II.3. CONTEXTE MORPHOLOGIQUE AUTOUR DE LA ZONE D'ETUDE

Le gisement de grès bitumineux de Bemolanga se trouve à l'extréme Nord du bassin sédimentaire de Morondava.

Notre zone d'étude est située dans le bassin versant du fleuve Manambao où elle est entourée par :

- Les massifs annulaires magmatiques de Berevo et Fonjay qui se trouvent au Nord et à l'Ouest,
- o Le plateau de Bongolava à l'Est,
- o La partie septentrionale du graben (dépression permotriasique) de Morafenobe au Sud,
- o Le plateau cristallin d'Andolobe au Sud-Est
- Le massif migmatitique et gneissique de Bekodoka au Nord.

II.3.1. MASSIF DE FONJAY

Le massif de Fonjay, avec une altitude de 756 mètres (Annexe XII), est un plateau gabbroïque qui se prolonge au Sud-Est par des sills et dykes de microgranite : Tsimitaratra (618 mètres) et son escarpement Sud, le Besongomby (538 mètres) plus étroit et escarpé. Dans l'ensemble, ce plateau de 13 kilomètres de diamètre est dissymétrique, bien fermé au Sud, fortement ébréché au Nord, avec une dépression centrale et un pointement granitique décamétrique.

II.3.2. LE PLATEAU DE BONGOLAVA

Située sur la partie Ouest de Madagascar, la chaîne du Bongolava s'étire sur plus de 200 kilomètres et forme un véritable rempart naturel entre les Hautes Terres et les régions de l'Ouest. Le relief y est constitué par une succession de crêtes et de talwegs, formant un ensemble de collines à fortes pentes. La chaîne de Bongolava présente une topographie escarpée. L'altitude y est élevée dépassant souvent les 900 mètres. Par contre, la partie Ouest de la zone s'inscrit dans un ensemble de plaines et de plateaux dont l'altitude oscille entre 200 et 400 mètres.

II.3.3. LA DEPRESSION PERMO-TRIASIQUE et LE PLATEAU CRISTALLIN D'ANDOLOBE

La dépression permo-triasique (couloir Karroo) sépare le plateau de Bemaraha des Hautes Terres centrales (Annexe XII). De 400 kilomètres de long, elle peut être subdivisée en trois sous-bassins :

- Le bassin de la basse Sakeny, au Sud,
- Le bassin du Manambolo, au Centre,
- Le bassin du haut Manambao, au Nord

Le bassin du haut Manambao constitue la partie la plus élevée (300 mètres) et la plus large (50 kilomètres) de la dépression. Le relief y est accidenté avec des petits ressauts au pied du Bongolava.

Dans la terminaison septentrionale du bassin de Morondava, le substratum précambrien affleure au Sud de la rivière Manambao à la hauteur des plateaux d'Andolobe et d'Ambaravaranala où il est représenté, pour l'essentiel par des faciès de granite et granitoïdes et de roches métamorphiques archéennes (gneiss, amphibolites, cipolins) du Groupe d'Amborompotsy (Besairie, 1964).

II.3.4. LE MASSIF MIGMATITIQUE ET GNEISSIQUE DE BEKODOKA

Le dôme de Bekodoka émerge du sédimentaire, au Nord de la zone d'étude. Il s'étire sur près de 90 kilomètres pour une largeur moyenne d'une vingtaine de kilomètres. Le dôme possède une ossature de granites migmatitiques. L'unité est relativement plane, couverte par les sables roux, et dans laquelle émergent quelques reliefs résiduels en roches dures.

Chapitre III : MATERIELS ET METHODES

III.1. METHODOLOGIE

La méthode d'approche utilisée consiste à collecter les données bibliographiques relatives aux thèmes de ce mémoire ; viennent ensuite leurs traitements (confection des lames minces, traitement des images radars) ; et enfin l'interprétation des résultats obtenus.

L'organigramme ci-dessous représente les étapes de notre étude :



Figure 12 : Organigramme des études

III.2 ACQUISITION DES DONNEES

Dans ce travail, nous avons appliqué 2 méthodes différentes qui sont : l'étude minéralogique et l'analyse des caractères structuraux.

La première méthode nécessite l'emploi et l'observation de plusieurs lames minces en vue d'une analyse plus détaillée en relation avec la minéralogie telle que les propriétés des minéraux, leurs relations spatiales et le processus qui les ont menés à leur état présent ; tandis que la deuxième méthode utilise des images satellites pour les analyses des caractères structuraux par extraction des linéaments.

III.2.1. ECHANTILLONNAGE SUR TERRAIN

Ayant prélevé des échantillons de roches dans divers endroits de notre zone d'étude (Tableau 2), une carte de leur localisation géographique a été établie à l'aide du logiciel ArcGIS:



Figure 13 : Les blocs pétroliers de la zone d'étude et représentation des points d'échantillonnage (Source : BD OMNIS 2010)

Nous avons reporté les points d'échantillonnage sur les blocs pétroliers 3102 de Bemolanga, 3101 de Tambohorano, 3104 de Tsimiroro (Figure 13) dont la précision de la géoréférence a permis une meilleure localisation de nos échantillons ainsi qu'une bonne délimitation de la zone d'étude.

Numéro échantillon	Karroo	X	Y			
В3769Н	Sakamena	227750	942450			
В3749Н	Sakamena	227400	946450			
B3747H	Sakamena	227300	946300			
B3788H	Sakamena	206650	939200			
B3765H	Sakamena	227300	943350			
B3748H	Sakamena	227400	946450			
B3641H	Isalo I	283000	937150			
B3653H	Isalo I	271950	912700			
B3614H	Isalo I	257700	896650			
B3649H	Isalo I	283400	919000			
B3606H	Isalo I	262750	896100			
B3780H	Isalo II	231050	923000			
B3707H	Isalo IIa	204900	910900			
B3705H	Isalo IIa	206500	911200			
B3706H	Isalo IIa	205150	911000			
B3704H	Isalo IIa	207000	911800			
B3708H	Isalo IIa	204900	910900			
B3719H	Isalo IIc	203200	909800			

Tableau 2 : Coordonnées de tous les échantillons en Laborde-Madagascar

A plus grande échelle, nous avons utilisé la carte géologique établie par le Service Géologique de Madagascar (Annexe X), et surchargé par RASOAMANANA A. pour localiser de façon plus précise nos échantillons cités dans le tableau 3.

Numero échantillon	Karroo	Formations	X	Y
В3769Н	Sakamena	Grès psammitique, schistes	227750	942450
B3788H			206650	939200
B3765H			227300	943350
B3707H	Isalo IIa	Grès et argilites à Ceratodus	204900	910900
B3705H			206500	911200
B3706H			205150	911000
B3704H			207000	911800
B3780H	Isalo IIa	Grès et argilites à Ceratodus	231050	923000
В3719Н	Isalo IIc en Isalo IIb	Grès blancs et argilites	203200	909800

Tableau 3 : Coordonnées des échantillons présents sur la carte géologique

La dénomination des trois derniers échantillons du tableau 3 a été rectifiée car en réalité, les échantillons B3719H, B3780H appartiennent à l'Isalo IIa au lieu de l'Isalo IIc.

III.2.2. DONNEES UTILISEES

Pour notre étude, nous avons utilisé :

- Une carte topographique à l'échelle 1/500.000 (BD FTM)
- Une carte géologique d'Antranogoaika et de Morafenobe à l'échelle 1/100.000 du service géologique
- Une carte du MNT (Modèle Numérique de Terrain) des données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)
- Une image raster LANDSAT 5 TM Ces deux dernières données sont disponibles sur le site du GLCF (Global Land Cover Facility)

Le traitement numérique des images a été réalisé à l'aide du logiciel de SIG : ArcGIS et ENVI.

III.3. TRAITEMENT DES DONNEES III.3.1. IMAGES SATELLITES ET CARTES

A. <u>Image Raster</u>

Les données utilisées proviennent du satellite Landsat 5 TM dont la diversité des canaux fournit une multitude d'informations à manipuler (7 bandes spectrales). La résolution spatiale est de 30 m pour les bandes réfléchissantes :

- Bande 01 : 0,45 à 0,52 mµ
- Bande 02 : 0,52 à 0,60 mµ
- Bande 03 : 0,63 à 0,69 mµ
- Bande 04 : 0,76 à 0,90 mµ
- Bande 05 : 1,55 à 1,75 mµ
- Bande 06 : 10,4 à 12,5 mµ
- Bande 07 : 2,08 à 2,35 mµ

Nous pourrions voir les applications de ces bandes dans l'Annexe IV.

Ces images satellites ont été choisies en raison de leurs caractéristiques spectrales et spatiales permettant une bonne identification des structures dans une carte à petite échelle. De plus, les données Landsat présentent l'avantage de bien faire ressortir les linéaments à cause de la basse valeur de l'angle solaire, de la suppression des détails spatiaux gênants et la couverture régionale.

Le traitement de l'image satellite a été traité en deux étapes :

✤ La première étape du traitement est la sélection des données d'entrées initiales pour l'extraction des linéaments. Un traitement d'image numérique pour l'extraction des caractéristiques linéaires impliquant le contraste, l'étirement, l'amélioration de l'image et l'analyse des composantes principales ont été effectuées sur les données satellitaires en utilisant le logiciel ENVI 4.5.

Nous avons effectué 2 compositions de couleur illustré dans le tableau 4 ainsi que sur la photo ci-dessous :

Couleur	Rouge	Vert	Bleu		
Vraie couleur	Bande 3	Bande 2	Bande 1		
Fausse couleur	Bande 4	Bande 5	Bande 3		

Tableau 4 : Composition colorée



Figure 14 : Image en composition colorée 3-2-1 (à gauche) et 4-5-3 (à droite) sur ArcGIS (Source : USGS 2016)

Les bandes 3, 4 et 5 ont été choisies pour former le composé coloré 4-5-3 (RVB) permettant une étude plus aisée des linéaments car elles mettent bien en évidence les ombrages, qui définissent la topographie, et le réseau de drainage souvent contrôlé par les structures géologiques.

✤ La deuxième étape du traitement est le filtrage directionnel des images

Un algorithme de filtrage de convolution comportant des gradients directionnels dits filtre de Sobel a été utilisé pour identifier les linéaments, parce qu'ils nous ont permis de mieux les discriminer et les rehausser, afin de cartographier l'essentiel des linéaments de la zone d'étude. L'image utilisée pour le filtrage est celle de la bande 4 qui se trouve dans la zone du proche infrarouge permettant ainsi de voir les détails structuraux importants.

Dans le cadre de notre étude, les dimensions du terrain étant de 65 km x 47 km, nous avons privilégié une fenêtre de convolution de 5 x 5, ce qui permet de détecter les linéaments supérieurs à 75 m.

Compte tenu de la portée angulaire de $\pm 45^{\circ}$ des filtres directionnels autour de la direction principale de rehaussement, quatre images de dérivée ont été générées à partir de quatre filtres

directionnels de Sobel : NO – SE ; E – O ; NE – SO ; N – S (Annexe VI à IX). Ceci permet de détecter les linéaments dans toutes les directions possibles. La structure des filtres de Sobel utilisés est donnée dans le tableau ...

Nord Ouest - Sud Est			Est - Ouest						Nord Est - Sud Ouest				Nord - Sud						
3	2	2	1	0	1	1	0	-1	-1	0	-1	-2	-2	-3	-1	-2	-3	-2	-1
2	4	3	0	-1	2	3	0	-3	-2	1	0	-3	-4	-2	-1	-3	-4	-3	-2
2	3	0	-3	-2	3	4	0	-4	-3	2	3	0	-3	-2	0	0	0	0	0
1	0	-3	-4	-2	2	3	0	-3	-2	2	4	3	0	-1	1	3	4	3	2
0	-1	-2	-2	-3	1	1	0	-1	-1	3	2	2	1	0	1	2	3	2	1

Tableau 5 : Filtres de Sobel 5 x 5 dans quatre directions principales

B. Image Radar

Les données radar mises à notre disposition sont des Modèles Numériques de Terrains (MNT) de type SRTM 3 (Shutte Radar Topographic Mission) avec une résolution de 30 secondes d'arc. Ce sont des images qui représentent explicitement les éléments physiques tels que le réseau hydrographique, les ruptures de pentes, les accidents structuraux et leurs rejets apparents. Dans le cadre de ce travail, l'image est filtrée et rehaussée (photo 1) avec un azimut du soleil de 315, une altitude de 45 avec un facteur d'élévation (Z) de 1 : elle est aussi traitée dans « ArcGIS en mode raster surface hillshade » ; ainsi les structures sont mieux visibles en fonction de l'orientation de l'azimut du soleil pour optimiser le nombre des linéaments.

Cette technique permet de ressortir toutes les structures du sol qui correspondent aux linéaments.

Au niveau du relevé des linéaments structuraux, notre méthode consiste en une extraction manuelle des linéaments par photo-interprétation.





C. <u>Les cartes thématiques</u>

Les cartes que nous allons utiliser sont la carte géologique (Annexe X) et la carte topographique (Annexe XI) munie des réseaux hydrographiques. Ces données serviront de support pour valider la carte des fractures du secteur exploré.

Toutes les images et les cartes ont été géoréférencées dans le système de coordonnées géographique : GCS _WGS_ 1984. Ensuite, l'intégration de l'ensemble de données spatiales dans un SIG est une opération d'intégration de la géoinformation, qui permet une bonne validation des linéaments.

III.3.2. CONFECTION DE LAME MINCE

La plupart des minéraux en grains qui constituent les roches ne se laissent pas traverser par les rayons lumineux. Pour les observer au microscope, il est nécessaire de réaliser une préparation de très faible épaisseur appelée « lame mince » dont la fabrication passe par cinq étapes principales : confection d'un talon de roche par sciage, surfaçage et rectification d'une des faces du talon, collage du talon sur la lame porte-objet, arasage et façonnage final par rodage. (Annexe IV)

III.3.3. OBSERVATION ET ETUDE DES MINERAUX SOUS MICROSCOPE OPTIQUE

A. Observation en lumière polarisée non analysée (LPNA)

Cette observation, encore appelée « lumière naturelle », permet de repérer la forme, le relief, les clivages et la couleur naturelle de certains minéraux. En effet les minéraux sombres à l'œil nu conservent en lame mince un reste de couleur et, pour certains (biotite, glaucophane...), cette couleur change lors de la rotation de la platine en raison d'une absorption différente de la lumière polarisée selon l'orientation ; c'est le phénomène de pléochroïsme.

1. Forme

- Xénomorphes : présentent un contour tout à fait quelconque
- Automorphes : montrent des formes géométriques reconnaissables (arrondies, anguleux...)

2. Pléochroisme

La coloration varie suivant l'orientation de la lame. Cette variation de couleur correspond à une variation différentielle de l'absorption suivant l'orientation du minéral.

- Direct
- Inverse

3. <u>Plan de clivage</u>

Ce sont des plans de division orientés suivant des directions parallèles.

- Uni direction de clivage
- Deux directions de clivage

4. <u>Altération</u>

Transformations à l'intérieur d'un minéral (apparition d'un nouveau minéral). Un minéral non altéré apparaît limpide alors que dans un minéral altéré on observe des taches.

5. <u>Les cassures</u>

Ce sont des fissures irrégulières non rectilignes

6. <u>Relief</u> (réfringence)

- Si le minéral est coloré, le relief est moyen
- Pour un minéral incolore => le relief est faible
- Si le minéral est incolore et limpide => le relief est fort

B. Observation en Lumière Polarisée Analysée (LPA)

L'observation en lumière polarisée analysée est conduite lorsque l'analyseur est en place. Les minéraux présentent alors des teintes de polarisation permettant leur identification. Ces teintes résultent de la propagation des vibrations lumineuses lors de la traversée d'un cristal. Celui-ci constitue généralement un milieu anisotrope, chaque section présentant un indice de réfraction minimal n_p et un indice maximal n_g orthogonal au précédent. Lorsque la lumière polarisée, qui vibre donc dans un seul plan, pénètre dans le cristal, elle donne naissance à deux vibrations de même amplitude mais qui se propagent à des vitesses différentes selon les deux indices de réfraction. Les deux vibrations ressortent déphasées ; elles traversent l'analyseur ce qui conduit à la disparition de certaines longueurs d'onde. Pour une épaisseur de lame donnée, cette teinte est fonction de la différence ($n_g - n_p$) appelée « biréfringence de la section ». Elle dépend de l'orientation de la plage traversée par rapport au système cristallin du minéral. Pour une plage donnée, la biréfringence varie avec la rotation de la platine, présentant quatre maxima d'intensité ainsi que quatre positions d'extinction.

1. <u>Biréfringence</u>

C'est la propriété d'un corps réfractant un rayon vibratoire incident selon deux directions distinctes

2. <u>Macles</u>

Elles résultent de l'association de deux ou plusieurs cristaux de même espèce minérale, souvent accolés et orientés selon des lois cristallographiques strictes.

La macle polysynthétique constitue une association de cristaux (plagioclase, cordiérite, chloritoïde)

La macle simple est une association de deux cristaux accolés ou interpénétrés (orthose, amphibole, pyroxène).

La macle croisée constitue deux familles de macles polysynthétiques croisées (microcline).

3. Angle d'extinction

L'angle d'extinction est l'angle formé par une direction cristallographique et l'un des indices, soit n_g , soit n_p . Les directions cristallographiques utilisées sont :

- La trace d'un clivage très facile (ex : micas)
- L'intersection de deux clivages équivalents correspondant à une direction dans le réseau cristallin (ex : clivages des amphiboles et des pyroxènes donnant la direction du réseau cristallin)
- L'allongement des prismes qui correspond à la direction d'allongement du réseau cristallin
- La trace d'un plan de macle

4. <u>Signe d'allongement</u>

Le signe d'allongement d'un minéral est positif lorsque la direction d'extinction parallèle à cet allongement est \mathbf{n}_{g} et négatif si cette direction est \mathbf{n}_{p} . Pour déterminer l'allongement, il suffit de placer en position d'éclairement maximal (à 45° de la position d'extinction) un cristal allongé et/ou présentant un clivage caractéristique. Il faut ensuite introduire la lame d'onde de gypse de $\lambda = 550$ nm de manière à ce que son \mathbf{n}_{g} soit parallèle à l'allongement du cristal. Si les teintes d'interférence du minéral et de la lame d'onde s'additionnent, le rayon lent correspond au \mathbf{n}_{g} . Si une soustraction est observée, le rayon lent est \mathbf{n}_{p} .

5. La signification des plages noires

Certaines plages peuvent apparaître constamment noires, quelle que soit la position de la platine. Si ces plages sont noires en LPNA et en LPA, il s'agit de minéraux opaques. Ceuxci sont le plus fréquemment des oxydes de fer (magnétite) ou de fer-titane (titanomagnétite). Si les plages sont claires en LPNA et constamment noires en LPA, il s'agit de milieux isotropes aux indices de réfraction constants quelles que soient les orientations. La biréfringence est alors nulle et l'analyseur orthogonal au polariseur arrête tout rayon. C'est le cas des minéraux qui cristallisent dans le système cubique, à l'exemple du grenat, ou de matériaux non cristallisés comme le verre.

6. La signification des teintes de polarisation

Dans une lame mince, il est courant d'observer de très nombreux cristaux d'un même minéral. Ceux-ci peuvent avoir des teintes de polarisation très diverses, selon la valeur de la biréfringence des différentes sections. Si on considère un minéral avec les teintes de polarisation maximales pour les sections ayant la plus grande biréfringence, il convient donc de rechercher dans une lame ces sections les plus caractéristiques pour identifier le minéral puis, en utilisant tous les autres caractères (en LPNA et en LPA), étendre l'identification aux autres sections.