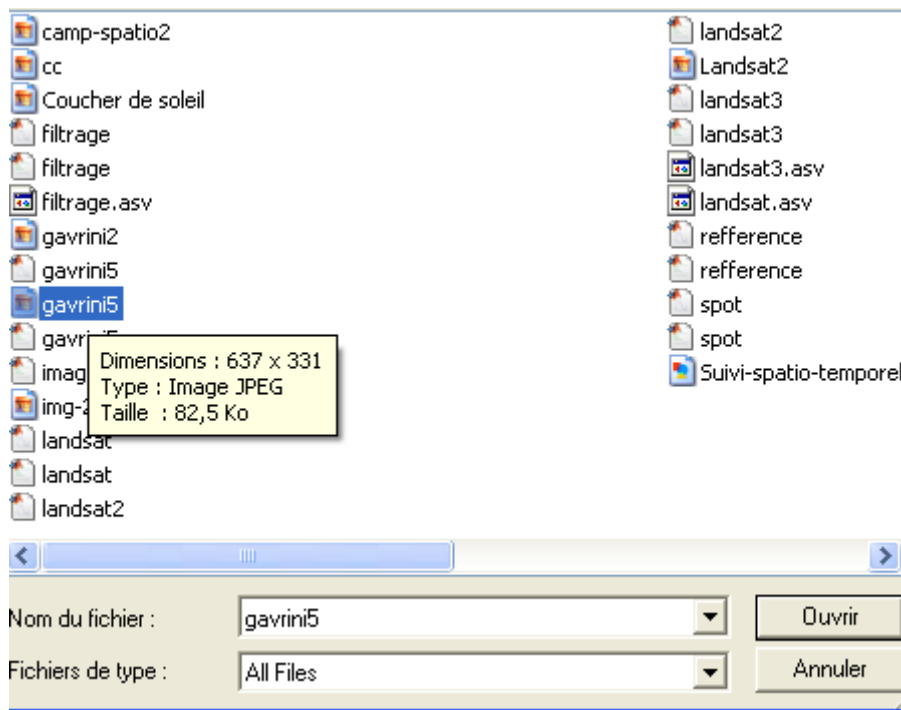


Figure3.1 : fenêtre de dialogue

L'image s'affiche sur une fenêtre graphique 'Image original ' comportant des menus (ouvrir, fonction, filtre) qui donnent accès à d'autres fenêtres.

La fenêtre représente l'organigramme général de notre interface.

Exemple : Canal XS1 du satellite SPOT de l'image Gavrinis (image brut).

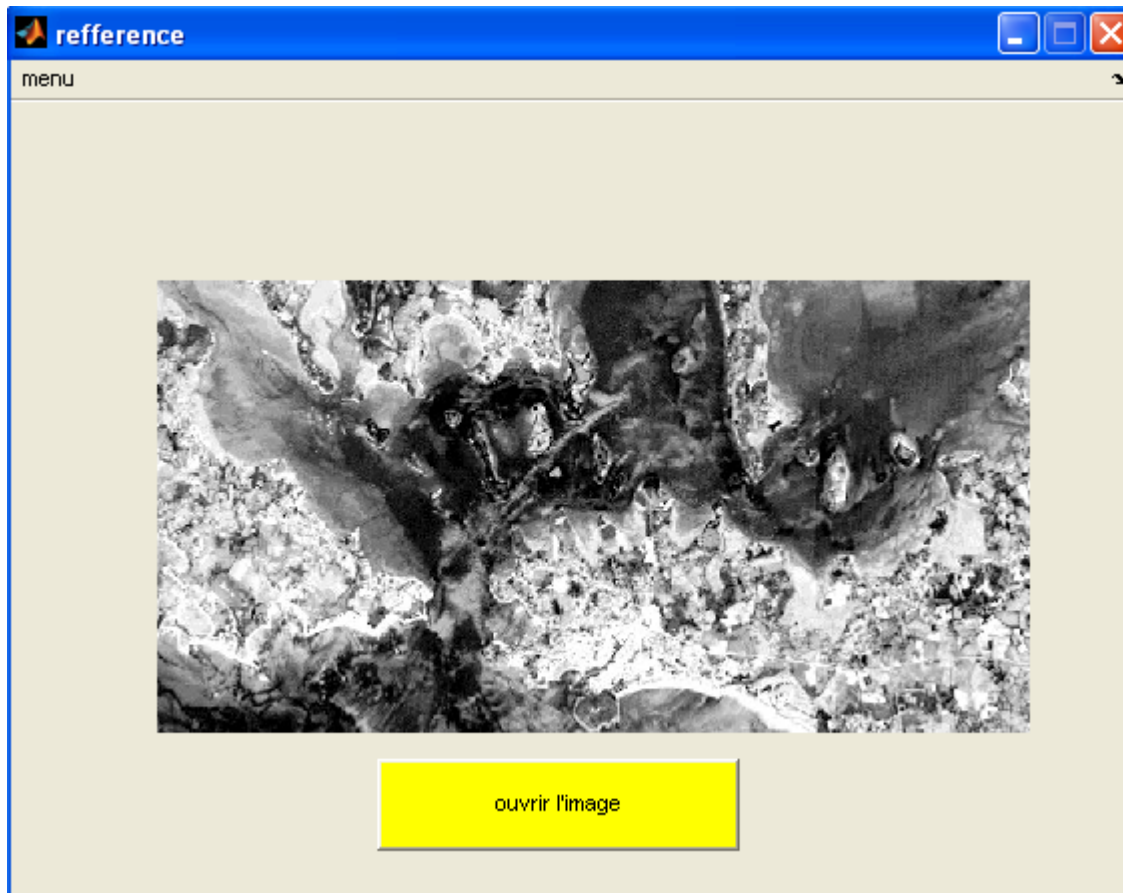
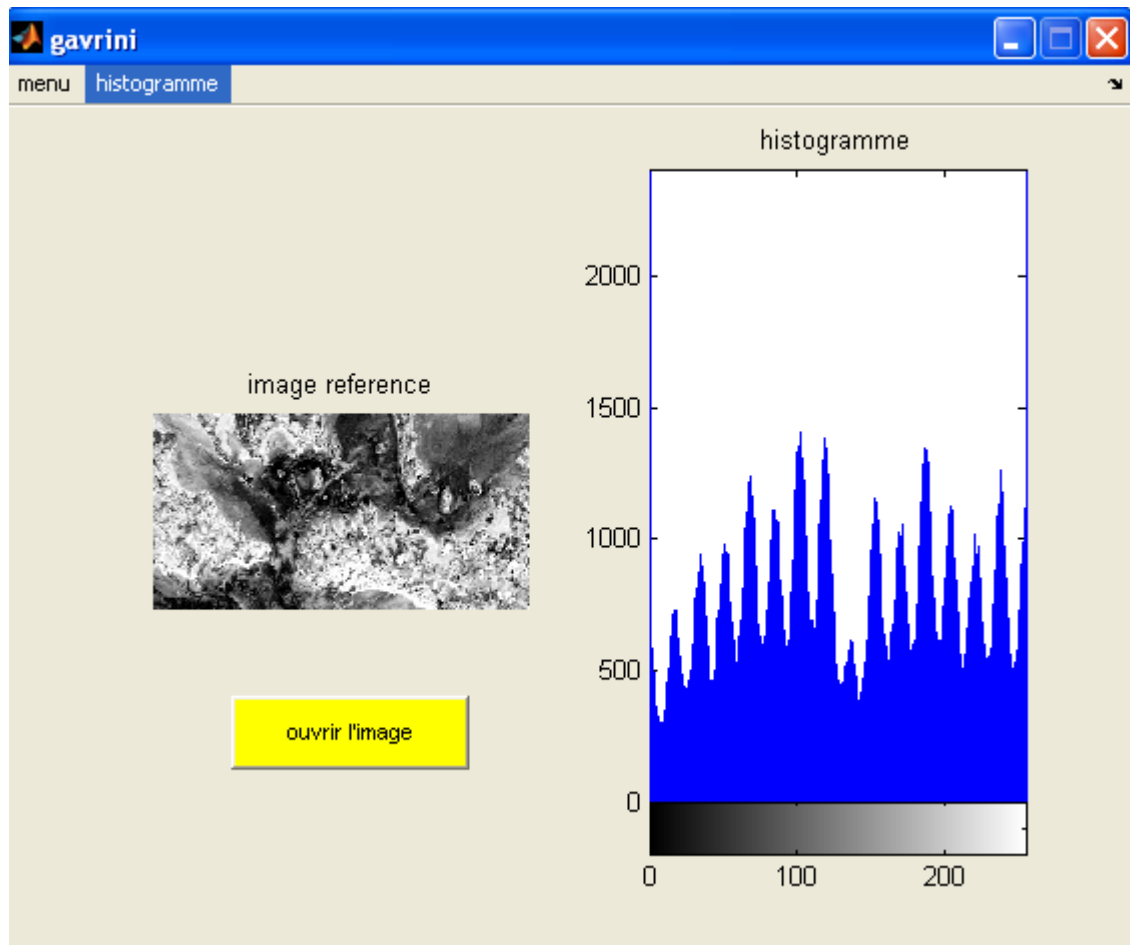


Figure3.2 : image originale

3.1.2. Histogramme :

L'histogramme peut être vu comme une densité de probabilité des niveaux de gris de l'image. En pratique, pour le calcul d'un histogramme, nous donnons un nombre de niveaux de quantification, et pour chaque niveau, on compte le nombre de pixels de l'image correspondant à ce niveau. La fonction MATLAB qui réalise le

Calcul d'un histogramme est **imhist**. Elle prend en paramètres le nom de l'image et le nombre de niveaux de quantification souhaités.

Exemple (histogramme)**Figure3.3** : histogrammes de l'image**3.2. Décomposition de l'image brute en trois couleurs au niveau de gris**

A partir de l'image brut on va extraire trois images au niveau de gris, par exemple le satellite SPOT enregistre trois images de la même zone. À chaque passage, le canal XS1 enregistre uniquement le bleu, XS2 le vert, XS3 le rouge.

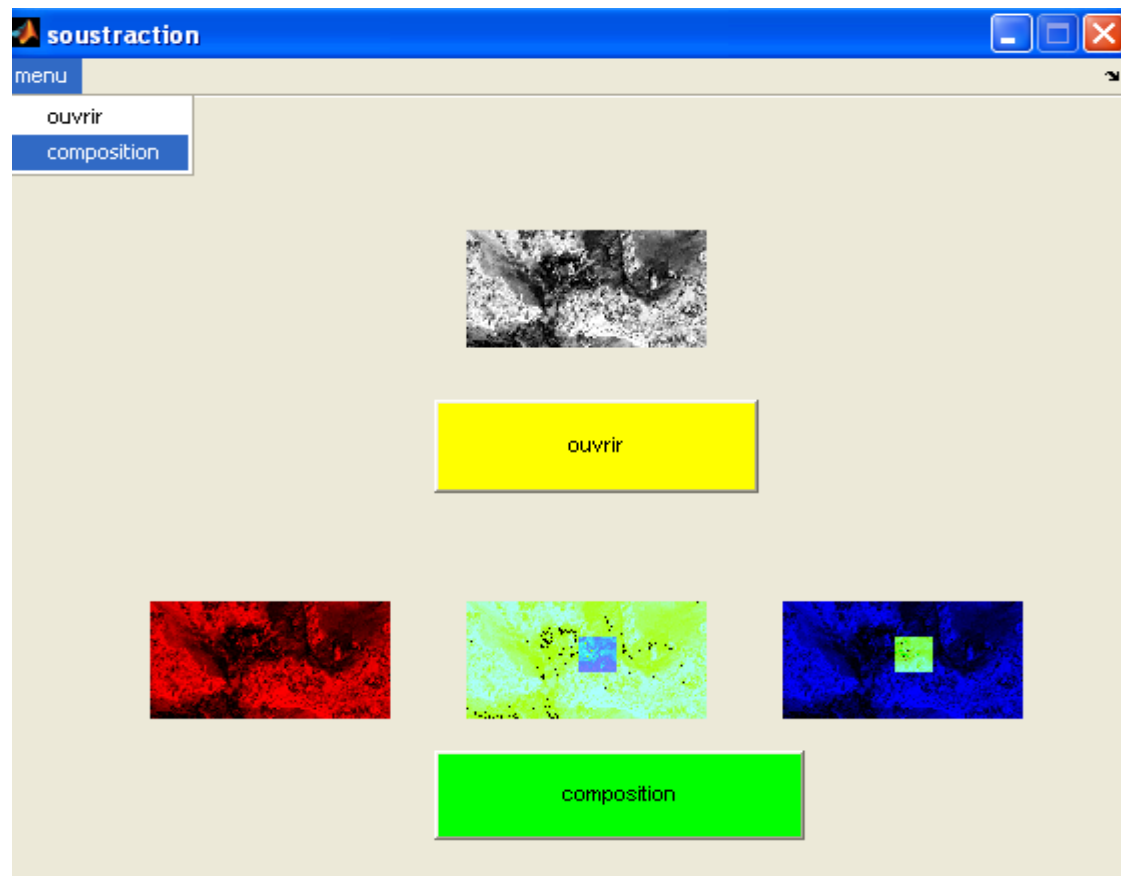


Figure 3.4.décomposition en trois niveaux de gris

Par superposition de ces canaux d'origine on obtient une image coloré.

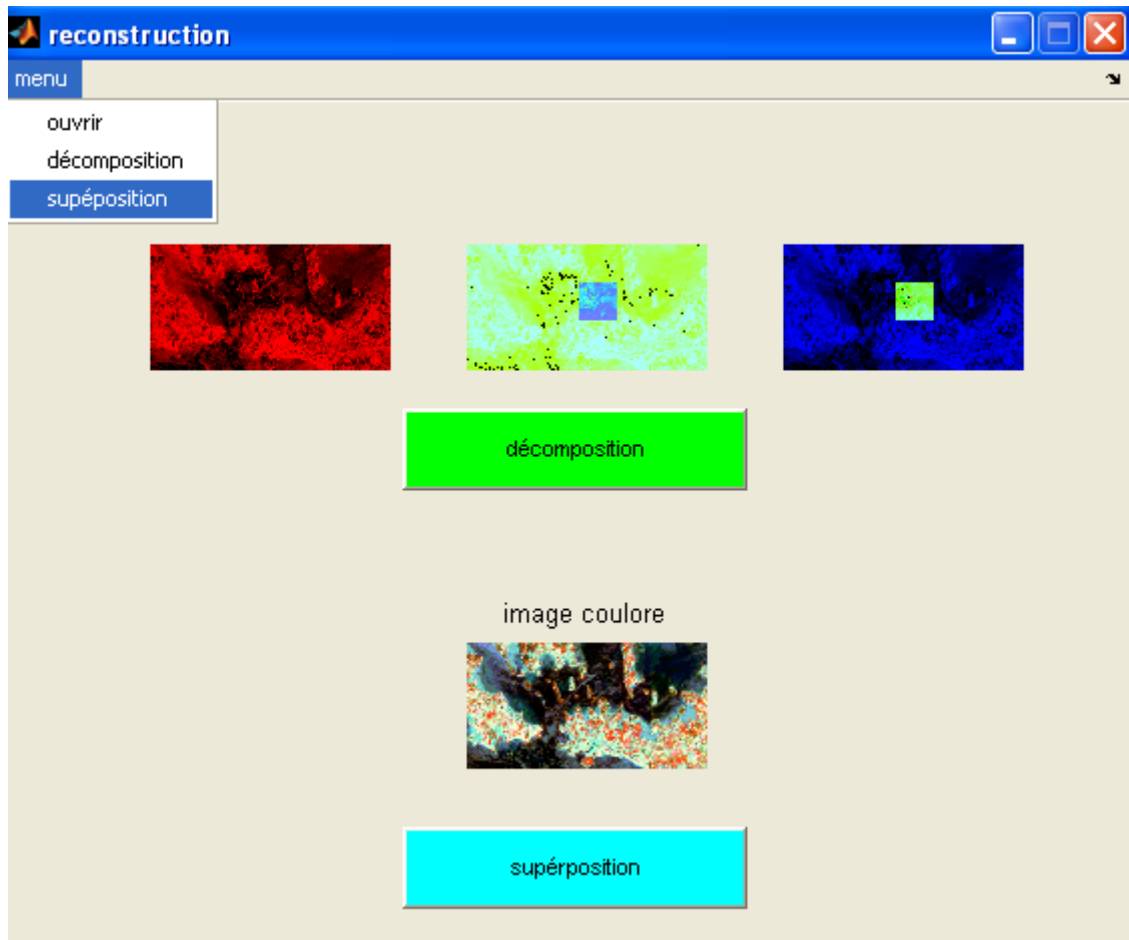


Figure 3.5.superposition des trois canaux d'origine

Avant d'entamer la correction radiométrique sous MATLAB, on corrige l'image brut géométriquement. Pour cela on utilise le cas de rotation de l'image on utilisant le programme suivant :

```
img = imread('C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\gavrini5.jpg')
%figure;
imshow(img);
imgrot1=imrotate(img,3,'bilinear');
figure;
imshow(imgrot1);
imgrot2=imrotate(img,3,'bilinear','crop');
%figure;imshow(imgrot2);
```

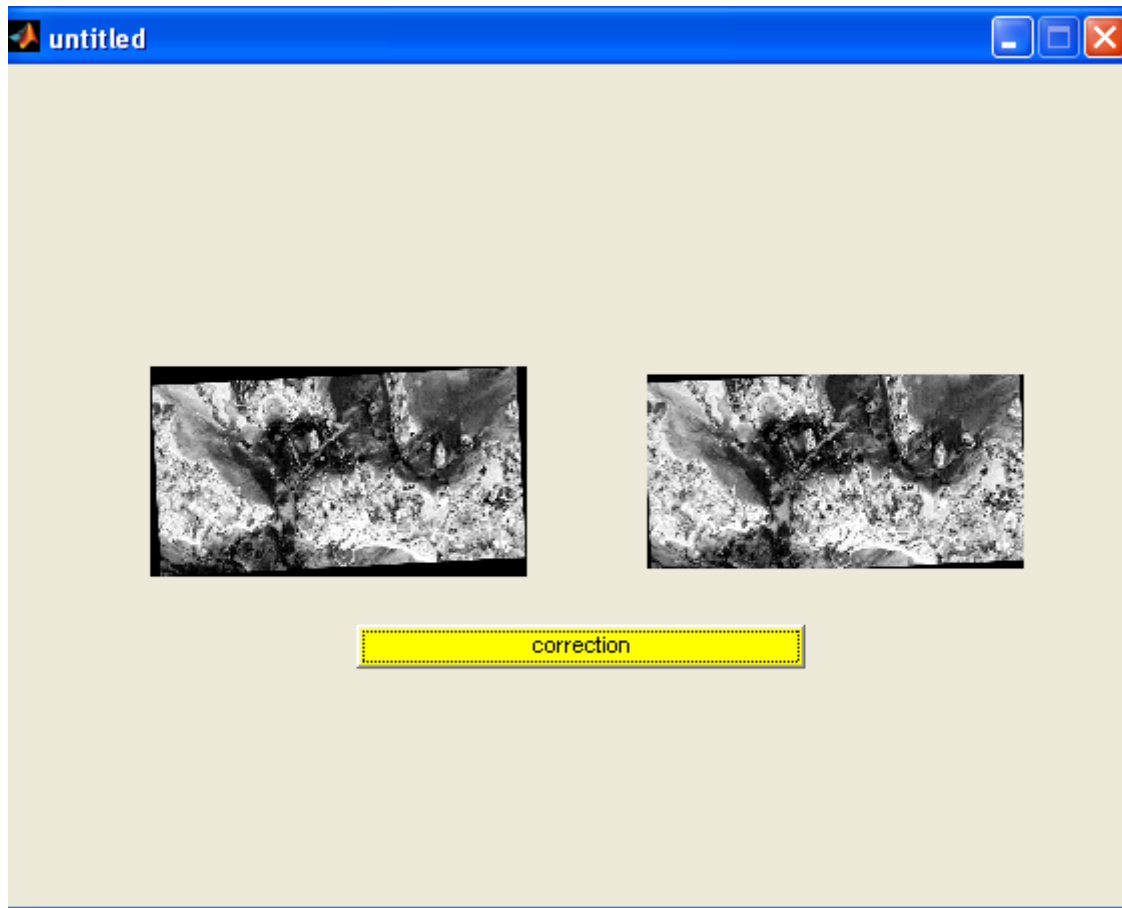


Figure3.6. Correction géométrique

3.3. Programme sous MATLAB des différentes corrections radiométriques

3.3.1. Algorithmes des traitements

3.3.1.1. Algorithmes du model uni temporel

Début

- ✓ charger une image Img
- ✓ déclarer un tableau de h ligne et w colonne soit Segmap
- ✓ déclarer un tableau de h ligne et w colonne soit ImgDibRes

```
% =====> DrNitro21@gmail.com <=====
```

```
CN    = 5    ;
gmk   = 1    ;
Ak    = 0.605 ;
Qcalmax = 63 ;
K2    = 5    ;
K1    = 3    ;
d     = 0.98 ;
Esun  = 185.2 ;
theta = 140.6 ;
img = imread('C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\img177.jpg')
%figure;
imshow(img);
```

```
IMG=mat2gray(img);
[h , w]=size(IMG);
```

%laluminence vraie

%a- cas spot

```
for i=1:h
    for j=1:w
        L(i,j)=CN/gmk*Ak;
    end
end
```

% b-cas LANDSAT

```
for i=1:h
    for j=1:w
        minL=min(L(:));
        maxL=max(L(:));
        L(i,j)=minL+(maxL-minL)/Qcalmax*CN;
    end
end
```

% 2^Â etape reflectance pourcentage

% a-cas Spot

```
for i=1:h
    for j=1:w
        Segmap=L*d^2*3.14/Esun*cos(theta);
    end
end
imgDibRes=Segmap ;
```

b-cas Landsat

1. pour les canaux TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM7 c'est le même algorithme que celui du cas SPOT ; ce qui change c'est L_λ .
2. Algorithme thermique pour le canal TM6 :

cas LandSat canal TM6

```
for i=1:h
    for j=1:w
        T=K2./log((K1./L)+1);
    end
end
```

Commentaires :

- L_{λ} =matrice pour Stocker le résultat partiel
- w=largeur
- h=hauteur

ImgDibRes=Segmap;

3.3.1.2. Algorithme du model multi temporel

Début

1. charger image1 dans CN1
2. charger image 2 dans CN2
3. Déclarer un tableau de n lignes et w colonnes soit $CN_{normaliser}$
4. Déclarer un tableau de n lignes et w colonnes soit imgDif
5. Déclarer un tableau de n lignes et w colonnes soit imgRes

% etape 3: seillage

```

S=0;
Sp=0;
ImgDif=zeros(h,w) ; %%%% qu'est ce que n ; on a mis h a la place
for i=1:h
    for j=1:w
        S=ImgDif(i,j)+S;
        Sp=ImgDif(i,j)*ImgDif(i,j)+Sp;
    end
end

M=S/(h*w);
sigma=sqrt((Sp/h*w)-M*M);
for i=1:h
    for j=1:w
        if (ImgDif(i,j)<M-sigma)
            ImgDif(i,j)=0;
        end
        if (ImgDif(i,j)>M+sigma)
            ImgDif(i,j)=0;
        end
    end
end
end
ImgSeuiller=ImgDif;

```

% étape 4 :Repérage des rectangles contenant les niveaux de gris inchanges

```

choix = 0;
k=1;
CN1 = zeros(h,w) ;
CN2 = zeros(h,w) ;
while (and((choix~=1),(k==0)))
    X0=input('entrer X0 = ? ')
    Y0=input('entrer Y0 = ? ')

```

```

H0=input('entrer H0 = ? ')
W0=input('entrer W0 = ? ')

X = X0;
Y = Y0;
H = H0;
W = W0;
Sk1=0;
Sk2=0;
for i=X:X+H
    for j=Y:Y+W
        Sk1 = CN1(i,j) +Sk1;
        Sk2 = CN2(i,j) +Sk2;
    end
end
mk1=Sk1/w*h;
mk2=Sk2/w*h;
choix=input('faites votre choix 1 pour arreter choix = ?');

```

end

%étape5:calcul des coefficients a1, b2 par régression linéaire

M1i :moyenne de la $i^{\text{ème}}$ parcelle de la première image ;

M2i :moyenne de la $i^{\text{ème}}$ parcelle de la deuxième image.

```

m1i=2;
m2i=3;
S1=0;
S2=0;
S3=0;
S4=0;
for i=1:k

    S1=S1+m1i;
    S2=S2+m2i;
    S3=S3+(m1i*m2i);
    S4=S4+(m2i*m2i);
end
a1=S1*S2-k*S3/S2-S2-K*S4;
S5=0;
for i=1:k
    S5=S5+(m1i-a1*m2i);
end
b1=1/K*S5;

```

%étape6:normalisation finale

```

ImgRes=zeros(h,w);

```

```

for i=1:h
    for j=1:w

```

```

    ImgRes(i,j)=a1*CN2(i,j)+b1;
end
end
% end

```

Commentaires :

H :Représente la hauteur de l'image en pixels ;
W :Représente la largeur de l'image en pixels ;
ImgSeuille :Matrice pour stocker les résultats partiels ;
ImgRes :Image résultat.

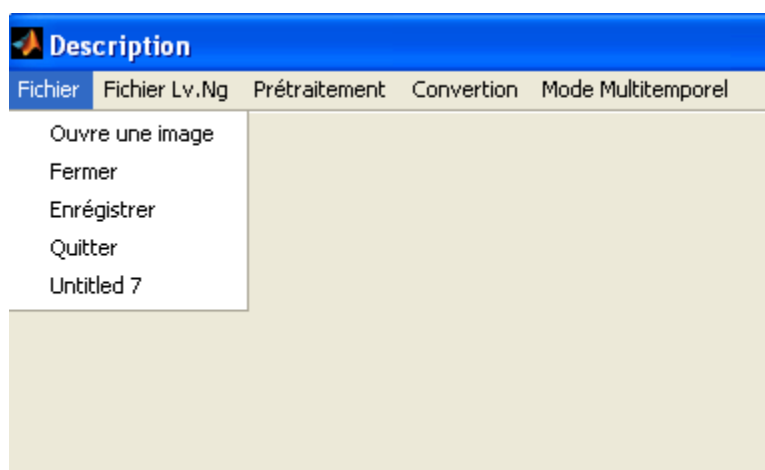
3.4. Description globale de l'interface :



Figure3.7 : fenêtre principale

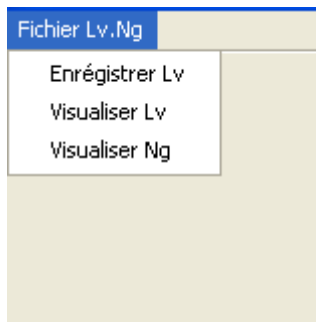
3.4.1 Description des menus

Le menu Fichier



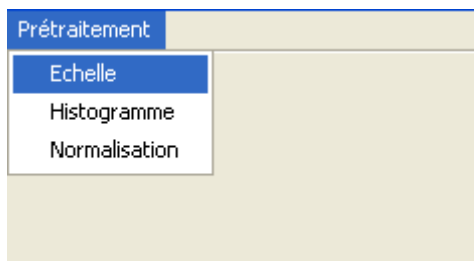
- **Ouvrir** : cette fonction ouvre la boîte de dialogue qui permet l'affichage d'une image
- **Fermer** : ferme la fenêtre active ;
- **Enregistrer** : Enregistrer l'image de la fenêtre active
- **Quitter** : Permet de quitter l'application

➤ **Le menu fichier Lv. Ng**



- **Enregistrer Lv** : enregistre Lv, après l'avoir calculé ,dans un fichier ;
- **Visualiser Lv** : permet de visualiser un tableau de valeurs de Lv ;
- **Visualiser Ng** : permet de visualiser un tableau de valeurs de Ng.

➤ **Le menu prétraitement**



- **Histogramme** : donne le tracé de l'histogramme de l'image de la fenêtre active;
- **Echelle** : Permet de changer de l'histogramme en introduisant les nouvelles valeurs dans la boîte de dialogue représentée à la figure 3.8 ;



Figure 3.8: Boite de saisie des nouvelles valeurs de l'échelle

•**Normalisation** : donne des informations sur l'image de la fenêtre active dans la boîte de dialogue représentée à la figure 3.9 puis permet de normaliser cette image

Figure3.9 : Boîte d'information et de normalisation

➤ **Le menu conversion**

▪ **Cas LANDSAT**

•**NG →LV** : effectue la conversion des niveaux de gris en luminance vraie en saisissant les données dans la boîte de dialogue représentée par la figure 3.10

•**Réfléctance** : effectue le calcul de la Réfléctance pourcentage hors atmosphérique en saisissant les données dans la boîte de dialogue représentée par la figure 3.11

•**Thermique** : effectue le calcul du pourcentage pour le cas du thermique (TM6) en saisissant les données dans la boîte de dialogue représentée par la figure 3.12

Figure3.10 : Boîte de saisie des paramètres de LANDSAT

Figure3.11 : Boite de saisie des paramètres pourcentage.

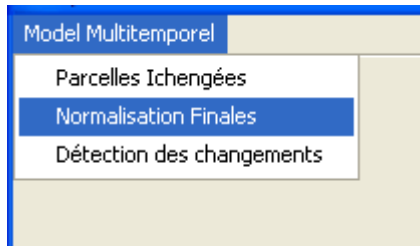
Figure3.12 : Boite de saisie des paramètres thermiques.

- **Cas de SPOT**

- **NG → LV** : effectue la conversion des niveaux de gris en luminance vraie saisissant les données dans la boîte de dialogue représentée par la figure 3.12 ;
- **Pourcentage** : effectue le calcul Réfléctance pourcentage hors atmosphère en saisissant les données dans la boîte de dialogue représentée par la figure 3.13.

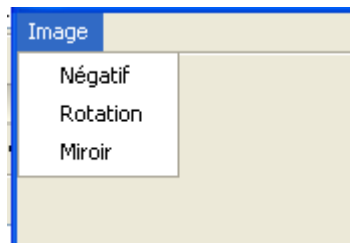
Figure3.13 : boite de saisie des paramètres de SPOT

➤ **Le menu Model multi temporel**



- Parcelles inchangées** : ouvre la boîte de dialogue qui permet d’afficher deux images et ouvre la boîte de dialogue représentée à la figure 3.13 pour saisir les dimensions de la parcelle sur laquelle s’effectuera le calcul des coefficients, l’image différence, l’image souillée puis sélectionner les parcelles inchangées ;
- Normalisation finale** : effectue la normalisation finale de l’image ;
- Détection des changements** : permet de détecter les changements.

➤ **Le menu Image**



- Négatif** : effectue l’affichage de l’image négatif,
- Rotation** : effectue la rotation de l’image ;
- Miroir** : effectue l’affichage du miroir de l’image.

3.5. Conclusion partielle

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation des étapes suivies pour la réalisation des traitements de notre application. Nous avons présenté aussi les grandes lignes des algorithmes développés pour l’implémentation de ces traitements.

Dans le chapitre suivant, nous allons mettre en application les différents algorithmes programmés en MATLAB sur image HRV XS de SPOT caractérisant la région d’Oran.

CHAPITRE 4

**Expérimentation et
présentation des
résultats**

1. Introduction

L'état de l'atmosphère, le type du satellite et du capteur ont des influences sur les radiométries qu'il importe de connaître avant de passer à l'utilisation des images fournies.

Nous allons essayer dans ce chapitre, de faire une expérimentation des techniques déjà citées et tirer des conclusions sur l'utilisation simultanée des données fournies par des capteurs embarqués et celles des radiomètres "terrain".

2. Présentation de la zone d'étude

La ville d'Oran et ses périphériques caractérisent notre zone d'étude. Le choix de ce site se justifie par la diversité des thèmes allant des structures linéaires (voirie au niveau urbain) jusqu'aux zones homogènes (caractérisant les peuplements forestiers formés d'un mélange de feuillues et de résineux) périurbaines situées au Nord-Ouest de l'image.

Les données utilisées représentent une fenêtre multi bande de 256x256 pixels extraite de la scène HRV de SPOT de MAI 1986 et ayant pour référence K043.J278 ; 2.

La figure 4.1 représente une composition colorée issue des 3 canaux HRV XS

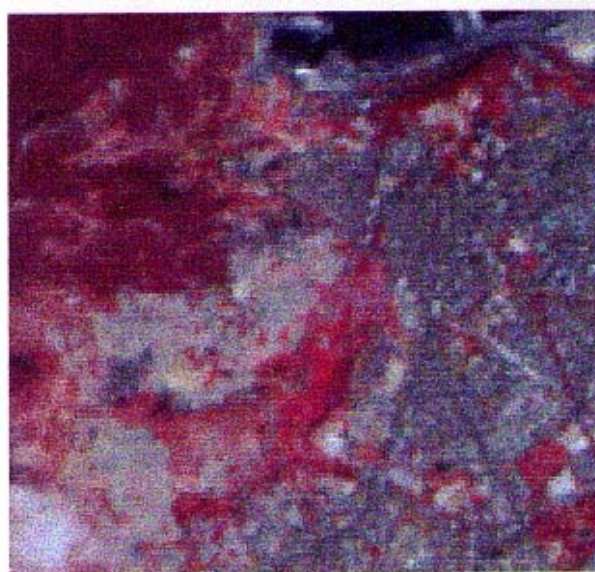


Figure 4.1 : Composition colorée issue des 3 canaux bruts HRV XS

- ✓ Rouge –noir (ouest de l'image) : Forêt de la montagne de MURDJADJOU correspondant aux résineux.
- ✓ Rouge vif : Végétation éparse
- ✓ Noir : Mer et le petit lac au Sud-est

- Les principaux thèmes d'occupation au sol sont :
 - ✓ La forêt de MURDJADJOU au Nord-ouest composée d'un mélange de feuillues et quelques peuplements de résineux ;
 - ✓ Les jardins à l'intérieur de la ville (couleur rouge) ;

- ✓ Le bâti et les structures linéaire(en particulier la voirie et le réseau ferroviaire) caractérisés par les autres teints.

La figure 4.2 représente le canal HRV XS2 avec une résolution spatiale de 20mx20m.

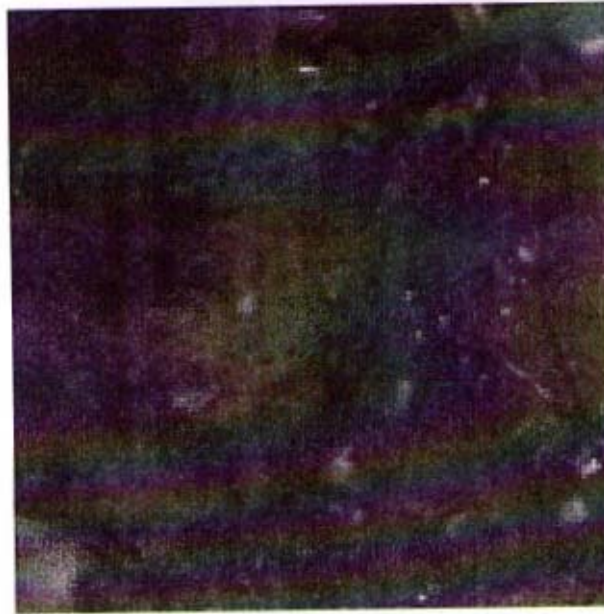


Figure4.2 : Image HRV XS2 (rouge) de SPOT de 256c x256l

La figure 4.3 représente le canal proche infra –rouge (HRV XS3) de la même scène

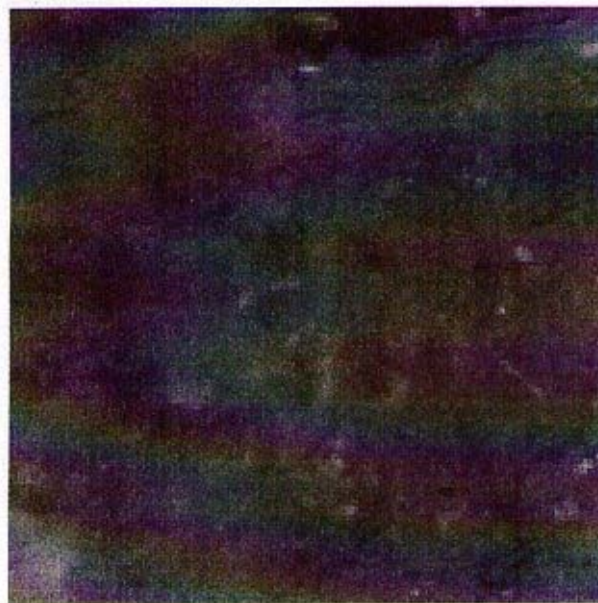


Figure4.3 : Image HRV XS3 (P.infra-rouge) de 256cx256l.

Les données relatives à la prise de vue, recueillies dans les fichiers entêtes de la scène originale sont :

- ✓ date de prise de vue : 6 mai 1986
- ✓ heures de prise de vue : 10h55mn 56s
- ✓ azimuth solaire : $+140,6^\circ$
- ✓ hauteur du soleil : 60°

L'irradiance solaire spectrale EK est de :

- 18.5 pour XS1
- 16.5 pour XS2
- 10.9 pour XS3
- 16.4 pour Pan.

La distance terre –soleil est de 1,009UA (unité astronomique)

Les figures 4.4 et 4.5 représentent respectivement les images HRV XS2 et HRV XS3 corrigées radio métriquement en pourcentage de réflectance.



Figure4.4 : image HRV XS2 (corrigée radio métriquement) exprimée en pourcentage de réflectance.



Figure 4.5 : image HRV XS3 (corrigée) exprimée en pourcentage de réflectance.

Nous remarquons qu'il est difficile d'interpréter et de donner un sens à ces images corrigées.

Pour pallier à ce problème, nous avons décidé de travailler à l'échelle sectorielle.

En effet, une fenêtre de 10*10 pixels a été extraite au niveau de la forêt de MURDJADJOU. La fenêtre est constituée de pin d'alep et d'un mélange de cyprès et de pin d'alep par endroit. Nous rappelons que cette zone a été déjà visitée par nos promoteurs.

La figure 4.6 représente une restitution d'appla-numérique des données brutes du proche infra-rouge (HRV XS3).

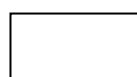
43	45	45	47	45	45	45	47	41	41
45	45	45	43	43	47	45	45	40	40
47	45	45	45	45	45	47	43	41	38
45	45	45	45	45	45	45	43	40	38
45	45	45	45	47	45	45	40	38	36
45	45	45	45	43	45	45	47	40	40
45	47	45	45	45	45	45	47	41	41
45	45	47	45	45	45	47	47	40	38
45	45	43	45	47	45	45	45	45	45
45	45	45	43	43	45	43	45	45	45

Figure 4.6 : extrait des données numériques brutes du canal HRV XS3

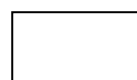
(Valeurs de luminances relatives).

La figure 4.7 représente les valeurs de pourcentage de reflectance du même secteur après correction du canal proche infrarouge (HRV XS3).

25	26	26	27	26	26	26	27	24	24
26	26	26	25	25	27	26	26	23	23
27	26	26	26	26	26	27	25	24	22
26	26	26	26	26	26	26	25	23	22
26	26	26	26	27	26	26	23	22	21
26	26	26	26	25	26	26	27	23	23
26	27	26	26	26	26	26	27	24	24
26	26	27	26	26	26	27	27	23	22
26	26	25	26	27	26	26	26	26	26
26	26	26	25	25	26	25	26	26	26



Pin d'alep



Mélange de pin d'alep et de
Cypés (pin d'alep dominant).

Figure 4.7 : représentation numérique du secteur étudié après correction radiométriques du canal HRV XS3 (proche infrarouge).

Pour ce qui est des deuxièmes méthodes, nous n'avons pas de données multi dates sur la région d'étude, mais néanmoins, nous avons testé la méthode développée sur des images simulées. Nous avons préféré de ne pas présenter les résultats qui ne rentrent pas dans le cadre d'une application concrète.

3. Conclusion partielle

A partir des résultats obtenus, nous avons constaté qu'il ya effectivement une grande similitude entre les résultats fournis par les radiomètres << terrain >>.

Ces corrections permettent de même, une meilleure interprétation de l'image pour un contrôle plus fin et plus étendu des réponses spectrale des objets.

Nous regrettons de même, l'indisponibilité des données multi date pour tester la seconde approche développée.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans le but de corriger radio métriquement les images satellitaires, nous avons mis en œuvre une application sous MATLAB.

Les données et outils définis dans la première partie nous ont permis une bonne compréhension de la nature des données, du principe de leurs acquisitions et des techniques de stockage permettant un traitement automatique.

Nous avons développé en deuxième chapitre un modèle mathématique permettant de corriger radio métriquement une image prise à un instant t . En effet, l'utilisation des données spatiales, exprimées en termes de réflectance, permet d'appréhender rapidement les signatures spectrales des objets constituant la scène observée et de comparer ces dernières avec les mesures radiométriques ou spectro photométriques de terrain. Cette comparaison est d'autant plus aisée que les corrections radiométriques effectuées sur les données numériques primitives réalisent la transformation de ces dernières en mesures physiques, contrôlables, ayant une signification physico- chimique précise. Ces nouvelles données, associées aux observations classiques de terrain, permettront de constituer des bandes de données multi sources pour une utilisation plus rationnelle des données fournies par les satellites. L'approche multi date que nous avons développé par la suite, nous a permis de ramener les données multi temporelles à un même référentiel pour pouvoir les utiliser simultanément. Cette technique est tout indiquée dans le cas où on cherche à quantifier un phénomène évolutif.

Dans le chapitre trois, nous avons développé les algorithmes des différentes opérations. La conception sous MATLAB nous a permis de réaliser et faciliter l'opération qu'on veut développer ainsi.

Dans la quatrième partie, nous avons privilégié le côté applicatif de l'outil développé. À cet effet, la méthode développée a été appliquée aux données HRV XS de SPOT caractérisant la ville d'Oran et de ses périphéries. Notre choix s'est porté sur la reconnaissance de certaines espèces forestières dont nous connaissons leurs comportements spectraux, le résultat obtenu sur les résineux est concluant en les comparant aux signatures spectrales obtenues à l'aide d'un radiomètre 'terrain'.

La méthode appliquée à la région d'Oran est transposable à toutes les régions ayant les mêmes caractéristiques.

Enfin, ce travail ouvre la voie à d'autres applications concernant l'optimisation des processus de segmentation et de classification et ce, en utilisant les données corrigées radiométriquement.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Lancement SPOT 2, " Observation de la terre", Revue.
- [2] MESBAH C. Apport de la télédétection à la géologie. Juin 1990
- [3] CNES: Centre National d'Études Spatiales 1986. Lancement de SPOT: Dossier.
- [4] GDTA : Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatial 1991. Cahier pédagogique BI : les bases physique de la télédétection, 18, avenue Edouard — Belin 31055 Toulouse cedex — France.
- [5] M Cheval 1991. Cours de technologie spatial : observation de la terre. CNES : Centre National d'Etudes Spatiales. Division observation de la terre. 2, place Maurice — Quentin 75039 Paris cedex 01 Rance.
- [6] Robert BARJO. Manuel de télédétection. Photographies aériennes images Radar — satellites, Édition SODIPE S . A. Paris, 1982.
- [7] Bildgen P. Jean. Parel GLLG (1994). Etude de la réponse spectrale et classification du Rhône. 113^{es} congrès. SOC. SAN. Strasbourg, Télédétection.
- [8] HUNT. G.R. Salisbury J.W (1981). Visible and near- infrared spectra of minerals and rocks. Modern Geology Vol. 1. p 283-
- [9] P. BILDGEN " Les signatures spectrales des objets, leur signification géologique et leur contrôle en télédétection spatiale ". LABORATOIRE DE GEOCHIMIE & METALLOGENIE UPMC Paris (U.A CNRS 196).
- [10] N.SIFAKIS " Essai de cartographie de la pollution Atmosphérique à partir des images SPOT " Mémoire D.E.S.S Université P & M CURIE. 1987.

- [11] BRIAN L. MARKHAM and JOHN L. BARRER " Landsat MSS and TM Post - Calibration Dynamic Ranges. Exoatmospheric Reflectances and Atmospheric Temperatures " LABORATORY FOR TERRESTRIAL PHYSICS- NASA/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER GREENBELT, MD 20771.
- [12] N.BACHARI " Cartographie de l'Albédo de Surface à Partir d'images Meteosat B-2 ". THÈSE de MAGISTER présentée au Centre National des Techniques Spatiales. Arzew 1990.
- [13] BARKER, J.L. " Relative Radiometric Calibration of Landsat Reflective Bands". LANDSAT- 4 SCIENCE INVESTIGATION SUMMARY : NASA CONF. PUB. 2326. GREENBELT, MD, ACC. IN84-30359 [vol.1] 140-180. 1984.
- [14] ALFORD, W. and J.L.BARKER, eds. " Landsat — 4 Multispectral Scanner (MSS) Subsystem. Radiometric Characterization Project " Publication 435-D- 404. GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, GREENBELT, MD. 1983.
- [15] F.BECKER " Principes Physiques et Mathématiques de la Télédétection " Cours Université LOUIS PASTEUR. Strasbourg. 1978.
- [16] T.S CHEN & G.OHRING " On the Relationship between Clear — sky Planetary and Surface Albedo ". NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, DATA and INFORMATION SERVICE, NASA/ NESDIS. WASHINGTON. DC 20233 7 February 1983 & 29 August 1983.
- [17] GU XF (1988). Mise en relation des luminances mesurées par SPOT, avec les réflectances de surfaces agricoles mesurées au sol, mémoire de DEA. université Paris VII, juin 1988, 37p.
- [18] S.DURRIEU; M.DEHJES (1994). Méthode de comparaison d'images satellitaires pour la détection des changements. Application aux monts de Lacane (Tarn. France). Ann. Sci. For Vol 51, p.147 — 161.

- [19] N.Piskonov (1972). Calcul différentiel et intégrale Tomel, Fditions MIR. MOUCOU.
- [20] GILLES BUREL. «Introduction au traitement d'image simulation sous MATLAB». PARIS ,Hermès Science publications,2001.
- [21] ToolboxMATLAB.Image processing,Version 2.2.
- [22] JEAN THIERRY LAPRESTE «Introduction MATLAB B» Edition ellipses marketing S.A ,1999
- [23] Mr HAMEL et Mr MESLEM «Traitement d'images sous MATLAB par la transformée en ondelettes» Thèse d'ingéniorat, UMMTO ,2002.
- [24] Item KI, Meyer P. Kellenberger T, Leur R, Sandmicir S. Bitter P. Seidel K (1992). Correction of the impact of topography and atmosphere on LANSAT - TM forest mapping of alpine régions. Remote sensing serties. vol 18, Département of géography, university of Zurich, 48.

ANNEXE

1. Introduction

Lors de la définition d'un produit qui sera mis sur le marché sous forme de bandes magnétiques, un problème important réside dans la définition du format de stockage des informations sur cette bande magnétiques. En ce qui concerne l'écriture et la lecture des informations élémentaires sur les bandes compatibles. Une normalisation mondiale existe de façon à ce qu'une bande écrite sur un type de calculateur puisse être lue sur n'importe quel autre calculateur.

En ce qui concerne les formats de stockage des inhumations, une telle normalisation n'a pas été réalisée, c'est pourquoi chaque produit possède son propre format. En ce qui concerne les images numériques de télédétection. Un effort de normalisation a été fait par le groupe de travail des opérateurs des stations SPOT IMAGE. Le résultat de ce travail conduit à un format de bande magnétique, conforme aux recommandations du groupe de travail mentionné ci-dessus, tout en donnant aux utilisateurs la possibilité d'accéder à un maximum d'informations auxiliaires concernant les conditions de prise de vue.

Cette annexe décrit les concepts de base du format de bande SPOT, ainsi que les moyens d'accéder aux principales informations.

1. Description générale d'un produit bande magnétique du produit SPOT La bande magnétique est composée physiquement d'une suite *d'enregistrement*, ces derniers sont regroupés en, fichiers lorsqu'ils comportent des données analogiques, elle est aussi caractérisée par un *volume physique* qui correspond à la quantité d'informations ou de fichiers que peut contenir une bande magnétique de longueur donnée.

L'ensemble des fichiers liés à un produit peut être réparti sur une ou plusieurs bandes magnétiques, ce qui induit la notion de *volume logique*.

2.1. Enregistrements

Le stockage sur bandes magnétiques se fait sous forme d'octet. Un enregistrement est une suite d'octet séparée de l'enregistrement suivant par un intervalle physique sur la bande. Pour le format SPOT, chaque enregistrement est formé d'un multiple de 180 octets. Un enregistrement est alors caractérisé par sa longueur en nombres d'octets et sa structure.

2.2. Fichiers

Les enregistrements peuvent être regroupés en fichiers, de façon à ce que toutes les données d'un même fichier soient de même nature (données image, données auxiliaires. etc.). Chaque

fichier est séparé du suivant par un enregistrement particulier appelé « marqueur de fin de fichier ». Pour le format SPOT, tous les enregistrements d'un même fichier ont la même longueur (multiple de 180 octets). D'autre part le premier enregistrement de chaque fichier sert à décrire la structure du fichier. Cet enregistrement comporte une partie de structure fixe commune à tous les fichiers, et une partie dont la structure est liée aux types de données stockées dans le fichier.

2.3 Volume physique

Cette notion s'impose pour le format SPOT car du fait du volume des données que représente une image, il existe des cas où une seule bande n'est pas suffisante.

2.4 Volume logique

C'est l'ensemble des fichiers qui contiennent l'ensemble des informations liées à un produit. Ces fichiers peuvent être stockés physiquement sur une ou plusieurs bandes magnétiques.

3. Description détaillée d'un produit bande magnétique

3.1 Enregistrements et fichiers

Les enregistrements et les fichiers d'une bande magnétique peuvent se présenter selon différents formats caractérisés par les options informatiques suivantes:

- ✓ densité d'enregistrement;
- ✓ organisation des fichiers;
- ✓ type de codage;
- ✓ longueur des enregistrements.

3.1.1 .Densité d'enregistrement

Les dérouleurs de bande magnétiques disponibles actuellement peuvent, dans leur immense majorité, lire les bandes enregistrées avec une densité de 6250 Tipi (Bits par inch) ou de 1600 Bpi. C'est pourquoi ces deux options sont disponibles.

3.1.2.Organisation des fichiers

En mode spectrale multi bande, la position relative des enregistrements correspondant à des bandes spectrales différentes, varie selon que l'on choisit l'option BIL, (organisation « entrelacée »), ou l'option BSQ (organisation « séquentielle »).

- ✓ Dans l'option BIL, il n'y a qu'un fichier «image » pour l'ensemble des 3 bandes spectrales: chaque ligne correspond à trois enregistrements successifs: Le premier pour la bande spectrale XSI. Le second pour la bande spectrale XS2. Le troisième

pour la bande spectrale XS3.

- ✓ Dans l'option BSQ. Chaque bande spectrale est associée à un volume logique; il y a donc 3 volumes logiques, (comportant chacun plusieurs fichiers, notamment un fichier image et un fichier de données auxiliaires). Le premier volume logique comporte, (dans son fichier image), les données de bande spectrale XSI, le deuxième celles de XS2, et la troisième celles de l'image XS3. Chacun des trois volumes logiques comprend les données auxiliaires SPOT pour la scène considérée. Le nombre minimal de bandes magnétiques est de trois (une par volume logique).

3.1.3 - Type de codage

Deux types de codage des caractères sont employés par les calculateurs, dépendant de leur marque:

- ✓ Le codage ASCII, codage sur 7 bits plus un bit réservé soit à une extension du jeu de caractères, soit utilisé comme bit de parité.
- ✓ Le codage EBCDIC, codage sur 8 bits, (les codes n'ont pas toujours de correspondant caractère).

3.1.4 Longueur des enregistrements

Un enregistrement correspond à une ligne image, et le volume de pixels d'une ligne dépend de l'angle de prise de vue et du niveau de prétraitement, l'enregistrement correspondant à une ligne d'image peut contenir par conséquent un volume d'octets très variable. Or certains matériels informatiques ne peuvent accepter que des enregistrements de taille inférieure ou égale à 4096 octets.

C'est pour cette raison que l'on distingue les enregistrements de longueur standard. Des enregistrements de longueur courte.

En longueur standard, les nombres d'octets des enregistrements image résultent directement des conditions de prise de vue et du niveau de prétraitement

Les scènes SPOT livrées sur bande magnétique se présentent sous l'une des trois tailles standard suivantes :

- ✓ 5400 octets par enregistrement;
- ✓ 8640 octets par enregistrement;
- ✓ 10980 octets par enregistrement.

En longueur courte, les blocs de taille standard sont redécoupés en deux ou trois blocs de 3960 octets.

3.2- Structure logique

Sur les bandes magnétiques de produits SPOT qui forment un volume logique tel que défini ci-avant, il existe cinq types de fichiers.

Deux sont directement liés à la structure du format:

- ✓ le ou les Répertoires de volume;
- ✓ Le fichier de fin de volume.

Les trois autres contiennent les informations spécifiques aux images SPOT. Ce sont :

- ✓ le fichier Entête qui contient les données auxiliaires liées à l'image; le fichier image qui contient les données image:

- ✓ le fichier de « Queue » qui contient des informations liées au prétraitement effectué.

3.2.1 Fichier Répertoire de volume

Ce fichier directement lié à la structure du format, sert à décrire le contenu de la bande; il comporte cinq enregistrements de 360 octets répartis en trois types:

- ✓ un enregistrement « descripteur de volume »;
- ✓ trois enregistrements « Pointeurs de fichier »;
- ✓ un enregistrement « Texte ».

L'enregistrement « Descripteur de volume » contient les informations d'identification de la bande magnétique et du format de stockage.

Les enregistrements «pointeurs de fichier » contiennent les descriptions des différents fichiers, en particulier concernant le format de stockage des informations.

L'enregistrement « Texte » contient un commentaire permettant l'identification en claire de la bande.

3.2.2 Fichier Entête

Ce fichier contient les données auxiliaires liées à l'image: il comporte 27 enregistrements de 3960 octets répartis en 8 types:

- ✓ Un enregistrement « Descripteur de Fichier » qui contient les informations décrivant le fichier ainsi que la position dans chaque enregistrement de données liées à ce type de fichier;
- ✓ Un enregistrement « Entête » qui contient toutes les données décrivant les paramètres de prise de vue ainsi que les prétraitements effectués sur l'image;
- ✓ enregistrement « Ephémérides-Attitude » qui contient, comme son nom l'indique, les éphémérides pour la scène considérée, et les vitesses de

variation de l'attitude du satellite durant la prise de vue. De plus, on peut y trouver les directions de visée des détecteurs extrêmes;

- ✓ Les enregistrements « Egalisation Radiométrique » qui contiennent les gains relatifs inter détecteurs ainsi que les valeurs des courants d'obscurité ayant servi à l'égalisation des réponses des détecteurs;
- ✓ Les enregistrements « Histogrammes » qui contiennent, comme leur nom l'indique, les histogrammes calculés des données images; L'enregistrement « Projection cartographique » qui contient les Informations relatives au mode de projection utilisé;
- ✓ L'enregistrement « Amers » qui contient les caractéristiques des points d'appuis;
- ✓ L'enregistrement « Annotations » qui contient toutes les informations»S'inscrites sur les films de précision.

3.2.3 Fichier Image

Le fichier « Image » contient les valeurs radiométriques de tous les points de l'image y compris les pixels de remplissage. Ce fichier comporte deux types d'enregistrements:

- ✓ Un enregistrement « Descripteur de Fichier » qui contient les informations décrivant le fichier ainsi que la position dans chaque enregistrement des données liées à ce type de fichier;
- ✓ Les enregistrements « Image » qui contiennent les valeurs radiométriques des pixels précédées d'un préfixe de 32 octets et suivies d'un suffixe de 68 octets. Les données image proprement dites commencent donne à l'octet 33 de chaque enregistrement.

3.2.4 Fichier de Queue

Ce fichier contient deux types de données: les informations de qualité des données image et des modèles géométriques utilisés pour certains prétraitements: il comporte 8 enregistrements:

- ✓ Un enregistrement « Descripteur de Fichier » qui contient les informations décrivant le fichier ainsi que la position clans chaque enregistrement des données liées à cc type de fichier;
- ✓ Un enregistrement « Qualité » qui contient les informations sur la qualité des données et du prétraitement:

- ✓ Un enregistrement « Modèles géométriques » qui contient les coefficients des polynômes de localisation, ainsi que des polynômes servant au calcul des marques géométriques sur les films de précision;
- ✓ Un enregistrement « Paramètres de canevas » qui contient les caractéristiques du canevas de rectification;
- ✓ Les enregistrements « Canevas de rectification » qui contiennent les positions des points d'appui ou des point de calage utilisées pour les prétraitements considéré.

Chaque enregistrement peut contenir jusqu'à 132 de ces points.

3.2.5 Fichier de fin de volume

Ce fichier directement lié à la structure du format, sert à indiquer la fin du volume logique: il comporte:

- ✓ Un enregistrement « Descripteur de Volume» qui a la même structure que l'enregistrement « descripteur de volume » du fichier répertoire de volume, contient un sous-ensemble des informations contenues dans ce dernier enregistrement.

3.3- Structure Physique

La structure physique d'une bande magnétique est liée à la caractéristique de densité d'enregistrement choisie (6250 Bpi ou 1600 Bpi), et à l'organisation des fichiers (BIL ou BSQ).

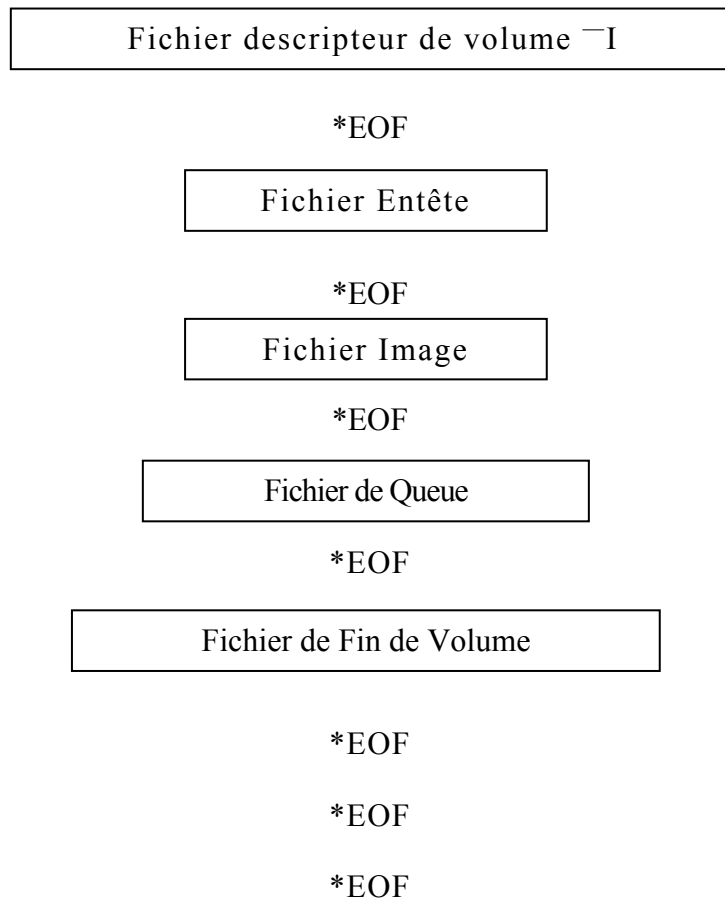
Scion que l'utilisateur choisit ta densité d'enregistrement de 6250 Bpi ou celle de 1600 Bpi, les données d'une scène. en organisation Bit vont être réparties sur une ou plusieurs bandes magnétiques. Dans le cas de l'organisation BSQ. Chaque bande spectrale est stockée sur un volume physique distinct.

La structure physique des bandes magnétiques SPOT est décrite ci-après.

3.3.1 Cas mono volume

C'est le cas des produits standard SPOT stockés sur des bandes magnétiques de densité 6250 Bpi.

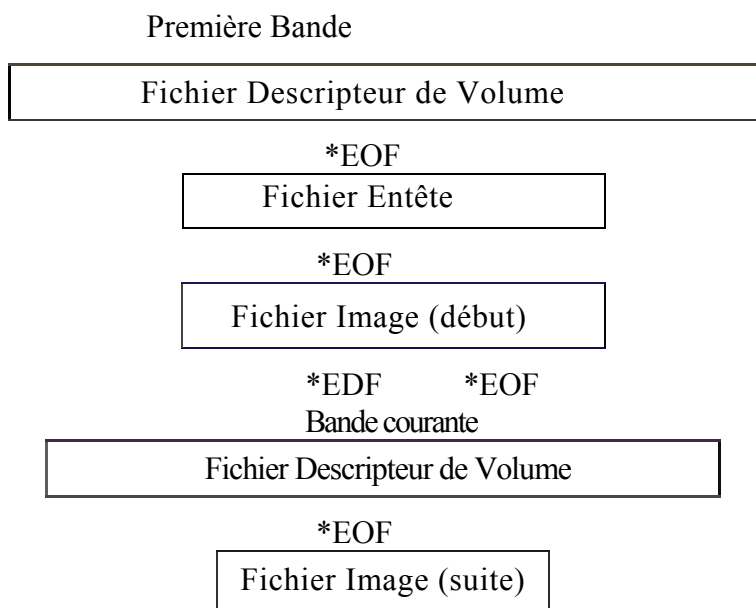
La structure de la bande est la suivante :

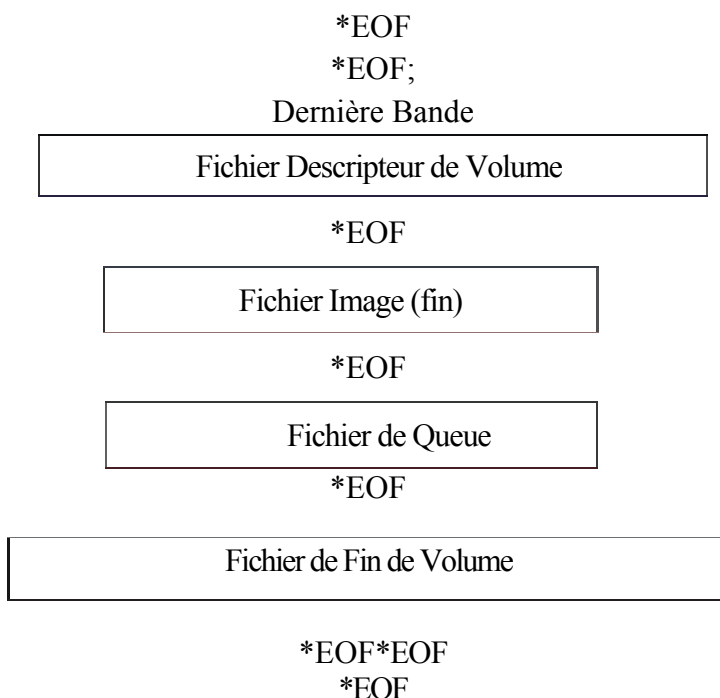


Note 1 : EOF (end of file) représente un marqueur de fin de fichier. Note 2 : l'option BSQ correspond à 3 bandes ayant cette structure.

3.3.2 Cas multi volume

C'est en particulier le cas des produits standard SPOT stockés sur des bandes magnétiques de densité 1600 13pi. La structure des bandes est la suivante:





Note 1 : la bande courante n'existe que si le nombre de bande est supérieur ou égal à 3; dans ce cas elle représente toute bande exceptée la première et la dernière.

Note 2: l'enregistrement descripteur du fichier image est répété en début de fichier image, sur chaque bande.

4. Fiches d'identité des données auxiliaires SPOT sous forme numérique

L'établissement d'algorithmes de lecture de données auxiliaires SPOT demande la connaissance d'un certain nombre de renseignements pour accéder à la donnée auxiliaire recherchée sur la bande.

Ces renseignements sont énumérés ci-après :

Nom générique :

Description :

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier :
- ✓ Nom de fichier :
- ✓ Numéro d'enregistrement :
- ✓ Nom d'enregistrement :
- ✓ Numéro (l'octet :

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage :
- ✓ Format de codage FORTRAN :

✓ Unité :

Commentaires :

Liste des fiches données auxiliaires

✓ Identification de la bande.

Nombre de bandes magnétiques.

✓ Rang de la bande magnétique.

✓ Date de création.

✓ Codage ASCII ou EBCDIC.

✓ Longueur des enregistrements image.

✓ Identification GRS (le la scène.

✓ Coordonnées du centre de la scène.

✓ Coordonnées des coins de la scène.

✓ Orientation de la scène.

Angle d'incidence.

✓ Azimut et hauteur solaires.

✓ Date de prise de vue.

✓ Identification du satellite.

✓ Nom de l'instrument.

✓ Mode spectral.

✓ Nature du codage en mode P.

✓ Numéro de révolution.

✓ Nombres de lignes et de colonnes de l'image.

✓ Niveau de prétraitement.

✓ Projection cartographique.

✓ Origine *des* coordonnées cartographiques.

✓ Coefficients d'étalonnage absolu

✓ Ephémérides.

✓ Temps Julien du centre de scène.

✓ Attitude.

✓ Directions de visée.

✓ Coefficients d'égalesisation.

✓ Histogrammes.

✓ Identification GRS de la scène de référence.

- ✓ Temps de scène de référence.
- ✓ Identification du satellite pour la scène de référence.
- ✓ Identification de l'instrument pour la scène de référence.
- ✓ Mode spectral de la scène de référence.
- ✓ Niveau de prétraitement de la scène de référence.
- ✓ Décalage par rapport à la scène de référence.

Voici les fiches de renseignements concernant quelques données auxiliaires citées ci-avant.

Nom générique : Codage ASCII ou EBCDIC

Description : Le type de codage utilisée pour les caractères
Alphabétiques et numériques de ce fichier

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 1
- ✓ Nom de fichier : Répertoire de volume
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2 et 4
- ✓ Nom d'enregistrement: Pointeur des fichiers entête et queue
- ✓ Numéro d'octet : 13

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 1 caractère
- ✓ Format de codage FORTRAN : A1
- ✓ Unité : A signifie ASCII
E signifie EBCDIC

Nom générique : Longueur des enregistrements image

Description : Taille des enregistrements du fichier image

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 1
- ✓ Nom de fichier : Répertoire de volume
- ✓ Numéro d'enregistrement : 3
- ✓ Nom d'enregistrement: Pointeur du fichier image
- ✓ Numéro d'octet : 109 à 116

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 8 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : I8

✓ Unité : Nombre d'octets

Commentaires :

Nom générique : Coordonnées du centre de la scène

Description : Coordonnées géographiques et coordonnées dans l'image en numéro de ligne et numéro de colonne du centre de la scène

Localisation sur la bande :

✓ Numéro du fichier : 2

✓ Nom de fichier : Entête

✓ Numéro d'enregistrement : 2

✓ Nom d'enregistrement : Entête

✓ Numéro d'octet : 85 à 148

Type de codage et unité :

✓ Type de codage : Coordonnées géographiques sur 32 caractères,

✓ Coordonnées image sur 32 caractère

✓ Format de codage FORTRAN : 2 (A1, I3,I2,I2, 8X),2I16

✓ Unité : Coordonnées géographiques latitude. puis longitude en degré, minute, seconde, coordonnées image. En numéro de ligne. Puis de colonne

Commentaires : Pour les latitudes. Le premier caractère est égal à N ou S suivant la position Nord ou Sud du point par rapport à l'équateur. Pour les longitudes. Le premier caractère est égal à E ou W suivant la position Est ou Ouest par rapport au méridien de Greenwich.

Nom générique : Orientation de la scène

Description: Angle de la direction géographique orientée vers l'Est avec les lignes de l'image brute.

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2
- ✓ Nom d'enregistrement: Entête
- ✓ Numéro d'octet : 437 à 452

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 16 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : I I X, F5.1
- ✓ Unité : Degré décimal

Commentaires : L'angle donné est le complément à 90° de l'angle entre les lignes de l'image brute et le Nord géographique.

Nom générique : Angle d'incidence

Description: Angle de la direction de visée au centre de la scène avec la normale à l'ellipsoïde de référence.

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2
- ✓ Nom d'enregistrement: Entête
- ✓ Numéro d'octet : 453 à 468

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 16 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : A 1 F4.1, 11X
- ✓ Unité : Degré décimal

Commentaires : Le premier caractère peut prendre la valeur L ou R. S'il vaut L (Let t), le satellite est passé, lors de la prise de vue, à l'Ouest du centre de la scène : s'il vaut R (Right), il est passé à l'Est.

Nom générique : Azimut et hauteur solaires

Description: Azimut et hauteur solaires au centre de la scène à l'instant de prise de vue, indiqué dans le champ de nom générique « date de prise de vue ».

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2
- ✓ Nom d'enregistrement : Entête
- ✓ Numéro d'octet : 469 à 500

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 2 angles sur 16 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : 10X, F6.1, 11X, F5.1
- ✓ Unité : Degré décimal

Commentaires : Le premier paramètre correspond à l'azimut solaire. Le deuxième à la hauteur.

Nom générique : Date de prise de vue

Description : Date et heure de la prise de vue

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2
- ✓ Nom d'enregistrement : Entête
- ✓ Numéro d'octet : 581 à 612

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 32 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : I4, 512, I3, I 5X
- ✓ Unité: Année, mois, jour. heure. minute, seconde, milliseconde

Commentaires : L'heure de prise de vue correspond à l'heure de prise de vue du centre de la scène. Les millisecondes sont toujours à 0.

Nom générique : Nom de l'instrument

Description : Nom de l'instrument ayant servi à la prise de vue de la scène considérée.

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier: 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2
- ✓ Nom d'enregistrement: Entête
- ✓ Numéro d'octet : 629 à 644

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 16 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : A16
- ✓ Unité : Sans objet

Commentaires : Le nom de l'instrument peut prendre l'une des deux valeurs HRV1 ou HRV2.

Nom générique : Mode spectral

Description : Mode de prise de vue (multi bande ou panchromatique)

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2
- ✓ Nom d'enregistrement : Entête
- ✓ Numéro d'octet : 645 à 660

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 16 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : A 16

Commentaires : Ce champ peut prendre l'une des deux valeurs XS pour multi bande ou PAN pour panchromatique.

Nom générique : Nombre de lignes et de colonnes de l'image

Description : Nombre de lignes et de colonnes de l'image
dépendant du niveau de prétraitement et du mode spectral.

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2
- ✓ Nom d'enregistrement : Entête

✓ Numéro d'octet : 997 à 1028

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 2 paramètres sur 16 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : 2 116
- ✓ Unité : Colonne ou ligne

Commentaire : Le premier paramètre représente le de pixels par ligne et donc le nombre de colonnes ; le deuxième représente le nombre de ligne de l'image utile.

Nom générique : Projection cartographique

Description : La projection utilisée, dans le cas des niveaux 2 ou S2

Localisation sur la bande

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2
- ✓ Nom d'enregistrement : Entête
- ✓ Numéro d'octet : 1413 à 1444

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 32 caractères alphanumériques
- ✓ Format de codage FORTRAN : A32

Commentaires :

Nom générique : Origine coordonnées cartographiques

Description : Coordonnées cartographiques du premier point de la première ligne (cas du niveau 3)

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2
- ✓ Nom d'enregistrement: Entête
- ✓ Numéro d'octet : 1621 à 1652

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 32 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : 8X, 2112
- ✓ Unité : Mètres (X,Y)

Commentaires :

Nom générique : Coefficients d'étalonnage absolu

Description : Coefficients permettant le calcul de la luminance équivalente des objets observés à partir de la valeur radiométrique de points de l'image.

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 2
- ✓ Nom d'enregistrement: Entête
- ✓ Numéro d'octet : 1765 à 1788

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 3 coefficients sur 8 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : 3 F8.5
- ✓ Unité : $\text{w}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{micromètre}$

Commentaires : Dans le cas d'une image en mode panchromatique, cet enregistrement comporte un seul coefficient : dans le cas d'une image multi bande, les trois coefficients sont liés respectivement aux bandes spectrales XS , XS2, puis XS3.

Nom générique : Ephémérides

Description : Ephémérides du satellite, lors de la prise de vue

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 3
- ✓ Nom d'enregistrement : Ephémérides- Attitude

✓ Numéro d'octet : 21 à 920

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 9 mesures des coordonnées et de la vitesse du satellite sur 12 caractères, instants correspondant sur 28 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : Position 3 (F9.3, 3X)
vitesse 3 (F9.6, 3X) date
(215, 18X)

- ✓ Unité : Position en kilomètre
vitesse en kilomètre par seconde
date en jour julien et en seconde dans le jour

Commentaires : Suivant l'instant du centre de la scène. On trouve Roll 9 mesure dans cet enregistrement.

Nom générique : Attitude

Description : Vitesse de variation de l'attitude du satellite durant la prise de vue.

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 3
- ✓ Nom d'enregistrement : Ephémérides-Attitude
- ✓ Numéro d'octet : 1001 à 2440 ou 2460

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 72 ou 73 mesures
contenant k numéro de ligne
image, et les trois vitesse de
variation d'attitude sur 20
caractères

- ✓ Format de codage FORTRAN : 14, 315, 1 X
- ✓ Unité : Pour les données d'attitude : 10^{-6} degré/ s

Commentaires : Les mesures d'attitude sont faites au niveau de la plate-forme SPOT toutes les 125 millisecondes.

Nom générique : Directions de visée

Description : Angles décrivant les directions de visée des détecteurs extrêmes

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 3
- ✓ Nom d'enregistrement : Ephéméride-Attitude
- ✓ Numéro d'octet : 2461 à 2492

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 4 angles sur R caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : 4 (14, 12, 12)
- ✓ Unité: degré, minute, seconde

Commentaires : Les angles sont définis dans le référentiel d'attitude le premier angle ψ_x représente une rotation autour de l'axe de tangage. Le deuxième ψ_y autour de l'axe de roulis.

Nom générique : Coefficients d'égalesation

Description : Coefficients d'étalonnage relatif utilisés pour égaliser les réponses des détecteurs. Ces coefficients sont appliqués systématiquement pour tous les niveaux de prétraitement.

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier : 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement : 4 à 21
- ✓ Nom d'enregistrement: Egalisation radiométrique
- ✓ Numéro d'octet : 61 à 2060

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 1000 coefficients entiers
Codés en binaire sur 16 bits
- ✓ Format de codage FORTRAN : Sans objet
- ✓ Unité : sans dimension

Commentaires : les gains inter détecteurs « g » sont multipliés par 10000. Les courants d'obscurité « e » sont multipliés par 10.

Noni générique : Mode spectral de scène de référence

Description : Mode spectral (multi bande ou panchromatique) de la Scène de référence (cas des niveaux S1 ou S3)

Localisation sur la bande :

- ✓ Numéro du fichier: 2
- ✓ Nom de fichier : Entête
- ✓ Numéro d'enregistrement: 3

- ✓ Nom d'enregistrement : Entête
- ✓ Numéro d'octet : 1589 à 1604

Type de codage et unité :

- ✓ Type de codage : 16 caractères
- ✓ Format de codage FORTRAN : A16
- ✓ Unité : : vaut XS ou PAN

Commentaires :