



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
**FACULTE DES SCIENCES**  
**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

pour l'obtention du diplôme de

**Maîtrise en Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée**

Option : Mines et Environnement

Intitulé

**APPORT DU TRAITEMENT D'IMAGE SATELLITAIRE  
LANDSAT 7 ETM+ A LA CARTOGRAPHIE LITHOSTRUCTURALE  
(Cas de Belafike, Commune rurale de Satrokala, District d'Ihosy)**

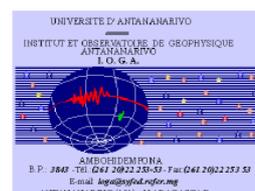
Présenté par

**RAKOTOARISON Hobiniaina Anthonio**

Devant les membres du jury composés de :

Président	RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien	Professeur Titulaire
Rapporteurs	RAKOTO Heritiana	Maître de conférences
Examineur	RASOLOMANANA Eddy Harilala	Professeur Titulaire

Le 11 septembre 2013







UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

pour l'obtention du diplôme de

**Maîtrise en Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée**

Option : Mines et Environnement

Intitulé

**APPORT DU TRAITEMENT D'IMAGE SATELLITAIRE  
LANDSAT 7 ETM+ A LA CARTOGRAPHIE LITHOSTRUCTURALE  
(Cas de Belafike, Commune rurale de Satrokala, District d'Ihosy)**

Présenté par

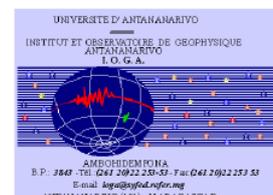


**RAKOTOARISON Hobiniaina Anthonio**

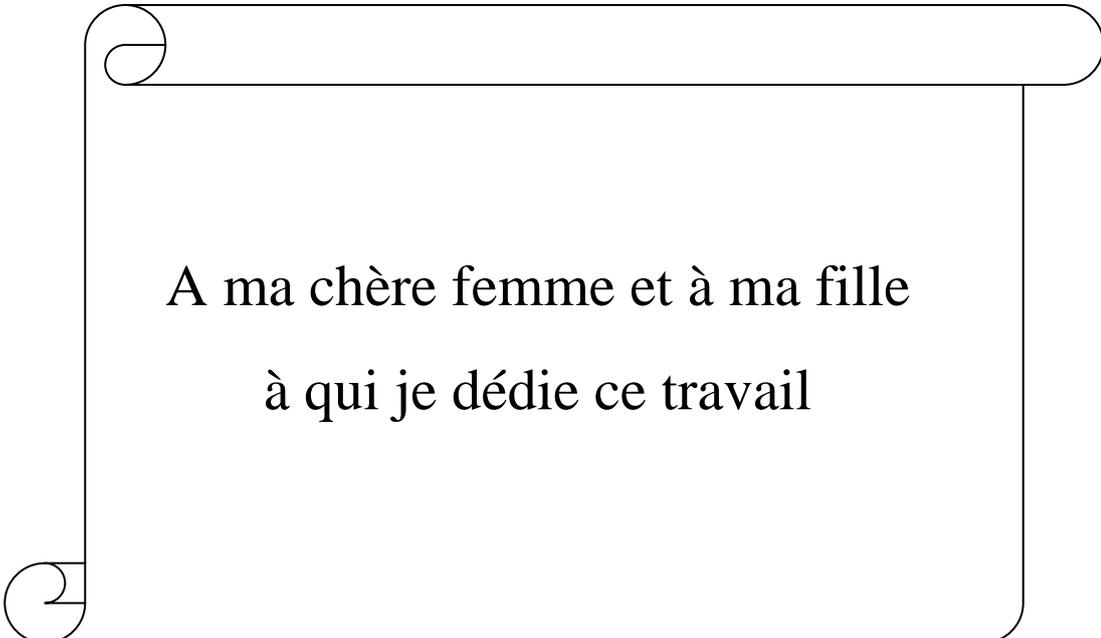
Devant les membres du jury composés de

Président	RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien	Professeur Titulaire
Rapporteurs	RAKOTO Heritiana	Maître de conférences
Examineur	RASOLOMANANA Eddy Harilala	Professeur Titulaire

Le 11 septembre 2013



## DEDICACE



A ma chère femme et à ma fille  
à qui je dédie ce travail

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire, notamment :

- Monsieur RAHERIMANDIMBY Marson, Professeur Titulaire, Doyen de la Faculté des Sciences, de m'avoir admis à la Faculté des Sciences,
- Monsieur RAKOTONDRAMANANA Hery Tiana, Maître de Conférences, Chef du Département de Physique, pour ses efforts pour le bon fonctionnement de notre département,
- Monsieur RAMBOLAMANANA Gérard, Professeur Titulaire, Directeur de l'Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo, d'avoir mis en œuvre tous les infrastructures, existant au sein de son établissement, pour la formation,
- Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien, Professeur Titulaire, Responsable de la formation en Maîtrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée, de m'avoir permis d'être parmi les étudiants au sein de la formation et d'avoir accepté de présider cette soutenance de mémoire,
- Monsieur RAKOTO Heritiana, Maître de Conférences, mon encadreur pédagogique, de m'avoir conseillé, dirigé et soutenu lors de la réalisation de ce travail,
- Monsieur RASOLOMANANA Eddy Harilala, Professeur Titulaire, d'avoir consacré une grande partie de son temps pour examiner ce travail,
- Tout le personnel de la SGDM, en particulier Monsieur ANDRIAMBOAVONJY Mamy Rija, Doctorant, géophysicien au sein de la Société Géosciences pour le Développement de Madagascar, mon encadreur professionnel, pour ses conseils tout au long de la préparation de ce mémoire de fin d'étude,
- Collègues étudiants, pour leur aide et encouragement tout au long de la formation et pendant la réalisation de mémoire,
- Toute ma famille, spécialement ma femme, ma fille et mes parents, pour leur soutien moral, matériel et financier.

Sans vous, ce mémoire n'aurait pas pu être mené à bien.

# SOMMAIRE

DEDICACE

REMERCIEMENT

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION

CHAPITRE I. CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE

CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES

I. MATERIELS

II. RAPPEL METHODOLOGIQUE

III. OBSERVATION SUR TERRAIN

CHAPITRE III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I. CARTOGRAPHIE LITHOLOGIQUE

II. CARTOGRAPHIE LINEAMENTAIRE

III. CARTE LITHOSTRUCTURALE

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

TABLE DES MATIERES

ANNEXE

RESUME

ABSTRACT

## LISTE DES ABREVIATIONS

ACP	: Analyse en Composante Principale
CP	: Composante Principale
DN	: Digital Number ou valeur radiométrique d'un pixel
ENVI	: Environment for Visualizing Images
ETM	: Enhance Thematic Mapper
IOGA	: Institut et Observatoire de Géophysique Antananarivo
MSTGA	: Maîtrise des Science et Technique en Géophysique Appliquée
NE	: Nord Est
NNE	: Nord Nord Est
NW	: Nord Ouest
OIF	: Optimum Index Factor
REM	: Rayon Electromagnétique
RVB	: Rouge, Vert, Bleu
SE	: Sud Est
SGDM	: Société Géosciences pour le Développement de Madagascar
SIG	: Système d'Information Géographique (GIS pour les anglophones)
SSE	: Sus Sud Est
SSW	: Sud Sud Ouest
SW	: Sud Ouest
TM	: Thematic Mapper
UTM	: Universal Transverse Mercator
WGS	: World Geodetic System
WNW	: Ouest Nord Ouest
WSW	: Ouest Sud Ouest
ZC	: Zone de Cisaillement

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation de la région d'étude.....	3
Figure 2: Carte topographique de la région d'étude.....	4
Figure 3: Carte des unités tectono-métamorphiques du socle cristallin du Précambrien de Madagascar ....	6
Figure 4: Carte structural simplifiée du Précambrien de Madagascar.....	7
Figure 5: Organigramme de la méthodologie de travail.....	10
Figure 6: Principe de base de la télédétection .....	12
Figure 7: Etapes de la télédétection.....	13
Figure 8: Représentation de l'onde électromagnétique .....	14
Figure 9: Détails des domaines spectraux .....	15
Figure 10: Signature spectrale de quelques minéraux et roches.....	15
Figure 11: (a) Satellite géostationnaire ; (b) Satellite à défilement .....	17
Figure 12: Comparaison entre une image très colorée et une image de télédétection.....	24
Figure 13: Image de télédétection après une analyse en composante principale .....	25
Figure 14: Image brute sans filtre.....	28
Figure 15: Image après l'application du filtre Sobel.....	28
Figure 16: Image après l'application du filtre directionnel sous différents angles.....	29
Figure 17: a- Rosace; b- Foliation sur le canevas de Wulff; c- Densité du canevas de Wulff .....	32
Figure 18: Composition en couleur naturelle 321 .....	34
Figure 19: Carte géologique au 1/100 000 de la région d'étude .....	35
Figure 20: Composition colorée 754 .....	36
Figure 21: Composition colorée 742 .....	37
Figure 22: Composition colorée 453 avec les différentes formations connues et reconnaissables .....	38
Figure 23: Composition colorée (a) visible, (b) mixte et (c) infrarouge .....	39
Figure 24: Composition colorée CP1 <sub>123457</sub> , CP2 <sub>123457</sub> , CP3 <sub>123457</sub> .....	40
Figure 25: Composition colorée (a) rapport de bandes 5/7 5/1 5/4, (b) rapport de bandes 7/3 5/2 4/3.....	41
Figure 26: Carte lithologique de la région d'étude.....	42
Figure 27: Différents filtres appliqués à la première composante principale CP1 <sub>123457</sub> .....	43
Figure 28: Carte linéamentaire de la région d'étude .....	44
Figure 29: Rosace de direction des linéaments de la région d'étude.....	45
Figure 30: Carte lithostructurale de la région d'étude.....	49

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques et applications des bandes spectrales du capteur TM .....	18
Tableau 2: Caractéristiques des bandes Landsat 7 ETM+.....	19
Tableau 3: Différentes combinaisons utilisées en fausses couleurs et leurs utilités.....	21
Tableau 4: Corrélations entre les matrices des six bandes et écarts types standards absolus .....	22
Tableau 5: OIF obtenu à partir des vingt combinaisons possibles des six bandes 1, 2, 3, 4, 5, 7 .....	23
Tableau 6: Taux de représentativité et Pourcentage de variance des composantes principales .....	26
Tableau 7: Exemples de rapports de bandes.....	27
Tableau 8: Résultat montrant la distribution de l'orientation des linéaments .....	32
Tableau 9: Caractéristiques des mesures structurales effectuées sur le terrain .....	45

## INTRODUCTION

La cartographie géologique tient une place capitale dans la recherche minière, notamment la phase d'exploration. Il est donc indispensable de maîtriser les techniques modernes de confection de cartes géologiques suivant l'avancée de la technologie. Le travail sur terrain est assez compliqué en matière de prospection étant donné la discontinuité et la rareté des affleurements, les problèmes d'accessibilité et la contrainte temps (durée limitée des missions).

Dans ce contexte, l'utilisation de la télédétection aide à discriminer les différentes formations sur une région donnée, à mettre en évidence les structures géologiques, mais également à gagner beaucoup de temps au niveau du traitement et des interprétations en multipliant les capacités d'observation et de détection (Hammad et al., 2009).

Ce travail a pour objectif de faire ressortir les traitements les plus adéquats d'images satellitaires pour la cartographie géologique, d'extraire des informations géologiques et structurales, à l'aide des images satellitaires Landsat 7 ETM+, afin de permettre une cartographie lithologique et linéamentaire de la région de Belafike et de comparer les résultats obtenus aux cartographies antérieures dans la région d'étude.

Le choix de la région d'étude s'est surtout porté sur le fait qu'elle se situe juste au Sud de la zone de cisaillement Bongolava-Ranotsara, la région bénéficie de peu d'étude géologique malgré sa richesse en ressources minières. La région a également été sélectionnée parce qu'une mission de prospection géochimique y a été réalisée.

Le présent mémoire a pour titre « *Apport du traitement d'image satellitaire Landsat 7 ETM+ à la cartographie lithostructurale (Cas de Belafike, Commune rurale de Satrokala, District d'Ihosy)* ». Il comporte trois chapitres:

- Le contexte général
- Les matériels et méthodes
- Les résultats et interprétations

## **CHAPITRE I.    CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE**

## I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

### I.1. Présentation de la région

La région d'Ihorombe se situe dans le centre sud de Madagascar. Elle se situe entre la latitude 23°10' et 21°61' Sud et la longitude 44°98' et 46°62' Est. L'ensemble de la région couvre une superficie de 40.990 km<sup>2</sup>.

### I.2. Localisation de la zone d'étude

Belafike se trouve dans la région Ihorombe, district d'Ihoso et Commune rurale de Satrokala comme montre la figure 1. Elle est située à environ 25 km au Nord-ouest d'Ihoso. Elle est délimitée par la carte feuille J55.

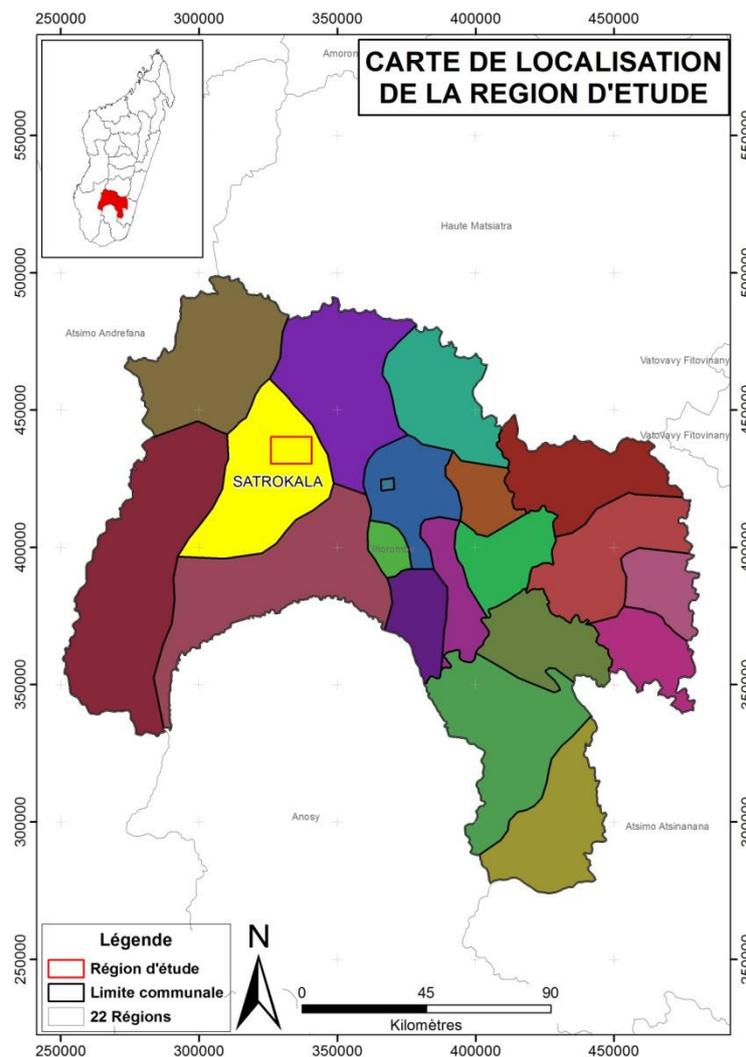


Figure 1: Carte de localisation de la région d'étude  
(source : BD 500)

### I.3. Cadre physique de la région d'étude

La région d'étude est caractérisée au centre par des vallées généralement de type pénéplaine et sur les parties Est et Ouest par des crêtes atteignant les 1300 m d'altitude. Ces crêtes ont une direction générale suivant NNW-SSE.

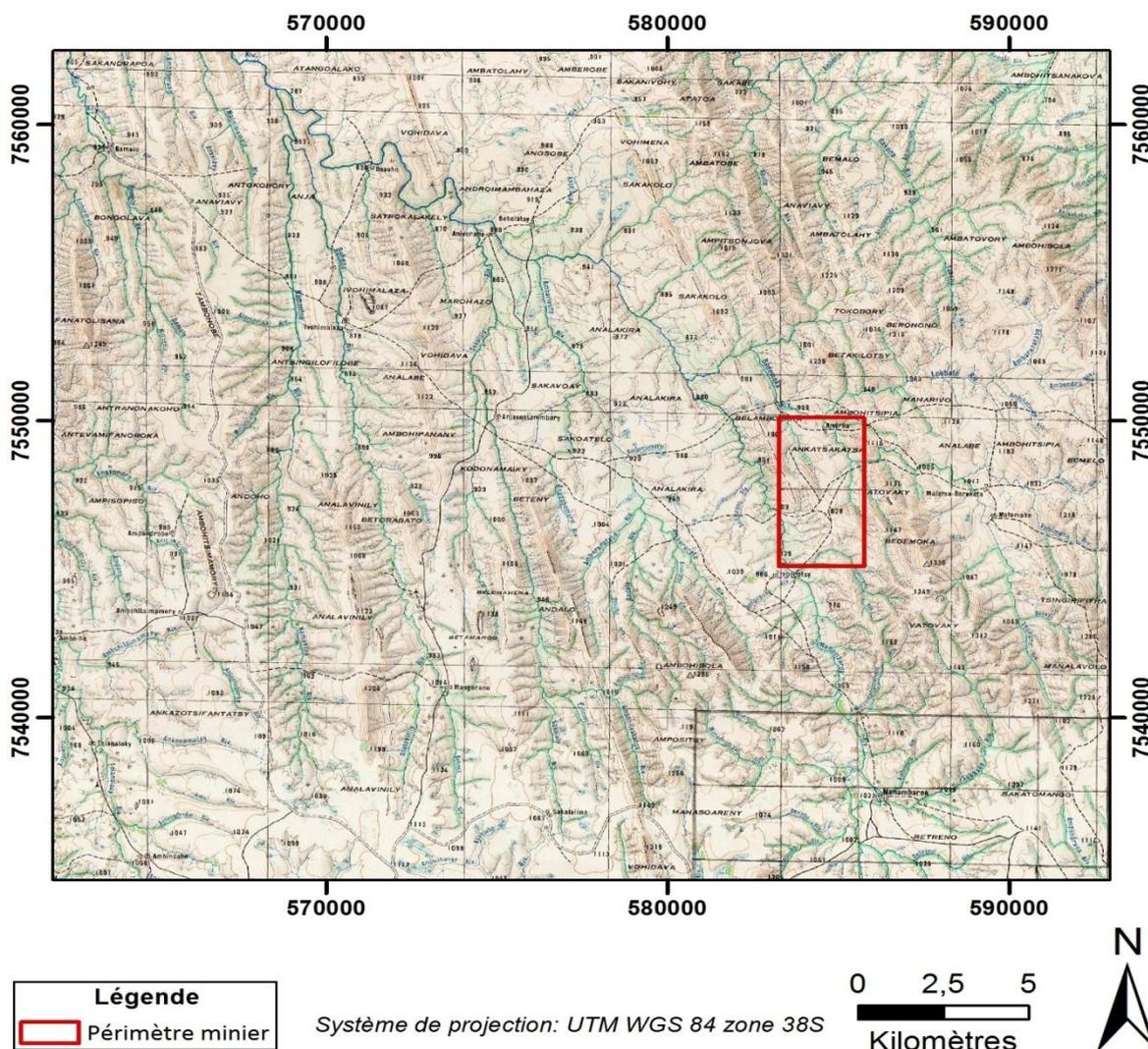


Figure 2: Carte topographique de la région d'étude  
(source : FTM)

Le réseau hydrographique rencontré dans la région est de type dendritique à moyenne densité.

Du point de vue formations végétale, Belafike est couverte par des savanes herbeuses de type arbustif. Le sol est presque mis à nu à cause des fréquents feux de brousse.

La région d'étude est soumise à un climat tropical avec une période sèche de mai à octobre et une période pluvieuse de novembre à avril.

Avec une population à majorité Bara, la région a une densité moyenne de 5,85 hab/km<sup>2</sup>.  
(source : INSTAT, 2005)

## II. CONTEXTE GEOLOGIQUE

### II.1. Aperçu de la géologie de Madagascar

Du point de vue géologique, Madagascar est constituée de deux entités principales : le socle cristallin précambrien qui constitue l'ossature de l'île ; elle affleure sur les deux tiers de la superficie totale de l'île, et la couverture sédimentaire, très fracturée, qui occupe le tiers restant de l'île; elle repose en discordance sur le socle cristallin.

De l'Archéen au Néoprotérozoïque, le socle cristallin a été polystructuré par les divers événements tectono-métamorphiques successifs qui ont jalonné son histoire (Windley et al, 1994).

Le métamorphisme est généralement du faciès amphibolite supérieur au faciès granulite. Du fait de sa complexité, l'histoire du socle cristallin a toujours été sujette à controverses.

Au fil des années, plusieurs hypothèses et interprétations ont été avancés :

- Besairie s'est basé sur la pétrographie, les gradients régionaux et locaux des intensités de métamorphisme. Pour lui, « *le socle cristallin serait un empilement sédimentaire repris par le métamorphisme* » (Besairie, 1964).

- Douze ans plus tard, Hottin (1976) et Vachette (1977) ont avancé un concept de zonéographie chronologique basé sur le métamorphisme et les âges absolus obtenus sur les principaux faciès types du socle cristallin.

- Et plus récemment, un concept basé sur les unités d'homogénéité métamorphisme, tectonique, et géochronologie structurale (Windley et al., 1994 ; Collins et al ; 2002).

Dans le cadre de cette étude, on adoptera l'hypothèse de Collins qui subdivise le socle cristallin malgache en neuf unités tectono-métamorphique (Collins et al, 2002) :

- Cinq blocs tectono – métamorphiques stables qui sont les blocs de l'Antongil, d'Antananarivo, d'Amborompotsy – Ikalamavony, de Taolagnaro – Ampanihy et de Vohibory.

- Trois nappes de charriage : nappe de Tsaratanana (avec trois ceintures qui sont celles de Befandriana, d'Andriamena et de Maevatanana), nappe d'Itremo et nappe de Bemarivo.

- Une zone de fermeture qui est la zone de suture Betsimisaraka.

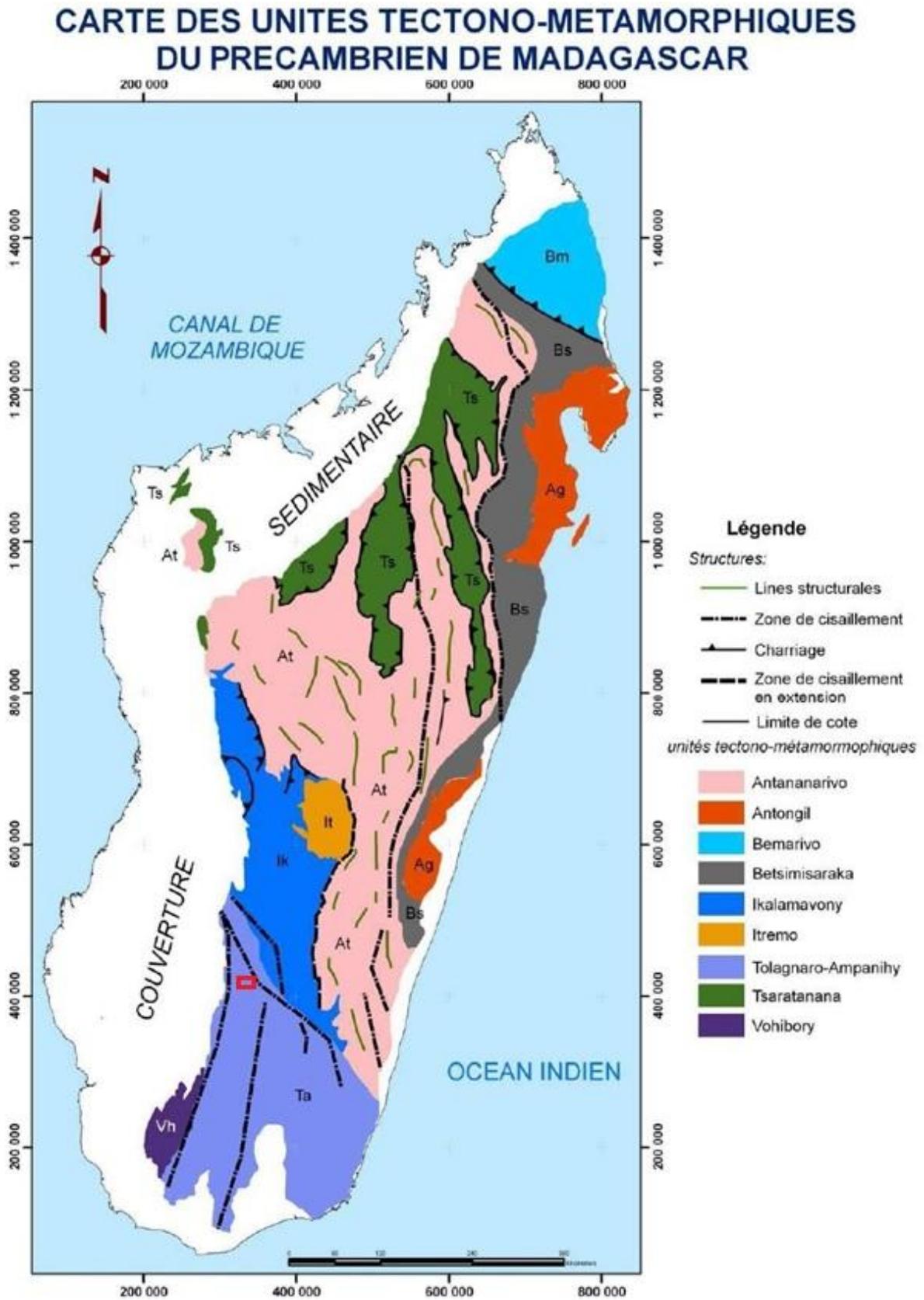


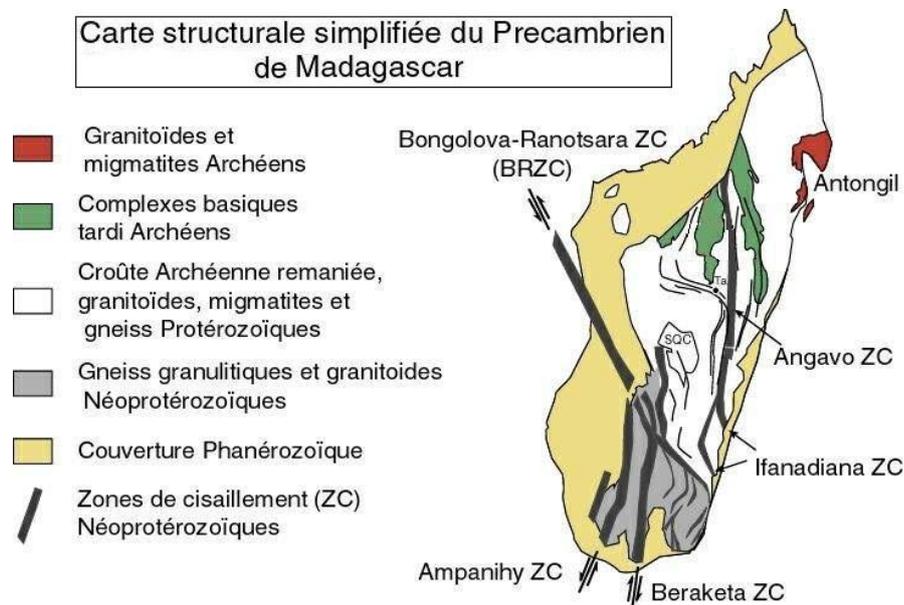
Figure 3: Carte des unités tectono-métamorphiques du socle cristallin du Précambrien de Madagascar (source: Collins et al, 2002)

## II.2. Zone cisailante Ranotsara

Ranotsara est en grande partie une vallée à fond plat jusqu'à 200 km long, de direction NW-SE.

Cette zone cisailante est géochronologiquement mise en place durant la fin de l'orogénèse panafricaine dominée par la zone de collision et le mouvement d'extension tectonique (Collins et Windley., 2002).

Le cisaillement majeur ductile de Ranotsara (figure 5) est interprété comme une rampe (Martelat et al., 1993) ou un effet de coin avec poussée brusque (Martelat et al., 2000). Deux générations du cisaillement ont engendré deux linéations E-W et N-S, associé communément avec les foliations observées à proximité d'Ihosy (Martelat et al., 2000).



**Figure 4: Carte structural simplifiée du Précambrien de Madagascar**

(*source* : Martelat, 2000)

La zone de cisaillement Ranotsara a une direction de N140 à N150 et de cinématique sénestre. Elle disparaît à l'Ouest sous la couverture sédimentaire et à l'Est ses formes deviennent moins évidentes du fait de la densité des structures fragiles. En effet, ce cisaillement se confond avec les failles de même direction qui le prolongent jusqu'à la côte Est et sa longueur atteint les 350 km. Il est moins bien homogène que le cisaillement de Beraketa ou d'Ampanihy et sa largeur est difficilement caractérisable (Rolin, 1991; Windley et al, 1994; Martelat, 1998).

De plus, cette zone de cisaillement s'anastomose avec des zones de cisaillement plus petites de 3 à 5km de large sur 20km de long (Noizet, 1969).

## **CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES**

## I. MATERIELS

La présente étude s'appuie sur le traitement et l'interprétation d'une scène Landsat 7 ETM+ p159r075 multispectrale et panchromatique, c'est-à-dire six bandes multispectrales à 30m de résolution TM 1,2,3,4,5,7 ; à 120 m de résolution TM 6 et une bande panchromatique TM 8 à 15m de résolution, couvrant la région de Belafike – Satrokala.

Pour se faire, nous avons utilisé les logiciels suivants :

- **ENVI 4.3** : élaboré par la société « ITTVIS », c'est un logiciel de traitement d'image satellitaire. Il présente une interface logique et intuitive pour lire, visualiser et analyser différents formats d'images.
- **ArcGIS 10.0** : c'est un ensemble de puissants logiciels d'information géographique développé par la société américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute). Il permet d'identifier dans les données des relations et des tendances qui sont moins visibles dans les bases de données, les feuilles de calcul ou les statistiques.
- **SPO 2003** : c'est un logiciel d'orientation préférentielle de formes. Il permet un énorme gain de temps en calculant automatiquement le nombre, la longueur et la direction de plusieurs centaines, voire des milliers de linéaments que peuvent inclure les cartes, en l'espace de quelques secondes.
- **ROSE.NET** : C'est une application Windows interactive qui permet la représentation graphique et le calcul de la répartition statistique de l'orientation de linéaments.

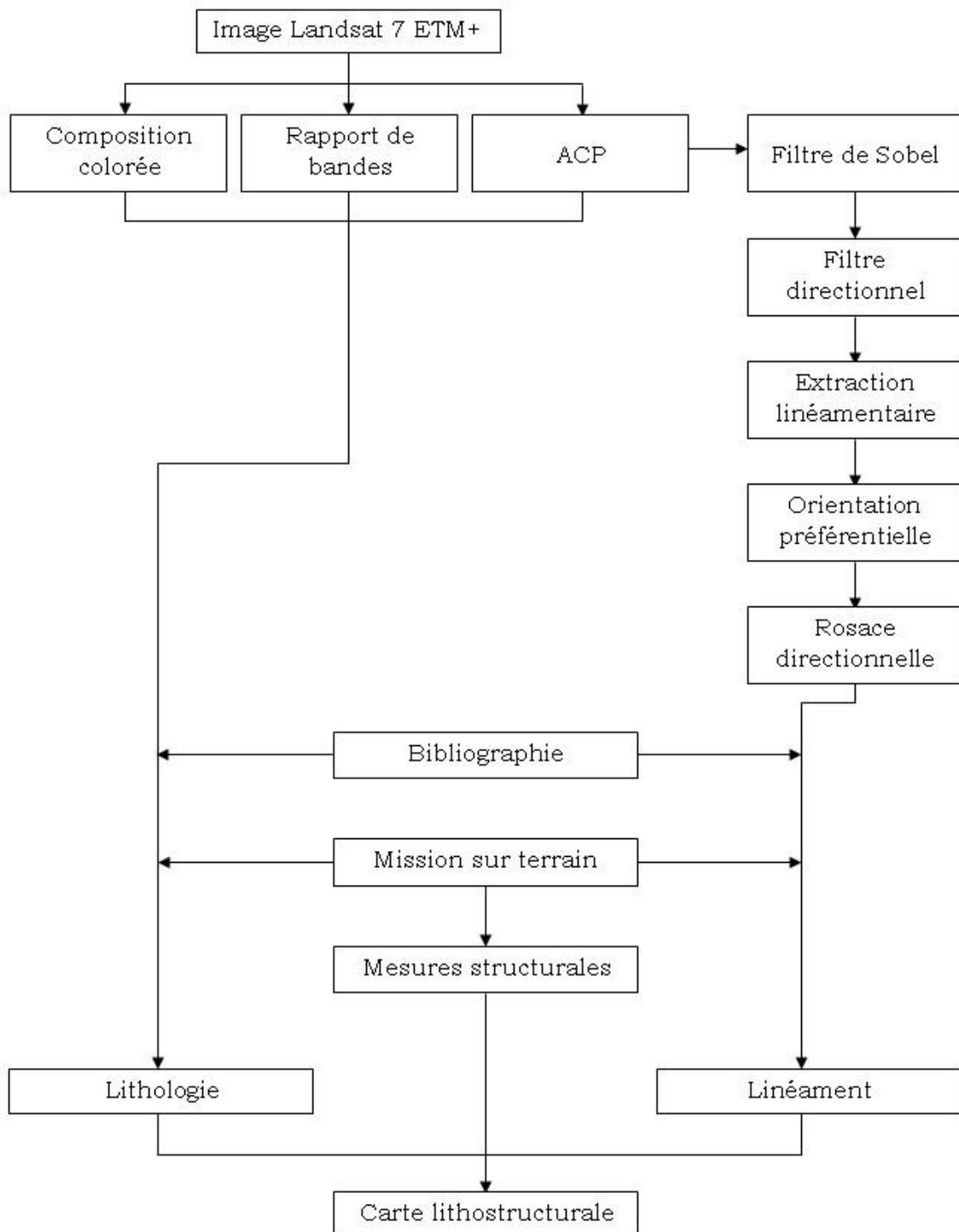
Dans cette étude, en plus des images satellitaires, nous avons consulté également des livres et des ouvrages, analogiques et numériques, de la zone d'étude et avons utilisé des données telles que la carte géologique au 1/100 000, établie par Randriamanantenina (1967), de la feuille J55.

## II. RAPPEL METHODOLOGIQUE

La méthodologie adoptée pour ce travail s'est basée surtout sur le traitement des images satellitaires et qui a été ensuite confrontée à la carte géologique à 1/100000 de la région et aux données de terrain pour la validation. Pour cela, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Traitement des images satellitaires p159r075 qui couvre la zone d'étude. Nous avons effectué une composition colorée, suivie d'une ACP et d'un rapport de bandes.
- Application de deux filtres, Sobel et directionnel, sur le CP1<sub>123457</sub> pour le rehaussement des linéaments en vue de leur identification.

- Numérisation et extraction de la lithologie et des linéaments en vue d'une carte litho-linéamentaire ; elles ont été traitées sous le logiciel ArcGIS ;
- Traitement de la carte linéamentaire dans SPO 2003 pour obtenir le nombre et les directions des linéaments.
- Extraction de la rosace de direction, à partir des données obtenues avec SPO 2003, grâce au logiciel Rose.NET.



**Figure 5: Organigramme de la méthodologie de travail**

## **II.1. Télédétection et cartographie géologique**

### ***II.1.1. Notion de télédétection***

La télédétection est utilisée de manière croissante dans différents domaines. 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 telles que la gestion des ressources naturelles, la climatologie, l'océanographie, la géographie ou la cartographie.

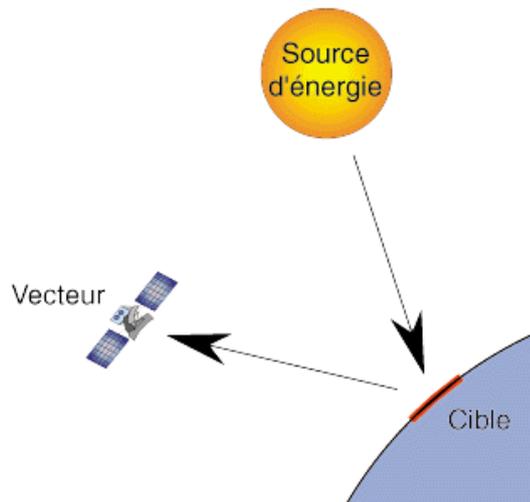
#### **Définition**

Télédétection vient de deux mots, Télé qui signifie « à distance » et détection qui veut dire « découvrir » ou « déceler ». Le néologisme « remote sensing » fait son apparition aux Etats-Unis dans les années soixante, lorsque des capteurs nouveaux viennent compléter la traditionnelle photographie aérienne. Le terme de télédétection a été introduit officiellement dans la langue française en 1973 et sa définition officielle est la suivante : « *Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.* » (Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988).

Cette définition est très vaste. Mais ce travail concerne particulièrement les techniques de télédétection aérospatiale, qui a pour but l'étude de la surface de la Terre à partir des satellites, en utilisant les propriétés du rayonnement électromagnétique émis, réfléchis ou diffusé par les corps ou surfaces qu'on étudie. Voici une définition plus adaptée à notre cas : « *La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre, sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information.* » (Site Web du Centre Canadien de Télédétection : <http://www.ccrs.nrcan.qc.ca>).

#### **Principe de base**

Le principe de base de la télédétection est similaire à celui de la vision de l'homme. La télédétection est le fruit de l'interaction entre trois éléments fondamentaux : une source d'énergie, une cible et un vecteur (figure 7).



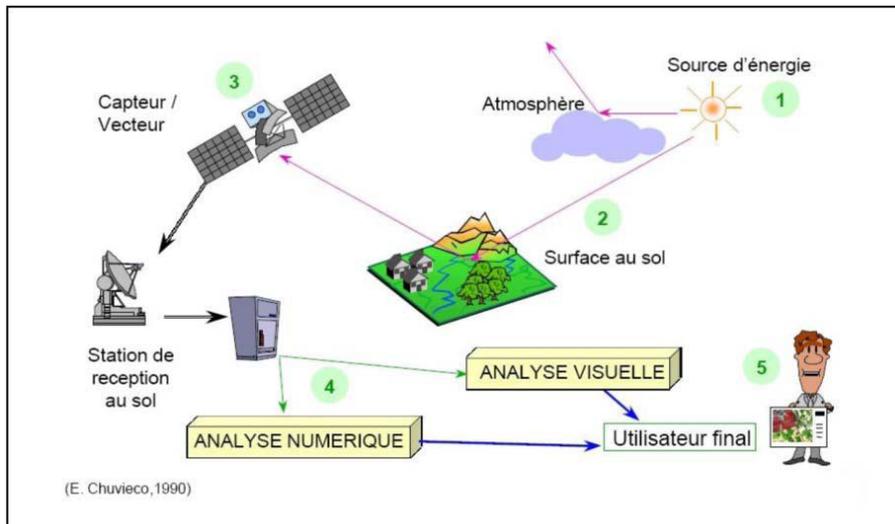
**Figure 6: Principe de base de la télédétection (source : Big n°3)**

- **La cible** est la portion de la surface terrestre observée par le satellite. Sa taille peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés.
- **La source d'énergie** est l'élément qui "éclaire" la cible en émettant une onde électromagnétique (flux de photons). Dans la majorité des cas, la source d'énergie est le soleil. Néanmoins, la technologie RADAR nécessite qu'un émetteur soit embarqué sur le satellite. Dans ce cas, le satellite lui-même est source d'énergie. Il est également possible de mesurer la chaleur qui se dégage à la surface de la cible (infrarouge thermique), donc c'est la cible qui est source d'énergie (bien qu'il s'agisse d'énergie solaire stockée et réémise).
- **Le vecteur** ou plate-forme de télédétection mesure l'énergie solaire (rayonnement électromagnétique) réfléchi par la cible. Le vecteur peut-être un satellite ou un avion, dominant la cible de quelques centaines de mètres à des milliers de kilomètres. Les capteurs embarqués sur le satellite mesurent le rayonnement électromagnétique réfléchi, puis un émetteur renvoie l'image sur Terre vers des stations de réception.

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*.

### **Principales étapes**

De manière plus détaillée, les principales étapes qui couvrent le processus de télédétection sont représentées par la figure 8.



**Figure 7: Etapes de la télédétection (source : Chuvieco E., 1990)**

- Le rayonnement provient d'une source d'énergie (1) ou d'illumination de la cible ;
- Il interagit avec l'atmosphère (durant son parcours «aller» et «retour» entre la source d'énergie et la cible) ;
- Une fois parvenue à la cible (2), l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. Les propriétés de cette dernière ainsi que la longueur d'onde du rayonnement réfléchi ou émis dans les diverses fréquences du spectre électromagnétique procurent à la cible une sorte d'« empreinte digitale » : sa signature spectrale ;
- L'énergie diffusée ou émise par la cible, est ensuite captée à distance par un capteur embarqué à bord d'un satellite (ou d'un avion) (3) et enregistrée sous format numérique ;
- Cette information enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception généralement située au sol où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques) ;
- L'image traitée est par la suite analysée (4) et interprétée (5) (interprétation visuelle et/ou numérique) pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible afin de mieux la comprendre, d'en découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

### **Bases physiques**

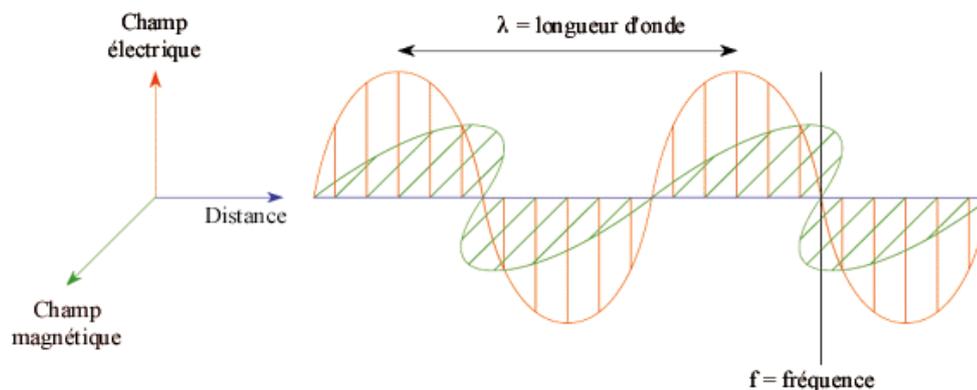
Quel que soit le domaine d'application considéré, une bonne interprétation des documents de télédétection ou une bonne utilisation des données numériques nécessite la compréhension des propriétés du rayonnement électromagnétique et principes physiques sur lesquels sont fondés la technique de télédétection.

- Le rayonnement électromagnétique

C'est une forme de propagation de l'énergie dans la nature, dont la forme qui nous est la plus familière est la lumière visible telle que la perçoit l'œil humain. Il peut être considéré comme étant un flux de particules élémentaires appelées *photons*.

Le rayonnement est reconnu par les physiciens comme un phénomène ondulatoire, en relation avec l'électricité et le magnétisme. Ainsi, une onde électromagnétique correspond à la vibration simultanée dans l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique (figure 9). Elle se caractérise par:

- **Sa période  $T$**  : le temps au bout duquel le champ électrique ou magnétique effectue un cycle ;
- **Sa fréquence  $\nu$**  (en Hertz, ou dans le cas de la télédétection caractérisée par des fréquences très élevées, les mesures sont kHz, MHz ou GHz) : qui est le nombre d'oscillations par unité de temps ;
- **Sa longueur d'onde ou amplitude  $\lambda$**  : (m,  $\mu\text{m}$ ) la distance entre deux crêtes consécutives ;
- **Sa vitesse de propagation dans le vide** (vitesse de la lumière) de l'ordre de 300 000 km/s.



**Figure 8: Représentation de l'onde électromagnétique (source : Imessaoudene, 2012)**

- Le spectre électromagnétique

C'est le résultat de la décomposition du rayonnement électromagnétique en ses fréquences constituantes. Il s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio).

L'ensemble des fenêtres de toutes les longueurs d'onde est appelé «spectre électromagnétique» (figure 10).

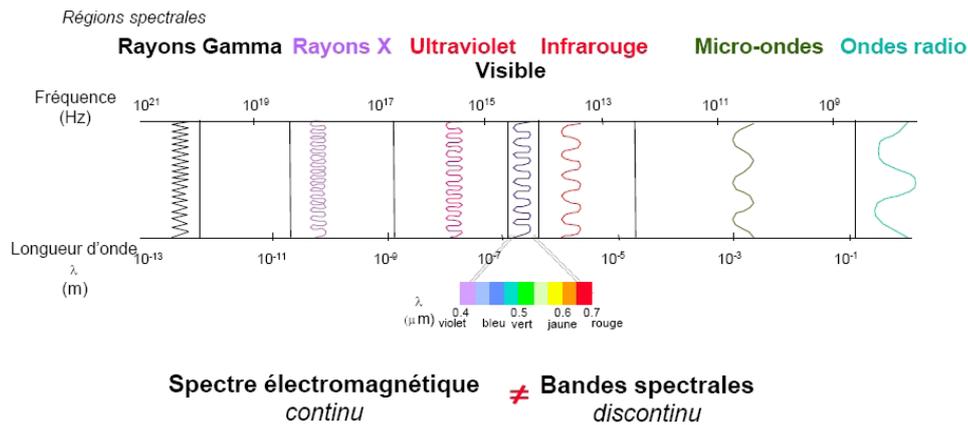


Figure 9: Détails des domaines spectraux (source : Laghouag 2011)

La télédétection utilise plusieurs régions du spectre électromagnétique. En télédétection, les capteurs des instruments embarqués sur les satellites et avions mesurent la quantité de REM renvoyée par une portion d'espace terrestre, les capteurs embarqués sur les satellites peuvent enregistrer les ultraviolets (rare), le visible, le proche-infrarouge, l'infrarouge moyen, l'infrarouge thermique, l'infrarouge lointain et les hyperfréquences. (Big n°3)

- La signature spectrale

L'objet de la télédétection est de distinguer les types de surfaces à partir du rayonnement reçu par le capteur. En mesurant l'énergie réfléchié ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'onde, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet. Les signatures spectrales sont donc la réponse radiométrique des objets dans une succession de longueurs d'onde. Elles sont représentées par des courbes figurant la réflectance en ordonné et la longueur d'onde en abscisse.

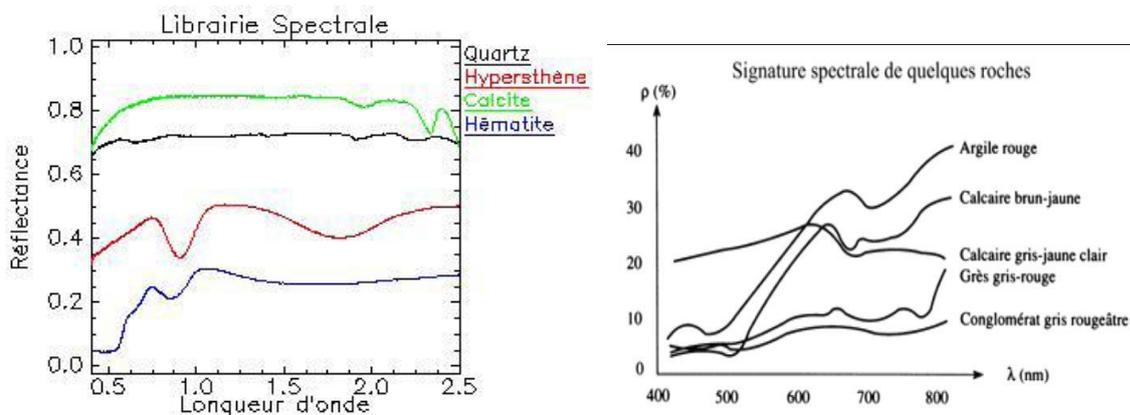


Figure 10: Signature spectrale de quelques minéraux et roches (source : <http://ceos.cnes.fr>)

- Le rayonnement électromagnétique et la télédétection

Les domaines du spectre électromagnétique utilisables en télédétection sont imposés par les sources de rayonnement, et la transparence de l'atmosphère. Les longueurs d'onde très courtes (ultraviolet, rayons X) par exemple ne sont pas utilisables, car l'atmosphère absorbe ou diffuse la quasi-totalité de ces rayonnements. En pratique, on peut distinguer trois grands types de domaine :

- Le domaine du spectre solaire (visible et proche infrarouge)
- L'infrarouge thermique
- Les micro-ondes ou hyperfréquence

### Les vecteurs

En fonction de la distance au sol, on distingue différents types de vecteurs : ceux qui opèrent à quelques mètres du sol (grues, ou véhicules qui supportent des radiomètres ou appareils photographiques) ; ceux qui opèrent entre la dizaine de mètres et la dizaine de kilomètres (avions, hélicoptères et ballons); ceux qui opèrent entre la dizaine et la centaine de km (ballons stratosphériques) et ceux qui opèrent entre 200 km et 40 000 km (les satellites).

Les satellites d'observation de la Terre occupent différentes orbites :

- **Orbite géostationnaire** : Un satellite géostationnaire est placé sur une orbite équatoriale (l'angle entre le plan orbital et le plan équatorial, ou inclinaison, est nul) à 35 800 km d'altitude. Il tourne à la même vitesse angulaire que la Terre. Il apparaît immobile pour un observateur terrestre. Il ne peut observer qu'une partie de la Terre. Les satellites METEOSAT (France), GOES (USA), GMS (Japon) et INSAT (Inde) sont géostationnaires.

- **Orbite circulaire quelconque** : comme pour les satellites TIROS, NOAA et ERS-1.

- **Orbite héliosynchrone**: Les satellites ont une orbite quasi-circulaire polaire (inclinaison 90°) à une altitude située entre 700 et 900 km. Le plan orbital est théoriquement fixe, et la trace (projection de la trajectoire du satellite sur la surface terrestre) se décale d'un certain angle vers l'ouest du fait de la rotation de la terre. Ce sont des satellites à défilement qui peuvent observer la totalité de la surface terrestre. Les satellites SPOT (France) et LANDSAT (USA) circulent sur ce type d'orbite.

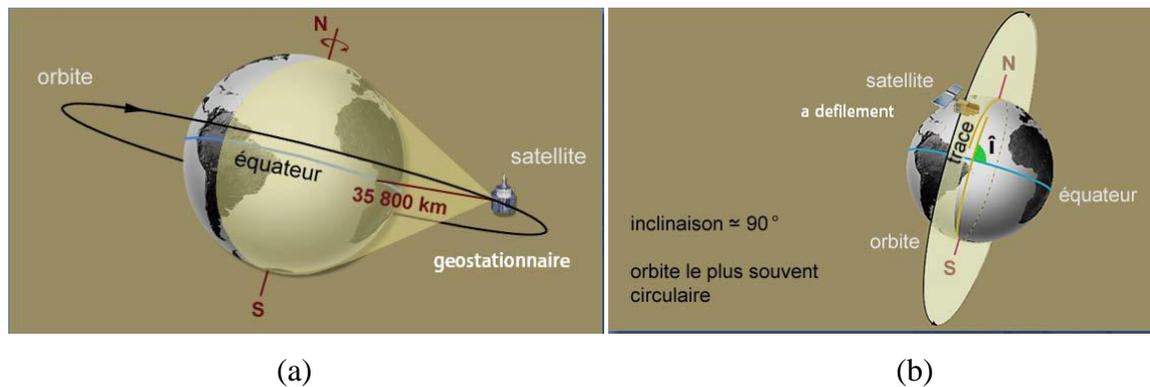


Figure 11: (a) Satellite géostationnaire ; (b) Satellite à défilement

(source : Imessaoudene, 2012)

Dans le cadre de notre étude, nous nous limiterons à la description des caractéristiques de Landsat, car notre choix a porté sur les images satellitaires en provenance du satellite Landsat 7 ETM+, du fait qu'elles sont une source d'informations géologiques importantes.

#### Caractéristiques des satellites et capteurs Landsat (Gomez C., 2004)

Les photos satellites utilisées dans ce travail proviennent du satellite Landsat 7 ETM+. Le choix de ces données est dicté par le fait qu'elles sont une source d'informations géologiques importantes et par le fait que ces images soient téléchargeables gratuitement sur le site de la NASA.

La première génération de satellites, composée des satellites Landsat 1, 2 et 3, a été lancée entre 1972 et 1985. Actuellement seuls les satellites Landsat 4, 5 et 7 de la seconde génération lancés entre 1982 et 1997, sont encore en fonction. Ces satellites fournissent des données d'une même surface à différentes dates, sur toute la surface terrestre exceptée pour les régions polaires. Les données des capteurs Thematic Mapper (TM) à bord de Landsat 4 ou 5 sont utilisées pour plusieurs applications comme la gestion des ressources, la cartographie, la surveillance de l'environnement et la détection des changements anthropiques ou naturels à la surface de la terre. La limite de résolution spatiale du capteur TM est de 30 m pour toutes les bandes, sauf l'infrarouge thermique qui est de 120 m. Toutes les bandes sont enregistrées sur une étendue de 256 valeurs numériques (8 octets). La résolution spectrale des bandes individuelles TM et leurs applications sont fournies dans le Tableau 1.

Landsat 7, dernier satellite de la famille Landsat, possède à son bord le capteur multi-spectral ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) (<http://landsat.gsfc.nasa.gov>). Ce capteur enregistre la réflectance de la surface terrestre dans sept bandes spectrales (Tableau 2): quatre dans le Visible et Proche Infrarouge, deux dans l'Infrarouge Moyen, une dans l'Infrarouge

Thermique et une bande en mode panchromatique (l'image panchromatique est obtenue à partir de données acquises dans une seule bande spectrale, correspondant à la partie visible du spectre à l'exception du bleu, la bande couvre la région du spectre comprise entre 0,52 et 0,90  $\mu\text{m}$ ). Ces bandes spectrales peuvent être utilisées pour la discrimination lithologique.

*Tableau 1: Caractéristiques et applications des bandes spectrales du capteur TM*

*(source : Imessaoudene, 2012)*

Bandes	Domaine Spectral ( $\mu\text{m}$ )	Résolution	Application
TM 1	0,45 - 0,52 (bleu)	30 m	Discrimination entre le sol et la végétation, bathymétrie /cartographie côtière; identification des traits culturels et urbains
TM 2	0,52 - 0,60 (vert)	30 m	Cartographie de la végétation verte (mesure le sommet de réflectance); identification des traits culturels et urbains
TM 3	0,63 - 0,69 (rouge)	30 m	Discrimination entre les espèces de plantes à feuilles ou sans feuilles; (absorption de chlorophylle); identification des traits culturels et urbains
TM 4	0,76 - 0,90 (proche IR)	30 m	Identification des types de végétation et de plantes; santé et contenu de la masse biologique; délimitation des étendues d'eau; humidité dans le sol
TM 5	1,55 - 1,75 (IR de courte longueur d'onde)	30 m	Sensible à l'humidité dans le sol et les plantes; discrimination entre la neige et les nuages
TM 6	10,4 - 12,5 (IR thermique)	120 m	Discrimination du stress de la végétation et de l'humidité dans le sol relié au rayonnement thermique; cartographie thermique
TM 7	2,08 - 2,35 (IR de courte longueur d'onde)	30 m	Discrimination entre les minéraux et les types de roches; sensible au taux d'humidité dans la végétation

Tableau 2: Caractéristiques des bandes Landsat 7 ETM+ (source : Imessaoudene, 2012)

Bandes de fréquence de l'instrument ETM+	Bandes spectrales	Résolution spatiale	Longueur d'onde
Bande 1	Bleu (visible)	30m	0,45-0,5 $\mu\text{m}$
Bande 2	Vert (visible)	30m	0,52-0,6 $\mu\text{m}$
Bande 3	Rouge (visible)	30m	0,63-0,69 $\mu\text{m}$
Bande 4	IR proche	30m	0,75-0,9 $\mu\text{m}$
Bande 5	IR moyen	30m	1,5-1,7 $\mu\text{m}$
Bande 6/1	IR Thermique/ lointain	60m	10,4-12,5 $\mu\text{m}$
Bande 6/2		120m	
Bande 7	IR moyen	30m	2,08-2,35 $\mu\text{m}$
Bande 8	Panchromatique (vert-rouge-IR)	15m	520-900nm

### II.1.2. Domaines d'application de la télédétection

La télédétection s'applique à toutes les disciplines qui nécessitent d'appréhender la répartition spatiale d'un phénomène, soit pour déterminer un état à un instant donné, soit pour suivre une évolution plus au moins rapide d'un phénomène (Foin.1985).

Le premier grand domaine d'application de la télédétection a été l'étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie). L'intérêt de la télédétection dans ce domaine est d'assurer le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la couverture nuageuse, mesurer la température, vapeur d'eau et précipitations.

En océanographie, et ressources marines, la télédétection offre l'avantage de permettre une analyse de la couleur de l'océan (estimation de la production biologique, turbidité), et une étude de la dynamique et caractéristiques des mers et océans (températures et altitude de surface, vagues et vents, turbidité des côtes, etc.).

Les applications terrestres de la télédétection sont extrêmement variées. Elles vont de l'agriculture (rendements des cultures, réponses de la végétation à certaines contraintes

environnementales, etc.), foresterie (Cartographie forestière, estimation de certaines caractéristiques dendrométriques des peuplements forestiers, défoliation et état sanitaire, etc.) et hydrologie (spatialisation de l'intensité des pluies, couverture végétale, etc.), à l'urbanisme et l'aménagement (cartographie de l'occupation du sol, etc.) , cartographie régulière et thématique, géologie (reconnaissance de la nature pétrographique des surfaces dépourvues de couverture végétale, suivre la dérive des continents, les anomalies thermiques liées aux zones tectoniques, etc.), prospection minière, géomorphologie et structurale (identification des réseaux de failles et donc la détermination des orientations préférentielles de rupture) et risques naturels (dresser des "cartes des risques" pour certaines régions menacées par les cyclones, séismes, volcans, mouvements de terrain, sécheresse, etc.).

### Télédétection et cartographie géologique

Discipline cartographique en plein développement, la télédétection trouve ses meilleures applications en géomorphologie et en géologie. Ainsi, la cartographie géologique, qui cherche à identifier et décrire les différents types de roche dans une région donnée puis à la mise en carte des données géologiques recueillies sur le terrain, est passée de son aspect classique basé uniquement sur des missions de terrain et les photos aériennes, ce qui s'avère être un travail long et complexe ; à un nouvel aspect (images optimisées par l'application de tous les traitements numériques, fondée sur leur sélection en mode interactif, la numérisation, etc.) facilitant la confection de telles cartes et la mise à jour des données cartographiques.

## **II.2. Les différents traitements utilisés**

### ***II.2.1. Discrimination lithologique***

Pour la caractérisation des différentes formations affleurant dans la région d'étude, trois traitements ont été appliqués à la scène Landsat 7 ETM+ p159r075 :

- La composition colorée
- L'analyse en composante principale
- Le rapport de bandes

Ces traitements sont réalisés avec le logiciel ENVI 4.3.

### Composition colorée

Les images de télédétection sont divisées en unités spatiales élémentaires appelées « pixel » (Laghouag, 2011). Chaque plan image correspond à une bande spectrale précise, c'est-à-dire à une longueur d'onde dans laquelle l'image a été acquise par les différents canaux radiométriques du satellite.

En codant les six bandes de même résolution de 30 m (bandes 1, 2, 3, 4, 5, 7) de notre scène Landsat avec les trois couleurs fondamentales (RVB), nous pouvons élaborer 216 compositions colorées.

Voici quelques exemples de composition colorée les plus utilisées.

*Tableau 3: Différentes combinaisons utilisées en fausses couleurs et leurs utilités*

*(source : Laghouag, 2011)*

RGB	Description
321	Image en couleur naturelle
432	Combinaison standard en fausses couleurs. La végétation apparaît en rouge.
453	La limite entre terre/eau est très nette. Bon pour l'étude des sols et de la végétation.
742	Combinaison souvent utilisée en géologie. Le sable, le sol et les minéraux montrent une multitude de couleurs. Bon pour étudier les régions désertiques.
753	Combinaison souvent utilisée géologie. Le sable, le sol et les minéraux montrent une multitude de couleurs.
541	Combinaison souvent utilisée en agronomie. La végétation apparaît en vert clair.
754	Très utiles en géologie. Fournit la meilleure pénétration dans l'atmosphère. La végétation apparaît en bleu.
731	Combinaison bonne en géologie. Les roches apparaissent dans une multitude de couleurs.

Plusieurs groupes de bandes sont très corrélés, c'est-à-dire que l'information se répète dans plusieurs bandes. Pour éviter cette répétitivité et choisir les compositions RVB les plus importantes, une étude statistique des six bandes a été effectuée. Ainsi, nous avons calculé le coefficient de corrélation des six canaux et leurs déviations standards. Les meilleures compositions colorées obtenues correspondent aux combinaisons de trois bandes les moins corrélées.

Tableau 4: Corrélacion entre les matrices des six bandes et écarts types standards absolus (Stdev) de la région d'étude

Corrélacion	Bande 1	Bande 2	Bande 3	Bande 4	Bande 5	Bande 7	Stdev
<b>Bande 1</b>	1,00						3,94
<b>Bande 2</b>	0,84	1,00					5,32
<b>Bande 3</b>	0,79	0,88	1,00				10,61
<b>Bande 4</b>	0,29	0,48	0,29	1,00			11,25
<b>Bande 5</b>	0,62	0,72	0,85	0,30	1,00		19,13
<b>Bande 7</b>	0,66	0,73	0,88	0,18	0,96	1,00	14,53

Afin d'optimiser la sélection de la meilleure combinaison de trois bandes RVB qui constituent la composition colorée, il est nécessaire de calculer le nombre de combinaison de trois bandes possible et l'OIF de chaque combinaison obtenue précédemment.

Le nombre de combinaisons possible se calcule de la manière suivante :

$$N_{RVB} = \frac{N!}{[3! * (N - 3)!]}$$

Avec N : nombre total de bandes

Pour N=3 bandes, il n'y a qu'une seule combinaison

Pour N=4 bandes, il y a quatre combinaisons possibles

Pour N=5 bandes, dix combinaisons sont possibles

Pour N=6 bandes, qui est notre cas, nous avons 20 combinaisons de composition colorée RVB possibles.

L'OIF est par contre obtenu en suivant la formule ci-dessous :

$$OIF = \frac{Stdev_i + Stdev_j + Stdev_k}{|Corr_{i,j}| + |Corr_{i,k}| + |Corr_{j,k}|}$$

Avec  $Stdev_i$  : déviation standard de la bande i

$Stdev_j$  : déviation standard de la bande j

$Stdev_k$ : déviation standard de la bande k

$Corr_{i,j}$  : coefficient de corrélation des bandes i et j

$Corr_{i,k}$  : coefficient de corrélation des bandes i et k

$Corr_{j,k}$  : coefficient de corrélation des bandes j et k

(Source : [www.spatial-analyst.net](http://www.spatial-analyst.net))

La combinaison ayant l'OIF le plus élevé est susceptible de fournir le maximum d'information lithologique, donc la combinaison RVB à employer, puisqu'elle utilise les données ayant le moins de redondances. Cette étude nous a permis, dans notre cas, de sélectionner les combinaisons montrées dans le tableau 5.

Tableau 5: OIF obtenu à partir des vingt combinaisons possibles des six bandes 1, 2, 3, 4, 5, 7 de la région d'étude

Composition colorée	$\Sigma$ Déviation standard	$\Sigma$ Coefficient de corrélation	OIF
321	19,87	2,50	7,94
421	20,51	1,61	12,76
431	25,80	1,37	18,94
432	27,18	1,65	16,47
521	28,39	2,18	13,04
531	33,68	2,31	14,56
532	35,06	2,45	14,30
541	34,32	1,21	28,28
542	35,70	1,51	23,72
543	40,98	1,45	28,36
721	23,80	2,23	10,65
731	29,08	2,33	12,47
732	30,46	2,50	12,21
741	29,72	1,14	26,15
742	31,10	1,40	22,19
743	36,39	1,36	26,84
751	37,60	2,25	16,74
752	38,98	2,41	16,16
753	44,26	2,70	16,42
754	44,91	1,45	31,01
453	40,98	1,45	28,36

Parmi les sept compositions en fausses couleur retenues à partir du calcul de l'OIF, nous nous sommes limités à trois compositions colorées RVB seulement, à savoir respectivement 453, 742 et 754. Ce choix est expliqué dans la section « Résultat et interprétation ».

### Analyse en composante principale

Les données multi-spectrales des différents canaux contiennent souvent de l'information similaire. Alors, une transformation d'image est utilisée pour réduire cette redondance de données. Cette transformation est appelée Analyse en composante principale. En effet, si on représente les composantes rouge et vert d'une image numérique sur un histogramme à 2 dimensions (scattérogramme), on remarque de suite que l'image de télédétection (partie inférieure) ne comporte qu'un nombre restreint de couleurs, en comparaison avec une image très colorée (partie supérieure).

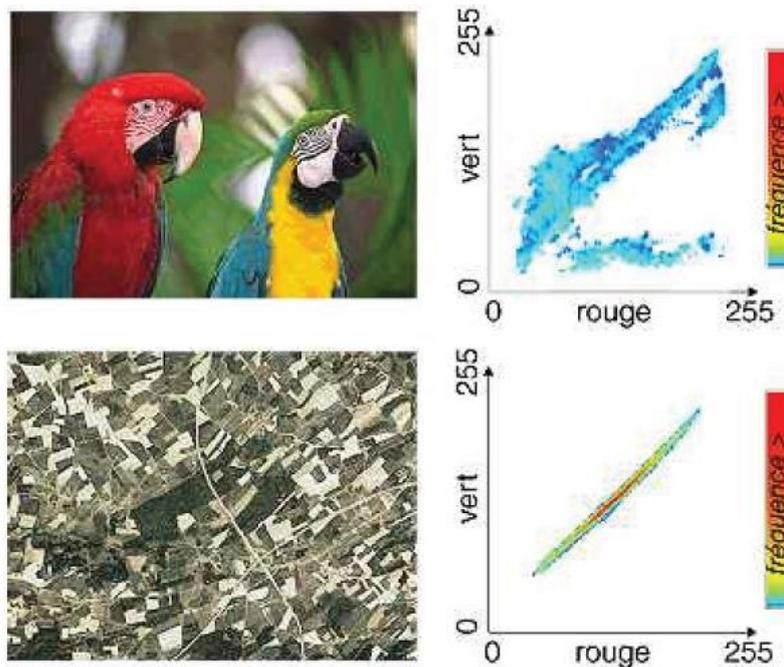


Figure 12: Comparaison entre une image très colorée et une image de télédétection avec leur scattérogramme respectif. (source : [eoedu.belspo.be](http://eoedu.belspo.be))

L'allure du scattérogramme de l'image de télédétection (tous les vecteurs spectraux sont regroupés le long de la diagonale) est l'indice d'une forte corrélation entre canaux: lorsqu'un pixel a une valeur élevée dans le rouge, il y a de fortes chances pour qu'il ait également une valeur élevée dans le vert. Cela signifie aussi que les différentes composantes spectrales n'ajoutent pas beaucoup d'information à l'image, qui pourrait pratiquement s'interpréter comme une image noir et blanc.

Le but de l'ACP est de réorganiser les données de telle manière qu'elles ne soient plus corrélées, c'est-à-dire qu'elles deviennent indépendantes. En ne conservant que les composantes les plus significatives pour l'analyse, il est possible de réduire considérablement le volume de données à traiter.

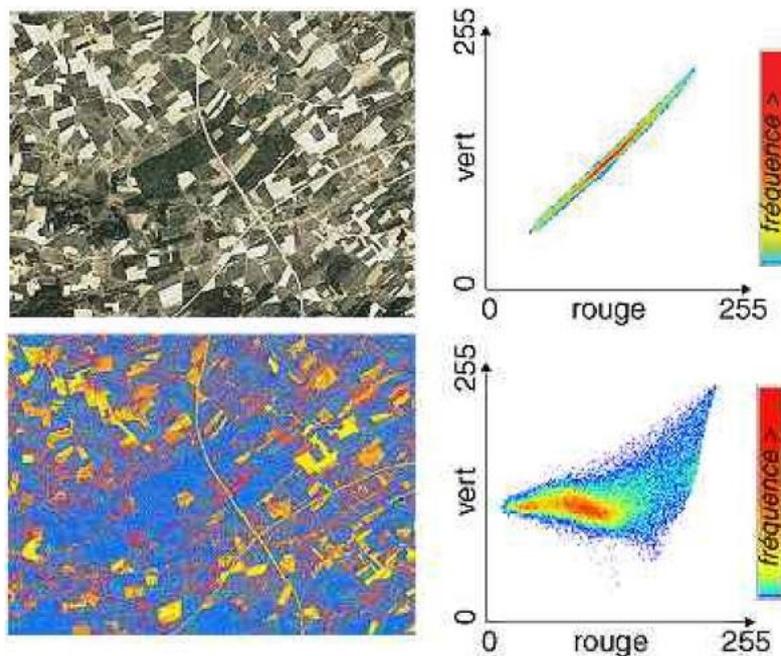


Figure 13: Image de télédétection après une analyse en composante principale  
(source : [eoedu.belspo.be](http://eoedu.belspo.be))

Les "néo" bandes qui en résultent sont appelées composantes principales et permettent de réduire par l'information comprise dans les 6 canaux en seulement trois composantes tout en conservant plus de 90% de l'information initiale. C'est une technique efficace pour accentuer une image multi-spectrale pour des fins d'interprétation géologique.

Pour connaître le pourcentage d'information contenu dans chaque composante principale et ainsi choisir la composante renfermant le plus d'information, nous avons procédé au calcul du pourcentage de variance des composantes qui existe en appliquant deux formules.

$$\text{Taux de la représentativité} = \frac{\text{Valeur propre d'une bande}}{\sum \text{Valeur propre de toute les bandes}}$$

$$\text{Pourcentage de variance} = \text{Taux de représentativité} * 100$$

(source : E. B. Randrianasolo)

Le résultat des calculs est détaillé dans le tableau 6 ci-dessous.

*Tableau 6: Taux de représentativité et Pourcentage de variance des composantes principales des bandes 1, 2, 3, 4, 5, 7*

<b>Bandes</b>	<b>Valeur Propre</b>	<b>Taux de représentativité</b>	<b>Pourcentage de variance</b>	<b>CP</b>
Bande 1	691,97	0,80	80,47	CP1
Bande 2	119,48	0,14	13,89	CP2
Bande 3	33,51	0,04	3,90	CP3
Bande 4	6,98	0,01	0,81	CP4
Bande 5	5,48	0,01	0,64	CP5
Bande 7	2,44	0,00	0,28	CP6
Somme	859,87	1,00	100,00	

Ainsi, le tableau 4 nous montre que les CP1, CP2 et CP3 totalisent 98,27% du pourcentage de variance et que le CP1 à elle seule renferme 80,47% des informations contenues dans les canaux 1, 2, 3, 4, 5 et 7.

Compte tenu de l'importance des informations contenues dans les trois premières composantes principales de l'APC, une composition colorée RVB est réalisée avec ces trois dernières notées CP1<sub>123457</sub>, CP2<sub>123457</sub>, CP3<sub>123457</sub>.

### **Rapport de bandes**

Cette analyse se base sur la notion de réflectances. Elle consiste donc en la division du DN (digital number ou valeur radiométrique d'un pixel) dans une bande par le DN d'une autre bande (nous rappelons qu'un pixel correspond à une valeur entre 0 et 255, correspondant à l'intensité du gris, avec 0 = le noir et 255 = le blanc).

Le rapport de bandes est un procédé multi-spectral très utilisé pour mettre en évidence les différences entre canaux et permettre de s'affranchir des variations d'éclairement des pixels, donc de réduire les effets de la topographie et d'augmenter le contraste entre les surfaces minérales. En pratique, trois rapports de bandes sont utilisés pour obtenir une image en RVB.

Ci-dessous, nous pouvons voir un tableau montrant les rapports de bandes les plus utilisés.

Tableau 7: Exemples de rapports de bandes utilisés dans le traitement des images satellitaires  
(source : Laghouag, 2011)

Rapport	Description
5/7	Bonne discrimination pour les roches qui riches en Al-OH
3/1	Bonne discrimination pour les roches ayant subies une altération hydrothermale et pour les oxydes de fer.
1/2, 2/1	Bonne discrimination pour les roches riches en oxydes de fer
3/1, 3/2	Bonne discrimination de la végétation et l'eau
4/1, 4/2	Bonne discrimination de la végétation et l'eau
3/4	Utilisé pour étudier les terres arides et les régions urbaines
7/5	Bonne discrimination des argiles
5/4	Bonne discrimination des oxydes de fer

Pour une bonne utilisation des résultats obtenus des rapports de bandes, nous avons décidé de suivre le protocole établi par Inzana et al. dans les terrains précambriens de Madagascar qui a utilisé les combinaisons 5/7 5/1 5/4 et 7/3 5/2 4/3.

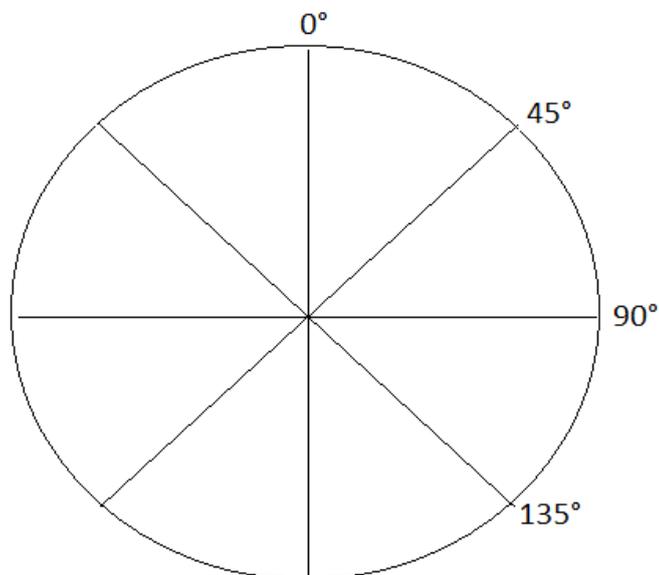
### II.2.2. Cartographie linéamentaire

Des filtres peuvent être appliqués aux différentes bandes spectrales et aux néo-canaux en vue d'obtenir les cartes linéamentaires. Filtrer une image, c'est lui appliquer une fonction mathématique qui modifie les valeurs du gris de tout ou une partie des pixels. Si la fonction est linéaire, on parle de *filtrage linéaire*, si elle prend en compte les valeurs du gris au voisinage de chaque pixel transformé, elle est dite *fonction de convolution*.

Les méthodes utilisées dans ce travail sont de type convolution à savoir le filtre Sobel et le filtre directionnel. Etant donné que la région d'étude a une dimension de 1500\*1000 pixel, qui est relativement petit, la taille de la fenêtre de convolution du filtre utilisée est 5\*5. Cette taille a une incidence sur la longueur des linéaments rehaussés, c'est-à-dire que seuls les linéaments et les structures de taille supérieure ou égale à la moitié de la fenêtre de convolution du filtre sont détecté alors que ceux de taille inférieure se confondent avec le bruit de l'image (Kouamé et al., 1999).

Sachant que la néo-bande CP1<sub>123457</sub> contient 80,47% des informations, il est jugé nécessaire de l'utiliser pour les différents traitements par filtrage.

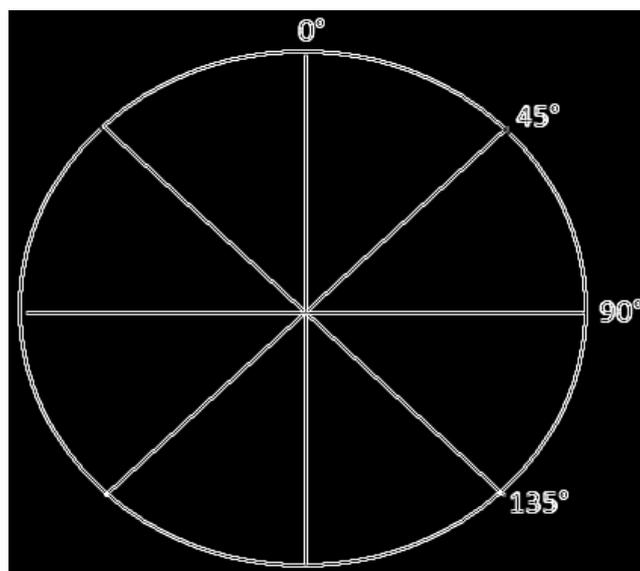
Pour mieux discerner les changements entre les différents filtres et mieux distinguer les rehaussements, nous avons effectué un filtrage d'un échantillon d'image.



*Figure 14: Image brute sans filtre*

### **Filtre Sobel**

Ce type de filtre est utilisé pour détecter les contours d'objets dans une image en faisant deux balayages, l'un horizontal et l'autre vertical. Il donne souvent de bons résultats pour la détection des linéaments.



*Figure 15: Image après l'application du filtre Sobel*

### Filtre directionnel

Il améliore la perception des linéaments, correspondants à des discontinuités lithologiques ou structurales, en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image. Ce filtrage est la suite logique du filtre directionnel.

Le filtre directionnel se démarque par sa capacité à rehausser les linéaments perpendiculaires à la direction qui a été affecté au filtre. En prenant un exemple avec un angle de filtrage de 45°, ce dernier rehausse les linéaments de direction 135°, c'est-à-dire SE-NW.

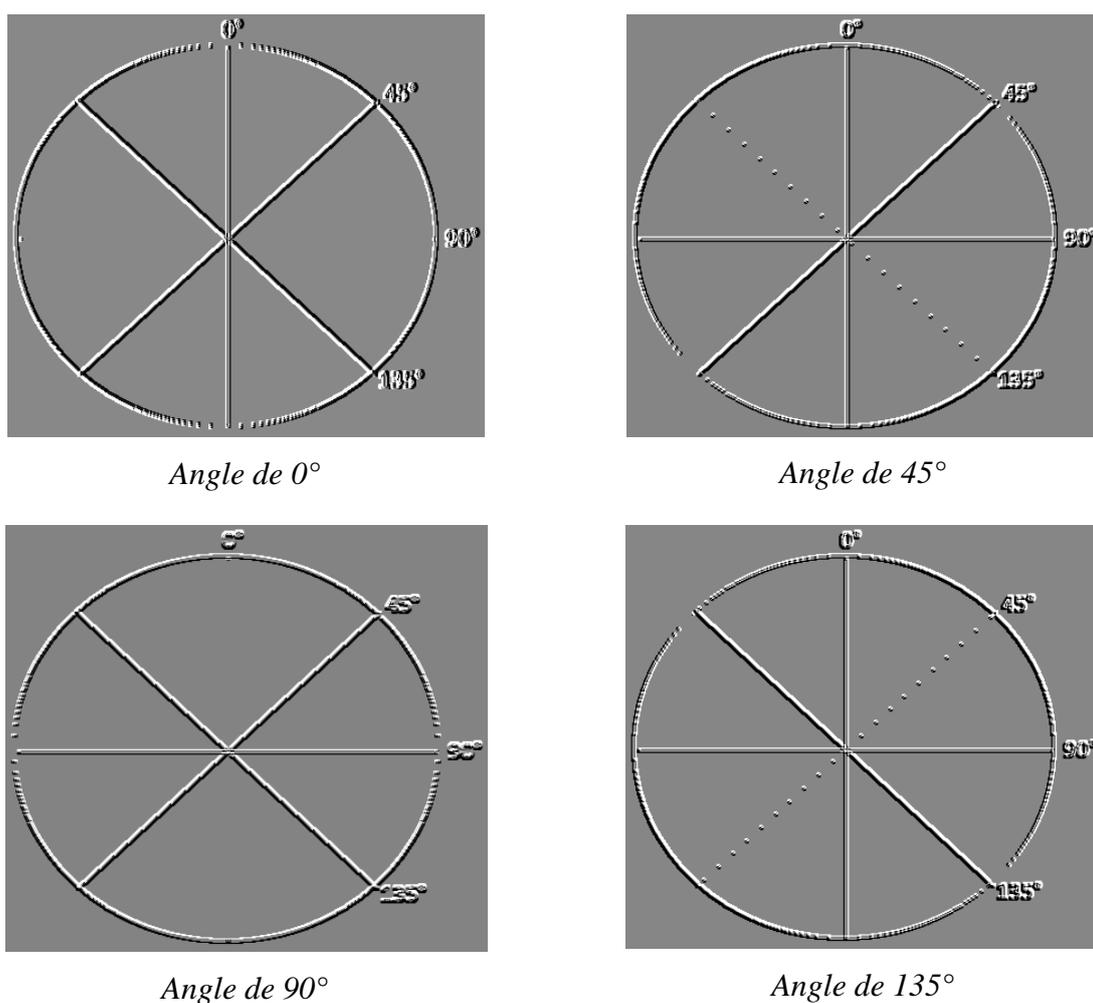


Figure 16: Image après l'application du filtre directionnel sous différents angles

Notre région d'étude se situe près de la zone de cisaillement Bonolava-Ranotsara, plus précisément au Sud. Il y a fort probabilité que les structures de la région soient contrôlées par cette ZC. Elle présente une direction SSE-NNW. C'est pour cette raison que, dans notre étude, nous avons choisi les angles suivants : 0°, 10°, 45°, 70°, 90°, 100°, 135° et 160° à appliquer avec la néo-bande CP1<sub>123457</sub>.

### *Extraction des linéaments*

Les images issues des traitements par filtrage sont importées dans ArcGIS pour dresser une carte linéamentaire de la région d'étude. Celles qui font ressortir le plus de discontinuité sont les CP1<sub>123457</sub> traitées par les filtres directionnels 10°, 70°, 100°, et 160° à matrice 5\*5. Elles permettent de déterminer des linéaments qui ressortent de manière très claire.

Une vectorisation est effectuée pour extraire les différents linéaments qui existent dans la région d'étude.

Il est préférable de préciser que le système de coordonnées utilisé lors de ce traitement est l'UTM WGS84 zone 38S.

#### *II.2.3. Orientation et analyse statistique de la carte linéamentaire*

##### *Orientation préférentielle*

La carte linéamentaire (figure 28) dérivée du traitement sous ArcGIS nous montre une multitude de linéaments. Afin d'éviter une erreur lors du comptage de ces linéaments, mais également pour gagner du temps, l'utilisation du logiciel SPO 2003 s'avère indispensable. En effet, le traitement sur ce programme nous renseigne sur le nombre de linéament, leur pourcentage, ainsi que leur orientation préférentielle.

Pour ce faire, nous avons importé les linéaments vectorisés avec ArcGIS dans SPO 2003 et le logiciel fait les calculs automatiquement. À l'issue du traitement, nous avons pu déterminer un nombre total de 160 linéaments de tailles variables et 74,37% des linéaments tracés sont représentés par une direction majeure SSE-NNW.

##### *Rosace directionnelle*

Suite au traitement des données sous SPO 2003, une analyse statistique du résultat est réalisée avec le logiciel Rose.NET. Une rosace de direction résulte de ce traitement.

L'étude du diagramme de fréquence (figure 29) confirme l'existence d'une direction majeure déjà signalée précédemment.

### **III. OBSERVATION SUR TERRAIN**

Une confrontation entre les données de terrain et les résultats obtenus dans ce travail (différents traitements des images satellitaires) a été effectuée. En effet, une mission sur le terrain dans la région de Belafike a été effectuée dans le but de faire de la prospection

géochimique, mais également de vérifier les lithologies et d'effectuer des mesures structurales. La localisation de tous les points étudiés sur le terrain a été réalisée l'aide d'un GPS.

Faute de temps, d'accessibilité et d'organisation, la descente sur le terrain s'est déroulée dans un seul carré minier de dimension 5\* 2,5 km.

Se limitant aux échantillonnages dans le périmètre minier et à partir de l'exploitation des données recueillies à partir des observations d'affleurements, on a pu déduire trois formations à structuration plus ou moins parallèle.

- Gneiss à amphibole, biotite avec des veines pegmatitiques :

X : 583314; Y : 7546250m (UTM WGS 84 zone 38S)

Ces roches occupent la partie Ouest, et NE du périmètre. On y note la présence de minéraux accessoires comme la biotite et l'amphibole. Le grenat, la sillimanite (sous forme de fine aiguille), et la cordiérite peuvent être parfois présents. Les veines pegmatitiques, à quartz, biotite et plagioclase, sont généralement à grain grossier.

Le gneiss est fortement déformé par la présence de boudinage. Ce boudinage pourrait-être le résultat combiné de cisaillement pur (aplatissement) et de cisaillement simple (glissement rotationnel). Ce phénomène est caractéristique de certaines zones de cisaillement ductile que l'on rencontre dans le Sud de Madagascar. Dans notre cas, c'est la zone de cisaillement de Bongolava- Ranotsara (Rakotoarison et al, 2008).

- Leucogneiss granitoïde :

X : 583772; Y : 7547629m (UTM WGS 84 zone 38S)

Il est constitué de quartz, de feldspath potassique et de grenat à grain moyen. Parfois, il est recoupé par des veines pegmatitiques et par des dykes granitiques.

Il s'agit probablement d'un orthogneiss métamorphisé dans le faciès granulite (Rakotoarison et al, 2008).

- Méapelite à grenat, sillimanite, cordiérite :

X : 584872; Y : 7549217m (UTM WGS 84 zone 38S)

Cette roche est mylonitisée. Cette structure est matérialisée par la présence de porphyroclastes de grenat et de feldspath alcalin, parfois boudinés, dans une matrice à grain beaucoup plus fin fortement tectonisée formant ainsi une blastomylonite.

D'après l'association minérale, il s'agit probablement d'une roche métamorphisée dans le faciès granulite (Rakotoarison et al, 2008). Ces blastomylonites matérialisent le phénomène de transpression ayant affecté la zone.

Du point de vue structural, on a reporté les données concernant les affleurements (Tableau dans l'annexe) sur le canevas de Wulff (hémisphère inférieur) et sur le diagramme de rosace directionnel et on a les figures suivantes.

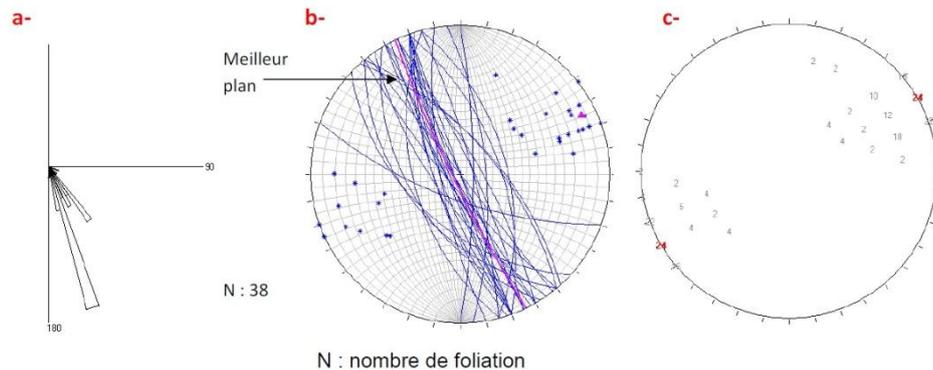


Figure 17: a- Diagramme de la rosace directionnelle ; b- Foliation sur le canevas de Wulff (hémisphère inférieur) ; c- Comptage de densité du canevas de Wulff (source : Rakotoarison et al, 2008)

A cause des foliations qui varient généralement dans les N110 à N175, nous avons choisi un intervalle de 5° pour le diagramme de rosace.

Tableau 8: Direction et nombre de linéaments des mesures structurales effectuées sur le terrain

(source : Rakotoarison et al, 2008)

Angle (°)	Nombre de linéaments
[110-114[	1
[130-134[	1
[135-139[	1
[140-144[	6
[145-149[	3
[150-154[	4
[155-159[	3

Angle (°)	Nombre de linéaments
[160-164[	14
[165-169[	4
[170-174[	1
[175-179[	1
<b>Total</b>	<b>39</b>

## **CHAPITRE III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

## I. CARTOGRAPHIE LITHOLOGIQUE

### I.1. Résultats du traitement en composition colorée

- Une combinaison ternaire, RVB, est souvent utilisée comme première image pour l'analyse. Il s'agit de la composition colorée 321 où le rouge est attribué à la bande rouge TM3, le vert à la bande verte TM2 et le bleu au canal bleu TM1. Cette composition est également appelée « composition en couleur naturelle » ou « vraie couleur ».

L'image 321 RVB de notre région d'étude est de bonne qualité malgré son OIF très bas. Elle permet une assez bonne discrimination entre les séries de l'Horombe (A5 sur la figure 18) qui apparaissent en rouge grenat de celles d'Ihosy (A2 sur la figure 18) qui apparaissent en blanc-vert. La série de Malakialina (M sur la figure 18) a tendance à avoir une teinte assez proche de la série d'Ihosy. De ce fait, elle sera mise en évidence dans les images des autres traitements qui vont suivre. Cette image permet aussi de distinguer la couche Sakamena inférieur (K<sup>4</sup> sur la figure 18) qui apparaît en blanc bleuté. Ainsi, nous remarquons une assez bonne discrimination entre la formation sédimentaire et le socle cristallin qui couvre les deux tiers de la région d'étude.

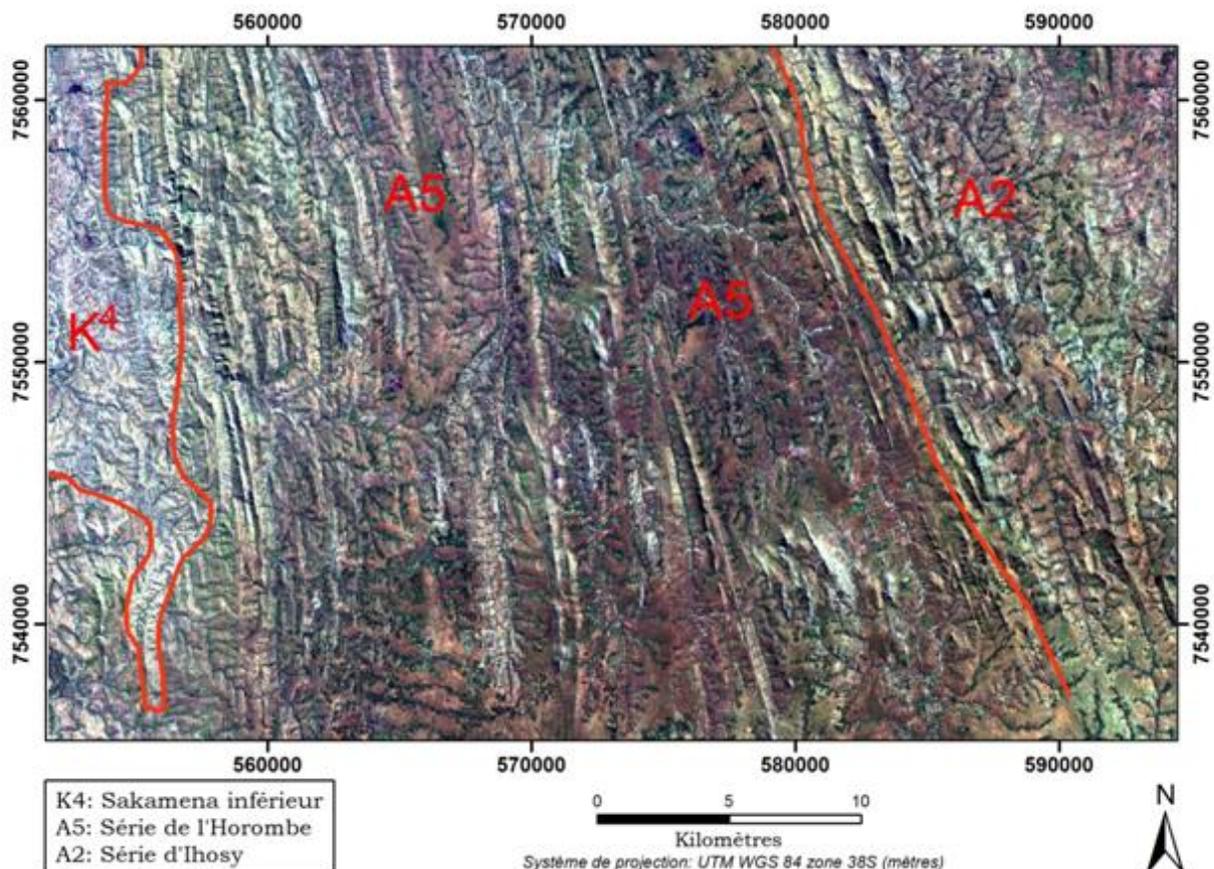


Figure 18: Composition en couleur naturelle 321

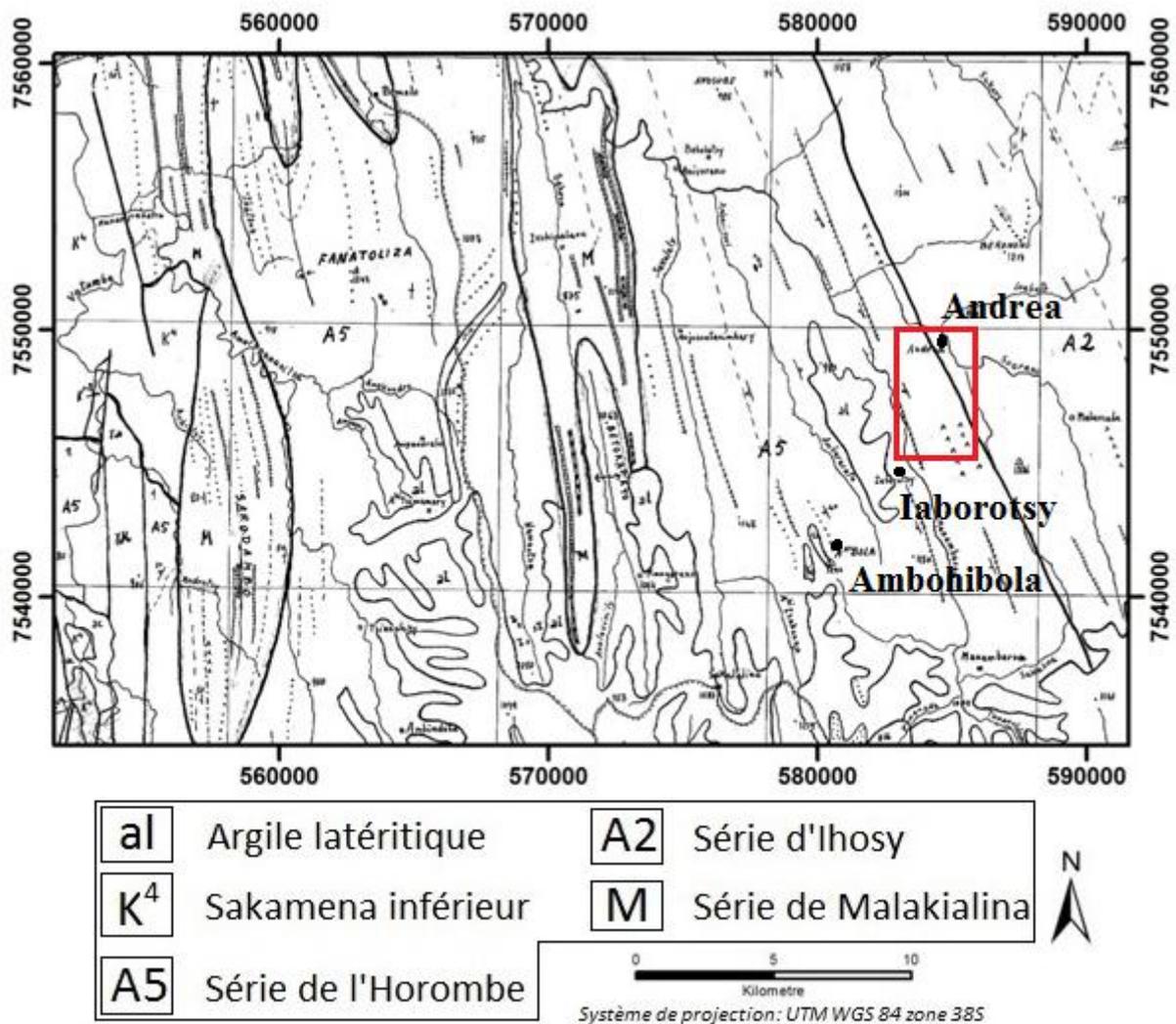


Figure 19: Carte géologique au 1/100 000 de la région d'étude (source: Service Géologique de Madagascar)

- La deuxième image présentée est l'image obtenue à partir de la composition colorée 754.

La composition 754, en dépit de son OIF élevé (31,01), fournit des réponses spectrales très proches ce qui traduit par une homogénéité des couleurs des formations. Ainsi, l'ensemble des formations Sakamena inférieur, série de l'Horombe et la série d'Ihosi apparaissent en jaune-vert pâle. Néanmoins, il est jugé utile de préciser que la partie représentée par la couleur jaune-orangée virée en rouge n'est pas une formation mais des localités comme des villages par exemple.

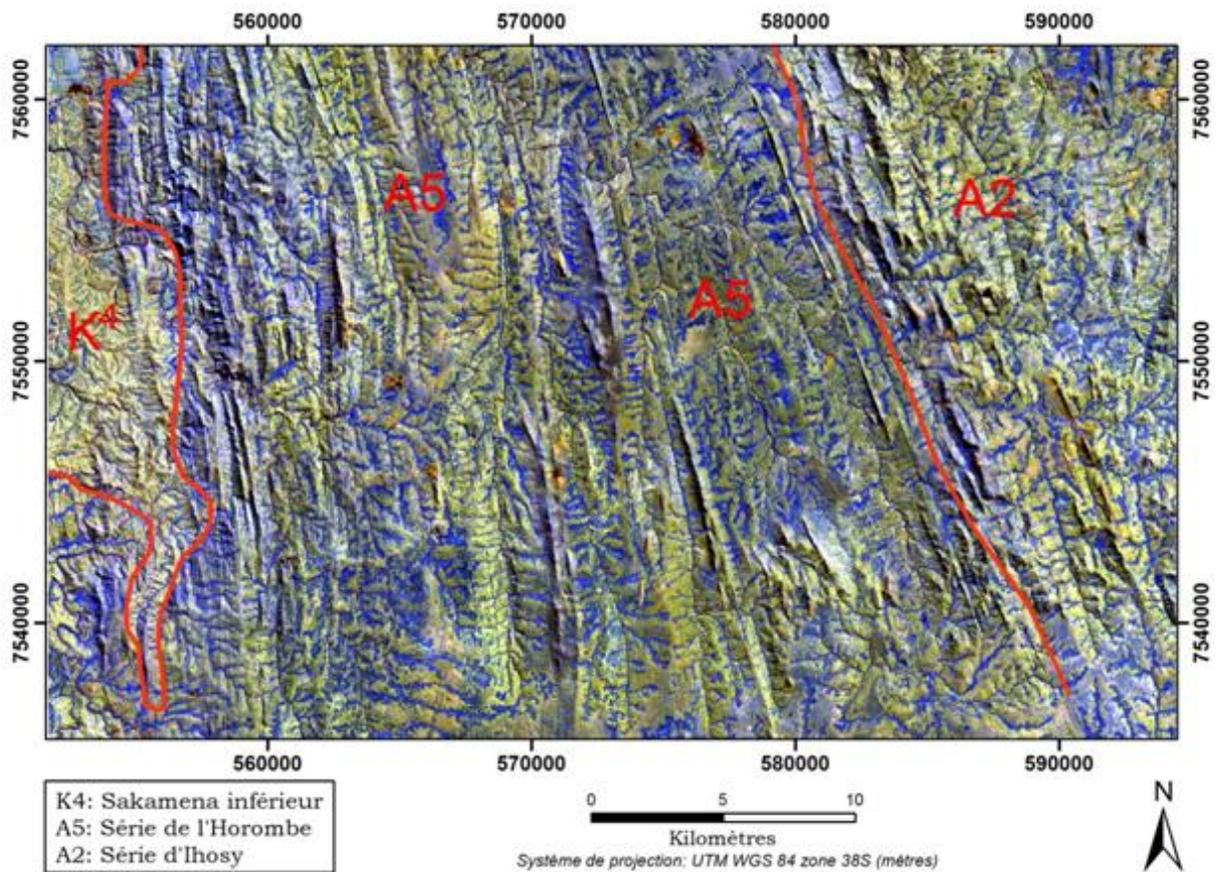


Figure 20: Composition colorée 754

- La composition colorée des canaux 742 est intéressante pour notre région d'étude. Le canal 7 est utile pour la reconnaissance des milieux rocheux ; le canal 4 est déterminant pour repérer les zones ferrugineuses ; le canal 2 donne une bonne indication sur la réponse dans le domaine visible, notamment lorsqu'on a affaire à des roches très claires sur le terrain. Les trois canaux privilégient donc la réponse minérale sur celle d'éventuels végétaux (Djemai et al., 2009).

Malgré son OIF un peu moins élevé (22,19), l'image 742 a été retenue en raison de son excellente qualité et de la distinction apparente des différentes unités lithologiques décrites dans la région. Les séries de l'Horombe (A5) sont en rose viré au rouge, la série de l'Ihosy (A2) est présentée par la couleur rose, le Sakamena inférieur ( $K^4$ ) est en couleur rose pâle. Les séries de Malakialina (M) se distinguent par leur couleur bleu-vert.

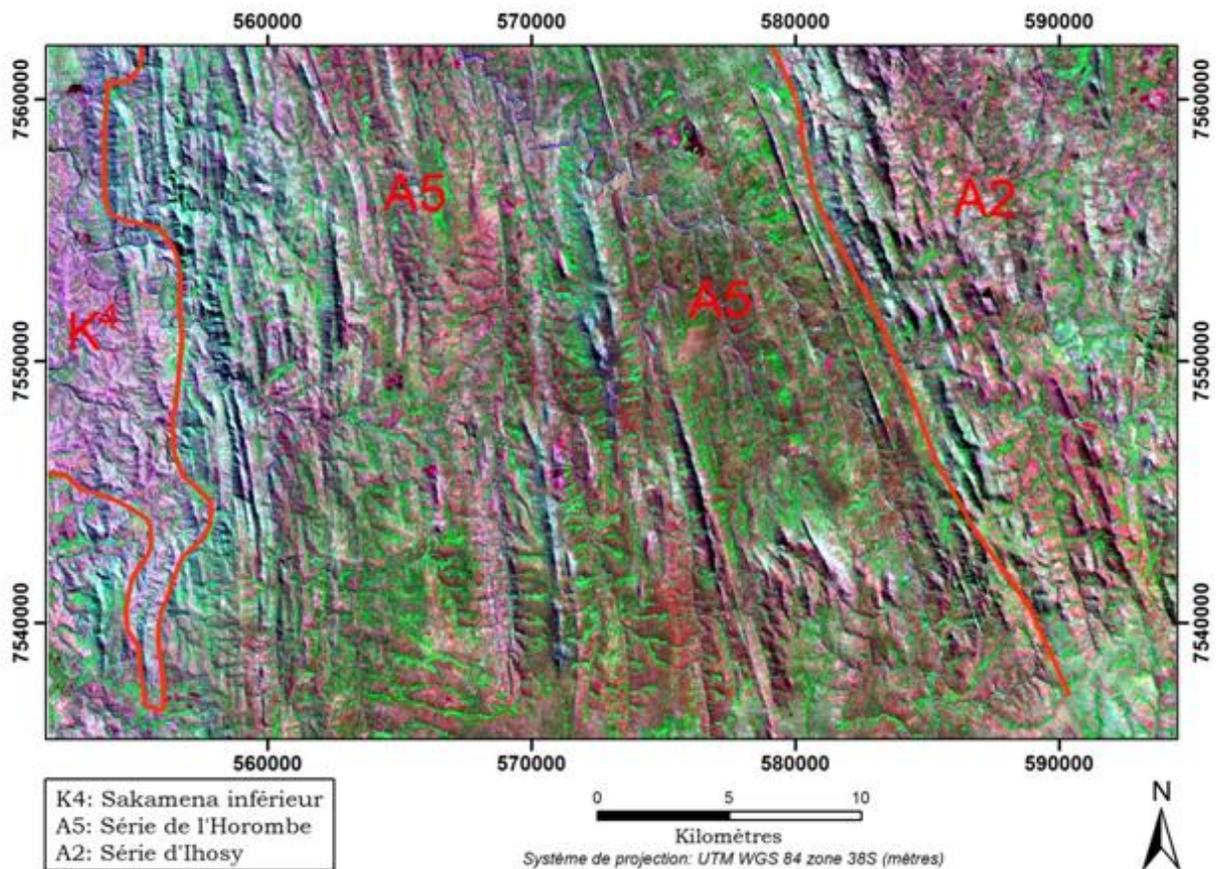


Figure 21: Composition colorée 742

- La meilleure composition colorée est l'image 453 RVB, ceci grâce à son OIF élevé (28,36) et à sa meilleure discrimination au niveau de la lithologie. Le rouge est attribué au canal proche-infrarouge 4, le vert au moyen-infrarouge 5 et le bleu à la bande du visible 3.

Ainsi, la série de Malakialina (M sur la figure 22) se distingue nettement avec sa couleur rose violacée. Les séries de l'Horombe (A5 sur la figure 22) et d'Ihoso (A2 sur la figure 22) apparaissent respectivement en vert foncé et vert clair. Le Sakamena inférieur (K<sup>4</sup> sur la figure 22) est représenté par la couleur bleue claire virée au vert très clair. Dans la partie Sud-est de notre région d'étude et s'étalant vers le centre de la partie Sud, nous pouvons constater la présence d'argile latéritique (al sur la figure 22) qui est colorée en gris-beige.

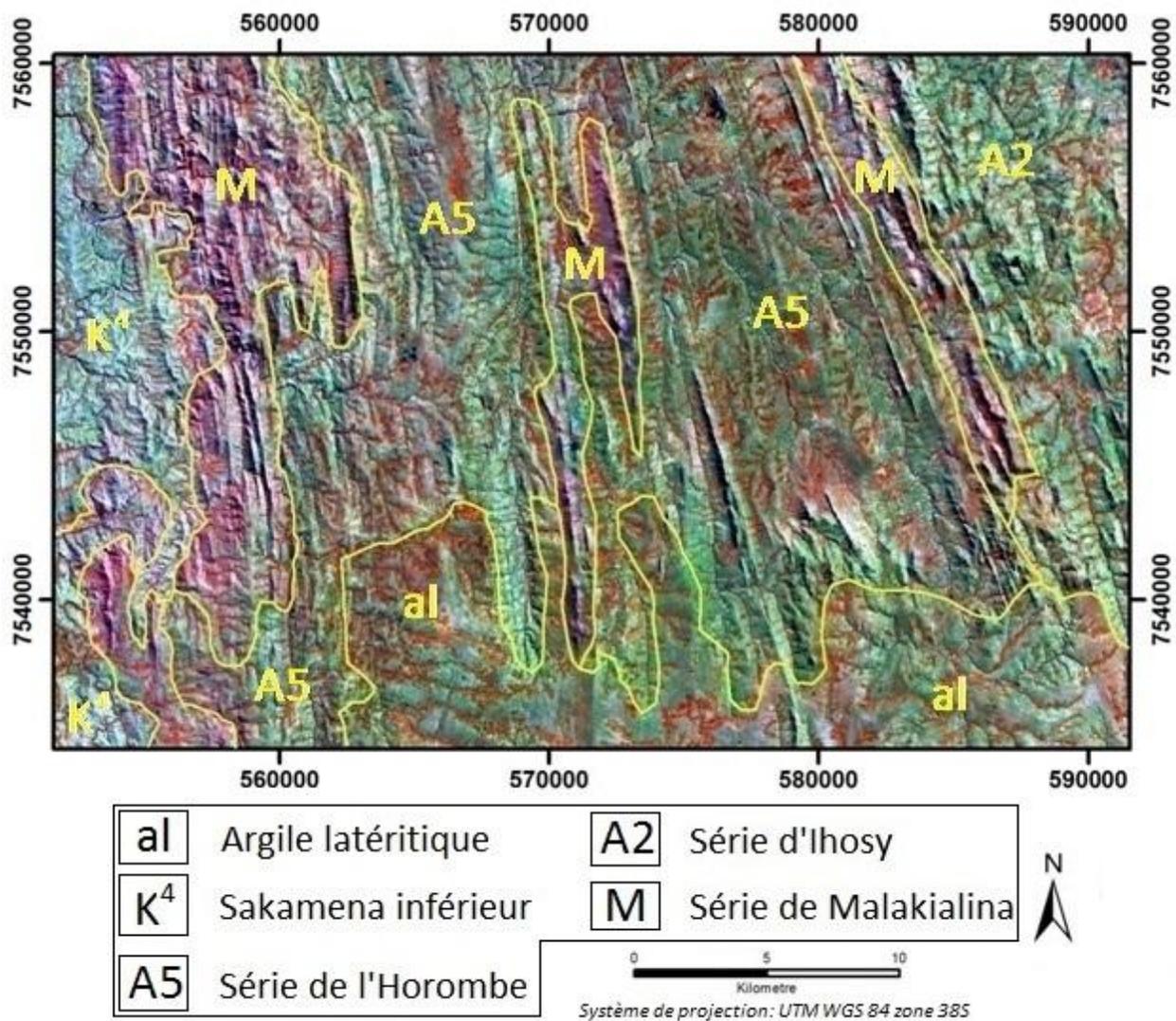


Figure 22: Composition colorée 453 avec les différentes formations connues et reconnaissables

En conclusion de cette partie composition colorée, les différentes images traitées ont données de bons résultats quant à la discrimination des différentes formations de la région d'étude, mais également, elle nous a permis d'effectuer une mise à jour et apporter quelques améliorations de la carte géologique existante qui date de 1967. Toutefois, il apparait clairement qu'il existe des lithologies qui semblent mal discernées, quelle que soit la composition utilisée. Cela est dû à la similitude de leurs réflectances. Les traitements qui vont suivre nous donnerons un peu plus de précisions sur ce cas.

## I.2. Résultats de l'analyse en composante principale (ACP)

Dans notre étude, nous avons appliqué la technique d'ACP, très utilisée en télédétection, aux différents domaines spectraux dans le but de condenser l'information répartie dans les nombreuses bandes spectrales de notre scène Landsat ETM+.

Pour l'ACP, le choix du nombre de composantes principales (CP) à conserver est une étape primordiale. Généralement, il n'y a pas de règle de décision d'où l'utilisateur est libre du choix de la CP à utiliser. D'après les différents calculs effectués dans la section « *Méthodes* » où les trois premières CP, c'est-à-dire CP1, CP2 et CP3 contiennent 98,27% de l'information contenue dans les six bandes, nous avons choisi de les utiliser.

Nous avons en premier temps réalisé une ACP avec différentes domaines :

- Domaine du visible, pour les bandes 1, 2, 3 donnant des néo-bandes qui sont CP1<sub>123</sub>, CP2<sub>123</sub> et CP3<sub>123</sub>. La composition colorée issue des ces trois CP peut être vu à la figure 23a.
- Dans le domaine mixte, c'est-à-dire 731 où la bande 7 appartient au moyen-infrarouge, la bande 3 et 1 appartiennent au domaine du visible, les néo-bandes sont CP1<sub>731</sub>, CP2<sub>731</sub> et CP3<sub>731</sub>. La composition colorée issue des ces trois CP peut être vu à la figure 23b.
- Le domaine de l'infrarouge, c'est-à-dire proche-infrarouge (canal 4) et moyen-infrarouge (canal 5 et 7), génère également les nouvelles bandes CP1<sub>457</sub>, CP2<sub>457</sub>, CP3<sub>457</sub> et elles sont visibles à la figure 23c.

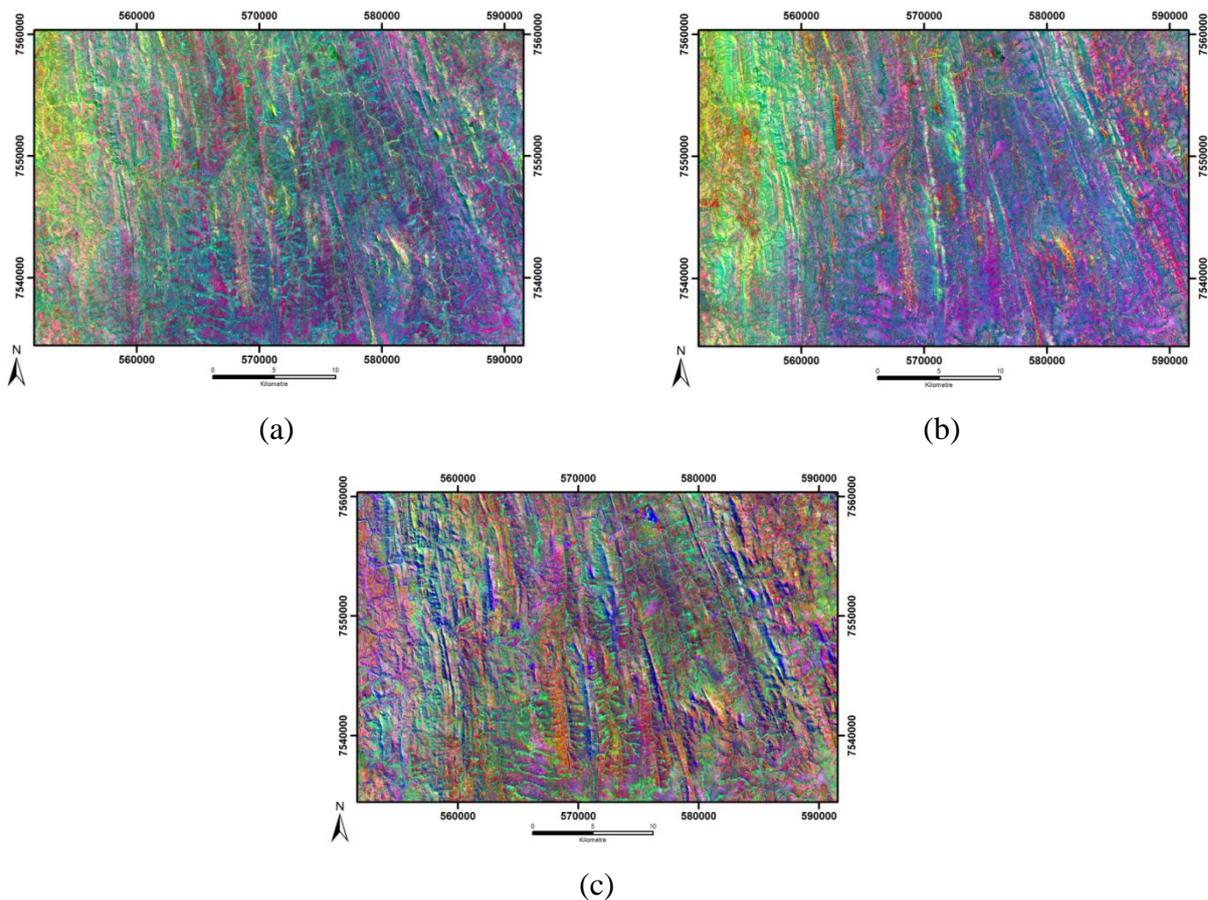


Figure 23: Composition colorée (a) domaine du visible, (b) domaine mixte et (c) domaine de l'infrarouge

Il s'avère que la composition colorée (CP1<sub>123457</sub>, CP2<sub>123457</sub>, CP3<sub>123457</sub>) générée à partir des six bandes 1, 2, 3, 4, 5, 7 est la meilleure pour l'interprétation géologique. Elle rassemble en une seule image 98,27% de la variance (information) contenue dans les fichiers images originaux, et fournit une composition colorée nette permettant la discrimination des différentes unités lithologiques.

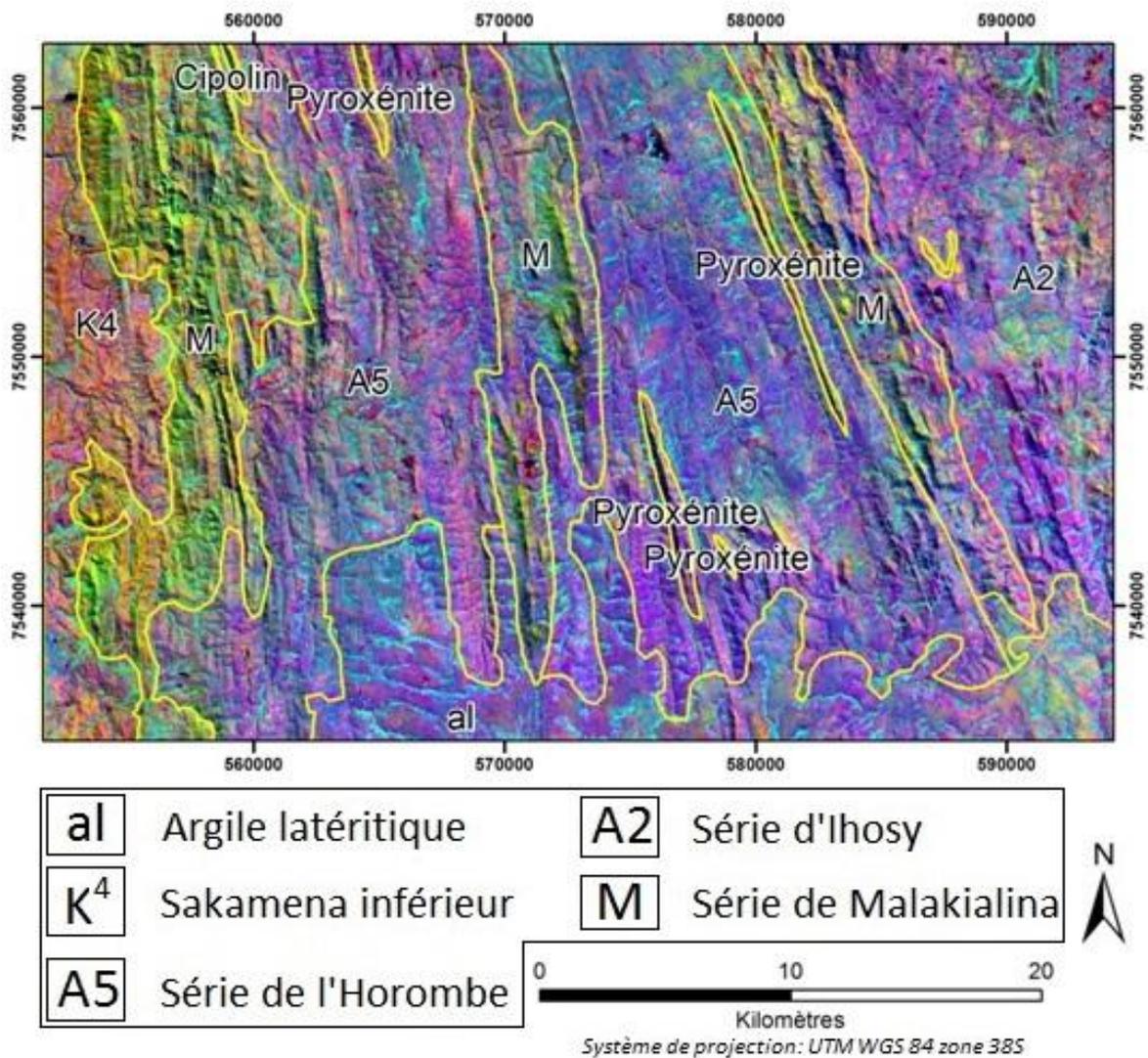
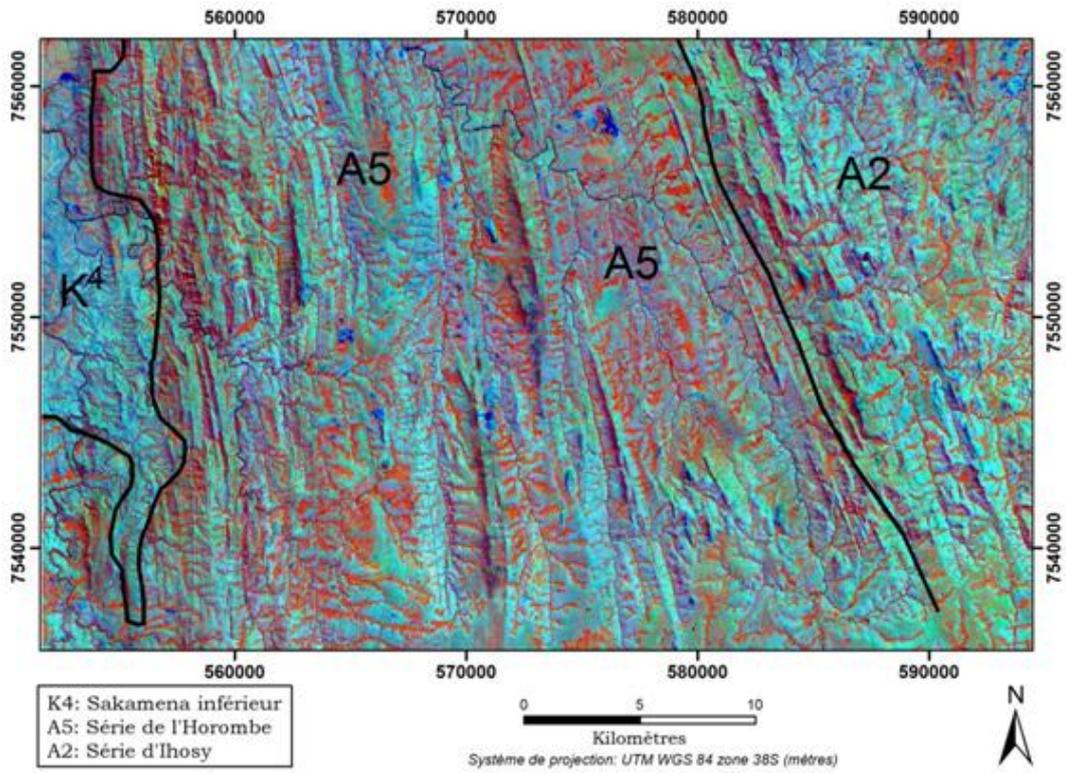


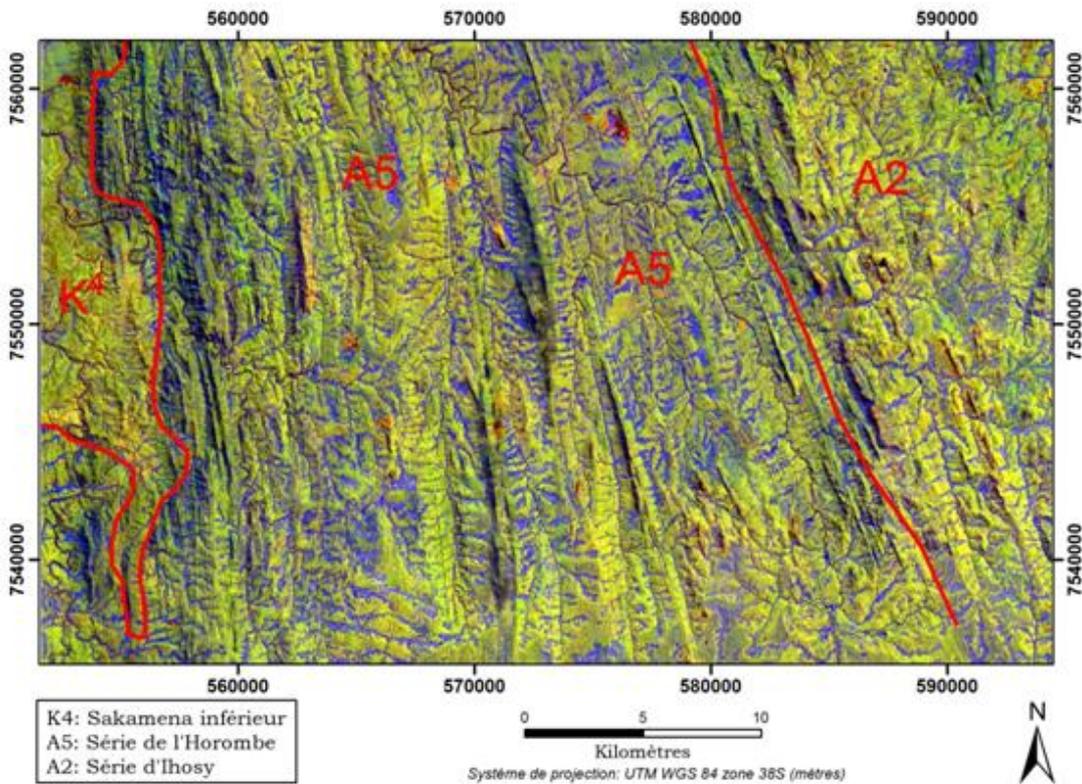
Figure 24: Composition colorée CP1<sub>123457</sub>, CP2<sub>123457</sub>, CP3<sub>123457</sub>

### I.3. Résultats du traitement par rapport de bandes

Nos compositions colorées effectuées à partir des rapports de bandes sont de mauvaises qualités. De ce fait, nous ne les avons pas retenues. Nous pouvons voir ci-dessous une aperçue des compositions colorées obtenues avec ces rapports de bandes.



(a)



(b)

Figure 25: Composition colorée (a) rapport de bandes 5/7 5/1 5/4, (b) rapport de bandes 7/3 5/2 4/3

#### I.4. Carte lithologique

La carte lithologique a été obtenue à partir des précédents traitements, leurs interprétations, ainsi que la confrontation avec la carte géologique 1/100000 à notre disposition.

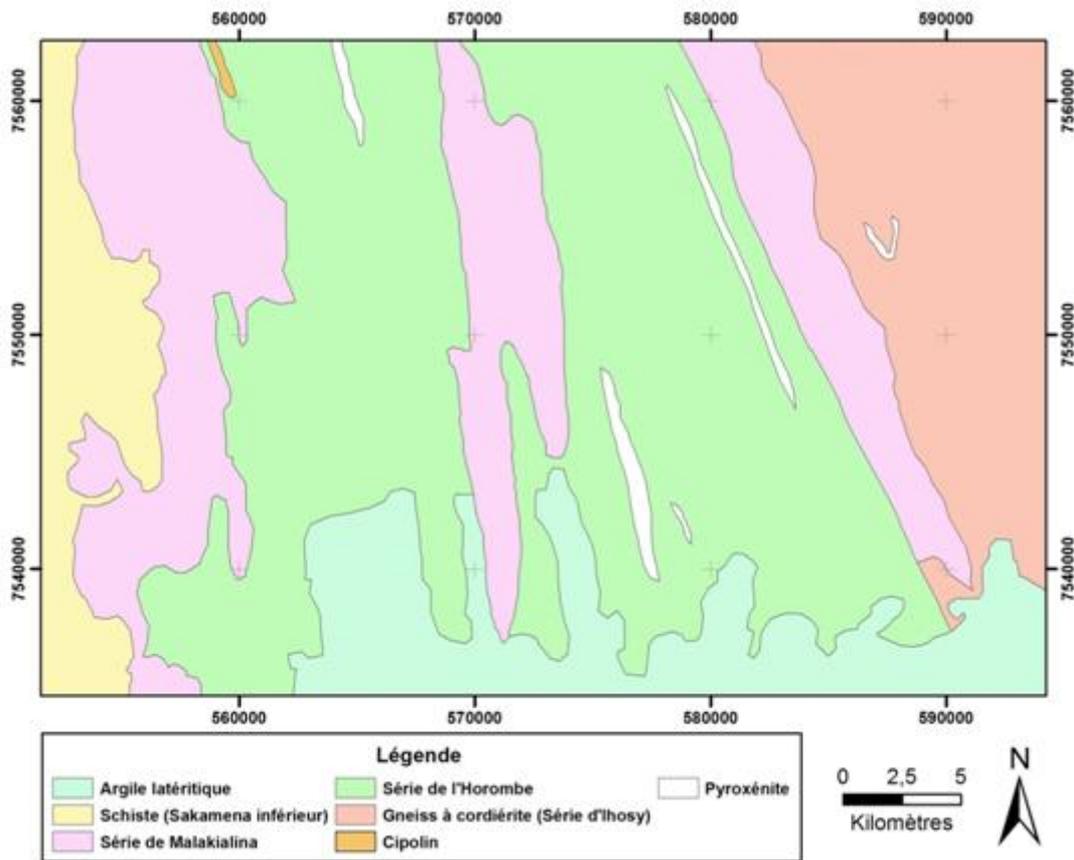


Figure 26: Carte lithologique de la région d'étude

## II. CARTOGRAPHIE LINEAMENTAIRE

On désigne par linéaments, les alignements rectilignes ou légèrement incurvés intégrant des éléments d'origine diverse : géomorphologique, hydrographique, tectonique, occupation des sols. Ils sont visibles d'une manière continue ou discontinue.

Pour effectuer une extraction linéamentaire, il est préférable de passer par le filtre Sobel avant de faire un filtrage directionnel. Effectivement, le filtre Sobel (figure 27a) permet une bonne perception des contours des différentes formations et des grands accidents tectoniques qui les affectent tandis que le filtre directionnel (figure 27b, c, d, e) rehausse les linéaments perpendiculaires à la direction affectée au filtre. Ces filtres ont donc de nombreuses applications en géologie pour la détection des structures géologiques linéaires.

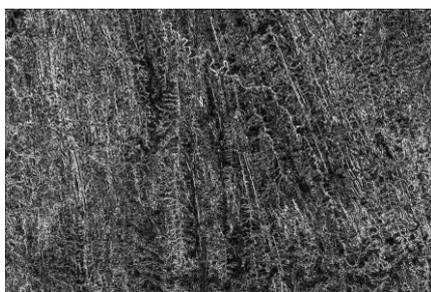
L'objectif de l'application des filtres est de trouver une meilleure façon pour identifier les linéaments correspondant à des discontinuités lithologiques et/ou structurales dans les images.

Les filtres directionnels améliorent la perception des linéaments en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image (Laghouag. 2011).

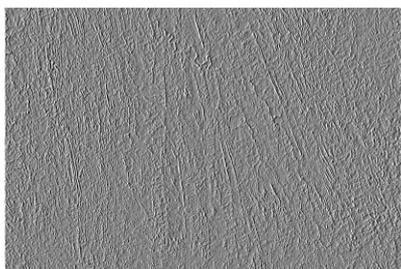
Le  $CPI_{123457}$  est utilisé pour les différents filtrages. Ce choix se justifie sur le fait que cette néo-bande possède à elle seule 80,47% des informations (se référer au tableau 6 montrant le pourcentage de variance des canaux 123457).

L'image résultant de l'application du filtre Sobel (figure 27a) améliore les contours des formations.

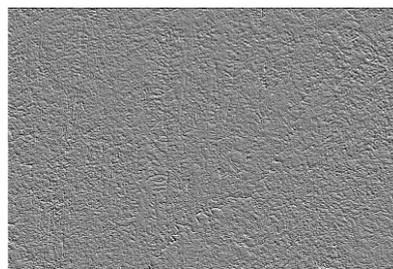
Pour le filtrage directionnel (figure 27b, c, d, e), le rehaussement a été effectué dans plusieurs directions ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $160^\circ$ ). Seuls les angles  $10^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $100^\circ$ , et  $160^\circ$  ont été retenus à cause de leur meilleure mise en relief des discontinuités radiométriques (fort contraste obtenu sur les images), mais aussi parce que c'est avec ces angles que l'on distingue le mieux les différents linéaments rehaussés.



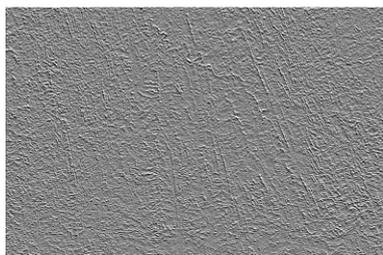
Filtre Sobel



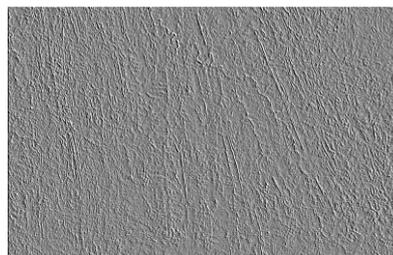
(a) Filtre directionnel  $10^\circ$



(a) Filtre directionnel  $70^\circ$



(b) Filtre directionnel  $100^\circ$



(c) Filtre directionnel  $160^\circ$

Figure 27: Différents filtres appliqués à la première composante principale  $CPI_{123457}$ . Filtre Sobel et filtres directionnels à matrice  $5*5$

## II.1. Carte des linéaments

Pour la cartographie des linéaments, nous avons fait appel au logiciel ArcGIS afin de numériser les linéaments issus des filtrages directionnels sur une nouvelle couche appelé « *shapefile* ». L'issue de ce traitement nous a donné une carte où figurent tous les linéaments extraits de différents filtrages.

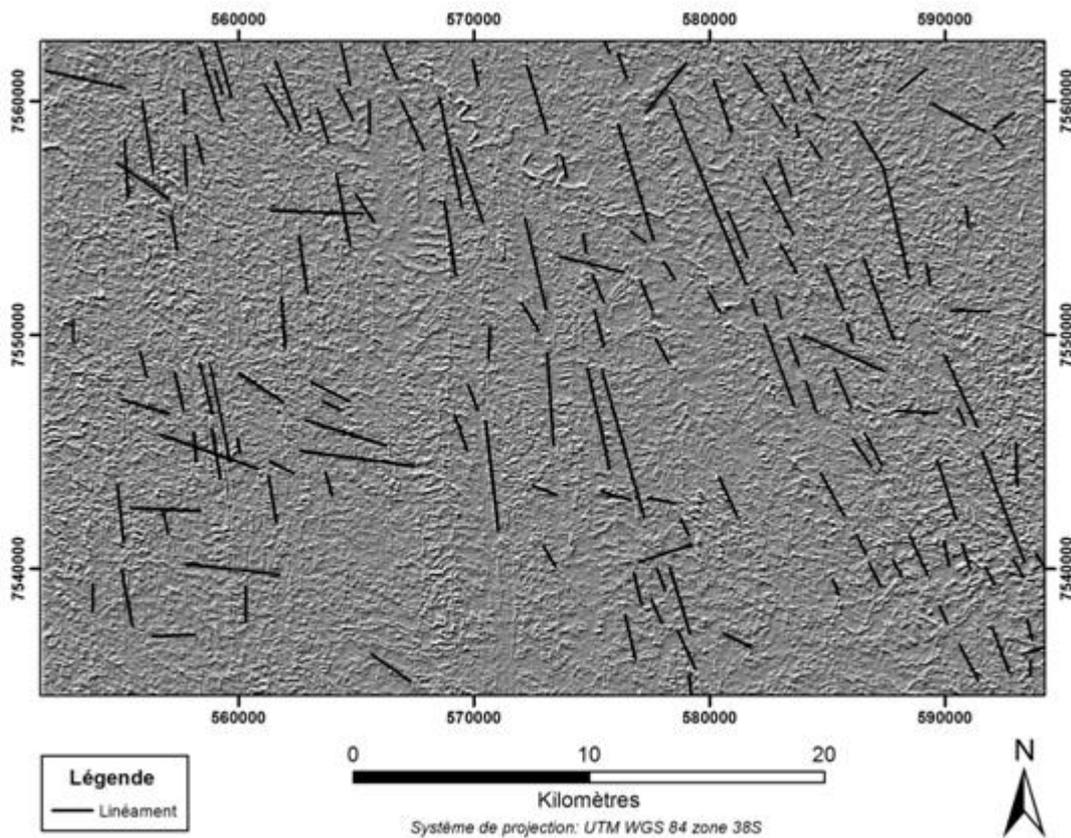


Figure 28: Carte linéamentaire de la région d'étude obtenue à partir des filtres directionnels 10°, 70°, 100°, 160° sur le CPI<sub>12457</sub>

## II.2. Résultat du traitement sur « SPO 2003 »

Grace au traitement sur SPO 2003, nous avons les données sur la distribution des linéaments à savoir l'intervalle des angles de direction, le nombre de linéaments y correspondant, ainsi que les différents pourcentages relatifs à chaque direction. L'intervalle des angles choisis est de 30° étant donné des valeurs de la direction très espacées.

Tableau 9: Synthèse des résultats du calcul sous SPO 2003 montrant la distribution de l'orientation des linéaments

Angle (°)	Direction	Nombre de linéaments	Pourcentage (%)
[0-30[	NNE-SSW	0	0
[30-60[	NE-SW	2	1,25
[60-90[	ENE-WSW	0	0
[90-120[	ESE-WNW	26	16,25
[120-150[	SE-NW	13	8,13
[150-180[	SSE-NNW	119	74,37
	Total	160	100

### II.3. Résultat du traitement sur "Rose.NET"

Un diagramme en rose a été établi à partir du précédent résultat. Ce diagramme représente les familles d'orientation des linéaments à l'échelle régionale de la région d'étude.

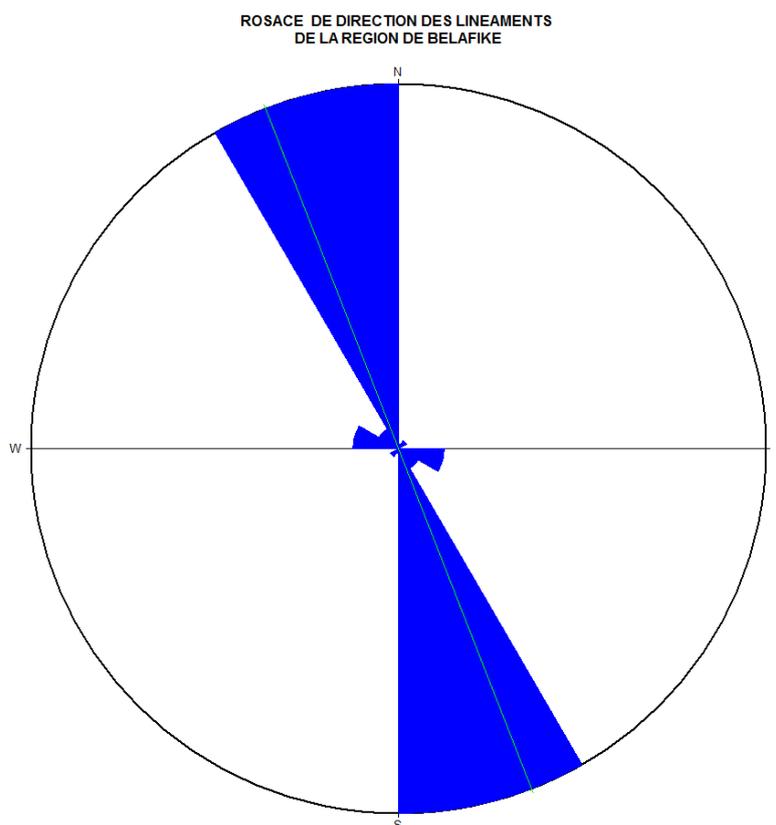


Figure 29: Rosace de direction des linéaments de la région d'étude

La carte de synthèse des linéaments (*figure 28: Carte linéamentaire de la région d'étude obtenue à partir des filtres directionnels 10°, 70°, 100°, 160° sur le CPI<sub>12457</sub>*) regroupe 160 linéaments. En effet, elle nous révèle quatre familles selon la direction des trajectoires des linéaments dont une très importante.

- SSE-NNW (150° à 179°)
- ESE-WNW (90° à 120°)
- SE-NW (120° à 149°)
- NE-SW (30° à 59°)

Les linéaments appartenant à la famille SSE-NNW, regroupent 74,38% des effectifs des linéaments et qui sont prédominants. Ensuite vient la famille ESE-WNW qui représente 16,25% des linéaments présent dans la région d'étude. 8,13% pour l'orientation SE-NW. Quant à l'orientation NE-SW, elle ne représente que 1,25%.

Les fractures ont des longueurs variables allant de l'ordre kilométrique jusqu'à l'ordre métrique. Leur orientation sur l'image n'est pas homogène et se fait dans presque toutes les directions.

Les directions majeures comprises entre SSE- NNW sur la rosace sont à peu près parallèles à celle de la faille Bongolava - Ranotsara. Ce phénomène peut être expliqué comme étant un même mouvement tectonique qui affecte la zone. Les autres directions s'orientent d'une façon désordonnée. Ces phénomènes peuvent être dus au fait que notre région d'étude est affectée par les différents facteurs tectono-métamorphismes.

### **III. CARTE LITHOSTRUCTURALE**

#### **III.1. Traitement d'images**

La réalisation de la carte lithologique et structurale de la région de Belafike a été rendue possible grâce à l'application, sur les images satellitaires Landsat 7 ETM+, de techniques permettant la mise en évidence de la lithologie et des linéaments.

Face à la présence de végétation dans la région d'étude, la discrimination lithologique a demandé un peu plus de travail au niveau de l'interprétation des résultats du traitement d'image. Mais grâce aux données de terrain aux différentes recherches bibliographique, ainsi qu'à la bonne qualité des images satellitaires, il a été possible d'effectuer la discrimination lithologique avec une plus grande aisance.

La méthode d'extraction manuelle des linéaments est une méthode soumise à l'appréciation et à la sensibilité de l'œil humain. Cette caractéristique intrinsèque de la méthode ne permet pas une cartographie géologique structurale précise. La lisibilité de l'image constitue également un problème supplémentaire qui compromet la fiabilité de cette méthode. Par conséquent, l'application de cette méthode, même sur une image satellitaire de grande résolution, ne peut permettre une interprétation exhaustive des linéaments.

Contrairement à cela, la méthode d'extraction numérique des linéaments assistée par ordinateur offre non seulement une meilleure lisibilité, mais également les moyens d'observation de l'image sous plusieurs aspects à travers l'utilisation des filtres (rehaussement des contours et des structures). Ces différents atouts permettent une cartographie se rapprochant le plus possible de la réalité. L'application des techniques résultant de cette méthode (superposition des interprétations des images) peut aboutir à une carte linéamentaire donnant avec une plus grande certitude la position et les directions des linéaments.

### **III.2. Lithologie et structure**

La zone d'étude située entre le bloc précambrien du sud et le bloc précambrien central de Madagascar est constituée essentiellement de roches gneissiques, large de quelques dizaines de kilomètres. Cette zone est comprise dans la méga zone de cisaillement ductile majeure de Ranotsara de direction NW-SE (Windley et al, 1994 ; Martelat., 1999 ; Collins et Windley, 2002 ; Randrianasolo, 2009). D'autres auteurs (Hottin, 1976; Nicollet, 1990) interprètent cette zone comme la faille majeure de Bongolava-Ranotsara avec une direction générale NW-SE. Par ailleurs, cette méga zone de cisaillement, de direction NW-SE (N140-150) s'anastomose avec des zones de cisaillement plus petites de 3 à 5 km de large (Martelat et al., 2000).

Comme l'orientation générale des formations sur la région de Belafike est généralement N160, cette orientation est parallèle à celle qui domine dans la carte de synthèse des linéaments structuraux (figure 28).

Du point de vue lithologique, la zone d'étude est dominée par les métapelites à grenat, cordiérite, sillimanite ; du gneiss à biotite, amphibole ; du leucogneiss souvent granitoïde et du quartzite.

Ces lithologies sont caractéristiques de la zone de cisaillement de Bongolava-Ranotsara (Martelat, 1999 ; Collins et Windley, 2002 ; nos observations).

Il convient de noter que le faciès granulite a rendu les roches beaucoup plus ductiles. Cette série est ainsi en général hautement défigurée et métamorphosée.

Coté structure, il est à noter qu'avec l'augmentation des contraintes, le comportement de la roche n'est plus ductile mais devient cassant (cassure colmatée par des intrusions). Ainsi, la présence de boudins asymétriques suppose des contraintes anisotropes ayant affecté la zone (*Photo 1 : Gneiss à amphibole et biotite à structure boudinée (vue de plan) avec des veines pegmatitiques*). De ce fait, ce phénomène a engendré un cisaillement pur (aplatissement) et un cisaillement simple. La zone étudiée a subi alors une forte transpression.

Ainsi, le prospect de Belafike fait partie intégrante de la méga zone de cisaillement ductile de Ranotsara.

Ce modèle structural de type transpressif, est aussi caractéristique des zones de cisaillement ductile que l'on rencontre dans le sud de Madagascar (Martelat, 1999). Le métamorphisme et la tectonique sont probablement contemporains. Ce stade qui s'est produit probablement pendant l'orogénèse panafricaine (Nicollet, 1990; Kröner et al., 1996; Kröner et al., 1999 ; Giese et al., 2008) a affecté cette partie sud de l'île.

### **III.3. Litho-structurale**

Parmi les traitements appliqués aux images Landsat 7 ETM+ couvrant la région de Belafike, les plus efficaces sont la composition colorée 453 RGB, l'analyse en composantes principales ACP123457 (CP1, CP2, CP3 issues des 6 bandes TM 1,2,3,4,5 et 7) et les filtres de Sobel et directionnel 10°, 70°, 100°, 160° à matrice 5\*5. Une carte lithostructurale est réalisée à partir de l'assemblage des différents résultats des analyses lithologiques et structurales en vue de tester la cartographie des différentes lithologies sur ces images obtenues par traitements, estimer leur apport et valider leurs résultats. Pour se faire, la méthodologie utilisée est accompagnée d'un travail parallèle bibliographique et de terrain (remplacé dans le cas de Belafike par la carte géologique de Satrokala feuille J55 de Randriamanantenina et al, 1967) comme outil de référence, d'examen et de confirmation.

Pour estimer le degré de concordance avec la carte géologique feuille J55 de Randriamanantenina et al. (1967) (figure 19), cette dernière a été digitalisée et incorporée dans un système d'informations géographiques (SIG) grâce au logiciel ArcGis 10.0, puis superposée à d'autres calques comportant la carte linéamentaire obtenue sous ArcGIS même et les différentes images issues des traitements utilisées pour dresser la carte lithologique de la région.

La nouvelle carte lithostructurale obtenue est assez précise et apporte des mises-à-jours à la carte géologique existante.

La direction NNW-SSE des unités lithologiques, relativement évidente, concorde avec celles des linéaments et foliations. Ce parallélisme est expliqué du fait que la zone a subi des contraintes importantes. Cette accordance structurale est caractéristique des zones de cisaillement ductile dans cette partie sud de Madagascar (Martelat, 1999).

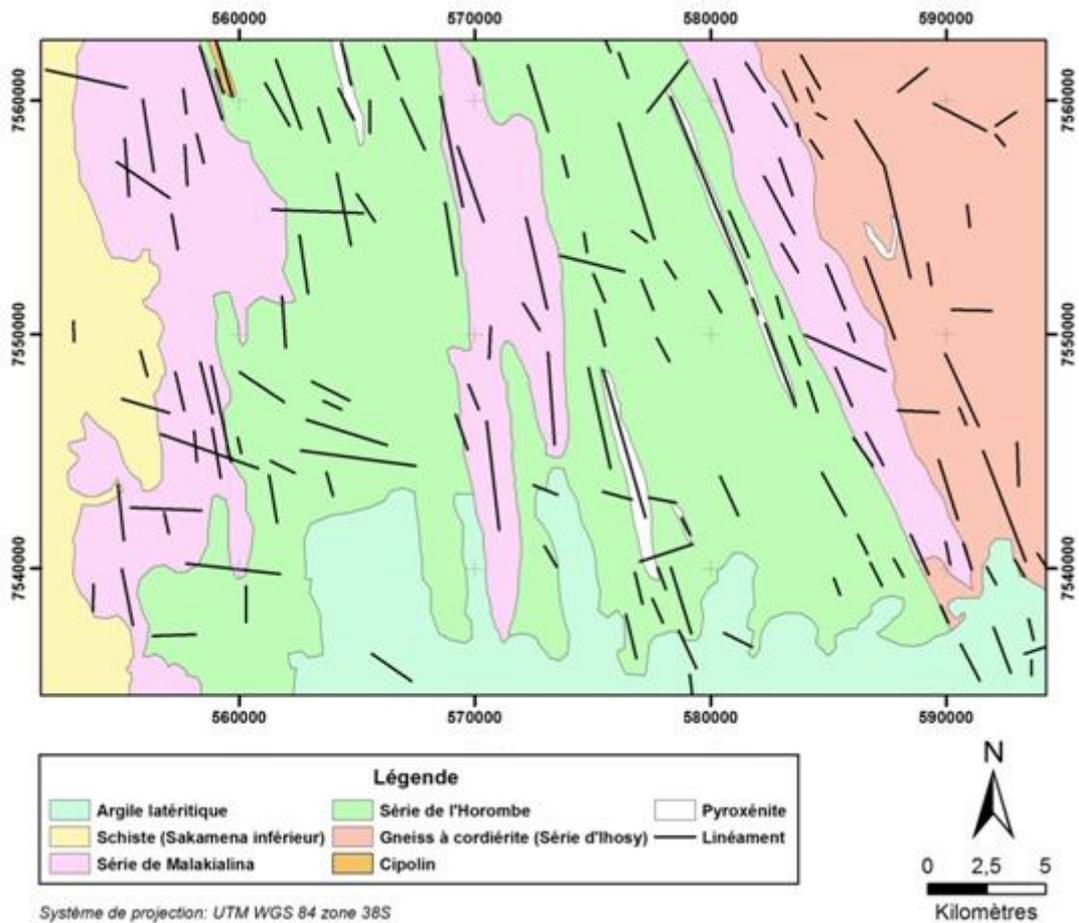


Figure 30: Carte lithostructurale de la région d'étude

## CONCLUSION

La cartographie géologique classique, basée uniquement sur des missions de terrain, est un travail long et complexe. Nous avons testé l'utilisation de traitements d'images satellitaires Landsat 7 ETM+ pour la cartographie de la région de Belafike. Ce travail montre que cela peut être d'une très grande efficacité lorsque cette méthodologie est associée à un travail parallèle bibliographique et de terrain comme outil de vérification et de validation (figure 6). Les résultats montrent que la composition colorée (321, 453, 742), l'ACP<sub>123457</sub> (CP1<sub>123457</sub> CP2<sub>123457</sub> CP3<sub>123457</sub>) font ressortir les différentes lithologies de la région, que les filtres Sobel et directionnel permettent une fidèle cartographie des linéaments qui autrement auraient été difficilement détectés.

On peut dire alors que la méthode adoptée permet des gains de temps aussi bien en aval qu'en amont des missions de terrain. En amont, elle permet d'identifier et de localiser des structures et des lithologies qui lorsqu'elles posent interrogation peuvent être vérifiées sur le terrain. En aval, elle permet, par exemple, une finition beaucoup plus précise dans la délimitation des formations.

Cela nous offre, pour Belafike, où seule une carte 1/100000 a été publiée, des perspectives très prometteuses pour une cartographie géologique plus performante aussi bien dans la qualité que dans le temps de réalisation.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

- Big n°3.** Initiation à la télédétection. Bulletin de l'Information Géographique appliquée aux activités de Recherche-Développement.
- Djemai S., Bendaoud A., Haddoum H., Ouzegane K., Kienast J-R., 2009.** Apport des images Landsat 7 ETM+ pour la cartographie géologique des terrains archéens en zone aride: Exemple du terrane de l'In Ouzzal (Hoggar occidental), Algérie. Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF Alger Novembre 2009. 7 pages.
- Giese J., Schreurs G., Berger A., Herwegh M., Gnos E., 2008.** A new perspective on the significance of the Ranotsara zone in central Madagascar. 33<sup>rd</sup> International Geological Congress Oslo 2008.
- Gomez C., 2004.** Potentiels des données de télédétection multisources pour la cartographie géologique : Application à la région de Rehoboth (Namibie). Thèse de Doctorat, Université Caude Bernard, Lyon, 210 pp.
- Hammad N., Kahoui M., Mahdjoub Y., 2009.** Apport de la télédétection à haute résolution à la discrimination lithologique en domaine semi-désertique et aride : application à la région du Djebel Drissa, Massif des Eglab, Algérie. Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF Alger Novembre 2009. 8 pages.
- Hottin G., 1976.** Présentation et essai d'interprétation du Précambrien de Madagascar. Bulletin du BRGM IV, 117-153.
- Imessaoudene M., 2012.** Utilisation de la télédétection pour la cartographie géologique du Massif des Eglab et de sa bordure sédimentaire (Sud-Ouest algérien) Exemple de la feuille de Mokrid. Mémoire de fin d'étude de l'Université Ferhat Abbas-Sétif. 68 pages.
- Inzana J., Kusky T., Higgs G., Tucker R., 2003.** Supervised classifications of landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar. *J. Afr. Earth. Sci* 37, 59-72.
- Jourda P., Djagoua V., Kouamé K., Saley B., Gronayes C., Achy J., Biémi J., Razack M., 2006.** Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : apport de l'imagerie ETM+ de Landsat.
- Kouamé K., Gioan P., Biémi J., Kouadio A. 1999.** Méthode de cartographie des discontinuités- images extraites d'images satellitaires : exemple de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. *Télédétection*, vol. 1, no 2, p. 139-156.
- Kröner A., Braun I., Jaeckel P., 1996.** Zircon geochronology of anatectic melts and residues from a high-grade pelitic assemblage at Ihosy, southern Madagascar: evidence for Pan-African granulite metamorphism, *Geological Magazine*, 133, 311 – 323.
- Kröner A., Windley F., Jaeckel P., Brewer S., and Razakamanana T., 1999.** Precambrian granites, gneisses and granulites from Madagascar: new zircon ages and regional significance for the evolution of the Pan-African orogen. *Journal of the Geological Society (London)* 156, 1125– 1135.
- Laghoug Y., 2011.** Apport de la télédétection (images Landsat 7 ETM+) pour la cartographie géologique de la région d'Aflou (Atlas saharien). Mémoire de fin d'étude de l'Université Ferhat Abbas-Sétif. 98 pages.

- Martelat E., 1998.** Evolution thermomécanique de la croûte inférieure du sud de Madagascar. Thèse. Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand II, 232 p.
- Martelat E., 1999.** Granulite microfabrics and deformation mechanisms in southern Madagascar. *Journal of structural Geology* 21, 671-687.
- Nicollet C., 1990.** Crustal evolution of the granulites of Madagascar. In: Vielzeuf, D., Vidal, P. (Eds.), *Granulites and Crustal Evolution*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 291–310.
- Noizet G., 1969.** Contribution à l'étude géologique des formations métamorphiques du faciès Granulite dans le Sud de Madagascar. Thèse Nancy, nb pages 42.
- Rakotoarison H., Razakamanana T., Andriamiadanarivo M., Razafindrainibe C., Rakotomandimby S., Rakotomanoelina R., Rajaonah H., 2008.** Rapport de terrain sur le projet d'exploration d'uranium dans la région d'Ihosy.
- Randrianasolo B., 2009.** Nouvelles méthodes de cartographie du socle protérozoïque de Madagascar. Nature et géométrie de la croûte continentale inférieure d'un domaine orogénique en convergence, implications économiques. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble (Terre solide, TUE Grenoble).
- Ratefiarimino A.,.** Potentiels de minéralisation des domaines miniers de la société Mines Tany Hafa (MTH) (Région de Zazafotsy – Sahambano – Ranotsara au Sud de Madagascar). Fascicule 1 : Etat des connaissances géologiques et minières. 16 pages.
- Rolin P., 1991.** Présence de décrochements précambriens dans le bouclier méridional de Madagascar: implications structurales et géodynamiques. *C. R. Acad. Sci. Paris* 312,625–629.
- Vachette M., 1977.** Géochronologie du Précambrien malgache. *Bulletin de l'académie malgache*. 55, 251–289.
- Windley F., Razafiniparany A., Razakamanana T., and Ackermann D., 1994.** Tectonic framework of the Precambrian of Madagascar and its Gondwana connections: a review and reappraisal, *Geologische Rundschau*, 83, 642– 659.

[www.ccrs.nrcan.gc.ca](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca) (consulté le 20 juillet 2013)

[www.ceos.cnes.fr:8100](http://www.ceos.cnes.fr:8100) (consulté le 6 juin 2013)

[www.cnes.fr](http://www.cnes.fr) (consulté le 6 juin 2013)

[www.eoedu.belspo.be](http://www.eoedu.belspo.be) (consulté le 6 juin 2013)

[www.esrifrance.fr](http://www.esrifrance.fr) (consulté le 7 août 2013)

[www.landsat.gsfc.nasa.gov](http://www.landsat.gsfc.nasa.gov) (consulté le 6 juin 2013)

[www.spatial-analyst.net](http://www.spatial-analyst.net) (consulté le 23 juillet 2013)

# TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	I
REMERCIEMENTS .....	II
SOMMAIRE .....	III
LISTE DES ABREVIATIONS .....	IV
LISTE DES FIGURES .....	V
LISTE DES TABLEAUX .....	V
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I. CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE.....	2
I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE .....	3
I.1. Présentation de la région .....	3
I.2. Localisation de la zone d'étude .....	3
I.3. Cadre physique de la région d'étude .....	4
II. CONTEXTE GEOLOGIQUE .....	5
II.1. Aperçu de la géologie de Madagascar.....	5
II.2. Zone cisailante Ranotsara.....	7
CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES .....	8
I. MATERIELS .....	9
II. RAPPEL METHODOLOGIQUE.....	9
II.1. Télédétection et cartographie géologique.....	11
II.2. Les différents traitements utilisés.....	20
III. OBSERVATION SUR TERRAIN .....	30
CHAPITRE III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....	33
I. CARTOGRAPHIE LITHOLOGIQUE .....	34
I.1. Résultats du traitement en composition colorée.....	34
I.2. Résultats de l'analyse en composante principale (ACP).....	38
I.3. Résultats du traitement par rapport de bandes.....	40
I.4. Carte lithologique .....	42
II. CARTOGRAPHIE LINEAMENTAIRE.....	42
II.1. Carte des linéaments.....	44
II.2. Résultat du traitement sur « SPO 2003 ».....	44
II.3. Résultat du traitement sur “Rose.NET”.....	45
III. CARTE LITHOSTRUCTURALE.....	46
III.1. Traitement d'images.....	46
III.2. Lithologie et structure .....	47

III.3. Litho-structurale .....	48
CONCLUSION .....	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES .....	VI
TABLE DES MATIERES.....	VIII
ANNEXE .....	X
RESUME	
ABSTRACT	

## ANNEXE

### Descriptions lithologiques

X	Y	Eboulis, éluvions ou « Floats »	Affleurement et mesure structurales
583350	7548026	Diopsidite, Veine de Quartz, Orthogneiss à biotite, Amphibolite, Quartz laiteux, Leucogneiss, Pegmatite.	Gneiss mylonitique: Direction N140, pendage 65°E
583650	7548036	Veine de quartz oxydé, Gneiss mylonitique, Amphibolite.	Gneiss granitique: Direction N138, pendage 64°E
584550	7548060	Veine de Quartz, Gneiss à grenat, biotite, Amphibolite, Diopsidite	Gneiss à biotite, grenat : Direction N160, pendage: 80°W
585250	7548060	Veine de quartz, Quartzite, Gneiss à biotite, grenat, Amphibolite	Gneiss mylonitique Direction N110, pendage 70W
583200	7547000	Gneiss et Amphibolite boudiné	Gneiss et Amphibolite boudiné direction: N144°, pendage:sub-vertical
583650	7547000	Leucogneiss	Leucogneiss, moins déformé, direction: N145°, pendage: 70°W
583750	7547000	Amphibolite, veine de quartz, blastomylonite à grenat porphyroblaste, sillimanite, cordiérite, quartz fumé.	Blastomylonite à grenat, sillimanite porphyroblaste, cordiérite, quartz fumeux, direction: N145°, pendage:sub-verticale
584900	7547000	Veine quartzeux, Gneiss à grenat, sillimanite, cordiérite	Veine quartzeux, Gneiss à grenat, sillimanite, cordiérite direction: N112°, pendage 52W
582600	7549000	Diopsidite, Mylonite, Veine de quartz	Gneiss granitoide direction: N145°, pendage: sub-vertical
582850	7549000	Diopsidite, Gneiss mylonitique, Amphibolite, granodiorite à amphibole et diopside	Gneiss mylonitique direction: N165°, pendage: 55°E, Diopsidite direction: N165°, pendage: 70ESE
582900	7549000	Mylonite, Diopsidite, phlogopite,	Gneiss mylonite, amphibolite, diopsidite, direction: N205°, pendage: 80°W
583250	7549000	Quartzite à magnétite	Banc de quartz à grain fin, direction: N160°, pendage sub-vertical
583400	7549000	Quartzite à magnétite	Banc de quartz à grain fin, direction: N145°, pendage sub-vertical
584250	7549000	Veine quartzeux, gneiss à grenat, sillimanite, cordiérite,, diopsidite - amphibolite, quartzite à magnétite	Veine quartzeux, Gneiss à grenat, sillimanite, cordierite; diopsidite, amphibolite, Quartzite à magnétite, direction: N 145°, Pendage: sub-vertical
584550	7549000	Gneiss déformé avec biotite, amphibole, phlogopite et veine de quartz	Gneiss déformé avec biotite, amphibole, phlogopite et veine de quartz. direction: N140°, pendage: sub-vertical

584800	7549000	Quartzite	Quartzite et veine de feldspath, direction: N140°, pendage: sub-vertical
583550	7546000	Leucogneiss, amphibolite, quartzite	Gneiss à amphibole, diopside, biotite direction N140°, pendage: sub-vertical
583600	7546000	Leucogneiss, amphibolite, quartzite	Veine quartzeux; Gneiss à grenat, sillimanite, cordiérite; Amphibolite; Quartzite à magnétite. direction: N 155°, pendage: sub-vertical
583950	7546000	Gneiss à amphibole, veine quartzeux feldspathique	Leucogneiss à amphibole, biotite de direction: N155°, pendage: 80E
584300	7546000	Gneiss granitoïde à biotite	Gneiss granitoïde à biotite, direction: N140°, pendage: 60ESE
584550	7546000	Quartzite, leucogneiss, diopsidite, Amphibolite	Diopsidite, veine quartzeux, amphibolite, gneiss à diopside-amphibole-biotite, même structure, folié, direction: N160°, pendage: 80°W
585450	7546000	Amphibolite, Diopsidite, Gneiss à grenat-cordiérite-sillimanite-diopside-amphibole,	Amphibolite, Diopsidite, gneiss à grenat, cordierite, sillimanite, diopside, amphibole, leucogneiss, direction: N140°, pendage: 80°W
585500	7546000	Leucogneiss, amphibolite	Leucogneiss, amphibolite, direction: N 144°, pendage: sub-vertical
585600	7546000	Gneiss à grenat-cordiérite, sillimanite-amphibole-diopside, leucogneiss	Gneiss à grenat-cordiérite, sillimanite-amphibole-diopside, leucogneiss, direction: N140°, pendage: 80°E
582450	7550000	Leucogneiss	Leucogneiss, direction: N 160°, pendage: 60°E boudinée
582550	7550000	Leucogneiss, amphibolite, diopsidite	leucogneiss, direction: N 146°, pendage: 70°E
583000	7550000	Gneiss à grenat-sillimanite-cordiérite-amphibole-diopside, amphibolite, diopsidite, quartzite	Gneiss à grenat-sillimanite-cordiérite-amphibole-diopside direction: N 160°, pendage: 70°W
583050	7550000	Gneiss à grenat-sillimanite-cordiérite-amphibole-diopside	Gneiss à grenat-sillimanite-cordiérite-amphibole-diopside direction: N 160°, pendage: 68°W
583500	7550000	Gneiss à grenat-sillimanite-cordiérite-amphibole-diopside, mylonite, amphibolite	Gneiss à grenat, sillimanite, cordierite, amphibole, diopside, mylonite; amphibolite. Gneiss direction: N 150°, pendage: sub-vertical, leucogneiss: N 160°, 80°W, amphibolite: N162°, 70°W
583550	7550000	Gneiss à grenat-sillimanite-cordiérite-amphibole-diopside, mylonite, amphibolite	Gneiss à grenat, sillimanite, cordierite, amphibole, diopside, mylonite; amphibolite. Gneiss direction: N 130°, pendage: sub-vertical, leucogneiss: N 3160°, 80°W, amphibolite: N164°, 70°W
583700	7550000	Leucogneiss	Leucogneiss à sillimanite, cordiérite, grenat finement folié, direction: N162°, pendage: 70°W
583950	7550000	Gneiss à grenat-sillimanite-cordiérite-amphibolite-diopsidite	Gneiss à grenat-sillimanite, cordierite, amphibolite; diopsidite, direction: N164°, pendage: 70°W
584300	7550000	Gneiss granitoïde, amphibolite, quartzite	Granite à feldspath rose, gneiss à amphibolite; diopsidite, direction: N 160°, pendage: 80°W
584650	7550000	quartzite, Leucogneiss	Quartzite, veine pegmatitique direction: N160°, pendage: 75W

**APPORT DU TRAITEMENT D'IMAGE SATELLITAIRE  
LANDSAT 7 ETM+ A LA CARTOGRAPHIE LITHOSTRUCTURALE  
(Cas de Belafike, Commune rural de Satrokala, District d'Ihosy)**

**RESUME**

La connaissance des lithologies et des structures géologiques est vraiment utile dans la recherche minière.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les grands ensembles lithologiques, ainsi que les linéaments de la région de Belafike, au moyen des images satellitaires Landsat 7 ETM+. Nous avons déterminé les limites des ensembles lithologiques grâce à différents traitements d'image satellitaire comme la composition colorée, l'analyse en composante principale et le rapport de bande. Ensuite, nous avons extrait les linéaments à l'aide de filtres Sobel et directionnels.

Une esquisse lithostructurale a ainsi été obtenue. Plusieurs directions de linéaments ont été cartographiées, mais la plus importante dans la région est la direction SSE-NNW, contrôlée par la zone de cisaillement Bongolava-Ranotsara.

La cartographie géologique réalisée à l'aide de la télédétection concorde bien avec les travaux antérieurs existants et la réalité sur le terrain. Elle offre un avantage considérable comme le gain de temps, la précision des données, mais également la possibilité de travailler sur une plus grande zone.

**Mots clés** : Cartographie lithostructurale, traitement d'image, Landsat 7 ETM+, Belafike.

**ABSTRACT**

Lithology and geological structures knowledge is needful in mining research.

The purpose of this work is to highlight major formations of Belafike region and its lineaments using Landsat 7 ETM+ images. We determined the limits of major formations using several processing like color composite, principal components analysis and band ratio. Then, we extracted lineaments using Sobel and directional filters.

A lithostructural sketch map was thus obtained. Several directions of lineaments were mapped but the most important in the region is SSE-NNW direction, controlled by Bongolava-Ranotsara shear zone.

Geological mapping carried out using remote sensing corresponds with existing previous work and reality in field. It offers many advantages such as time saving, data accuracy and the opportunity to work on a larger area.

**Keywords**: Lithostructural mapping, image processing, Landsat 7 ETM+, Belafike.

**Encadreur:**

Dr RAKOTO Heritiana

Enseignant chercheur à l'Institut et Observatoire  
de Géophysique d'Antananarivo

**Impétrant :**

RAKOTOARISON Hobiniaina Anthonio

Mobile : 032 78 792 59

Courriel : a.rakotoarison@gmail.com