



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
D'ANTANANARIVO  
DEPARTEMENT INGENIERIE PETROLIERE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en  
Technologie pétrolière

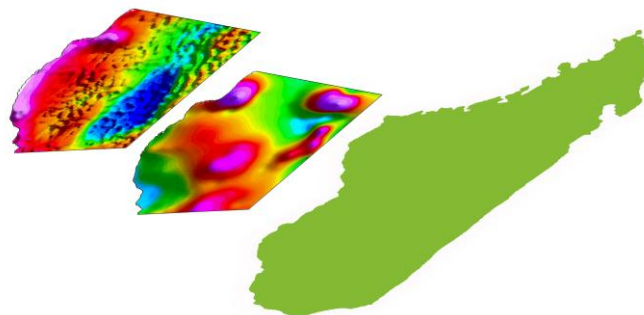
Intitulé

« *ETUDE STRUCTURALE DU BASSIN  
SEDIMENTAIRE DE MORONDAVA*

*(entre Manja et l'Onilahy)*

*PAR TELEDETECTION ET INTERPRETATION*

*GEOPHYSIQUE »*



Présenté par :

RAHARIVONIMBELO Toky Niaina

Promotion 2012



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
D'ANTANANARIVO  
DEPARTEMENT INGENIERIE PETROLIERE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en  
Technologie pétrolière  
Intitulé**

**« *ETUDE STRUCTURALE DU BASSIN  
SEDIMENTAIRE DE MORONDAVA  
(entre Manja et l'Onilahy)***

**PAR TELEDETECTION ET INTERPRETATION GEOPHYSIQUE »**

Présenté et soutenu publiquement le 29 Novembre 2013 par :

**RAHARIVONIMBELO Toky Niaina**

Devant le Jury composé de :

Président : **Mr. RAJEMIARIMIRAHO** Manitriniaina, Maître de conférences

Rapporteurs : **Mme. RAKOTOVAO** Soatsitohaina Ravaonjalitera, Maître de conférences  
**Mme. RAHARIMANANIRINA** Clodette, Maître de conférences

Examineurs : **Mr. ANDRIANAIVO** Lala, Professeur

**Mr. RAZAFINDRAKOTO** Boni Gauthier, Maître de conférences

Promotion 2012

# REMERCIEMENTS

Mes remerciements les plus sincères vont en premier lieu à Dieu Tout Puissant car sans sa Bénédiction, son Amour ce mémoire n'aurait pas pu être réalisé. Il m'a accompagné avec sa Bonté durant mes études.

C'est également avec un sincère plaisir que je veux adresser mes plus vifs remerciements et ma gratitude à toutes les personnes et organisations suivantes sans lesquelles il n'aurait pu être mené à bien :

- Professeur ANDRIANARY Philippe Antoine, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), de m'avoir autorisé à présenter ce mémoire,
- Docteur RAJEMIARIMIRAHO Manitriniaina, Chef de Département Ingénierie Pétrolière, d'avoir accepté de présider le jury, malgré ses multiples responsabilités et occupations,
- Docteur RAKOTOVAO Soatsitohaina Ravaonjalitera, Enseignant Chercheur à l'ESPA, mon encadreur pédagogique, pour m'avoir accompagné pour la réalisation de ce mémoire afin de terminer à bien cet ouvrage. Vos commentaires, vos encouragements et ainsi que votre patience m'ont permis d'accomplir ce travail dans les meilleures conditions,
- Docteur RAHARIMANANIRINA Clodette, Chef de Département à l'OMNIS, mon encadreur professionnel, qui a bien voulu consacrer son précieux temps et a bien voulu m'apporter ses conseils ainsi que ses expériences malgré ses multiples obligations,
- Professeur ANDRIANAIVO Lala, Enseignant Chercheur à l'ESPA et au Docteur RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier, Enseignant Chercheur à l'ESPA, d'avoir accepté de porter leurs jugements sur le présent travail,
- Monsieur ANDRIAMBOAVONJY Mamy Rija, Enseignant Chercheur au Département Ingénierie Pétrolière, pour tous ses précieux conseils et encadrements,
- Tous les Enseignants de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, en particulier ceux du Département Ingénierie Pétrolière, ainsi que le Personnel Administratif et Technique de l'Ecole.

En terminant, je tiens à remercier toute ma famille, pour leurs encouragements constants, pour leur affection, leur soutien moral, financier et spirituel durant mes études ; tous ceux ou celles que j'ai dû consulter et qui ont, de près ou de loin, apporté leur soutien et aide pour la réalisation de ce travail, à tous mes amis et collègues de la promotion.

*Sincères remerciements à tous !*

# **SOMMAIRE**

**REMERCIEMENTS**

**SOMMAIRE**

**LISTE DES ABREVIATIONS**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**INTRODUCTION**

## **PARTIE I : NOTION SUR LA GEOLOGIE PETROLIERE ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

- I. HISTORIQUE DE L'INDUSTRIE PETROLIERE
- II. NATURE DU PETROLE
- III. ORIGINE DU PETROLE
- IV. PROCESSUS DE TRANSFORMATION DE LA MATIERE ORGANIQUE
- V. LE SYSTEME PETROLIER
- VI. CADRE GEOGRAPHIQUE
- VII. CADRE GEOLOGIQUE

## **PARTIE II : BASES METHODOLOGIQUES**

- I. LES IMAGES NUMERIQUES
- II. LES METHODES GEOPHYSIQUES
- III. PRESENTATION ET ACQUISITION DES DONNEES

## **PARTIE III : TRAITEMENTS, RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

- I. LES LOGICIELS UTILISES

- II. TRAITEMENTS
- III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS
- IV. MODELISATION 2D
- V. INTERETS PETROLIERS

**CONCLUSION**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**ANNEXES**

**TABLE DES MATIERES**

**RESUME**

# LISTE DES ABBREVIATIONS

AB	: Anomalie de Bouguer
ASCII	: American Standard Code for Information Interchange
BD	: Base de Données
CGS	: Centimètre-Gramme-Seconde
CNES	: Centre national d'Etudes Spatiales
CT	: Correction de Terrain
Cos	: Cosinus
DORIS	: Détermination de l'Orbite et Ratio-Positionnement Intégré par Satellite
E	: Est
EGM08	: Earth Gravity Model 2008
EMAG	: Earth Magnetic Anomaly Grid
ERS	: European Remote-Sensing Satellite
ETM <sup>+</sup>	: Enhanced Thematic Mapper Plus
F A	: Anomalie à l'air libre (anomalie de Faye)
FTM	: Foiben-Taosaritanin'I Madagasikara
GLCF	: Global Land Cover Facility
GRGS	: Cleveland Regional Geodetic Survey
GRID	: Global Resource Information Database
GRS80	: Gravimetric Reference System 1980
Hz	: Hertz
MNT	: Modèle Numérique du Terrain
MSS	: Multispectral Scanner
N	: Nord
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NGA	: National Geospatial-Intelligence Agency
O	: Ouest
Oe	: Oerstred
OGO	: Orbiting Geophysical Observatory
POGO	: Polar Orbiting Geophysical Observatory
S	: Sud
SIGM	: Système d'Information Géologique et Minière
Sin	: Sinus
SPM	: Société des Pétrole de Madagascar
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
TM	: Thematic Mapper
UTM	: Universal Transverse Mercator
WGS84	: World Geodesic System 1984

# LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Période de formation du pétrole.....	8
Figure 2: Formation des huiles et gaz .....	9
Figure 3 : Principales étapes de la formation des hydrocarbures .....	10
Figure 4 : Migration des hydrocarbures .....	11
Figure 5 : La migration primaire, secondaire et la dysmigration .....	13
Figure 6 : Exemple de piège stratigraphique : Piège par discordance .....	15
Figure 7 : Piège anticlinale.....	15
Figure 8 : Piège par faille .....	16
Figure 9: Exemple de piège mixte : Dôme de sel .....	16
Figure 10 : Exemples de pièges à Madagascar .....	17
Figure 11 : Processus du système pétrolier .....	17
Figure 12: Carte de localisation de la zone d'étude .....	19
Figure 13 : Schémas d'ouverture en « pull apart »des bassins Est-africain .....	22
Figure 14: Les bassins de Madagascar et d'Afrique de l'Est : .....	23
Figure 15 : Log stratigraphique synthétique et variations du régime de dépôt des séries sédimentaires du bassin de Morondava.....	26
Figure 16 : Dépôt d'affleurement du Karroo de la zone d'étude .....	27
Figure 17: Dépôt d'affleurement du Post-Karroo de la zone d'étude .....	28
Figure 18: Schéma structural de la zone d'étude .....	30
Figure 19: Différentes étapes de télédétection .....	32
Figure 20 : Représentation de la longueur d'onde d'une fonction sinus.....	33
Figure 21 : Attraction gravitationnelle entre deux masses .....	36
Figure 22 : Principe de mesure de la hauteur de mer par altimétrie satellitaire .....	38
Figure 23 : Principe de la mesure altimétrique .....	40

Figure 24: Principales grandeurs utilisées et illustration du problème .....	41
Figure 25 : Illustration de la correction d'altitude.....	43
Figure 26 : Effet de profondeur.....	44
Figure 27 : Illustration de la Correction de Terrain .....	44
Figure 28 : Illustration de la correction de plateau.....	45
Figure 29 : Illustration du contraste de densité du sous-sol .....	45
Figure 30 : Attraction entre deux pôles magnétiques.....	47
Figure 31 : Gamme des valeurs de Susceptibilités magnétiques .....	49
Figure 32 : Les composantes du champ magnétique terrestre .....	52
Figure 33 : Satellite Allemand CHAMP embarquant un magnétomètre .....	54
Figure 34 : Synthèse additive de la couleur .....	61
Figure 35 : Une scène en composition colorée 321 et 742 sur ENVI4.5 .....	62
Figure 36 : Carte du MNT de la zone d'étude sur ArcGis10 .....	63
Figure 37 : Illustration des étapes de traitements des données gravimétriques.....	64
Figure 38 : Carte montrant les points de levé.....	64
Figure 39 : Carte de l'anomalie de Bouguer .....	66
Figure 40 : Carte de déconvolution d'Euler .....	67
Figure 41 : Carte montrant les points de levé.....	68
Figure 42 : Carte de l'anomalie magnétique de la zone d'étude .....	69
Figure 43 : Carte de déconvolution d'Euler .....	70
Figure 44 : Carte du signal analytique .....	72
Figure 45: Carte de superposition du MNT, de l'image LANDSAT7 ETM <sup>+</sup> composition 321 et les failles observées .....	74
Figure 46 : Carte de superposition du MNT, de l'image LANDSAT7 ETM <sup>+</sup> composition 742 et les failles observées .....	75
Figure 47 : Superposition de la carte d'anomalie de Bouguer et de la carte structurale.....	76



Figure 48 : Localisation des quatre zones sur la carte d'anomalie de Bouguer .....	77
Figure 49 : Graben imaginé dans la fosse du Karroo .....	78
Figure 50 : Illustration de la fosse sédimentaire .....	79
Figure 51: Interprétation de la carte d'anomalie magnétique et du signal analytique .....	81
Figure 52: Superposition de la carte d'anomalie magnétique et de l'anomalie de Bouguer avec la carte structurale .....	82
Figure 53 : Localisation des profils sur la carte d'anomalie magnétique et sur la carte d'anomalie de Bouguer .....	84
Figure 54 : Modélisation obtenue suivant la coupe A A' .....	85
Figure 55: Modélisation obtenue suivant la coupe B B' .....	87
Figure 56 : Modélisation obtenue suivant la coupe C C' .....	89
Figure 57 : Localisation des quatre zones sur la carte d'anomalie de Bouguer .....	91
Figure 58 : Illustration d'un hydrocarbure piégé par une intrusion .....	92

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Densité de quelques roches .....	47
Tableau 2 : Caractéristiques spectrales de Landsat ETM <sup>+</sup> .....	55
Tableau 3 : Fichiers téléchargeables disponibles d'EMAG2 .....	58
Tableau 4 : Exemples de composition colorée .....	61

# ***INTRODUCTION***

En Afrique, les grandes compagnies pétrolières ont longtemps concentré leurs efforts de prospection sur le Nord du continent et sur le golfe de Guinée. L'augmentation des prix des produits pétroliers, l'épuisement annoncé des gisements de ces grandes zones de production et quelques découvertes spectaculaires aiguisent les appétits des majors du secteur pour les côtes de l'Afrique de l'Est. Dans ce contexte, Madagascar apparaît comme une « nouvelle frontière » de la prospection pétrolière. Une quinzaine de compagnies effectuent aujourd'hui des travaux d'exploration sur vingt-quatre concessions dont dix-huit onshores et six offshore.

L'histoire de la recherche pétrolière à Madagascar est tout aussi ancienne que le lancement des premières campagnes d'exploration au début du XXe siècle. Le Syndicat des Etudes et Recherches Pétrolières (SERP) s'installe sur l'île à partir des années 1930, la Société des pétroles de Madagascar dans les années 1950 et enfin Chevron, Agip, Amoco ou d'autres compagnies internationales poursuivent après l'indépendance, en 1960, des activités de recherche sur la côte Ouest de l'île, sans jamais franchir le seuil de la mise en exploitation des réserves identifiées.

Durant ces dix dernières années, l'évolution de nouvelles technologies comme dans le domaine de l'aérospatial permettent de tirer directement des informations supplémentaires à partir des données géophysiques et de télédétection permettant ainsi de réduire de façon significative les risques à l'exploration.

Dans le cadre de cette étude, les données utilisées sont essentiellement celles provenant des mesures faites par des satellites telles que les images satellites, les données gravimétriques et magnétiques satellitaires qui seront au fur et à mesure couplées avec les données géologiques.

Ainsi, il en va que les résultats dégagés suivant les données disponibles reposeront avant tout sur des hypothèses strictement structurales.

Le présent ouvrage s'intitule alors **« ETUDE STRUCTURALE DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE MORONDAVA ENTRE MANJA ET L'ONILAHY PAR TELEDETECTION ET INTERPRETATION GEOPHYSIQUE »**. L'objectif est de localiser les zones probables de formation de gisement d'hydrocarbures.

L'étude sera menée en trois parties :

■ La première partie se consacrera en premier lieu sur la notion sur la géologie pétrolière et présentation de la zone d'étude dans laquelle nous rappellerons les points essentiels sur le pétrole comme son origine et les différentes étapes de sa formation jusqu'à son piégeage qui sera suivie de la présentation de la zone d'étude où nous effectuerons les études géologiques allant de l'évolution tectonique de Madagascar jusqu'à la naissance des bassins sédimentaires ;

■ Dans la deuxième partie, nous entamerons les bases méthodologiques où nous allons développer les méthodes utilisées dans cet ouvrage comme la télédétection et les méthodes géophysiques telles que les méthodes gravimétrique et magnétique satellitaires;

■ La dernière partie s'étalera sur les traitements, les résultats et les interprétations au terme desquelles nous allons avancer les perspectives et intérêts de notre zone pour la recherche pétrolière.

**PARTIE I : NOTION SUR LA  
GEOLOGIE PETROLIERE ET  
PRESENTATION DE LA  
ZONE D'ETUDE**

Dans cette première partie, nous allons faire en premier lieu un rappel sur le pétrole. Nous allons surtout nous tourner vers la géologie pétrolière allant de l'origine jusqu'à la formation d'un gisement pétrolier. Ensuite, nous allons présenter notre zone d'étude tant sur le plan géographique que géologique. Nous allons ainsi passer à la délimitation et à l'étude géologique qui permettront de nous renseigner sur le cadre structural et les différentes formations existantes dans notre zone. L'étude sera basée sur les travaux géologiques déjà entrepris à partir de la consultation des différents ouvrages et publications.

## **I. HISTORIQUE DE L'INDUSTRIE PETROLIERE [32]**

Le pétrole est connu et utilisé depuis la plus haute Antiquité. Il forme des affleurements dans les lieux où il est abondant en sous-sol ; ces affleurements ont été utilisés de nombreuses façons : calfatage des bateaux, ciment pour le pavage des rues, source de chauffage et d'éclairage...

A partir des années 1850, le pétrole fait l'objet d'une exploitation et d'une utilisation industrielle. Il est exploité en 1857 en Roumanie et en 1859 aux Etats-Unis dans l'Etat de Pennsylvanie.

A partir de 1910, il est considéré comme une matière première stratégique, à l'origine de la géopolitique du pétrole. La période 1920-1970 est marquée par une série de grandes découvertes de gisements, particulièrement au Moyen-Orient, qui fait l'objet de toutes convoitises.

En 1970, la production de pétrole des Etats-Unis atteint le maximum.

La période 1973-1973 marque l'histoire du monde avec les premier et deuxième chocs pétroliers. A partir de 1986, le contre-choc pétrolier voit le prix du baril s'effondrer. En 2003, le prix du baril remonte, en dépit d'une production toujours assurée et d'une relative paix mondiale, à cause de la spéculation sur les matières premières en général. Quand cette spéculation s'arrêtera brutalement en 2008, le prix du baril suivra cette évolution spectaculaire.

Les années 2000 voient plusieurs nouveaux géants du secteur public comme Petrobras et Petrochina réaliser les plus grandes introductions en Bourse de l'histoire du pétrole, avec des valorisations symboles de la confiance des investisseurs dans leur croissance.

Pour le cas de Madagascar, l'histoire géologique montre belle et bien l'existence de pétrole et de gaz sur son sol. L'implantation de différentes compagnies pétrolières à Madagascar témoigne de l'intérêt dans ce secteur qui commence à prendre de l'envol.

## **II. NATURE DU PETROLE [3] [9] [12] [13]**

### **II.1 Définition [12]**

Le mot « pétrole brut » (du latin petroleum, huile de pierre) désigne une huile minérale. Le pétrole est un mélange naturel et variable d'hydrocarbures et de composés hétéroatomiques dont la majeure partie est de poids moléculaire élevé. Il se forme au sein de certaines assises sédimentaires par transformation de la matière organique qui y est incorporée lors du dépôt.

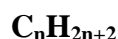
### **II.2 Composition chimique**

#### **II.2.1 Hydrocarbures naturels**

Ils sont essentiellement formés par des chaînes d'atomes de carbone et d'hydrogène. Ces principaux éléments mais également l'oxygène O et l'azote N, présents dans le pétrole sont aussi ceux des organismes biologiques. Une grande partie de O a été transformée par des bactéries en CO<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>O, progressivement expulsés lors de l'enfouissement. De même pour une partie de N donnant du N<sub>2</sub> et des oxydes d'azote. Le soufre S proviendrait de sels de sulfate dissous dans la mer.

Il existe trois grandes familles d'hydrocarbures naturels :

#### **a. Les hydrocarbures acycliques saturés ou paraffiniques ou alcanes :**

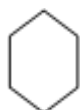


Un exemple est le Propane C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> : CH<sub>3</sub> – CH<sub>2</sub> – CH<sub>3</sub>

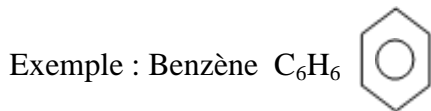
Pour n compris entre 1 et 4, nous avons du gaz et pour n compris entre 5 et 12, du liquide, et il se présente sous forme pâteux ou solide pour n compris entre 16 et 70.

#### **b. Les hydrocarbures cycliques saturés ou naphténiques : C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>**

Exemple : Cyclohexane C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>



**c. Les hydrocarbures cycliques non saturés ou aromatiques :  $C_nH_{2n-6}$**



**II.2.2 Autres constituants**

D'autres éléments peuvent également être présents en petites quantités avec les hydrocarbures. Ce sont essentiellement :

- l'azote sous forme dissout ou à l'état de composés organiques ;
- le phosphore,
- quelques substances minérales comme Ca, Mg, Si, Fe, Ni, V ;
- le soufre sous forme d'hydrogène sulfuré.

**II.3 Propriétés physiques et chimiques**

**II.3.1. Caractères physiques**

Les hydrocarbures peuvent se rencontrer sous différents états :

■ Gazeux : Ce sont les gaz naturels difficilement liquéfiables ou non liquéfiables ou gaz secs comme le méthane et les gaz humides facilement liquéfiables comme le propane.

■ Liquide : Ce sont les huiles brutes qui sont fluorescentes par réflexion dont leur densité peut varier entre 0,83 et 0,96. Elles distillent généralement en dessous de 200°C

■ Pâteux ou malthes : Ce sont les huiles qui ont perdu une partie de leurs fractions légères et commençant à s'oxyder. Leur teneur en huile se situe entre 45 à 65%

■ Solide : Ce sont les bitumes et correspondent soit à des produits d'oxydation d'huiles brutes comme les asphaltes et asphaltites que l'on rencontre soit à l'état libre, soit sous forme d'imprégnation dans des roches poreuses comme le grès, sable, calcaire et dolomie, ou bien des produits non oxydés tels que les paraffines naturelles se présentant sous forme cristallisée assez rare nommée hatchettite, soit microbiologique plus fréquente l'ozocérite.

**II.3.2. Caractères chimiques**

La distillation en fonction de la température donne les résultats suivants :

- 100°C, on a de l'essence de première qualité,
- 110°C de l'essence spéciale,
- 130°C de l'essence de deuxième qualité,
- 260°C du kérosène ou météor,
- 270°C du pétrole lampant,



- 300°C des fractions huileuses

Les produits obtenus au-delà de 300 °C sont rangés parmi les mazouts.

### **II.3.3. Les pyrobitumes**

Les pyrobitumes sont des composés organiques de nature chimique qui se présentent au microscope sous forme d'inclusions solides de teinte jaune intimement associées à la trame minérale des roches qui les contiennent. Ils sont insolubles dans le chloroforme et le tétrachlorure de carbone. Par distillation, ils fournissent des huiles brutes de pétrole non saturées et l'on note la présence notable de phénols.

Les roches pyrobitumineuses sont des sédiments dans lesquels la matière organique a évolué dans un sens différent de celui des huiles de pétrole soit par suite de la nature propre de cette matière organique, soit par suite de conditions particulières de sédimentation et de milieu.

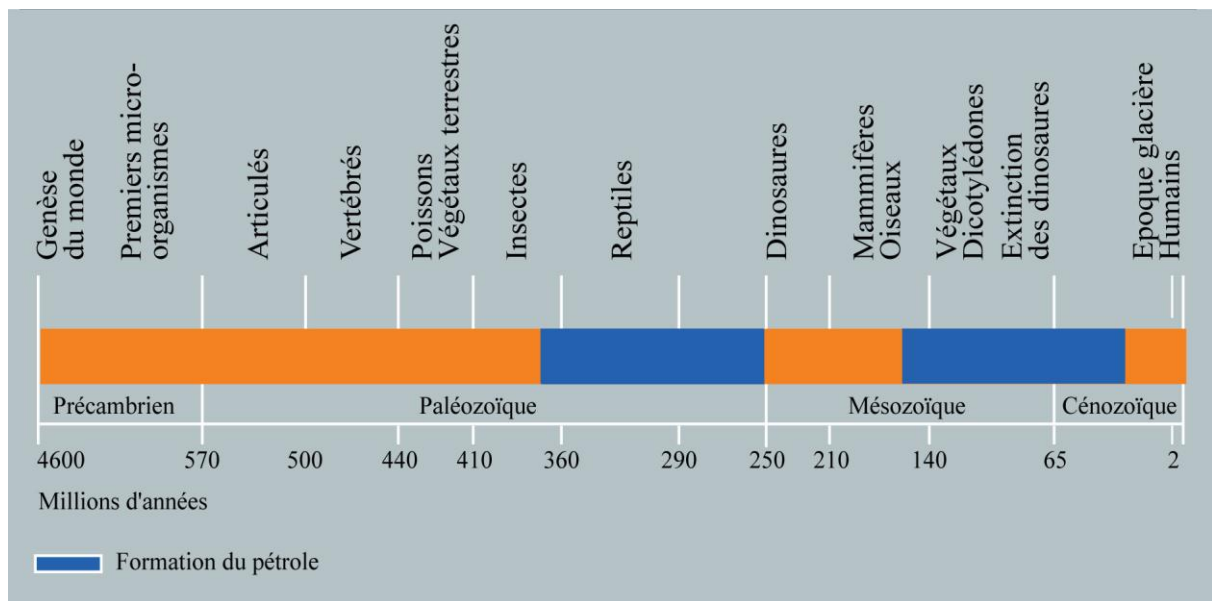
## **III. ORIGINE DU PETROLE [9] [12] [13]**

Il y a plusieurs millions d'années, les restes de nombreux organismes marins se sont déposés au fond des océans, y se sont accumulés et se sont mélangés à la boue et au limon pour former des couches de sédiments riches en matière organique : « le kérogène ». Cette matière organique est essentiellement constituée par le plancton ajouté à des végétaux terrestres apportés par les cours d'eau, surtout dans les zones de delta, et également des micro-organismes.

Le plancton est un être vivant unicellulaire microscopique d'origine animale (zooplancton) et végétale (phytoplancton) des milieux marins ou lacustres.

Ces organismes planctoniques renferment dans leur protoplasme, des graisses ou lipides dont la composition est proche de celle des hydrocarbures. Chez les diatomées par exemple, le pourcentage en poids sec de ces lipides atteint 5 à 10%.

Le kérogène est le résidu insoluble provenant de la décomposition des matières organiques des sédiments marins ou lacustres par des bactéries. Il est disséminé dans une masse minérale appelée la "roche mère" sous forme de petits filets.



Source : American Petroleum Institute

**Figure 1 : Période de formation du pétrole**

Sous l'effet de la tectonique des plaques, les sédiments s'enfoncent très lentement dans le sol. Ces couches de sédiments se sont ensuite transformées en roche sous l'effet de la compression due à la forte profondeur. L'élévation de la température provoquée par l'augmentation de l'épaisseur des couches de sédiments et des apports de chaleur géothermique ont entraîné une décomposition des matières organiques en substances plus simples. Ce phénomène nommé « pyrolyse » conduit à la formation des hydrocarbures.

#### **IV. PROCESSUS DE TRANSFORMATION DE LA MATIERE ORGANIQUE [3] [8] [9] [12]**

L'enfouissement continu de roches sédimentaires conduit à une série de transformation durant laquelle les débris organiques d'origine surtout lacustre et marine contenus dans ces roches vont progressivement perdre leur constituants oxygénés puis s'appauvrir en hydrogène et enfin vont former les hydrocarbures.

Cette transformation est due à l'élévation de température dont le gradient thermique est en moyenne de 3°C pour 100m.

Le processus de production des hydrocarbures se déroule en trois phases :

- La diagenèse
- La catagenèse
- La métagenèse

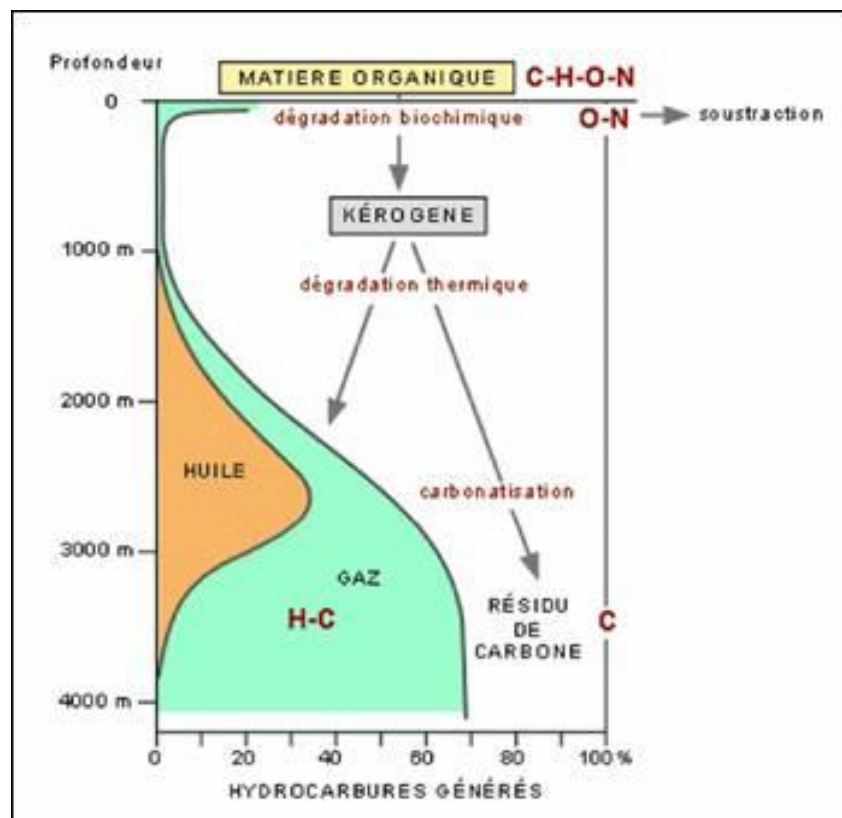
#### **IV.1 La diagenèse**

Au cours de cette première phase, on remarque la formation de l'eau et du gaz carbonique. Les bactéries méthanogènes y ont été dissoutes afin de donner du méthane biogénique. Ce phénomène se produit dans les premiers mètres de profondeur d'enfouissement de la matière organique c'est-à-dire dans les 1000m.

#### **IV.2 La catagenèse**

On assiste en premier à la formation d'huiles dans un intervalle de température et de profondeur. Cet intervalle est nommé « fenêtre à huile » situé à une profondeur inférieure à 3 000m et à une température comprise entre 60 et 120°C.

Puis, viennent les hydrocarbures plus légers qui sont essentiellement composés de gaz dits « gaz humides ».



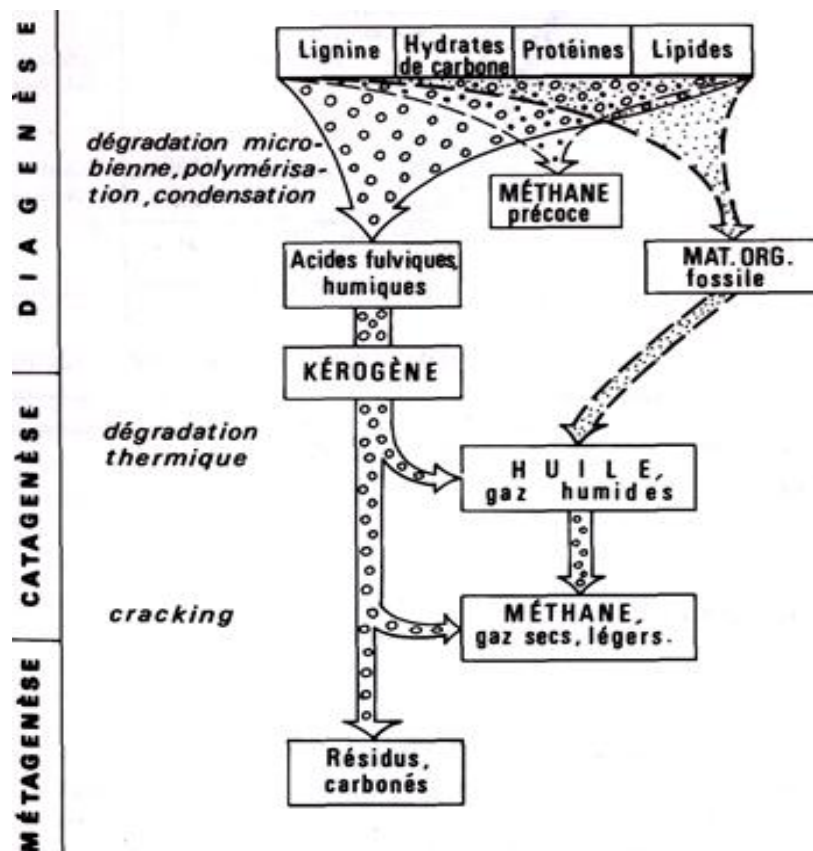
(Source : Institut Français du Pétrole)

**Figure 2: Formation des huiles et gaz**

#### **IV.3 La métagenèse**

Ce dernier phénomène se passe à une plus grande profondeur et à une température plus élevée.

Les grosses molécules d'hydrocarbures précédemment formées vont subir un craquage, en augmentant ainsi la teneur en produits plus légers. Il se forme surtout du méthane qui est du gaz sec.



(Source : Tissot et Welte, 1984)

Figure 3 : Principales étapes de la formation des hydrocarbures

## V. LE SYSTEME PETROLIER [8] [12] [13]

La première étape fondamentale est la formation de la roche mère. Cette boue sédimentaire enfouie à plusieurs kilomètres de profondeur se transforme après plusieurs étapes en pétrole, eau et gaz. Sous la pression des gaz, le pétrole est expulsé de la roche mère et constitue la migration, jusqu'à ce qu'il rencontre une roche réservoir, puis une roche couverture imperméable, où il sera piégé et préservé. Cette succession d'étapes ordonnées compose un « système pétrolier », chacune étant indispensable les unes que les autres pour aboutir à un gisement exploitable.

### V.1 Présence de roches mères

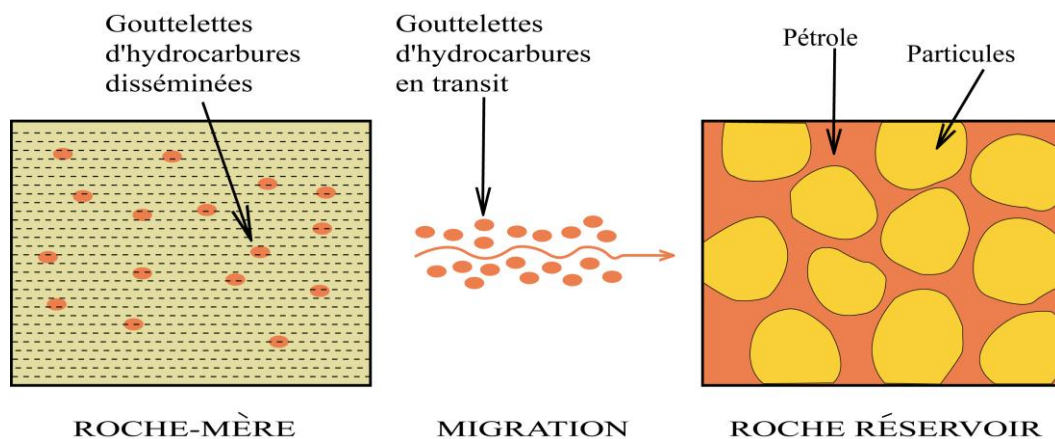
Ce sont des roches riches en matière organique dans lesquelles cette dernière a pu se conserver et se transformer sans être détruite par des actions oxydantes. La roche-mère se trouve toujours dans un bassin sédimentaire. Elle a, en général, alimenté des roches

sédimentaires plus poreuses. Quelques roches ignées ou métamorphiques suffisamment poreuses et proches ont pu recueillir du pétrole.

Comme exemple, les roches-mères associées aux séries argilo-sableuses (argiles, marnes schisteuses, sable ou le grès) sont les argiles et marnes noires à grain fin, tandis que celles des séries carbonatées (calcaires fins, dolomies de teint sombre) sont les assises argileuses ou marneuses.

Simultanément, sous l'effet de la pression, les hydrocarbures formés sont progressivement expulsés de la roche mère malgré leur forte imperméabilité, pour migrer dans des roches à plus forte porosité et perméabilité : c'est la **migration**.

En général, ce mouvement s'effectue vers un milieu poreux et perméable qui en raison même de ces caractéristiques ne constituait pas une roche mère initiale, la matière organique sédimentaire ayant été détruite ou oxydée précocement.



**Figure 4 : Migration des hydrocarbures**

On distingue trois phases de migration :

#### **V.1.1 La migration primaire**

Elle désigne l'expulsion de l'huile et du gaz de la roche mère vers un drain poreux, perméable. La cause majeure de l'expulsion de l'huile en milieu argileux est la compaction.

Avec la perte progressive de la porosité, après l'expulsion massive de l'eau, les hydrocarbures dont la saturation augmente peuvent envahir l'espace poreux puis former un véritable réseau.

La migration primaire s'effectue comme un flot diphasique, eau et hydrocarbures séparément en deux phases distinctes.

### **V.1.2 La migration secondaire**

Cette phase désigne les mécanismes de déplacement des hydrocarbures depuis leur lieu d'expulsion ou roche-mère vers leur lieu d'accumulation dans une roche-réservoir ou magasin qui constitue sous certaines conditions un piège.

L'expulsion à partir de roches à grain fin qui est le cas pour toutes les roches mères vers un réservoir suppose des chemins de migration le long de drains.

Les mécanismes de la migration secondaire se résument comme suit :

Les différents fluides expulsés de la roche tels que l'eau et les constituants pétroliers relativement insolubles plus légers que la roche vont circuler par effet de flottaison en fonction de leur densité en suivant un drain vers la surface.

Les chemins de migration peuvent être variés. Ainsi, les drains peuvent être :

- soit une roche poreuse perméable comme le sable, grès, calcaire grainstone, dont les caractères sont ceux de roches réservoirs,
- soit un système de fractures ouvertes comme les failles et les microfractures,
- soit encore des surfaces de discontinuités ou discordances.

Les distances de migration dépendent de la proximité d'un piège et varient considérablement. Elles peuvent être infimes dans quelques cas rares (cas des schistes bitumineux) ou très modérées, mais on reconnaît aujourd'hui des chemins de migration très longs, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres et dont l'histoire peut être complexe en fonction de l'histoire géologique.

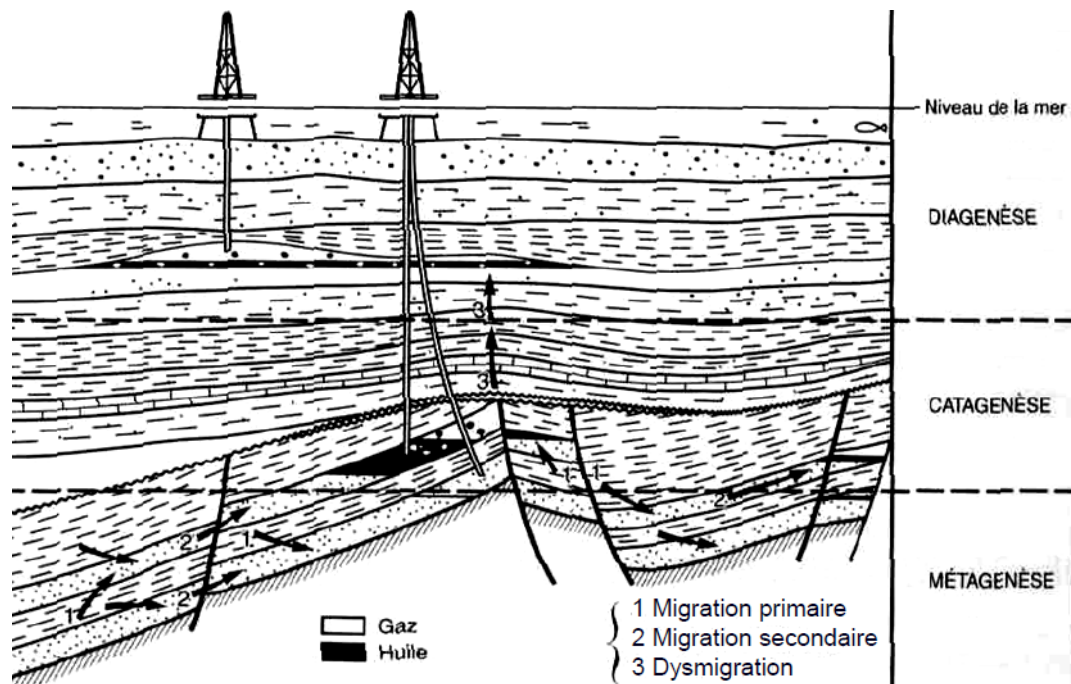
### **V.1.3 La migration tertiaire ou dysmigration**

L'étanchéité d'un piège ou d'un gisement dépend de l'imperméabilité de sa couverture qui dans les cas favorables empêche le mouvement normalement ascendant du pétrole.

Si l'étanchéité est mauvaise il y a dysmigration : c'est par exemple le cas le long de failles ouvertes qui sont perméables ou à travers des couvertures hétérogènes que les barrières de pression capillaire deviennent inférieures aux forces de flottaison.

La migration tertiaire ou dysmigration est donc la « fuite » des hydrocarbures qui, à partir d'un piège où ils se sont accumulés et concentrés, se déplacent vers la surface du sol ou vers un autre piège, souvent appelé gisement de récupération.





Source : American Petroleum Institute

Figure 5 : La migration primaire, secondaire et la dysmigration

## V.2 Présence de roche-réservoir

La formation du pétrole et gaz se passe dans un bassin sédimentaire. Ils naissent puis migrent au sein de roches sédimentaires. Ces roches se sont toutes déposées au final dans l'eau d'un océan, d'une mer, d'une lagune ou d'un lac, sous forme de grains. Ces grains peuvent être très grossiers comme le cas des graviers, plus fins comme le sable ou de taille minuscule, formant des boues. Ils sont en contact les uns avec les autres. Les vides existant entre eux définissent la porosité d'une roche qui se mesure en pourcentage de volume total de la roche.

Les roches réservoirs ou roches magasins, sont donc des roches poreuses et perméables dans lesquelles l'hydrocarbure pourra se loger.

Plus ces deux caractéristiques pétrophysiques seront bonnes, plus le réservoir sera meilleur. Si la roche est fracturée, ses qualités de réservoir sont améliorées.

Les roches réservoirs sont constituées essentiellement par des roches détritiques, formées par l'empilement de petits grains de quartz ou de carbonates, comme les sables et les grès, et par certaines roches carbonatées, calcaires et dolomies. Ces roches correspondent le plus souvent à des milieux de dépôts agités et peu profonds.

Par exemple, pour le cas des séries pétrolifères argilo-sableuses (argiles, marnes schisteuses, sable ou grès), les roches réservoirs associées sont les argiles et le sable et celles des carbonatées (calcaires fins, dolomies de teint sombre) sont le calcaire et la dolomie.

### **V.3 Présence de roche-couverture**

C'est une roche imperméable au-dessus du réservoir qui a pour rôle d'empêcher la fuite de l'hydrocarbure vers la surface. Les roches-couvertures sont à la fois plastiques, imperméables et suffisamment épaisses surtout dans les régions de tectonique violente où il y a risque d'étirement et rupture.

Comme exemple, les roches couvertures associées aux séries argilo-sableuses sont les horizons argileux ou schisteuses, tandis que celles des carbonatées sont les calcaires compacts et horizons d'anhydrite ou de sel.

### **V.4 Présence de pièges**

Un piège, condition indispensable de tout gisement, est une zone où le réservoir, couvert par une couche imperméable, est fermé latéralement par des terrains imperméables ou par une déformation des couches. Il permet l'accumulation d'une quantité d'hydrocarbures exploitable. Un piège rempli d'hydrocarbures peut ne contenir que du pétrole ou du gaz ou les deux à la fois. Pour ce dernier cas, le gaz étant plus léger, se rassemble au sommet du piège.

Il est à remarquer que si seul du pétrole s'y accumule, d'importantes quantités de gaz sont tout de même dissoutes et que les accumulations de gaz seul contiennent toujours une fraction de liquides légers appelé condensat, d'autant plus qu'il reste toujours un peu d'eau résiduelle collée aux grains de la roche réservoir.

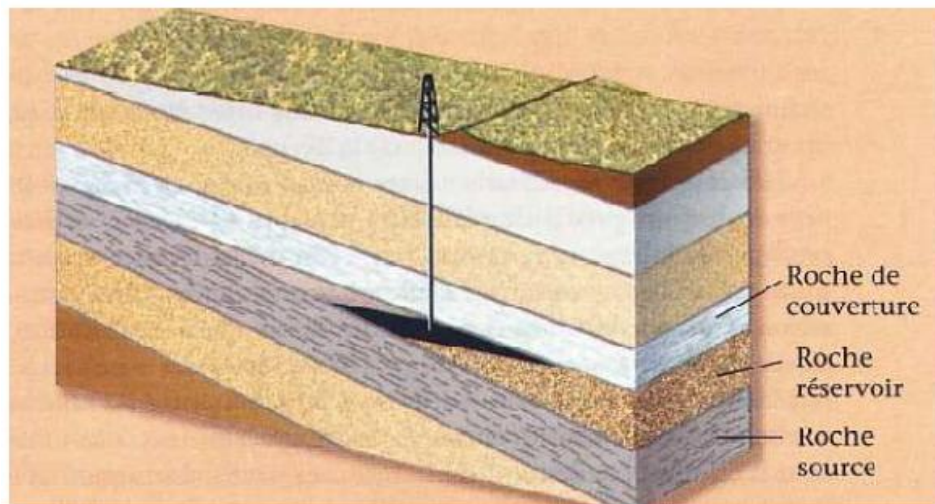
Il existe différents types de pièges classés en trois grandes familles: les pièges stratigraphiques, les pièges structuraux et les pièges mixtes.

#### **V.4.1 Les pièges stratigraphiques :**

La formation de ce type de piège est due aux variations latérales des caractéristiques de la roche réservoir passante. La roche-réservoir devient imperméable et bloque la migration du pétrole. C'est par exemple le cas des pièges récifaux.

Un autre mode de formation de ce type de piège est quand la couche perméable se termine par un biseau. Citons comme exemple de pièges stratigraphiques un piège à discordance, un piège optique et un paléo récif, lentille sableuse et un piège par variation lithologique.





Source : Microsoft Encarta

**Figure 6 : Exemple de piège stratigraphique : Piège par discordance**

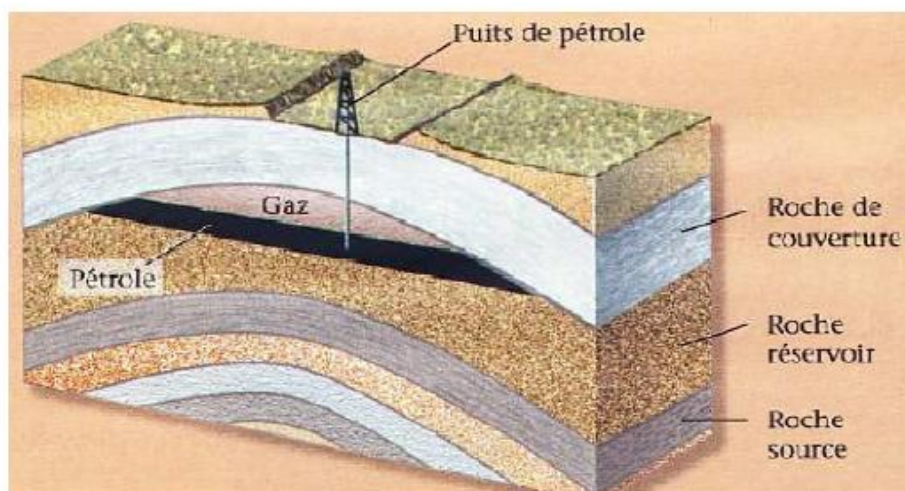
#### **V.4.2 Les pièges structuraux :**

Les pièges structuraux sont formés à la suite d'une déformation des couches sédimentaires réservoirs. Ces déformations sont en général postérieures au dépôt.

Les exemples de pièges structuraux sont :

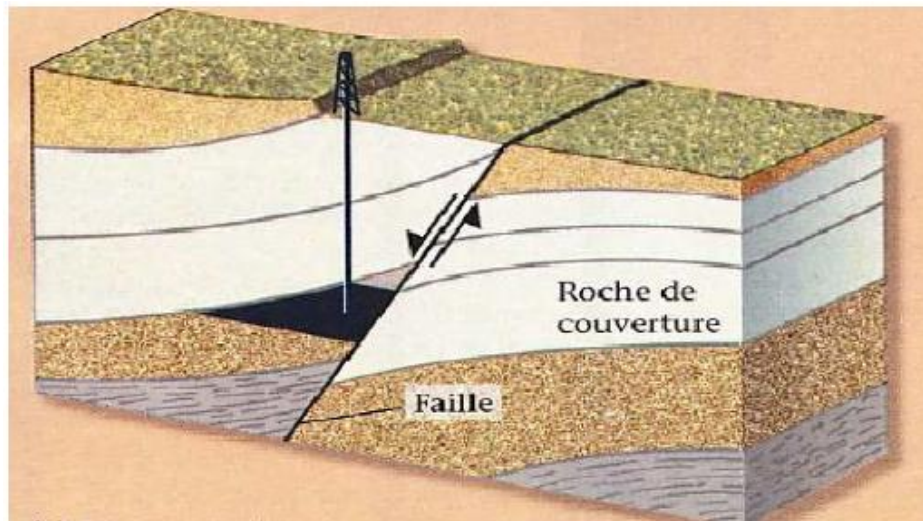
- les pièges anticlinaux qui sont dus à un mouvement tectonique souple
- les pièges par faille : dus à une tectonique cassante.

Ce type de piège a été créé par des failles ou des fractures mettant en contact une couche-réservoir et un terrain imperméable.



Source : Microsoft Encarta

**Figure 7 : Piège anticlinale**



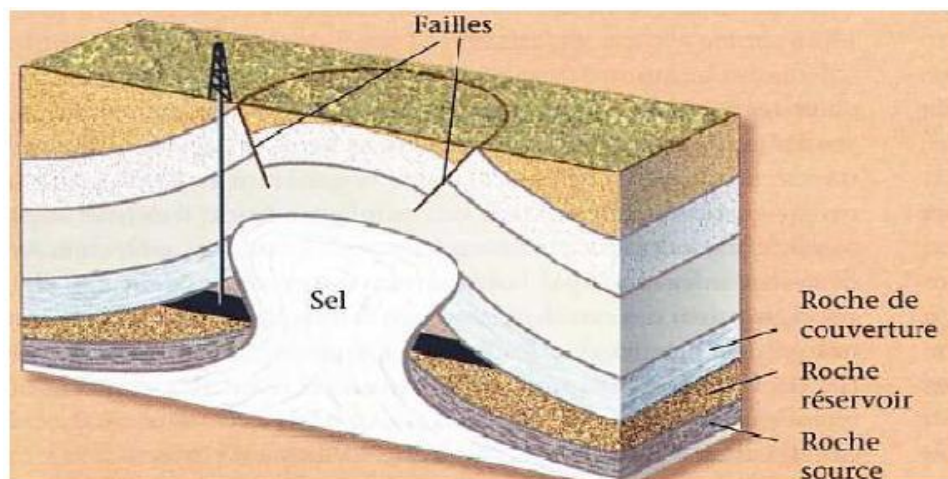
Source : Microsoft Encarta

**Figure 8 : Piège par faille**

#### **V.4.3 Les Pièges mixtes**

Ce sont des pièges qui résultent de la conjonction de facteurs structuraux, lithologiques et stratigraphiques. Un des exemples est celui des pièges liés aux dômes de sel.

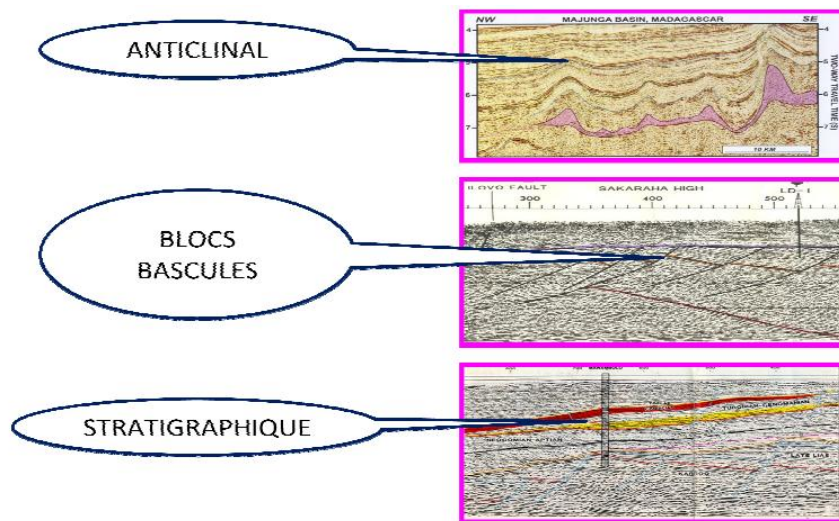
La formation de ce type de piège se passe comme suit : au cours des temps, durant leur phase de maturation ou diagenèse, les roches sédimentaires augmentent en densité, ce qui n'est pas le cas pour les roches salines ou sel gemme qui conservent sa densité. Ainsi, ce déséquilibre permet aux roches salines de monter au travers de la colonne stratigraphique et redresse à son contact les couches traversées et créent ainsi des failles.



Source : Microsoft Encarta

**Figure 9: Exemple de piège mixte : Dôme de sel**

Voici quelques exemples de pièges rencontrés à Madagascar :



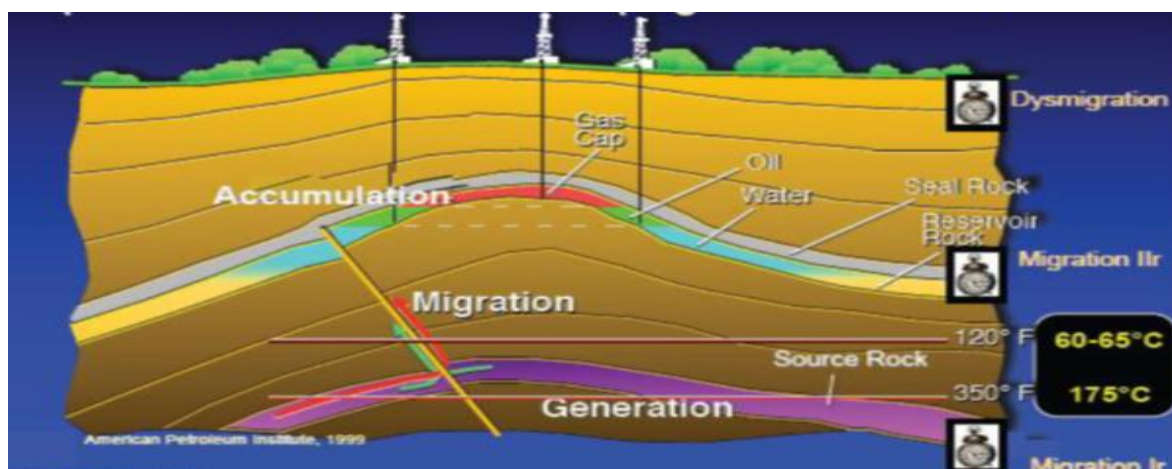
(Source : OMNIS)

Figure 10 : Exemples de pièges à Madagascar

### V.5 La préservation du pétrole et du gaz

Le contact avec l'oxygène et l'action des bactéries apportés par les eaux de pluies infiltrées attaquent et provoquent une diminution très importante de la proportion des hydrocarbures liquides légers et moyens et il ne restera plus que des hydrocarbures lourds. Ceci conduit aussi à la libération de gaz surtout pour les accumulations à faible profondeur.

D'un autre côté, les accumulations beaucoup plus en profondeur pourront subir des bouleversements dus aux mouvements tectoniques des roches. Ceci pourrait entraîner la formation des fractures ou des failles dans lesquelles les hydrocarbures piégés vont s'engouffrer et s'échapper.



Source : American Petroleum Institute

Figure 11 : Processus du système pétrolier



## **VI. CADRE GEOGRAPHIQUE [15] [39]**

Géographiquement, notre zone d'étude est située à 500Km à l'Est de l'Afrique séparé par le Canal de Mozambique. Elle se trouve dans trois régions de Madagascar qui sont les Régions de Menabe, Atsimo Andrefana et Androy.

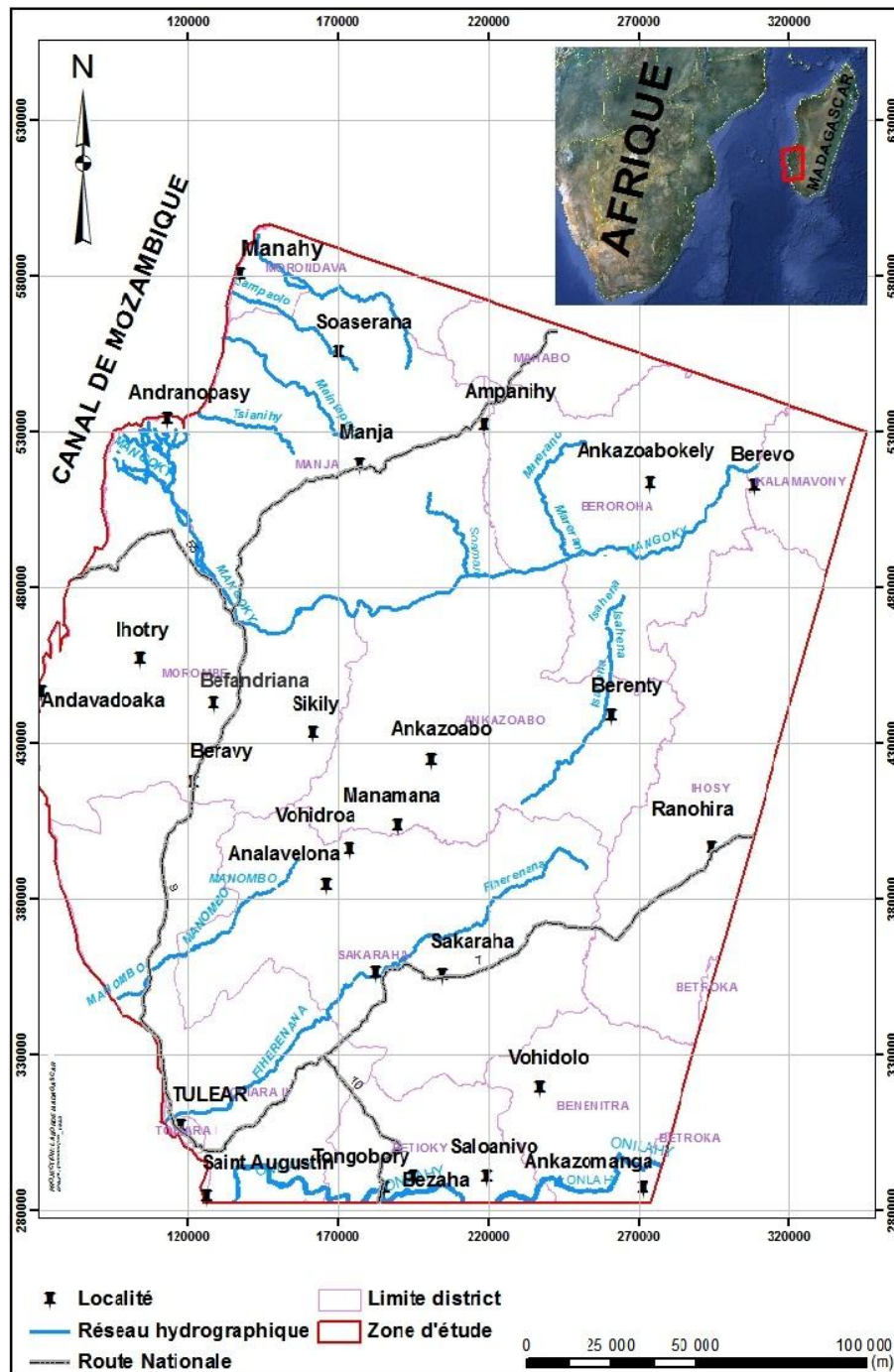
Plus précisément, la zone est limitée entre les coordonnées Laborde X=283000m et 598000m, Y= 68100 m et 346500m, entre Manja et le fleuve de l'Onilahy, d'une superficie totale d'environ 63 450 Km<sup>2</sup>. Dans le cadre de cette étude, six blocs pétroliers sont pris en compte. Citons du Nord au Sud, le bloc 3108 d'Amicoh, les blocs 3109 et 3111 de Tullow, le bloc 3110 d'ESSAR énergie, le bloc 3112 de Madagascar Southern Petroleum, et le bloc 3113 de Madagascar Energy International Ltd.

Sur le plan hydrographique, deux catégories de réseaux hydrographiques caractérisent notre zone d'étude.

- Les cours d'eau à bassin versant mixte, traversant à la fois sur le socle cristallin des Hautes Terres et le bassin sédimentaire de l'Ouest dont la longueur dépasse les 400 km comme le cas de Mangoky. Ils sont permanents quelle que soit la saison.

- Les cours d'eau qui coulent uniquement sur les terrains sédimentaires comme le cas de Fiherenana et ne dépassant pas les 300 km.

L'existence du Delta de Mangoky caractérise notre zone. Ce delta occupe une superficie de plus de 110 000 hectares dont une bordure salée de 50 000 hectares. Il commence vers Tanandava, limité au sud par le cordon dunaire arcqué Namakia-Ankonetse-Marosarandra et s'étend jusqu'à la mer. Au nord du fleuve, le delta s'étend jusqu'à Andranopasy.



(Source : BD 500 FTM)

*Figure 12: Carte de localisation de la zone d'étude*

## VII. CADRE GEOLOGIQUE

### VII.1. Cadre géodynamique et géologique de Madagascar [19]

L'île de Madagascar s'est formée à la suite de la dislocation du supercontinent du Gondwana reliant l'Afrique, l'Amérique du sud, L'Antarctique, l'Australie, l'Inde et

Madagascar auquel il appartenait jusqu'à la fin du Paléozoïque. Plusieurs arguments stratigraphiques, structurales, géophysiques soutiennent cette hypothèse :

- ✓ Similitudes entre les séries sédimentaires du Karroo en Afrique du Sud, Kenya et

Tanzanie d'une part, et d'autre part les séries sédimentaires continentales des bassins de Morondava (Bésairie, 1972).

Le karroo est formé par des formations de dominance continentales avec quelques intercalations marines.

- ✓ Concordance entre les analyses des pôles magnétiques mesurées sur les roches d'âge Karroo de Madagascar et d'Afrique australe (Razafindrazaka, 1976).

- ✓ Concordance des positions relatives et des mouvements tectoniques observées sur les linéaments d'Assouan (en Afrique) et de Ranotsara (Madagascar) (Chorowicz, 1987).

- ✓ Concordance entre les déformations des roches du socle ancien de Madagascar et celles de la ceinture de Mozambique (Nicollet, 1988).

- ✓ Concordance des lignes de cotes est-africaines et cotes malgaches (Raillard, 1990).

A Madagascar, des épisodes de rifting s'identifient par la mise place de leur bassin sédimentaire.

#### **VII.1.1. Rifting Afro-Malgache [19]**

Madagascar dérive du Nord-Ouest vers le Sud-Est le long d'une structure de coulissement : la ride de Davie. Cette dérive a entraîné la formation du bassin océanique de la Somalie au Nord et du Canal de Mozambique à l'Ouest. Des données géophysiques ont montré cette double ouverture (Raillard, 1990). Ces ouvertures ont été précédées par une période de dislocation du Gondwana, relativement longue pendant le Carbonifère supérieur-Permien au Jurassique inférieur.

Pendant le Jurassique moyen (170 et 110 Ma), l'ouverture de la croûte terrestre et la formation d'une croûte océanique divise le supercontinent du Gondwana en deux blocs : un bloc occidental constitué de l'Afrique et de l'Amérique du Sud, et un bloc oriental composé par Madagascar, l'Antarctique, l'Australie et l'Inde, qui se déplace vers le Sud Sud Est par rapport à l'Afrique. Madagascar était accolée à l'Afrique au niveau du Kenya/ Somalie ; le rift afro-malgache sépare les deux structures, et la Grande île dérive vers le sud jusqu'à sa place actuelle.

Les bassins océaniques somalien et mozambicain qui s'individualisent ainsi sont attachés par une zone de failles transformantes.

Vers 100 Ma, le processus se poursuit avec le rifting indo-malgache et l'ouverture de l'océan indien. Pendant et après cette période, d'importants épisodes de magmatisme, de véritables trapps appelés CFB (Continental Flood Basalt) recouvrent l'île de laves ; il en reste des témoins : le massif de l'Androy au sud, les bassins de Morondava et Tulear.

#### **VII.1.2. Rifting Indo-Malgache [19]**

Une deuxième cassure continentale fait son apparition à l'Est de la structure précédente entraînant la séparation de l'Inde et de Madagascar.

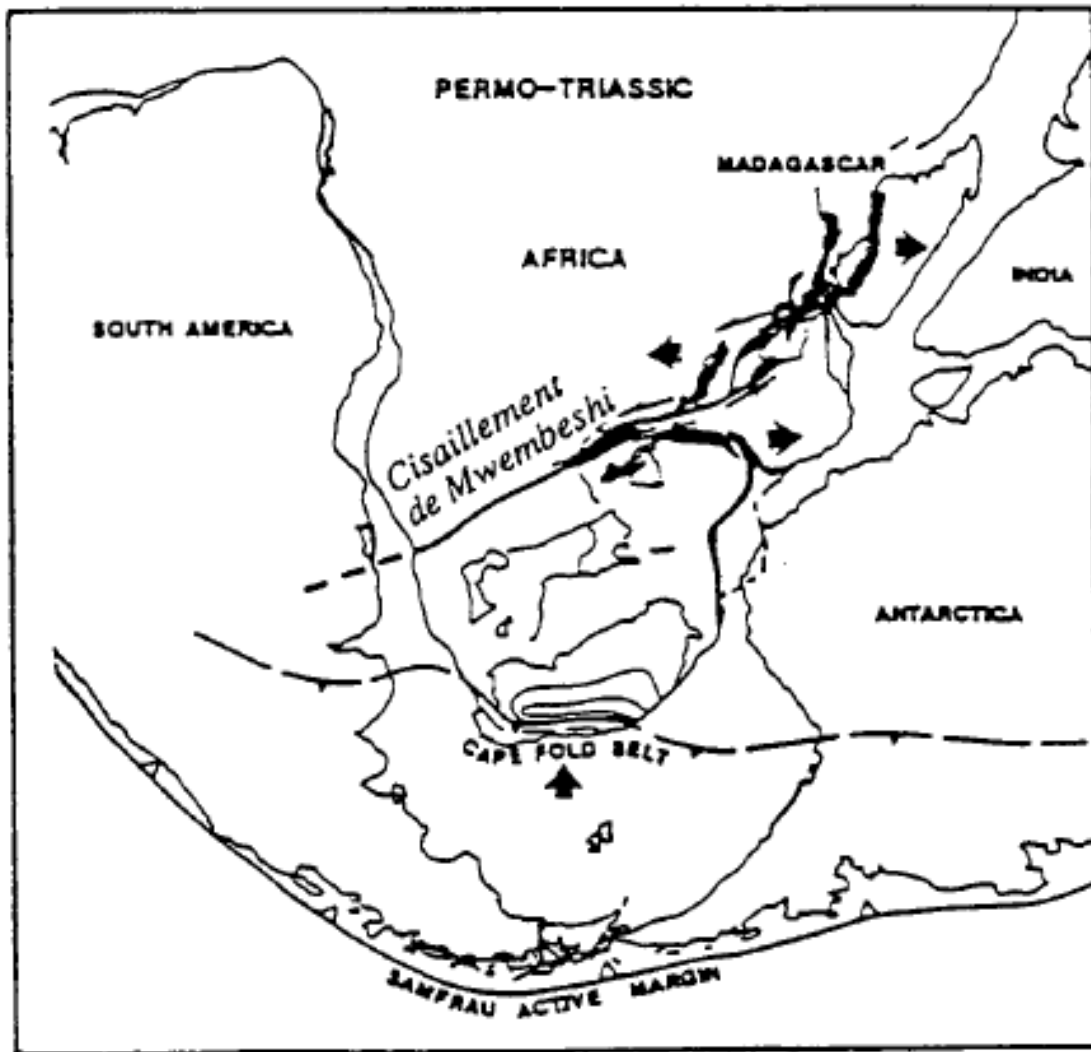
Le passage de Madagascar au-dessus d'un panache chaud (monté de magma au crétacé supérieur que l'on nomme point chaud de Marion) a entraîné la mise en place des basaltes et une fragilisation de la lithosphère qui provoque ainsi des forces de tension.

Ces forces sont à l'origine de l'extension Est-Ouest à l'Est Nord Est-Ouest Sud-Ouest qui ont donné naissance aux dykes de la côte Est. Au même moment, le mouvement sur la zone de fracture de Davie est remplacé par une extension pure. Les anomalies magnétiques dans le bassin des Mascareignes montrent que l'Inde dérive vers le Nord Est. Cette direction est la même pour les dykes du Sud-Ouest malgache.






#### **VII.2. Le bassin sédimentaire de Morondava [18] [23]**

L'évolution du système du Basin Karoo dans le sud-ouest de Madagascar peut être considérée comme une première rupture entre l'Est et l'Ouest-Gondwana en Afrique de l'Est. L'évolution du rift dans le bassin d'extension de Morondava a déjà été décrite en termes d'extension orthogonale de la croûte de direction soit E - W ou NW - SE. L'extension de la croûte dans le Bassin de Morondava et la sédimentation associée des Super séquences du groupe Karoo se sont produites dans trois périodes et régimes cinématiques différentes :

➤ Deux décrochements senestres du Néo et Mésopermien et du Post et Néopermien qui ont généré des bassins en transtension de direction vers le Sud.



### Légende

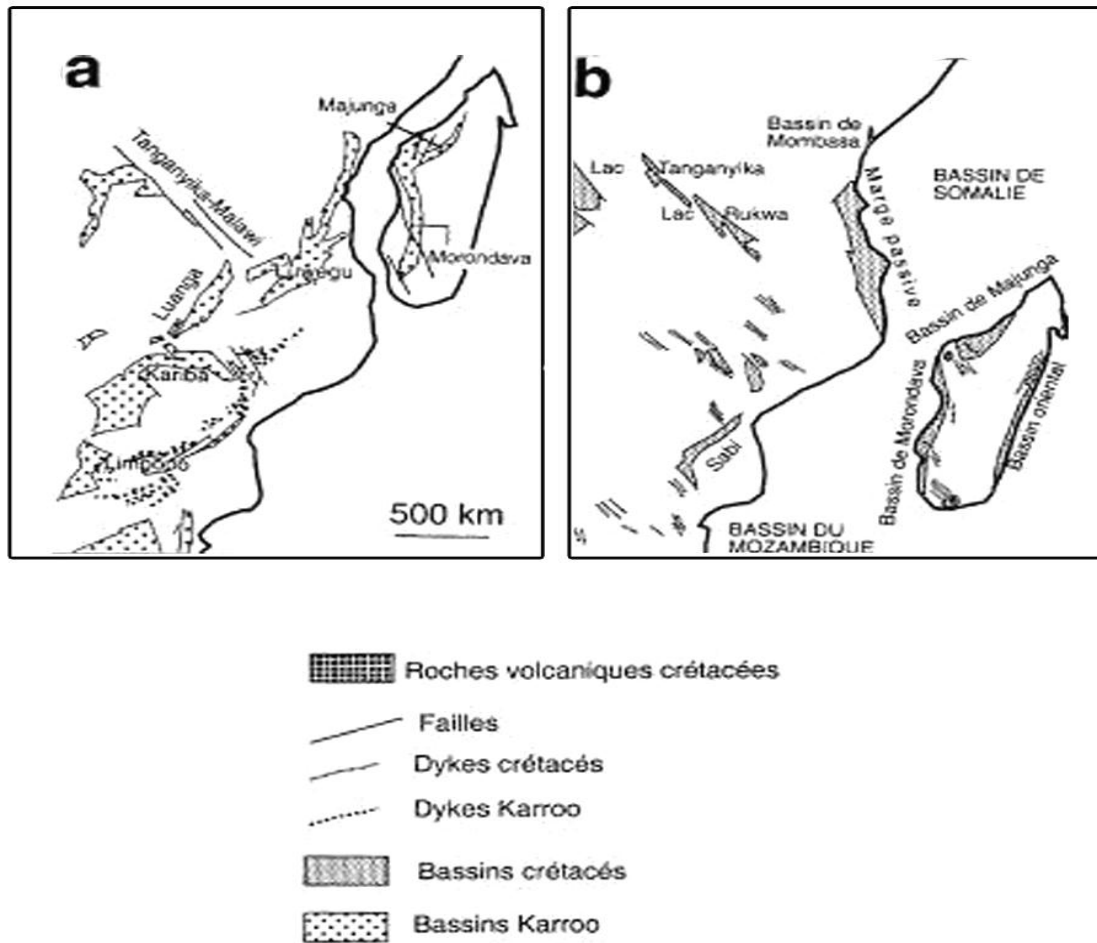
-  Zone d'ouverture
-  Zone de cisaillement
-  Zone de chevauchement
-  Limite de plaque
-  Sens de déplacement

Source: Daly et al., (1989).

**Figure 13 : Schémas d'ouverture en « pull apart » des bassins Est-africain**

➤ Une extension de direction NO, SE qui a engendré des failles normales et la formation des semi-grabens.





Source : Piquet et al. (1999) [16]

**Figure 14: Les bassins de Madagascar et d'Afrique de l'Est : (a) Bassin Karroo, (b) Bassins crétacés**

### VII.3. Description lithologique de la zone d'étude :

Notre zone d'étude se trouve dans le bassin de Morondava. La superficie actuelle des sédiments émergés est d'environ 58.000 Km<sup>2</sup>.

#### VII.3.1. Le socle :

Le socle occupe une petite partie au Nord-est de notre zone d'étude. Il est essentiellement composé de basalte, gabbros, limburgites, sakalavites, quartzites, gneiss et de cipolin. Le contact du socle avec les terrains sédimentaires se fait par des failles syn-sédimentaires.

#### VII.3.2. Le système Karoo [2] [18] [20]

Le système Karroo s'étend sur la période qui va du Carbonifère supérieur au Jurassique inférieur. Le terme Karroo concerne les formations sédimentaires et intrusives qui

se sont déposées ou mises en place en Afrique, dans des bassins intra et péri-continentaux situés au Sud de l'Equateur : le bassin Karroo (Afrique du Sud) le bassin d'Etjo (Botswana), les bassins de Limpopo et du Zambèze (Zimbabwe, Mozambique), le bassin du Congo (Zaire), la vallée de Rovuma (Tanzanie), le bassin de Mombasa (Kenya), les bassins de Morondava et de Majunga (Madagascar). Le régime de dépôt est essentiellement continental.

Elles remplissent dans le bassin de Morondava la fosse dite du Karroo qui commence un peu au sud de Toliara et qui présente une direction subméridienne parallèle au contact sédiments-socle. Il est formé de bas en haut par :

**a. Le groupe de la Sakoa (Carbonifère-Permien) :**

Le groupe de la Sakoa occupe une région limitée dans le Sud-Ouest. Il comporte quatre séries dont les calcaires marins de Vohitolia, témoins de la première transgression marine connue lors de l'ouverture du canal de Mozambique.

Le groupe de la Sakoa Supérieur est composé de grès grossiers feldspathiques, d'argile rouges et d'Arkoses de l'ère primaire et de dépôt continental et semi-aride. Tandis que le groupe Sakoa Inférieur composé de grès, conglomérats, pélites schistosées, varves, tillites, charbon et de schiste noire de l'ère primaire. A la base de la série, dans les bassins les plus anciens, le Karroo est représenté par des tillites, témoins d'un épisode glaciaire ; ces tillites sont discordantes sur le socle cristallin. Ce sont des dépôts de dominance continentale, lacustre et périglaciaire.

**b. Le groupe Sakamena (Permo-Trias)**

Il est plus répandu et plus épais que le groupe de la Sakoa. Il est divisé en trois termes de formations allant du Permien supérieur au Trias moyen:

➤ Le terme inférieur est discordant sur la Sakoa et sur le socle. Il a 500 à 3000 m d'épaisseur. Ce sont surtout des grès gris-vert souvent à laminations obliques, et des argilites grises bien litées d'origine continentale.

➤ Le terme moyen est argileux, lacustre ou laguno-marin avec une épaisseur de 250-300 m. Il est continu sur tout le bassin et est daté du Trias inférieur.

➤ Le terme supérieur a une épaisseur de 500 m avec prédominance des faciès gréseux et microconglomératiques. Sa partie sommitale est constituée d'argiles bariolées, de siltites et de grès parfois quartzitiques. Ces faciès indiquent des conditions de dépôts continentales ou lagunaires.

**c. Isalo (Trias-Jurassique moyen)**

Le groupe de l'Isalo occupe une large bande de bassin de Morondava. L'âge de ces formations varie du Trias au Jurassique moyen. La base est de nature continentale avec des incursions marines parfois importantes et de longue durée dans sa partie inférieure.

L'Isalo I est constitué d'arkose grossière microconglomératique blanche ou grise. Les laminations obliques d'échelle métrique et les diaclases silicifiées qui restent en relief caractérisent ce faciès.

L'Isalo II est formé de conglomérats et de grès rougeâtres avec des bois silicifiés. Cette formation est datée du Trias supérieur. La base de cette couche est parfois discordante sur les niveaux inférieurs ou repose directement sur le socle. Razafimbelo (1987) propose de rattacher l'Isalo I à la Sakamena et donne le nom de formation Makay à l'Isalo II. Au sommet ces grès passent latéralement vers l'ouest à des faciès mixtes, récurrents, gréseux, calcaires et marneux à nombreux bois silicifiés. C'est la transgression majeure.

Un Isalo III à faciès mixte est aussi identifié localement au sommet de l'Isalo II. Il est constitué de calcaire blanc avec au-dessus une récurrence de marnes et de calcaire.

**VII.3.3. Le Post-Karoo [2] [18] [20]**

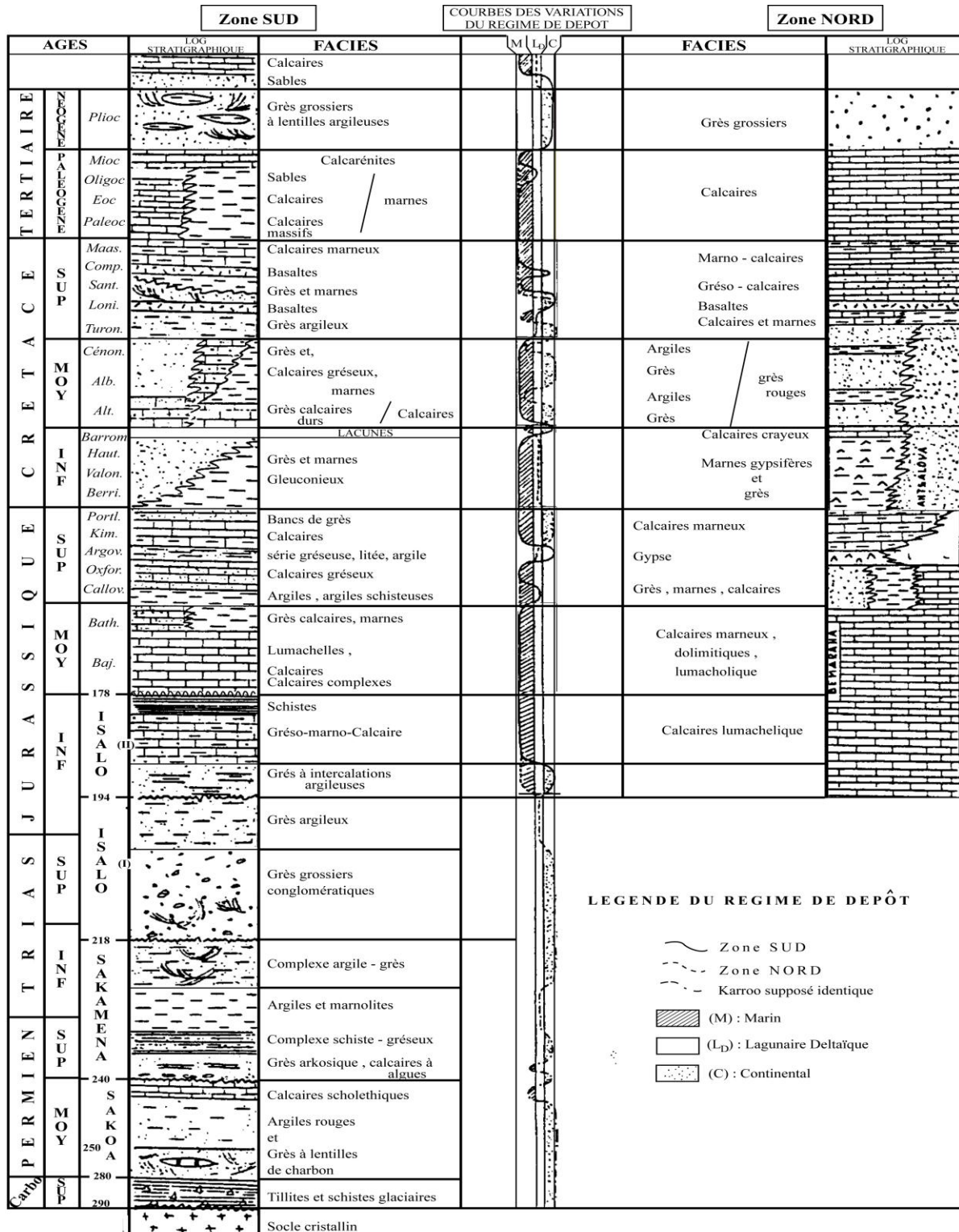
Le post-Karoo va du Jurassique supérieur au Quaternaire. Le régime de dépôt est essentiellement marin mais il présente des faciès continental, lagunaire avec des apparitions d'intrusions magmatiques liées à la tectonique.

Le jurassique est surtout marin avec des dépôts continentaux épais. Il débute par une transgression marine observable dans tous les bassins malgaches. Les couches de Crétacé sont marquées par des faciès répétés et alternés de marnes, de grès calcaires et de grès. On peut noter l'existence d'importants épanchements basaltiques au Campanien-Turonien.

. Leur lithologie et leur puissance sont marquées par des variations très rapides tant verticales que latérales. Les faciès, bien développés tant au Nord qu'au Sud de Madagascar, sont remarquablement constants et peuvent être suivis sur des dizaines de kilomètres.

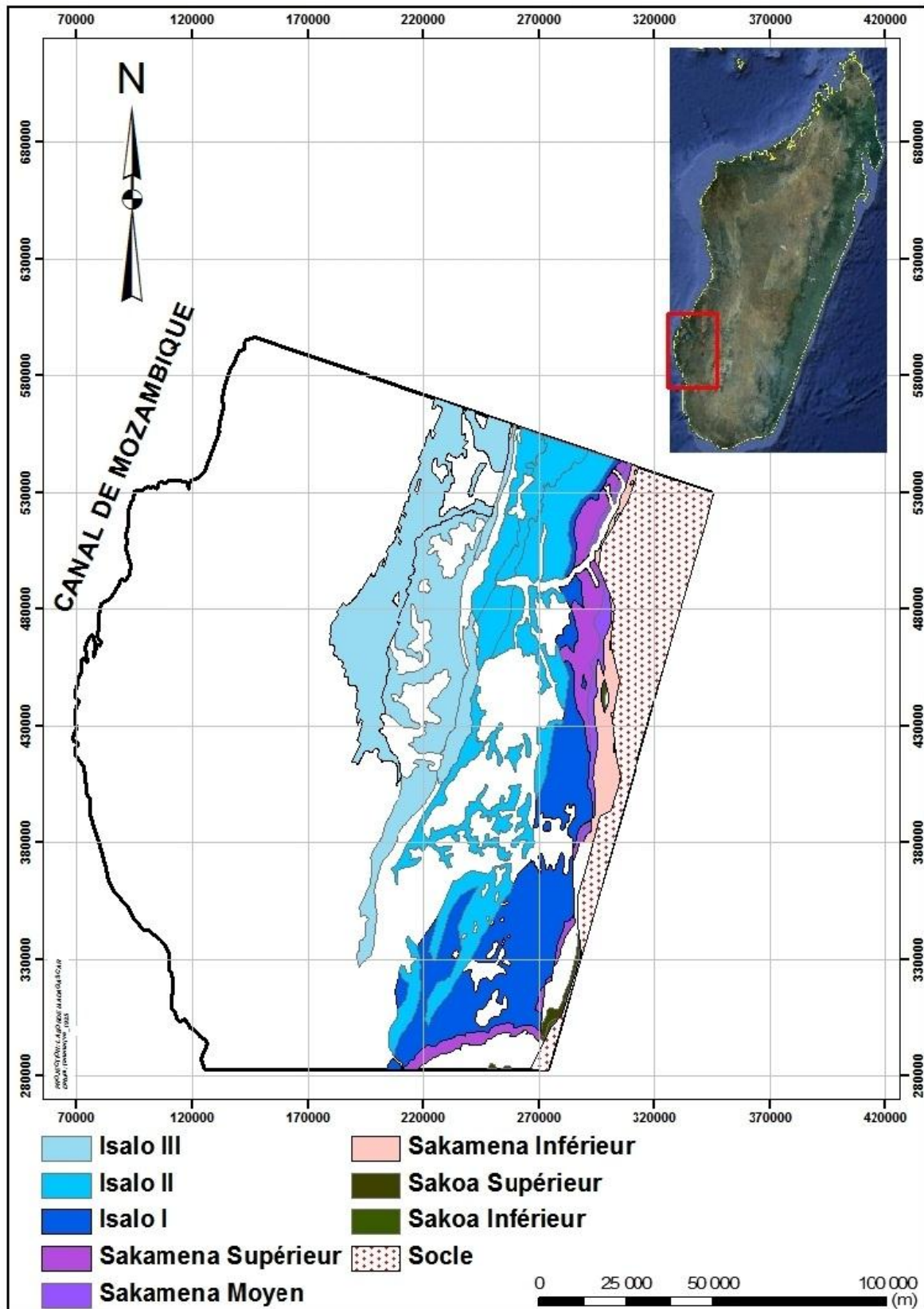
Le Crétacé supérieur se caractérise par un épanchement de coulées basaltiques. Le Miocène présente peu d'affleurements et se caractérise par des calcarénites. On évalue l'épaisseur de la série post-Karoo à plus de 5000 m vers la côte.

La chronologie des faciès de la série sédimentaire rencontrée dans le bassin est illustrée par la colonne stratigraphique synthétique ci-après :



Source : RAJAOMAZAVA F., 1992 [18]

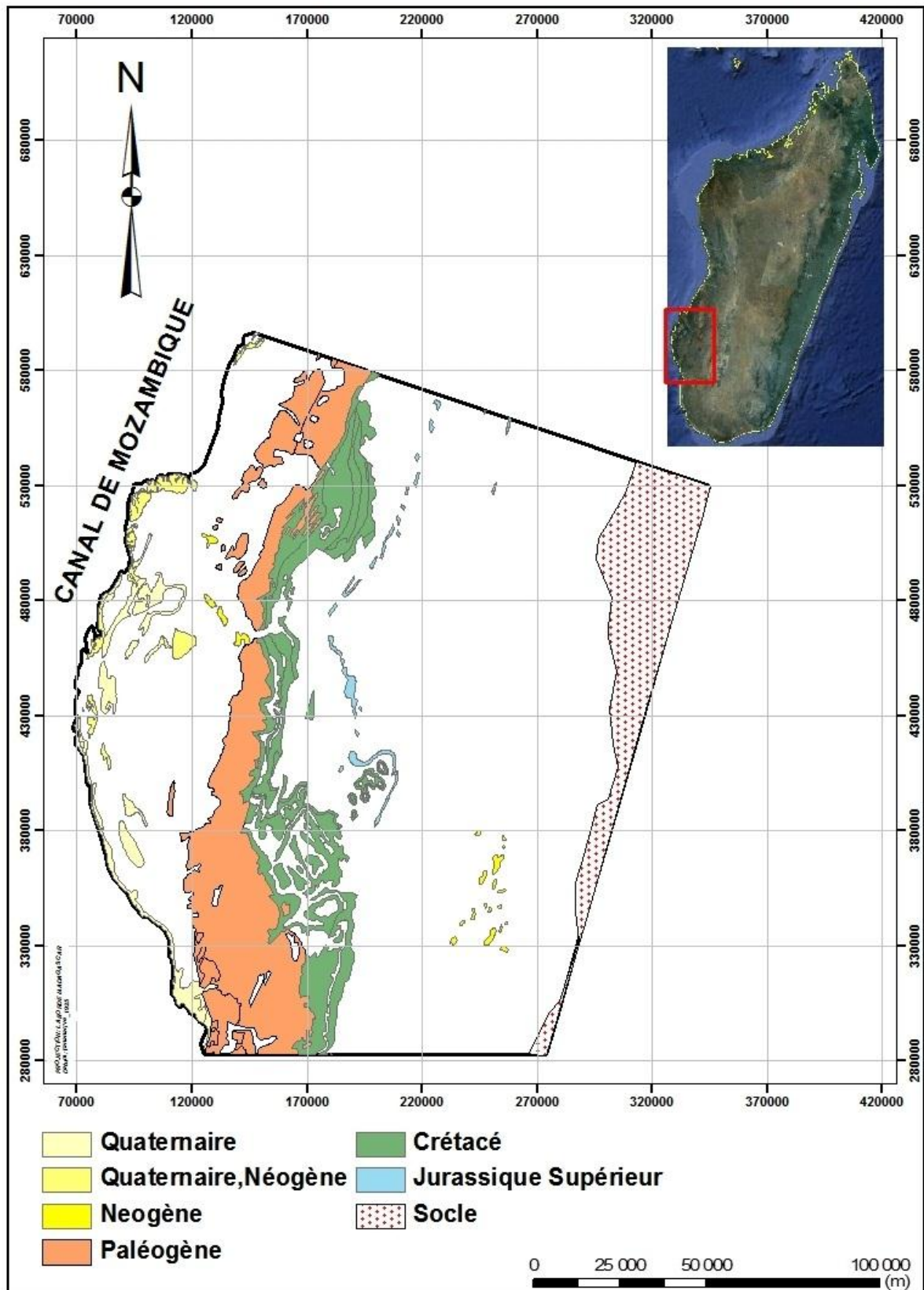
Figure 15 : Log stratigraphique synthétique et variations du régime de dépôt des séries sédimentaires du bassin de Morondava



Source : BD 500 (FTM)

Figure 16 : Dépôt d'affleurement du Karroo de la zone d'étude





Source : BD 500 (FTM)

Figure 17: Dépôt d'affleurement du Post-Karoo de la zone d'étude

#### **VII.4. Aperçu général de la géologie structurale [2] [16] [18]**

Structuralement parlant, le bassin de Morondava est subdivisé en deux parties : un sous-bassin sud avec des failles bordières et un sous-bassin nord avec une direction globale des failles NNO-SSE.

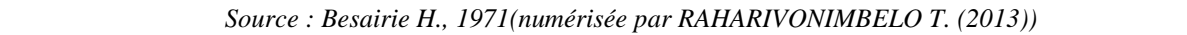
D'une manière générale, la bordure orientale du bassin de Morondava montre une aggradation progressive des formations Karroo du sud vers le nord et de l'ouest vers l'est. Le contact avec le socle se fait par des failles syn-sédimentaires. Des coupes effectuées sur la bordure du bassin, ainsi que l'étude de la subsidence des couches (Rajaomazava, 1991) montrent une géométrie en horst et graben reliée à l'effondrement progressif vers l'ouest du socle et de sa couverture Karroo. On peut penser à une réactivation de ces accidents anciens durant la période du Carbonifère au Jurassique donnant au bassin de Morondava sa forme particulière. Les failles bordières montrent une composante principale verticale sans trace apparente de mouvement transcurrent. Piqué et al (1999) concluent que le bassin de Morondava, avant le Jurassique, était un rift avorté.

Pour notre Zone d'étude, les affleurements indiquent un bassin monoclinal assez simple, interrompu par un certain nombre de zones en faille, par rapport à la direction des couches. La tectonique y est compliquée du fait de l'existence de nombreuses failles.

Parmi ces failles, les plus remarquables sont :

- La faille de l'Ilovo, de direction NNE-SSO
- La faille du Sikily, de direction NNE-SSO
- La faille de Befandriana de direction N-S à l'Ouest
- La faille de Tuléar de direction Mozambique

La tectonique profonde montre l'existence d'une morphologie accidentée dite Fosse du Karroo.



---

30



# **PARTIE II : BASES METHODOLOGIQUES**

Dans cette partie, on décrit surtout la base des méthodes scientifiques utilisées pour l'obtention des données interprétées dans ce mémoire telles : la télédétection, la gravimétrie et le magnétisme satellitaire.

## **I. LES IMAGES NUMERIQUES [1] [4] [11] [26] [36]**

### **I.1 La télédétection**

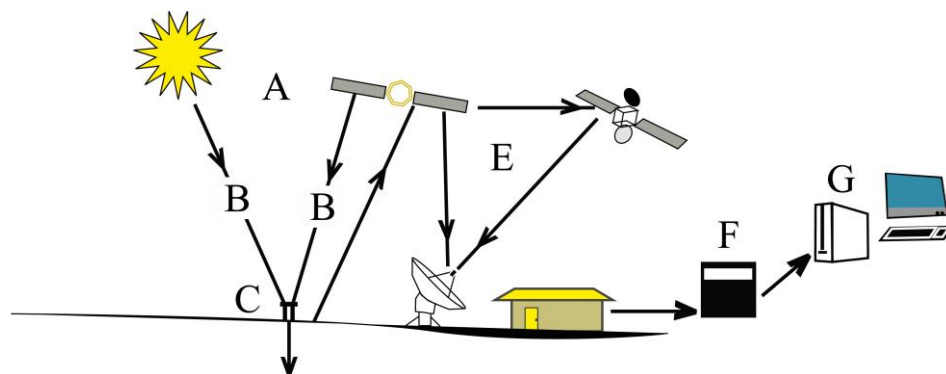
#### **I.1.1 Définition [4]**

La télédétection est l'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.

#### **I.1.2 Principes physiques de la télédétection [4] [11]**

##### **a. Les différentes étapes de télédétection**

- Une source d'énergie ou d'illumination (A) : On s'intéresse la télédétection dite passive qui utilise le soleil comme principale source d'énergie. Le soleil éclaire et envoie un rayon incident vers la cible.
  - Interactions entre le rayonnement et l'atmosphère tout au long du trajet source-cible et cible-capteur (B).
  - Interactions avec la cible (C) : Ces interactions sont de trois types : la transmission, la réflexion et l'absorption.
- Enregistrement du signal par le capteur (D) : Le capteur enregistre le signal reçu.
- Transmission, Réception, et Traitement (E) : Le satellite transmet les signaux vers des stations de réception au sol ou à des satellites relais.
  - Traitements, analyses, interprétation et applications (F et G) :



Source : KERGOMARD C., 2004 [11]

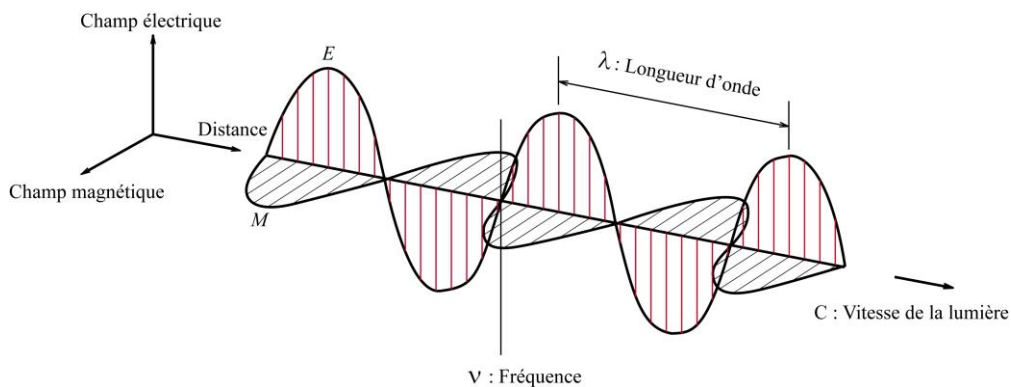
**Figure 19: Différentes étapes de télédétection**

### b. Le rayonnement électromagnétique (REM)

Selon la théorie des ondes, tout rayonnement électromagnétique possède des propriétés fondamentales et se comporte de façon prévisible. Le rayonnement électromagnétique est composé d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (M). Le champ électrique varie en grandeur et est orienté de façon perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement. Le champ magnétique est orienté de façon perpendiculaire au champ électrique. Les deux champs se déplacent à la vitesse de la lumière (c). [11]

Pour comprendre la télédétection, il est indispensable de saisir les deux composantes du rayonnement électromagnétique qui sont la longueur d'onde et la fréquence. La longueur d'onde équivaut à la longueur d'un cycle d'une onde, ce qui correspond à la distance entre deux crêtes successives d'une onde. La longueur d'onde est représentée habituellement par la lettre grecque lambda ( $\lambda$ ), et est mesurée en mètres ou en l'un de ces sous multiples tels que les nanomètres (nm,  $10^{-9}$  mètre), micromètres ( $\mu\text{m}$ ,  $10^{-6}$  mètre) ou centimètres (cm,  $10^{-2}$  mètre).

La fréquence représente le nombre d'oscillations par unité de temps. Normalement, la fréquence est mesurée en Hertz (Hz) (c'est-à-dire en oscillations par seconde) ou en multiples d'Hertz. [11]



Source : Source : KERGMARD C., 2004 [11]

**Figure 20 : Représentation de la longueur d'onde d'une fonction sinus**

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

$$\lambda = c/\nu \quad (\text{II.1})$$

$\lambda$  est la longueur d'onde (m);

c est la vitesse de la lumière ( $\approx 3 \times 10^8$  m/s) ;

$\nu$  est la fréquence de l'onde (Hz).

La longueur d'onde et la fréquence sont donc inversement proportionnelles, c'est-à-dire que plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée, et plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est basse. [11]

### **c. Les capteurs utilisés [36]**

Les capteurs sont des dispositifs permettant d'enregistrer, de transmettre, de coder et de renvoyer la lumière émise ou réfléchie par des objets observés sur la surface de la terre.

On distingue les différentes résolutions suivantes :

➤ **Résolution Spectrale** : décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Plus, la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites.

➤ **Résolution Spatiale** : correspond à la surface élémentaire d'échantillonnage observée instantanément par le capteur satellitaire. Cette surface correspond au pixel (Picture élément). Comme exemple, cette résolution est de 20 m × 20 m pour le satellite SPOT et de 30 m × 30 m pour le satellite Landsat Thematic Mapper,

➤ **Résolution radiométrique** : elle correspond la capacité d'un système d'acquisition à distinguer entre deux niveaux d'énergie voisins.

➤ **Résolution temporelle** : correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène. Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite.

### **d. La réflectance spectrale [11]**

Les caractéristiques de réflexivité des objets de surface de la terre peuvent être quantifiées en mesurant la partie reflétée de l'énergie incidente. Ces nombres sont enregistrés en pixel organisés en matrices de lignes et colonnes qui forment des images. La dimension de cette matrice combinée avec la dimension du pixel correspond à la portion de la surface de la terre vue par le capteur. Chaque pixel est composé de plusieurs mesures du REM ce qui constitue l'approche multi spectrale.

### **e. La télédétection appliquée à la géologie et la géomorphologie [1] [4]**

Le principe d'utilisation de la télédétection en exploration géologique et géomorphologique est principalement fondé sur l'analyse des réponses spectrales de chaque unité structurale. Ces méthodes ont été héritées de la photogéologie. Les réponses attendues de l'analyse des données produites après l'utilisation des différents moyens sont de type : lithologique, minéralogique, structurale et beaucoup d'autres.

## **I.2 Le modèle numérique de terrain (MNT) [1]**

Représenter le Modèle Numérique de Terrain revient à modéliser la représentation du relief par une grille régulière et rectangulaire. L'altitude de chacun des nœuds de cette grille est en générale l'altitude de terrain au point considéré.

L'analyse morphologique spatialisée est une nouvelle méthode de détection des accidents pendant l'utilisation les données morphométriques du relief (pente, orientation, altitude), extrait d'un modèle numérique de terrain précis par un programme informatique.

Un MNT est la représentation du relief sous forme de la grille régulière.

Un MNT est défini par :

- un point d'origine
- un nombre de lignes et de colonnes

L'orientation des lignes et colonnes du MNT sont en général celle de la projection choisie.

## **II. LES METHODES GEOPHYSIQUES**

Les méthodes géophysiques abordées sont la méthode gravimétrique et la méthode magnétique satellitaires. Ce sont tous deux des méthodes de prospection utilisées tant dans le domaine pétrolier que minier. Ce sont des méthodes géophysiques non destructives, applicables sur tous les domaines, marin ou terrestre.

### **II.1 Gravité obtenue par altimétrie satellitaire [6] [14] [17] [22] [29]**

Les anomalies gravimétriques qui sont utilisées dans cet ouvrage sont le fruit de la combinaison de la géophysique et de de la géodésie.

● La géophysique nous permet de détecter les anomalies gravimétriques dans la lithosphère, ces anomalies correspondant à des structures bien déterminées.

● La géodésie qui a une relation étroite avec le champ de pesanteur ou champ de gravité.

#### **II.1.1. Lois de Newton**

La gravimétrie est basée sur les deux lois de Newton :

##### **a. Première Loi de Newton**

En 1687, ISAAC NEWTON a publié la loi de l'attraction universelle dans son œuvre intitulée « La Philosophiae Naturalis Principia Mathematica ». Cette loi explique l'ensemble des observations de GALILEE sur la chute des corps et de KEPLER sur le mouvement des planètes.

Cette loi s'énonce comme suit :

« L'attraction gravitationnelle entre deux masses est proportionnelle au carré de leur distance ».

L'attraction gravitationnelle  $\vec{F}$  entre deux masses ponctuelles  $m_1$  et  $m_2$  est donc telle que :

$$\vec{F} = -\frac{Gm_1m_2}{r_1^2} \vec{r}_1 \quad (\text{II.2})$$

Où :

$\vec{F}$  : Force appliquée sur la masse  $m_2$

$\vec{r}_1$  : Vecteur unitaire

$r$  : Distance entre les masses  $m_1$  et  $m_2$

$G$  : Constante universelle de la gravité

Avec :

$$|\vec{r}_1| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (\text{II.3})$$

Et :

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{Kg}^2 \text{ (SI)}$$

$$= 6.67 \times 10^{-8} \text{ dyne cm}^2/\text{g}^2 \text{ (CGS)}$$

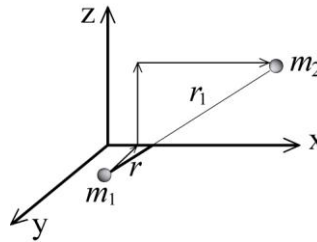


Figure 21 : Attraction gravitationnelle entre deux masses

### b. Deuxième Loi de Newton

Cette loi s'énonce comme suit : « Il faut appliquer une force  $\vec{F}$  à une masse  $m$  pour lui faire subir une accélération  $\vec{a}$  ».

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (\text{II.4})$$

Ceci se traduit par la relation :

L'accélération d'une masse à la surface du sol s'exprime alors par :

$$\vec{a} = -\frac{GM_T}{R_T^2} \vec{r} = \vec{g} \quad (\text{II.5})$$

Où :

$M$  : Masse de la Terre ( $5.977 \times 10^{24} \text{ Kg}$ )

$R_T$  : Rayon moyenne de la Terre (6370 Km)

$\vec{g}$  : Accélération de la gravité :  $9.81 \text{ m/s}^2$

$G$  : Constante universelle de la gravité

Avec:  $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$

### **II.1.2. Altimétrie satellitaire**

En première approximation, le niveau moyen des mers est une surface équipotentielle du potentiel de pesanteur et reflète la répartition de la matière dans la Terre. Ce qui nous amène à l'obtention des anomalies gravimétriques. Ainsi, nous allons aborder les bases théoriques et méthodologiques pouvant nous amener de l'altimétrie satellitaire jusqu'à l'obtention des anomalies gravimétriques que l'on interprètera ensuite le long de notre étude.

#### **a. La mesure radar**

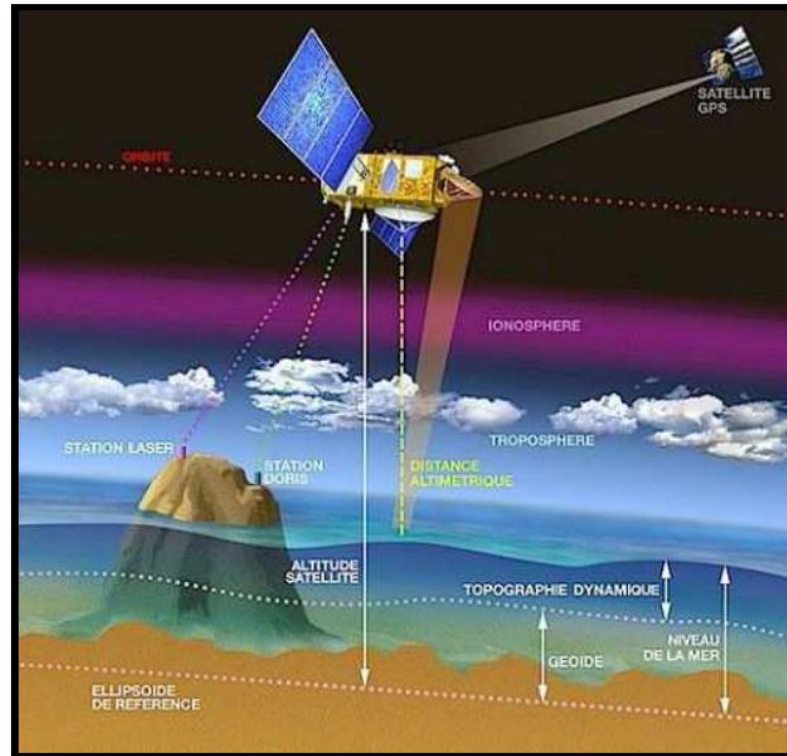
Le radar mesure la distance entre le satellite et la surface océanique. En connaissant l'orbite du satellite indépendamment grâce aux différents systèmes comme le système GPS (Global Position System) ou DORIS (Détermination d'Orbite et Radio-Positionnement Intégré par Satellite), Il est possible d'en déduire les ondulations de la surface océanique.

Le système DORIS est un système développé par la France (CNES, GRGS, IGN) conçu pour suivre, avec une précision de l'ordre de 10 cm, l'orbite du satellite d'altimétrie radar TOPEX-POSEIDON destiné à étudier le niveau moyen des océans et les courants de surface. Le principe de la mesure se fonde sur l'effet Doppler qui consiste à recueillir au sol le signal radioélectrique émis par un émetteur à bord du satellite et d'en déduire les positions du satellite par la relation entre vitesse et position du satellite et de la station. Il est possible d'en déduire les ondulations de la surface océanique.

La surface moyenne des mers est la surface du géoïde augmentée de la circulation océanique également moyennée. La mesure altimétrique permet alors de connaître la hauteur de la mer à un instant donné. Au niveau moyen de la mer se superposent des ondulations dues

aux marées océaniques et terrestres, et aux variations de la circulation océanique comme les effets saisonniers.

La trajectoire des satellites est suivie et surveillée depuis la Terre grâce à des stations de poursuite comme le système DORIS qui calculent les modifications de leurs orbites.



Source : <http://www.aviso.oceanobs.com>

**Figure 22 : Principe de mesure de la hauteur de mer par altimétrie satellitaire**

### **b. les systèmes de références : l'ellipsoïde de référence et le géoïde**

La valeur moyenne de la pesanteur est de l'ordre de 981gals. Elle varie selon :

- L'altitude car la distance au centre de la terre augmente ce qui diminue l'effet de la gravitation universelle mais augmente celui lié à la rotation terrestre ;
- La latitude du fait de l'aplatissement terrestre, le rayon polaire est inférieur au rayon équatorial, la force de gravitation est donc plus grande au pôle qu'à l'équateur.

Ainsi, ceci nous amène à définir le concept d'ellipsoïde de référence et de géoïde.

#### **i. L'ellipsoïde de référence**

Un ellipsoïde de référence est une approximation mathématique théorique et simplificatrice de la surface du globe. C'est donc un ellipsoïde de révolution, tournant avec la Terre autour de son axe Z, et centré au centre de masse de la Terre. Il est déterminé comme étant la surface qui donne le meilleur ajustement au niveau moyen de la mer.



Des campagnes de géodésie aérospatiale, menées dans le cadre de grands programmes internationaux depuis 1965 ont permis de fixer les données géodésiques fondamentales dans le système GRS (Geodesic Reference System). L'ellipsoïde de référence est alors défini par :

- ✓ son demi-axe  $a = 6\,378\,136 \pm 1$  m
- ✓ son aplatissement  $f = (a - b) / a = 1/298.257 \pm 0,001$  où  $b$  est le rayon polaire.

La valeur de la pesanteur en fonction de la latitude  $\lambda$  est donnée par la formule:

$$g = g_e (1 + \beta \sin^2 \lambda) \quad (\text{II.6})$$

où  $g_e$  est la valeur de la pesanteur à l'équateur

$$\text{et } \beta = 5 \cdot \omega^2 a / (2 \cdot g_e) \quad (\text{II.7})$$

où  $\beta = (g_p - g_e) / g_e$  représente l'aplatissement gravimétrique

$\omega$  étant la vitesse angulaire de rotation de la Terre

$g_p$  est la valeur de la pesanteur au pôle

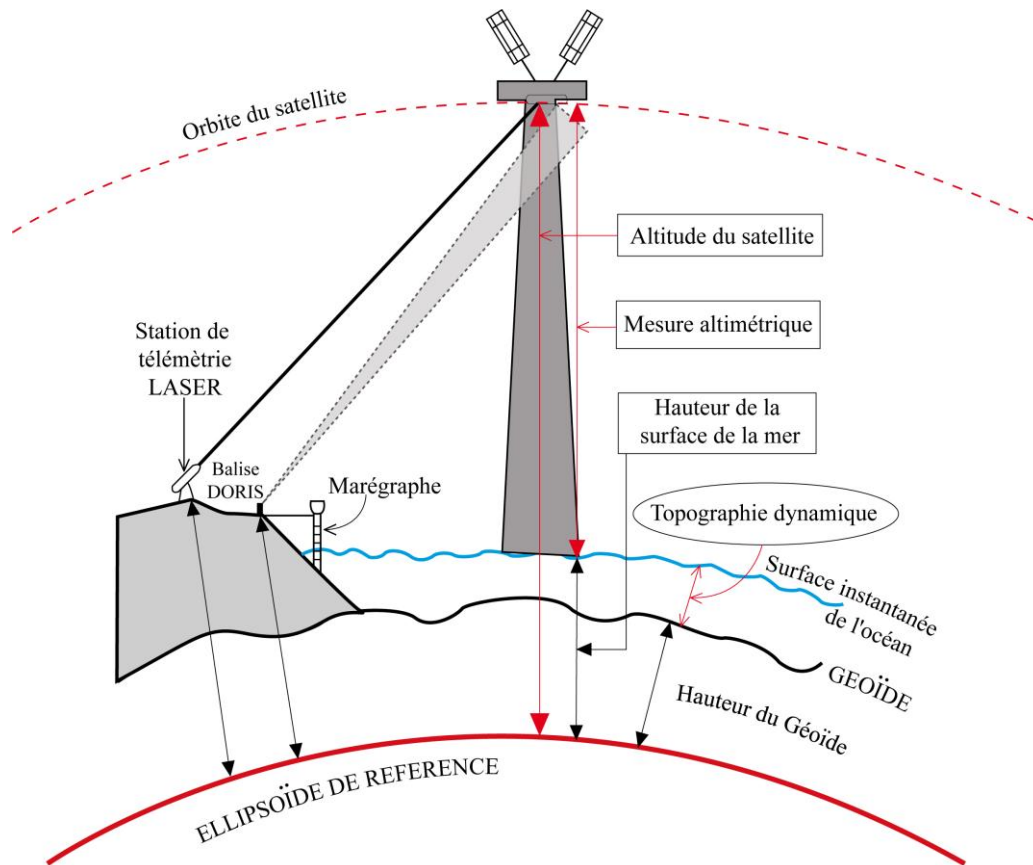
## *ii. Le géoïde*

Par définition, la verticale est donnée en tout point du globe par la direction du fil à plomb (donc par la direction locale de la pesanteur). Néanmoins, les différentes verticales ne sont pas toutes parallèles entre elles à cause des déviations verticales vers le relief dues à la topographie

L'horizontale est, définie en un lieu comme la direction perpendiculaire à la verticale. De proche en proche, il est donc possible de faire le tour de la Terre en restant sur une horizontale. Une telle surface est dite équipotentielle de pesanteur. Il existe donc une infinité de surfaces équipotentielles depuis le centre de la terre.

Le géoïde est alors défini comme l'équipotentielle de pesanteur correspondant à un instant donné à la surface moyenne des océans c'est à dire un ensemble global de points de mesure des marégraphes et des repères de nivellement, après soustraction des composantes dynamiques.

Ce géoïde correspond à la forme gravimétrique de la terre. Du fait des hétérogénéités de masse au sein du globe, cette surface n'est pas régulière, mais présente des ondulations par rapport à l'ellipsoïde de référence.



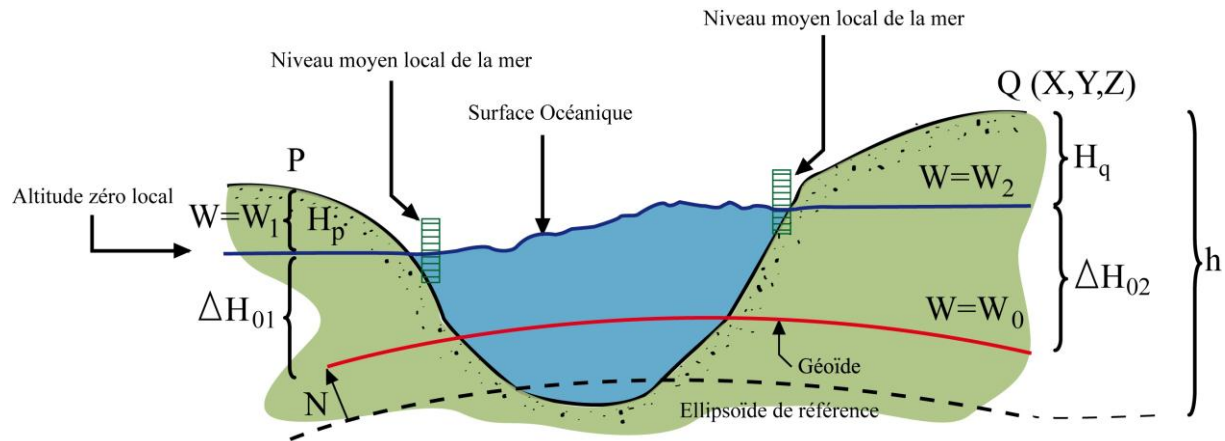
Source : Source : <http://www.aviso.oceanobs.com>

**Figure 23 : Principe de la mesure altimétrique**

### II.1.3. Principe de mesure de la gravité par altimétrie satellitaire

La position du satellite ou altitude est connue par son orbite qui est elle-même référencée par rapport à l'ellipsoïde. Un radar du satellite envoie des ondes très hautes fréquences (13 kHz) qui se réfléchissent sur la surface de la mer et permettent de mesurer la distance entre le satellite et la surface instantanée de l'océan. Par différence, on obtient la hauteur de la surface de la mer par rapport à l'ellipsoïde.

Ces mesures altimétriques doivent subir un certain nombre de corrections avant d'être exploitables. Des corrections du signal sont appliquées pour corriger les erreurs dues à l'environnement et aux bruits instrumentaux. Ainsi, il faut prendre en compte l'état de la mer, les variations de pression atmosphérique, les effets de la marée terrestre, les effets de charge, la présence d'eau dans l'atmosphère.



**Figure 24: Principales grandeurs utilisées et illustration du problème**

La distance entre le géoïde et la surface instantanée correspond à la topographie dynamique océanique.

$\Delta H_0 = \Delta H_{02} - \Delta H_{01}$  : est égal à 1m entre les continents, 0.1-0.2m entre îles et entre côtes des continents – îles.

La hauteur au-dessus de cet ellipsoïde,  $h$ , est mesurée suivant la normale à l'ellipsoïde. On l'observe indirectement par le positionnement par satellite à partir de coordonnées  $(X, Y, Z)$  connues.

La hauteur du géoïde,  $N$ , est la hauteur d'un point sur le géoïde au-dessus de l'ellipsoïde. Elle peut être observée en déterminant  $h$  par le technique satellite sur un point du marégraphe ou à un point de nivellement.

La hauteur orthométrique,  $H$ , communément appelé la hauteur au-dessus du niveau moyen de la mer est mesurée à partir du géoïde le long du fil à plomb. Il est observé par nivellement. Les mesures (altitude et gravité) donnent la valeur du champ de gravité terrestre dérivé du potentiel de gravitation, appelé géopotential  $U$  qui est converti en unités métriques en divisant par la gravité moyenne le long du fil à plomb. La gravité,  $g$ , est la magnitude du gradient de  $W$  à la surface de la Terre et de  $T$  (potentiel centrifuge) dans l'espace. Elle peut être observée par la technique absolue comme une expérience de chute libre ou relative (comme une différence) par un gravimètre à ressort. Un modèle (normal) de potentiel de gravité,  $U$ , avec l'ellipsoïde comme surface équipotentielle, est utilisé pour calculer la gravité normale,  $\gamma$ .

A tout point de latitude et altitude orthométrique connues, l'anomalie gravimétrique  $\Delta g$  est la différence entre la gravité mesurée et la gravité normale ( $\Delta g = g - \gamma$ ).

La gravité  $\gamma$  est calculée en un point avec une hauteur ellipsoïdale égale à la hauteur orthométrique.

L'altimétrie radar par satellite peut donc être utilisée pour calculer les anomalies de gravité prenant avantage de la relation mathématique entre les hauteurs du géoïde et les anomalies de la pesanteur (Sandwell et al, 1996; Knudsen, 1996). Cependant, les hauteurs obtenues à partir de l'altimétrie radar sont des hauteurs de la surface moyenne de la mer mais non du géoïde, même si les deux surfaces peuvent être proches.

#### **II.1.4. L'exploration pétrolière par la méthode gravimétrique**

##### **a. Anomalies de gravité et formules de réduction**

Nous savons que les valeurs mesurées de la pesanteur varient à la surface de la Terre. Cette variation est due à l'aplatissement de la Terre, en fonction de la distance au centre (d'après la loi de Newton) et à cause des irrégularités de densité. Ce sont ces dernières que l'on recherche lors de l'exploration géophysique.

La gravimétrie est surtout utilisée pour la recherche des structures pouvant constituer des pièges telles que les dômes de sel et les anticlinaux. Elle permet également de connaître l'épaisseur des sédiments ou d'un bassin.

Il est donc nécessaire d'appliquer au point de mesure de la gravité des corrections qui tiennent compte de la présence de masse au-dessus du géoïde de référence ou de l'absence de masse en dessous du géoïde de référence.

L'anomalie de gravité est ainsi définie comme étant la différence entre la mesure de pesanteur corrigée et la valeur théorique de la pesanteur produite par une Terre ellipsoïdale idéale tournant exactement comme la Terre réelle. Les anomalies sont exprimées en milligals ( $1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ ).

##### **i. Anomalie à l'air libre (FA)**

L'anomalie à l'air libre est corrigée des variations latérales du champ gravimétrique et des variations d'altitude. Il faut donc enlever la somme des effets gravitationnels théoriques attribuable à la latitude ( $g_l$ ), et additionner le produit du gradient de la gravité verticale moyenne par mètre d'altitude au-dessus du niveau de la mer (égal au taux de variation suivant la verticale de la force de gravité, soit  $0,3086 \text{ mGal.m}^{-1}$ ).

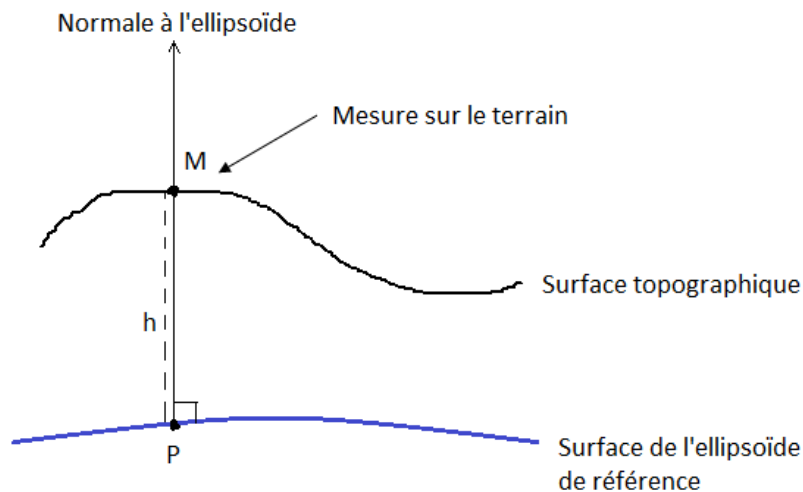
Pour une observation faite au sol, on a :

$$FA = g_o - g_t + (dg/dz) h \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$dg/dz = + 0,3086 \text{ mGal m}^{-1}$  (gradient de gravité verticale moyenne)

$h$  = altitude de la station au-dessus du niveau de la mer (mètres)



**Figure 25 : Illustration de la correction d'altitude**

**ii. Anomalie de Bouguer (AB)**

Elle représente l'effet des variations latérales de densité locales à la mesure : c'est en principe ce que l'on recherche en exploration pétrolière.

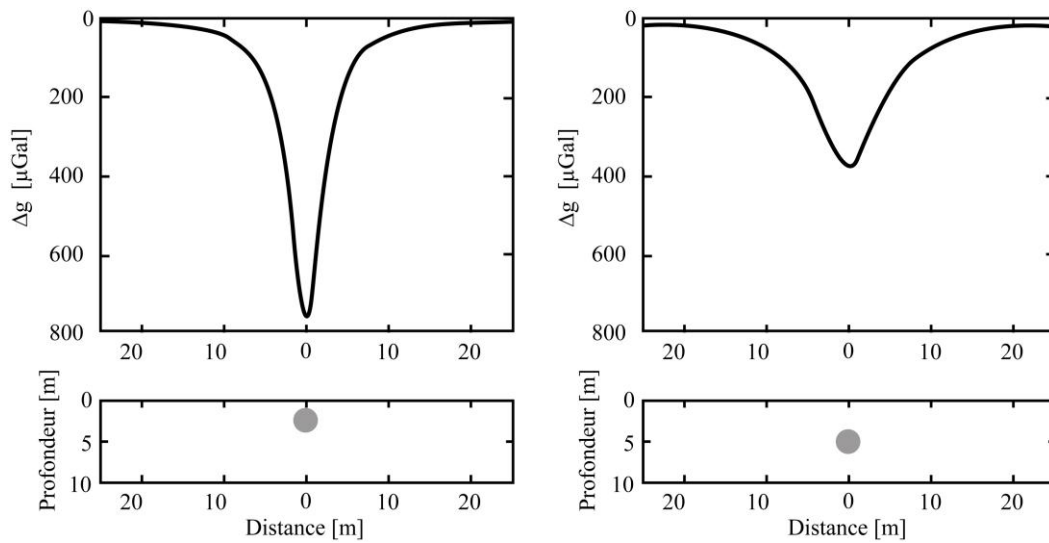
Elle représente la somme de tous les corps sous la surface et elle démontre en général deux caractéristiques :

- Des variations du champ gravitationnel régulières et continues sur de grande distance appelées variations régionales. Elles sont produites par les hétérogénéités à grandes profondeurs.
- superposées à ces variations régionales, et souvent masquées par celles-ci, on observe de petites perturbations locales du champ gravitationnel qui sont secondaires en dimensions mais primordiales.

L'anomalie de Bouguer peut provenir de trois niveaux :

- En grande profondeur
- En profondeur moyenne
- En faible profondeur

Plus la source est profonde, plus l'anomalie est évasée.



Source : CHOUTEAU M. [6]

**Figure 26 : Effet de profondeur**

L'anomalie de Bouguer comprend une correction supplémentaire par rapport à l'anomalie à l'air libre, qui corrige la différence de masse entre la station et le géoïde de référence.

$$AB = FA - 2\pi \cdot G \cdot \rho_c \cdot h + CT \quad (\text{II.9})$$

avec :

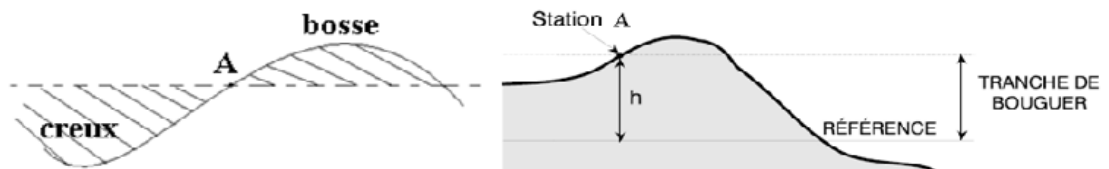
$G = 6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  ou  $6,672 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ mGal}$  (constante universelle de la gravitation)

$\rho_c = 2670 \text{ kg m}^{-3}$  (densité ou masse volumique de la lithologie crustal)

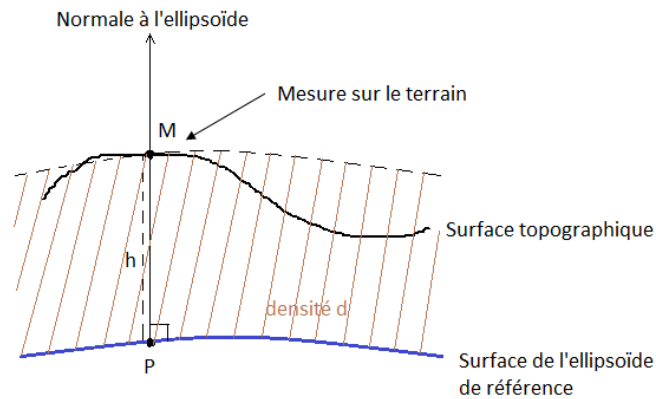
$$2\pi \cdot G \cdot \rho_c \cdot h = 0,0419 \cdot \rho_c \cdot h \quad (\text{III.10})$$

CT= Correction de terrain (mGal)

Rappelons que la correction de terrain prend en compte les variations topographiques existantes à proximité du point de mesure. Elle est toujours positive car elle a pour effet de diminuer la gravité au point de mesure.



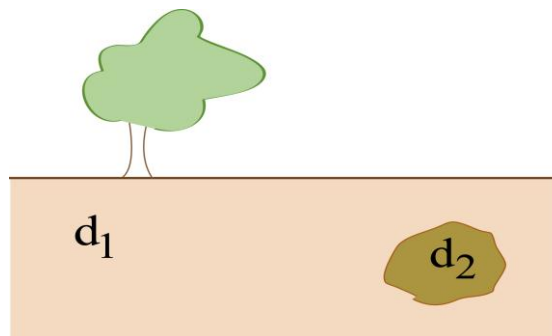
**Figure 27 : Illustration de la Correction de Terrain**



**Figure 28 : Illustration de la correction de plateau**

**b. Relation entre le champ de la pesanteur et la géologie**

Considérons un exemple géologique simple d'un minéral enfoui dans le sous-sol. Nous supposons que la densité  $d_2$  du minéral, sera plus grande que la densité  $d_1$  du sol encaissant.



**Figure 29 : Illustration du contraste de densité du sous-sol**

En laissant tomber un objet sous l'influence de la gravité, sa vitesse augmente constamment avec le temps. De ce fait, l'objet chute avec une accélération constante.

En gravimétrie, nous mesurons les variations de cette accélération dues aux champs de la pesanteur. Les variations du champ de pesanteur seraient causées par des constituants géologiques hétérogènes dans le sous-sol.

En effet, cette variation de l'accélération gravitationnelle ne dépend pas des densités des roches. Elle dépend de la différence de la densité entre le corps minéralisé et le sol encaissant.

C'est pour cela qu'on dit que le paramètre géologique adéquat n'est pas la densité, mais le contraste de densité ( $d_2 - d_1$ ).

**c. La densité des roches**

Comme nous le savons, l'objectif d'une étude gravimétrique est d'estimer la distribution de densité du sous-sol. Puisque l'on peut attribuer une densité à chaque roche, on essaiera de corrélérer la distribution de densité à une distribution des roches. Mais comme plusieurs types de roche peuvent avoir la même densité, la solution unique n'existe pas. On cherchera donc à lever cette ambiguïté en se fiant à des données de forage par exemple.

**i. Roches sédimentaires**

Les roches sédimentaires offrent une grande variabilité en termes de densité. En moyenne, les sols non consolidés ont une densité de  $2000 \text{ Kg.m}^{-3}$ , les argiles de  $2300 \text{ Kg.m}^{-3}$  et les calcaires de  $2600 \text{ Kg.m}^{-3}$  environ. Mais les conditions d'enfouissement (porosité, cimentation) peuvent faire varier ces valeurs de 10 à 30%.

**ii. Roches ignées**

Elles sont plus denses que les roches sédimentaires. Leur densité varie depuis 2600 à  $3000 \text{ Kg.m}^{-3}$ . La composition minéralogique (teneur en ferro-magnésiens) peut faire varier ces valeurs.

**iii. Roches métamorphiques**

Leur densité varie suivant:

- La roche d'origine ;
- Leur profondeur de formation;
- L'intensité des processus métamorphiques;

**iv. Métaux**

Ils sont généralement très denses:  $17000 \text{ Kg.m}^{-3}$  pour l'or,  $10000 \text{ Kg.m}^{-3}$  pour l'argent, ce qui facilite leur détection par gravimétrie dans l'exploration minière.



Le tableau ci-après montre les intervalles de densité de quelques types de roches :

**Tableau 1 : Densité de quelques roches (mGal)**

Types de roches	Intervalle de densité [g/cm <sup>3</sup> ]	Densité moyenne [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Basalte</b>	2.7-3.3	2.99
<b>Granite</b>	2.5-2.81	2.64
<b>Schistes</b>	2.39-2.9	2.64
<b>Marnes</b>	2.3-2.5	2.4
<b>Grès</b>	2.2-2.5	2.35
<b>Calcaires</b>	2.5-2.7	2.55
<b>Alluvions</b>	1.9-2	1.95

(Source : FLANDRIN J.et al, .1961) [10]

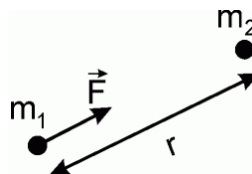
## II.2 Le magnétisme satellitaire [5] [17] [25] [20] [34]

### III.2.1. Théorie du magnétisme

La prospection magnétique est une méthode géophysique qui emploie les mesures du champ magnétique pour caractériser le sous-sol. Ainsi nous allons exposer quelques principes importants du magnétisme afin de bien comprendre les propriétés physiques des anomalies rencontrées que nous allons ultérieurement interpréter.

#### a. Force magnétique

La loi de Coulomb pour un dipôle magnétique est définie par :



**Figure 30 : Attraction entre deux pôles magnétiques**

$$\vec{F} = - \frac{m.m'}{\mu r^2} \vec{r} \quad (\text{II.11})$$

F : Force en dynes (1cm.g/cm<sup>2</sup>=10<sup>-5</sup>N)

m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub> : Masses magnétiques aux pôles (emu)

r : distance entre les deux pôles

$\vec{r}$ : Vecteur unitaire selon la droite joignant m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>

$\mu$  : Perméabilité du milieu autour des pôles ( $\mu = 1$  dans le vide et l'air)

Si deux pôles de 1 emu sont placés dans le vide à 1cm l'un de l'autre, la force entre eux sera de 1 dyne. Par convention, un pôle est positif s'il est attiré par le Nord magnétique de la terre et négatif s'il est attiré vers le Sud.

### **b. Champ magnétique**

Une masse magnétique  $m$  placée au point  $M$  de l'espace est soumise à l'attraction émanant d'une autre masse magnétique  $m'$  située à une distance  $r$  du point  $M$ . L'intensité du champ magnétique  $H$  est définie comme la force exercée sur un pôle unitaire :

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{m'}{\mu r^2} \vec{r} \quad (\text{II.12})$$

On suppose que  $m$  n'est pas assez grand pour affecter le champ  $H$  au point de mesure, c'est-à-dire :  $m \ll m'$ . En unité CGS, l'unité du champ est l'Oersted.

En, géophysique, on mesure des variations de l'ordre de  $10^{-4}$  fois l'amplitude du champ magnétique terrestre, qui est environ 0.5 Oe.

### **c. Moment magnétique**

Il n'y a pas de masse magnétique libre. Seul le dipôle, association de deux pôles  $-m$  et  $+m$  séparés d'une distance  $l$ , a une signification physique. Le moment magnétique du dipôle est un vecteur dirigé suivant la droite joignant  $-m$  à  $+m$ , orienté de  $-m$  à  $+m$  et d'intensité :

$$\vec{M} = ml\vec{r} \quad (\text{II.13})$$

### **d. Intensité de magnétisation**

Un corps magnétique placé dans un champ magnétique externe sera magnétisé par induction. L'intensité de la magnétisation est proportionnelle à la force du champ et sa direction est dans celle du champ. Elle est définie comme le moment magnétique par unité de volume :

$$\vec{I} = \frac{\vec{M}}{v} \quad (\text{II.14})$$

### **e. Susceptibilité magnétique**

La susceptibilité magnétique  $K$  est une mesure du degré auquel un matériau peut être magnétisé. Plus grande que serait la susceptibilité, plus grand serait l'intensité de la magnétisation induite et, par conséquent, plus grande serait l'anomalie produite par rapport au champ terrestre. On a :

$$\vec{I} = \kappa \vec{H} \quad (\text{II.15})$$

La susceptibilité magnétique d'un volume de roche est une fonction de la quantité de minéraux magnétiques (surtout la magnétite et la pyrrhotite) qu'elles contiennent. Les mesures de la susceptibilité magnétique peuvent donner une estimation rapide du caractère ferromagnétique de la roche. Ces mesures peuvent être interprétées comme étant des changements lithologiques ou d'homogénéité de la roche ou encore comme une indication de la présence de zones d'altération dans le massif rocheux.

Le tableau ci-après donne une idée sur la gamme de susceptibilité de quelques types de roches.

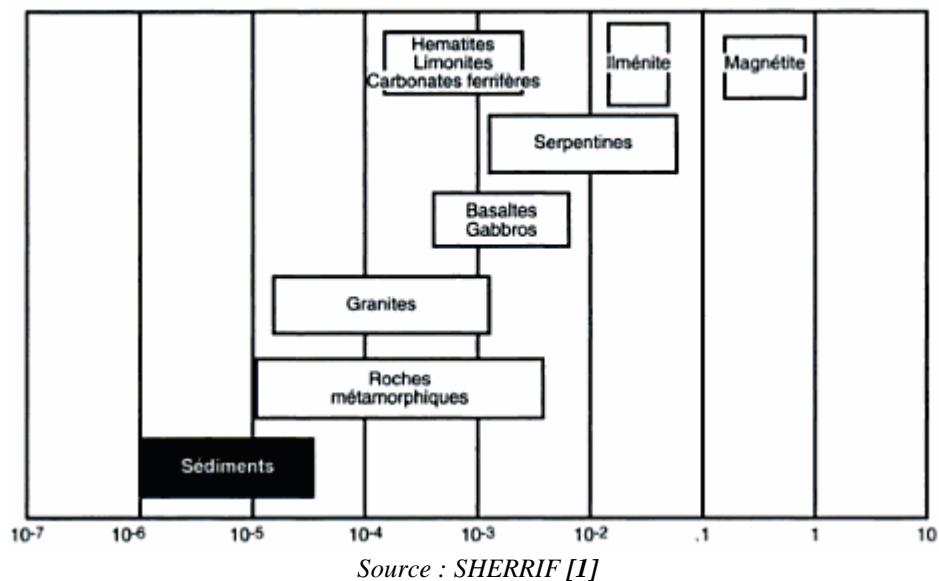


Figure 31 : Gamme des valeurs de Susceptibilités magnétiques  $K$  (CGS)

### III.2.2. Propriétés magnétiques

#### a. Aimantation des roches

Une roche est constituée par un agglomérat de minéraux, différents par leur nature, leur forme et leurs dimensions et qui sont, pour la plupart diamagnétiques ou paramagnétiques. S'ils interviennent dans l'aimantation induite, ils ne sont pas créateurs de rémanence magnétique comme peuvent l'être les minéraux ferromagnétiques.

Les roches de la croûte terrestre prennent dans le champ magnétique terrestre une aimantation induite plus ou moins importante à laquelle s'ajoute parfois une aimantation rémanente, s'il s'agit de roches à minéraux ferromagnétiques.

Tous les matériaux peuvent être classés à l'intérieur de trois groupes définissant leurs propriétés magnétiques : diamagnétisme - paramagnétisme - ferro et ferrimagnétisme.

➤ Si  $K < 0$ , on parle de diamagnétisme. L'intensité de la magnétisation induite est dans la direction opposée au champ inducteur. Phénomène faible, réversible, affecte tous les corps et souvent caché par un autre phénomène.

Ex : quartz, feldspath, sel.

➤ Si  $K > 0$ , la substance est alors paramagnétique. Comme le diamagnétisme, c'est un phénomène faible et réversible, mais tend à renforcer l'action du champ inducteur. Le champ induit décroît cependant avec la température.

Ex : métaux, gneiss pegmatite, dolomie, syénite.

La susceptibilité d'une roche est entièrement dépendante de la quantité de minéraux ferromagnétiques qu'elle contient, de la dimension des grains et de leur distribution.

### b. Champ total

La méthode de prospection est basée sur l'existence de contraste de susceptibilité magnétique dans l'écorce terrestre. Tout corps placé dans un champ magnétique externe, tel celui de la terre, acquiert une magnétisation induite proportionnelle au champ inducteur et dans la même direction.

Le champ total en unité CGS est alors :

$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{H}' = \vec{H} + 4\pi\vec{I} = (1 + 4\pi\kappa)\vec{H} \quad (\text{II.16})$$

où  $B$  : Induction magnétique

$\vec{I}$  : Intensité de la magnétisation

Le champ total mesuré est donné par la somme du champ terrestre, de la magnétisation induite et de la magnétisation rémanente.

$$\vec{H}_T = \vec{H} + 4\pi\vec{H} + \vec{M}_R \quad (\text{II.17})$$

### c. Magnétisme induit

Le champ magnétique de la terre induit le magnétisme dans les roches. Il est faible en comparaison avec un électroaimant. Le degré de magnétisme induit dépend de l'intensité du champ terrestre au point particulier ainsi que de la susceptibilité magnétique de la roche.

#### **d. Magnétisme rémanent**

En plus du magnétisme induit par le champ magnétique de la terre, quelques roches et minéraux possèdent un magnétisme rémanent qui est dû au magnétisme rémanent de leurs grains ferromagnétiques constitutants.

Dans quelques roches et minerais, le magnétisme rémanent pourrait dominer le magnétisme induit complètement et il peut être orienté dans une direction différente à celle du magnétique terrestre et il peut, en effet, être opposé au champ terrestre.

#### **e. Le champ magnétique terrestre**

On peut dire en première approximation que le champ magnétique de la Terre est celui d'un dipôle situé en son centre et dont l'axe fait un angle de  $11,5^\circ$  avec l'axe de rotation de la Terre.

Le champ magnétique terrestre  $B(S,t)$  mesuré en un point  $S$  et à l'instant  $t$  résulte de la superposition de trois champs:

- champ principal  $B_p(S,t)$
- champ d'anomalie crustal  $B_a(S)$
- champ transitoire  $B_t(S,t)$

$$\text{C'est-à-dire : } B(S,t) = B_p(S,t) + B_a(s) + B_t(s,t) \quad (\text{II.18})$$

Le champ principal est d'origine purement interne et est engendré par des courants électriques circulant dans le noyau fluide conducteur, c'est-à-dire qu'il résulte du phénomène de convection dans le noyau fluide. L'intensité du champ principal est comprise entre 25000nT et 60000nT, sa longueur d'onde est de l'ordre de quelques milliers de kilomètres. Le champ principal représente, en moyenne, les 99% du champ observé à la surface du Globe.

#### **f. Le champ d'anomalie crustal $B_a(S)$**

Le champ d'anomalie locale est d'origine superficielle. Il est dû aux roches aimantées de la croûte terrestre situées au-dessus de la surface isotherme de Curie, (à la température de Curie les propriétés magnétiques des roches disparaissent). La longueur d'onde de ce champ peut atteindre la centaine de kilomètres et son amplitude dépasse rarement 1000 nT.

#### **g. Le champ transitoire $B_t(S,t)$**

Le champ transitoire a deux origines :

- Externe: les causes sont soit des courants électriques circulant dans la partie éclairée de la couche ionosphérique, soit des déformations des lignes de force du champ terrestre causées par les variations du vent solaire.

➤ Interne: champ créé par le courant induit dans le sol lorsqu'il est conducteur.

Les sources primaires du champ d'origine externe proviennent de l'interaction entre les rayons solaires et l'environnement terrestre.

#### h. Composantes du champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre peut être défini par ses trois composantes en tout point donné : Nord, Sud, Vertical (X, Y, Z). Très souvent, on donne une valeur exprimée par la grandeur du champ total F, sa déclinaison D ainsi que son inclinaison I où D est l'angle entre la composante horizontale H du champ et le Nord géographique et I, l'angle entre F et l'horizontale.

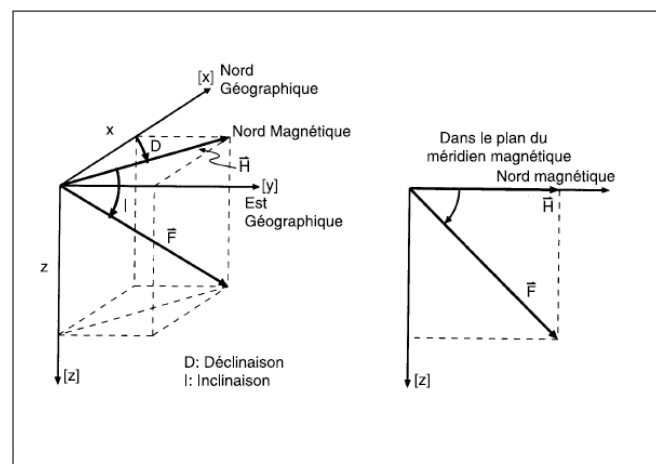
On a les relations suivantes entre les éléments du champ géomagnétique :

$$\begin{aligned}H &= F \cos I \\X &= F \cos I \cos D \\Y &= F \cos I \sin D \\Z &= F \sin I \\F^2 &= X^2 + Y^2 + Z^2\end{aligned}\quad (\text{II.19})$$

Les composantes X, Y, Z sont les composantes cartésiennes du champ magnétique, généralement utilisées pour la recherche. Les composantes H, D, Z sont les composantes cylindriques du champ magnétique, concernant les mesures relatives.

Les composantes (F, I, D) sont les composantes sphériques du champ magnétique, déterminées directement par des mesures absolues.

$\vec{F}$  a une intensité de 0.6 Oe aux pôles magnétiques ( $I = \pm 90^\circ$ ) et minimale de 0.3 Oe à l'équateur magnétique ( $I = 0^\circ$ ).



Source : CHOUTEAU M. [5]

Figure 32 : Les composantes du champ magnétique terrestre

### **III.2.3. La prospection magnétique**

#### **a. L'anomalie magnétique**

Un corps magnétique produira un effet magnétique à la surface et l'amplitude ou l'intensité de l'anomalie magnétique et également la forme de l'anomalie sont en rapport direct quelconque avec la teneur en minéral magnétique, la taille, la profondeur et la forme du corps enterré. Il sera, de plus apprécié que, si certaines roches sont relativement plus ou moins magnétiques que d'autres, elles deviennent par la suite possibles de faire la distinction entre ces roches différentes même si elles sont cachés sous une couverture.

#### **b. Utilisation de la méthode magnétique en exploration pétrolière**

La méthode magnétique permet de faire :

- les études régionales des bassins sédimentaires à partir des anomalies en vue de la création de la carte structurale ;
- l'estimation de l'épaisseur des séries sédimentaires ;
- l'étude des structures géologiques qui pourraient indiquer la présence d'un piège de pétrole ou de gaz, ou qui pourraient avoir influencées le dépôt et la concentration des minéraux économiques ;
- l'interpolation entre les affleurements sans être obligé de forer ou de creuser ;
- la détection indirecte des pièges structuraux comme les failles et les plis.

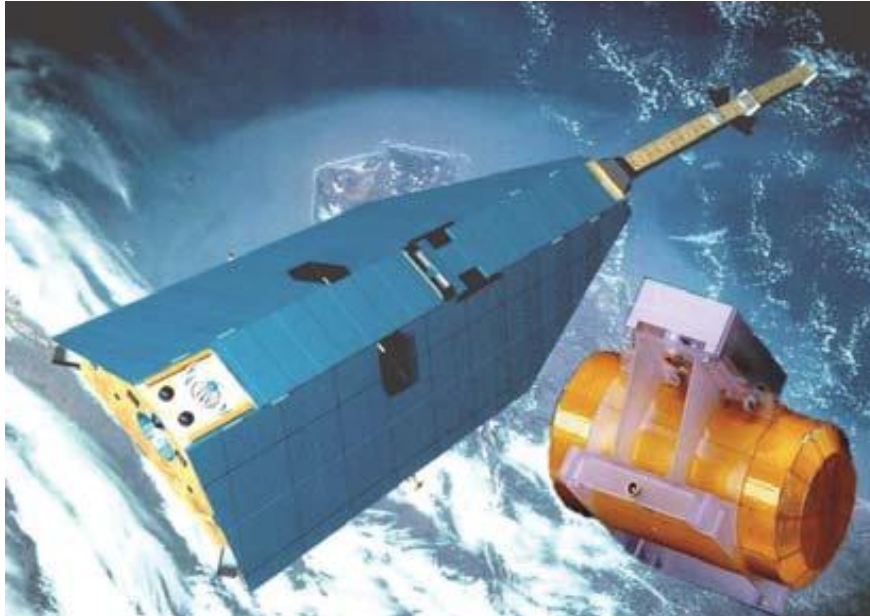
### **III.2.4. Le magnétisme satellitaire**

Avant l'ère spatiale les relevés sur les caractéristiques régionales du champ magnétique terrestre sont rares ou absentes. Les satellites POGO (Polar Orbiting Geophysical Observatory) et OGO (Orbiting Geophysical Observatories) 2, 4, et 6 satellites de la NASA effectuent entre octobre 1965 et juin 1971 des mesures globales de l'intensité du champ magnétique terrestre et des modèles sont construits à partir des données de POGO.

Avant le lancement de POGO, on considérait qu'il était impossible de détecter les anomalies magnétiques depuis l'espace. En analysant les données de ce satellite, les scientifiques se rendirent compte que les instruments du satellite avaient pu détecter des variations du champ magnétique local lorsqu'il survolait la Terre à basse altitude.

La mesure du champ magnétique terrestre par satellite se fait grâce au magnétomètre embarqué sur le satellite. Les anomalies magnétiques détectées sont le reflet de caractéristiques géologiques majeures telles que la composition des roches, le magnétisme rémanent et la structure géologique à une échelle régionale.





Source : <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/>

**Figure 33 : Satellite Allemand CHAMP embarquant un magnétomètre (en gros plan à droite)**

### III. PRESENTATION ET ACQUISITION DES DONNEES

#### III.1. Images LandSat [36]

##### III.1.1. Présentation

Les images satellites que nous utiliserons lors de notre étude sont celles de la génération LANDSAT.

LANDSAT-1 était le premier satellite d'observation de la Terre (EOS : Earth Observation Satellite), lancé par les Etats-Unis en 1972. Il est reconnu pour son aptitude à observer la Terre depuis l'espace. Ses qualités ont accentué l'importance de la télédétection dernière cri.

Après LANDSAT-1, LANDSAT-2, 3, 4, 5, 7 ont été lancés. LANDSAT-5 est équipé d'un scanner multispectral (MSS : Multispectral Scanner) et du Thematic Mapper(TM). MSS est un capteur optique qui observe les rayonnements solaires réfléchis depuis la surface de la Terre dont quatre bandes spectrales, utilisant une combinaison du système optique et du capteur.

Le TM est une version plus avancée du MSS qui observe la surface de la Terre dont sept bandes spectrales du visible à l'infrarouge thermique. De plus, le TM a une résolution d'image plus haute, une fidélité géométrique améliorée, et une plus grande précision radiométrique. Le TM a à sa disposition sept bandes qui enregistrent simultanément les

radiations réfléchies ou émises depuis la surface de la Terre dont le BLEU (bande1), le VERT (bande2), le ROUGE (bande3), LE PROCHE INFRAROUGE (bande4), le MOYEN INFRAROUGE (bande 5 et bande 7) et LE PROCHE INFRAROUGE (bande6).

La bande 1 peut pénétrer l'eau pour faire de la bathymétrie le long des côtes et différencie bien le sol et la végétation. La bande 2 peut quant à elle détecter la réflectance du vert correspondant à la biomasse verte. La bande 3 est en revanche employée pour percevoir l'absorption du chlorophylle dans la végétation.

Après le TM, LANDSAT 7 a été lancé avec succès, il est équipé du ETM<sup>+</sup> (Enhanced Thematic Mapper Plus) le successeur du TM, les bandes spectrales d'observations sont les mêmes que ceux du précédent, seulement a été ajoutée une bande panchromatique avec une résolution de 15m.

Les Caractéristiques spectrales de Landsat ETM<sup>+</sup> sont les suivantes :

**Tableau 2 : Caractéristiques spectrales de Landsat ETM<sup>+</sup>**

CAPTEUR	GAMME DE BANDE(m)	LOCALISATION SPECTRALE	RESOLUTION (m)
ETM+	B1 :0.45-0.52	BLEU	30×30
	B2 :0.52-0.60	VERT	30×30
	B3 :0.63-0.69	ROUGE	30×30
	B4 :0.76-0.90	PROCHE IR	30×30
	B5 :1.55-1.75	MOYEN IR	30×30
	B6 :10.4-12.5	IR THERM	60×60
	B7 :2.08-2.35	MOYEN IR	30×30
	P :0.50-0.90	VISIBLE ET PROCHE IR	15×15

(Source : <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook>)

### **III.1.2. Mode d'acquisition des images**

Les images utilisées ont été téléchargées sur internet. Elles sont disponibles sur le site du GLCF (Global Land Cover Facility). Les diverses bandes existantes dans ce site sont des images déjà prêtes pour l'utilisation. Elles sont en format GEOTIFF et sont géoréférencées en coordonnées UTM.

Elles sont rangées en colonnes et en lignes pour constituer une scène. Les scènes recouvrant notre zone d'étude sont les suivantes : p160r75, p160r76, p161r75 et p161r76.

### III.2. Les données gravimétriques obtenues par altimétrie satellitaire : la grille EGM08 [15] [19] [26]

#### III.2.1. Présentation

Les données gravimétriques obtenues par altimétrie satellitaire utilisées lors de notre étude proviennent du modèle gravimétrique officiel EGM2008 qui a été rendu publique par l'*U.S.National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) EGM Development Team*.

Les données ont été collectées, informatisées et mises à la disposition du publique par le BGI (Bureau Gravimétrique Internationale).

Les anomalies de gravité formant la grille EGM05 sont des anomalies de gravité moyenne calculée par intégration numérique.

En effet, à partir du moment où les anomalies de gravité sont mesurées à différentes altitudes, leur calcul et leur définition peuvent varier d'un pays à l'autre. Afin de mener à bien le calcul de la valeur moyenne, des lacunes de données sont parfois remplies avec les valeurs calculées sur la base des informations topographiques et de la densité. Ces anomalies sont appelées géophysiquement valeurs prédites.

Ce modèle gravimétrique correspond à l'harmonique sphérique de degré et d'ordre égal à 2159, et contient des coefficients additionnels s'étendant jusqu'au degré égal à 2190, toujours d'ordre égal à 2159. Le calcul des valeurs de l'ondulation du Géoïde se rapporte à l'ellipsoïde de référence WGS84.

Les constantes utilisées pour définir cet ellipsoïde et la gravité normale associée sont:

- $a = 6378137,00$  m (semi-grand axe de l'ellipsoïde WGS 84)
- $f = 1/298,257223563$  (aplatissement de l'ellipsoïde WGS 84)
- $GM = 3,986004418 \times 10^{14} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$  (Constante de gravitation et Masse de la Terre)
- $\omega = 7.292.115 \times 10^{-11}$  radians/sec (vitesse angulaire de rotation de la terre)

Les satellites qui ont permis d'effectuer les mesures sont les satellites Topex-Poséidon et ERS1-2. Ces nouveaux satellites altimétriques fournissent maintenant des données avec une précision de 2 cm, soit 5 à 10 fois mieux qu'il y a 20 ans.

#### III.2.2. Mode d'acquisition des données

Comme il est mentionné précédemment, nos données gravimétriques ont été fournies par le B.G.I. Son rôle est de collecter, à l'échelle mondiale, les mesures du champ de gravité terrestre et les informations y associées, de les compiler et les archiver dans une base de données informatisée, afin de de les redistribuer.

Ainsi, les données sont téléchargeables sur internet sous forme ASCII. Nous avons ainsi téléchargé les valeurs de l'anomalie de Bouguer de notre zone définie par sa latitude et sa longitude.

### **III.3. Les données magnétiques satellitaires : la grille EMAG2 [17] [30] [34]**

#### **III.3.1. Présentation**

Depuis le début de la conquête spatiale, des mesures magnétiques ont été réalisées par de nombreux satellites. Ces mesures ont été faites à la fois en orbite à basse altitude, destinées à la cartographie du champ magnétique d'origine interne, et à haute altitude destinées à l'étude de la magnétosphère.

La collecte de données de bonne qualité en quelques jours par un satellite en orbite polaire à basse altitude équipé de magnétomètres vectoriels et de magnétomètres absolus donne un aperçu complet du champ magnétique de la Terre interne aussi bien qu'externe.

Actuellement, la génération la plus récente de la grille magnétique est celle provenant de la grille globale EMAG2. EMAG2 est un mis à jour important du précédent grille magnétique mondial. La résolution a été améliorée de 3 arc min à 2 arc min, et l'altitude a été réduite de 5km à 4km en haut de la géoïde.

Ces valeurs ont été compilées avec des données satellitaires, des données marines, des données aéromagnétiques et des données terrestres.

L'un des avantages des mesures réalisées depuis l'espace est qu'elles permettent une couverture globale uniforme et dense, qui ne peut être obtenue depuis la surface.

#### **III.3.2. Mode d'acquisition**

Les données EMAG2 sont disponibles sur internet. Il existe différentes types de fichiers téléchargeables selon les besoins. Celles-ci peuvent être des cartes ou sous forme ASCII.

Pour notre cas, nous avons téléchargé la version ASCII de l'anomalie magnétique terrestre. Ainsi, les valeurs présentées sont celles recouvrant plus ou moins la totalité du globe. Nous avons ensuite extrait les valeurs utiles pour notre zone d'étude.

Il est à noter que ce sont des données qui ont déjà été corrigées donc prêtes pour interprétation.

Le tableau ci-après montre les types de fichiers disponibles à télécharger :

**Tableau 3 : Fichiers téléchargeables disponibles d'EMAG2**

TYPE	FORMAT	MBYTE	CONTENUS
Carte haute résolution	PDF	160	EMAG2 : Un Poster (version 2.0)
Carte haute résolution	JPG	160	EMAG2 : Un Poster (version 2.0)
Carte haute résolution	JPG	145	EMAG2 : Une image (version 2.0)
Article	JPG	10	EMAG A2-arc minute resolution Earth Magnetic Anomaly: Un manuscrit de la grille compilé avec les données magnétiques satellitaires, aéroportées, marine pour la publication en Géochimie, Géophysique
Google-Earth	KMZ	0.1	Plugging pour google Earth
XYZ ZIP	Zipped ASCII	442	EMAG2 (version 2.0) ASCII grille des anomalies du champ magnétique total à 4Km au-dessus de l'ellipsoïde WGS84
GMT grd	NET COF	228	GMT (Generic Mapping Tools) compatible netCOF grid avec une resolution de 2 arc-minutes.
Color relief	GEOTIFF	132	Un 24-bit RG8 : Image géoréférencée (GeoTIFF) pour une visualisation en couleur de relief de la grille EMAG2 pouvant être ouverte avec ArcGIS

(Source : <http://www.geomag.org/models/emag2.html>,)

**PARTIE III :**

**TRAITEMENTS, RESULTATS**

**ET INTERPRETATIONS**

Nous allons consacrer cette dernière partie aux traitements et interprétations des résultats au terme desquels trois modèles seront présentés. Les interprétations se baseront sur la synthèse des différents traitements dont le but est notamment de présenter les zones probables de formation de gisement pétrolière.

## **I. LES LOGICIELS UTILISES**

Le traitement des données est réalisé grâce à des logiciels spécifiques pour chaque domaine. Les données géophysiques sont traitées avec le logiciel Geosoft 6.4 tandis que tous les traitements d'images satellites sont réalisés avec le logiciel ENVI 4.5. Les différentes cartes qui seront ultérieurement interprétées sont finalement réalisées avec le logiciel ArcGis10.

### **I.1. Le logiciel Oasis Montaj 6.4 (Geosoft) [35]**

Oasis Montaj de Geosoft est un logiciel de traitement de données et de cartographie. Il permet de gérer, manipuler, visualiser et cartographier les données géoréférencées dans le domaine des Sciences de la Terre. Il fournit un environnement optimal pour l'intégration, la visualisation et la comparaison de grands volumes de données. Il a aussi des extensions qui apportent des fonctions complémentaires telles que l'analyse géophysique, géochimique ou géologique.

### **I.2. Le logiciel ENVI 4.5 [38]**

Le logiciel ENVI est un logiciel commercial complet de traitement d'images de télédétection. Toutes les méthodes de traitement d'image, de classification et de mise en page cartographique sont présentes.

D'autres outils relatifs à la visualisation et à la modélisation de données topographiques sont aussi disponibles.

### **I.3. Le logiciel ArcGis10 [37]**

ArcGis est un système regroupant des logiciels clients tels qu'ArcView, ArcEditor, ArcInfo et ArcExplorer et des logiciels serveurs ArcSDE et ArcIms. C'est un logiciel SIG (Système d'Information Géographique) permettant de visualiser, d'interroger, d'analyser et de mettre en page les données. Il fournit des outils interactifs pour explorer, sélectionner, afficher, éditer, analyser, symboliser et classifier les données ou pour créer automatiquement, mettre à jour ou gérer les métadonnées grâce aux composants ArcCatalog, ArcMap et ArcToolBox.



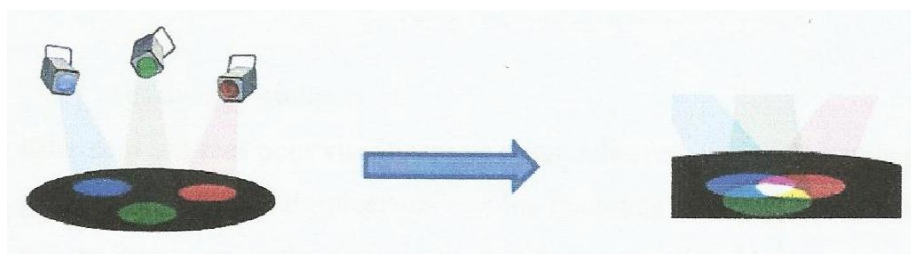
## II. TRAITEMENTS

### II.1. Traitement des images LANDSAT7 ETM<sup>+</sup>

#### II.1.1. La composition colorée

Chaque bande dans le domaine multispectral est visualisée en niveaux de gris. Les compositions colorées permettent de produire des images en couleur en tenant compte de la signature spectrale des objets. On combine parfois deux ou trois bandes. L'objectif est de faciliter l'interprétation et l'analyse tout en essayant d'extraire le maximum d'informations.

Les couleurs primaires additives sont le bleu, le vert et le rouge. Elles sont accommodées de façon à ce qu'elles produisent le jaune, le magenta et le cyan. Ces trois couleurs sont combinées pour avoir le blanc.



**Figure 34 : Synthèse additive de la couleur**

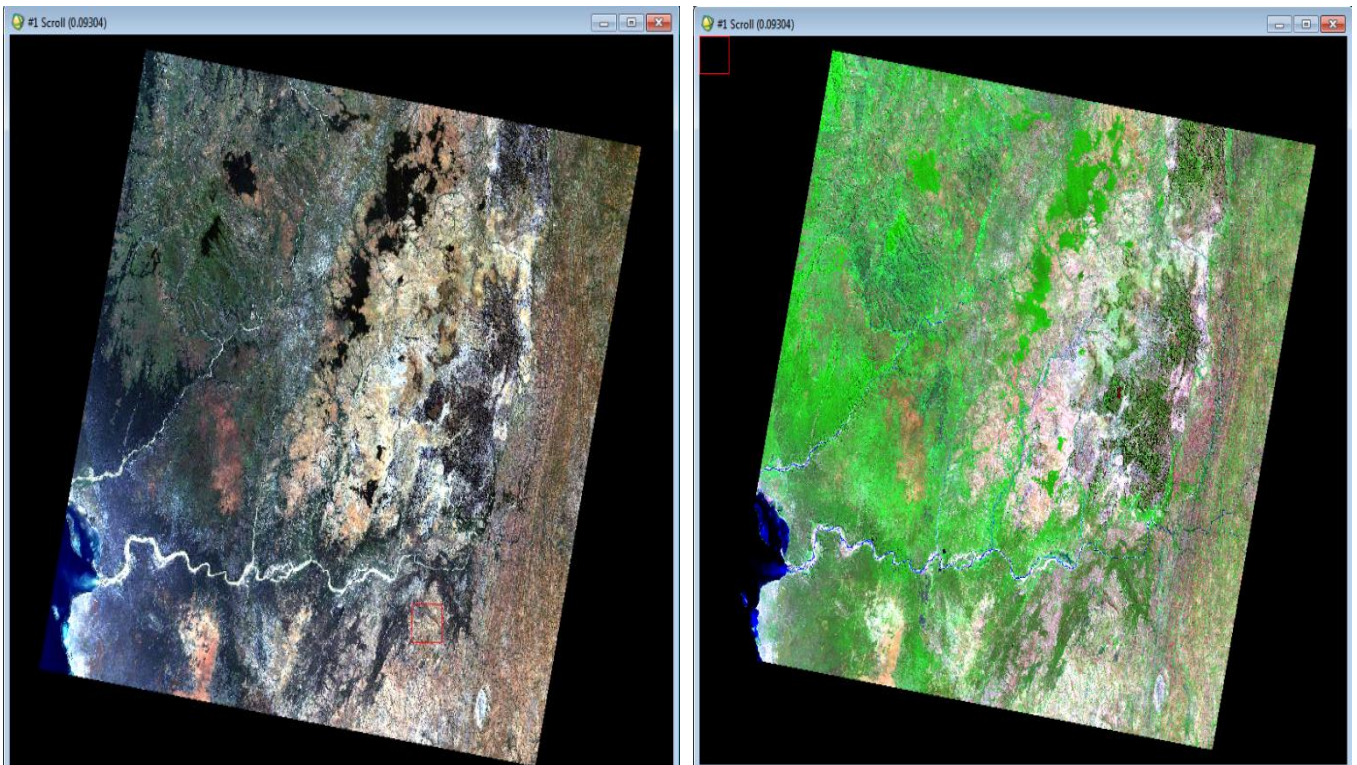
On obtient ces compositions en attribuant les bandes spectrales aux trois composantes couleurs de base.

**Tableau 4: Exemples de composition colorée**

Couleur	Bleu	Vert	Rouge
Naturelle	B1	B2	B3
Infrarouge	B2	B4	B7

(Source : <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook>)

La composition 321 est dite composition en couleur naturelle. Autrement, elle est dite en fausse couleur.



**Figure 35 : Une scène en composition colorée 321 (à gauche) et 742 (à droite) sur ENVI4.5**

### **II.1.2. Traitement et photo-interprétation**

Au terme du traitement proprement dit, on a deux traitements possibles avec le logiciel ENVI : la classification et la composition colorée. Nous avons opté pour la composition colorée en couleur naturelle 321 et en fausse couleur 742 puis nous avons utilisé l'option mosaïque pour corrélérer les cinq scènes. L'image obtenue est ensuite exportée vers le logiciel ArcGis en vue de l'élaboration des cartes et pour les différentes superpositions.

La photo-interprétation des images est fondée sur deux descripteurs principaux : le spectre, qui détermine la teinte ou la couleur des objets, qu'elles soient visibles directement ou artificiellement et la morphologie accessible en deux ou trois dimensions. Il s'agit de la forme des objets et de leur mode dominant, de leur type, de leur taille, de leur orientation. Le but de notre traitement est de tracer les structures observées telles que les failles.

### **II.2. Réalisation de la carte du MNT**

La carte du MNT a été réalisée avec le logiciel ArcGis grâce aux données SRTM par les scènes, p160r75, p160r76, p161r75 et p161r76. Ces données sont des données satellitaires disponibles également sur le site du GLCF. La carte réalisée permet ainsi la visualisation en relief du terrain et facilite la localisation des structures comme les linéaments et les failles.



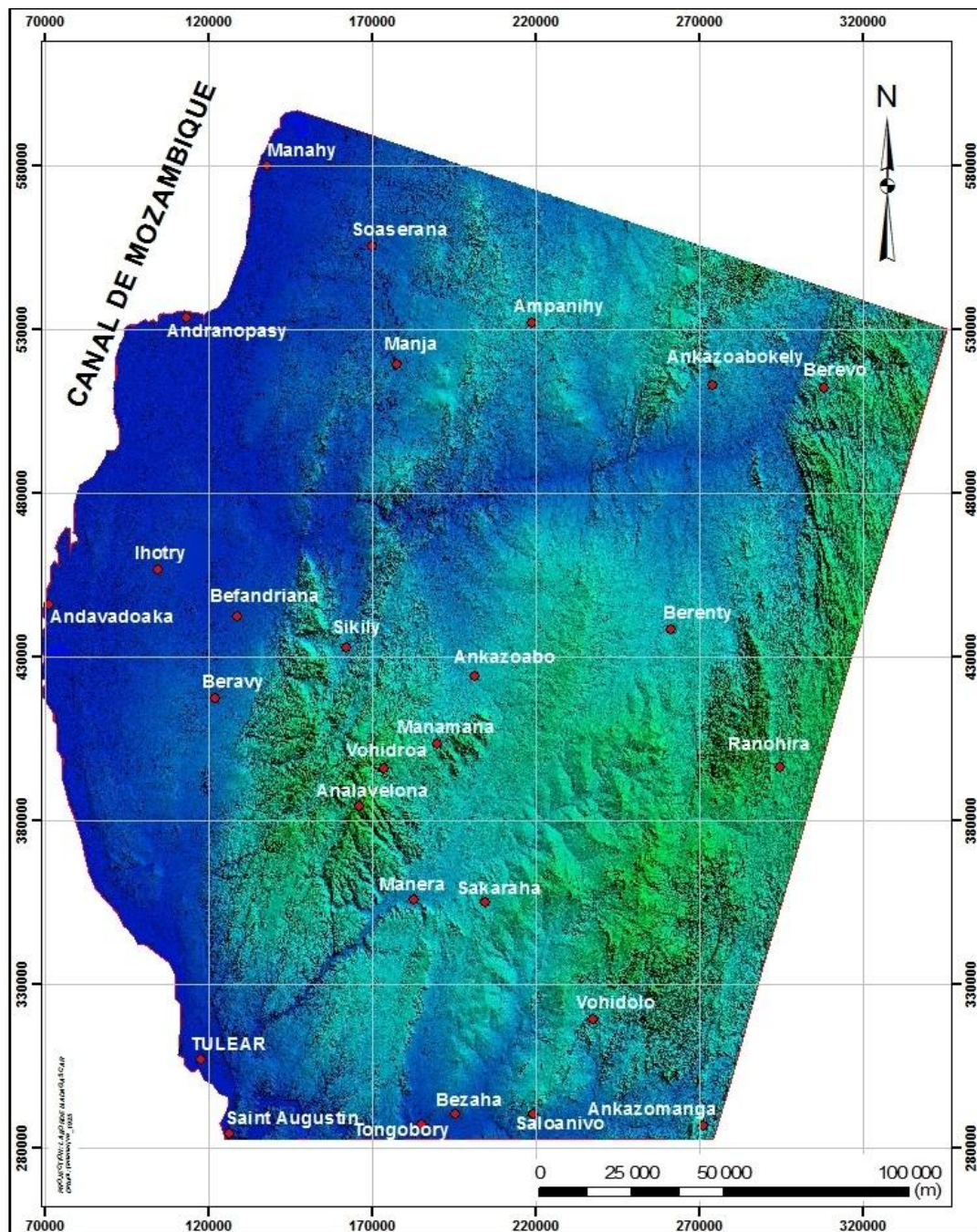


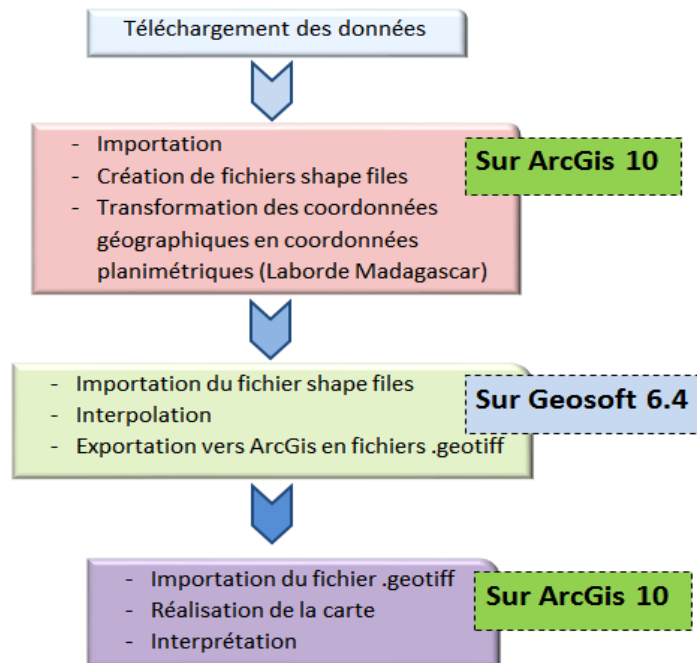
Figure 36 : Carte du MNT de la zone d'étude sur ArcGis10

### II.3. Traitement des données gravimétriques

#### II.3.1. Carte d'anomalie de Bouguer

Le traitement se fait à l'aide du logiciel OASIS Montaj 6.4 puis l'image a été exportée vers le logiciel ArcGis10 qui permet la superposition des différentes données en vue de l'élaboration de la carte.

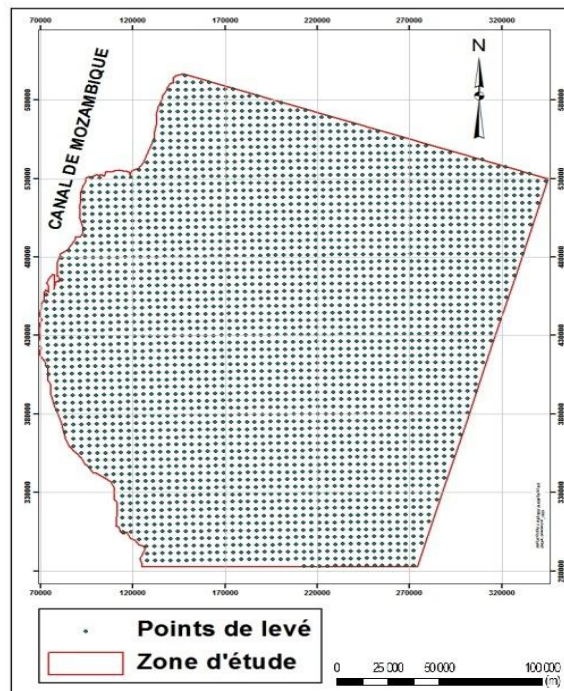
Le diagramme ci-après résume les étapes de traitements :



*Figure 37 : Illustration des étapes de traitements des données gravimétriques*

**a. Importation des données téléchargées**

Dans le cadre de cette étude, nous avons plus de 4250 points représentés chacun par ses coordonnées et la valeur de l'anomalie correspondante. La carte suivante montre la répartition des points de levés :



*Figure 38 : Carte montrant les points de levé*

### **b. Interpolation**

Les valeurs des anomalies de Bouguer sont importées sur Geosoft 6.4 puis interpolées grâce à la fonction « GRID » en vue d'obtenir la carte d'anomalie de Bouguer.

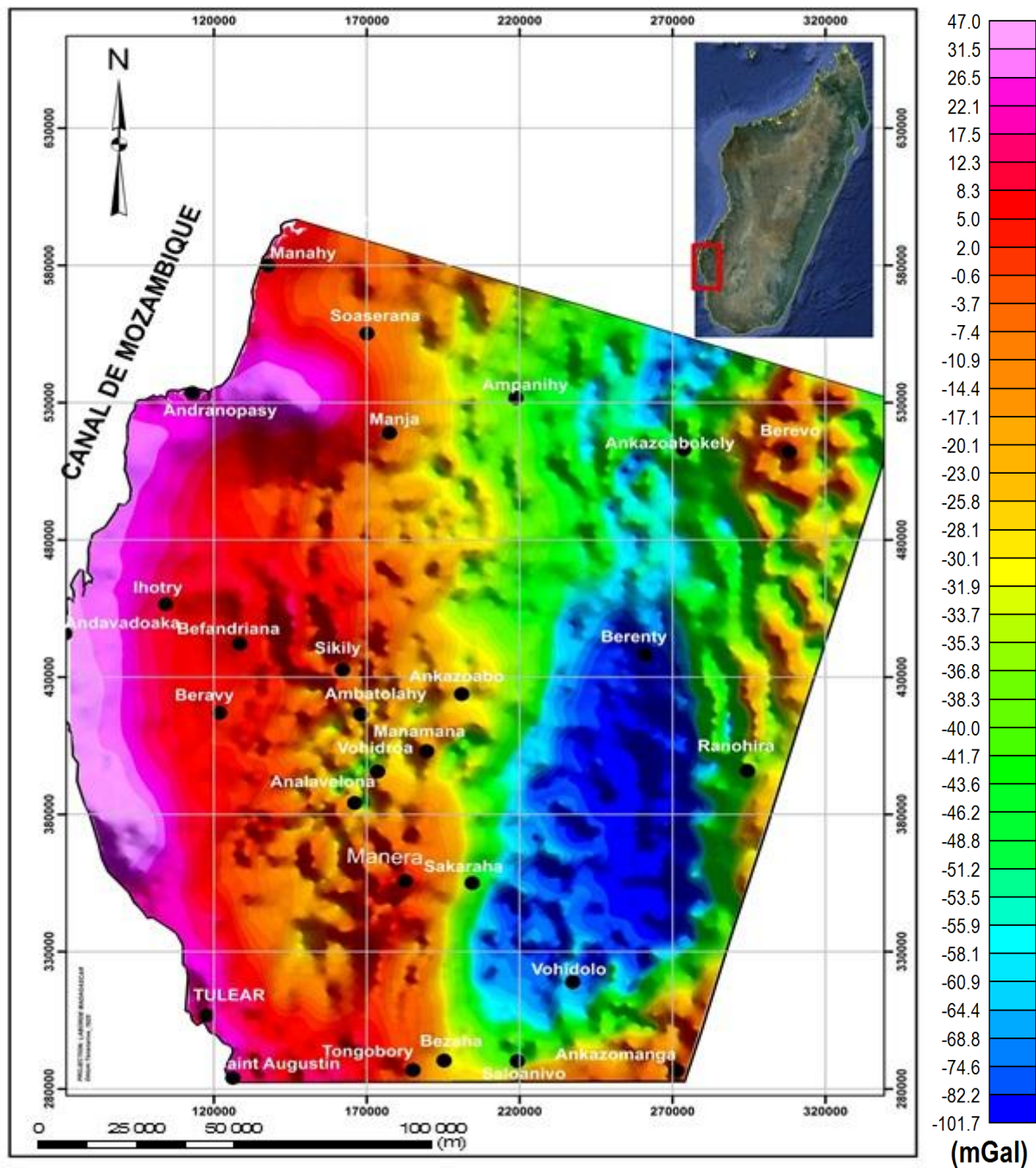
Il existe plusieurs méthodes d'interpolation telles que le modèle maillé régulier, krigeage, splines et triangulation. Parmi ces différentes méthodes d'interpolation, nous avons opté pour la méthode par krigeage. Le krigeage se distingue par ses caractéristiques d'estimation non-biaisée et par la faible valeur de la variance associée (Gratton, 2002; Chilès, 2004; Guillot, 2004; Bishop et al., 2006). De plus, c'est le modèle géostatistique le plus utilisé pour interpoler des données en sciences de l'environnement et de la terre (Bobbia, Mietlicki et al., 2000; Brochu et al., 2002; Baillargeon, 2005). C'est une méthode géostatistique qui permet l'estimation de valeurs locales en considérant l'organisation spatiale des variables étudiées. Elle peut générer des surfaces estimées à partir d'un échantillon de points géoréférencés ; et selon que l'on connaît ou non la moyenne du champ à estimer. Ainsi, nous avons effectué l'interpolation par Krigeage avec une maille de 500 m.

### **II.3.2. Carte de déconvolution d'Euler**

Cette opération consiste à localiser et à identifier les sources responsables des anomalies géophysiques observées en surface. Elle se porte sur la détermination des structures géologiques et à déterminer la profondeur des sources responsables des différentes anomalies observées sur les cartes en utilisant la relation d'homogénéité d'Euler.

Le traitement a été réalisé avec le logiciel Geosoft grâce à la fonction « Euleur3D » en choisissant une maille de 1Km et d'indice structural égal à 1. L'ensemble a été ensuite exporté vers le Logiciel ArcGis10 pour l'élaboration de la carte.

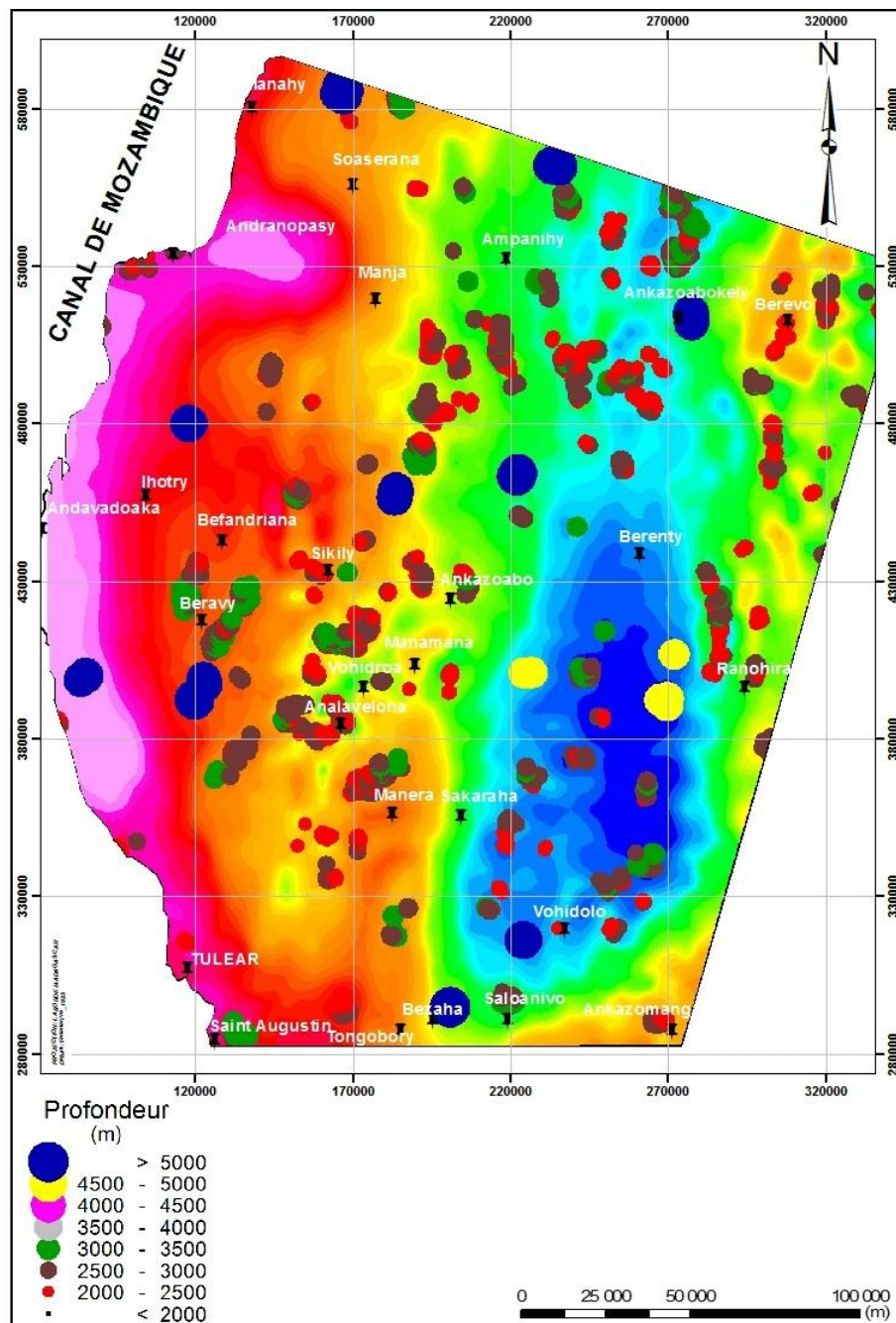




**Figure 39 : Carte de l'anomalie de Bouguer**

Du point de vue général, on remarque que l'anomalie de Bouguer croît du centre en allant vers la côte Ouest, elle varie de -101 à 47 mGal. La plus remarquable est celle d'Andranopasy ayant une forme arrondie et pointue.

La partie centrale et Est de notre zone est dominée par des anomalies négatives, les plus remarquables sont celles de Vohidolo et aux alentours de Berenty, elles ont une forme ovale de direction Nord - Sud dont l'intensité varie entre -80 à -56mGal (couleur bleue). Ces zones ont un intérêt particulier pour la recherche des gisements pétroliers.



**Figure 40 : Carte de déconvolution d'Euler**

La carte de déconvolution d'Euler obtenue par la gravimétrie permettrait tout de suite d'estimer la profondeur du substratum.

En général, la carte indique que la source est plus ou moins répartie dans toute la zone d'étude excepté la partie côte-ouest. La profondeur des anomalies se situerait entre 2500 à 3500m.



Néanmoins, nous remarquons des profondeurs allant de 4500m à plus de 5000m comme dans la zone de la fosse du Karroo aux alentours de Bezaha et de Vohidolo. Celles-ci seraient respectivement dues à la faille de l'Ilovo et à la fosse du Karroo.

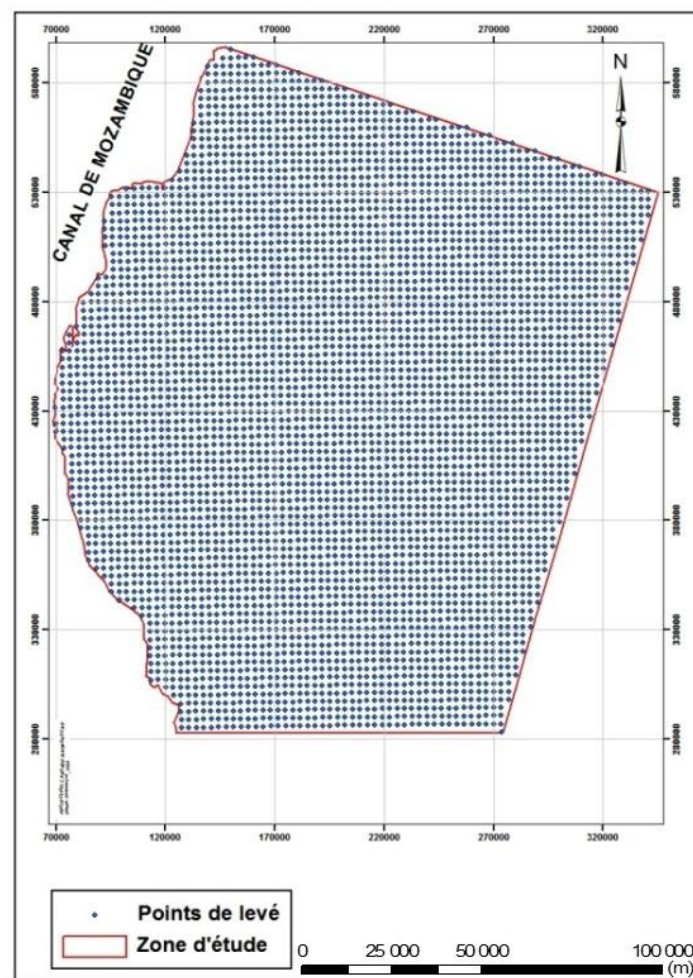
Les grandes profondeurs localisées dans la côte-ouest seraient dues au passage des failles de Tuléar et de Befandriana, tandis que celles localisées dans la partie centrale sont dues aux failles de Sikily et de l'Ilovo.

Ceci témoignerait donc de la puissance très élevée des sédiments existants et la possibilité d'abaissement du socle.

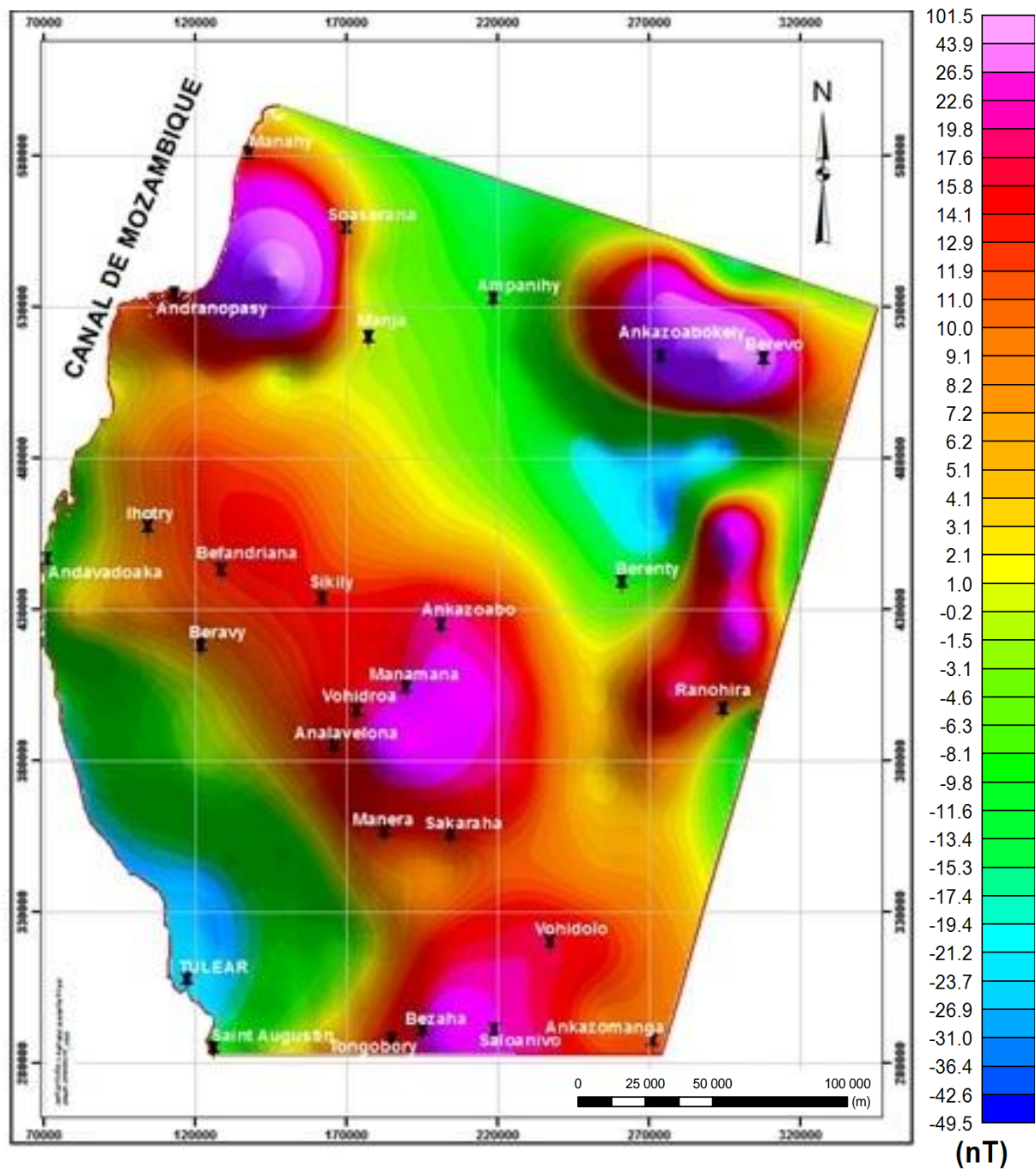
## **II.4. Traitement des données magnétiques**

### **II.4.1. Carte de l'anomalie magnétique**

La réalisation de la carte d'anomalie magnétique est semblable à celle de l'anomalie de Bouguer et traitée par les mêmes logiciels. Nous avons plus de 6600 points de levé et l'interpolation a été réalisée par méthode krigeage avec une maille de 250m.



*Figure 41 : Carte montrant les points de levé*



**Figure 42 : Carte de l'anomalie magnétique de la zone d'étude**

Les valeurs de l'anomalie observées varient de -49 à 101 nT, dans laquelle on a remarqué cinq lobes d'anomalie positive et deux lobes d'anomalie négative.

Une forte anomalie positive de forme ovale, de direction S-E – N-E, est entourée d'anomalie plus faible et se trouve dans la partie centrale et dans la partie Sud de la zone d'étude. Elle pourrait être interprétée comme un volcan suivi de ses coulées de laves dans laquelle le taux de magnétite est très élevé.

D'autres fortes valeurs d'anomalies magnétiques positives de forme ovale et pointue sont également localisées à proximité d'Andranopasy, d'Ankazoabokely et entre Ranohira et Berenty, elles correspondraient à un volcan mais également à un dyke.

Le côté Sud-Ouest et la partie Nord de notre zone sont dominés par des anomalies magnétiques négatives plus ou moins uniforme (couleur verte sur la carte).

#### II.4.2. Carte de déconvolution d'Euler

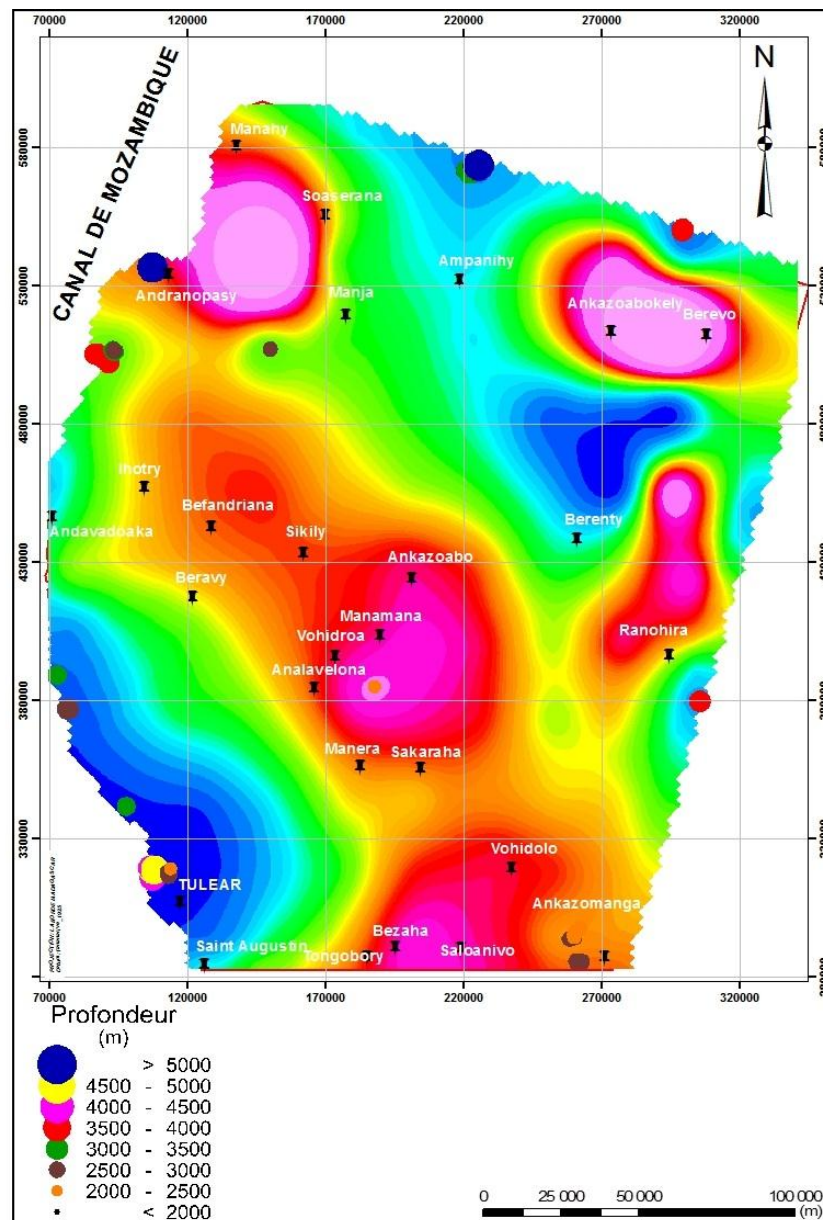


Figure 43 : Carte de déconvolution d'Euler

La carte de déconvolution d'Euler obtenue à partir des anomalies magnétiques est réalisée de la même façon que celle de l'anomalie gravimétrique, de même elles sont traitées par des mêmes logiciels.

Nous constatons que les sources d'anomalies sont surtout localisées le long de la bordure de notre zone. Ce qui amènerait à avancer que les anomalies détectées sont d'une échelle régionale et non locale. En effet, du point de vue structural, nous constatons que les anomalies ne répondent pas à l'existence des éléments majeurs comme les failles et la fosse du Karroo, on en déduit que ces formations sont diamagnétiques.

Néanmoins, nous pourrions avancer que la source qui aurait entraîné l'intrusion d'Andranopasy se trouverait à plus de 5000m (couleur bleue sur la carte de déconvolution d'Euler). Aux alentours d'Analavelona, la source de l'anomalie est localisée à une profondeur située entre 2000 et 2500 m.

La profondeur des anomalies dans la partie Sud-Ouest est estimée entre 2500 à 3500m, mais pourrait atteindre une profondeur de 5000m. Nous pourrions avancer que ceci serait dû au passage de la faille de Tuléar. En effet, cette partie constitue le compartiment abaissé à l'ouest de la faille de Tuléar, dans laquelle on a noté un changement brusque de faciès de l'Eocène, calcaire à l'Est et devient marneux à l'Ouest [02].

#### **II.4.3. Carte du signal analytique**

L'indépendance de la direction d'aimantation des sources magnétiques est une caractéristique importante du signal analytique. Son amplitude est simplement liée à l'amplitude de la magnétisation. Le signal analytique est défini par la formule ci-après :

$$F = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2} \quad \text{(III.1)}$$

Avec :

F : Signal analytique

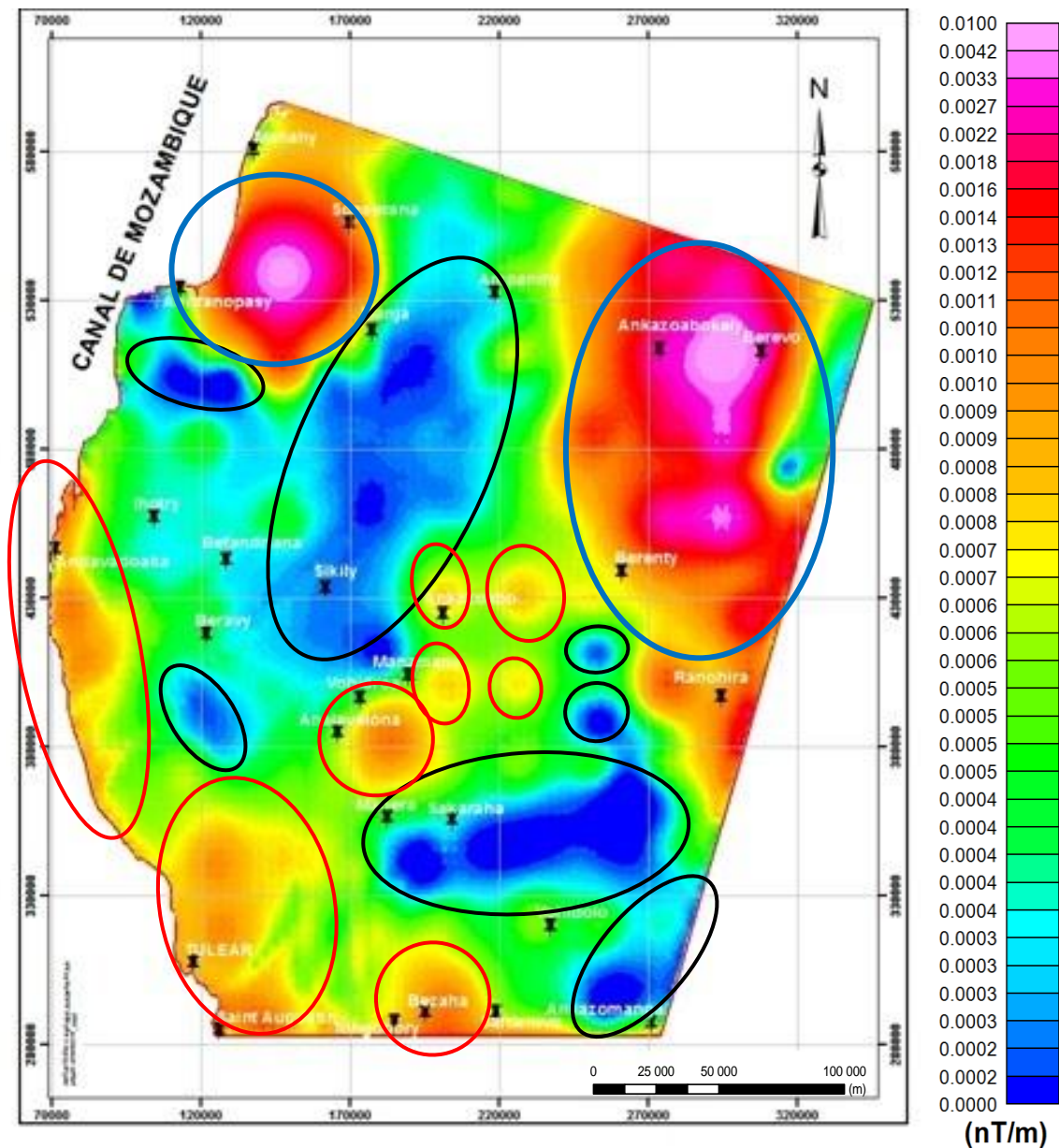
$\frac{\partial f}{\partial x}$  : Première dérivée horizontale avec azimuth égal=0

$\frac{\partial f}{\partial y}$  : Première dérivée horizontale avec azimuth égal=90

$\frac{\partial f}{\partial z}$  : Première dérivée verticale

La carte du signal analytique a été réalisée avec le logiciel Oasis Montaj 6.4 grâce au programme « GRID » inclus dans le logiciel. Elle permet de délimiter les différentes formations géologiques. Dans le cas général, les formations ayant des signaux analytiques élevés se caractérisent par des intrusions basaltiques.





**Figure 44 : Carte du signal analytique**

La carte du signal analytique permettrait de distinguer quatre zones:

- Une forte valeur du signal analytique rencontrée dans la partie Nord-Ouest et Nord-Est aux alentours d'Andranopasy et de Berenty (Zone 1 entourée en bleu sur la carte);
- Des signaux relativement faibles (couleur bleue) localisés dans la partie Sud-est aux alentours de Sakaraha et d'Ankazomanga mais également dans la partie centrale entre Beravy et Ampanihy en passant par Sikily (Zone 2 entourée en noir sur la carte); ;
- Des signaux plus ou moins faibles longeant la côte-Ouest, le Sud et une partie centrale de notre zone (Zone 3 entourée en rouge sur la carte) ;
- Le reste est caractérisé par une valeur plus ou moins constante (Couleur verte).

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

#### **III.1. Interprétations tectono-structurales**

La superposition des images satellites (composition 321 et 742) avec le MNT et la carte structurale de Besairie ont permis d'obtenir des informations supplémentaires sur les structures existantes sur terrain.

Les failles et les formations identifiées sur la carte tectono-structurale ont une correspondance avec les indices spectrales des images satellites et avec le modèle numérique de terrain. Les failles sont nettement observées avec la composition couleur 742.

Nous constatons qu'en générale, les failles suivent une direction NNE-SSO dominée par la faille de l'Ilovo et la faille du Sikily.

Dans la partie Ouest, les éléments directeurs sont les failles de Tuléar de direction Mozambique et la faille de Befandriana de direction N-S. A l'Ouest de ces failles s'étend un bassin côtier subsident où les faciès deviennent argileux ou marneux [02].

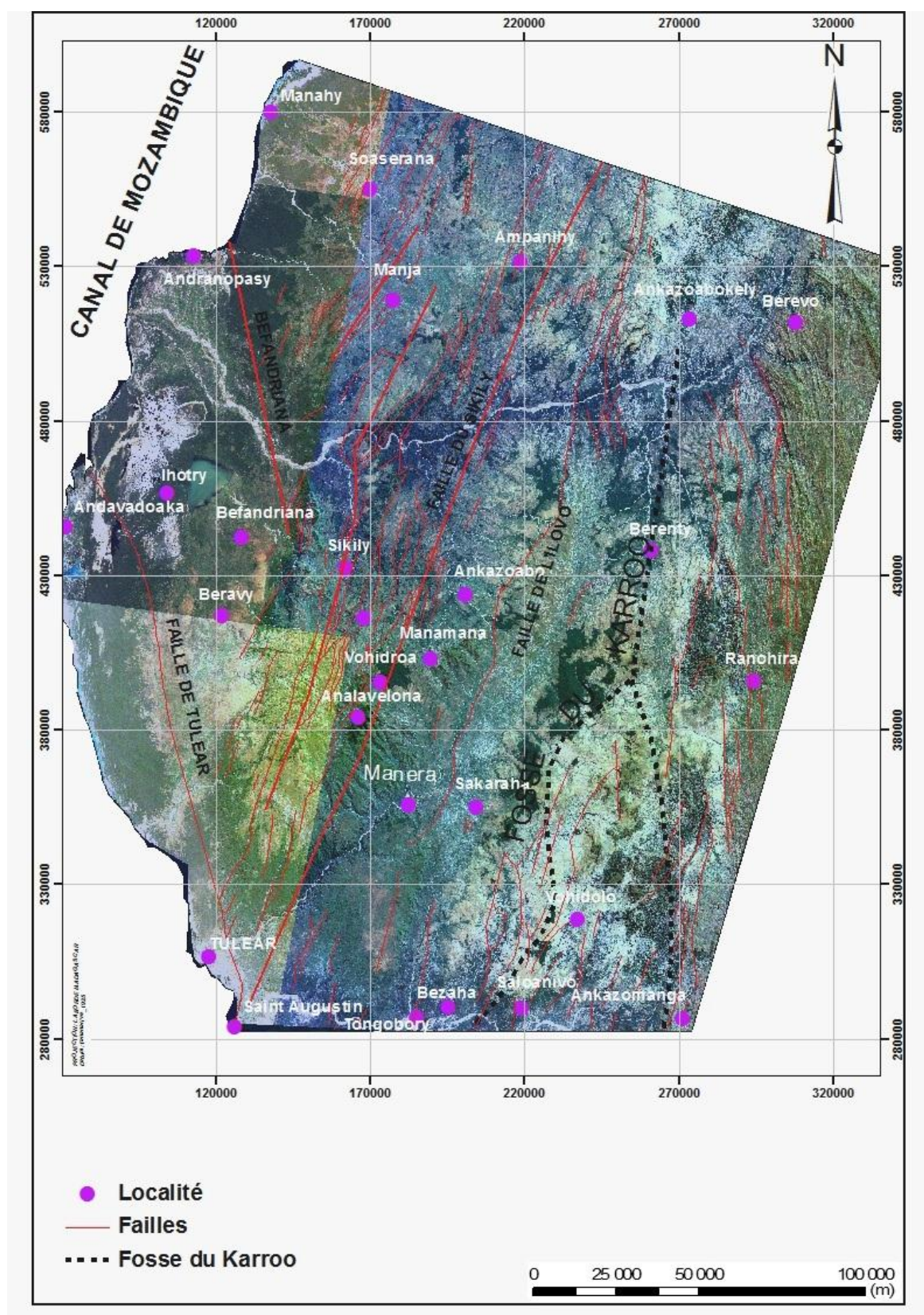
La partie Nord-Ouest est dominée par des failles de direction plus ou moins parallèle à la faille de Manja.

La partie Sud-Est est marquée par une série de failles de direction N-S. Cette partie est marquée par une tectonique profonde qui est la fosse du Karroo.

Dans la région centrale de notre zone d'étude, on note également une série de failles. Dans cette partie, on note un important système de fracture NNE-SSO. La zone du haut Sikily, correspond d'après la tectonique de surface, à une vaste surélévation post-éocène avec phase cassante récente où les deux directions Mozambique et côte Est interfèrent [02].

La partie Est est marquée par des failles de direction NO-SE. Ces failles marquent le contact socle-sédimentaire.

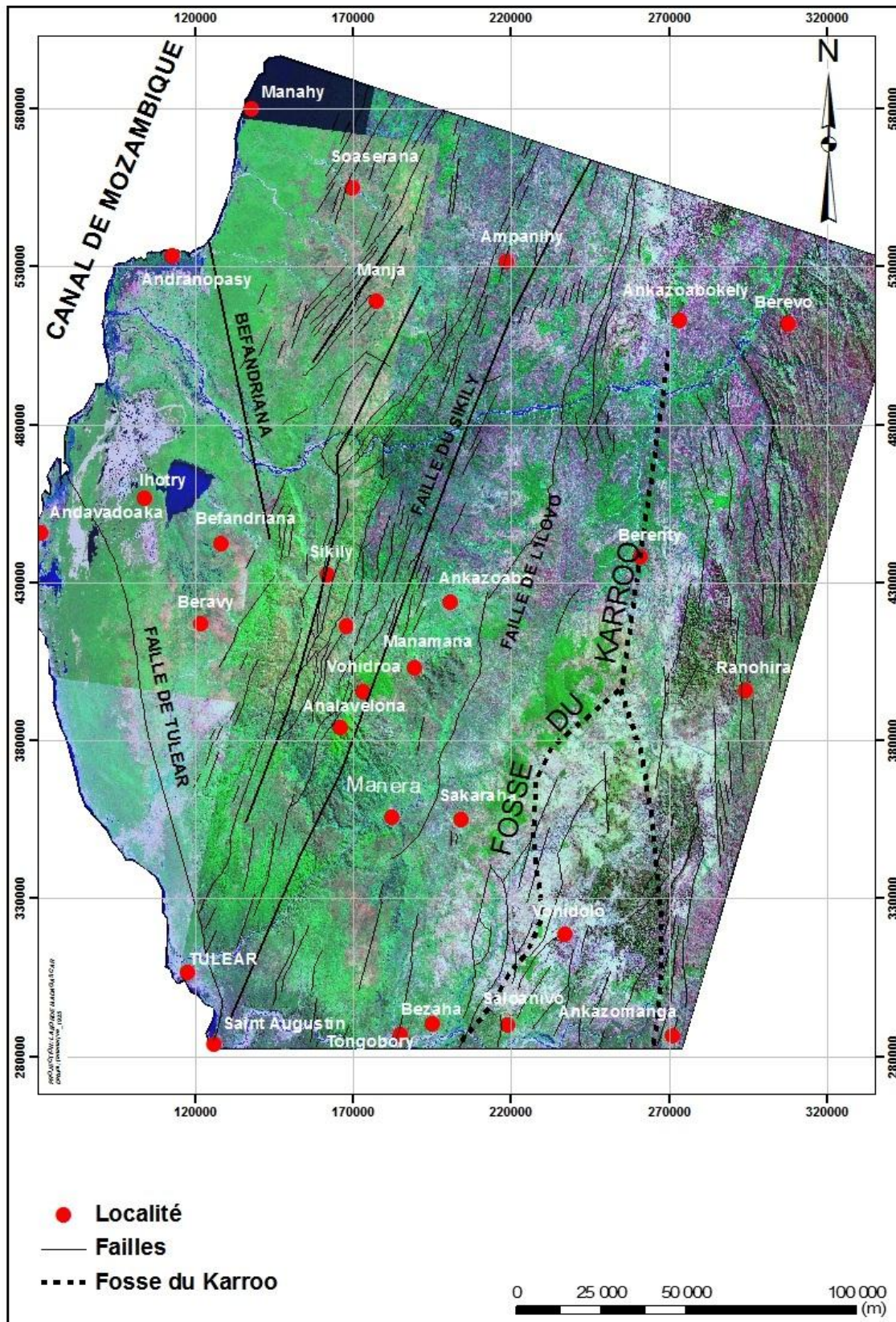
Ceci alors nous amène à avancer que la mise en place du bassin s'est faite par extension marquée par des failles normales et par phénomène de subsidence.



Source: Besairie. H,1971, SIGM,RAHARIVONIMBELO T.2013

Figure 45: Carte de superposition du MNT, de l'image LANDSAT7 ETM<sup>+</sup> composition 321 et les failles observées





Source: Besairie. H,1971, SIGM,RAHARIVONIMBELO T.2013

**Figure 46 : Carte de superposition du MNT, de l'image LANDSAT7 ETM<sup>+</sup> composition 742 et les failles observées**



## III.2. Interprétations des données géophysiques

### III.2.1. Interprétation de la carte d'anomalie de Bouguer et de la carte structurale

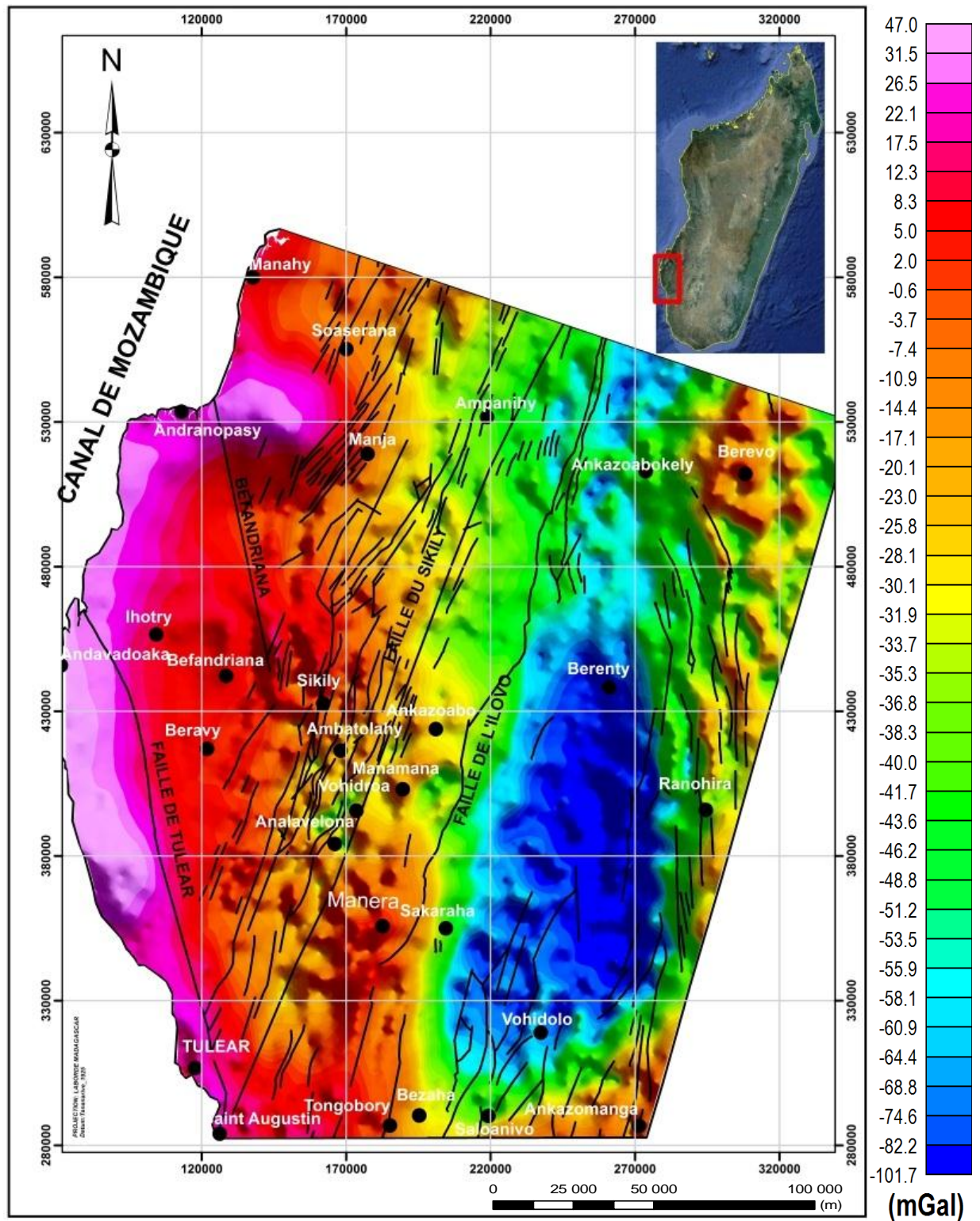


Figure 47 : Superposition de la carte d'anomalie de Bouguer et de la carte structurale

La carte de l'anomalie de Bouguer met immédiatement en évidence une morphologie accidentée. En effet, l'allure générale de l'anomalie est croissante allant du centre vers la côte-ouest (couleur bleu vers rose).

La tectonique s'ordonne autour des deux directions principales de cassures : direction côte Est et direction Mozambique. Dès la bordure du socle, l'enfoncement du Karroo est rapide et une fosse profonde s'allonge en direction N-S du Mangoky à l'Onilahy [2].

Il est à noter que les fortes anomalies sont associées au soulèvement du socle ou à ses hétérogénéités alors que les faibles valeurs sont liées à des terrains sédimentaires beaucoup plus légers, à des granites dans le socle ou des dômes dans les formations sédimentaires.

Pour l'interprétation, nous allons considérer quatre zones :

- La fosse du Karroo
- La zone centrale Tongobory-Sikily
- La zone côtière
- La partie Nord-Ouest

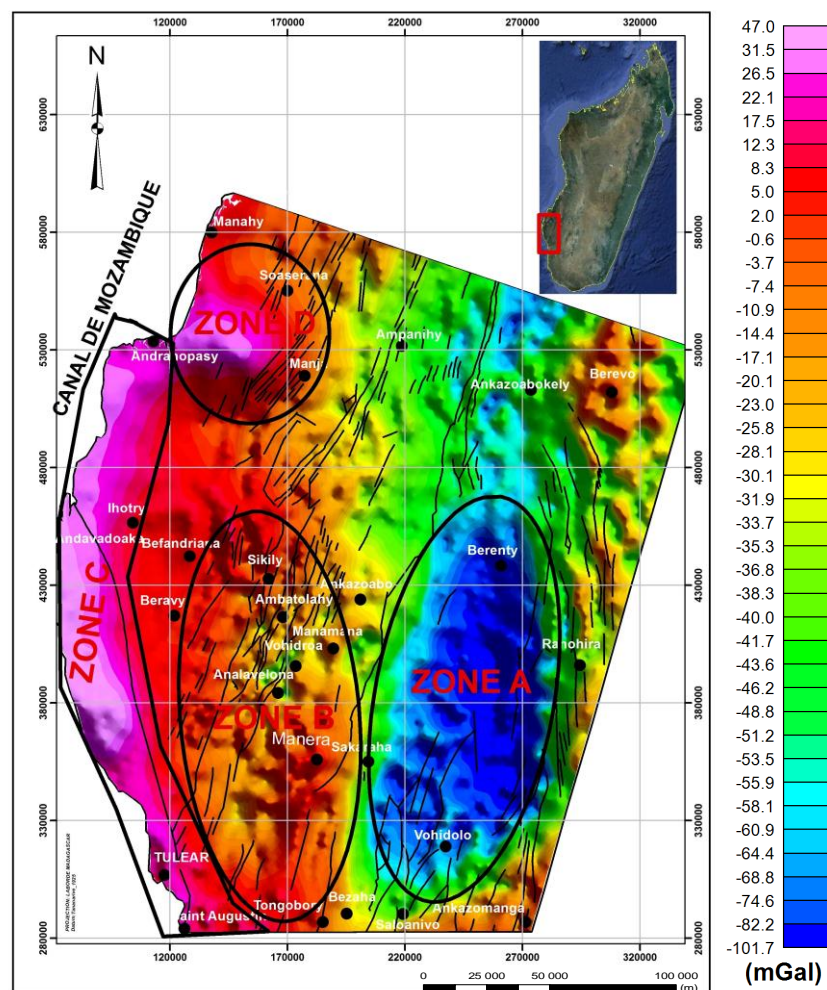


Figure 48 : Localisation des quatre zones sur la carte d'anomalie de Bouguer

**a. La fosse du karroo (Zone A)**

La faible valeur de l'anomalie de Bouguer dans cette partie pourrait expliquer que les séries sédimentaires y occupent une place importante.

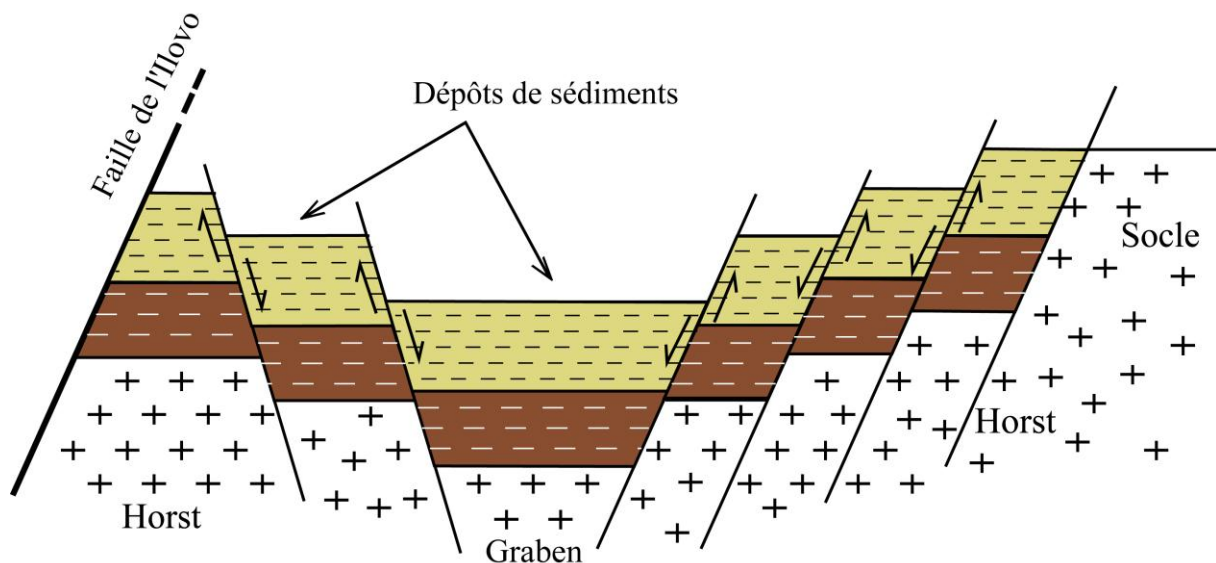
D'après la tectonique de surface, la bordure du socle cristallin est très faillée.

L'anomalie de Bouguer indique une remontée à l'ouest de la fosse (couleur bleue foncée vers jaune) au parallèle Sakaraha-Manera.

Au voisinage de la faille de l'Ilovo, on remarque des pendages Est.

Autour de Vohidolo, la géologie de surface met en évidence un système complexe de horsts et de fossés sans correspondance avec les indications gravimétriques. Il y a en effet discordance entre les directions de surface et les directions gravimétriques. Ceci rejoint l'affirmation de Besairie en avançant que le haut fond du socle est sans doute un paléo-relief qui a été affecté par une tectonique cassante ayant rejoué plusieurs fois.

Cette zone se présenterait donc comme une structure en graben où les sédiments se seraient posés.



*Figure 49 : Graben imaginé dans la fosse du Karroo*

**b. La zone centrale Tongobory-Sikily (Zone B)**

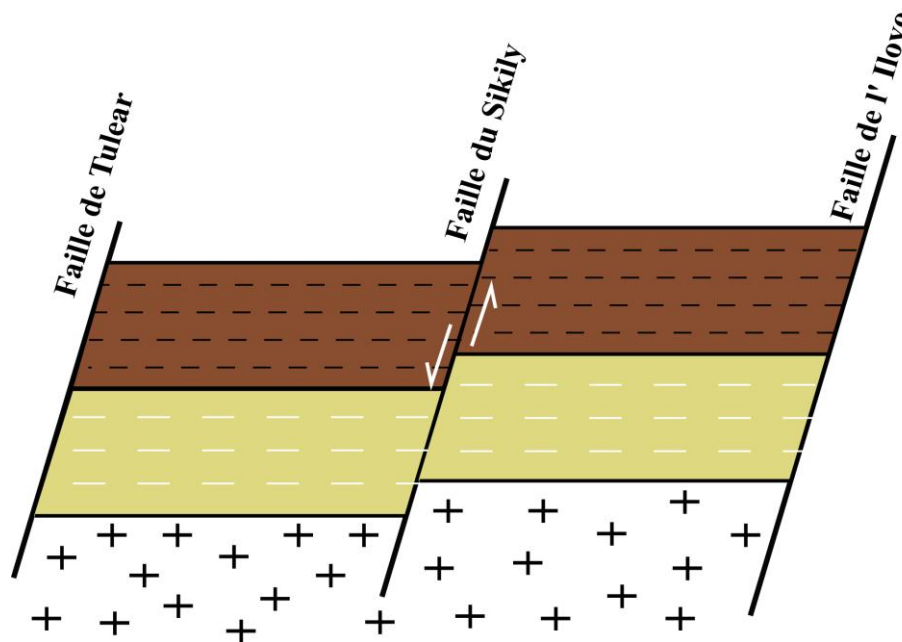
Entre Tongobory et Analavelona, on remarque une forte anomalie gravimétrique. Le gradient marquant le bord de la fosse du Karroo est mise en évidence (Couleur verte entre le bleu et le jaune).

À l'Ouest, nous remarquons une zone de basses valeurs dessinant une cuvette fermée entre Manera et Tulear. Ceci pourrait témoigner de l'existence d'un bassin

d'effondrement. Cette hypothèse est confirmée par un sondage électrique effectué dans cette zone plus précisément à Vineta qui a montré la présence d'une série argileuse infrabasaltique, épaisse de plus de 1000m [02].

La carte d'anomalie de Bouguer montre une anomalie négative impliquant un déficit de masse ce qui exclut la présence d'intrusion ou d'un haut fond du socle.

Ceci rejoint l'hypothèse de Besairie qu'il y a donc là une ancienne fosse sédimentaire ayant subi un réajustement isostatique suivi de failles de tension provoquant l'effondrement final [02].



**Figure 50 : Illustration de la fosse sédimentaire**

Cette hypothèse est confirmée par le sondage d'Ambatolahy où on a constaté que les épaisseurs sont les mêmes qu'aux affleurements mais la sédimentation a un caractère plus profond ; L'isalo II argilo-marneux y passe au Lias marin argileux et le Dogger continental d'ankazoabo passe à des marno-calcaires [02].

### **c. La zone côtière (Zone C)**

Cette zone est surtout dominée par des valeurs d'anomalie de Bouguer relativement forte (Couleur orange vers rose sur la carte).

Les éléments directeurs sont les failles de Tulear de Direction Mozambique et la faille de Befandriana de direction N-S à l'ouest desquels s'étend un bassin côtier subsident où les faciès deviennent argileux ou marneux [02].

La faille Befandriana et de Tulear correspondent à un gradient d'environ 8mGal.



Le sondage de Tuléar a permis de déterminer que la faille de Tulear sépare le Lutétien calcaire du plateau calcaire (cote+165) d'un Lutétien marneux rencontré à proximité à -85m [02].

Pour le cas de la faille de Befandriana, la sismique a retrouvé à -3000m sous le lac d'Ihotry, l'horizon basaltique qui se trouve à -500m à l'est de la faille [02].

Ainsi, ces deux failles sont donc considérées comme des accidents importants.

La carte d'anomalie de Bouguer et la géologie de terrain permettrait alors d'avancer que la zone côtière apparaît comme un bassin profond. Par ailleurs, le sondage d'Andavadaoka montre une série homogène argilo-marneuse épaisse d'environ 3500m [02].

#### **d. La partie Nord-ouest (Zone D)**

Cette partie Nord-Ouest est affectée d'une série de failles dont la direction est en générale Nord-Sud. La tectonique y est cassante. Les pendages Ouest, assez faibles en surface s'accroissent jusqu'à devenir très élevés en profondeur marquant une subsidence forte et rapide du bassin dans la région côtière [02].

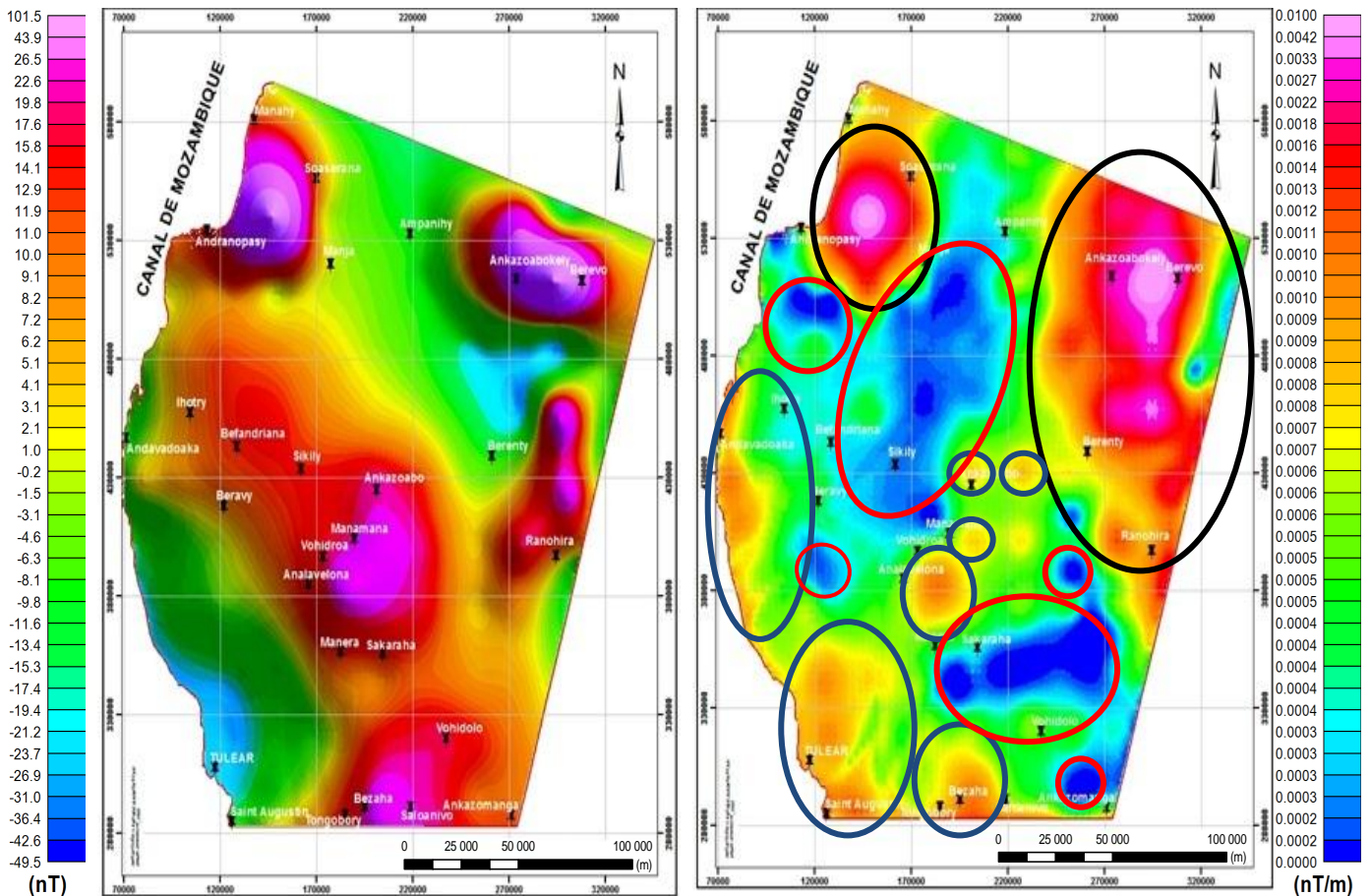
Une très forte anomalie gravimétrique atteignant 35mGal dite d'Andranopasy s'étend largement au Nord de la ligne Andranopasy –Tsianihy. Elle correspond à un massif intrusif basique profond.

Notons que la partie Est de notre zone est marquée par le contact socle-sédimentaire. Ce contact s'est fait par des failles syn-sédimentaires et est mis en évidence par une anomalie de Bouguer relativement faible (couleur verte claire sur la carte d'anomalie).

Les hypothèses avancées précédemment confirment alors que la mise en place du bassin sédimentaire de Morondava s'est faite par extension marquée par des failles normales et par phénomène de subsidence.

### **III.2.2. Interprétation de la carte d'anomalie magnétique et du signal analytique**

L'interprétation qualitative de l'anomalie magnétique est basée sur le fait que le contraste de susceptibilité magnétique le plus important est celui existant à l'interface Socle-Sédimentaire. Or, cette condition n'est pas toujours remplie à cause de la présence de série basaltique interstratifiée mais aussi à cause de nombreuses intrusions rencontrées.



**Figure 51(a): Carte d'anomalie magnétique** **Figure 51(b) : Carte du signal analytique**

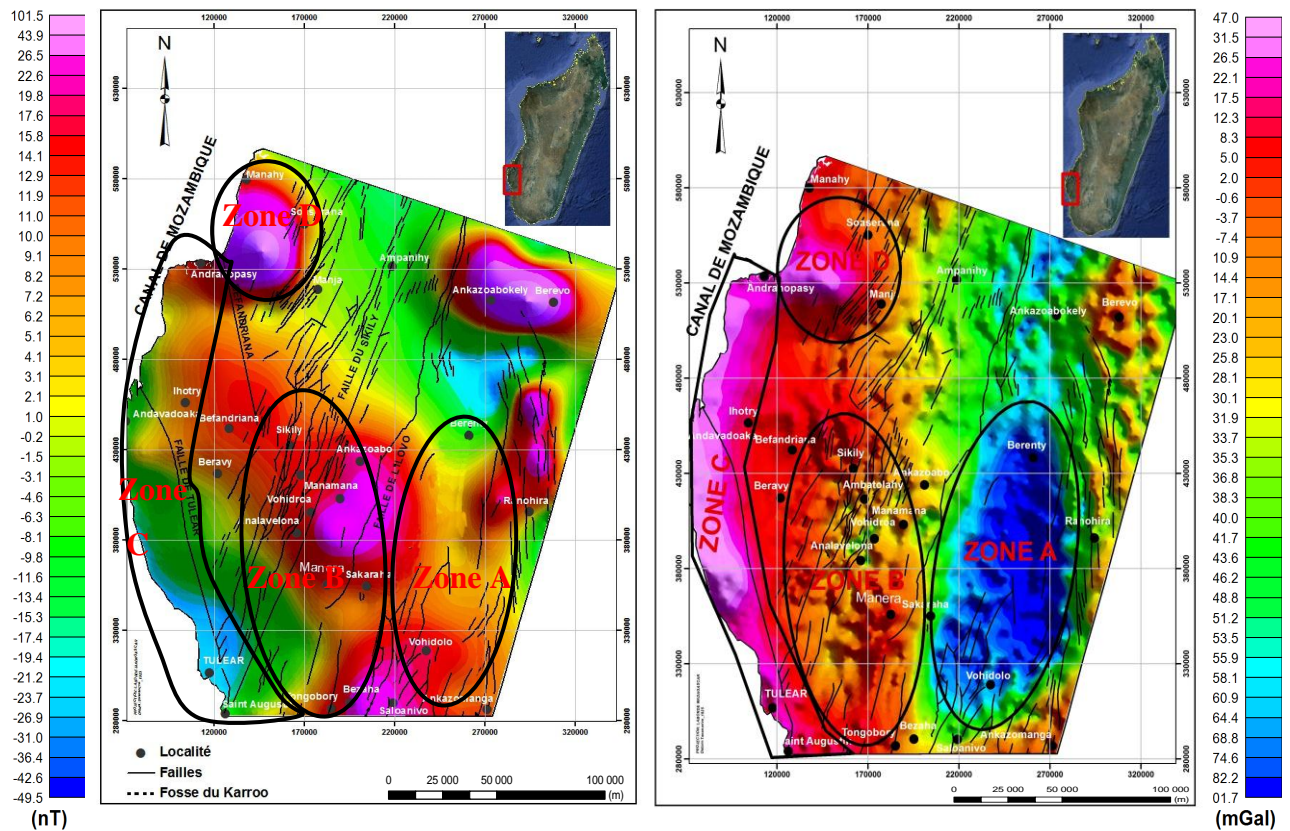
**Figure 51: Interprétation de la carte d'anomalie magnétique (a) et du signal analytique (b)**

La corrélation entre ces deux cartes permet de distinguer les zones qui ont subi une forte intrusion basaltique comme celles d'Andranopasy et d'Ankazoabokely. Elles sont ici entourées en noir sur la carte du signal analytique.

Des zones d'intrusion sont également mises en évidence comme aux alentours de Manamana et d'Analavelona et aussi dans la région côtière (entourées en bleue sur la carte). Dans cette partie côtière, les basaltes supérieurs appelés aussi basaltes post-éocène se présentent en necks et en coulées et ont une épaisseur entre 100 à 150m [2].

Aux alentours de Vohidolo et de sikily, on note des zones à valeur du signal analytique relativement faible. Ce seraient essentiellement des formations sédimentaires non magnétiques comme du grès, de l'argile et du calcaire (entourées en rouge sur la carte).





**Figure 52(b): Superposition de la carte d'anomalie de Bouguer et structurale**

**Figure 52: Superposition de la carte d'anomalie magnétique (a) et de l'anomalie de Bouguer (b) avec la carte structurale**

La corrélation entre ces cartes permettrait d'avancer les hypothèses suivantes :

- Il y aurait présence de corps à la fois légers et à haute valeur de susceptibilité magnétique dans la partie centrale et Sud-Est de notre zone. Néanmoins, vu l'allure et la forme des anomalies magnétiques, ces anomalies mesurées seraient surtout dues à l'existence de volcan et ses laves, mais aussi à des roches compactes de faible profondeur.
- Si nous considérons le cas de la zone de la fosse du Karroo, comme nous le savons, cette fosse est principalement sakaménienne ou antérieure à la Sakamena. Ces corps identifiés par la mesure de l'anomalie magnétique pourraient donc être des corps très compacts de faible profondeur par rapport à la profondeur de la fosse. Ceci est appuyé par le sondage réalisé par la Société des Pétrole de Madagascar (SPM) dans la région de Vohidolo qui a mis en évidence 800m de grès quartzitiques très compacts [02] qui pourraient jouer le rôle de roche-couverture ou « cap-rock ».

➤ L'intrusion massive intrusive basique profonde d'Andranopasy est fortement mise en évidence tant par la carte d'anomalie de Bouguer que par la carte d'anomalie magnétique.

#### **IV. MODELISATION 2D**

##### **IV.1. Techniques de modélisation**

La modélisation serait possible seulement si on impose des contraintes dans le but de bien ajuster nos courbes théoriques sur les points expérimentaux.

Elle est réalisée avec le logiciel Geosoft 6.4 grâce au programme de modélisation en 2D incorporé « GM-SYS 6.4 ». C'est une application développée par le « Northwest Geophysical Associates » en 1999.

La modélisation des profils gravimétrique et magnétique se fait simultanément. Le calcul des anomalies tient exclusivement compte des masses comprises entre 0 et 15 km de profondeur, des structures et des formations géologiques de la région.

L'objectif de cette modélisation est de mettre en évidence les structures et les formations géologiques probables de la région.

Pratiquement, la modélisation se fait en 3 étapes :

- Création des modèles gravimétrique et magnétique théoriques ;
- Entrée des différentes valeurs de densité et de susceptibilité ;
- Ajustement simultané des courbes expérimentale et calculée.

Les valeurs de la densité et de la susceptibilité des différentes roches sont connues à partir des études antérieures. En effet, ces valeurs sont différentes d'une formation à une autre. Ainsi, les références pour les valeurs de densité et de susceptibilité utilisées lors de la modélisation sont celles montrées respectivement par le **tableau 01** et la **figure 31** présentés dans la partie II.

##### **IV.2. Choix des profils**

Les profils doivent suivre une direction perpendiculaire à celle des formations. Pour notre cas, les profils ont une direction Ouest-Est et leur emplacement a été choisi de façon à traverser les éléments structuraux majeurs tels que la fosse du Karroo, les failles du Sikily et de l'Ilovo et l'intrusion basique d'Andranopasy.

Trois modèles ont été réalisés suivant les profils AA', BB' et CC' de la figure 54 :

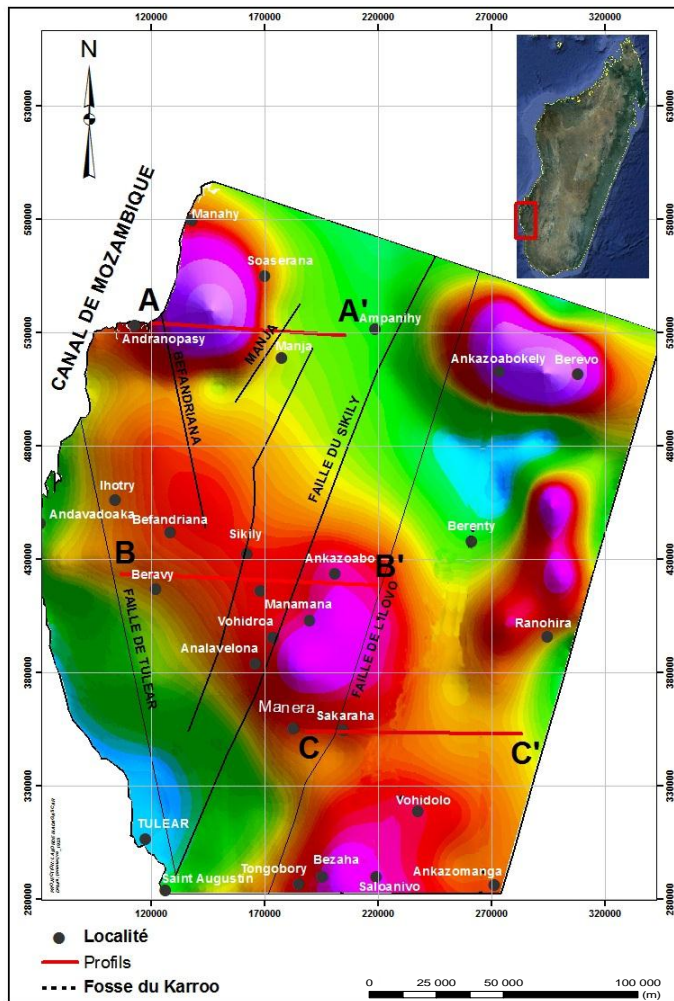


Figure 53(a) : Localisation des profils sur la carte d'anomalie magnétique

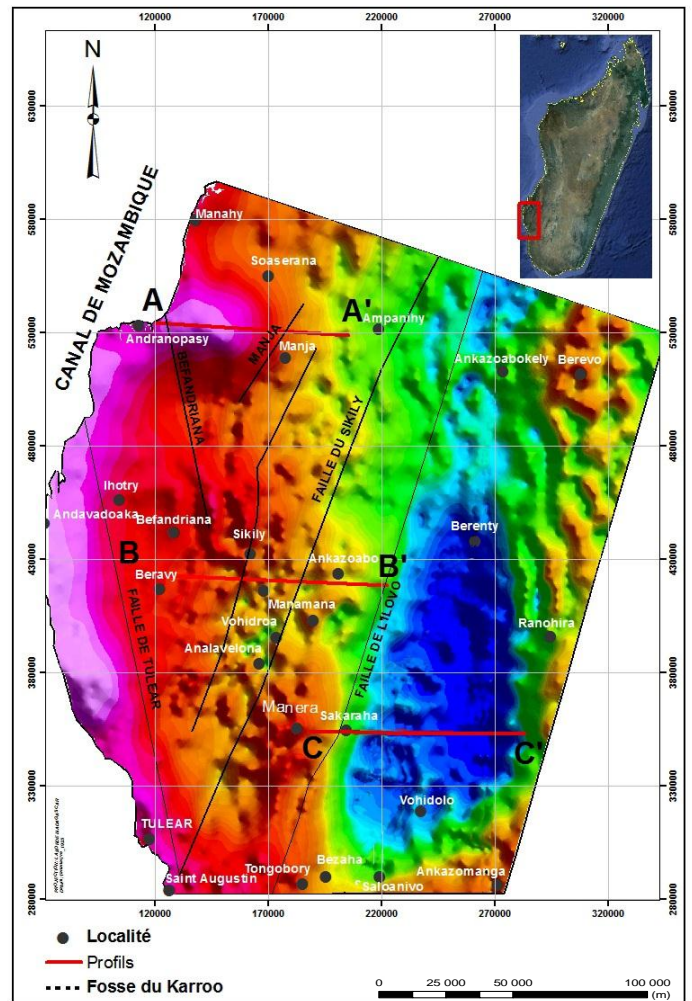


Figure 53(b) : Localisation des profils sur la carte d'anomalie de Bouguer

Figure 53 : Localisation des profils sur la carte d'anomalie magnétique et sur la carte d'anomalie de Bouguer

### IV.3. Modélisation

#### IV.3.1. Profil A A'

Un modèle a été élaboré dans la zone Nord, suivant la coupe AA' passant par Andranopasy et Manja.

La longueur du profil est d'environ 85 Km et il est orienté d'Ouest en Est. Ce profil traverse l'intrusion basique d'Andranopasy et coupe la faille de Manja.



Le modèle obtenu est présenté par la figure ci-après :

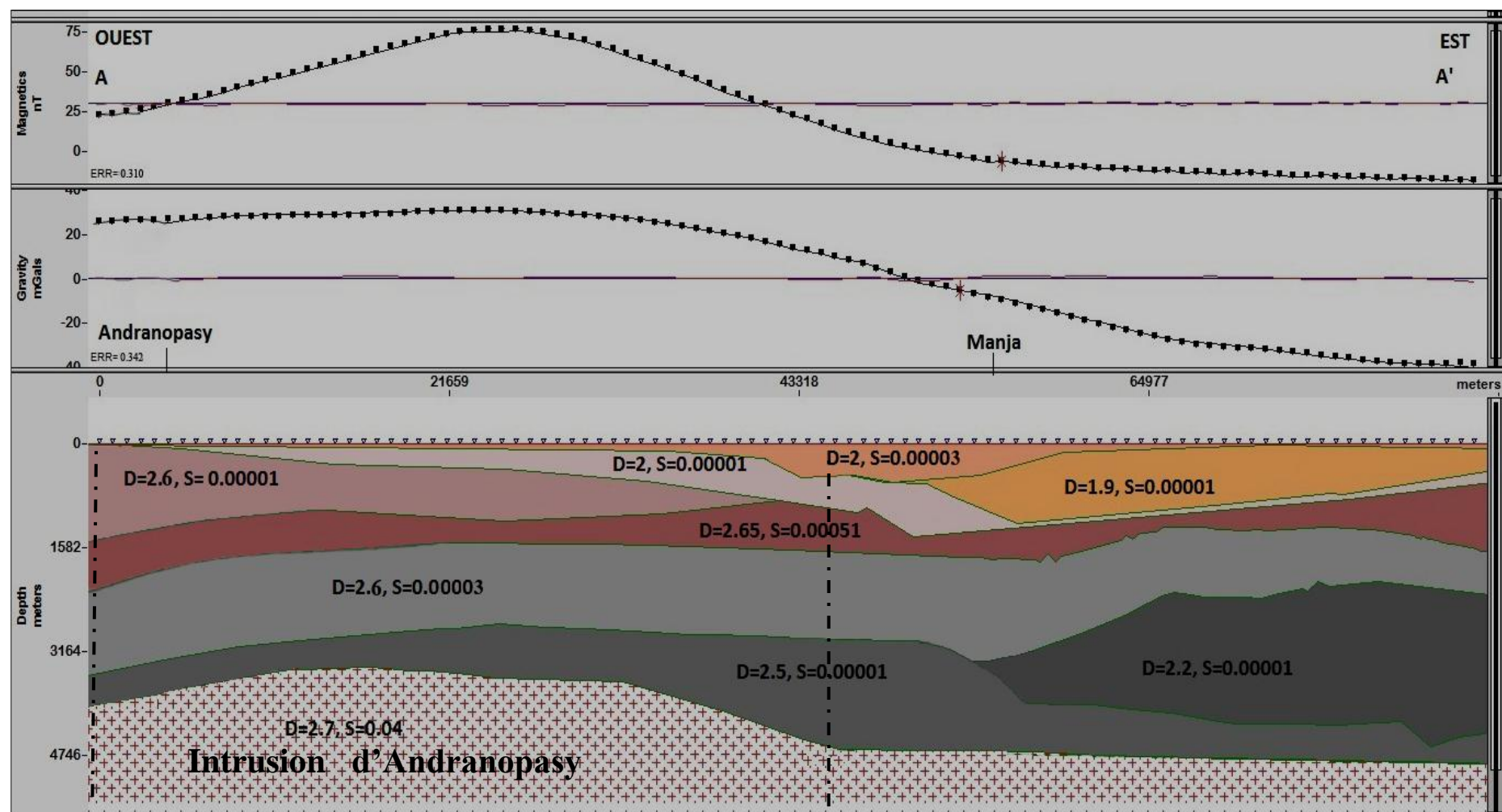


Figure 54 : Modélisation obtenue suivant la coupe A A'

En général, l'allure des deux courbes d'anomalie est la même, elle augmente jusqu'au point d'abscisse  $X=26730\text{m}$  puis descend avant d'être stable.

La partie où les courbes d'anomalie présentent un maximum indique le passage du profil le long de l'intrusion basique d'Andranopasy et la descente progressive serait due au passage de la faille de Manja.

En effet, la courbe de l'anomalie magnétique montre un écart de  $-18\text{nT}$  à  $78\text{nT}$  et met en évidence l'intrusion volcanique.

La courbe d'anomalie de Bouguer se situe entre  $-38$  et  $33\text{mGal}$ . L'intrusion d'Andranopasy est constituée de corps à forte densité. Le modèle obtenu reflète également l'allure en dôme que prend le socle aux alentours d'Andranopasy.

#### **IV.3.2. Profil B B'**

Ce deuxième profil orienté également Ouest-Est d'une longueur d'environ  $110\text{Km}$  se trouve dans la partie centrale de notre zone. Ce profil passe aux environs de Beravy, Sikily et Ankazoabo et traverse des séries de failles dont les plus remarquables sont celles du Sikily et de l'Ilovo.

Le modèle est représenté par la figure ci-après :

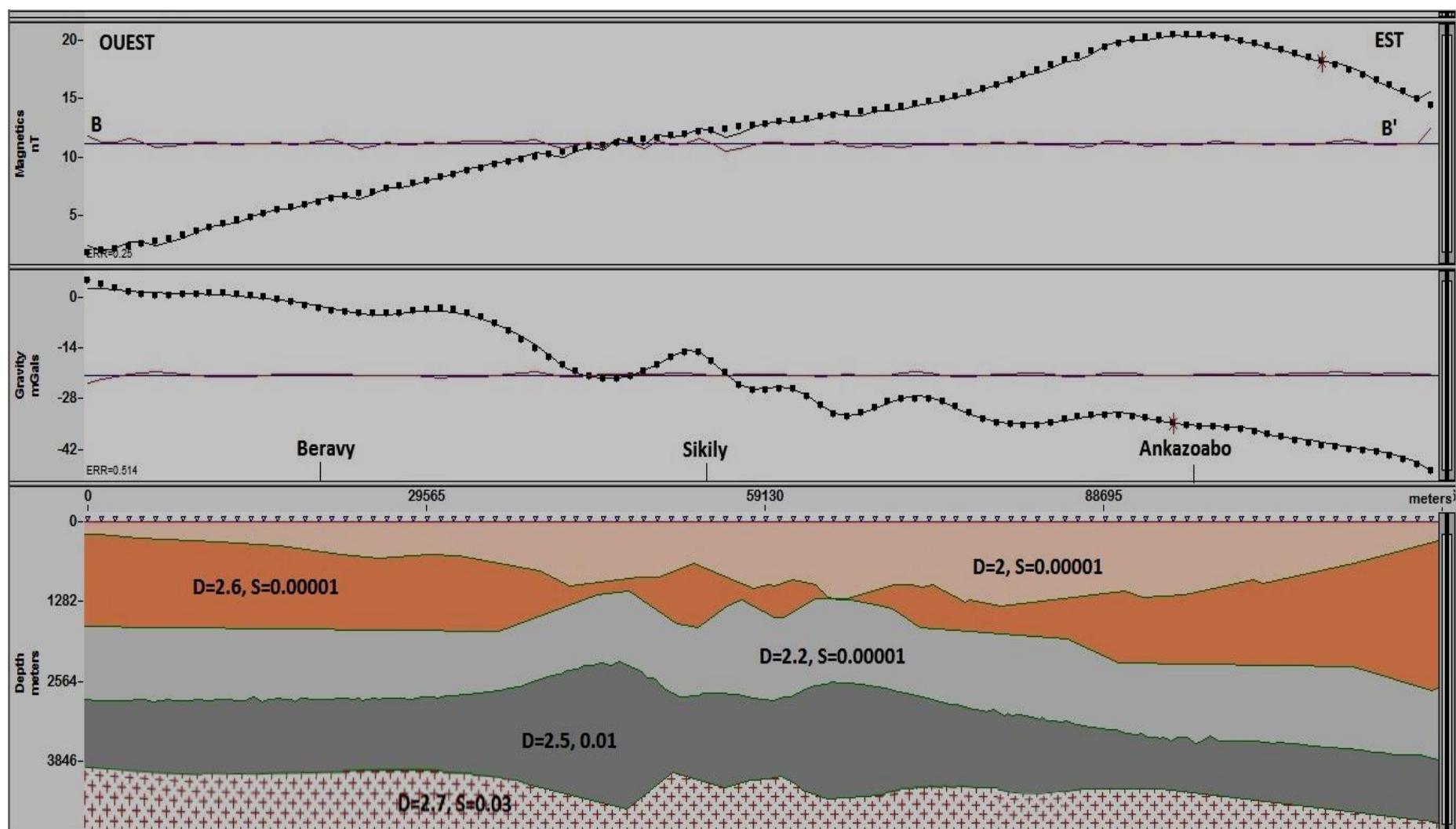


Figure 55: Modélisation obtenue suivant la coupe B B'

La courbe d'anomalie magnétique monte jusqu'au point d'abscisse  $X=96660\text{m}$  où elle atteint son pic pour ensuite descendre. Les valeurs de l'anomalie magnétique observées sont comprises entre 1.5 et 20nT.

Nous pouvons avancer l'hypothèse suivante : l'anomalie détectée serait due à la présence de volcan avec les laves qui l'entourent.

En effet, le pic de la courbe correspondrait aux alentours du centre du volcan. Ainsi, la courbe de l'anomalie magnétique ne mettrait pas en évidence les structures majeures comme la faille du Sikily et celle de l'Ilovo, ceci nous montre qu'il n'y a pas de contraste de susceptibilité magnétique de part et d'autre de ces failles.

Par contre, la courbe d'anomalie gravimétrique diminue de l'Ouest vers l'Est. D'où la modélisation obtenue met en évidence l'allure accidentée de quelques structures rencontrées dans la zone d'étude. Les effondrements dus aux failles sont bien marqués aux environs du point d'abscisse  $X=59130\text{m}$ , cet effondrement est dû à la faille du Sikily.

#### **IV.3.3. Profil CC'**

Le troisième modèle proposé se situe dans la partie Sud-Est de notre zone. Sa particularité est que le profil traverse des éléments structuraux majeurs caractérisant le bassin sédimentaire de Morondava qui sont la faille de l'Ilovo et la fosse du Karroo en passant par Sakaraha. Sa direction est également d'Ouest-Est avec une longueur de 94 Km.



Le modèle est représenté par la figure ci-après :

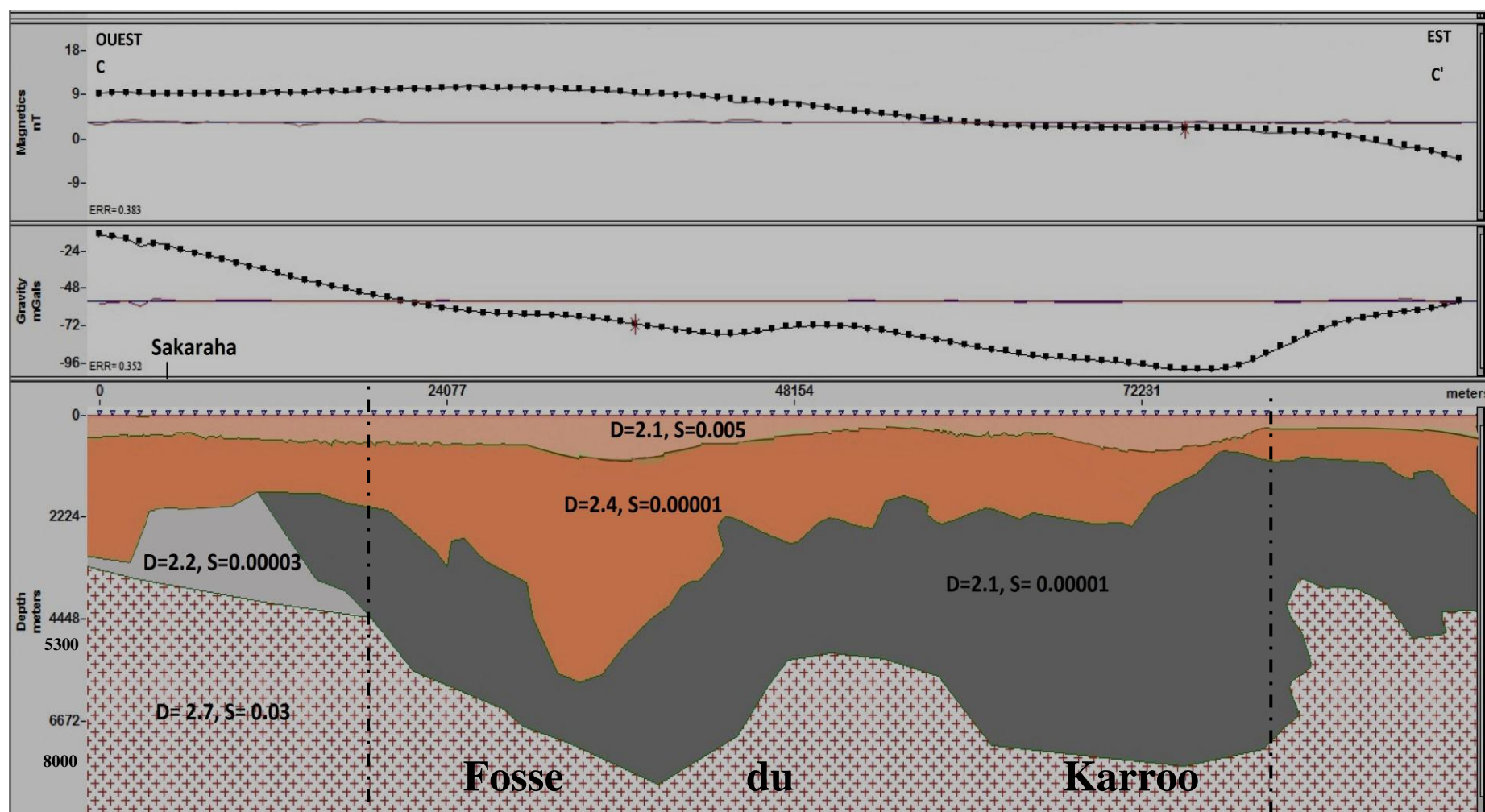


Figure 56 : Modélisation obtenue suivant la coupe C C'

L'allure générale des deux courbes est descendante. L'amplitude des anomalies magnétiques varie entre -4nT et 10nT tandis que celle de la gravimétrie est de -14mGal à -100mGal.

Cette allure descendante de la courbe d'anomalie gravimétrique témoigne de l'effondrement dû à la faille de l'Ilovo, des accidents qu'aurait subi le socle mais également de la grande épaisseur des sédiments qui la surmonte.

Selon ce modèle, le socle pourrait atteindre une profondeur de 8000m aux environs du point d'abscisse X=3600m.

Aux alentours du point d'abscisse X= 52100m, nous constatons une remontée du socle jusqu'à environ 5300m.

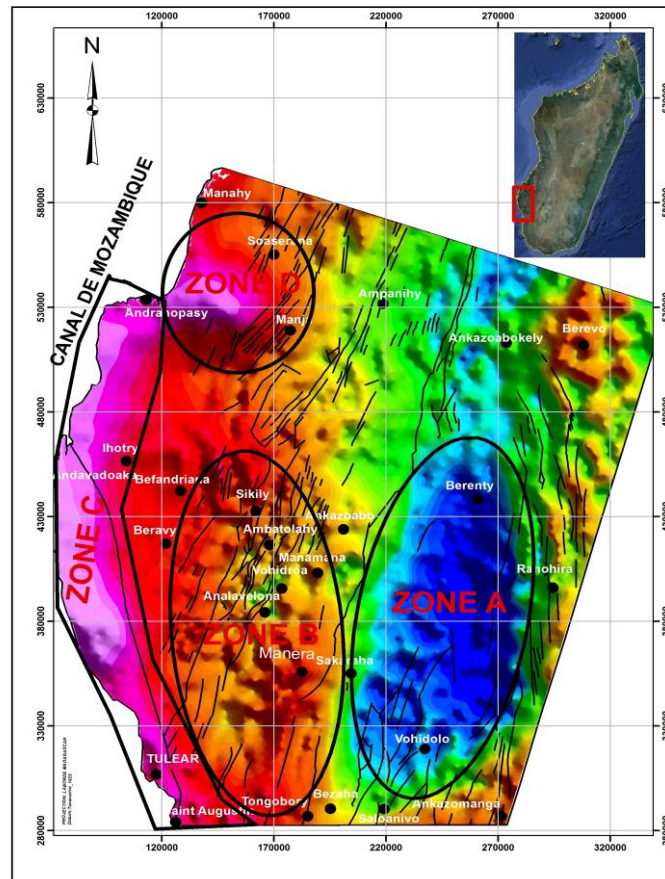
Dans la partie Est, nous remarquons également une remontée du socle qui marquerait le contact du bassin sédimentaire avec le socle cristallin.

Le modèle ainsi obtenu confirmerait la géométrie en horst et graben dans cette partie du bassin sédimentaire de Madagascar.

## **V. INTERETS PETROLIERS**

La synthèse des différentes analyses effectuées prédemment nous conduit à avancer des hypothèses sur la potentialité en hydrocarbures de notre zone d'étude. Ainsi, nous allons considérer quatre zones :

- La fosse du Karroo (Zone A)
- La zone centrale Tongobory-Sikily (Zone B)
- La zone côtière (Zone C)
- L'extrême Nord-Ouest (Zone D)



*Figure 57 : Localisation des quatre zones sur la carte d'anomalie de Bouguer*

### V.1. La fosse du Karroo (Zone A)

L'intérêt pétrolier de cette zone réside sur le fait qu'elle pourrait être le lieu de formation d'hydrocarbure (roche-mère). En effet, comme il est mentionné précédemment, cette fosse est principalement Sakaménienne et la forte anomalie gravimétrique négative (couleur bleue sur la carte d'anomalie de Bouguer) témoigne de la profondeur de cette fosse et de l'éventuelle existence de corps relativement légers. De plus, l'existence des séries de failles et l'allure anticlinale que prend le socle dans cette partie pourraient témoigner de la formation de pièges à hydrocarbures.

## V.2. La zone centrale Tongobory-Sikily (Zone B)

L'existence de cette ancienne fosse sédimentaire montrée par la carte d'anomalie de Bouger est favorable pour la recherche pétrolière dans cette zone. L'effondrement causé par des failles sont également propices pour piéger l'hydrocarbure.

De plus, cette région est proche du Delta de Mangoky qui est un lieu favorable pour la formation d'hydrocarbure. La migration du pétrole pourrait alors se faire à partir de la région du Delta de Mangoky vers un lieu où il sera piéger.

Ces hypothèses sont sans doute la raison pour laquelle des forages ont été réalisés par la SPM sur cette zone comme celui de Sikily où l'on a rencontré du gaz à environ 2600m de profondeur [02].

### **V.3. La zone côtière (Zone C)**

Comme il est mentionné précédemment, la zone côtière apparaît comme un bassin profond qui pourrait susciter un intérêt pétrolier. Néanmoins la carte d'anomalie de Bouguer a donnée un gradient relativement élevé allant de 9 à plus de 32mGal (couleur rouge au rose sur la carte).

De plus, on a retrouvé une série homogène argilo-marneuse épaisse d'environ 3500m à Andavadaoka [02].

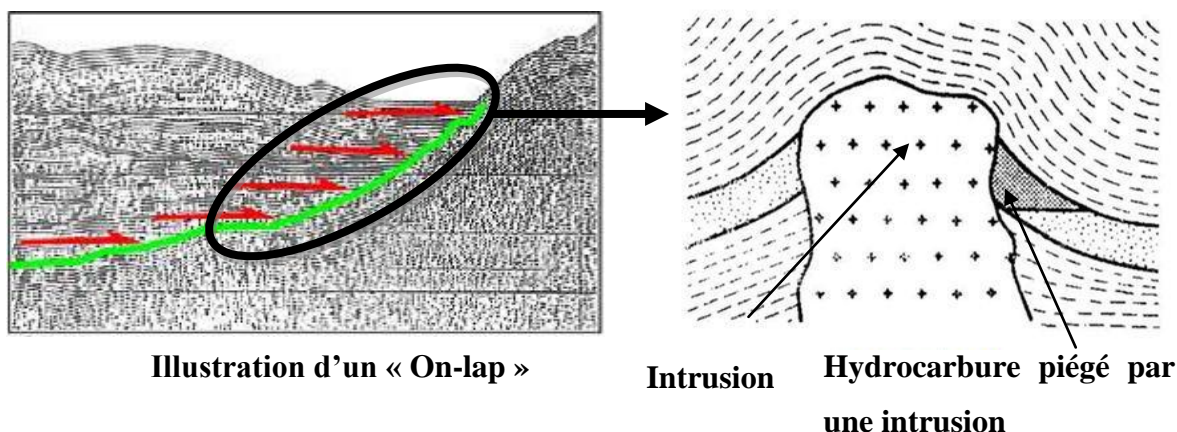
Ces deux dernières hypothèses amèneraient à avancer que la probabilité d'existence de gisement pétrolifère dans cette zone côtière serait relativement faible, ceci est dû au fait que cette série homogène argilo-marneuse ne pourrait pas constituer un réservoir.

La recherche devrait être réalisée plus à l'est dans la flexure gravimétrique comme aux alentours de Beravy et de Befandriana.

### **V.4. L'extrême Nord-Ouest (Zone D)**

Le principal intérêt pétrolier dans cette zone se trouve essentiellement aux alentours de l'intrusion basique d'Andranopasy. En effet, cette forte anomalie conduirait à avancer qu'il y aurait une grande épaisseur de sédiments dans cette zone. De plus, ceci pourrait être un dôme autour duquel pourrait se trouver des pièges à hydrocarbures (piège mixte).

Parallèlement, le dyke localisé aux alentours de Berenty a une importance significative sur la recherche pétrolière. En effet, l'existence de cette intrusion pourrait bloquer la migration d'hydrocarbures. Ce phénomène est illustré par les figures ci-après :



*Figure 58 : Illustration d'un hydrocarbure piégé par une intrusion*

## **CONCLUSION**

Au terme de ce travail, nous pouvons avancer que notre étude a permis de passer en revue deux méthodes de prospection géophysique très utilisées en exploration pétrolière à grande échelle qui sont les méthodes gravimétrique et magnétique. Combinées avec la télédétection et le MNT, ces méthodes constituent un outil de prospection très efficace et très important. Les résultats obtenus ne contredisent pas les études antérieurement réalisées et sont en générale conformes aux réalités sur terrain.

Couplées avec la géologie, à la suite des différents traitements réalisés, les interprétations des données satellitaires ont permis de dégager les éléments structuraux qui nous a conduit à affirmer que la mise en place de cette partie du bassin sédimentaire malgache s'est faite par extension, par transtension et par subsidence.

On a présenté trois modèles se situant dans les parties Nord, centrale et Sud de notre zone d'étude traversant les éléments structuraux marquants comme les failles majeures et la fosse du Karroo. Cette méthode a permis d'employer les relations susceptibilité densité avec le modèle utilisé et les différentes réponses du soubassement et d'en identifier ses caractéristiques.

Au terme des interprétations, nous avons mis en évidence quatre zones qui pourraient susciter des intérêts pétroliers. La zone la plus probable se situerait dans la fosse du Karroo vu son allure accidentée et la puissance élevée des sédiments qui la surmonte. La zone autour de l'intrusion d'Andranopasy pourrait également être favorable vue l'existence de cette dôme et sa proximité avec le delta de Mangoky.

Pratiquement, en dehors de la non-accessibilité de certains documents due à leur caractère confidentiel et malgré l'évolution technique des méthodes de mesures utilisées, nous avons observé des limites pouvant entraîner des incertitudes et imprécisions sur les résultats obtenus.

Enfin, les données géophysiques satellitaires plus la MNT et la télédétection ont permis de localiser les zones probables de gisement d'hydrocarbures dans cette partie du Bassin de Morondava dont les formations présentent des caractéristiques pouvant, probablement, constituer des gisements. C'est sûrement la raison de l'implantation des différentes compagnies pétrolières internationales dans cette région. On devrait alors avoir recours à des méthodes gravimétriques et magnétiques détaillées avec des mailles plus fines et à la sismique réflexion et confirmer les résultats avec des forages.



## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] ANDRIHARIZAFY R., 2011. Reconnaissance structurale par les méthodes gravimétrique et magnétique de l'Ouest et du Nord-Ouest de Madagascar - Contribution à l'étude de potentialité en ressources pétrolières.65p.
- [2] BESAIRIE H. avec la collaboration de Maurice COLLIGNON- GEOLOGIE DE MADAGASCAR, tome1, sédimentaires, Tananarive imprimerie Nationale 1971. Appendix M. bassin modelling data Madagascar.
- [3] BIJU DUVAL B., 1999. Géologie sédimentaire.68p.
- [4] BONN et ROCHON, 1992, Précis de télédétection : principes et méthodes.72p.
- [5] CHOUTEAU M., 1999, Géophysique Appliquée I, Cours de Magnétisme, Ecole Polytechnique de Montréal. 112p.
- [6] CHOUTEAU M., 2002. Géophysique appliquée I : Cours de Gravimétrie, Ecole Polytechnique de Montréal.108p
- [7] COLLOT J. Y., MALAHOFF A., 1980. Anomalies gravimétriques et structure de la zone de subduction des Nouvelles-Hébrides. 66p.
- [8] COOPER B. S. OWEER J., 1984. Elements of Geochemistry. Robertson Research International Ltd.36p.
- [9] FLANDRIN J., 1955. La Géologie du pétrole. Editions Techniques. Ecole nationale supérieure du pétrole et des moteurs. Centre d'études supérieures de prospection géologique et géophysique. Rueil-Malmaison. Île-de-France. 87p
- [10] FLANDRIN J.et al., 1961. Le Pétrole. Ecole nationale supérieure du pétrole et des moteurs. Rueil-Malmaison. Île-de-France. 76p.
- [11] KERGOMARD C., 2004. La télédétection aérospatiale : Une introduction. Ecole Normale Supérieure Paris, 51p.
- [12] LALICKER C.G., 1951. Principles of Petroleum Geology. New York. 121p.
- [13] LEVORSEN A.I., 1954. Geology of Petroleum. Freeman. San Franscisco. 132p.
- [14] Members of BGI and Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale, Toulouse, France., 2006. Principe de la gravité satellitaire: Gravitation, gravimétrie, géodésie spatiale et géophysique.20p.
- [15] MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'ELEVAGE et DE LA PECHE, 2006. Monographie de Madagascar.96p.
- [16] PIQUE et al., 1999. Evolution géologique de Madagascar et la dislocation de Gondwana : une introduction ; Journal of African Earth Sciences, Vol.28 (165-178) .



- [17] RAHARIMANANIRINA C., 2011. Le Plateau Continental de l'Extrême Sud de Madagascar – Etudes tectonique et géophysique. Thèse de Doctorat d'Université, Université d'Antananarivo.151p.
- [18] RAJAOMAZAVA F., 1992. Etude de la subsidence du bassin sédimentaire de Morondava(Madagascar) dans le cadre de l'évolution géodynamique de la marge Est-Africaine.Centre Géologique et Géophysique, Université des Sciences et Techniques du Languedoc 3405-MONPELIER Cedex 5-France.204p.
- [19] RAKOTONDRAOMPIANA S.A., 2005. La Géodynamique de la Partie Centrale de Madagascar. Thèse de Doctorat d'Université, Université d'Antananarivo.193p.
- [20] RAKOTOSOLOFO N.A. et al., 1999.The Karoo Supergroup revisited and Madagascar-Africa fits, Journal of African Earth Sciences, Vol 29 (135-151) .
- [21] REID A., MCINERNY P., FITZGERALD D., 2006. Euler deconvolution of gravity data.54p.
- [22] SARRAILH M. et al., 2006. La mesure directe du champ de gravité de la terre : La gravimétrie. Bureau Gravimétrique International, Toulouse, France. 30p.
- [23] SCHANDELMEIER H.et al., 2004. Journal of African Earth Sciences, Vol 38 (321-330).
- [24] SHOUT H., 1998. La géophysique pour les géologues. Les méthodes gravimétriques, Tome 3. 65p.
- [25] SHOUT H., 1998. La géophysique pour les géologues. La méthode de prospection magnétique, Tome 2. 63p.
- [26] TSAYEM DEMAZE M., 2002. Caractérisation et suivi de la déforestation en milieu tropical par télédétection, Application aux défrichements agricoles en Guyane Française au Brésil. Thèse de Doctorat d'Université, Université d'Orléans, 224p.
- [27] VALERIA C. F., et al., 1998. Stability analysis and improvement of structural index estimation. 32p.
- [28] ZAFRUL M. et al., 2009. Analyzing gravity and magnetic data in surma basin, Bangladesh: some reconnaissance on the subsurface structure. 36p.

## **REFERENCES WEBOGRAPHIQUES**

- [29] <http://bgi.omp.obs-mip.fr/index.php/fre/Donnees-Produits/> (consulté le 12/ 07/13)
- [30] <http://geomag.org/models/EMAG2/acknowledgments.html> consulté le (15/08/13)
- [31] <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook> (consulté le 21/07/13)
- [32] [http://mailto:stars@mm.gouv.qc.ca;](mailto:stars@mm.gouv.qc.ca) (consulté le 21/07/13)
- [33] <http://www.aviso.oceanobs.com> (consulté le 12/07/13)
- [34] <http://www.geomag.org/models/emag2.html> (consulté le 12/07/13)
- [35] <http://www.geosoft.com>, (consulté le 18/07/13)
- [36] <http://www.landcover.org> (consulté le 12/07/13)
- [37] <http://www.tuto.arcgis.com> (consulté le 18/07/13)
- [38] <http://www.tutorial.envi.com> (consulté le 18/07/13)
- [39] <http://www.omnis.mg> (consulté le 18/07/13)
- [40] <http://www.planetseed.com> (consulté le 21/07/13)
- [41] [stars@mm.gouv.qc.ca](mailto:stars@mm.gouv.qc.ca) (consulté le 21/07/13)

# **ANNEXES**

## ANNEXE 1 : EXTRAIT DES VALEURS D'ANOMALIE DE BOUGUER

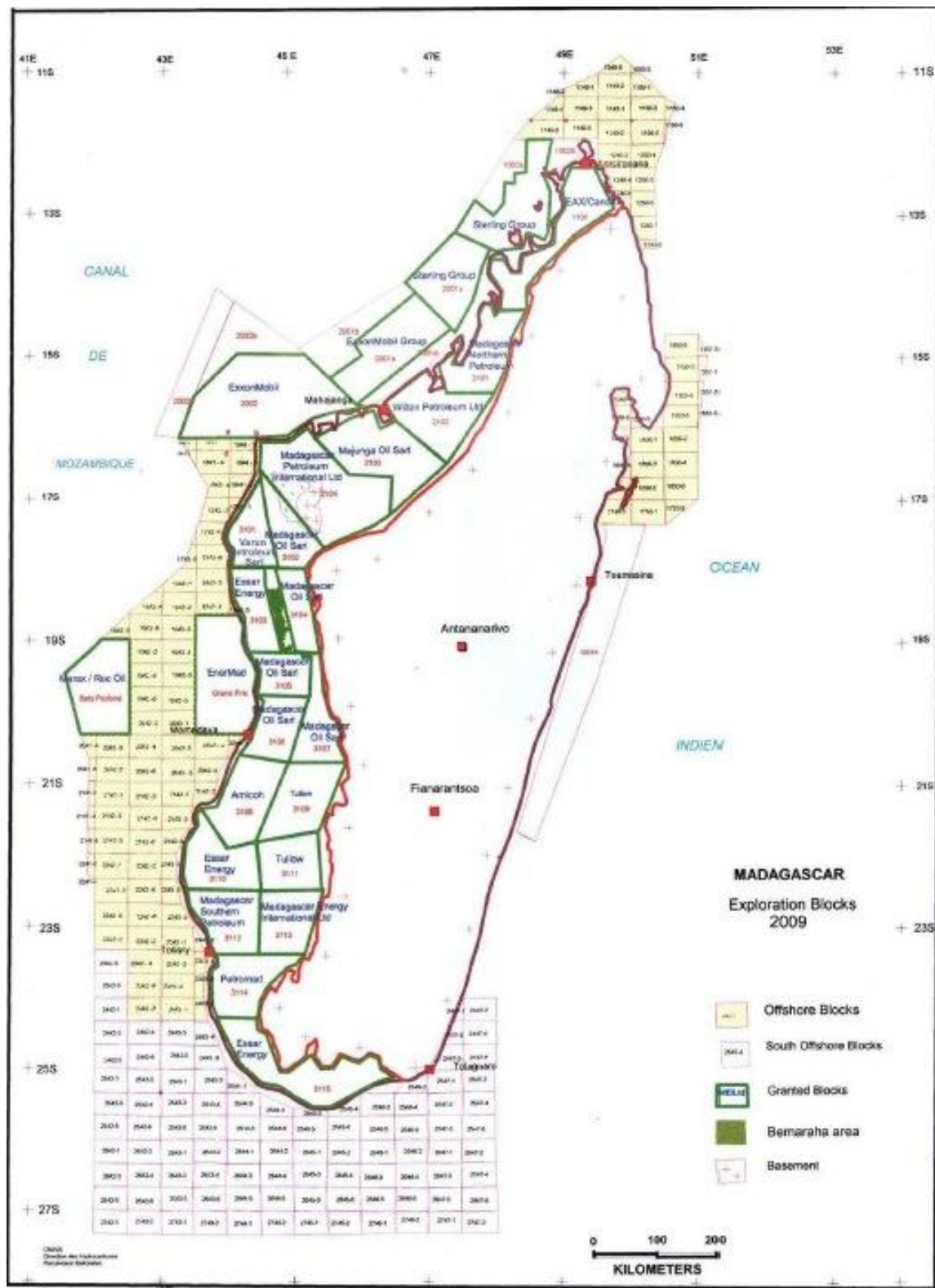
"LONG(DEG)"	"LAT(DEG)"	"BOUGUER(MGAL)"
44.479166667	-21.9375	-35.45
44.479166667	-21.979166667	-39.94
44.479166667	-22.020833333	-39.05
44.479166667	-22.0625	-37.49
44.479166667	-22.104166667	-34.12
44.479166667	-22.145833333	-34.28
44.479166667	-22.1875	-35.08
44.479166667	-22.229166667	-32.27
44.479166667	-22.270833333	-30.85
44.479166667	-22.3125	-33.31
44.479166667	-22.354166667	-31.4
44.479166667	-22.395833333	-25.51
44.479166667	-22.4375	-33.74
44.479166667	-22.479166667	-48.48
44.479166667	-22.520833333	-41.23
44.479166667	-22.5625	-37.05
44.479166667	-22.604166667	-37.73
44.479166667	-22.645833333	-33.68
44.479166667	-22.6875	-31.64
44.479166667	-22.729166667	-30.38
44.479166667	-22.770833333	-29.26
44.479166667	-22.8125	-28.96
44.479166667	-22.854166667	-29.7
44.479166667	-22.895833333	-32.48
44.479166667	-22.9375	-33.85
44.479166667	-22.979166667	-38.18
44.479166667	-23.020833333	-41.83
44.479166667	-23.0625	-42.72
44.479166667	-23.104166667	-42.57
44.479166667	-23.145833333	-44.62
44.479166667	-23.1875	-42.96
44.479166667	-23.229166667	-43.02
44.479166667	-23.270833333	-43.06
44.479166667	-23.3125	-43.67
44.479166667	-23.354166667	-41.95
44.479166667	-23.395833333	-40.54
44.479166667	-23.4375	-36.58
44.479166667	-23.479166667	-37.55
44.479166667	-23.520833333	-35.91
44.479166667	-23.5625	-32.95
44.479166667	-23.604166667	-37.51
44.479166667	-23.645833333	-38.33
44.479166667	-23.6875	-39.87
44.479166667	-23.729166667	-38.24
44.479166667	-23.770833333	-33.48
44.479166667	-23.8125	-25.75
44.479166667	-23.854166667	-16.66
44.479166667	-23.895833333	-6.21
44.479166667	-23.9375	1.19
44.479166667	-23.979166667	7.81
44.479166667	-24.020833333	13.22

**ANNEXE 2 : EXTRAIT DES VALEURS D'ANOMALIE MAGNETIQUE**

Long(DEG)	Lat(DEG)	Anomalie_mag(nT)
44.066667	-22.166667	12.270556
44.100000	-22.200000	12.256554
44.100000	-22.166667	12.200152
44.133333	-22.200000	12.261924
44.133333	-22.166667	12.036609
44.166667	-22.200000	12.289805
44.166667	-22.166667	11.885398
44.200000	-22.200000	12.359121
44.200000	-22.166667	11.772398
44.233333	-22.200000	12.451137
44.233333	-22.166667	11.690562
44.266667	-22.200000	12.587290
44.266667	-22.166667	11.663500
44.300000	-22.200000	12.812739
44.300000	-22.166667	11.721319
44.333333	-22.200000	13.182623
44.333333	-22.166667	11.895816
44.366667	-22.200000	13.717864
44.400000	-22.200000	14.374179
44.366667	-22.166667	12.195184
44.400000	-22.166667	12.577544
44.433333	-22.200000	15.115167
44.433333	-22.166667	12.961484
44.466667	-22.200000	15.737286
44.466667	-22.166667	13.207869
44.500000	-22.200000	15.902221
44.500000	-22.166667	13.139514
44.533333	-22.200000	15.436334
44.533333	-22.166667	12.637871
44.566667	-22.200000	14.506957
44.566667	-22.166667	11.819249
44.600000	-22.200000	13.417245
44.600000	-22.166667	10.845603
44.633333	-22.200000	12.347098
44.633333	-22.166667	9.799200
44.666667	-22.200000	11.304353
44.666667	-22.166667	8.655389
44.700000	-22.200000	10.126788
44.700000	-22.166667	7.335617
44.733333	-22.200000	8.461426
44.733333	-22.166667	5.631321
44.766667	-22.200000	6.080367
44.766667	-22.166667	3.336356
44.800000	-22.200000	3.003255
44.833333	-22.200000	-0.346254
44.800000	-22.166667	0.541849
44.833333	-22.166667	-2.602445
44.866667	-22.200000	-3.702172
44.866667	-22.166667	-5.793641
44.900000	-22.200000	-6.988262
44.900000	-22.166667	-8.969161

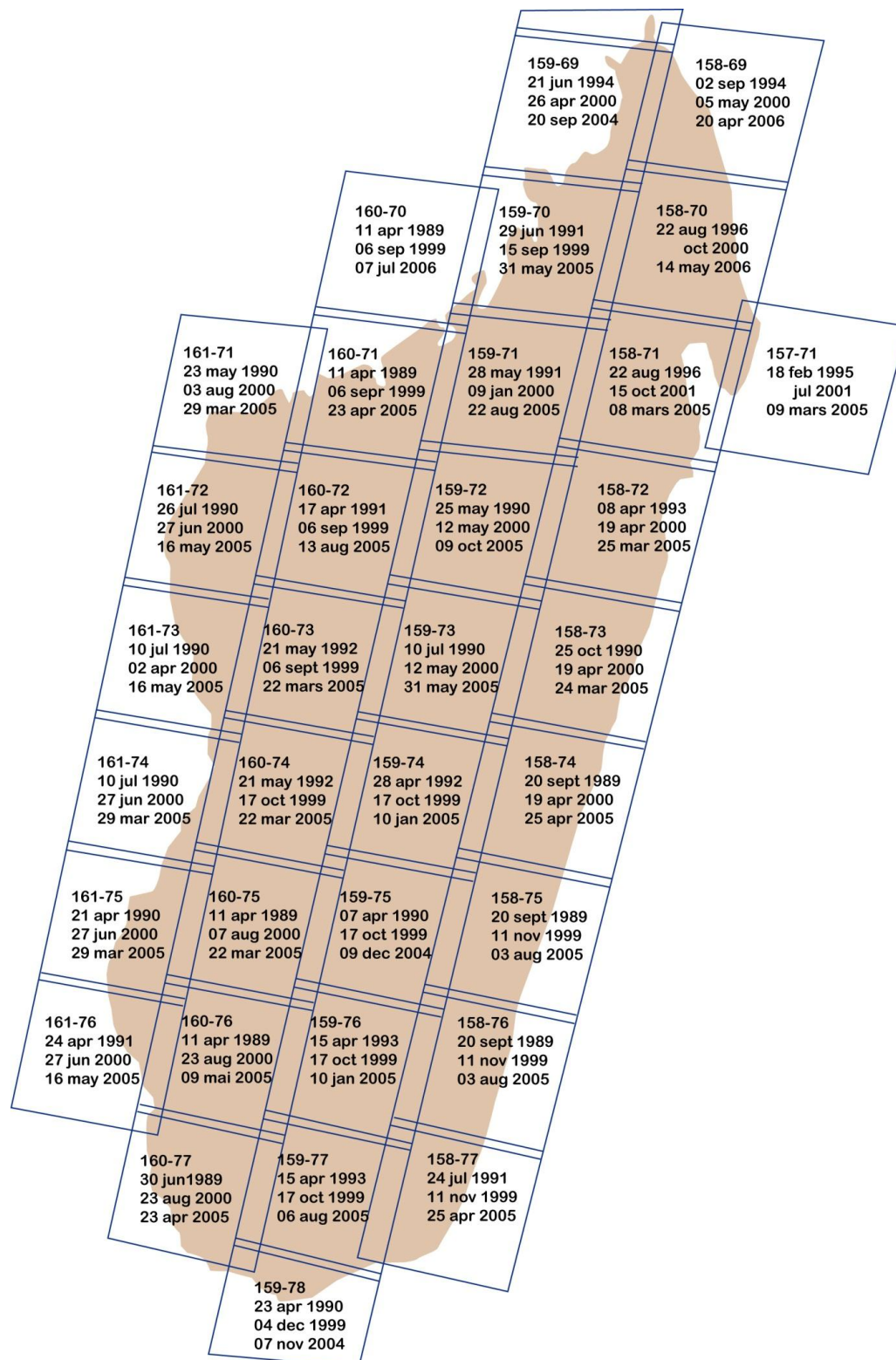


## ANNEXE 3 : BLOCS PETROLIERS





## ANNEXE 4 : REPARTITION DES IMAGES SATELLITES LANDSAT7 ETM<sup>+</sup> ET SRTM



## ANNEXE 5 : ECHELLE STRATIGRAPHIQUE INTERNATIONALE

Phanérozoïque					Age en Ma
Enthème	Erathème	Système	Série	Étage	
	Cénozoïque	Quaternaire	Holocène		0,0117
			Pléistocène	Supérieur	0,126
				"Ionien"	0,781
				Calabrien	1,806
		Pliocène	Gelasien	2,588	
			Plaisancien	3,600	
			Zancléen	5,332	
			Messinien	7,246	
		Miocène	Tortonien	11,608	
			Serravalien	13,82	
			Langhien	15,97	
			Burdigalien	20,43	
			Aquitanien	23,03	
			Oligocène	Chattien	28,4 ± 0,1
		Paléogène	Rupélien	33,9 ± 0,1	
			Éocène	Priabonien	37,2 ± 0,1
	Bartonien			40,4 ± 0,2	
	Lutétien			48,6 ± 0,2	
	Yprésien		55,8 ± 0,2		
	Paléocène		Thanétien	58,7 ± 0,2	
			Selandien	~ 61,1	
	Danien		65,5 ± 0,3		
	Mésozoïque	Crétacé	Supérieur	Maastrichtien	70,6 ± 0,6
				Campanien	83,5 ± 0,7
				Santonien	83,8 ± 0,7
Coniacien				~ 88,6	
Turonien				93,5 ± 0,8	
Cénomanién				99,6 ± 0,9	
Inférieur			Albien	112,0 ± 1,0	
			Aptien	125,0 ± 1,0	
			Barrémien	130,0 ± 1,5	
			Hauterivien	~ 133,9	
			Valanginien	140,2 ± 3,0	
Berriasien	145,5 ± 4,0				

Enthème	Phanérozoïque					Age en Ma
Erathème	Mésozoïque					
Système	Jurassique					
Série				Supérieur	Tithonien	145,5 ±4,0
				Kimméridgien	150,8 ±4,0	
Oxfordien				~ 155,6		
Callovien				161,2 ±4,0		
Bathonien				164,7 ±4,0		
Bajocien				167,7 ±3,5		
Moyen				Aalénien	171,6 ±3,0	
				175,6 ±2,0		
Toarcien				183,0 ±1,5		
Pliensbachien				189,6 ±1,5		
Sinemurien				196,5 ±1,0		
Hettangien				199,6 ±0,6		
Inférieur				Rhétien	203,6 ±1,5	
				Norien	216,5 ±2,0	
Carnien				~ 228,7		
Ladinien				237,0 ±2,0		
Anisien				~ 245,9		
Olenekien				~ 249,5		
Trias				Indusien	251,0 ±0,4	
				Changhsingien	253,8 ±0,7	
Wuchiapingien				260,4 ±0,7		
Capitanien				265,8 ±0,7		
Wordien				268,0 ±0,7		
Roadien				270,0 ±0,7		
Permien				Kungurién	275,6 ±0,7	
				Artinskien	284,4 ±0,7	
Sakmarien				294,6 ±0,8		
Assélien				299,0 ±0,8		
Gzhélien				303,4 ±0,9		
Kasimovien				307,2 ±1,0		
Carbonifère	Pennsylvanien			Moscovien	311,7 ±1,1	
				Bashkirien	318,1 ±1,3	
Serpukhovien				328,3 ±1,6		
Viséen				345,3 ±2,1		
Tournaisien				359,2 ±2,5		
359,2 ±2,5						

Enthème	Erathème	Système	Série	Étage	Age en Ma
Phanérozoïque	Paléozoïque	Dévonien		Famennien	359,2 ± 2,5
				Frasnien	374,5 ± 2,6
				Givétien	385,3 ± 2,6
				Eifélién	391,8 ± 2,7
				Emsien	397,5 ± 2,7
				Praguien	407,0 ± 2,8
		Silurien		Lochkovien	411,2 ± 2,8
					416,0 ± 2,8
				Pridolien	418,7 ± 2,7
				Ludfordien	421,3 ± 2,6
		Wenlock		Gorstien	422,9 ± 2,5
				Homerien	426,2 ± 2,4
				Sheinwoodien	428,2 ± 2,3
				Telychien	436,0 ± 1,9
	Ordovicien	Llandovery		Aeronien	439,0 ± 1,8
				Rhuddanien	443,7 ± 1,5
				Hirnantien	445,6 ± 1,5
				Katien	455,8 ± 1,6
		Supérieur		Sandbien	460,9 ± 1,6
				Darriwilien	468,1 ± 1,6
				Dapingien	471,8 ± 1,6
				Floien	478,6 ± 1,7
		Moyen		Tremadocien	488,3 ± 1,7
				Étage 10	~ 492 *
				Étage 9	~ 496 *
				Paibien	~ 499
	Cambrien	Furongien		Guzhangien	~ 503
				Drumien	~ 506,5
				Étage 5	~ 510 *
				Étage 4	~ 515 *
		Série 3		Étage 3	~ 521 *
				Étage 2	~ 528 *
		Terreneuvién		Fortunien	542,0 ± 1,0

Enthème	Erathème	Système	Age en Ma
Précambrien	Protérozoïque	Édiacarien	542
		Neo-protérozoïque	~ 635
		Cryogénien	850
		Tonien	1000
		Mésoproterozoïque	1200
		Sténien	1400
		Ectasien	1600
		Calymmien	1800
	Paléoproterozoïque	Stathérién	2050
		Orosirien	2300
		Rhyacien	2500
		Sidérien	2800
		Néoarchéen	3200
		Mésoarchéen	3600
Archéen	Hadéen		~ 4600

\* Le statut du quaternaire n'est, à ce jour pas encore fixé  
 \* Les âges des séries et les étages du Cambrien sont en attente de ratification.

Échelle de février 2008 d'après le travail de la Commission Internationale de Stratigraphie.

International Commission on Stratigraphy.  
<http://www.stratigraphy.org>

Erwan Le Fol 2009

## ANNEXE 6 : DE L'ALTIMETRIE A L'ANOMALIE GRAVIMETRIQUE [17]

Le potentiel gravitationnel perturbateur  $T$  ( $T = T_{\text{total}} - T_{\text{ellipse}}$ ) est relié à la hauteur du géoïde  $N$  au-dessus de l'ellipsoïde par la formule de Bruns :

$$N(x,y) \equiv -\frac{1}{g_0} T(x,y,O) \quad (6.1)$$

Avec  $g_0$  : valeur moyenne de l'accélération de la gravité (9,81 ms<sup>-2</sup>)

$$\Delta g \text{ et à l'anomalie gravimétrique } \Delta g \text{ par : } \Delta g = - \frac{\partial T(x,y,O)}{\partial z} \quad (6.2)$$

Les composantes Nord  $\eta$  et Est  $\xi$  de la déflexion de la verticale sont données par :

$$\begin{cases} \eta(x,y) = -\frac{\partial N}{\partial x} \equiv -\frac{1}{g_0} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \xi(x,y) = -\frac{\partial N}{\partial y} \equiv -\frac{1}{g_0} \frac{\partial T}{\partial y} \end{cases} \quad (6.3/6.4)$$

Ces quantités (1-2 à 1-4) vérifient l'équation de Laplace :  $\Delta T=0$

En remplaçant les relations (1-2) et (1-3 ; 1-4) dans l'équation de Laplace, nous obtenons une relation entre le gradient vertical gravimétrique et les composantes Est et Nord de la déflexion de la verticale :

$$\frac{\partial \Delta g}{\partial z} = -g_0 \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) \quad (6.5)$$

Cette dernière expression est utilisée pour estimer le gradient vertical gravimétrique des composantes grillées à partir de la déflexion de la verticale.

Le calcul de l'anomalie gravimétrique étant plus ardu dans le domaine spatial, on passe pour cela dans le domaine de Fourier. La transformée de Fourier de l'équation (1-5) est donnée par:

$$\frac{\partial \Delta g(k,z)}{\partial z} = -2i\pi g_0 [k_x \eta(k) + k_y \xi(k)] \quad (6.6)$$

On obtient, en résolvant l'équation de Laplace dans le domaine spectral ( $k$ , nombre d'onde), un prolongement vers le bas de l'anomalie gravimétrique :

$$\Delta g(k,z) = \Delta g(k,0) \cdot \exp[-2\pi|k|z] \quad (6.7)$$

Avec :  $|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  Nombre d'onde

$$\Delta g(k,0) = \frac{ig_0}{|k|} [k_x \eta(k) + k_y \xi(k)] \quad (6.8)$$

Pour convertir les profils altimétriques des hauteurs de la mer en anomalies gravimétriques, D.T. Sandwell et W. Smith (1988) ont d'abord construit une grille avec les composantes Nord et Est de la déflexion verticale. Ils ont fait une transformée de Fourier de la grille, après retrait d'un modèle global. Finalement, ils appliquent l'équation (1-8) et font une transformée de Fourier inverse pour, ainsi, obtenir l'anomalie gravimétrique (après réinjection d'un modèle global).

## ANNEXE 7 : HOMOGENEITE D'EULER [1]

L'utilisation de la déconvolution d'Euler pour faire l'interprétation rapide des données magnétiques est particulièrement efficace pour délimiter les contacts et évaluer rapidement la profondeur. La qualité de cette évaluation dépend en grande partie du choix approprié de l'indice structural, lequel est fonction de la géométrie des corps causaux.

Une rapide estimation de la place et de la profondeur des sources magnétiques peut être faite en utilisant la relation d'homogénéité d'Euler. Cette méthode est basée sur l'usage des gradients verticaux et horizontaux et elle n'a pas besoin de supposition sur l'aimantation. Elle peut ainsi être utilisée pour localiser les sources magnétiques sans faire une supposition sur l'aimantation.

Une structure aimantée située en point  $M(x_0, y_0, z_0)$  crée en point  $S(x, y, z)$  de la surface un champ d'anomalie d'intensité  $T$ . Selon Thompson (1982), la relation d'homogénéité d'Euler est définie par la formule ci –après :

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \quad (7.1)$$

Dans cette relation,  $B$  représente l'intensité du champ régional et  $N$  le degré d'homogénéité ou indice structural. Les coordonnées des sources sont obtenues par inversion matricielle.



## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE.....	ii
LISTE DES ABREVIATIONS .....	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX .....	viii
INTRODUCTION.....	1
 <b>PARTIE I : NOTION SUR LA GEOLOGIE PETROLIERE ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE</b>	
I. HISTORIQUE DE L'INDUSTRIE PETROLIERE .....	4
II. NATURE DU PETROLE .....	5
II.1 Définition .....	5
II.2 Composition chimique.....	5
II.2.1 Hydrocarbures naturels.....	5
II.2.2 Autres constituants .....	6
II.3 Propriétés physiques et chimiques.....	6
II.3.1.Caractères physiques .....	6
II.3.2.Caractères chimiques.....	6
II.3.3.Les pyrobitumes .....	7
III. ORIGINE DU PETROLE.....	7
IV. PROCESSUS DE TRANSFORMATION DE LA MATIERE ORGANIQUE	
IV.1 La diagenèse .....	9
IV.2 La catagenèse.....	9
IV.3 La métagenèse.....	9
V. LE SYSTEME PETROLIER .....	10
V.1 Présence de roches mères .....	10
V.1.1 La migration primaire .....	11
V.1.2 La migration secondaire .....	12
V.1.3 La migration tertiaire ou dysmigration .....	12

V.2	<i>Présence de roche-réservoir</i> .....	13
V.3	<i>Présence de roche-couverture</i> .....	14
V.4	<i>Présence de pièges</i> .....	14
V.4.1	Les pièges stratigraphiques : .....	14
V.4.2	Les pièges structuraux : .....	15
V.4.3	Les Pièges mixtes .....	16
V.5	<i>La préservation du pétrole et du gaz</i> .....	17
VI.	CADRE GEOGRAPHIQUE.....	18
VII.	CADRE GEOLOGIQUE .....	19
VII.1.	<i>Cadre géodynamique et géologique de Madagascar</i> .....	19
VII.1.1.	Rifting Afro-Malgache .....	20
VII.1.2.	Rifting Indo-Malgache .....	21
VII.2.	<i>Le bassin sédimentaire de Morondava</i> .....	21
VII.3.	<i>Description lithologique de la zone d'étude</i> : .....	23
VII.3.1.	Le socle .....	23
VII.3.2.	Le système Karoo.....	23
VII.3.3.	Le Post-Karoo .....	25
VII.4.	<i>Aperçu général de la géologie structurale</i> .....	29
 <b>PARTIE II : BASES METHODOLOGIQUES</b>		
I.	LES IMAGES NUMERIQUES .....	32
I.1	<i>La télédétection</i> .....	32
I.1.1	Définition .....	32
I.1.2	Principes physiques de la télédétection .....	32
I.2	<i>Le modèle numérique de terrain (MNT)</i> .....	35
II.	LES METHODES GEOPHYSIQUES.....	35
II.1	<i>Gravité obtenue par altimétrie satellitaire</i> .....	35
II.1.1.	Lois de Newton .....	35
II.1.2.	Altimétrie satellitaire .....	37
II.1.3.	Principe de mesure de la gravité par altimétrie satellitaire .....	40
II.1.4.	L'exploration pétrolière par la méthode gravimétrique .....	42
II.2	<i>Le magnétisme satellitaire</i> .....	47
III.2.1.	Théorie du magnétisme .....	47
III.2.2.	Propriétés magnétiques .....	49
III.2.3.	La prospection magnétique .....	53

III.2.4.Le magnétisme satellitaire .....	53
III. PRESENTATION ET ACQUISITION DES DONNEES .....	54
III.1. Images LandSat.....	54
III.1.1.Présentation .....	54
III.1.2.Mode d'acquisition des images .....	55
III.2. Les données gravimétriques obtenues par altimétrie satellitaire : la grille EGM08 .....	56
III.2.1.Présentation .....	56
III.2.2.Mode d'acquisition des données .....	56
III.3. Les données magnétiques satellitaires : la grille EMAG2.....	57
III.3.1.Présentation .....	57
III.3.2.Mode d'acquisition .....	57

### **PARTIE III : TRAITEMENTS, RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

I. LES LOGICIELS UTILISES.....	60
I.1. Le logiciel Oasis Montaj 6.4 (Geosoft).....	60
I.2. Le logiciel ENVI 4.5.....	60
I.3. Le logiciel ArcGis10 .....	60
II. TRAITEMENTS .....	61
II.1. Traitement des images LANDSAT7 ETM <sup>+</sup> .....	61
II.1.1.La composition colorée .....	61
II.1.2.Traitement et photo-interprétation.....	62
II.2. Réalisation de la carte du MNT .....	62
II.3. Traitement des données gravimétriques .....	63
II.3.1.Carte d'anomalie de Bouguer .....	63
II.3.2.Carte de déconvolution d'Euler.....	65
II.4. Traitement des données magnétiques .....	68
II.4.1.Carte de l'anomalie magnétique.....	68
II.4.2.Carte de déconvolution d'Euler.....	70
II.4.3.Carte du signal analytique .....	71
III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....	73
III.1. Interprétations tectono-structuraux .....	73
III.2. Interprétations des données géophysiques.....	76
III.2.1.Interprétation de la carte d'anomalie de Bouguer et de la carte structurale....	76
III.2.2.Interprétation de la carte d'anomalie magnétique et du signal analytique.....	80

III.2.3. Interprétation de la carte d'anomalie de Bouguer, d'anomalie magnétique et de la carte structurale.....	82
IV. MODELISATION 2D.....	83
IV.1. Techniques de modélisation .....	83
IV.2. Choix des profils .....	83
IV.3. Modélisation.....	84
IV.3.1. Profil A A' .....	84
IV.3.2. Profil B B' .....	86
IV.3.3. Profil CC' .....	88
V. INTERETS PETROLIERS .....	90
V.1. La fosse du Karroo.....	91
V.2. La zone centrale Tongobory-Sikily .....	91
V.3. La zone côtière .....	92
V.4. L'extrême Nord-Ouest.....	92
CONCLUSION.....	93
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	i
ANNEXES.....	a
TABLE DES MATIERES .....	i
RESUME	

**Titre : ETUDE STRUCTURALE DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE MORONDAVA  
ENTRE MANJA ET L'ONILAHY PAR TELEDETECTION ET INTERPRETATION  
GEOPHYSIQUE»**

Nombre de pages	: 93	Nombre des annexes	: 07
Nombre de tableaux	: 04	Nombre de figures	: 58

**RESUME** - L'objectif principal de cet ouvrage est de localiser les zones probables de formation de gisement d'hydrocarbures dans le bassin de Morondava. Notre étude a mis en évidence les structures cassantes et souples qui pourraient constituer des pièges d'hydrocarbures tout en estimant leur profondeur, permettant ainsi d'avoir une image du sous-sol. Les données géophysiques utilisées proviennent des mesures faites par des satellites qui ont été combinées avec la télédétection et le MNT. L'étude a permis d'avancer que la mise en place de cette partie du bassin sédimentaire malgache s'est faite par extension, par transtension et par subsidence. Comme perspective, les différentes interprétations ont permis de dégager deux zones pouvant susciter des intérêts pétroliers. Ces zones sont situées entre autre aux alentours de la fosse du Karroo et aux environs de l'intrusion basique d'Andranopasy.

Le présent mémoire pourrait donc être considéré comme guide de prospection pétrolière pour tous travaux réalisés dans cette partie du bassin sédimentaire malgache.

**Mots clés** : Bassin de Morondava, pétrole, satellite, magnétisme, gravimétrie, MNT, anomalie, télédétection, modélisation.

**ABSTRACT** - This work has as objective to locate the potential areas for the formation of hydrocarbon deposits in Morondava basin. Our survey has obviously shown the brittle and flexible structures, that could constitute hydrocarbon traps and has both enabled us to estimate their depth and to have a view of their underground basement.

The geophysical data used come from measurements made by satellites combined with remote sensing and DTM. This study has let understand that the implementation of this part of the Malagasy sedimentary basin has been made by extension, pull-apart and subsidence. As perspective, different interpretations have identified two potential areas of petroleum interest: around the pit Karroo and around the basic intrusion of Andranopasy.

As a conclusion, the present memoir could be considered as a guide for any petroleum prospection realized in this Malagasy sedimentary basin.

**Key-words**: Morondava basin, petroleum, satellites, magnetism, gravimetry, DTM, anomaly, remote sensing, modeling.

**Encadreurs :**

**Auteur** : RAHARIVONIMBELO Toky Niaina  
**Adresse** : LOT VS 84 Antsahondra Haute-ville  
**Tel** : 033 12 220 45  
**Email** : rahtoky@gmail.com

Dr. RAKOTOVAO Soatsitohaina Ravaonjalitera  
**Email** : soatsitohaina\_rakoto@yahoo.fr  
Dr. RAHARIMANANIRINA Clodette  
**Email** : cmananirina@yahoo.fr