

# **SOMMAIRE**

**REMERCIEMENTS**

**SOMMAIRE**

**LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**INTRODUCTION**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>PARTIE 1 : CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE</b>                                  | <b>2</b>  |
| <b>CHAPITRE I: GENERALITES SUR L'EXPLORATION PETROLIERE</b>                         | <b>3</b>  |
| <b>I.1. Notion sur le pétrole</b>   | <b>3</b>  |
| <b>I.2. Activités d'exploration</b>   | <b>23</b> |
| <b>CHAPITRE II: CONTEXTE GENERALE SUR LA ZONE D'ETUDE ET LES TRAVAUX ANTERIEURS</b> | <b>36</b> |
| <b>II.1. Présentation de la zone à étudier</b>                                      | <b>36</b> |
| <b>II.2. Cadre géologique</b>   | <b>41</b> |
| <b>II.3. Travaux antérieurs</b>   | <b>49</b> |
| <b>PARTIE 2 : BASES METHODOLOGIQUES</b>   | <b>52</b> |
| <b>CHAPITRE III: RAPPEL SUR LA PROSPECTION MAGNETIQUE</b>                           | <b>53</b> |
| <b>III.1. Principe de base</b>  | <b>53</b> |
| <b>III.2. Données magnétiques</b>   | <b>57</b> |
| <b>III.3. Traitement des données magnétiques</b>                                    | <b>62</b> |
| <b>CHAPITRE IV: RAPPEL SUR LA PROSPECTION GRAVIMETRIQUE</b>                         | <b>64</b> |
| <b>IV.1. Principe de base</b>   | <b>64</b> |
| <b>IV.2. Données gravimétriques</b>   | <b>68</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>IV.3. Anomalie gravimétrique</b>  | <b>74</b> |
| <b>PARTIE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATION</b>                                      | <b>82</b> |
| <b>CHAPITRE V: LIEN ENTRE GRAVIMETRIE ET MAGNETISME</b>                            | <b>83</b> |
| <b>V.1. Relation de poisson entre les anomalies de gravité et de magnétisme</b>    | <b>83</b> |
| <b>V.2. Méthode d'interprétation des données</b>                                   | <b>87</b> |
| <b>CHAPITRE VI: PRESENTATION DES DONNEES, MODELISATION ET INTERPRETATION</b>       | <b>89</b> |
| <b>VI.1. Présentation et nature des données</b>                                    | <b>89</b> |
| <b>VI.2. Modélisation et interprétation à partir de la corrélation des données</b> | <b>95</b> |
| <b>CONCLUSION</b>  |           |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>   |           |
| <b>REFERENCES WEBOGRAPHIQUES</b>   |           |
| <b>ANNEXES</b>   |           |

## ***LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS***

AIE : Agence International d'Energie

API: American Petroleum Institute

BD 500 : Base de Donnée à l'échelle 1/500000

BTS : Basse Teneur en Soufre

CGS : Centimètre-Gramme-Seconde

CPP : Contrat de Partage de Production

EMAG : Earth Magnetic Anomaly Grid

ERS : European Remote-Sensing Satellite

FTM : Foiben-Taosaritanin'I Madagasikara

GPL: Gaz de Pétrole Liquéfié

GPS : Global Positioning System

GRID : Global Resource Information Database

IGRF: Information Géographique et Référence Foncier

MNT : Modèle Numérique du Terrain

MTS : Moyenne Teneur en Soufre

NNE : Nord Nord Est

NOC : National Oil Companies

OMNIS : Offices des Mines Nationales et des Industries Stratégiques

ONU : Organisation des Nations Unies

OPEP : Organisation des Pays Exportateur de Pétrole

PGRM : Programme de Gouvernance des Ressources Minérales

PIB: Production Interne Brute

RN6 : Route Nationale 6

SGDM : Société Géosciences pour le Développement de Madagascar

SMM: Système Magnétomètre Marin

SPM : Société des Pétrole de Madagascar

SSW : Sud Sud Ouest

TBTS : Très basse Teneur en Soufre

TEP : Tonne Equivalent Pétrole

THTS : Très Haute Teneur en Soufre

TM : Thematic Mapper

USD : United State Dollar

UTM : Universal Transverse Mercator

WGS84 : World Geodesic System 1984

WTI: West Texan Intermediate

## **LISTE DES FIGURES**

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure 1 :  | Hydrocarbures générés à partir du kérogène en fonction de la profondeur d'enfouissement .....                   | 10 |
| Figure 2 :  | Migrations primaire et secondaire du pétrole conduisant à la formation d'un gisement.....                       | 12 |
| Figure 3 :  | Principaux types de pièges à pétrole .....  | 13 |
| Figure 4 :  | Zone de présence et trafics pétroliers.....   | 22 |
| Figure 5 :  | Les blocs pétroliers de madagascar .....  | 25 |
| Figure 6 :  | Equipement expérimental utilisé pour déterminer l'accélération de la gravité sur un prisme en chute libre ..... | 29 |
| Figure 7 :  | Exemple de carte gravimétrique .....  | 30 |
| Figure 8 :  | Gravimètre scintrex .....   | 30 |
| Figure 9 :  | Magnétisme aéroporté.....   | 31 |
| Figure 10 : | Exemple de plan de vol.....   | 31 |
| Figure 11 : | Exemple de carte d'anomalie magnétique.....   | 33 |
| Figure 12 : | Technique d'acquisition sismique .....  | 34 |
| Figure 13 : | Exemple d'un résultat sismique .....  | 34 |
| Figure 14 : | Carte de localisation de la zone d'étude .....  | 37 |
| Figure 15 : | Carte hydrographique de la zone d'étude.....  | 39 |
| Figure 16 : | Carte géologique couvrant la zone d'étude.....  | 41 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure 17 : | Coupe stratigraphique du sédimentaire malgache.....                     | 43 |
| Figure 18 : | Carte de réduction au pôle QRS34-RS35 .....                             | 50 |
| Figure 19 : | Représentation du champ magnétique terrestre .....                      | 56 |
| Figure 20 : | a) Détecteur au bout du tringle ; b) Détecteur dans le sac.....         | 59 |
| Figure 21 : | Coupe transversale d'un poisson équipé d'un magnetomètre ....           | 61 |
| Figure 22 : | Gravimètre la coste-romberg d 139 .....                                 | 69 |
| Figure 23 : | Vue interne d'un gravimètre.....  | 70 |
| Figure 24 : | Mesure de la variation de la gravité entre deux points A et B.....      | 70 |
| Figure 25 : | Exemple de reseau de base .....   | 73 |
| Figure 26 : | Marées gravimetriques.....  | 74 |
| Figure 27 : | Série de mesure suivant un cheminement en boucle .....                  | 75 |
| Figure 28 : | Série de mesure suivant un cheminement non bouclé .....                 | 76 |
| Figure 29 : | Illustration de la correction d'altitude .....                          | 78 |
| Figure 30 : | Illustration de la correction de plateau .....                          | 79 |
| Figure 31 : | Source d'anomalie de bouguer .....                                      | 80 |
| Figure 32 : | Paramètres gravimétriques d'une sphère .....                            | 85 |
| Figure 33 : | Paramètres gravimétriques d'un cylindre horizontal .....                | 86 |
| Figure 34 : | Carte d'anomalie de bouguer superposé sur une carte géologique<br>..... | 92 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figure 35 : | Carte d'anomalie magnétique superposé sur une carte géologique | 94  |
| Figure 36 : | Organigramme d'interprétation des données en model 2d          | 96  |
| Figure 37 : | Modélisation du profil AA'                                     | 97  |
| Figure 38 : | Densité moyennes d'échantillons de surface et de carottes      | 99  |
| Figure 39 : | Modélisation du profil BB'                                     | 100 |

## ***LISTE DES TABLEAUX***

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tableau 1. | Classification des bruts                             | 19 |
| Tableau 2. | Coordonnees delimitant la zone d'etude               | 36 |
| Tableau 3. | Formations karroo malagasy                           | 46 |
| Tableau 4. | Formations post- karroo dans le bassin d'antsiranana | 47 |
| Tableau 5. | Source du champ magnetique mesure en un point        | 55 |
| Tableau 6. | Densite des roches ignees                            | 67 |
| Tableau 7. | Densite des roches metamorphiques                    | 68 |
| Tableau 8. | Densite des mineraux divers et non-metalliques       | 68 |
| Tableau 9. | Masses volumiques de quelques roches et mineraux     | 99 |

## INTRODUCTION

La demande mondiale d'énergie primaire demeure en forte croissance et elle a peu de chances de diminuer, à moyen terme, compte tenu du développement souhaitable et nécessaire des pays les moins riches. Les deux demandes les plus sensibles concernent l'électricité dans les mégapoles et les carburants pour les transports. Actuellement, les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) fournissent 90% de l'énergie primaire, tandis que les hydrocarbures (pétrole et gaz) sont considérés comme les énergies de bouclage, permettant de répondre à tout niveau de demande. De plus, les réserves de pétrole et de gaz sont importantes, mais limitées. La moitié des réserves prouvées de pétrole et le tiers de celles de gaz seront déjà consommés en 2020. Les réserves de gaz permettront juste d'atteindre 2050, celles de pétrole seront insuffisantes. C'est pourquoi, un effort considérable de recherche scientifique et technologique, dans les domaines discutés ici, associé à des économies d'énergie sévères, permettrait d'atteindre la fin du siècle.

Ainsi, depuis l'époque révolutionnaire en 1978, l'OMNIS (Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques) a déjà mené des études sérieuses en ce sens. L'un des sites concernés par la recherche pétrolière est la commune d'Ankaramibe qui fera l'objet des études dans ce mémoire. De ce fait, le thème de ce mémoire s'intitule alors : **« EXPLORATION PETROLIERE ET INTERPRETATION CONJOINTE DES DONNEES GRAVIMETRIQUES ET MAGNETIQUES DANS LA COMMUNE D'ANKARAMIBE »**. Notre objectif est d'établir et esquisser à grand trait les principaux éléments de la structure interne et du modèle de structure du socle de la plateforme.

Pour ce faire, six chapitres sont nécessaires pour développer ce thème. Premièrement, on parle des généralités sur l'exploration pétrolière. Ensuite, le contexte général sur la zone d'étude et les travaux antérieurs. Au troisième chapitre, on explique la théorie du magnétisme. Ensuite, celle de la gravimétrie. Au cinquième chapitre, on parle du lien entre la gravimétrie et le magnétisme. Et pour terminer, au dernier chapitre, la présentation, la modélisation et l'interprétation des données.

# **PARTIE 1- CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE**

## **Chapitre I: GENERALITES SUR L'EXPLORATION PETROLIERE**

### **I.1. Notion sur le pétrole**

#### **I.1.1. Définition**

Le pétrole, du latin *petra* = pierre et *oleum* = huile, soit « huile de pierre » est une huile minérale naturelle utilisée comme source d'énergie. Il est issu d'un mélange variable d'hydrocarbures (molécules composées d'atomes de carbone et d'hydrogène) associé à d'autres atomes, principalement de soufre, d'azote et d'oxygène. Certains de ses composants peuvent être gazeux, liquides et parfois solides selon la température et la pression. Cela explique la consistance variable du pétrole, plus ou moins visqueuse ou liquide. L'exploitation du pétrole comme source d'énergie, dite fossile, est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine. Dense, facilement stockable et transportable, le pétrole fournit la quasi totalité des carburants liquides. Il est aussi fréquemment utilisé pour la pétrochimie (caoutchoucs, plastiques, textiles, chimie).

Sa constitution est issue de la géologie sédimentaire d'un lieu et plus spécifiquement de la succession de trois phases :

- La phase d'accumulation de matière organique dans les profondeurs lors de la sédimentation. Cette matière est essentiellement d'origine végétale.
- La phase de maturation en hydrocarbures, moment où la matière se transforme avec l'augmentation de la pression et de la température. Elle est d'abord transformée en kérogène. A haute température, le kérogène subit une décomposition thermique, appelée pyrolyse, qui expulse les hydrocarbures. Plus le sédiment est profond et chaud, plus la part de gaz (hydrocarbures légers) est importante.
- La phase de migration et piégeage : par la pression croissante, une partie des hydrocarbures migre vers la surface de la terre, où elle s'oxyde ou subit une biodégradation. L'autre partie migre jusqu'à rester piégée dans une roche poreuse et perméable, source d'un futur gisement de pétrole, si le piège est fermé.

La naissance d'un gisement de pétrole (ou de gaz, les deux étant corrélés) résulte ainsi d'une conjonction favorable de facteurs géologiques. Cela influe sur la disparité des gisements dans le monde et les typologies de pétrole. Les pétroles sont généralement classés

selon leur origine et leur composition (fluidité, densité mesurée en degrés API, teneur en soufre,...).

Dans l'usage, on distingue aussi les pétroles « conventionnels » faciles à extraire et à raffiner parce qu'ils restent fluides et pompables du puits au stockage de surface, des pétroles « non-conventionnels » qui requièrent des techniques d'extraction plus sophistiquées. On peut citer parmi les pétroles non-conventionnels le pétrole extra-lourd, les sables bitumineux, les schistes bitumineux.

### **I.1.2. Histoire de l'utilisation du pétrole**

L'usage du pétrole remonte à l'Antiquité, mais l'approvisionnement était limité aux affleurements naturels de pétrole, et au pétrole trouvé accidentellement en creusant des puits pour trouver de l'eau potable ou de la saumure. Ces sources étaient faibles et irrégulières. Les civilisations mésopotamiennes s'en servaient comme produit pharmaceutique, cosmétique et comme combustible pour les lampes à huile. Les Égyptiens employaient de l'asphalte pour la momification.

Au Moyen Âge, il a été utilisé par les Byzantins, puis les Vénitiens, dans la préparation du « feu grégeois » pour incendier et couler les navires ennemis. Les Amérindiens, de leur côté, utilisaient du pétrole pour calfater les embarcations et pour ses supposées vertus médicinales. Au début du XIXe siècle, il existait une utilisation ponctuelle du pétrole, surtout aux États-Unis. Il était vendu comme remède « miracle », ou servait dans des lampes et comme lubrifiant. À la même époque, le pétrole de Gabian, était utilisé en France, dans la pharmacopée et les salons de coiffure...

1859-1901 : la naissance d'une industrie

Contrairement à une idée répandue (surtout aux États-Unis), Edwin Drake n'a pas foré le premier puits de pétrole cette année-là. Cependant, il semble avoir été le premier à produire du pétrole depuis un puits spécifiquement foré dans ce but et, quoi qu'il en soit, il a provoqué la naissance de l'industrie pétrolière. L'idée était simple : puisque le pétrole qu'on trouvait en surface semblait fuir depuis des réserves souterraines, on devait pouvoir en produire beaucoup plus en creusant pour accéder directement à celles-ci. Il forait donc son puits en Pennsylvanie, dans une région connue pour les affleurements de pétrole, et produisit les premiers barils de

l'ère moderne. Les États-Unis en produisirent 274 tonnes en 1859. L'année précédente, le seul producteur était la Roumanie avec 200 tonnes.

En 1885, le chimiste américain Benjamin Silliam Jr. (1816-1885), reprenant des travaux antérieurs, retrouva un certain nombre de produits naturels par distillation du pétrole : goudrons, lubrifiants, naphta, solvants pour les peintures ainsi que l'essence qui, considérée à l'époque comme produit mineur, était utilisée comme détachant

#### 1901-1945 : changement d'échelle

Foré en 1901, le premier puits dans le gisement de Spindletop au Texas inaugura une ère nouvelle. Creusé dans un réservoir profond et non indiqué par des affleurements, il produisit 80 kbbls/j après son percement. Vers la même époque, le moteur à explosion se généralise, créant une nouvelle demande pour les carburants liquides. La production augmente de façon soutenue jusqu'à la Seconde Guerre mondiale.

Des gisements de pétrole de grande taille, comme East Texas ou Kirkouk, furent si prolifiques que l'inquiétude principale était alors de savoir comment écouler la production. Le pétrole devint une source d'énergie majeure, au même titre que le charbon. Pendant les deux guerres mondiales, l'approvisionnement en pétrole des belligérants fut un enjeu majeur. L'industrie pétrolière se développa ensuite dans un nombre accru de pays, mais resta largement dominée par la production américaine qui, en 1945, représente encore 60 % du chiffre mondial de 7 Mbbls/j. Néanmoins, s'agissant des réserves, une part accrue se situe au Moyen-Orient. Par exemple, Burgan est découvert en 1938.

#### 1945-1973 : l'abondance

La forte croissance économique qu'ont connue les pays développés entre 1950 et le milieu de 1970 n'a pu se réaliser qu'au prix d'un très fort accroissement de la consommation d'énergie. En effet, cette consommation est passée de 1,7 milliard de TEP (tonne équivalent pétrole) en 1950 à 5,2 milliards de TEP en 1970, soit un triplement en 20 ans. Au cours de cette période, le pétrole bon marché détrôna progressivement le charbon ; alimentant les centrales électriques et l'industrie, suscitant une crise économique de reconversion dans les bassins charbonniers. Dans le même temps, il permit la révolution verte. La population mondiale augmenta de 60 % durant ces 28 années, tandis que la production de pétrole fut multipliée par sept.

En 1953, les États-Unis mirent en place des restrictions à l'importation de pétrole afin de stimuler la production nationale. La fermeture du Canal de Suez de 1967 à 1975 entraîna une augmentation prodigieuse de la capacité unitaire des transports maritimes. C'est ainsi qu'on a construit dans les années 1970 des supertankers de 550 000 tonnes.

Vers 1970, on commença à se rendre compte qu'une croissance exponentielle de la production ne peut être maintenue indéfiniment, et certains pays producteurs se mirent à raisonner sur le long terme, se disant qu'en limitant la production, ils pourraient la prolonger. Ils prirent conscience de leur pouvoir face aux pays consommateurs et aux compagnies pétrolières. Des négociations importantes eurent lieu à Téhéran, puis à Tripoli en 1971, où les pays de l'OPEP obtinrent des compagnies une revalorisation substantielle de leurs revenus et des assurances de nouvelles augmentations. Le prix de l'Arabe léger (Arabian Light), brut de référence, n'était que de 3,02 USD courant le baril.

#### 1973-1985 : les crises pétrolières

En février 1971, l'Algérie annonça à la surprise générale la nationalisation des hydrocarbures, elle fut suivie par l'Irak en 1972, puis par la Libye en 1973, qui nationalisa à son tour 5 compagnies anglo-américaines de pétrole. En octobre 1973 éclata la guerre du Kippour. Les pays arabes, déjà mécontents de la dévaluation du dollar américain qui servait à payer leur pétrole (la convertibilité en or du dollar ayant été supprimée), décrétèrent un embargo pétrolier. Le prix du pétrole bondit de 3 à 13 USD. Une crise encore plus grave eut lieu en 1979, provoquée par la Révolution iranienne. Le prix culmina à 40 dollars en 1981. La production mondiale passa de 66 Mbbls/j en 1979 à 56 en 1983, le niveau de 1979 ne fut retrouvé qu'en 1993 - et il ne le fut jamais si l'on divise par la population. Dans ce contexte, les pays non-membres de l'OPEP se lancèrent dans un développement rapide de prospection et forage dans de nouvelles régions, comme la baie de Campeche, la mer du Nord, la Sibérie et l'Alaska.

#### 1986-2001 : le retour à l'abondance ?

Une nouvelle période de prix relativement bas à partir de 1986 est due à la conjonction de plusieurs phénomènes. D'une part, les pays du Golfe augmentent massivement leur production. Il s'agit en partie d'un plan convenu avec les États-Unis dans le but de « couler » l'économie soviétique, pour laquelle le pétrole représente une source de devises importantes.

D'autre part, le pétrole des nouvelles régions explorées en réponse aux chocs pétroliers est exploité intensivement, les réserves s'épuisant à un rythme beaucoup plus rapide que celui des régions « traditionnelles ».

Depuis 2002 : l'inquiétude

En 2006, le prix du pétrole se situe près des 75 USD, soit cinq fois plus qu'en 2001. Cette hausse a pris tous les analystes par surprise, d'autant qu'elle s'est produite sans raison politique majeure, contrairement aux chocs des années 1970. Si des paramètres momentanés (ouragans, ruptures d'oléoducs, incidents politiques, situation au Venezuela) sont intervenus, les raisons de fond sont :

- ✓ La hausse de la demande, en particulier de la Chine, dont la consommation a augmenté de plus de 2 Mbbls/j en quatre ans, résultat de l'accès d'une fraction pourtant faible de sa population à la société de consommation.
- ✓ L'épuisement rapide des réserves de certaines régions, comme la Mer du Nord, qui ont été exploitées très intensivement. Par exemple, la production britannique a diminué de 40 % entre 2000 et 2006, tandis que la production australienne a diminué de moitié.
- ✓ Les investissements trop faibles de la décennie précédente. Actuellement, tous les éléments de la chaîne pétrolière (derricks, gisements, oléoducs, pétroliers, raffineries) sont vieux et utilisés à 100 % de leur capacité.
- ✓ L'incapacité des pays du Golfe à augmenter suffisamment leur production, du fait du vieillissement de leurs grands gisements, dont la plupart sont exploités depuis 40 ans ou plus.

Les paramètres principaux pour l'estimation de la demande pétrolière à moyen et long terme sont au nombre de cinq :

- la croissance économique ;
- l'évolution de la part du pétrole dans le mix énergétique ;
- les changements dans l'efficacité de l'utilisation du pétrole (intensité énergétique par unité de PIB) ;
- les prix du pétrole ;
- les conditions climatiques.

D'autres éléments impactent la demande à court terme :

- le prix des énergies concurrentes (principalement gaz et charbon) ;
- la fiscalité sur les produits pétroliers ;
- le taux de change du dollar ;
- le taux de charte des tankers ;
- la spéculation ;
- le nombre de jours travaillés dans le mois ;
- les grèves dans les industries très consommatrices de pétrole ;
- etc.

### **I.1.3. Origine organique du pétrole**

Dans les sédiments déposés en milieu aquatique, la matière organique provient des organismes vivant dans la tranche d'eau (plancton), sur le fond (la faune et la flore benthiques) ou sur les terres émergées voisines charriées par les cours d'eau. Cette productivité organique en milieu marin est contrôlée par la présence de sels minéraux indispensables (azote et phosphore) et par l'éclairement qui rend possible le phénomène de photosynthèse végétale, origine de la chaîne alimentaire animale.

La partie superficielle des sédiments est le siège d'une activité micro biologique intense. Les sables et les grés ne sont pas des roches favorables à la formation du pétrole. Au contraire, les sédiments imperméables et compacts (argile, vase, calcaire fine), dénommés roches mères, constituent rapidement un milieu clos et réducteur. L'activité micro biologique, privée d'oxygène (anaérobie) fait pratiquement disparaître la matière organique pour ne laisser subsister que les kérogènes. Il s'agit d'un ensemble de macro molécules constituant un résidu inassimilable par les micros organismes. À mesure que les sédiments sont recouverts par de nouveaux dépôts, ils s'enfoncent, provoquant une augmentation de la température et de la pression. Ceci entraîne une rupture de certaines liaisons à l'intérieur du kérogène ce qui aboutit à l'élimination de l'oxygène, de l'eau et de l'azote. Le processus récurant fournit les constituants habituels du pétrole à savoir les hydrocarbures (mélange de carbone et d'hydrogène), les résines, et les asphaltènes (soufre, azote et oxygène).

À plus grande profondeur, la transformation se poursuit jusqu'au phénomène de craquage où les hydrocarbures deviennent de plus en plus légers. Dans les bassins très profonds, les hydrocarbures liquides cèdent la place au gaz, puis au méthane seul<sup>49</sup>. Les réactions de formation du pétrole sont très lentes. La vitesse d'enfouissement des sédiments est de quelques mètres par millions d'années et l'augmentation de la température est de l'ordre de 30°C par 1000 mètres. Le pétrole se déplace au sein des sédiments qui l'abritent, ce qui implique qu'il ne se rencontre généralement pas là où il a pris naissance. Le pétrole brut contient des centaines de milliers de types moléculaires différents dont quelques centaines seulement ont été séparés et identifiés.

#### **I.1.4. Maturation du kérogène en pétrole**

Par leurs propres masses et à la suite de leur couverture par de nouveaux dépôts, les couches sédimentaires s'enfoncent naturellement dans la croûte terrestre. Au cours de ce phénomène et au-delà de 1 000 mètres de profondeur sous le plancher océanique, les résidus minéraux des boues de sédimentation se solidifient en une roche relativement imperméable. Appelée « roche-mère », cette formation piège le kérogène.

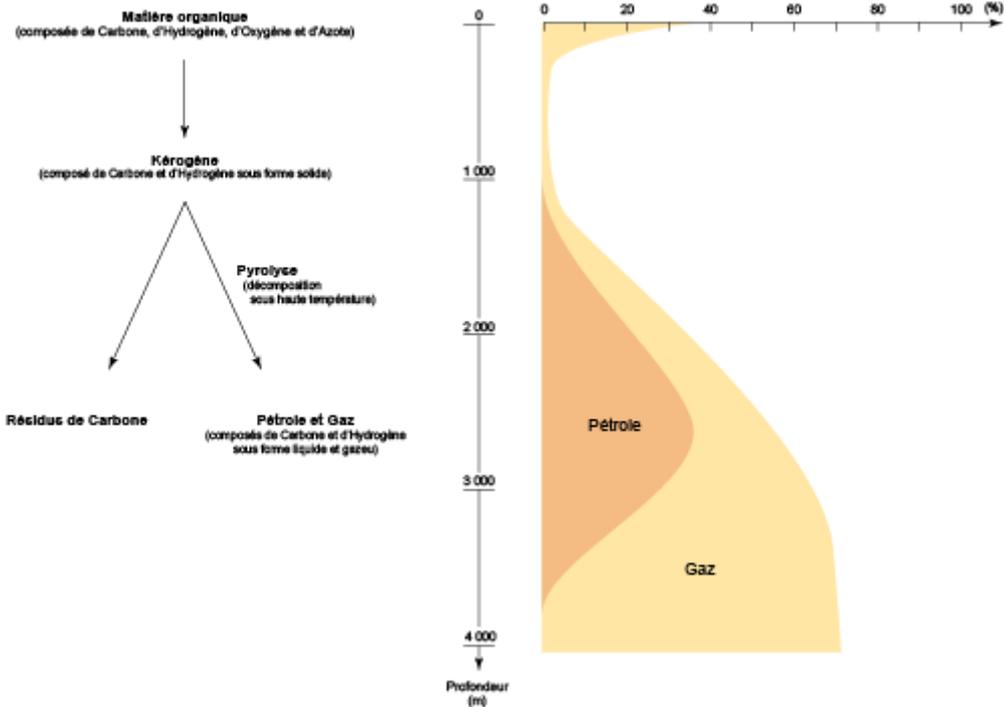
La roche-mère subit également un enfouissement. Le kérogène est donc soumis à des pressions et des températures géothermiques de plus en plus élevées, augmentant d'environ 3°C tous les 100 mètres. À une température supérieure à 60°C, ce qui correspond à un enfouissement d'environ 1 500 à 2 000 mètres, le kérogène subit un craquage thermique, appelé également « pyrolyse ». Cette transformation chimique élimine l'azote et l'oxygène résiduels pour laisser de l'eau, du CO<sub>2</sub> et des hydrocarbures, molécules exclusivement composées de carbone et d'hydrogène. Le mélange d'hydrocarbures liquides est appelé pétrole brut.

Des hydrocarbures sous forme gazeuse (méthane) sont également générés lors de la transformation du kérogène. La proportion de gaz au sein de la roche-mère s'avère d'autant plus élevée que la durée et la température de transformation du kérogène sont importantes :

- entre 60° et 120°C (entre 2 000 à 3 000 mètres de profondeur), le kérogène produit principalement du pétrole et une faible quantité de gaz ;
- à partir de 120°C (soit 3 000 mètres), la production de pétrole à partir du kérogène devient insignifiante. Les hydrocarbures liquides présents dans la

roche-mère sont à leur tour transformés en molécules de gaz sous l'effet de la température et de la pression ;

- au-delà de 150°C (soit un enfouissement supérieur à 4 000 mètres), il ne se forme plus que du gaz.



(©2011, d'après le département de géologie de l'université Laval)

**Figure 1 :** *Hydrocarbures générés à partir du kérogène en fonction de la profondeur d'enfouissement*

Lorsque la roche-mère n'est pas suffisamment enfouie, le kérogène qu'elle contient ne subit pas de pyrolyse. Appelé schiste bitumineux, il s'agit d'un combustible fossile arrêté au stade d'"avant-pétrole" dans le processus de maturation du kérogène. Par un procédé industriel, les schistes bitumineux peuvent être transformés en pétrole en subissant une pyrolyse (à 500° C pour accélérer la maturation du kérogène).

### I.1.5. Formation des gisements de pétrole

Le pétrole est une matière première facilement exploitable lorsqu'il se concentre dans un réservoir par des phénomènes de migration :

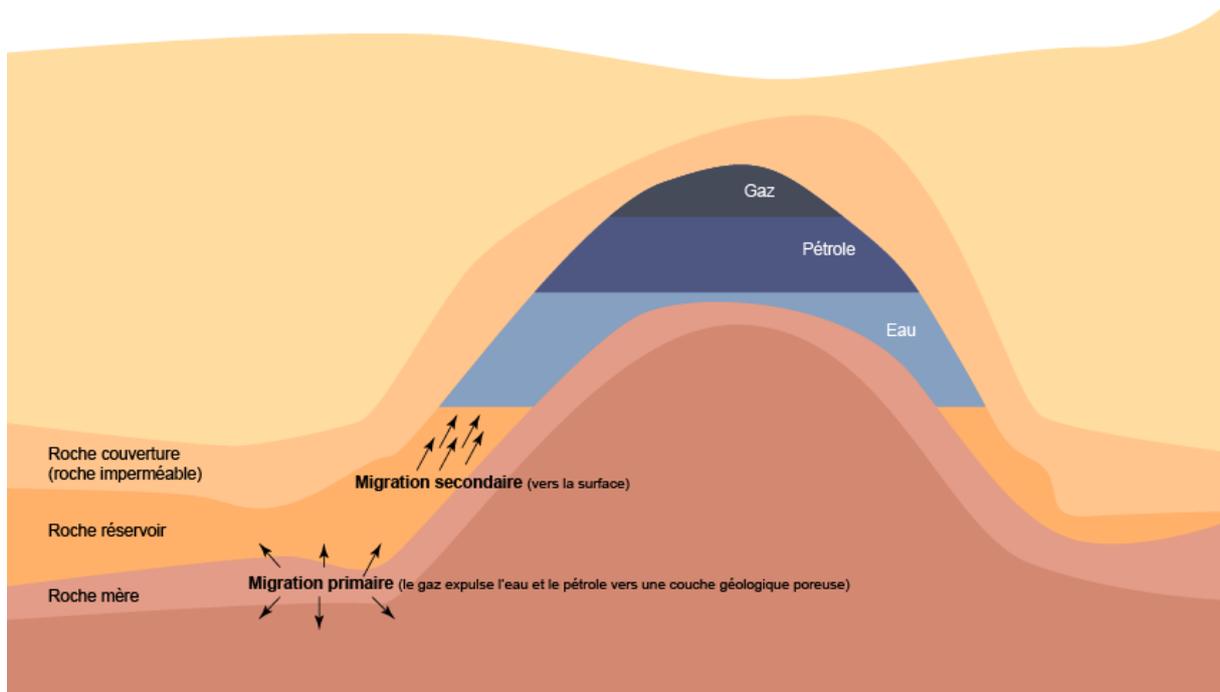
### ***a. Migration primaire***

Le pétrole brut est initialement contenu dans la roche-mère, compacte et imperméable. Par un mécanisme encore mal élucidé (certainement lié à une augmentation de pression dans la roche-mère au cours de son enfouissement) l'eau, le pétrole et le gaz issus du kérogène peuvent être expulsés de leur formation d'origine, migrant alors vers la future roche-réservoir.

### ***b. Migration secondaire***

De faible densité, le pétrole expulsé (mêlé à de l'eau et du gaz dissous) a tendance à remonter jusqu'à la surface de la Terre. Il s'échappe très lentement à travers les couches sédimentaires perméables qui jouxtent la roche-mère :

- ✓ en général, la migration secondaire du pétrole n'est pas arrêtée par un obstacle. Le pétrole finit par atteindre les premiers mètres du sol, où il est dégradé en bitumes sous l'action de bactéries. Les combustibles fossiles produits sont alors des pétroles dits « lourds » ou « extra-lourds » et des sables bitumineux. Ils peuvent être utilisés comme des indices de surface pour détecter un bassin sédimentaire susceptible de contenir du pétrole, lors de prospections réalisées par l'industrie pétrolière ;
- ✓ parfois, la migration du pétrole brut vers la surface est empêchée par une formation géologique imperméable, comme une couche de sel par exemple, appelée « roche-couverture » (également qualifiée de « roche imperméable »). Une accumulation de pétrole, associé à de l'eau et du gaz, se forme dans la couche perméable sous-jacente créant ainsi une roche-réservoir en dessous de la roche-couverture. Dans ce réservoir poreux, le gaz s'accumule au-dessus du pétrole brut, lequel se retrouve au-dessus de l'eau en raison des densités respectives de ces produits (le gaz naturel est plus léger que le pétrole, lui-même plus léger que l'eau).



**Figure 2 :** *Migrations primaire et secondaire du pétrole conduisant à la formation d'un gisement*

Seule une faible quantité de pétrole brut est concentrée dans les roches-réservoirs. En effet, environ 98% du pétrole produit reste piégé dans la roche-mère, de manière disséminée. Le pétrole de roche-mère est alors plus connu sous le nom d'« huile de schiste » ou de « pétrole de schiste ». Moins facile à extraire que le pétrole sous forme de gisements, il requiert des techniques d'exploitation particulières et notamment la fracturation hydraulique.

#### **I.1.6. Différents « pièges à pétrole »**

L'ensemble roche-réservoir/roche-couverture forme une structure dite de « piège à pétrole ». Plusieurs types de pièges sont décrits, principalement en fonction de la déformation des roches au cours de phénomènes géologiques.

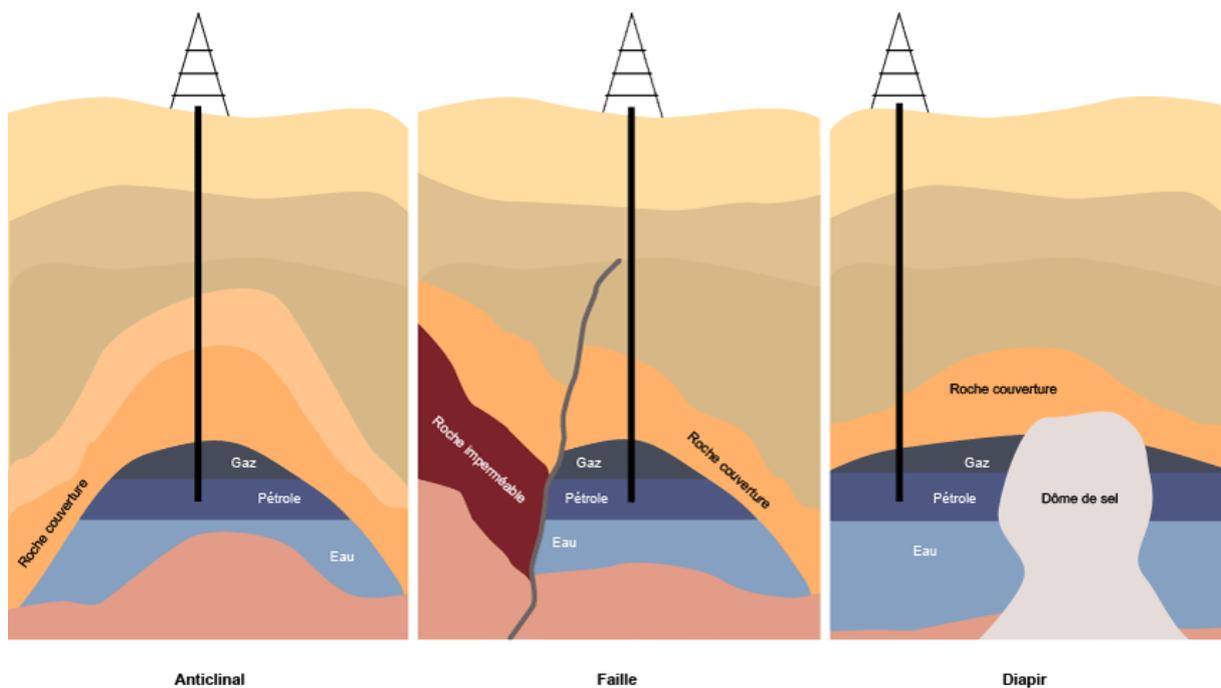
### a. Pièges structuraux

Le plus courant est le piège anticlinal, structure où les roches ont été plissées en forme de voûte par les mouvements terrestres. Pour le géologue, la présence d'un anticlinal est un indice en faveur de la présence de gisements. En effet, environ 80% des gisements de pétrole sont de ce type.

Lors de la création d'une faille, un bloc terrestre peut également glisser vers le haut ou vers le bas au niveau de la cassure. Une couche imperméable peut alors venir obstruer une couche perméable et arrêter le pétrole dans sa migration.

### b. Pièges stratigraphiques

Les dômes de sel (appelés diapirs) sont des masses de sel formées en profondeur qui remontent sous l'effet de la température et de la pression. En s'élevant, elles traversent des couches perméables et subdivisent les réserves de pétrole. En surplombant les roches-réservoirs, les dômes de sel imperméables constituent des roches-couvertures.



**Figure 3 :** Principaux types de pièges à pétrole

Les mouvements terrestres sont susceptibles de modifier les gisements formés. Le pétrole peut être enfoui plus profondément : il subit alors à nouveau un craquage thermique et donne alors un gisement de gaz naturel. Les gisements de pétrole peuvent également fuir. Dans cette situation, le pétrole migre vers la surface ou vers un autre piège.

### **I.1.7. Différentes sortes de pétroles**

#### ***a. Bruts ou pétroles conventionnels***

Il existe des centaines de sortes de pétrole brut à travers le monde. Les plus connus sont :

- le Brent (le brut de référence en Europe) ;
- le WTI (West Texan Intermediate, le brut de référence Américain) ;
- le Dubaï Light pour l'Asie.

Selon sa provenance, le brut peut contenir du gaz dissous, de l'eau salée, du soufre et des produits sulfurés (thiols –mercaptans- surtout). Il a une composition trop complexe pour être décrite en détails. Il faut distinguer simplement trois catégories de brut suivant leur composition chimique :

- les bruts à prédominance paraffinique ;
- les bruts à prédominance naphthinique ;
- les bruts à prédominance aromatique.

D'autres sortes de pétrole bruts, plus lourds, sont aptes à faire du bitume. Plus un brut est léger, plus il est apte à fournir une large gamme de produits dérivés de qualité. Les caractéristiques et les compositions d'un pétrole brut conditionnent son prix de vente.

Dans le cas du pétrole conventionnel, les hydrocarbures formés au niveau de la roche-mère migrent vers une roche poreuse et perméable (appelée réservoir). Ils s'y accumulent et forment des gisements dont l'exploitation se fait par simple forage.

### ***b. Pétroles non conventionnels***

La hausse du prix du baril au cours de ces dernières années a conduit à exploiter certains gisements connus mais non exploités jusqu'ici pour des raisons économiques : les gisements de « pétrole non conventionnel ».

Le pétrole non conventionnel est un pétrole produit ou extrait en utilisant des techniques autres que la méthode traditionnelle de puits pétroliers, ou impliquant un coût et une technologie supplémentaires en raison de ses conditions d'exploitation plus difficiles. Les productions de type non conventionnel comprennent : l'exploitation de sables bitumeux, de pétrole lourd, de schiste bitumineux, en offshore profond, en conditions polaires. Si les deux derniers types de pétrole ne sont pas matériellement différents du pétrole conventionnel, en revanche les trois premiers, bien qu'ayant la même origine, ont eu une genèse différente.

Les gisements, dont certains semblent représenter un potentiel considérable (à l'instar de celui de la province d'Alberta, au Canada), n'étaient pas rentables il y a quelques années, en raison de la faible teneur en pétrole et des nombreux traitements nécessaires pour valoriser le bitume extrait (il contient du sable, de l'argile, de l'eau, et est très visqueux, voire solide). L'extraction de ce type de pétrole s'effectue par exemple par introduction de vapeur afin de fluidifier le pétrole. Leur bilan énergétique est contesté : dans certains cas, il faut consommer plus d'énergie que le pétrole obtenu n'en représente (mais on considère généralement que l'on récupère 2 à 3 fois plus d'énergie que ce qui est consommé pour la transformation). Ce qui conduit les groupes pétroliers à s'intéresser à l'énergie nucléaire, pour produire leur pétrole non conventionnel à moindre coût (la vapeur nécessaire à la fluidification serait produite par des centrales nucléaires). L'exploitation de ces gisements est un désastre environnemental reconnu (impact paysager, pollution des cours d'eau et des sols, pollution atmosphérique, etc.). C'est également l'une des raisons pour lesquelles le Canada traîne les pieds en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre : l'exploitation de tels gisements en province d'Alberta fait exploser les émissions de CO<sub>2</sub> nationales.

Pour le pétrole non-conventionnel, les hydrocarbures restent dispersés dans les couches peu poreuses et peu perméables du bassin sédimentaire. Ils peuvent même être piégés dans la roche-mère (schistes bitumeux et pétroles de schiste). Dans d'autres cas (sables bitumeux et pétroles lourds), les caractéristiques physiques du pétrole, très visqueux voire solide, ne permettent pas une exploitation classique. Les techniques d'extraction du pétrole

non conventionnel s'avèrent plus complexes, en ayant recours notamment à la fracturation hydraulique.

### **I.1.8. Classification des hydrocarbures liquides**

#### ***a. Par provenance***

- **Le pétrole brut** : désigne le pétrole issu d'un gisement naturel, et que l'on exploite sous forme liquide à la pression atmosphérique. Cette appellation désigne donc un produit naturel avant raffinage, mais qui a déjà perdu une partie de sa composition de gisement, la fraction d'hydrocarbures légers quittant la phase liquide sur le lieu même de son exploitation.
- **Les condensats**, dits aussi « pentane plus » ou « C5+ », ou « liquides de puits de gaz naturel » : ce nom désigne la fraction légère allant du pentane (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>) jusqu'à l'heptane (C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>) ou l'octane (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>). Les condensats désignent la fraction d'hydrocarbures qui, en solution gazeuse dans le gisement, condensent sous forme liquide à pression atmosphérique. Ils sont généralement associés aux grands gisements de gaz naturel, mais aussi au gaz associé des champs de pétrole. Il s'agit de liquides de très haute qualité (légers et contenant peu de soufre).
- **Les liquides de gaz naturel** (éthane, propane, butane - C<sub>2</sub> à C<sub>4</sub>) restent des gaz à température ambiante, mais sont liquéfiés dans les usines qui traitent le gaz, par cryogénie. On parle de « liquide d'usine de naturel ». Butane et propane sont souvent appelés gaz de pétrole liquéfié (GPL), mais, dans cette appellation, on ne distingue pas ceux qui viennent des usines de gaz naturel et ceux qui viennent du raffinage du pétrole (qui contient aussi du butane et du propane en solution).
- **Les pétroles extra-lourds** : trop visqueux pour être vendus directement (non transportables par pipeline). On trouve ce type de production au Canada (Athabasca : 600 kb/j environ - Il s'agit de bitume, solide à l'état naturel) et au Venezuela (vallée de l'Orénoque : plus de 550 kb/j - Liquide à l'état naturel). Il est produit via de coûteuses opérations surtout s'il s'agit de bitume, notamment l'ajout d'hydrogène et l'injection de vapeur et/ou de solvants pour le liquéfier in situ. Le pétrole extra-lourd (de ces deux mêmes régions) est vendu non transformé en syncrude (donc de faible valeur). Il est soit mélangé à des hydrocarbures légers (condensats, brut léger, syncrude ou naphta) pour donner un mélange suffisamment fluide pour le transport en pipeline, soit sous forme d'émulsion dans

l'eau (Orimulsion vénézuélienne). Actuellement, seuls l'Athabasca et la vallée de l'Orénoque produisent des pétroles extra-lourds, mais il en existe des réserves (beaucoup plus petites) à d'autres endroits : Madagascar, Russie, Alaska, Inde...

- **Les liquides de synthèse** produits à partir de charbon et de gaz naturel : on utilise surtout du charbon comme matière première. L'Afrique du Sud est de loin le premier producteur (165 kb/j). De nombreux projets sont à l'étude dans divers pays (Qatar, Chine, etc).
- **Les agrocarburants**, de type biodiesel et alcool.
- **Le gain de raffinage** : les raffineries, grâce notamment à l'hydrocraquage (ajout d'hydrogène) produisent des liquides globalement un peu moins denses que le brut qu'elles achètent, il y a donc un gain en volume qu'il faut prendre en compte comme une catégorie de production si l'on veut que les chiffres de production et de consommation coïncident. C'est quelque peu trompeur, puisque le gain de raffinage n'est évidemment pas une source d'énergie. C'est un effet de l'habitude de mesurer le pétrole en volume, alors qu'il aurait été plus rigoureux de le mesurer en masse, ou mieux encore en pouvoir calorifique (ce qui ne se pratique, semble-t-il, qu'en Nouvelle-Zélande).

### ***b. Par qualité***

Les pétroles (qu'il s'agisse des bruts conventionnels, de condensats, ou de syncrude) ne sont pas tous de la même qualité. Différentes échelles permettent de comparer les pétroles entre eux. Les plus importantes sont la densité et la teneur en soufre.

- **La densité API** (conçue par le American Petroleum Institute) :

Elle est utilisée dans le système anglo-saxon pour exprimer la densité du pétrole.

Un liquide dont le degré API est de 10°API à une température de 15 °C, a une densité de 1,00 (soit celle de l'eau, 1 kg/litre) à la même température. Une densité de 22°API à 15 °C équivaut à 0,9218 de densité à 15 °C et 35°API à 15 °C équivaut à 0,8498 de densité à 15 °C. La limite inférieure du pétrole conventionnel est généralement placée à 15°API.

On parle généralement de brut lourd pour moins de 20°API, moyen dans les 20 à 30°API et léger au-delà, mais ces bornes varient selon les pays.

Les pétroles les plus légers sont les plus convoités par les raffineurs, car ils donnent directement beaucoup de coupes légères de grande valeur (diesel, essence, naphtha). À l'inverse, les pétroles lourds donnent plus de produits, tels que des bitumes et du fioul résiduel, qu'il faut soit vendre tels quels à bas prix, soit convertir en coupes plus légères, notamment par hydrocraquage (ajout d'hydrogène).

- **La teneur en soufre :**

Elle varie considérablement d'un gisement à l'autre et donc d'un mélange commercial à l'autre, de 0,03 % à quelque 5 %. Le soufre est un polluant que les raffineurs doivent retirer (du moins dans les pays ayant des lois contre les pluies acides), il diminue donc la valeur du brut. On place en général à 1.5 % de soufre la limite entre pétrole « doux » et « acide ». Un brut peut être :

- ✓ TBTS (très basse teneur en soufre),
- ✓ BTS (basse teneur en soufre),
- ✓ MTS (moyenne teneur en soufre),
- ✓ HTS (haute teneur en soufre)
- ✓ THTS (très haute teneur en soufre)

Outre ces deux échelles principales, il y a nombres d'autres critères de qualité, parmi lesquels on peut citer la viscosité, l'acidité, les ratios entre types d'hydrocarbures (cycliques ou non, saturés ou non), et les teneurs en azote, en métaux lourds, en sels, etc.

**TABLEAU 1:** Classification des bruts

| <b>% S du fuel</b><br><b>Rdt % du fuel</b>           | <b>Brut TBTS</b><br><b>≤ 0,5 % S</b>                            | <b>Brut BTS</b><br><b>≤ 1,0 % S</b> | <b>Brut MTS</b><br><b>≤ 2,0 % S</b> | <b>Brut HTS</b><br><b>≤ 3,0 % S</b>          | <b>Brut THTS</b><br><b>&gt; 3 % S</b>  |
|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| <b>Très léger</b><br><b>Rdt ≤ 31 %</b><br><b>Pds</b> | Arzew<br>Hassi-Messaoud<br>Zarzaitine<br>Nigeria Light          | Brent                               |                                     |  |  |
| <b>Léger</b><br><b>Rdt ≤ 38 %</b><br><b>Pds</b>      | Nigeria Forcados<br>Nigeria Médium                              | Bréga<br>Zuétina                    | Murban                              | Qatar<br>Zakhum<br>Berri<br>Umm Shaïff       |  |
| <b>Moyen</b><br><b>Rdt ≤ 48 %</b><br><b>Pds</b>      | Ekofisk   | Es Sider                            |                                     | Agha Jari<br>Ashtart<br>Arabe Léger<br>Tatar | Basrah<br>Kirkuk   |
| <b>Lourd</b><br><b>Rdt &gt; 48%</b><br><b>Pds</b>    | Amna<br>Bassin Parisien<br>Gamba<br>Emeraude/Loango<br>Loango E | Emeraude                            | Grondin/Mandji<br>mélange           | Grondin                                      | Buzurgan<br>Kuwait<br>Safaniya (Arabe<br>lourd)<br>Tia Juana<br>Bachaquero<br>Rospo Mare |

### I.1.9. Enjeux par rapport à l'énergie

Autrefois, il était utilisé comme mortier, produit d'étanchéité et médicinales. Au milieu du XIXème siècle, il devient l'un des composants de base de l'activité industrielle. Il est tout d'abord utilisé en tant que pétrole lampant, pour l'éclairage puis comme producteur d'énergie avec l'essence, le gasoil et le fuel. Aujourd'hui il est utilisé comme lubrifiant ou source d'énergie, de chauffage, pour la fabrication des bitumes, de médicaments, d'encre, ou encore comme produit chimique. Il est également employé comme pesticide, fertilisant ou comme matière première dans la fabrication des peintures, vernis ou de la cire (chandelles et crayons par exemple).

Egalement appelé « Or noir », le pétrole génère le plus gros commerce de la planète en valeur et en volume. Autrefois, il était utilisé comme mortier, produit d'étanchéité et médicinales. Au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, à l'origine de la deuxième révolution industrielle, il devient l'un des composants de base de l'activité industrielle, le pétrole a succédé au charbon et a rapidement suscité un vif intérêt économique pour les pays producteurs. Il est tout d'abord utilisé en tant que pétrole lampant, pour l'éclairage puis comme producteur d'énergie avec l'essence, le gasoil et le fuel. Aujourd'hui il est utilisé comme lubrifiant ou source d'énergie, de chauffage, pour la fabrication des bitumes, de médicaments, d'encre, ou encore comme produit chimique. Il est également employé comme pesticide, fertilisant ou comme matière première dans la fabrication des peintures, vernis ou de la cire (chandelles et crayons par exemple).

Source d'énergie ou de matière première, c'est dans les transports que sa domination est la plus nette. Pour ce qui relève de la production d'électricité, le pétrole a vu sa part diminuer progressivement depuis 30 ans. S'y sont souvent substitués le gaz naturel, le nucléaire et les énergies renouvelables. La découverte de réserves de pétrole dans un pays est souvent perçue comme un miracle pour son économie. La raison majeure réside dans l'influence considérable des revenus du pétrole sur les budgets des pays hôtes, où sont découverts des gisements.

### **I.1.10. Acteurs majeurs**

L'industrie pétrolière est un pilier de l'économie mondiale. Sur les dix plus grandes sociétés privées de la planète, cinq sont pétrolières. Il existe plusieurs catégories de compagnies pétrolières :

- Les compagnies nationales ou National Oil Companies (NOC en Anglais), propriétés de l'état. Exemple: PDVSA (Vénézuéla), CNPC (Chine), Aramco (Arabie saoudite), Petrobras (Brésil), Petronas (Malaisie), NIOC (Iran), IPC (Irak), NOC (Nigeria)
- Les grandes compagnies privées multinationales et verticalement intégrées (c'est-à-dire concentrant tout ou partie des activités d'exploration, production, raffinage, et distribution), dites « majors », telles que Exxon Mobil, Shell, BP, Total, Chevron.

- Les raffineurs, qui ne détiennent que l'aval (raffineries et éventuellement stations-service).
- Les indépendants, qui ne font que chercher et produire du brut pour le vendre à des raffineurs.

Avec de lourds enjeux économiques et énergétiques, le pétrole a un fort impact géopolitique. L'approvisionnement en pétrole est libre sur un marché mondial très ouvert. Il pose cependant aux pays importateurs de nombreux problèmes, principalement d'ordre politique (dépendance), financier (devises) et environnemental (émissions de CO<sub>2</sub>, pollution en ville). Plusieurs pays (européens entre autres) ont donc engagé une politique de réduction de leur dépendance au pétrole depuis les chocs pétroliers de la décennie 1970.

#### **I.1.11. Unités de mesure et chiffres clés**

La valeur d'un pétrole brut dépend de son origine géographique et de ses caractéristiques physico-chimiques propres. En simplifiant, plus le brut est léger (c'est-à-dire apte à fournir une plus grande proportion de produits à forte valeur marchande) et moins il contient de soufre, plus il vaut cher.

L'unité couramment utilisée pour quantifier les volumes de pétrole est le baril (bbl). Un baril équivaut à 42 gallons, soit 159 litres. L'unité du baril, n'est pas une unité légale : elle est utilisée depuis l'origine de son extraction aux USA au XIX<sup>e</sup> siècle, car le pétrole était stocké et transporté dans des tonneaux en bois de 159 litres, appelés barils.

Un très bon puits peut produire 10 Kb/jour ou plus pendant 20 ans.

Un grand gisement peut contenir 1Bb (milliard de barils) de réserves ou plus.

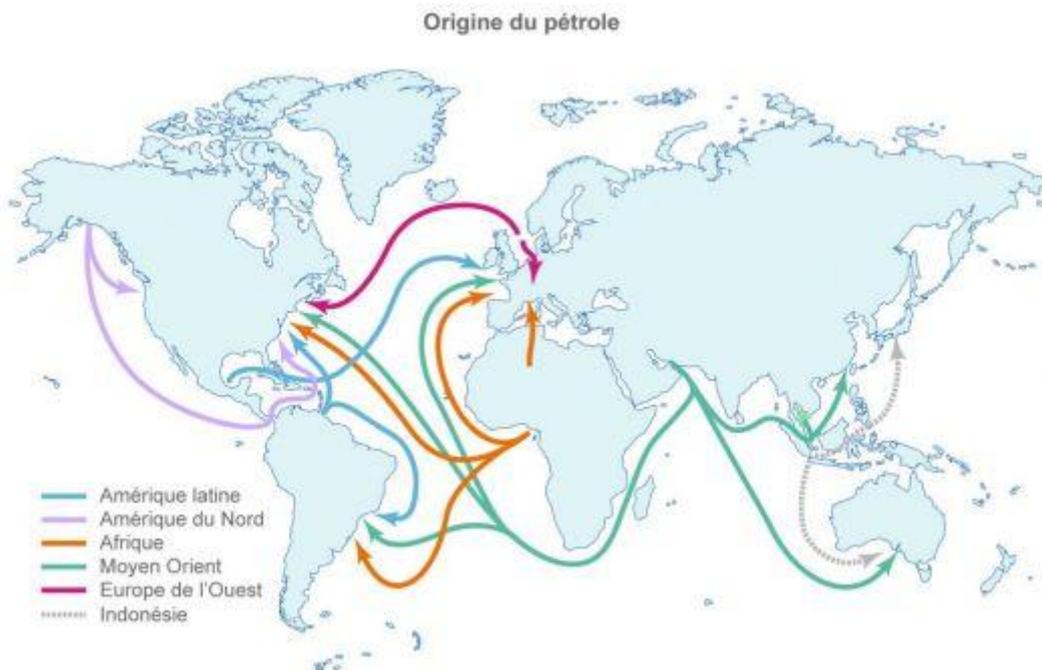
#### **I.1.12. Zone de présence ou d'application**

La production mondiale est de 85 millions de barils/jour en 2010, selon l'estimation de l'AIE. Plus d'un tiers de cette production est issu des pays membres de l'Organisation des pays exportateurs de Pétrole (OPEP) :

- en Afrique : Algérie, Libye, Angola, Nigeria.
- au Moyen-Orient : Arabie saoudite, Émirats arabes unis, Koweït, Iran, Irak, Qatar.

- en Amérique : Venezuela, Équateur, Brésil.

Certains pays producteurs et exportateurs de pétrole ne sont pas membres de l'OPEP. C'est le cas du Canada, du Soudan, du Mexique, du Royaume-Uni, de la Norvège, des États-Unis, de la Russie et d'Oman.



**Figure 4 :** Zone de présence et trafics pétroliers

## I.2. Activités d'exploration

Les activités d'exploration pétrolière a pour objectif :

- la découverte d'accumulations d'hydrocarbures techniquement et économiquement exploitables ;
- la reconnaissance des gisements dans les bassins sédimentaires par des forages ;
- la localisation des forages d'exploration à partir d'une série d'opérations de reconnaissance aboutissant ;
- la détection indirecte des hydrocarbures à partir de la surface ;
- la vérification de la présence d'hydrocarbure et le test de leur mobilité par forage des réservoirs identifiés ;
- la mise en œuvre des techniques géologiques et géophysiques de plus en plus complexes et coûteuses.

L'industrie pétrolière se sépare schématiquement en « amont » (exploration, production) et en « aval » (raffinage, distribution).

L'exploration, c'est-à-dire la recherche de gisements et la production sont souvent associés : les États accordent aux compagnies des concessions, pour lesquelles ces dernières assument le coût de l'exploration, en échange de quoi elles exploitent (pour une certaine durée) les gisements trouvés. Les mécanismes financiers sont variés : prêts à long terme, participation au capital, financement via des emprunts faits auprès de banques nationales, etc.

L'exploration commence par la connaissance géologique de la région, puis passe par l'étude détaillée des structures géologiques (principalement par imagerie sismique, même si la magnétométrie et la gravimétrie peuvent être utilisées) et la réalisation de puits. On parle d'exploration « frontière » lorsque la région n'a pas encore de réserve prouvée, le risque est alors très élevé mais le prix d'entrée est faible, et le retour peut être important.

La production, ou plutôt l'extraction du pétrole, peut être une opération complexe : pour maximiser la production finale, il faut gérer un réservoir composé de différents liquides aux propriétés chimiques très différentes (densité, fluidité, température de combustion et toxicité, entre autres). Au cours de la vie d'un gisement, on augmente le nombre de puits de production pour accéder aux poches restées inexploitées. En règle générale, on injecte de

l'eau et/ou du gaz dans le gisement, via des puits distincts de ceux qui extraient le pétrole. Une mauvaise stratégie d'exploitation (mauvais emplacement des puits, injection inadaptée, production trop rapide) peut diminuer de façon irréversible la quantité de pétrole extractible. Par exemple, la frontière entre la nappe de pétrole et la nappe d'un liquide chargé en soufre peut être brisée par simple brassage, contaminant ainsi le pétrole.

Au cours des dernières décennies, l'exploration et la production se font en proportion croissante en offshore : l'onshore, plus facile d'accès, a été exploité le premier. La loi de Ricardo s'applique très bien au pétrole, et, en règle générale, le retour sur investissement tend à diminuer : les gisements sont de plus en plus petits, dispersés, et difficiles à exploiter. Il y a bien sûr des exceptions, comme dans des pays où l'exploration a longtemps été paralysée pour des raisons politiques.

On inclut aussi souvent dans l'industrie aval pétrolier, en plus de la production des carburants, la conversion de certains des produits en dérivés comme les matières plastiques. Le transport du pétrole, tant le brut que les produits raffinés, utilise principalement les pétroliers et les oléoducs pour les grandes distances et les volumes importants. Le transport par chemin de fer, par barge en eau douce et par camion sont surtout utilisés pour la distribution finales des produits. Le transport du pétrole est à lui seul un secteur économique important : ainsi, les pétroliers représentent environ 35 % du tonnage de la marine marchande mondiale.

### **I.2.1. Blocs pétroliers**

Les blocs pétroliers de Madagascar ont été identifiés par l'OMNIS, leur dimensionnement suit les normes internationales établies par l'ONU et la Banque mondiale. Evalués préliminairement puis classifiés suivant leur potentialité en hydrocarbures, ils sont ensuite soumis à un appel d'offre international. Les critères d'évaluation des offres étant la corporation et ressources financières, la performance technique, la stratégie d'exploration, la politique en matière d'environnement et de développement des ressources humaines et le partage de profit pétrolier.

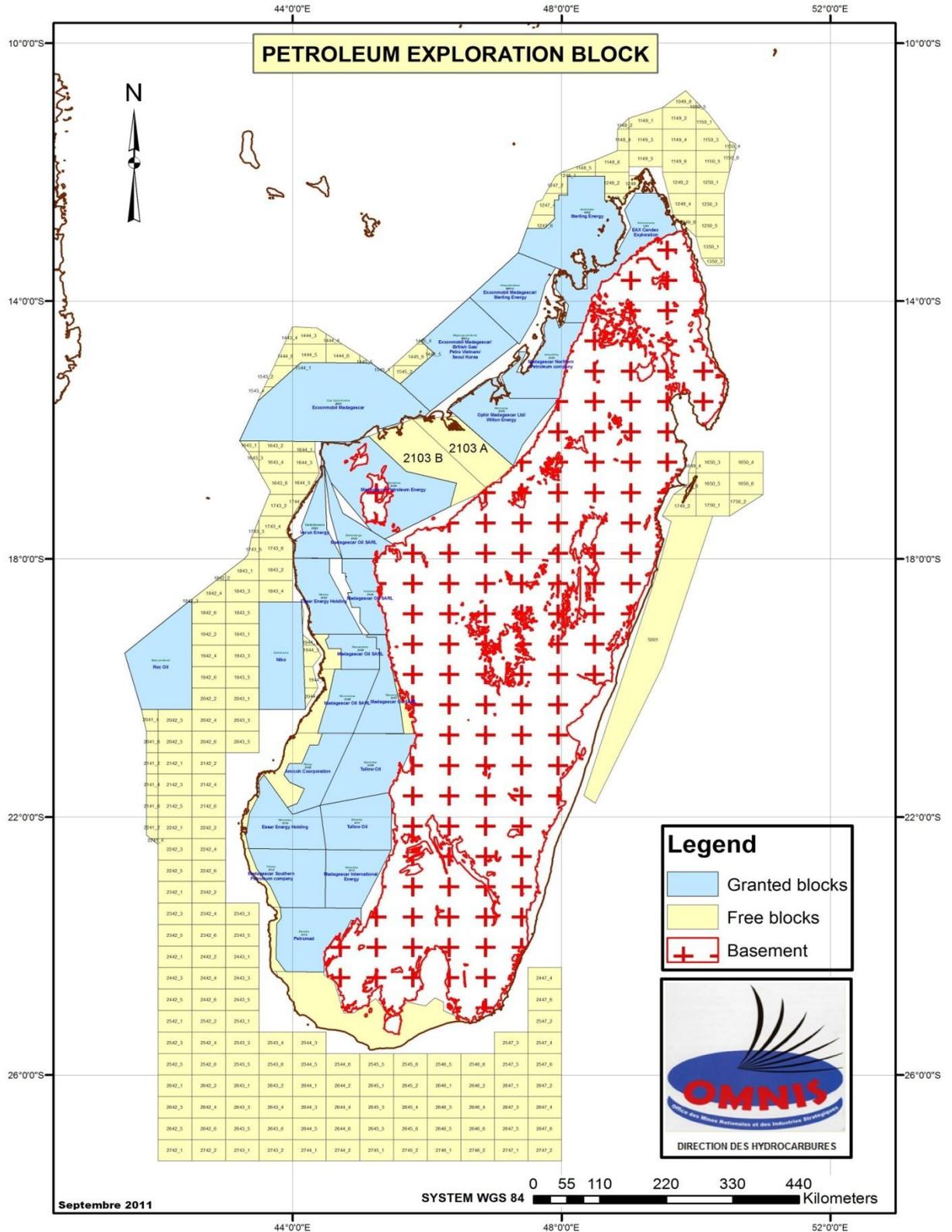


Figure 5 : Les blocs pétroliers de Madagascar

## I.2.2. Contrat pétrolier

### a. Types de contrats

Il existe trois types de contrats pétroliers :

- Contrat de Partage de Production (CPP);
- Contrat d'Association ( Joint Venture);
- Contrat de Concession.

Le contrat couramment appliqué à Madagascar est le CPP.

Le CPP est régi par la Loi malagasy selon le **CODE PETROLIER 96-018 du 04 SEPT 1996**. Il prend effet à la date de mise en vigueur après approbation du Président de la République.

Les principales caractéristiques d'un CPP sont:

- ✓ La compagnie pétrolière est sélectionnée et désignée par le titulaire du titre minier, l'Etat ou la Société Nationale ou agence après Appel d'offres international;
- ✓ La société pétrolière prend tous les risques lors des opérations lesquelles sont supervisées par le titulaire du titre minier: la société pétrolière fournit le capital, la technologie et la main d'œuvre pendant la phase d'exploration;
- ✓ La compensation de la société est payée à partir de la production du périmètre contractuel;
- ✓ Le partage de production attribuable à la société variera suivant le partage après recouvrement des coûts pétroliers;
- ✓ La société pétrolière est passible d'impôt sur ses revenus;
- ✓ Les puits de forage et toutes les installations sont les propriétés du titulaire du titre minier; le transfert de propriété peut se faire progressivement.

Les obligations des contractants:

- ✓ Avoir un Représentant résidant et une base à Madagascar
- ✓ Accomplir des travaux minima d'exploration
- ✓ Fournir les fonds nécessaires pour les investissements et les coûts opérationnels
- ✓ Contribuer à la formation des nationaux

- ✓ Protection de l'environnement
- ✓ Contribution à l'approvisionnement du marché national
- ✓ Conformité à la législation du travail et de la prévoyance sociale

**Remarque** : *Les Contractants auront le droit de résilier le Contrat en renonçant à la totalité du périmètre contractuel selon les dispositions du Contrat et de la loi en vigueur. Si c'est l'OMNIS qui résilie le Contrat, les Contractants perdront tous leurs droits et intérêts dans le contrat.*

## ***b. Durée du CPP***

### ***b-1 Période d'Exploration***

Selon l'Article 4 du CPP, la période d'exploration s'étend sur une période de huit (08) Années consécutives, subdivisées en phases suivantes :

- une phase d'Exploration initiale de quatre (04) Années ;
- une seconde phase d'Exploration de deux (02) Années ;
- une troisième phase d'Exploration de deux (02) Années.

Les Contractants ne procéderont à la phase d'exploration suivante que si leurs obligations de la phase précédente ne soient réalisées conformément au Code Pétrolier en vigueur.

La période d'exploration peut être prolongée jusqu'à deux (02) ans au maximum si l'évaluation complète du périmètre contractuel n'est pas terminée dans le temps imparti.

### ***b-1 Période d'Exploitation***

Si aucune découverte commerciale n'a été faite dans le Périmètre Contractuel ou que ladite découverte n'a été notifiée, le contrat sera résilié à la fin de la période d'Exploration ou à l'extension y relative.

Dans le cas où une découverte de Pétrole à l'intérieur du Périmètre Contractuel est déclarée « Découverte Commerciale », le Périmètre d'Exploitation fera l'objet du Titre Minier obtenu auprès de l'OMNIS. La Période d'Exploitation et le Titre Minier correspondant sera de vingt-cinq (25) Années à partir de la notification du Décret dudit Titre.

En cas d'une Découverte Commerciale de Gaz Naturel, la Période d'Exploitation et le Titre Minier correspondant sera de trente-cinq (35) Années.

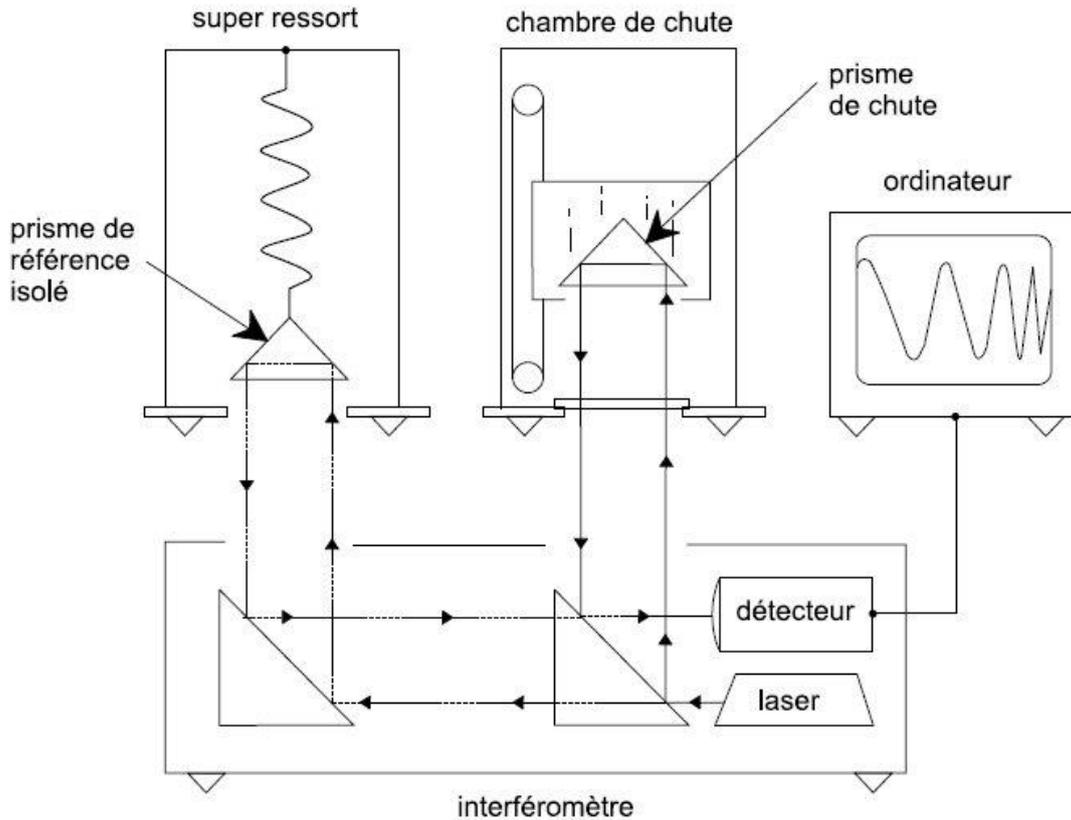
La Période d'Exploitation et le Titre Minier peuvent être prolongés de :

- cinq (05) Années pour le Pétrole liquide, et
- dix (10) Années pour le Gaz Naturel.

### **I.2.3. Etude gravimétrique**

Le travail à faire consiste à montrer l'intérêt d'une prospection gravimétrique sur l'étude des roches de l'écorce terrestre. Elle est basée sur des mesures très précises de la force de pesanteur ou de ces variations à l'aide des gravimètres apportant des arguments sur les matériaux peu denses (eau, pétrole, gaz, sel...). Le paramètre fondamental est la densité, il s'agit ici de déceler en un point de la surface de la terre un contraste de densité.

Mesurer la pesanteur revient à mesurer une accélération donc à réaliser simultanément une mesure de distance et de temps. Ainsi, on distingue les mesures absolues et les mesures relatives : - Une mesure absolue de la pesanteur va nous donner la valeur de l'accélération de la pesanteur à partir des mesures de temps et de distance. la méthode couramment utilisée aujourd'hui est basée sur l'observation de la chute libre d'un corps et on peut utiliser le gravimètre absolu FG5 de Micro-g solutions ;



**Figure 6 :** *Équipement expérimental utilisé pour déterminer l'accélération de la gravité sur un prisme en chute libre*

- Les appareils relatifs ne vont pas permettre de mesurer la valeur de l'accélération de la pesanteur, mais une variation de celle-ci. Ainsi, la connaissance de la pesanteur en tout point de mesure se fera sous condition de connaître la valeur absolue en un point. Ce point est appelé base et est un point bien repéré géographiquement, facilement récupérable et choisi a priori dans un environnement stable. On utilise les gravimètres relatifs tels que Lacoste&Romberg (Etats-Unis) et Scintrex (Canada) pour effectuer les mesures.

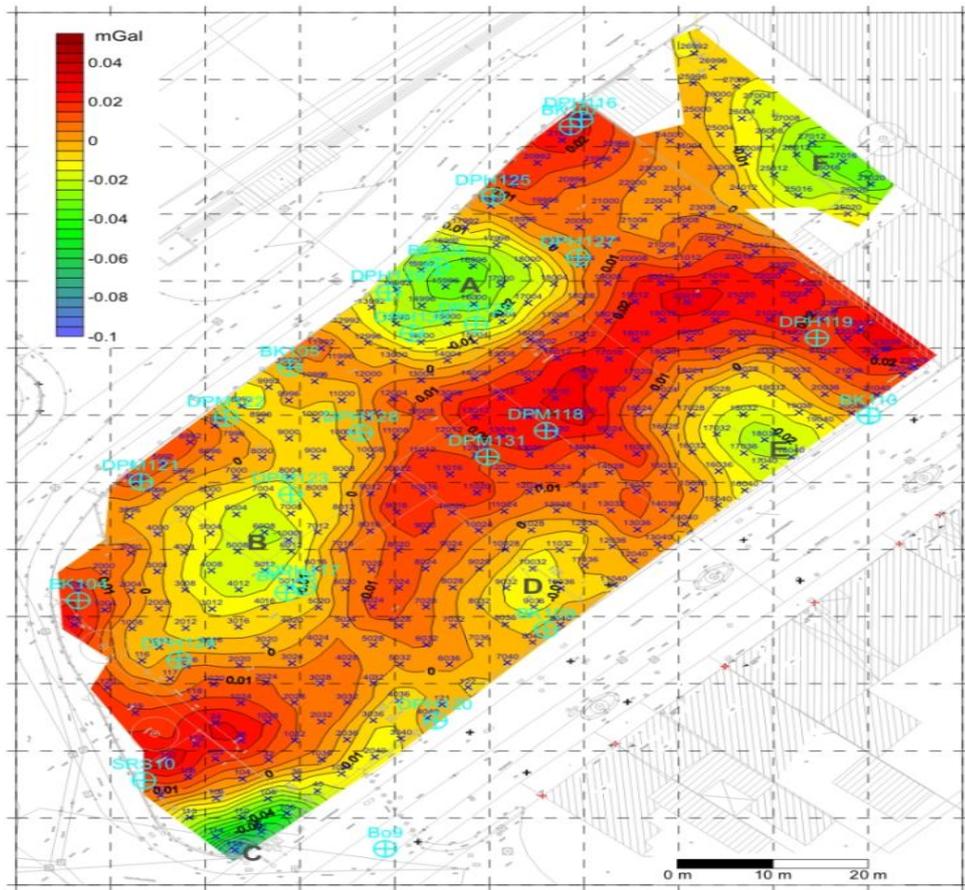


Figure 7 : Exemple de carte d'Anomalie Gravimétrique



Figure 8 : Gravimètre Scintrex

### I.2.4. Etude aéromagnétique

Les mesures magnétiques peuvent être enregistrées par des magnétomètres montés dans les aéronefs (d'où le terme "magnétisme aéroporté" utilisé sur les en-têtes des cartes). Il est possible d'ajuster les mesures par la mathématique pour laisser apparaître que la zone entière a été survolée à la même altitude au-dessus de la terre. Quoiqu'on puisse mesurer l'intensité du champ magnétique à pied sur le terrain, il est possible de couvrir des grandes superficies beaucoup plus rapidement en montant un magnétomètre dans un aéronef.

#### Sonde Magnétique



Figure 9 : Magnétisme Aéroporté

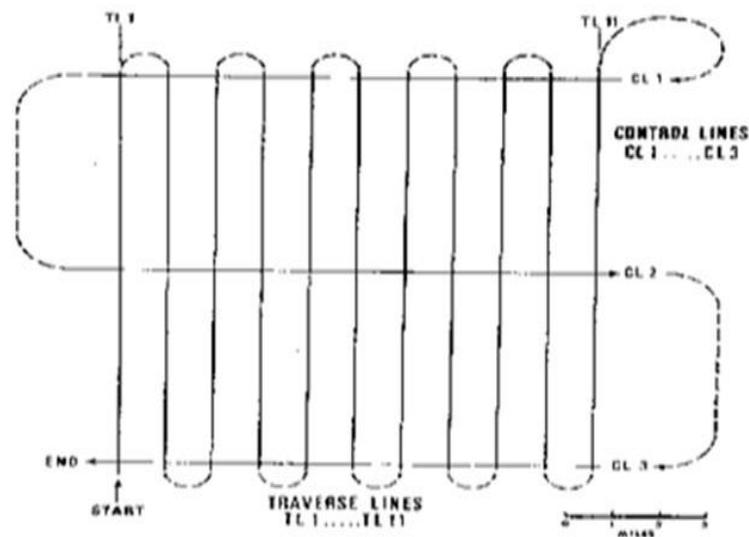


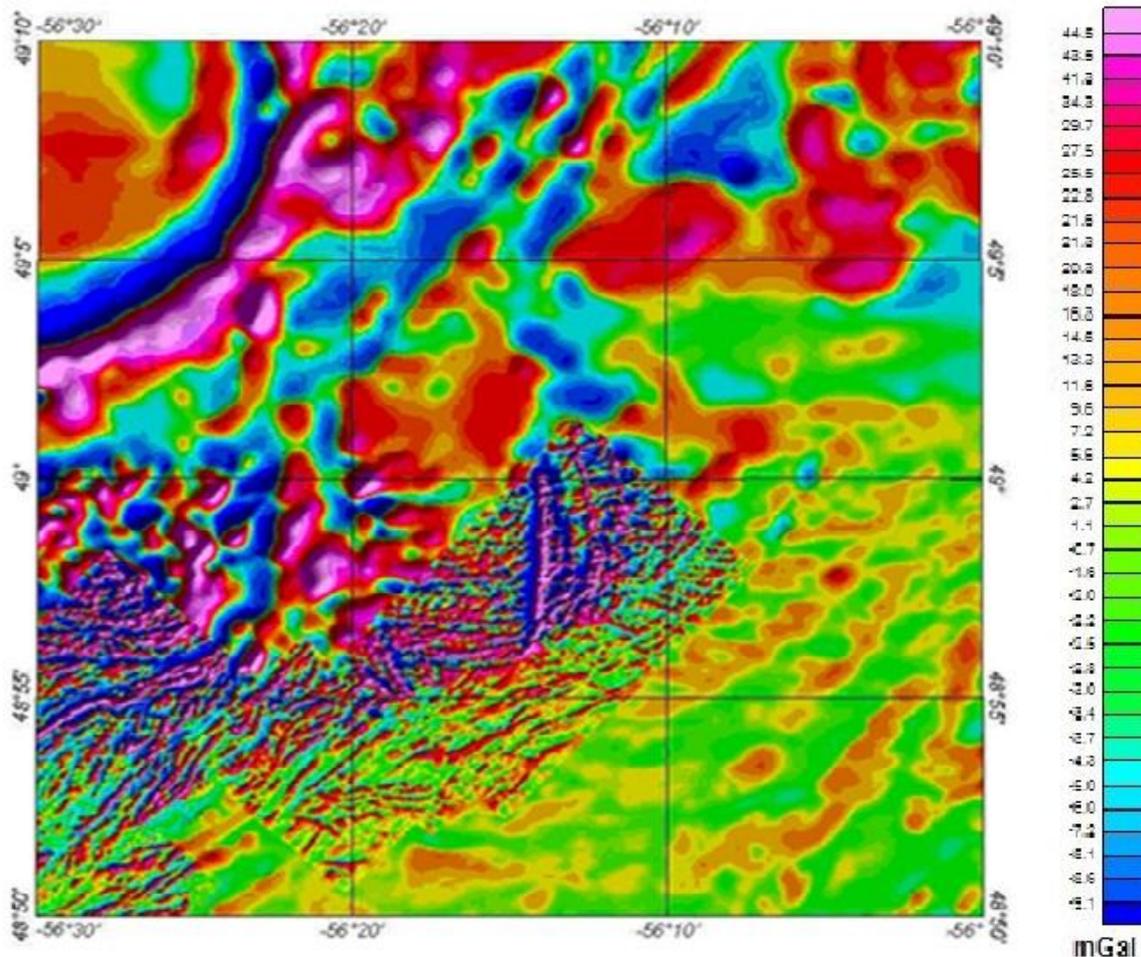
Figure 10 : Exemple de plan de Vol

La sortie d'un levé magnétique aéroporté est une carte de l'intensité magnétique totale de la zone qui est généralement accompagnée d'un model numérique du terrain.

Les aéronefs sont aussi beaucoup plus éloignés des objets artificiels, tels que des tuyaux métalliques et des lignes de haute tension, qui sont très magnétiques et peuvent, dans d'autres circonstances, engloutir complètement l'anomalie magnétique causée par les roches.

Comme le champ magnétique est incliné et n'est pas orienté directement en bas, une roche magnétique crée une valeur magnétique maximum aussi bien qu'une valeur magnétique minimum. Les mesures réalisées sur un grand nombre d'échantillons de roche indiquent que les roches sédimentaires ne sont pas généralement magnétiques, tandis que les roches magmatiques riches en fer et en magnésium ont tendance à être très magnétiques.

Le but de cette étude est donc la reconnaissance du bassin en vue de la création de la carte structurale afin d'établir l'épaisseur des sédiments, la structure géologique du bassin et l'anomalie magnétique.



**Figure 11 :** *Exemple de carte d'Anomalie magnétique*

### **I.2.5. Acquisition sismique**

La méthode géophysique la plus utilisée pour déterminer les structures du sous-sol est la méthode sismique. La mise en œuvre la plus répandue est celle de type couverture multiple en sismique réflexion. Cette technique fournit une échographie du sous-sol à 2 ou 3 dimensions. Pour obtenir un calage en profondeur plus précis que celui obtenu en utilisant les vitesses issues des données sismiques de surface, les géophysiciens utilisent des données de puits telles que carottage sismique et diagraphie sonore, et plus récemment les informations extraites de la sismique de puits. La sismique de puits est utilisée pour une meilleure connaissance du gisement en phase d'exploration, mais peut être également utilisée en phase d'exploitation en sismique répétitive pour l'étude du gisement au cours du temps.

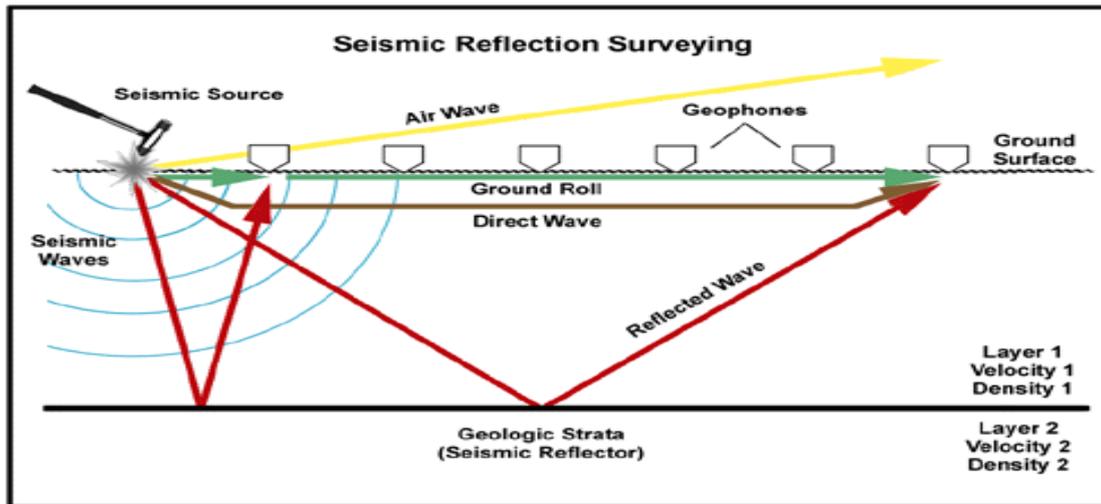


Figure 12 : *Technique d'Acquisition Sismique*

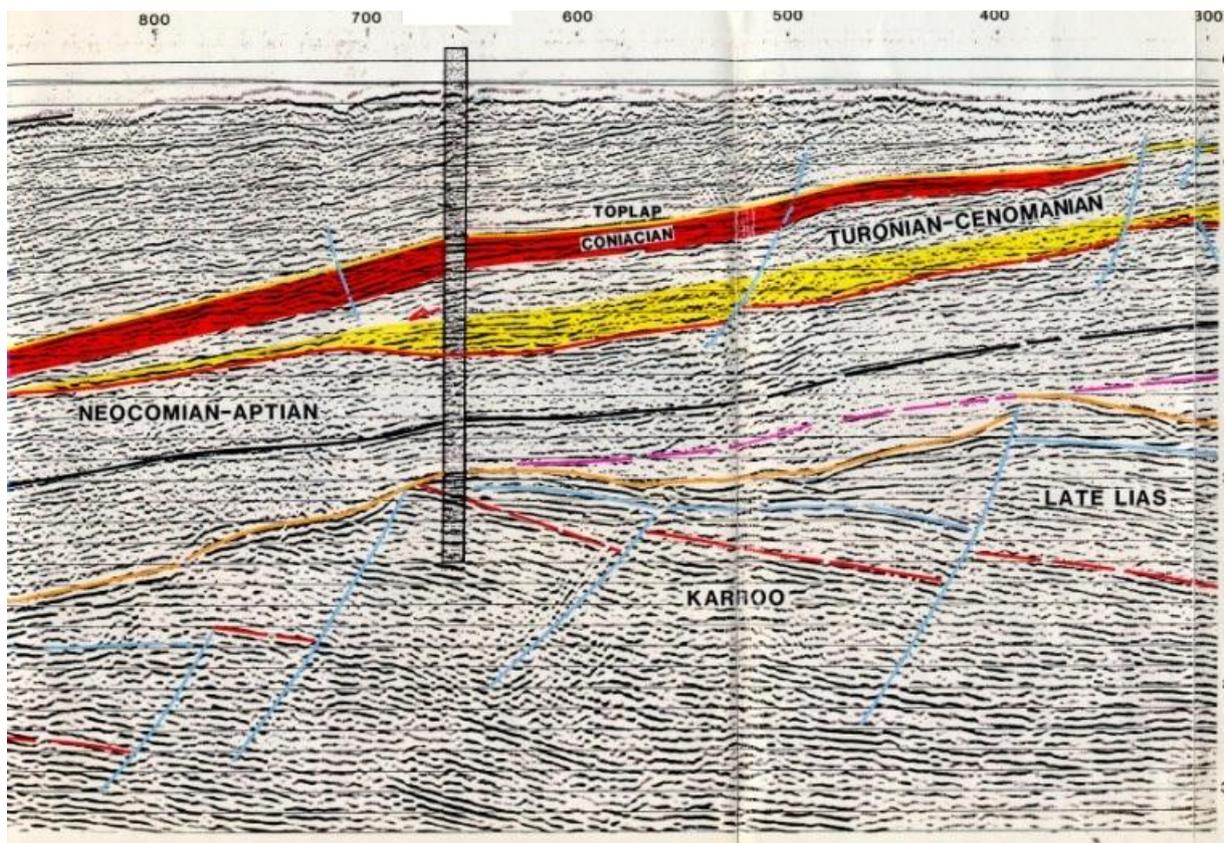


Figure 13 : *Exemple d'un résultat sismique*

Voici les phases de l'exploration sismique :



- 1) Positionnement
- 2) Source d'énergie sismique
- 3) Enregistrement des données
- 4) Traitement des données
- 5) Interprétation des données

## Chapitre II: CONTEXTE GENERALE SUR LA ZONE D'ETUDE ET LES TRAVAUX ANTERIEURS

### II.1. Présentation de la zone à étudier

#### II.1.1. Etude géographique

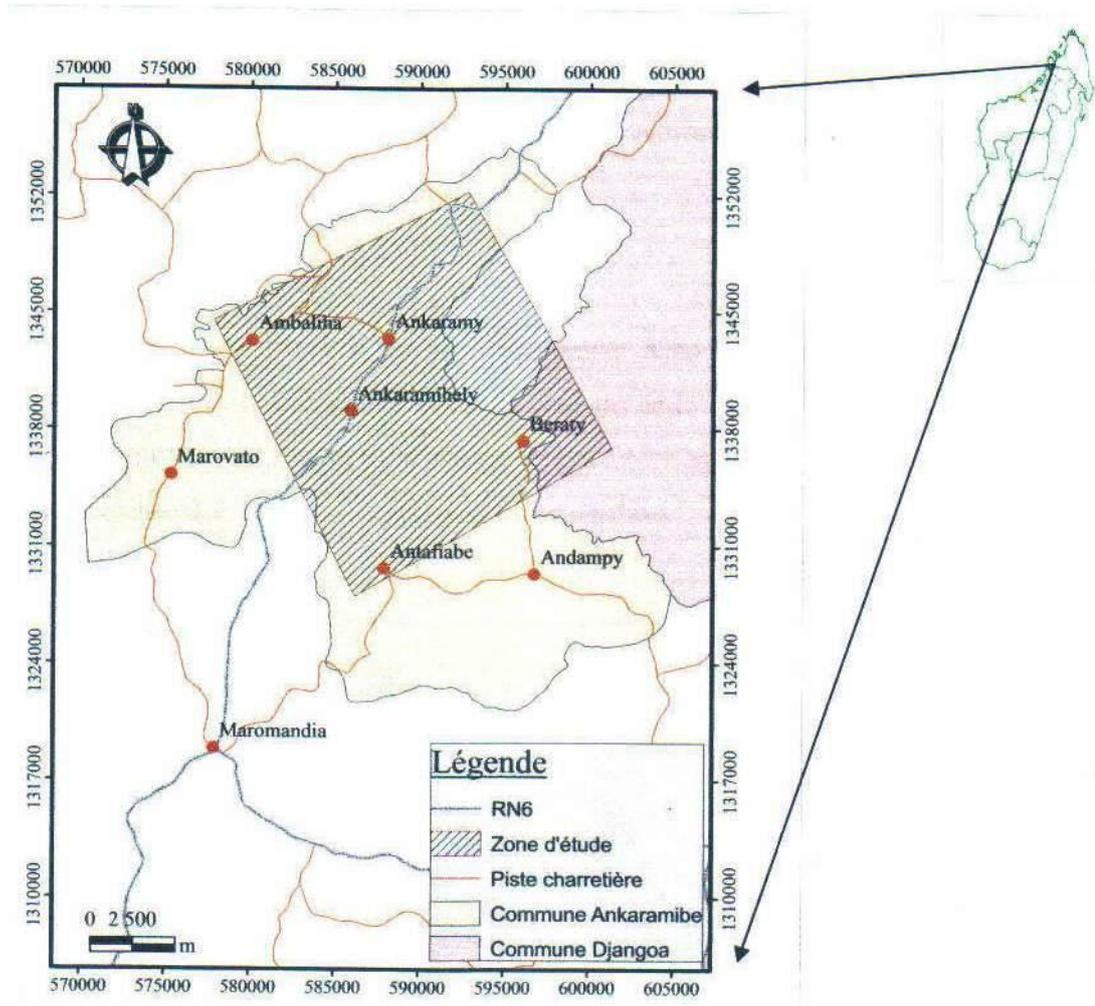
##### *a. Situation de la zone à étudier*

Ankaramibe est une Commune Rurale du District d'Analalava dans l'ex-Province de Mahajanga, dans la partie Nord-Ouest de Madagascar, localisé par les coordonnées géographiques : Longitude Est : 48°10'41.93'' et Latitude Sud : 13°58'33.23''. En partant de la ville d'Antananarivo, on emprunte la RN 4 jusqu'à Ambondromamy et la RN 6 à partir d'Ambondromamy jusqu'à Ankaramibe. Plusieurs Fokontany parmi les 16 qui constituent la Commune d'Ankaramibe se trouvent à l'intérieur du secteur étudié comme : Beraty, Antafiabe, Ankaramihely et Ambaliha. Pour circuler à l'intérieur des différents sites, on peut emprunter des voies intercommunales.

La zone d'étude occupe une superficie de 288 km<sup>2</sup> et est limitée par les coordonnées consignées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 2:** Coordonnées délimitant la zone d'étude

| Côtés | Latitude      | Longitude     |
|-------|---------------|---------------|
| Nord  | 13°53'56.5''S | 48°13'10.4''E |
| Ouest | 13°58'16.1''S | 48°4'54.2''E  |
| Sud   | 14°7'6.9''S   | 48°9'36.9''E  |
| Est   | 14°2'12.7''S  | 48°17'58.8''E |



(Source :BD 500 FTM)

**Figure 14 :** Carte de localisation de la zone d'étude

La zone étudiée est encadrée :

- Au Nord : par les Communes d'Antsirabe et d'Ankingameloka (Région Diana)
- A l'Est : par la Commune de Djangoa (Région Diana)
- Au Sud : par la Commune de Maromandia (Région Sofia)
- A l'Ouest : par la Commune de Maromandia et le Canal de Mozambique

Le secteur étudié se situe entre le Massif de Manongarivo (Alt. 1882m) à l'Est, Bezavona (676m) au Nord-Ouest, et la colline de Marovato au Sud-Ouest. Il présente des reliefs à fortes pentes avec dénivellations importantes :

- Maromiandra (Alt. 883m)
- Marovato (405m)
- Bekenikeny (776m) : intrusion volcanique

- Des collines accompagnées d'érosions (lavaka) et de ravins dans la zone Antafiabe, Analanantsoa, Ankaramihely
- Des collines (ou tanety) de moyennes et basses altitudes variant entre 41m et 344m sur lesquelles les sommets sont dénudés et érodés par les tavy.

Ces massifs sont séparés par des ravins et sont couverts de végétaux à feuilles tranchants et toxiques pour la peau qui gênent leur traversée.

Les forêts secondaires en dégradation sont dominantes. Des lambeaux forestiers sont menacés de disparition malgré le statut de zones protégées car la gestion des autorisations de coupe et l'éducation à la protection environnementale ne sont pas les soucis de la population locale de cette Commune.

#### ***b. Climat***

La région est soumise à un climat de type tropical. Il est caractérisé par une alternance d'une saison fraîche et sèche du mois de Mai jusqu'en Novembre et d'une saison humide et chaude à partir de Décembre jusqu'en Avril.

#### ***c. Température***

Le régime thermique de la région est régi par l'alternance des deux saisons. La moyenne annuelle est entre 25,5°C à 27,2°C. Les mois les plus frais sont Juillet et Août (23°C). Les mois les plus chauds sont Mars et Avril (27°C).

#### ***d. Pluviométrie***

Les précipitations annuelles varient entre 1482 et 2409mm par an réparties en 130 jours. Les mois les plus arrosés s'étendent de Décembre à Mars et les mois les plus secs de Juin en Octobre.

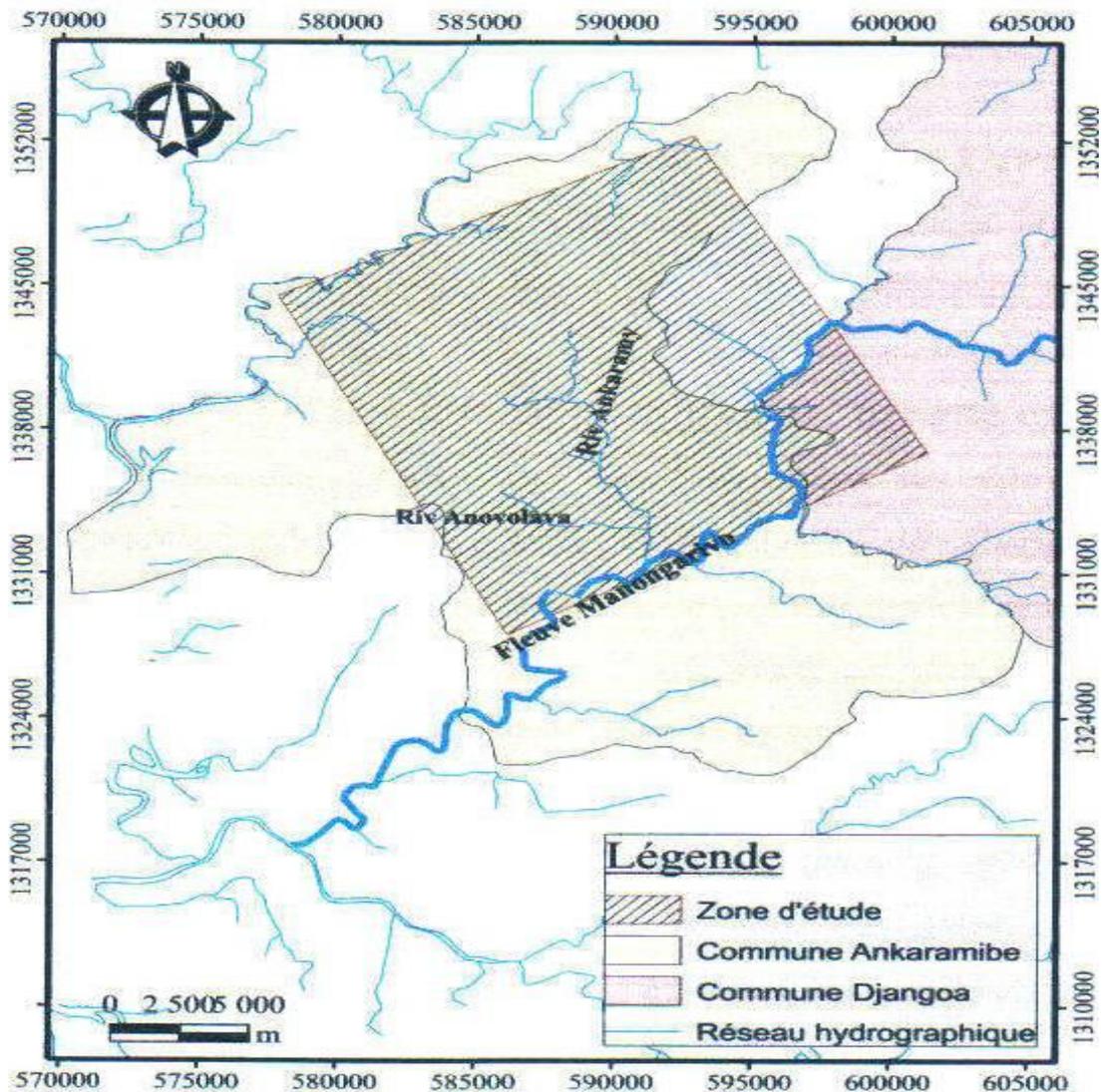
#### ***e. Vents***

La région est soumise aux vents humides et réguliers de l'Alizé « Varatraza », qui souffle en permanence dans la direction Sud-Est à Est d'Avril à Novembre et de la Mousson « Talio », vent de direction Ouest-Est. La saison sèche est nettement propice aux vents qui

soufflent à plus de 10km/h, avec un maximum en Novembre. Elle est rarement frappée par des perturbations cycloniques.

### *f. Hydrographie*

Le réseau hydrographique n'est pas très dense dans la zone d'étude. Le fleuve de Manongarivo traverse la partie Est et la partie Sud de cette dernière. Ce fleuve a ses bras vis, qui sont des rivières pérennes, dont les plus marquées présentes dans le site d'étude sont Ankaramy et Anovolava.



(Source BD 500 FTM)

**Figure 15 :** Carte hydrographique de la zone d'étude

## **II.1.2. Etude socio-économique**

### ***a. Démographie***

Selon l'information recueillie auprès de la Commune d'Ankaramibe, la population de cette dernière compte 25 314. Elle est répartie dans les 16 Fokontany qui la constituent. Le plus peuplé est Analanantsoa qui a 3 090 habitants et le moins peuplé est Ambodimangatelo avec 403 habitants.

Les sakalava, originaires de la zone, étaient des pêcheurs et des éleveurs itinérants qui n'avaient nullement humanisé le milieu. Avec l'immigration des Tsimihety, provenant de Mandritsara- Befandriana, la population avait des coutumes et des systèmes de cultures analogues à ceux des Betsimisaraka (élevage extensif dans les zones basses, cultures en semis direct sur brûlis, cueillettes...), puis avec la pression démographique (3,8% par an de taux d'accroissement) et l'établissement de concessions de type européen (café, riziculture...) pendant l'ère coloniale, une évolution s'est observée dans les activités agricoles : cultures de bas-fonds, plantations de cultures de rente, exploitation des raphières etc...

En ce moment, la population est cosmopolite dont Tsimihety, Sakalava, Makoa, Antaimoro etc...

### ***b. Agriculture***

Tous les types de cultures sont pratiqués par la population de cette Commune. Ce sont :

- Les cultures vivrières : riz, manioc, maïs, haricot, patate douce
- Les cultures de rentes : café, poivre, vanille, noix de cajoux
- Les cultures des fruits et des brèdes

### ***c. Elevage***

L'élevage représente un secteur d'activité de production indissociable du mode de vie en milieu rural de cette Commune. Les élevages traditionnels sont surtout (les plus) pratiqués dans cette zone tels que le cheptel bovin, porcin, ovin, mouton, chèvre, caprin et volailles.

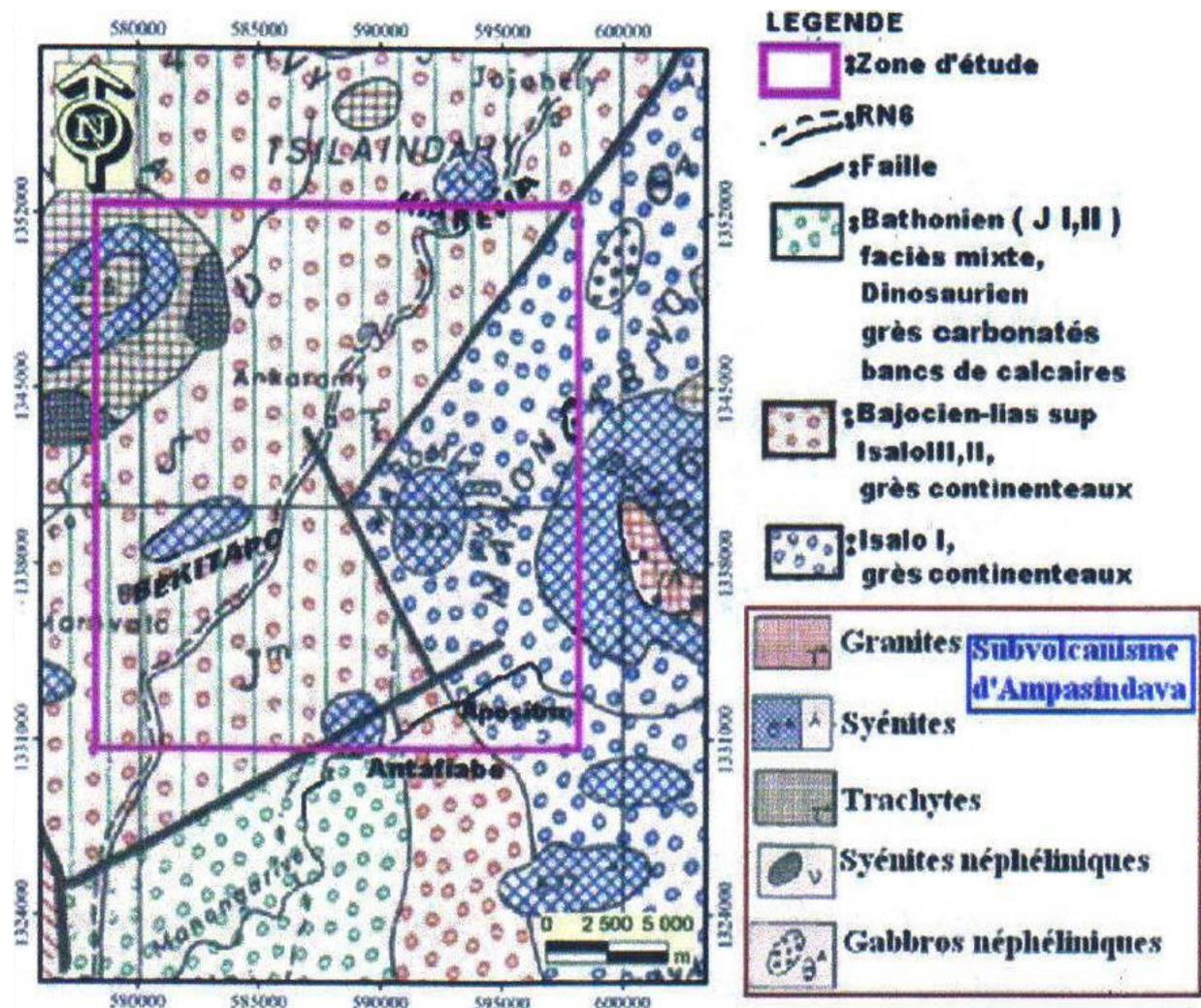
### ***d. Pêche***

La pêche maritime est subdivisée en deux catégories : la pêche traditionnelle et la pêche artisanale. Elles se pratiquent à l'aide de moyens très simples auxquels les pêcheurs sont habitués depuis des générations (lignes, filets, ramassage), qui ravitaillent en priorité les

consommateurs locaux en poissons frais d'une part, et d'autre part les excédents sont séchés sur place.

## II.2. Cadre géologique

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire d'Antsiranana, plus précisément du groupe Ampasindava-Manongarivo. Les terrains sédimentaire malagasy sont en discordance sur le socle et sont formés de couche faiblement inclinées vers l'Ouest. Les pendages varient de 20 à 30° en contact du socle pour être 1° seulement au voisinage de la côte (discordance angulaire).



(Source : SIGM, MEM )

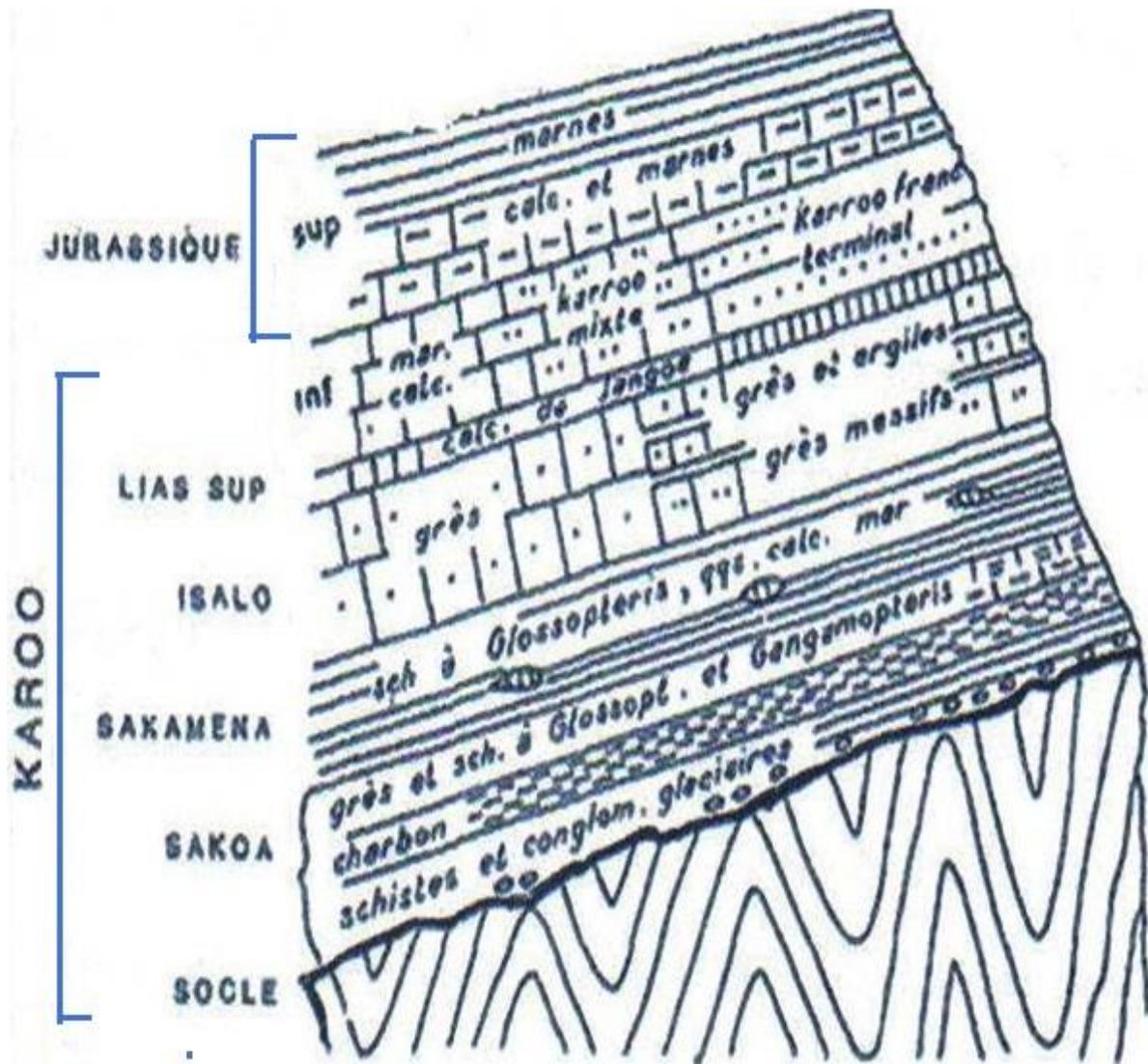
Figure 16 : Carte géologique couvrant la zone d'étude

Le complexe d'Ampasindava est encaissé dans les formations sédimentaires de l'Isalo, d'âge Jurassique moyen et Lias supérieur (Donnot, 1963). D'après De Saint Ours (1957), le Lias et le Jurassique moyen sont caractérisés par des faciès mixtes formés par une alternance de grès, de schistes, et de marnes. Au sommet de ces formations affleurent parfois des bancs calcaires discontinus.

La carte tectonique générale de Madagascar montre que les massifs volcano-plutoniques d'Ampasindava sont alignés le long d'une grande faille de direction SE-NW. A propos de cette direction, Noizet 1973, Nicollet 1984, Arthaud et al 1990, Piquet et al 1993 ont exprimé la présence de rift récent ou rift africain qui correspond à la réactivation des failles anciennes de bordure et des bassins sédimentaires de la côte Ouest de Madagascar au Miocène terminal et actuel. Ceci entraîne le développement d'un système de failles ayant cette direction NNE-SSW. Les grès en alternances avec les marnes ou schistes représentent les formations dominantes. Les grès forment également des bancs réguliers de 1 à 2m d'épaisseur, en intercalation avec des filons de granites. Ils sont à matrice siliceuse ou calcaire, le plus souvent à grains fins.

Le complexe magmatique de Manongarivo forme une allure de trèfle qui regroupe trois appareils éruptifs : Bekolosy, Andaipotsy, et Antsatrotro dominés par différents types de syénites et elles affleurent dans toutes les parties du massif éruptif. Elles se sont basculées à cause de l'abondance des failles radiales. Les granites occupent la zone de bordure mais ils peuvent également s'associer avec les syénites dans la partie centrale du massif. Les brèches volcaniques se trouvent au centre et les basaltes affleurent les zones de bordure.

Dans la partie Ouest de Manongarivo, les formations encaissantes sont représentées par des grès (grès conglomératiques, grès calcaires à grains fins ou grains grossiers) de forte puissance allant de 1 à 4m. Quelque fois, ils sont intercalés par des calcaires ou par des sills de granite. Dans la partie Est de Manongarivo, les roches encaissantes sont représentées par des grès et des schistes noirs.



(Source : Bésarie)

Figure 17 : Coupe stratigraphique du sédimentaire dans la région de Manongarivo

### II.2.1. Karoo malagasy et la zone d'étude

Le groupe Sakamena se rencontre dans le bassin d'Antsiranana. Elle est entièrement marine avec une épaisseur totale de l'ordre de 600m. A la partie inférieure, on observe des grès Productus et Siprifer et des grès argileux à Cycloglobus (fossile d'ammonite). La partie moyenne renferme des schistes à poisson et ammonite et aussi des calcaires à Flemingites. Ce schiste renferme également des nodules marnocalcaires ellipsoïdes et aplatis facilement

clivable. Ces nodules montrent très fréquemment des empreintes de poisson entier qu'on peut penser l'ancêtre de la Coelacanthe. Dans ces nodules, on peut trouver également des empreintes d'ammonites et des fossiles d'amphibiens (Protobatrachus).

Du point de vue paléontologie, ce Sakamena moyen offre un extrême intérêt (cas de poisson fossile d'Ambilobe). La partie supérieure renferme de schiste et calcaire à Flemingites (espèce d'ammonite à côte radiale) et des Aspidites (espèce d'ammonite à côte lisse).

Le tiers de la superficie de la zone d'étude est recouverte de l'Isalo I continental âgé du Néotrias jusqu'au Lias inférieur. Ce Karoo malagasy se rencontre dans la partie Sud-Est du site d'étude aux environs d'Ankaramibe, d'Analanantsoa et de Beraty. Il recouvre la Sakamena en discordance et est constitué de grès blanc grossier conglomératique avec des stratifications obliques bien marquées qui indiquent un régime climatique à forte pluie. La sédimentation a été puissante avec transport de grosse masse de sable déposée dans des plaines deltaïque (épaisseur pouvant atteindre 3000m).

L'Isalo III âgé du Jurassique moyen au niveau de Bajocien est constitué d'une alternance de grès à stratification oblique et d'argiles. Les intercalations marines sont plus abondantes avec d'épaisse alternance de faciès mixte (grès, lits calcaires) dans la majeure partie de la zone d'étude. L'Isalo III continental (grès, argiles) se rencontre aux environs d'Antafiabe où se présentent aussi les calcaires du niveau de Jangoa du Lias supérieur.

Au niveau du Lias supérieur, au fond de la baie d'Ampasindava, à Jangoa, sur la ligne de base de la presqu'île marquée par une fracture et l'arête rocheuse Ankaramy- Jangoa, on trouve dans une zone faillée rapidement recouverte par la mangrove, un banc calcaire épais d'une quarantaine de mètres, qui fournit à VILLIAUME la première faune liasique.

Il existe une microfaune mais sans éléments caractéristiques. Ce niveau calcaire est intercalé dans des grès et schistes, peu visibles à Jangoa mais qui se développent en direction Sud- Ouest sur les flancs et au bas de la grosse arête faillée Ankaramy- Jangoa. Les environs d'Ankaramy où un vieux sondage de VILLIAUME en 1900 a rencontré des grès bitumineux qui sont bien connus. On y voit une alternance de grès plus ou moins grossiers, des pélites grises, ocre, noires, localement de lignite en lits de plusieurs centimètres. Les grès sont soit massifs, soit en bancs de quelques centimètres à quelques décimètres, régulièrement stratifiés. Les pélites, en général schisteuses, renferment fréquemment des lits limonitiques.

Les grès et pélites d'Ankaramy se poursuivent de part et d'autre de la faille et s'étendent jusqu'à 2 ou 3 km à l'Est du village. La coupe du sondage d'Ankaramy (1200m au

Nord-Est du village) montre, sur 90m, une alternance métrique de grès silicieux ou calcaires et pélites avec lits de lignite. La base du sondage, jusqu'à 120m, est plus gréseuse et les grès sont imprégnés de bitume. Ce bitume, empâtant le matériel, rendit impossible la continuation du forage.

LEVAT a signalé la présence, "au fond du ruisseau aboutissant à la rivière d'Ankaramy, à 10m de marche sur la rive gauche de l'Ankaramy", de grès bitumineux avec veines millimétriques de charbon, formant une cascade. Cet affleurement n'a pu être retrouvé non plus que dans des grès bitumineux superficiels. Toutefois de nombreux échantillons donnent un produit soluble au chloroforme et très fluorescent. Les échantillons les plus fluorescents sont tous charbonneux ou constitués de grès sombres pyriteux. Les fluorescences semblent dues à la présence d'éléments carbonés et on pourrait songer à une distillation des lignites causés par les nombreuses intrusions de la région.

Le tableau suivant résume les formations Karoo du bassin d'Atsiranana :

**Tableau 3:** Formations Karoo

| <b>Système</b>       | <b>Etage</b>          | <b>Karoo malagasy</b> |   |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| Jurassique moyen     | Bathonien             | ISALO III             | b |
|                      | Bajocien              |                       | a |
| Jurassique inférieur | Lias                  | ISALO II              |   |
| Trias                | Eotrias               | ISALO I               |   |
| Permien              | Permien supérieur     | SAKAMENA              |   |
|                      | = néo permien         |                       |   |
|                      | Mesopermien           |                       |   |
|                      | Eopermien             |                       |   |
| Carbonifère          | Carbonifère supérieur | SAKOA                 |   |

## II.2.2. Post-Karoo dans le bassin d'Antsiranana

Le tableau suivant résume les formations post- Karoo dans le bassin d'Antsiranana :

**Tableau 4:** Formations Post- Karoo dans le bassin d'Antsiranana

| SYSTEME              | ETAGES   | BASSIN D'ANTSIRANANA   |
|----------------------|--|--|
| QUATERNAIRE          |  | Transgression et régressions (récifs et dunes à Aepyornis)   |
| NEOGENE              | PLIOCENE<br>MIOCENE  | Alternance de calcaire et de grès plus ou moins sableux et tufs basaltiques  |
| PALEOGENE            | OLIGOCENE<br><br>EOCENE  | Pas d'Oligocène sédimentaire, mais Subvolcanisme d'Ampasindava<br><br>Calcaire dolomitique (sans fossiles)- Calcaires à alvéolines et orthophragmine Nummulites  |
| CRETACE supérieur    | MAESTRICHTIEN<br><br>CAMPANIEN<br><br>SANTONIEN<br>CONIACIEN           | Grès et sables à faciès continental<br><br>Calcaire crayo- marneux à oursins (Micaster, lampadaster)<br><br>Grès blanchâtres<br><br>Grès jaunes à bancs calcaires à Baculites et Barroiceras                   |
| CRETACE moyen        | TURONIEN<br><br>CENOMARISEN<br><br>ALBIEN                              | Grès continentaux à lits et lentilles de Pyrite, Marnes et grès jaunes<br><br>Marnes avec abondante faune d'Ammonites (Acanthoceras, Scaphites)<br><br>Marnes à gypse et ammonites pyriteuses (petites formes) |
| CRETACE inférieur    | APTIEN   | Grès de Saharena   |
| CRETACE inférieur    | HAUTERIVIEN<br><br>VALANGINIEN   | Marnes à Crioceras et Duvalis<br><br>Marnes et argiles glauconieuses à Néocomites  |
| JURASSIQUE supérieur | TITHONIQUE<br><br>KIMERIDIEN<br><br>ARGOVIEN<br>OXFORDIEN<br>CALLOVIEN | Marnes à Belemnites<br><br>Marnes à Belemnites<br><br>Marnes à Belemnites<br><br>Marnes à Mayaïtes<br><br>Marnes à Macrocephalites   |

### II.2.3. Pétrographie

Les monzonites néphéliniques, caractérisées par un mélange en proportions à peu près égales de néphéline, de feldspaths potassiques et de plagioclases présentent des types mésocrates et leucocrates dont certains sont potassiques et d'autres sodiques. Ces roches se présentent en filons dans la région Miarena- Ankaramy.

Les essexites à feldspath alcalin, plagioclase et néphéline sont riches en éléments colorés et de couleur foncée. Elles ont des structures diverses grenues, foyaîtiques et sont souvent hétérogènes. Les théralites ne renferment plus de feldspaths alcalins ; elles forment quelques filons dans la région d'Ankaramy- Bekinikiny et ne se distinguent pas extérieurement des essexites, sauf que la hornblende est plus abondante.

Les monchiquites, roches à grains fins ; noires, à faciès lamprophyriques, constituées de phénocristaux et microclites d'augite, d'amphibole brune et de magnétite titanifère dans un fond d'analcime primaire, sont assez abondantes en filons dans la région d'Ankaramy.

Les békinkinites correspondent à un groupe de roches sans individualité chimique, noires caractérisées par la hornblende barkévicienne noire, avec comme minéral blanc essentiel, l'analcime qui est ici secondaire. Elles forment de nombreux filons dans le secteur d'Ankaramy.

Dans la zone d'étude, d'après la carte géologique, on peut citer la présence de:

- Trachyte Microsyénite dans le massif de Bezavona
- Syénite quartzifère constituant le massif de Maromiandra et dans quelques parties du massif de Manongarivo
- Syénite néphélinique constituant les massifs de Bekitapo et d'Ankitsika, on le rencontre aussi dans quelques parties des massifs de Bezavona et de Manongarivo
- Trachyte et de Laurvickite aux environs de Beraty
- Békinikinite et d'Ankaramite qui forment de nombreux filons dans le secteur d'Ankaramy
- Cassitérite et de Pyrochlore aux environs de la rivière de Berondra, le Pyrochlore se rencontre aussi dans le secteur de Beraty
- Gabbro dans la partie Nord- Est du site d'étude
- Blende dans le secteur d'Ambaliha

- Alluvions dans quelques parties d'Antafiabe, de Beraty, d'Ankaramihely.

### **II.3. Travaux antérieurs**

- Forage avant 1975

Le seul sondage qui a montré des indices d'hydrocarbures (des traces de grès bitumineux à bitume libre) dans le bassin sédimentaire d'Antsiranana se trouve près d'Ankaramy, au Nord-Est à une distance de 1200m du village. L'extension de cette étude (forages de trois core-drills) dans la partie du delta de Mahavavy et près d'Ambilobe (sondage AMB.1 près de la côte, à 26km au NW d'Ambilobe) réalisée par le Bureau de Recherches du Pétrole et par la Société des Pétroles n'a pas présenté des résultats importants car le forage a été arrêté à 2200m après avoir traversé une série de sédiments très fins, marneux au sommet, devenant uniquement silteux à partir de 1300m. Les intercalations de calcaires et de grès sont très rares et ces niveaux sont toujours compacts, sans aucune porosité inter-granulaire. Dès 100m de profondeur, la densité des roches est très forte, atteignant 2,71.

La coupe du sondage a été donnée à propos du Jurassique supérieur. La faune et la microfaune très pauvres permettent d'affirmer que le sondage a démarré, sous les alluvions, dans le Jurassique supérieur (Portlandien à Kimmeridgien) et d'estimer qu'il a atteint le Dogger vers 930m et peut-être le Lias supérieur dans les dernières centaines de mètres. La permanence des fortes subsidences dans le bassin d'Ambilobe et la presque île d'Ampasindava n'est pas favorable à l'existence de sédiments grossiers de piedmont loin en aval des affleurements et si des chenaux de roches perméables susceptibles de constituer des réservoirs peuvent exister dans le domaine paralique, ils sont bien difficiles à détecter et demandent de longues études géophysiques.

- De 2004 à 2009

La compagnie pétrolière EAX/CANDAX sous contrat avec l'OMNIS dans le bloc 1101 y menant des travaux d'exploration, les données furent étudiées et interprétées par GETECH. Des travaux aéromagnétiques réalisés par Fugro Ltd en 2004 présentent une anomalie magnétique importante dans ce secteur, ces travaux furent suivis par une étude de sismique réflexion en 2008, les résultats restent cependant encore confidentiels. La partie Sud du bassin sédimentaire d'Ambilobe jusqu'à la région Sud de la commune rural d'Ankaramibe fut concernée.

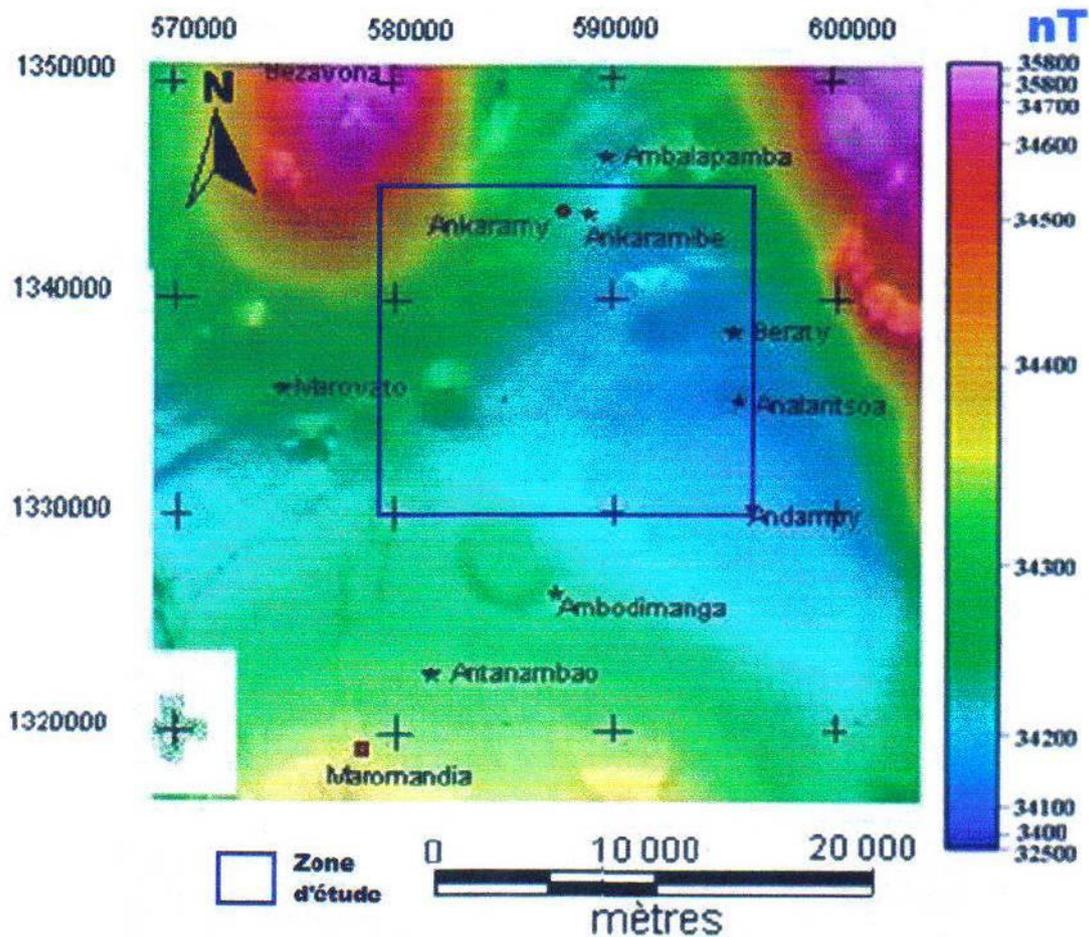
- Tectonique

On assiste à une fracture importante à la base de la presqu'île d'Ampasindava de direction NNE-SSW. Une faille parallèle, légèrement au Sud est une limite des affleurements du Lias supérieur marin de Djangoa. A cela s'ajoute une série de failles subméridiennes qui s'allonge à travers Bezavona.

- Prospection magnétique

La société Fugro Ltd a entrepris un levé aéromagnétique de cette partie Nord de Madagascar, au nom du PGRM, dans le cadre de la réinterprétation géologique de principales zones minières et/ou pétrolières de Madagascar. Le secteur Ankaramibe fut concerné.

La carte du Champ magnétique réduit au pôle est présentée ci-après :



(Source PGRM, 2010)

**Figure 18 :** Carte de Réduction au pôle QRS34-RS35

Les parties Nord-Ouest (Bezavona) et Nord-Est (Mnongarivo) de la carte magnétique réduite au pôle se caractérisent par des auréoles et des pôles d'anomalies positives liées aux complexes subvolcaniques magnétiques.

La zone se trouvant au Sud d'Ankaramy constituée principalement de l'Isalo, formations faiblement magnétiques, se trouve par contre une bande d'anomalie fortement négative. Une très bonne cohérence avec la carte géologique est observée

## **PARTIE 2-BASES METHODOLOGIQUES**

## Chapitre III: RAPPEL SUR LA PROSPECTION MAGNETIQUE

La méthode magnétique est une méthode géophysique qui essaie de déterminer, en étudiant la perturbation du champ magnétique, la distribution des roches du sous-sol caractérisées par leur susceptibilité magnétique. La méthode magnétique est celle que l'on emploie en géophysique appliquée depuis le plus longtemps et elle demeure la première parmi les méthodes géophysiques employées dans l'exploration minérale et le plus souvent dans l'exploration pétrolière.

### III.1. Principe de base

La méthode magnétique est basée sur la loi de Coulomb. Cette loi stipule que « deux particules chargées ou deux pôles magnétiques séparées d'une distance  $r$  s'attirent ou se repoussent par une force proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur distance », cette force est appelée « aimantation » et donnée par la formule : 
$$\vec{F} = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2} \vec{r}$$

Avec  $\vec{F}$  : force en dynes.

$m_1, m_2$  : masse magnétique en ému.

$\vec{r}$  : vecteur unitaire suivant la droite joignant  $m_1$  et  $m_2$ .

$\mu$  : perméabilité du milieu = 1 dans le vide et dans l'air.

L'aimantation des roches est due en partie à leur induction dans le champ magnétique terrestre et en partie à leur aimantation rémanente. La rémanence est la persistance de l'aimantation que les roches ont acquise durant leur formation, on parle aussi de mémoire magnétique.

#### III.1.1. Susceptibilité magnétique

L'intensité et l'orientation de l'aimantation induite dépendent du champ magnétique ambiant et de la susceptibilité magnétique des roches tandis que l'intensité et l'orientation de la partie rémanente sont fonction de l'histoire géologique des roches. L'aimantation induite a une direction parallèle au champ magnétique ambiant et son intensité est proportionnelle à

celle du champ ambiant ; la constante de proportionnalité s'appelle la susceptibilité magnétique, exprimée par la formule suivante :  $\vec{I} = k\vec{H}$

Avec  $\vec{I}$  : intensité de d'aimantation

$k$  : susceptibilité magnétique

$\vec{H}$  : champ inducteur

Toutes les substances appartiennent à trois classes d'aimantation: le diamagnétisme, le paramagnétisme et le ferromagnétisme.

Pour les matériaux diamagnétiques  $k < 0$ , le champ magnétique induit et le champ magnétique inducteur sont de sens opposés. Exemple de substance diamagnétique : graphite, gypse, marbre, quartz, sel, gaz rares, bismuth, cuivre et diamant.

Pour les substances paramagnétiques  $k > 0$ , le champ magnétique induit tend alors à renforcer le champ magnétique inducteur. Les métaux, gneiss, pegmatite, dolomie, syénite sont des substances paramagnétiques.

Le ferromagnétisme est un cas spécial de paramagnétisme qui est visible même en absence d'un champ inducteur contrairement au paramagnétisme. Il y a trois sortes de ferromagnétisme: le ferromagnétisme proprement dit, l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme.

### III.1.2. Origine du champ magnétique mesuré en un point

Le champ magnétique terrestre  $\vec{B}(O, t)$  mesuré en un point O à l'instant t résulte de la superposition de trois champs:

- le champ principal  $\vec{B}_p(O, t)$
- le champ d'anomalie  $\vec{B}_a(O, t)$
- le champ transitoire  $\vec{B}_t(O, t)$

$$\vec{B}(O, t) = \vec{B}_p(O, t) + \vec{B}_a(O, t) + \vec{B}_t(O, t)$$

**Tableau 5:** Source du champ magnétique mesuré en un point

| Champ       | Source                                  | Ordre de grandeur                |
|-------------|---|----------------------------------|
| Principal   | Le noyau interne de la terre            | Milliers de nT                   |
| Anomalie    | Les roches de la croute                 | Dépasse rarement 1000 nT         |
| Transitoire | La couche ionosphérique de l'atmosphère | Des dizaines à un milliers de nT |

### III.1.3. Composantes du champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre est défini par trois composantes:

- (X, Y, Z) : composantes cartésiennes
- (H, D, Z) : composante dans le système de coordonnées cylindriques
- (F, D, I) : composante dans le système de coordonnées sphériques



$$\text{Tang } I = \frac{Z}{H}$$

$$\|\vec{B}_T\| = F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

### III.1.4. Valeur théorique du champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre en un point peut être calculé par plusieurs modèles mais on utilise généralement le modèle IGRF. La modélisation du champ magnétique terrestre est basée sur le développement en harmonique sphérique de son potentiel associé.

A l'heure actuelle, l'unité utilisée en prospection magnétique est le nanoTesla (nT), d'après l'inventeur renommé Nikola Tesla. Un nanoTesla est exactement égale à un gamma, l'ancien unité CGS ,  $1 \text{ nT} = 10^{-9}\text{T} = 1\gamma$ .

## III.2. Données magnétiques

### III.2.1. Levé magnétique

Les anomalies peuvent être grandes ou petites et pourraient être soit une augmentation, soit une diminution du champ de la terre et dépendront de la profondeur d'enterrement, le degré et la direction de la magnétisation et l'attitude de la formation relative à l'orientation du champ de la terre à ce lieu.

Les magnétomètres sont des instruments dont on se sert pour mesurer le champ magnétique et, grâce à leur sensibilité et portée, peuvent mesurer non pas uniquement les changements de champ entre deux types de roche n'ayant que de petites différences en teneur magnétique, mais aussi l'anomalie proéminente d'un dyke de dolérite ou l'anomalie très grande au-dessus d'un gisement de minerai de fer magnétique. La valeur obtenue est soustraite de la valeur du champ magnétique de référence mesurée à une station de référence au même instant. Cette différence est le reflet de la déformation des lignes de champ au point de mesure (la déformation de ces lignes de champ étant due à la présence de failles, de filons, de minéraux magnétiques, de bassins, de corps magnétiques, etc.).

On se sert des levés magnétiques pour localiser et pour délimiter:

- Des gisements de minerais de fer magnétique.
- Des gisements de minerais métalliques qui pourraient avoir soit de la magnétite, soit de la pyrrhotite soit de l'ilménite associée avec le minerai.
- Des zones riches en magnétite qui pourraient avoir une association quelconque indirecte avec un gisement métallique (« marker zones »).
- Des structures géologiques qui pourraient indiquer la présence d'un piège de pétrole ou de gaz ou qui pourraient avoir influencé le dépôt et la concentration des minéraux économiques.
- Des dykes magnétiques qui forment souvent une barrière pour l'accumulation de l'eau souterraine.
- Des failles.
- Des restes archéologiques.

Les levés magnétiques fournissent aussi une assistance très précieuse à la cartographie géologique et peuvent apporter des données qui sont utiles pour l'Ingénieur civil.

### **III.2.2. Instrumentation**

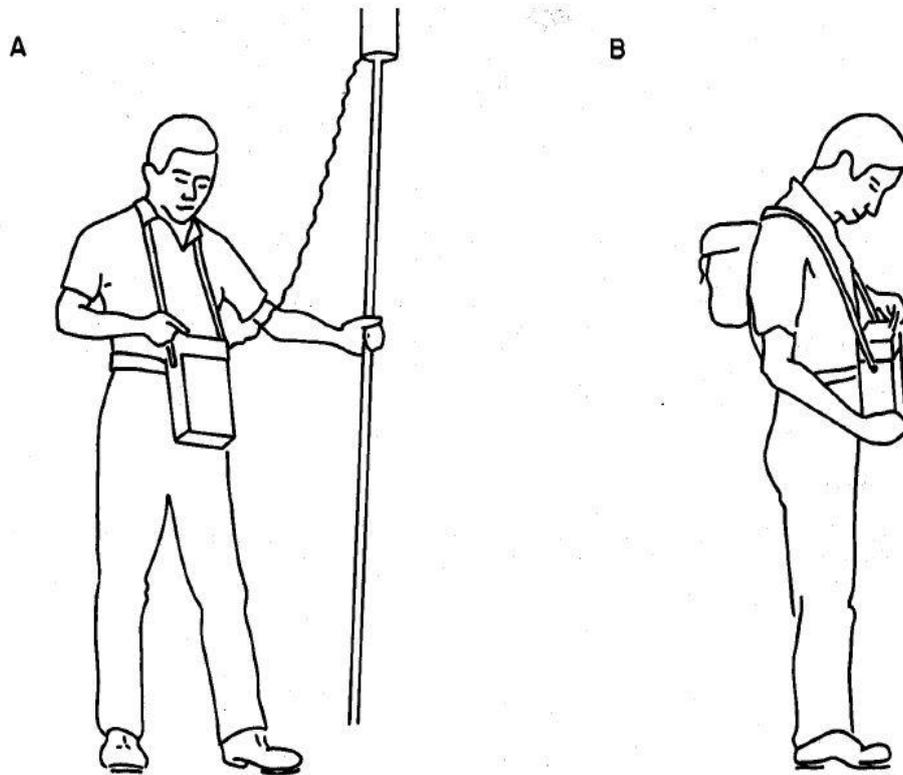
#### ***a. Magnétisme au sol***

##### *a-1 Magnétomètres à protons*

Les magnétomètres typiques pour des opérations de terrain sont ceux portables. C'est l'opérateur lui-même qui porte un détecteur, souvent monté sur une tringle, ou dans un sac à dos. Les enregistrements se font le long d'un profil ou grille. Pour les grilles détaillées les considérations les plus importantes sont la longueur des lignes, l'orientation des lignes, l'espacement des lignes et l'espacement des stations. La disposition sera généralement la même pour toutes les méthodes de prospection utilisées pour la zone en question (méthodes géophysiques aussi bien que l'échantillonnage des sols et la cartographie géologique). Les lignes seront démarquées aux intervalles convenables avec des piquets en bois (éviter des piquets métalliques pour les raisons évidentes). L'orientation des lignes sera, dans la mesure du possible, perpendiculaire à l'orientation connue ou déduite de la géologie afin d'assurer la meilleure résolution des corps quelconques enterrés.

Le détecteur du magnétomètre à protons consiste en un conteneur de liquide riche en protons, généralement le kérosène (la paraffine), autour duquel une bobine de fil électrique est

enroulée. Les protons agissent comme des petits aimants rotatifs. Un courant est passé dans la bobine, ce qui crée un fort champ magnétique qui fait aligner tous les axes de rotation dans la direction de ce champ. Le courant est coupé et les axes de rotation oscilleront autour de la direction du champ terrestre et induiront ensemble un voltage oscillant dans la bobine.



**Figure 20 :** A) Détecteur au bout du tringle ; B) Détecteur dans le sac à dos

La console électronique du magnétomètre fournit le courant pour la bobine en forme d'une impulsion et dispose, en même temps, de l'instrumentation électronique pour mesurer et enregistrer le champ magnétique de la terre directement en nanoteslas (nT) sur un écran numérique. La bobine (détecteur) est généralement séparée de la console et reliée avec elle par câble, ce qui assure qu'elle est éloignée d'une influence magnétique quelconque en provenance de la console et de l'opérateur.

#### a-2 Magnétomètres de sondage

Le type le plus efficace de magnétomètre de forage est le magnétomètre à trois éléments qui mesure le champ magnétique le long de trois directions qui sont mutuellement

perpendiculaires. Un élément de mesure est généralement orienté dans la direction du puits de forage, un deuxième est horizontal et le troisième est perpendiculaire aux deux autres. Les mesures du champ magnétique détecté par chaque élément sont enregistrées aux intervalles discontinus le long du forage. Comme on connaît maintenant la direction et la grandeur du champ et sa magnitude pour chacun des trois éléments, le vecteur résultant du champ dans l'espace pourrait être obtenu, pourvu que la direction du forage et son pendage soit connus. Des mesures du champ magnétique détecté par chaque élément sont enregistrées aux intervalles discontinus le long du forage. Les vecteurs obtenues à partir des enregistrements se trouvent dans l'espace 3-dimensionnel.

### ***b. Magnétisme spatial ou aéroporté***

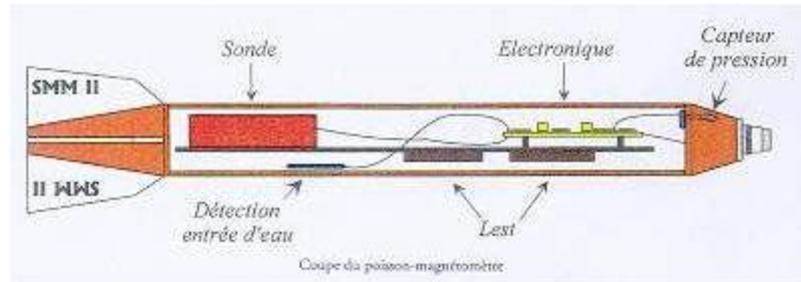
La majeure partie des opérations spatiales est réalisée efficacement à partir d'un avion. Le détecteur est monté sur un pylône ou tracté en arrière par câble. Cet appareil volant survole le long des lignes parallèles à une altitude constante (lignes de contrôle aux intervalles). Le principal avantage est de permettre à des grandes superficies, éventuellement difficiles d'accès, d'être levées rapidement et à moindre coût que par lever au sol.

Pour effectuer un levé magnétique, les instruments de bord requis sont : 1 à 4 magnétomètres, un GPS, un enregistreur numérique, un altimètre radar ou laser et un baromètre. L'espacement entre les lignes de vol est déterminé par la cible et la géologie, tandis que l'espacement des lignes de contrôle est plus ou moins 10 fois celui de ces dernières. Les traversées entre ces deux lignes doivent être à une même altitude.

Les magnétomètres à vapeur de Césium sont le type le plus souvent mis en œuvre pour les levées aéromagnétiques. Un détecteur césium fournit, en pratique, des sorties qui sont essentiellement continues. En combinaison avec l'électronique requise, il peut opérer à une résolution allant jusqu'à 0.001 nT, à un taux d'échantillonnage de 10 mesures par seconde ou mieux, au travers d'une portée de 20,000 à 100,000 nT. Les magnétomètres peuvent être installés dans des aéronefs à voilure fixe ou dans les hélicoptères, dans une configuration "stinger" (aiguille) ou "towed bird" (oiseau tracté) et, en plus de mesurer le champ magnétique total, peuvent servir pour prendre des mesures verticales, transversales et/ou des mesures de l'inclinaison longitudinale en mettant en œuvre deux détecteurs.

### c. Prospection magnétique en mer

La prospection magnétique en mer est en général réalisée à l'aide d'un poisson remorqué par un bateau, contenant un magnétomètre. C'est le cas avec le Système Magnétomètre Marin (SMMII) de Thomson Marconi Sonar. Ce système permet de repérer la présence de corps ferreux qui modifient le champ terrestre local (anomalies). L'information recueillie peut donner, après traitement, plusieurs informations intéressantes, comme la masse de fer, la profondeur d'enfouissement, etc...



Source <http://forumbachelor.free.fr/gma/GMA1/index.php?page=16>

**Figure 21 :** Coupe transversale d'un poisson équipé d'un magnétomètre

### d. Susceptibilitémètres

Les susceptibilitémètres mesurent la susceptibilité ( $k$ ) des roches. On peut faire ces mesures avec des petits instruments portables sur des affleurements des roches ou avec des instruments plus grands et plus précis dans un laboratoire sur des échantillons de roche, de préférence les carottes de forage.

L'opération est facile. L'instrument est mis en marche et, avec aucun échantillon dans le porte-échantillon le cadran est tourné jusqu'à ce que aucun bruit ne soit entendu dans les écouteurs, soit jusqu'à ce que l'aiguille de l'instrument soit à zéro. L'échantillon est placé dans le porte-échantillon et on entend un son dans les écouteurs ou l'aiguille bouge. Le cadran est tourné encore une fois jusqu'à ce que aucun bruit ne soit entendu dans les écouteurs, soit jusqu'à ce que l'aiguille de l'instrument soit à zéro. La différence entre les deux mesures est une mesure de susceptibilité. Afin d'obtenir la vraie susceptibilité l'enregistrement est converti à l'aide d'un facteur fourni par le fabricant dans la forme d'un tableau. Les instruments plus modernes fournissent un affichage numérique direct en unités de susceptibilité. Les petits instruments utilisés sur le terrain fournissent les affichages directs sans devoir manipuler le

cadran, mais ils sont moins précis que les instruments de laboratoire. Ils sont, pourtant, très utiles pour obtenir une idée de la différence en susceptibilité entre les différents types de roches rencontrées sur le terrain.

Les susceptibilitémètres peuvent être gradués soit en unités c.g.s. (autrefois), soit en unités SI, soit en "kappa" (récemment).

### **III.3. Traitement des données magnétiques**

La prospection magnétique est fondée sur l'interprétation des anomalies du champ magnétique terrestre.

$$\text{On a : } \vec{B}(O, t) = \vec{B}_p(O, t) + \vec{B}_a(O, t) + \vec{B}_t(O, t)$$

Il faut donc procéder à un certain nombre d'opérations pour ne tenir compte que le champ d'anomalie  $\vec{B}_a(O, t)$  qui reflète les variations d'aimantation des roches dans le sous sol.

#### **III.3.1. Réduction des observations**

La réduction d'un levé consiste à éliminer les variations transitoires  $\vec{B}_t(O, t)$  du champ magnétique et nécessite de disposer d'une station fixe dite station de réduction.

Pratiquement cette correction s'effectue comme en gravimétrie, il faut donc, pour une mesure effectuée à l'instant  $t$ , enlever une quantité  $\left(\frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}\right)(t - t_1)$  à la valeur lue sur l'appareil.

Avec :  $V_2$ : valeur lue sur l'appareil à la station de base à l'instant  $t_2$

$V_1$ : valeur lue sur l'appareil à la station de base à l'instant  $t_1$

Après cette opération les valeurs mesurées aux différentes stations de mesure sont réduites à un même instant  $t_1$  et ne sont plus fonction du temps.

### III.3.2. Détermination du champ principal

Pour avoir  $\vec{B}_p(O, t)$  il faut la latitude et la longitude du point O. Il existe plusieurs modèles proposées pour calculer le champ principal mais on adopte généralement le modèle d'IGRF.

### III.3.3. Anomalie magnétique

Considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- le réseau considéré est de dimension assez restreinte pour qu'on puisse considérer que la surface terrestre est plane;
- l'intensité du champ d'anomalie  $\vec{B}_a$  est petite devant celle du champ principal  $\vec{B}_p$  ;
- la direction du champ principal  $\vec{B}_p$  est supposée uniforme dans le domaine du réseau;
- les mesures sont faites dans un plan horizontal.

Soit Oxyz un trièdre où Ox pointe vers le Nord géographique, Oy vers l'Est et où Oz est la verticale ascendante. Le plan S de mesure étant par convention le plan de côte nulle, qui est vérifié dans notre cas puisque les mesures sont effectuées sur la surface de la mer, nous disposons de l'intensité mesurée  $B_T(x, y, O)$ , la valeur mesurée réduite, et nous connaissons la direction  $\vec{P}$  du champ principal, ainsi que son intensité, par l'intermédiaire du modèle IGRF,  $B_p(x, y, O)$ , dans ce plan l'anomalie de l'intensité  $A_b$  est :  $A_b = B_T - B_p$  qui est liée de façon générale au champ d'anomalie  $\vec{B}_a$  par la relation :  $A_b \approx \vec{B}_a \cdot \vec{P}$

### III.3.4. Réduction au pôle

La réduction au pôle consiste à enlever l'effet de l'inclinaison magnétique ainsi mettre l'anomalie à la verticale de la source. Dans le cas de Madagascar l'inclinaison magnétique et la déclinaison magnétique sont négatives, après la réduction au pôle, l'anomalie va se déplacer vers le Sud Est.

## Chapitre IV: RAPPEL SUR LA PROSPECTION GRAVIMETRIQUE

### IV.1. Principe de base

La gravimétrie est l'étude du champ de pesanteur terrestre. Ce dernier est à la base de la géodésie, faisant intervenir la mesure des dimensions et la forme de notre planète. La gravimétrie apporte aussi des informations très importantes concernant la répartition des masses au sein de notre globe. Le phénomène de la gravité a été mis en évidence par Galilée (1561-1642), qui a démontré qu'il n'était pas nécessaire d'exercer un effort pour mettre un corps en mouvement. Il a ainsi déduit qu'il devait exister une force responsable de la chute des corps (unité gravimétrique : le gal).

#### IV.1.1. Lois de Newton

Il existe au sein de notre Globe terrestre divers phénomènes très variés, telles les orbites célestes, les marées et la chute des corps. Afin d'expliquer ces différents phénomènes, des lois fondamentales de la dynamique ont été énoncées par Newton en 1687. Elles constituent le Principe de base de la gravimétrie.

- Selon la première loi de Newton, la force  $F$  entre deux masses  $m_1$  et  $m_2$  distante de  $r$  est une force attractive dont le module est donnée par l'équation: 
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Avec :  $G$  : constante de gravitation universelle.  $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \text{kg}^{-2}$

- D'après la seconde loi de Newton, il faut appliquer une force  $F$  à une masse  $m$  pour lui faire subir une accélération  $a$ .

Ceci se traduit par la relation : 
$$F = m \cdot a$$

L'accélération d'une masse  $m$  à la surface du sol s'exprime donc par : 
$$a = g = G \frac{m_T}{r_T^2}$$

Avec :  $m_T$  est la masse de la terre ( $5,977 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ ) et  $r_T$  le rayon moyen de la terre (6370 km).

$g$  est dite "accélération de la gravité" et vaut en moyenne  $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

En l'honneur de Galilée, on a nommé l'unité d'accélération gravitationnelle le *Gal* avec:

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} = 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal} = 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

La précision d'un gravimètre d'exploration est de l'ordre de 0.01 *mGal* (soit  $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

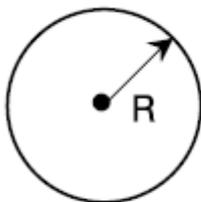
#### IV.1.2. Une référence pour la terre

##### a. Ellipsoïde de révolution

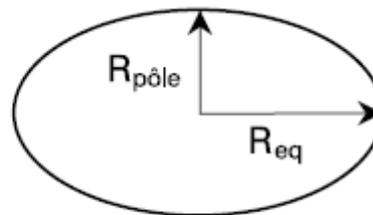
Pour prédire le champ gravitationnel de la terre en tout point, sa forme et ses variations de densité doivent être connus. A cause de sa rotation, la terre n'est pas sphérique. Sa forme peut être approximée par une ellipsoïde de révolution quelquefois appelée sphéroïde et caractérisé par son coefficient d'aplatissement :

$$f = \frac{R_{\text{équateur}} - R_{\text{pôle}}}{R_{\text{équateur}}} = \frac{1}{298,247}$$

Avec :  $R_{\text{équateur}}$  : le rayon de la terre à l'équateur (6378,139 km) et  $R_{\text{pôle}}$  le rayon de la terre au pôle



Sphère



Ellipsoïde

Sur l'ellipsoïde, la gravité de référence  $g_{th}$  pour un point de latitude  $\varphi$  est :

$$g_{th} = g_o(1 + 5,2789 \cdot 10^{-3} \sin^2 \varphi + 23,462 \cdot 10^{-6} \sin^4 \varphi) \quad \text{avec : } g_o = 978030 \text{ mGal}$$

La valeur de la gravité ainsi obtenue est celle qui serait observée au niveau de la mer sur une terre de forme sphéroïdale (approximant de près sa forme réelle) et dont la densité ne varie qu'en profondeur et non pas latéralement.

### ***b. Géoïde***

La formule de  $g_{th}$  donnée précédemment suppose que le niveau des océans est lisse et que la densité ne varie qu'en profondeur. Or, il n'en est rien. On sait que cette surface a des bosses et des creux de plusieurs dizaines de mètres et que la densité peut varier suivant toutes les directions. Ceci nous amène alors à définir le concept de géoïde que l'on définit par la surface équipotentielle correspondant à la surface des océans aux repos. Sur les continents, le géoïde correspond à la surface définie par l'eau contenue dans un canal étroit reliant les océans de part et d'autre du continent. Par définition, le géoïde est partout perpendiculaire à la verticale telle qu'indiquée par le fil à plomb.

### ***c. Densité***

On entend par densité d'un corps homogène, le rapport entre sa masse et son volume :

$$d = \frac{m}{V}$$

Les roches sont généralement hétérogènes et composées de corps appartenant aux trois états principaux qui sont: les corps gazeux, les solides et les liquides. Rappelons qu'une roche est composée d'un ensemble de minéraux variés, où la silice, le calcium et l'alumine jouent le plus grand rôle. Ces agrégats de minéraux peuvent laisser entre eux des vides remplis ou non d'eau, ou parfois d'hydrocarbures, rarement de l'air quand il s'agit de roches proches de la surface. Contrairement aux autres paramètres pétrophysiques de la roche, la variation de la densité des matériaux est très faible sur l'échelle globale des densités de roches.

La densité moyenne de la terre est de "5,5" tandis que la densité moyenne des roches composant l'écorce terrestre est de "2,67".

La densité des roches dépend principalement de trois paramètres:

- densité de grains des minéraux formant la roche ;
- porosité " qui représente le volume des vides par rapport au volume total de la roche" ;
- densité du fluide remplissant les interstices de la roche.

Pour un échantillon de roche, on peut déterminer deux valeurs de densité: la densité "sèche", qui correspond à un échantillon desséché complètement; et la densité "humide", pour

une roche complètement imprégnée d'eau. Pour des matériaux très poreux, la différence entre densité sèche et humide peut atteindre 30% à 40%.

La valeur utilisée en interprétation gravimétrique dépendra de la profondeur de la formation étudiée par rapport à la nappe phréatique ("son niveau dépend des conditions climatiques"). Dans la plupart des cas on utilise la densité "humide", car on peut supposer qu'au dessous de la nappe phréatique, les interstices sont remplis d'eau. La densité de l'eau est généralement un peu supérieure à "1", à cause des sels et autres minéraux dissous. Des fluides tels que l'huile et le gaz ont des densités inférieures à "1".

Pour la plupart des minéraux constituant les roches, la densité de grain varie assez peu. Pour le quartz pur " $(SiO_2)$ ", la densité est de "2,65", pour la calcite " $(CaCO_3)$ ", la densité est aussi d'environ "2,65". Les minéraux de l'argile ont des densités variant entre "2,5 et 2,8". Ainsi ce qui confirme, que pour la plupart des roches courantes, les densités des matériaux de base dont elles sont formées ne varient pas fortement, aussi la densité dépend principalement de la porosité, ou la densité augmente quand la porosité diminue. Une valeur de densité n'est pas caractéristique d'un seul type de roche. Les sables non consolidés et les grès ont des densités variant entre 1,7 et 2,2 leur densité augmente avec la profondeur. Les sables consolidés et les grès plus anciens ont des densités plus fortes: 2,5 à 2,6. Des calcaires massifs peuvent avoir des densités atteignant 2,7.

**Tableau 6:** Densité des roches ignées ( $g/cm^3$ )

| Type de roche      | Intervalle | Moyenne | Type de roche      | Intervalle | Moyenne |
|--------------------|------------|---------|--------------------|------------|---------|
| Rhyolite vitreuse  | 2.20-2.28  | 2.24    | Diorite quartzeuse | 2.62-2.96  | 2.79    |
| Obsidienne         | 2.20-2.40  | 2.30    | Diorite            | 2.72-2.99  | 2.85    |
| Vitrophyre         | 2.36-2.53  | 2.44    | Laves              | 2.80-3.00  | 2.90    |
| Rhyolite           | 2.35-2.70  | 2.52    | Diabase            | 2.50-3.20  | 2.91    |
| Dacite             | 2.35-2.80  | 2.58    | Essexite           | 2.69-3.14  | 2.91    |
| Phonolite          | 2.45-2.71  | 2.59    | Norite             | 2.70-3.24  | 2.92    |
| Trachyte           | 2.42-2.80  | 2.60    | Basalte            | 2.70-3.30  | 2.99    |
| Andésite           | 2.40-2.80  | 2.61    | Gabbro             | 2.70-3.50  | 3.03    |
| Néphéline- Syénite | 2.53-2.70  | 2.61    | Hornblende- Gabbro | 2.98-3.18  | 3.08    |
| Granite            | 2.50-2.81  | 2.64    | Péridotite         | 2.78-3.37  | 3.15    |
| Granodiorite       | 2.67-2.79  | 2.73    | Pyroxénite         | 2.93-3.34  | 3.17    |
| Porphyre           | 2.60-2.89  | 2.74    | Igées acides       | 2.30-3.11  | 2.61    |
| Syénite            | 2.60-2.95  | 2.77    | Ignées basique     | 2.09-3.17  | 2.79    |
| Anorthosite        | 2.64-2.94  | 2.78    |                    |            |         |

**Tableau 7:** Densité des roches métamorphiques (g/cm<sup>3</sup>)

| Type de roche      | Intervalle | Moyenne | Type de roche      | Intervalle | Moyenne |
|--------------------|------------|---------|--------------------|------------|---------|
| Quartzite          | 2.50-2.70  | 2.90    | Serpentine         | 2.40-3.10  | 2.78    |
| Schiste            | 2.39-2.90  | 2.64    | Ardoise            | 2.70-2.90  | 2.79    |
| Grauwacke          | 2.60-2.70  | 2.65    | Gneiss             | 2.59-3.10  | 2.80    |
| Granulite          | 2.52-2.73  | 2.65    | Schiste à chlorite | 2.75-2.98  | 2.87    |
| Phyllite           | 2.68-2.80  | 2.74    | Amphibolite        | 2.90-3.04  | 2.96    |
| Marbre             | 2.60-2.90  | 2.75    | Éclogite           | 3.20-3.54  | 3.37    |
| Ardoise quartzique | 2.63-2.91  | 2.77    | Métamorphique      | 2.40-3.10  | 2.74    |

**Tableau 8:** Densité des minéraux non-métalliques et des minéraux divers (g/cm<sup>3</sup>)

| Type           | Intervalle | Moyenne | Type       | Intervalle | Moyenne |
|----------------|------------|---------|------------|------------|---------|
| Neige          | -          | 0.125   | Gypse      | 2.20-2.60  | 2.35    |
| Pétrole        | 0.60-0.90  | -       | Bauxite    | 2.30-2.55  | 2.45    |
| Glace          | 2.88-0.92  | -       | Kaolinite  | 2.20-2.63  | 2.53    |
| Eau de mer     | 1.01-1.05  | -       | Orthoclase | 2.50-2.60  | -       |
| Tourbe         | -          | 1.05    | Quartz     | 2.50-2.70  | 2.65    |
| Asphalte       | 1.10-1.20  | -       | Calcite    | 2.60-2.70  | -       |
| Lignite        | 1.10-1.25  | 1.19    | talc       | 2.70-2.80  | 2.71    |
| Houille grasse | 1.20-1.50  | 1.32    | Anhydrite  | 2.90-3.00  | 2.93    |
| Anthracite     | 1.34-1.80  | 1.50    | Biotite    | 2.70-3.20  | 2.92    |
| Brique         | -          | 1.50    | Magnésite  | 2.90-3.12  | 3.03    |
| Carnallite     | 1.60-1.70  | -       | Fluorine   | 3.01-3.25  | 3.14    |
| Soufre         | 1.90-2.10  | -       | Épidote    | 3.25-3.50  | -       |
| Craie          | 1.53-2.60  | 2.01    | Diamant    | -          | 3.52    |
| Graphite       | 1.90-2.30  | 2.15    | Corindon   | 3.90-4.10  | 4.0     |
| Sel gemme      | 2.10-2.60  | 2.22    | Barite     | 4.30-4.70  | 4.47    |
|                |            |         | Zircon     | 4.00-4.90  | 4.57    |

## IV.2. Données gravimétriques

### IV.2.1. Instrumentation

Dans une campagne gravimétrique, on utilise un appareil sensible aux variations de gravité appelées : gravimètre. Dans notre cas, on a utilisé un gravimètre de type La Coste-Romberg D 139. C'est un gravimètre astable qui est plus précis que les gravimètres stables.

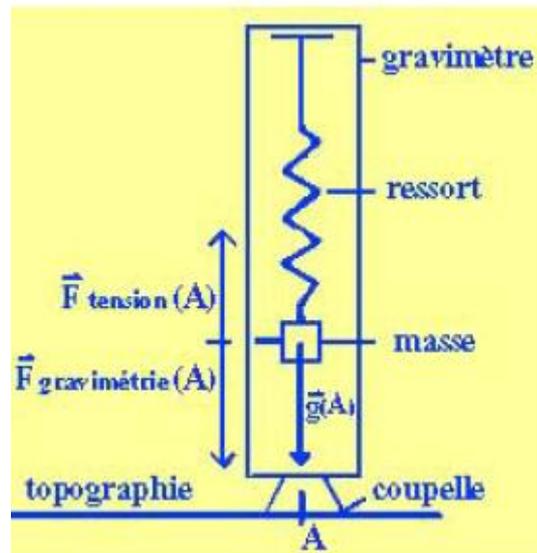


**Figure 22 :** Gravimètre La Coste-Romberg D 139

La Coste - Romberg est développé en 1934 par J.B. LaCoste, il est basé sur le principe du ressort de longueur zéro. Son degré de précision est de  $\pm 0,01 \text{ mGal}$ , voire mieux. Ils sont fabriqués en métal avec faible extension thermique et sont isolés et thermostatés à  $\pm 0,02^\circ\text{C}$ .

On peut mesurer "g" en valeur absolue soit en étudiant la chute d'un corps dans le vide (possible uniquement en laboratoire) soit à l'aide de pendules (mesure de leur période d'oscillation), utiles en géodésie, ces valeurs permettent d'étudier les termes principaux de "g" à la surface de la terre. Les bases de mesure absolue servent pour l'étalonnage des gravimètres. Les gravimètres de prospection ne permettent que des mesures relatives: ceci ne modifie en rien la mesure car seules nous intéressent les anomalies de "g", c'est-à-dire les écarts par rapport à une base. (précision: 1/100 mgal)

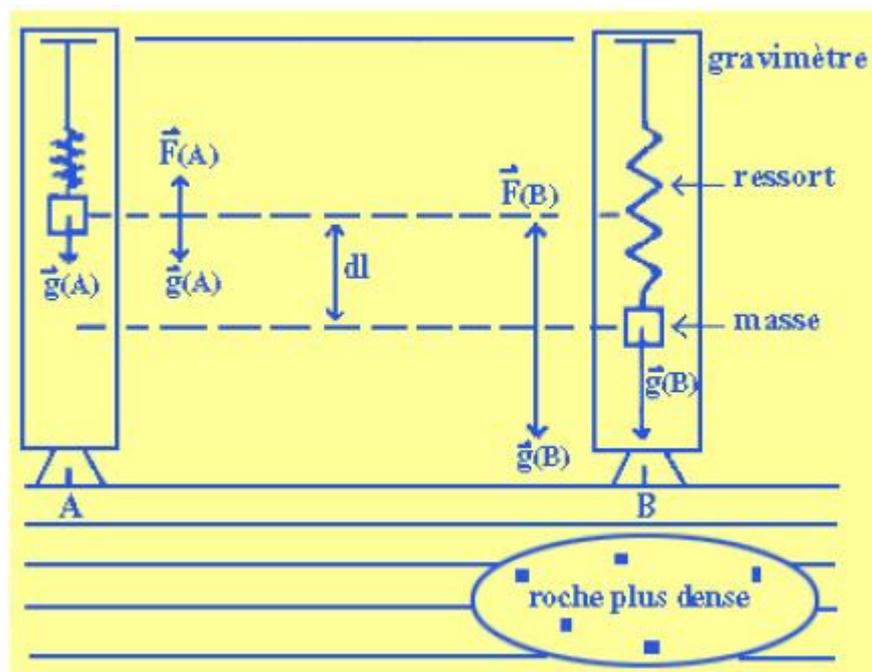
Les gravimètres les plus simples sont constitués d'une masse  $m$  (par exemple un quartz hélicoïdal) supportée par un ressort de constante de raideur  $k$ . L'opérateur place le gravimètre horizontalement en un point donné. Le ressort subit un allongement vers le bas, suivant la direction du champ de gravité local (direction verticale). Cet allongement est d'autant plus grand que la gravité locale est importante.



**Figure 23 :** *Vue interne d'un gravimètre*

En fait, la plupart des gravimètres sont « relatifs » et ne peuvent pas mesurer directement la valeur absolue de la gravité en un point. Ils peuvent mesurer la variation de la gravité entre deux points (mesure relative).

Si nous considérons un point de mesure B situé au-dessus d'une roche plus dense, la gravité en B [ $g(B)$ ] est alors plus forte que la gravité en A [ $g(A)$ ] :



**Figure 24 :** *Mesure de la variation de la gravité entre deux points A et B*

Une augmentation de gravité se traduit par un allongement du ressort du gravimètre. Ainsi, toute augmentation (ou diminution) du champ de gravité entraîne un allongement (ou raccourcissement) du ressort. Grâce à l'étalonnage de l'appareil, une mesure de l'allongement du ressort permet donc de déduire la variation de gravité entre deux points.

#### **IV.2.2. Levé gravimétrique**

Une équipe de gravimétrie devrait être composée au moins de 2 personnes, l'opérateur du gravimètre et son aide.

Avant de faire une prospection gravimétrique, il faudrait recalculer la valeur du coefficient d'étalonnage  $K$  du gravimètre.

L'exécution des mesures doit tenir compte des quelques points essentiels suivants :

- Le filtrage des résultats et, par conséquent, la mise en évidence des anomalies intéressantes sont facilités si les mesures sont plus ou moins réparties dans les zones étudiées et si elles sont disposées sur de profils rectilignes parallèles entre eux (sauf pour certains endroits difficiles d'accès) et perpendiculaires à l'allongement présumé des structures cibles.
- L'étude doit être étendue hors de la zone d'anomalie, ce qui permet d'obtenir une référence et une structure adéquat.
- Les variations de  $g$  avec la position des stations, principalement en fonction de leur altitude, contraignent l'opérateur à effectuer un levé topographique de bonne précision.

Une prospection gravimétrique est habituellement conduite selon un profilage de la zone d'étude : les stations de mesures sont alignées et réparties plus ou moins régulièrement le long de profils suivant un pas de mesure. Les profils sont généralement choisis perpendiculaires à la direction présumé de la ou des structures cibles au cas où des informations géologiques le permettent. Le pas de mesure peut être variable en fonction des buts recherchés, de la topographie et de la facilité de déplacement.

La distance entre deux profils est aussi importante. Elle fait intervenir un pas de mesure entre profils. L'ensemble de ces deux pas de mesure, l'une dans la direction du profil et l'autre dans la direction perpendiculaire, définit ce que l'on appelle : Maille de mesure.

Les emplacements des points de base doivent être choisis de façon à être facilement accessibles, et retrouvables et aussi de façon à ce que les points soient plu ou moins uniformément répartis sur toute la zone d'étude afin de pouvoir toujours en trouver une au cours de la prospection.

On déterminera d'abord avec précision les différences des gravités  $\Delta g$  entre ces points de base. Ils serviront ensuite indifféremment lors de la prospection proprement dite.

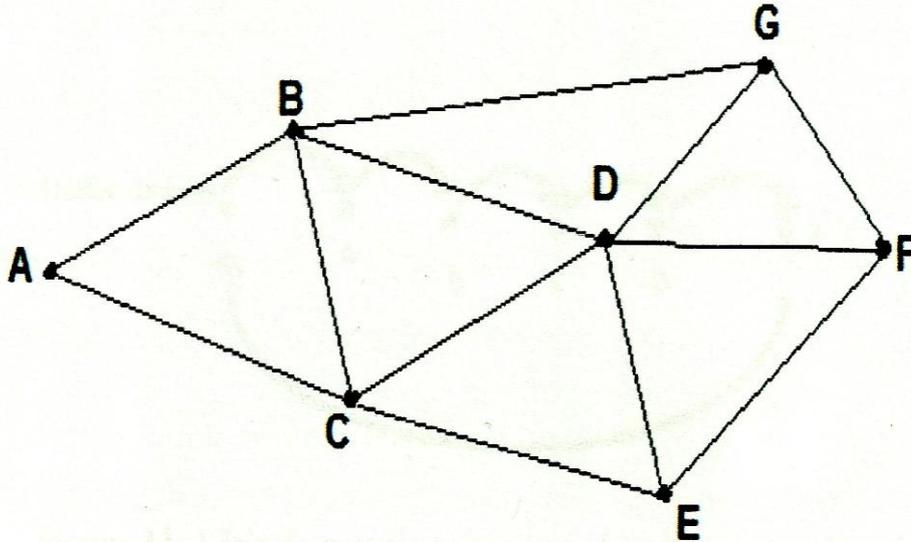
Une mode classique consiste à réaliser un aller-retour et demi : A, B, A, B ce qui permet d'avoir un meilleur critère de qualité par comparaison des dérives de l'appareil en AA et BB.

Supposons un triangle A, B, C dont les  $\Delta g_{AB}$ ,  $\Delta g_{BC}$ ,  $\Delta g_{AC}$  ont été mesurée de cette façon. La somme algébrique de ces trois valeurs n'est généralement pas nulle, comme elle doit l'être, du fait de l'imprécision des mesures. Cet écart constitue l'écart de fermeture. Il doit être compensé, réparti entre les différents points de mesures, afin d'avoir une somme des valeurs nulle (ou du moins assez faible).

#### **IV.2.3. Méthode de compensation**

La compensation est généralement mal comprise. Il ne s'agit pas de rendre les mesures meilleures. Elles sont ce qu'elles sont avec leur précision qui est connue : aucune compensation ne les rendra meilleures. Le but est plutôt d'assigner des valeurs différentes selon le chemin suivi.

Soit, par exemple, le réseau de bases suivant formé de 7 points.



**Figure 25 :** Exemple de réseau de base

Selon que l'on prenne le chemin A-B-D, ou A-C-D, etc... on aura des valeurs différentes de  $g$  pour le point D. Les points de base étant censés être des points d'appui pour la prospection, on voit bien qu'il importe de pouvoir leur donner des valeurs uniques.

Pour faire cette compensation, on préfère généralement la méthode dite des « engrenages » aux autres méthodes utilisant les moindres carrés. Elle a l'avantage d'être rapide tout en donnant une précision acceptable. Pour ce faire, on reporte sur chaque côté, la valeur du  $\Delta g$  avec le sens correspondant. On se choisit ensuite un sens de rotation positive arbitraire. Les valeurs des écarts de fermeture (en centième de milliGal) est ensuite reporté à l'intérieur de chaque maille, compte tenu de ce sens conventionnel de rotation.

L'idée de départ est de répartir équitablement la fermeture d'une maille sur chaque côté de cette maille. Chaque fois qu'on fait une telle opération, les mailles adjacentes verront leur fermeture modifiée et lorsqu'elles sont traitées à leur tour, la première maille verra sa fermeture modifiée, etc... D'où le nom engrenage donné à ce procédé. Son intérêt consiste à ce que la convergence des calculs soit rapide. Pour accélérer encore mieux la convergence, il convient de traiter chaque fois la maille qui ferme la plus mal.

On arrête le calcul quand aucune fermeture ne dépasse 0,02 mGal en valeur absolue.

### IV.3. Anomalie gravimétrique

#### IV.3.1. Origine des anomalies gravimétriques

La gravimétrie se fonde sur l'étude des anomalies du champ de pesanteur à la structure terrestre. L'inégale distribution des masses du globe est la cause de ces variations. La localisation des zones structurales sur la base de données gravimétriques ne s'avère possible que grâce à l'inégalité de densité de ces structures. La différence d'enfouissement des discontinuités de densités, c'est-à-dire des surfaces de séparation entre les masses de roches hétérogènes sont suffisamment grandes, a engendré cela. L'intensité de la pesanteur est directement liée à l'attraction subite par l'instrument de la part de diverses parties du globe, compte tenu de la force centrifuge due à la rotation.

#### IV.3.2. Correction des données gravimétriques

Afin d'obtenir les variations du champ gravitationnel dues à des causes géologiques, il est nécessaire de corriger nos lectures de toutes les autres causes extérieures pouvant les influencer.

##### a. Correction de dérive

Elle comprend la dérive instrumentale liée à la fatigue du ressort (puisque la raideur du ressort n'est pas une constante absolue) et la dérive causée par les marées.

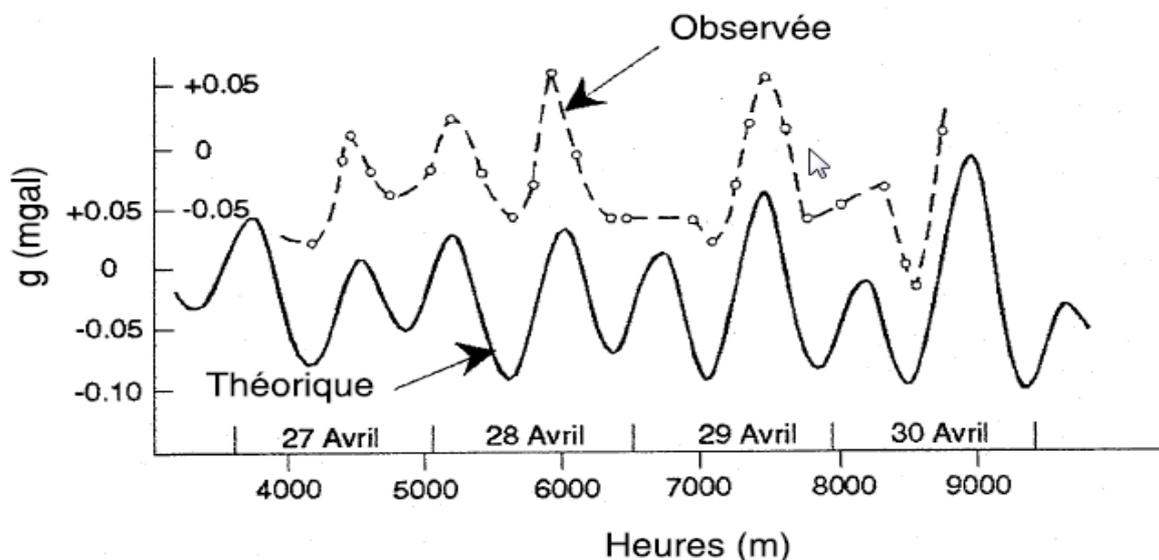
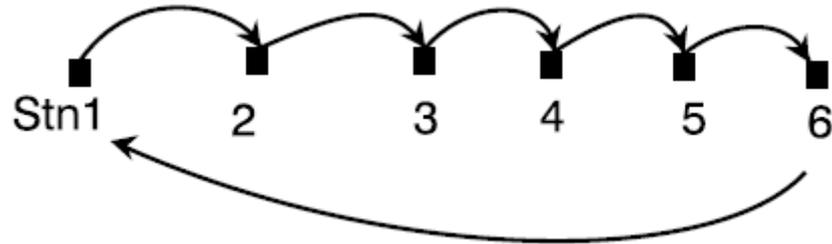


Figure 26 : Marées gravimétriques

Dans ce but, il est nécessaire de suivre un certain cheminement entre les stations de lectures. Dans la pratique, on fait une série de mesures en suivant un cheminement en boucle : la série débute habituellement en un point donné et se termine à ce même point. Le point de départ de la boucle est normalement relié à une station de base.



**Figure 27 :** Série de mesure suivant un cheminement en boucle

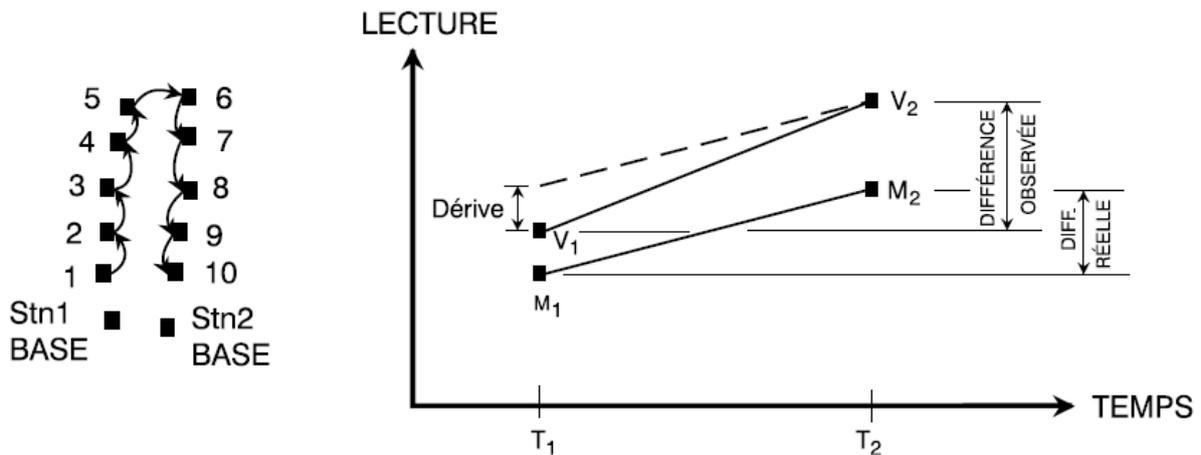
En général, les mesures du début et de la fin à la station de base ne sont pas semblables. Cette différence, appelée dérive, est due en partie au gravimètre, et en partie au marée lunaire. Les valeurs mesurées sont donc entravées d'erreurs puisqu'une de leurs composantes provient de la dérive et ne reflète pas un changement dans la valeur de  $g$  dû à des hétérogénéités du sous-sol. La correction est faite en supposant que la dérive est linéaire dans le temps. Donc, si on est passé à la station de base, aux temps  $t_1$  et  $t_2$  et que les valeurs mesurées étaient respectivement  $V_1$  et  $V_2$ , le taux de dérive TD est défini par :  $TD = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}$

Lorsque la dérive est positive, c'est que les mesures ont été surestimées, il faut donc les diminuer. La correction de dérive sera négative.

Inversement, dans le cas où la dérive est négative, les mesures sont sous-estimées et la correction devra être positive.

Ainsi, toute valeur  $V$  prise au temps  $t$  (où  $t_1 \leq t \leq t_2$ ) est corrigée par la formule suivante :  $V_{cor} = V_{lu} - \left[ \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \right] (t - t_1)$

Le principe demeure le même si au lieu de boucler sur la station de départ, la dernière mesure se fait sur une autre station de base. Evidemment, les stations initiales et finales doivent auparavant avoir été reliées entre elles.



**Figure 28 :** Série de mesure suivant un cheminement non bouclé

Si lors de l'établissement des 2 stations de bases on a trouvé des valeurs égales à ce que la différence entre les nouvelles valeurs observées  $V_1$  et  $V_2$  soit semblable à celle qui existe entre  $M_1$  et  $M_2$ , obtenus antérieurement à  $V_1$  et  $V_2$ . La dérive est égale à :

$$\text{Dérive} = \text{différence réelle} - \text{différence observée} = (M_2 - M_1) - (V_2 - V_1)$$

De la même manière qu'auparavant, la formule de correction est :

$$V_{cor} = V_{lu} + \frac{(M_2 - M_1) - (V_2 - V_1)}{t_2 - t_1} (t - t_1) + (M_1 - V_1)$$

Remarque : le terme supplémentaire à la fin de l'équation,  $M_1 - V_1$  a pour but de ramener les valeurs à un niveau de référence semblable pour chaque partie du levé.

D'où, la gravité absolue d'une station est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$g_a(A) = g_a(B) + K(V_A - V_B)$$

Avec :  $g_a(A)$  : gravité absolue d'une station A en *mGal*

$g_a(B)$  : gravité absolue de la station de base B en *mGal*

$K$  : coefficient d'étalonnage du gravimètre en *mGal/division*

$V_i$  : lecture corrigée à la station de mesure  $i$  en *division*

### **b. Correction de latitude**

Cette correction tient compte des variations de  $g$  avec la latitude dues à la rotation de la terre et à son aplatissement.

$$g_{th}(\varphi) = g_o(1 + 5,2789 \cdot 10^{-3} \sin^2 \varphi + 23,462 \cdot 10^{-6} \sin^4 \varphi)$$

Avec :  $g_o = 978030 \text{ mGals}$

où  $g_{th}(\varphi)$  en  $mGals$  est la valeur du champ au point de latitude géocentrique  $\varphi$ . La correction  $\Delta L$  pour un déplacement  $dl$  suivant un méridien est donc :

$$\Delta L = 0,081 \sin^2 \varphi \cdot dl \quad [\text{mGal}/100\text{m}]$$

Il faut additionner  $\Delta L$  pour un déplacement vers pôle et il faut le soustraire lorsqu'on se déplace vers l'équateur.

### **c. Correction d'altitude**

Les lectures d'un levé gravimétrique ne sont pas forcément prises au-dessus d'un terrain plat. Or plus on se rapproche du niveau de référence, plus  $g$  augmente. Les mesures obtenues présentent donc des variations qui ne sont dues qu'à la position de la station de mesure et non pas à des hétérogénéités du sous-sol. Il faut donc corriger les mesures.

$$\text{Puisque : } g_r = \frac{G \cdot m}{r^2}$$

avec  $r$  : le rayon de la terre au niveau de l'ellipsoïde de référence.

Si on se déplace d'une hauteur  $h$  par rapport à ce niveau de référence, alors :

$$g_h = \frac{G \cdot m}{(r+h)^2} = \frac{G \cdot m}{r^2(1+2\frac{h}{r}+\frac{h}{r})^2}$$

Puisque l'on a  $r \gg h$ , alors :  $g_h = g_r - 2h \cdot g_r / r$

$$\text{D'où } g_h - g_r = -\frac{2h \cdot g_r}{r} = \Delta h$$

En prenant  $r$  comme rayon moyen de la terre, la correction à faire est donnée par ( $h$  positif vers le haut) :  $\Delta h = 0,3086h \quad [\text{mGal}/\text{m}]$

avec  $h$  : élévation de la station de mesure en mètre

Donc  $\Delta h$  est positif si on est au-dessus du référentiel et négatif si on est en-dessous.  
Remarque : Pour une précision d'environ 0,01 mGal, il faut connaître à  $\pm 3 \text{ cm}$  la hauteur de la station par rapport au référentiel.

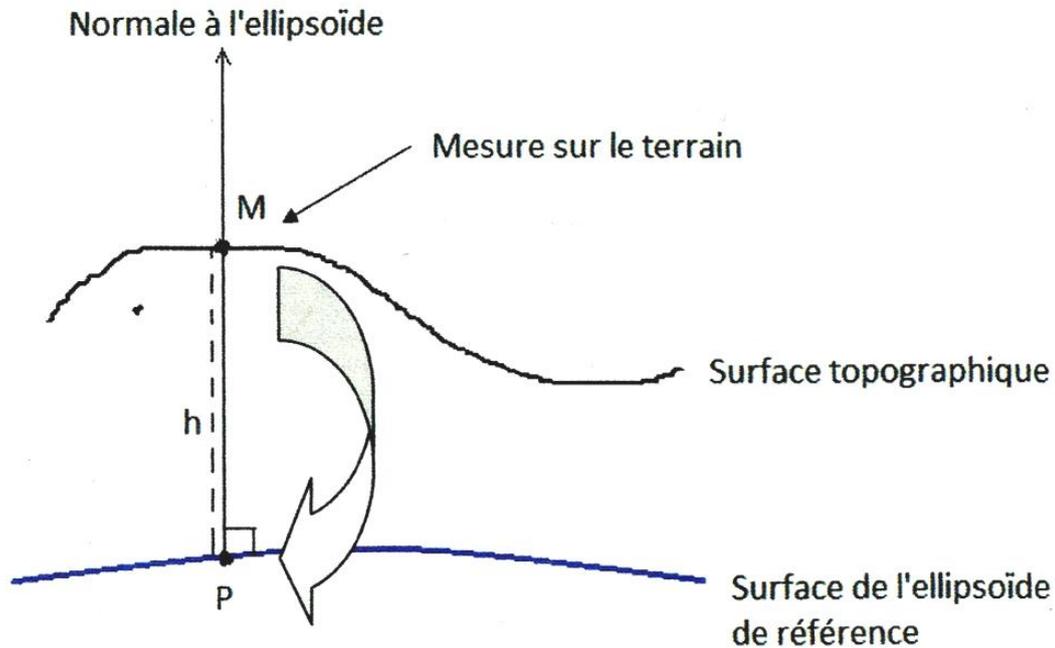


Figure 29 : Illustration de la correction d'altitude

#### d. Correction de plateau

La correction de plateau tient compte de la masse comprise entre le référentiel et la station de mesure. Pour une tranche de hauteur  $h$ , l'attraction est donnée par :

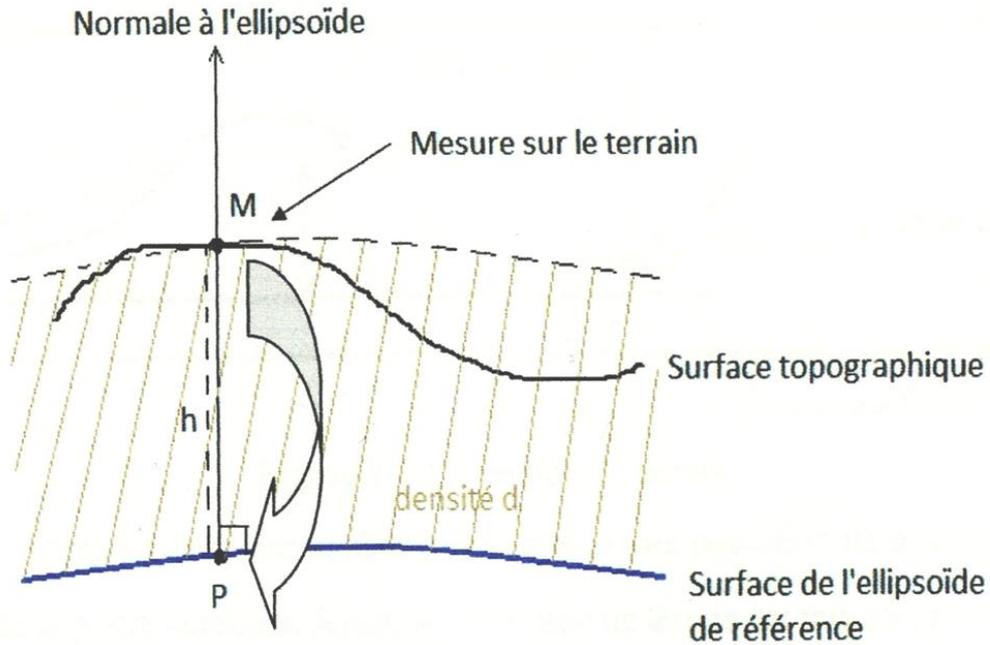
$$\Delta p = 2\pi Ghd$$

où  $G$  : constante universelle de la gravitation et  $d$  est la densité présumée de la croûte terrestre ( $d = 2,67 \text{ g/cm}^3$  en moyenne).

Comme  $\Delta p$  augmente lorsque  $h$  augmente, il faut soustraire  $\Delta p$  lorsque  $h > 0$  et donc :

$$\Delta p = -0,0419h \cdot d \quad [\text{mGal/m}]$$

Il faut connaître précisément l'élévation de l'appareil à chaque station ( $h = \pm 10 \text{ cm}$ ) si on veut une précision de  $\pm 0,01 \text{ mGal}$ .



**Figure 30 :** Illustration de la correction de plateau

Ainsi pour ramener la station M à sa projection P situé sur l'ellipsoïde, il faut enlever l'effet de cette masse situé entre la station et l'ellipsoïde. Cette correction est donc négative.

### IV.3.3. Anomalie à l'air libre

L'équation de l'anomalie à l'air libre est :

$$g_{FA} = g_{mes} - g_{th} + 0,3086h - 0,0419h \cdot d$$

Avec :  $g_{FA}$  : anomalie à l'air libre en  $mGal$

$g_{mes}$  : gravité mesuré en  $mGal$

$g_{th}$  : correction de latitude en  $mGal$

$h$  : élévation de la station de mesure

$d$  : densité présumé de la croûte terrestre ( $d = 2,67 \text{ g/cm}^3$  en moyenne)

#### IV.3.4. Anomalie de Bouguer

L'anomalie de Bouguer, notée  $\Delta_{gB}$ , est l'anomalie du champ gravitationnel mesurée plus ou moins la somme de toutes les corrections. Les anomalies de Bouguer sont représentatives des anomalies de densité dans le sous-sol.

$$\Delta_{gB} = \Delta_{gmesuré} \pm \sum \text{corrections}$$

Avec :  $\Delta_{gmesuré} = g_{mesuré} - g_{théorique}$

L'anomalie de Bouguer peut provenir de plusieurs niveaux :

- à grande profondeur, telle des variations du socle métamorphique ;
- à profondeur moyenne, telle une lentille de sel à l'intérieur d'une colonne sédimentaire ;
- à faible profondeur, telle les variations de l'épaisseur du mort-terrain.

#### IV.3.5. Traitement des données gravimétriques

L'anomalie de Bouguer peut provenir de plusieurs niveaux :

- grande profondeur : ex. : variations du socle métamorphique ;
- profondeur moyenne : ex. : lentille de sel à l'intérieur d'une colonne sédimentaire ;
- faible profondeur : variations de l'épaisseur du mort-terrain.

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



**Figure 31 :** Source d'anomalie de Bouguer

Une fois toutes les corrections appliquées, on obtient une carte de l'anomalie de Bouguer qui démontre en général deux caractéristiques (l'anomalie de Bouguer représente la somme de tous les corps sous la surface) :

1. Des variations du champ gravitationnel régulières et continues sur de grande distance appelées variations régionales. Elles sont produites par les hétérogénéités à grandes profondeurs. Composante qui varie lentement en  $(x, y)$ .

2. 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.

Selon le but du levé, il faut :

- Lisser et enlever les effets de surface pour ne retenir que les effets de profondeur (régionale).
- Lisser les effets de sources profondes et les soustraire pour obtenir les anomalies de surface (résiduelle).

Les anomalies dites résiduelles, sont surtout produites par des hétérogénéités situées dans la partie supérieure de l'écorce terrestre. Ce sont souvent le résultat de minéralisation ou de réservoirs. Afin de pouvoir observer ces anomalies, il est nécessaire de soustraire l'anomalie régionale de nos données. Pour séparer la régionale et la résiduelle, on peut soit :

- faire un lissage graphique sur le profil ;
- faire un lissage graphique sur les lignes de contours ;
- calculer la régionale analytiquement ou appliquer un filtre (généralement par ordinateur) ;
- calculer l'effet de la source à éliminer si sa géométrie et sa densité sont connues afin de le soustraire à l'anomalie de Bouguer (modélisation)

## **PARTIE 3- RESULTATS ET INTERPRETATION**

## Chapitre V: LIEN ENTRE GRAVIMETRIE ET MAGNETISME

### V.1. Relation de poisson entre les anomalies de gravité et de magnétisme

Un corps magnétique peut être considéré comme étant un assemblage de petits aimants et chacun de ces aimants, un dipôle.

De la même manière que la gravité  $\vec{g}$  est une force par unité de masse, on peut concevoir que l'intensité de la migration  $\vec{H}$  est une force par unité de pôle magnétique.

Pour un dipôle, cette force unitaire se décompose en 2 parties : une due à la force de répulsion du pôle positif et l'autre due à l'attraction du pôle négatif. Ces forces étant inversement proportionnelles à l'inverse du carré de la distance, la force magnétique peut être vue comme la somme vectorielle de 2 forces gravitationnelles : une positive, l'autre négative. Si tous les « aimants » d'un corps sont en lignes dans la même direction, Poisson a montré que l'anomalie magnétique peut être obtenue par différenciation de l'anomalie de gravité.

Donc plusieurs formules d'anomalies peuvent être obtenues grâce aux formules correspondantes en gravité : 
$$W = - \frac{I}{G\sigma} \frac{\partial U}{\partial j}$$

où  $U$  : le potentiel gravitationnel ;

$\sigma$  : le contraste de densité ;

$W$  : le potentiel magnétostatique ;

$I$  : l'aimantation  $\vec{I} = k\vec{H}$

$j$  : la direction de la polarisation.

Si  $s$  est la direction dans laquelle on veut calculer le champ magnétique, alors

$$\vec{H}_s = - \frac{\partial W}{\partial s}$$

Si on considère des modèles avec polarisation verticale alors:  $\vec{j} = \vec{z}$  et  $\vec{s} = \vec{z}$

D'où 
$$Z = \frac{I}{G\sigma} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$

#### V.1.1. Cas d'une sphère

Les paramètres gravimétriques de la sphère sont :  $U = \frac{G m}{r}$

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 \sigma$$

$$r = (x^2 + z^2)^{1/2}$$

Ainsi,  $\frac{\partial U}{\partial z} = -Gm \frac{z}{(x^2+z^2)^{3/2}}$  donc  $\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -Gm \left[ \frac{2z^2 - x^2}{(x^2+z^2)^{5/2}} \right]$

Par conséquent :  $Z = \frac{I}{G\sigma} \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{\sigma}{z^3} \left[ \frac{2 - \left(\frac{x}{z}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{x}{z}\right)^2\right]^{5/2}} \right]$

$$Z = \frac{I}{G\sigma} \frac{4}{3} \pi \frac{R^3 I}{z^3} \left[ \frac{2 - \left(\frac{x}{z}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{x}{z}\right)^2\right]^{5/2}} \right]$$

Z varie donc avec  $\frac{1}{z^3}$  alors qu'en gravité il varie avec  $\frac{1}{z^2}$

La gravité peut donc observer des phénomènes plus profonds.

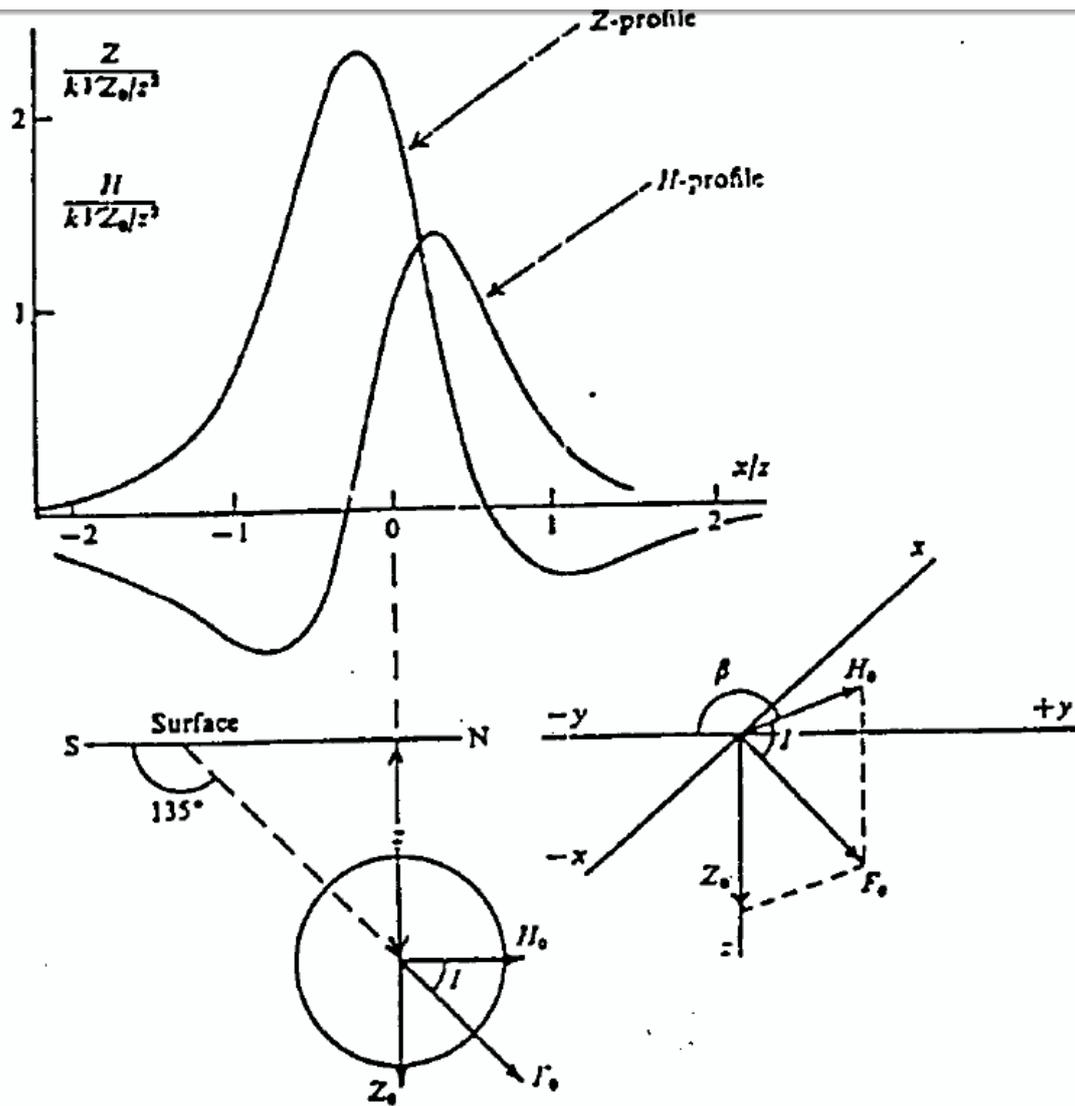


Figure 32 : Paramètres gravimétriques d'une sphère

V.1.2. Cas d'un cylindre horizontal

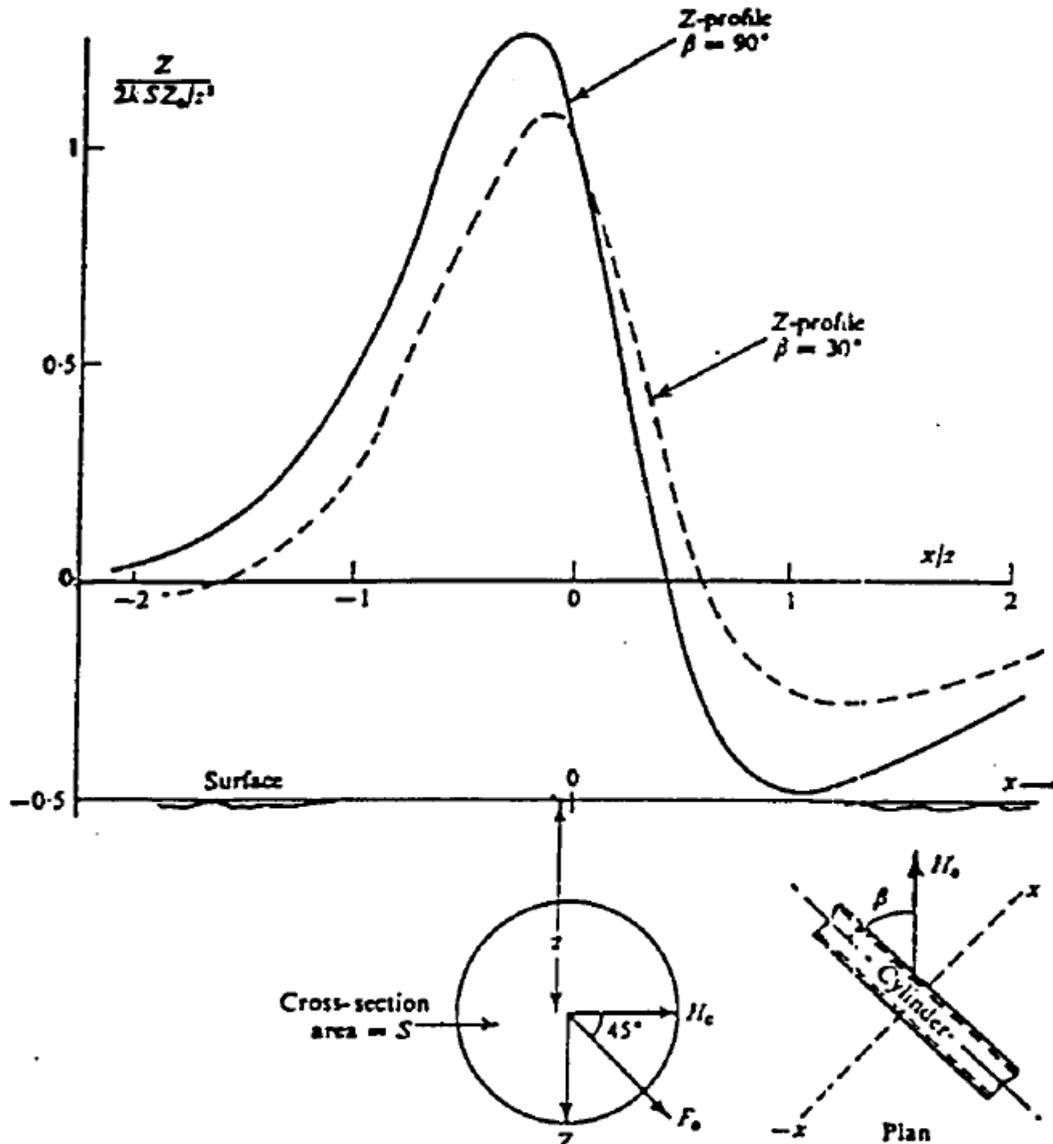


Figure 33 : Paramètres gravimétriques d'un cylindre horizontal

- Pour un cylindre infini : 
$$Z = \frac{2\pi R^2 k}{r^4} [2H_0 xz \sin\beta + Z_0(z^2 - x^2)]$$

Si  $F$  est vertical, alors : 
$$Z = \frac{2\pi R^2 k}{(x^2 + z^2)^2} F(z^2 - x^2)$$

$$Z = \frac{2\pi R^2 k}{z^2} \left[ \frac{1 - \frac{x^2}{z^2}}{\left(1 + \frac{x^2}{z^2}\right)^2} \right]$$

- Pour un cylindre de longueur fini ( $L=2Y$ ) :

$$Z = \frac{2\pi R^2 k Y}{r^4 (r^2 + Y^2)^{3/2}} [H_0 (3r^2 + 2Y^2) xz \sin\beta + Z_0 (Y^2 (z^2 - x^2) + r^2 (2x^2 - x^2))]$$

## **V.2. Méthode d'interprétation des données**

Le but de l'interprétation géophysique est d'essayer de fournir des modèles qui expriment l'idée que l'on se fait de la structure du sous-sol. Lors des interprétations, on se heurte au problème de la non unicité de la solution ; afin de réduire le champ d'investigation, les premières hypothèses sur les modèles découlent de l'analyse comparative des cartes géophysique et géologique. En absence d'indications sur les sources d'anomalies et pour tenir compte du non unicité des solutions, il est nécessaire de fixer des bornes sur les caractéristiques des sources et réduire ainsi l'indétermination. Pour le faire, les paramètres sont estimés à partir des méthodes d'approche ou méthodes indirectes. Les estimations déduites de ces méthodes sont reprises dans les techniques de calcul direct pour la modélisation finale des sources. Il existe plusieurs méthodes d'interprétation : les méthodes directes, et les méthodes indirectes.

### **V.2.1. Méthodes directes**

Les méthodes directes sont utilisées lorsqu'on a une connaissance de la géologie de la région d'étude et donc de la structure qui crée l'anomalie observée. Les paramètres physiques tels que densité et susceptibilité magnétique, et morphologiques permettent de construire un modèle et de calculer son effet. Cet effet est ensuite comparé avec l'anomalie observée. Le modèle de départ est basé sur des structures de forme simple telles que les sphères, les cylindres et les prismes. On distingue les modélisations 2D, 2.5D et 3D.

Pour des rapports allongement principal/extension transversale inférieur à cinq, la modélisation directe tient compte de la longueur limitée du corps, la modélisation est alors dite de type 2.5D.

La modélisation 2.5D consiste en la décomposition de la structure initialement préconçue en prismes de section polygonale et d'allongement fini. L'anomalie théorique est calculée en faisant varier les paramètres physiques de la structure perturbatrice, notamment sa forme, sa profondeur et sa densité. Le meilleur modèle est celui qui correspond à la structure dont l'anomalie calculée coïncide le mieux avec l'anomalie observée.

### **V.2.2. Méthodes indirectes**

Ces méthodes comportent un ensemble de techniques utiles pour la production des cartes de gradients du champ de pesanteur ou du champ magnétique, de prolongation du

champ et autres cartes transformées, et qui fournissent chacune une information sur les paramètres de la géométrie de la source. Parmi ces méthodes on peut citer le prolongement vers le haut, la dérivée verticale et la déconvolution d'Euler.

Comme le champ de la pesanteur on peut aussi utiliser le prolongement vers le haut pour le champ magnétique en particulier pour l'anomalie de l'intensité. Le prolongement vers le haut a pour effet d'atténuer les courtes longueurs d'onde et ainsi éliminer les effets des corps qui se trouvent près de la surface du sol.

## **Chapitre VI:      PRESENTATION DES DONNEES, MODELISATION ET INTERPRETATION**

### **VI.1. Présentation et nature des données**

Les données gravimétriques et magnétiques utilisées dans le cadre de cette étude ont été acquises au cours des campagnes de prospection réalisées par l'OMNIS dans l'année 2011. Les données gravimétriques et magnétiques, qui sont en coordonnées géographiques, avant d'être utilisées pour des traitements ultérieurs doivent être converties en coordonnées cartésiennes. La conversion des coordonnées géographiques en distances kilométriques se fait par projection UTM.

Les cartes utilisées pour l'interprétation qualitatives ont été obtenues par l'utilisation du logiciel de traitement de données GEOSOFT (Oasis Montaj). Ce dernier est un logiciel de cartographie et de traitement de données ultra performant qui répond aux besoins spécifiques de l'investigation et de l'exploration. Il permet d'importer, de visualiser, de traiter et de mettre en commun des ensembles de données, des grilles ou des images à l'intérieur d'un seul et même environnement.

#### **VI.1.1.      Acquisition des données**

Pour le levé gravimétrique, dans cette campagne, l'OMNIS a réalisé un levé gravimétrique terrestre totalisant 775 stations réparties sur le long de la RN6, les route Communale et même sur des chemins inaccessibles aux voitures avec un pas de mesure moyen de 100 mètres.

Les mesures ont été fait suivant un cheminement en boucle, c'est-à-dire, la série de mesure débute en un point et se termine en ce même point. Les mesures ont été faites autant que possible par programme de deux heures.

46 stations de bases secondaires ont été établies à partir de la station de Maromandia devant le pilier gauche de l'Eglise Catholique Romain (ECAR) dont la valeur fondamentale de la pesanteur  $g$  à 0,01 près est égale à 978347,93 mGal. Elles ont servi de liaison pour les levés gravimétriques des différentes stations. Les points de mesure ont été localises par GPS de haute résolution.

Les valeurs de  $g$  mesurées dans cette campagne se rapprochent des valeurs de  $g$  dans le système de POSTDAM du réseau ORSTOM qui avait réalisé des cartes gravimétriques de Madagascar et autres îles du Sud-Ouest de l'Océan Indien (Comores, Maurice, Réunion) en 1978. En effet, dans cette étude, on a des valeurs de  $g$  comprises entre  $978308,41 \text{ mGal}$  et  $978385,09 \text{ mGal}$  alors que dans le réseau ORSTOM, la valeur de  $g$  de la station d'Antsohihy aéroporté est  $978342,78 \text{ mGal}$  et celle de Nosy-Be est  $978383,23 \text{ mGal}$ . Les valeurs à ces stations du réseau ORSTOM ont été établies avec une précision de  $0,03 \text{ mGal}$ .

Pour le levé magnétique, cette campagne a permis d'implanter 3680 points de mesure. Le contexte topographique relativement difficile n'a pas permis d'établir une grille de mesure régulière. Ainsi, une grande partie des points a été implanté au Sud du village d'Ankaramibe et à l'Est longeant le pied de Manongarivo. Une partie des points sont quand même implantés dans le Nord.

### **VI.1.2. Logiciel de traitement des données : Oasis Montaj**

Oasis montaj de Geosoft est un logiciel de cartographie et de traitement de données ultra performant qui répond aux besoins spécifiques de l'investigation et de l'exploration des Sciences de la Terre. Il permet une analyse rapide, afin de contribuer à la résolution de problèmes au quotidien et de faciliter ainsi la prise de décision. Oasis montaj est utilisé par les géoscientifiques pour :

- Le traitement, l'analyse et le contrôle qualité de données provenant de prospections gravimétriques et magnétiques aéroportées, marines ou terrestres.
- La génération et l'évaluation de cibles en exploration minière.
- L'exploration de gisements potentiels pétroliers et gaziers.
- La détection de projectiles non explosés (UXO).
- La caractérisation géologique et hydrologique des sous-surfaces
- La caractérisation de sites environnementaux
- L'investigation sur sites archéologiques
- L'océanographie.

### **VI.1.3. Elaboration des cartes**

Les données gravimétriques et magnétiques, qui sont repérés en coordonnées géographiques, relevés sur le terrain, avant d'être utilisées pour des traitements ultérieurs

doivent être converties en coordonnées cartésiennes. La conversion des coordonnées géographiques en distances kilométriques se fait par projection UTM ou par projection Laborde. On a utilisé cette dernière dans notre cas.

VI.1.4. Interprétation qualitative des données gravimétriques

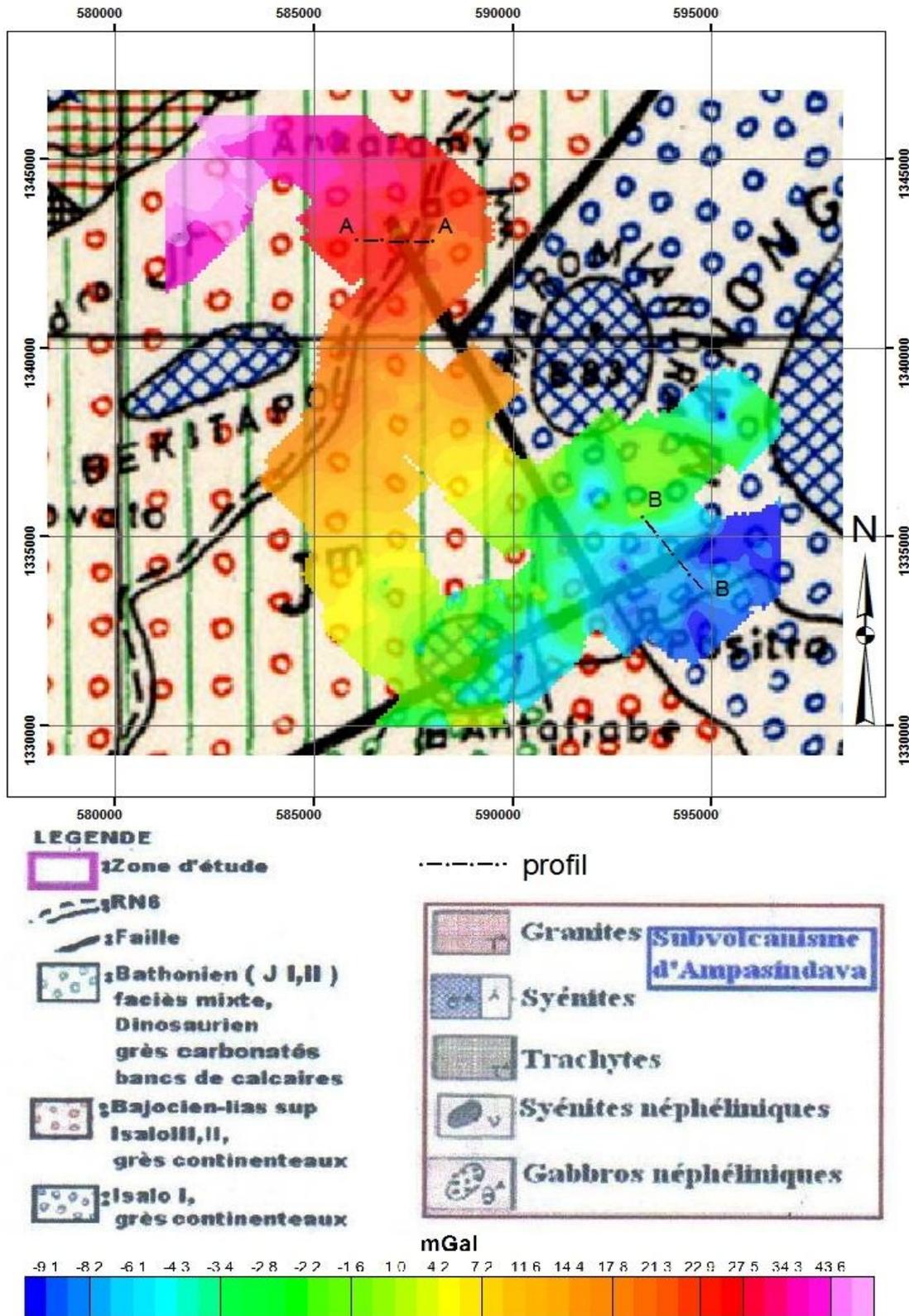


Figure 34 : Carte d'anomalie de Bouguer superposé sur une carte géologique

La carte d'anomalie de Bouguer montre des anomalies positives et des anomalies négatives de dimension et d'amplitude variables, avec des valeurs allant de -9,1 mGal dans la partie Sud-Est à 44,5 mGal dans la partie Nord-Ouest.

Dans l'ensemble de la carte, on constate une augmentation progressive des valeurs de l'anomalie de Bouguer depuis la partie Sud-Est vers la partie Nord-Ouest. Une très forte valeur de l'anomalie de Bouguer est montrée aux environs d'Ankaramy au point de coordonnées  $X=582$  km et  $Y=1345$  km en système Laborde. A l'opposé, ces valeurs sont plus négatives aux environs de Positra au point de coordonnées  $X=597$  km et  $Y=1335$  km.

La forte valeur de l'anomalie gravimétrique montre la présence de corps à forte densité tandis que la faible valeur de l'anomalie montre la présence de corps à faible densité.

VI.1.5. Interprétation qualitative des données magnétiques

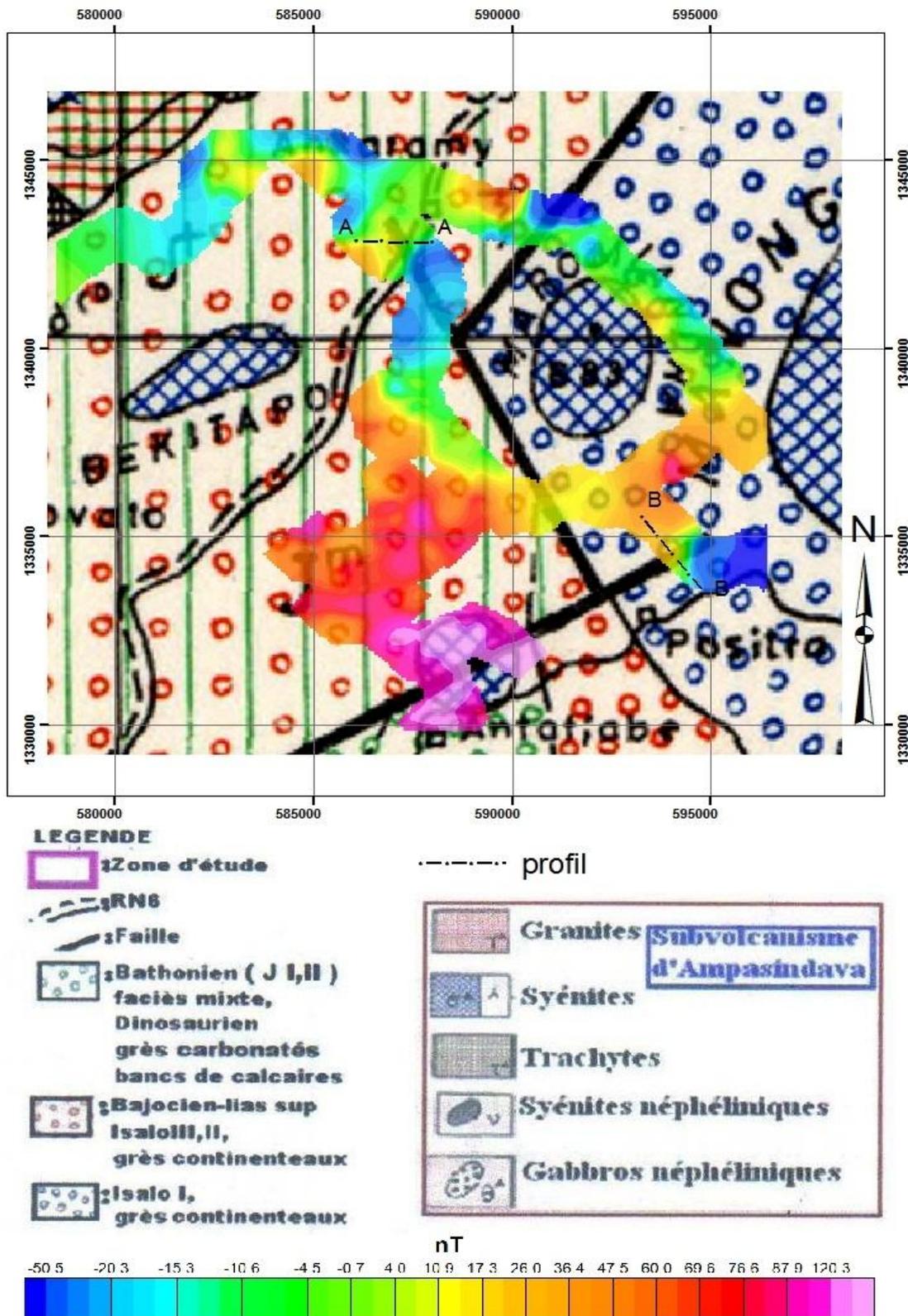


Figure 35 : Carte d'anomalie magnétique superposée sur une carte géologique

La carte d'anomalie magnétique montre que dans la partie Sud, autour d'Antafiabe, il y a des zones à fortes valeurs du champ magnétique. Par contre, toute la partie centrale et le Nord de la zone d'étude sont dominés par des valeurs relativement faibles du champ magnétique. Une bande à plus faible anomalie est aussi observée à Positra. C'est une zone qui devrait intéresser les pétroliers dans la mesure où cela pourrait représenter un piège stratigraphique. Les fortes valeurs sont causées par les roches intrusives à fortes susceptibilités magnétiques correspondant aux syénites dans lesquels le taux de magnétite est élevé. Les faibles valeurs pourraient aussi être liées à la bipolarité du champ magnétique.

## **VI.2. Modélisation et interprétation à partir de la corrélation des données**

Dans cette partie, on va essayer de faire une interprétation quantitative conjointe entre les données gravimétriques et magnétiques. Ce sont des modélisations de sous sol à deux dimension (2D) suivant les paramètres de densités et de susceptibilités magnétiques.

### **VI.2.1. Choix du profil**

Normalement l'interprétation est effectuée à partir des profils exécutés perpendiculairement à l'allongement principal d'une structure à étudier. Les profils choisis doivent déborder largement de la zone où la structure est supposée comme étant la source de l'anomalie pour tenir compte de l'effet des roches proches ou éloignées.

Nos profils ont été choisis de telle sorte qu'ils traversent des éléments structuraux (dans notre cas une faille) qui pourrait représenté comme un piège stratigraphique intéressant du point de vue de rechercher des gisements d'accumulation pétrolière.

### **VI.2.2. Technique de modélisation**

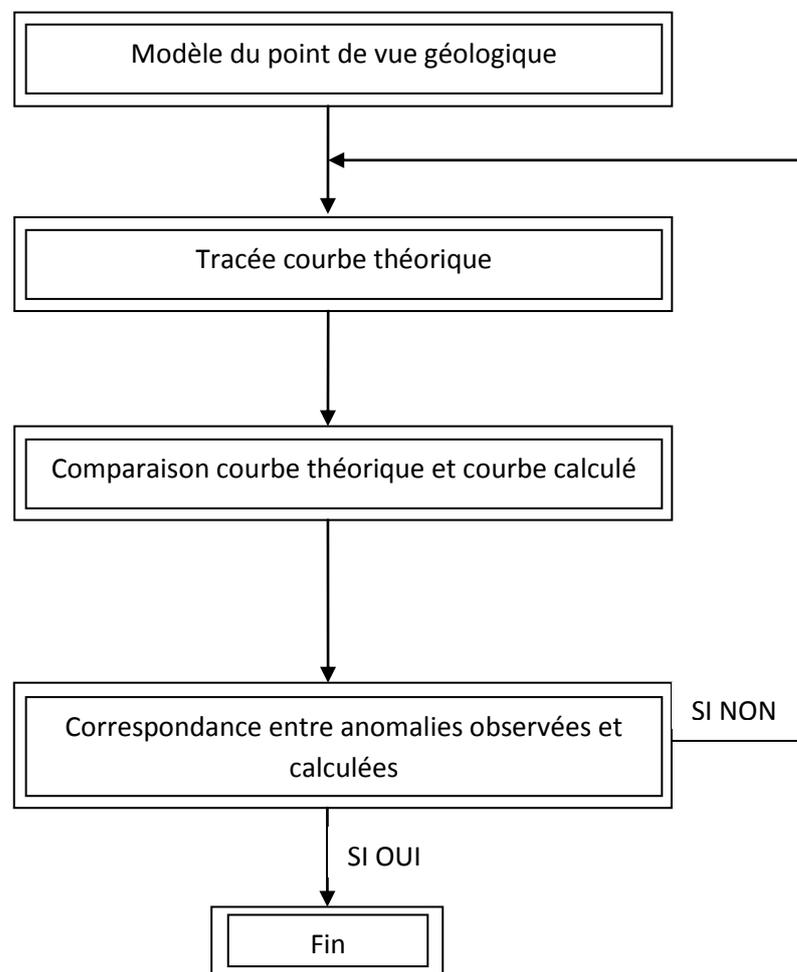
La modélisation du sous-sol est effectuée par le logiciel Geosoft version 6.4 grâce au programme de modélisation en 2D incorporé « GM-SYS 6.4 ».

La modélisation des profils gravimétriques et magnétiques se fait simultanément. Le calcul des anomalies tient compte les contrastes de densité et de susceptibilité magnétique des corps comprise entre 0 et 15 km de profondeur. Ils sont basés sur les structures et les formations géologiques rencontrés dans la zone d'étude.

Dans la pratique, l'interprétation s'effectue en quatre étapes :

- construction d'un modèle raisonnable du point de vue géologique,
- tracée de la courbe théorique des anomalies provoquée par ce modèle,
- comparaison entre la courbe expérimentale et la courbe calculée,
- modification du modèle pour améliorer la correspondance entre les anomalies observées et calculées et retour à l'étape 2.

Le processus est itératif et la bonne correspondance entre les anomalies observées et calculées est progressivement améliorée. L'organigramme ci-après nous résume les étapes à suivre pour l'interprétation.



**Figure 36 :** Organigramme d'interprétation des données en modèle 2D

### VI.2.3. Profil AA'

Le profil AA' est situé au Nord de la zone d'étude, Il est de direction Est- Ouest, de longueur d'environ 2km qui coupe une structure faillée (Figures 34 et 35). Le début du profil est localisé au point des coordonnées X=586 km et Y=1343 km et la fin au point des coordonnées X= 588 km et Y= 1343 km. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 37 ci-après.

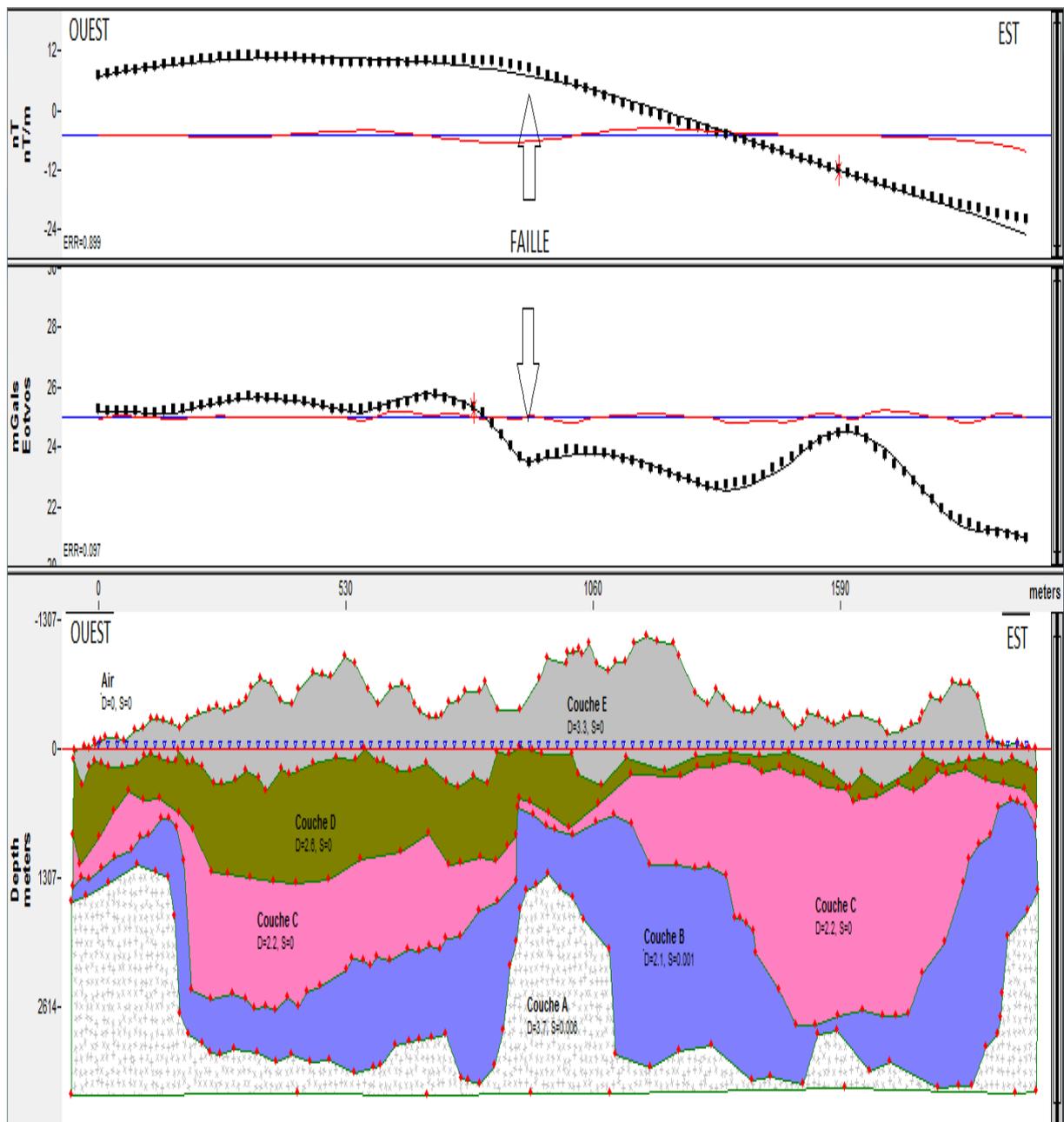


Figure 37 : Modélisation du profil AA'

L'allure des courbes, d'anomalie gravimétrique et magnétique, se diffère. La courbe d'anomalie magnétique est monotone légèrement croissante vers l'Ouest mais elle reste constante entre les point d'abscisse 800m et 1200m, et ensuite redescend jusqu'à la fin du profil. Par contre, la courbe d'anomalie gravimétrique a une forme plus ou moins ondulée.

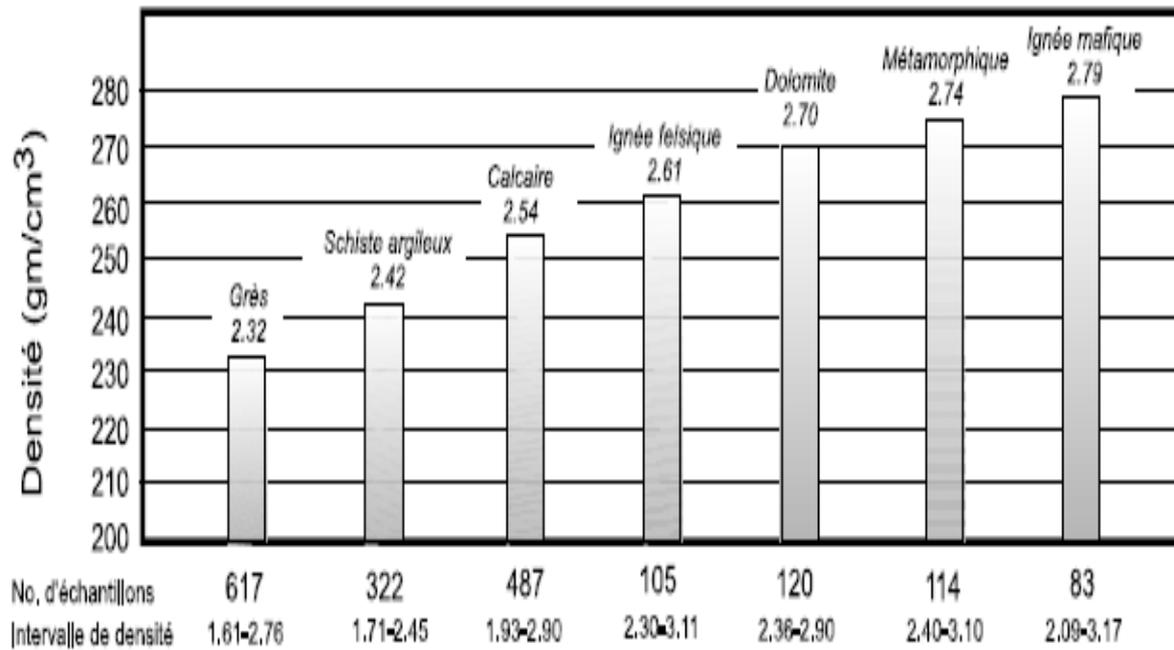
La valeur de l'anomalie gravimétrique est positive tout au long du profil, ce qui nous permet de dire qu'il y a une forte remonter la roche mère. La modélisation met en évidence cinq formations de densités et de susceptibilités différentes. L'erreur entre les valeurs calculées et celles observées est faible, ce qui rend le modèle fiable.

Dans la couche A, on remarque des chevauchements importants à l'Ouest, au centre et à l'Est. La couche A a une densité de 3,7 et une susceptibilité de 0,006 qui constitue le socle de la zone d'étude. Les susceptibilités des autres couches sont très faible, voir négligeable.

On note également la présence d'une faille dans les couches supérieures au niveau du chevauchement central et que les couches supérieures épousent l'allure et la forme du socle. Les couches B, C, D ont une densité comprise entre 2 et 2,7 qui sont caractéristiques des schistes argileux, calcaires et marnes. Ces dernières sont favorables à la génération du pétrole.

Dans la partie Est de ce profil, au niveau de l'effondrement du socle il y a un dépôt épais de couche C et B mais amincissement de la couche D. A l'opposé, l'épaisseur de ces couches est plus ou moins homogène. On note toujours un amincissement des couches supérieures sur les deux chevauchements des côtés du socle.

La couche supérieure est caractérisée par une densité 3,3 et qui constitue essentiellement la couche de gabbro observée en surface. Cette couche s'amincit sur les deux extrémités du profil et beaucoup plus épaisse au centre.



**Figure 38 :** Densité moyennes d'échantillons de surface et de carottes

**Tableau 9:** Masses volumiques de quelques roches et minéraux

| Roche/Minéral  | Masse volumique (kg m <sup>-3</sup> ) |
|--|---------------------------------------|
| Sédiments (la densité augmentant avec la profondeur) |                                       |
| non consolidés                                       | 1 400...2 300                         |
| grès   | 2 000...2 700                         |
| calcaire   | 2 500...2 800                         |
| schiste ardoisier argileux                           | 2 500...2 800                         |
| lignite  | 1 000...1 500                         |
| houille grasse                                       | 1 200...1 800                         |

#### VI.2.4. Profil BB'

Le profil BB' est situé au Sud Est de la zone d'étude, Il est de direction Nord Ouest - Sud Est, de longueur d'environ 2,4km qui coupe aussi une structure faillée (Figure 34 et 35). Le début du profil est localisé au point des coordonnées X= 593,5 km et Y= 1335,6 km et la fin

au point des coordonnées X= 594,6 km et Y=1333,8 km. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 39 ci-après.

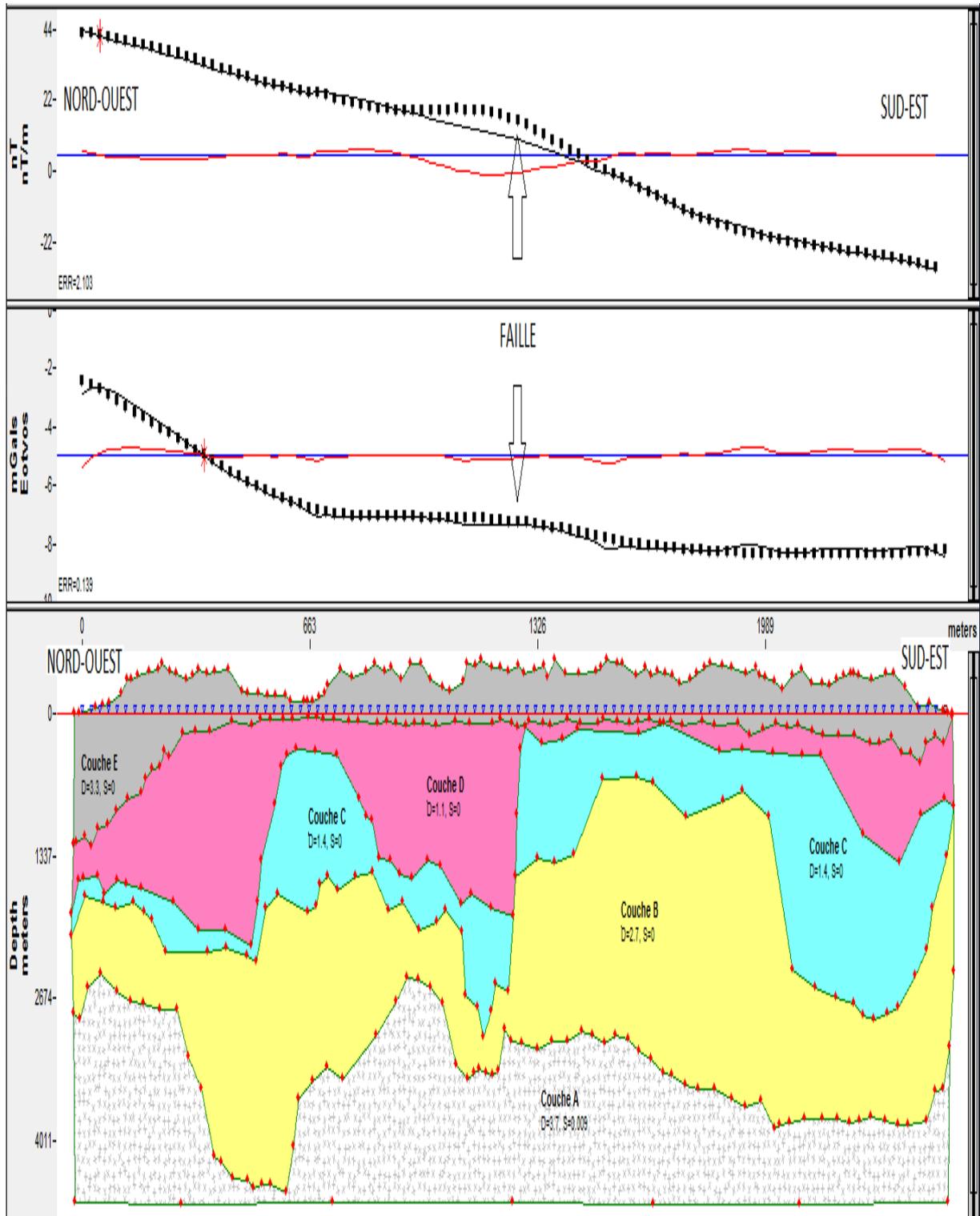


Figure 39 : Modélisation du profil BB'

L'allure des deux courbes, anomalie gravimétrique et anomalie magnétique, décroissent tout au long du profil de Nord Ouest vers Sud Est. La courbe d'anomalie gravimétrique se stabilise à partir de point d'abscisse 655m du début du profil, mais elle reste encore comme anomalie gravimétrique négative tout au long de ce profil, ce qui nous amène à dire que cette zone est favorable de trouver un piège à pétrole. Cette zone est la plus intéressante dans la recherche pétrolière car l'anomalie négative indique la présence des corps de densité légère, or le pétrole fait partie des matières légères.

La modélisation obtenue met en évidence une succession de cinq formations en termes de densités et de susceptibilités différentes. L'erreur entre les valeurs calculées et celles observées est très faible (inférieure à 10), ce qui indique la bonne qualité de notre modélisation, on peut déduire que le modèle obtenu est plus proche de la réalité.

La couche A est marquée par les valeurs de densité 3,7 et de susceptibilité de 0,009, elle marque le substratum rocheux (ou socle) de la zone d'étude, on remarque un effondrement important autour du point d'abscisse 650m du début du profil. La valeur de densité est la même que celui du profil AA' mais c'est la susceptibilité qui diffère, elle est légèrement magnétique. Les susceptibilités des autres couches sont très faible, voir négligeable.

La couche B remplit l'effondrement du socle (couche A), elle est donc très épaisse à cet endroit. Cette couche s'amincit au centre du profil, entre 800m et 1200m, elle marque la présence d'une faille qui est très visible pour les couches subjacentes. A partir de 1200m, il y a aussi un dépôt épais de la couche B qui s'amincit vers l'extrémité Sud est du profil. La densité de la couche B est de 2,7, elle est identifiée comme des formations calcaires.

La couche C, au dessus de la couche de calcaire, a une densité de 1,4. Elle pourrait être de la couche de houille grasse (Cf tableau 9). On voit bien dans cette couche la faille qui se situe au milieu du profil (au point d'abscisse 1200m). Dans la partie Nord ouest de la faille, cette couche de houille grasse forme un dôme, c'est un endroit favorable à l'accumulation. Par contre, dans la partie Sud est de la faille, cette formation est synclinale qui plonge vers le bord Sud Est du profil.

La couche D doit avoir une densité de 1,1, elle est définie comme une couche de lignite (Cf tableau 9). Dans la zone, Nord ouest de la faille, il y a un effondrement de la couche D aux deux extrémités et amincissement au milieu. Dans la zone Sud est de la faille, cette couche est

très aminci mais s'agrandit à la fin du profil. Cette couche épouse également l'allure de la couche inférieure.

La couche la plus supérieure est caractérisée par une valeur de densité 3,3, elle est définie comme une couche de gabbro. L'épaisseur de la couche est plus ou moins homogène, sauf au début Nord Ouest du profil qui est plus épaisse à cause de l'effondrement de la couche inférieure.

## **CONCLUSION**

Au terme de ce travail, cette étude nous a permis de modéliser la structure probable du sous-sol dans des zones jugées intéressantes. La méthode gravimétrique a permis de connaître les grandeurs géophysiques fondamentales qui sont les contrastes de densités et des variations du champ de pesanteur dus aux hétérogénéités du sous sol. Mais la connaissance de ces grandeurs dans la prospection pétrolière n'a pas suffi pour établir la structure du sous-sol, c'est pourquoi le recours à d'autres méthodes tel que la méthode magnétique a été nécessaire.

On a utilisé les logiciels Oasis Montaj de Géosoft et l'ArcGis de l'ESRI dans les traitements et les modélisations des données. Différentes cartes ont été établies mettant plus ou moins en exergue les zones intéressantes pour l'exploration pétrolière dans la zone d'étude. Deux modèles ont été présentés : l'un se trouve dans la partie Nord de la zone d'étude et l'autre dans la partie Sud-Est, traversant tous deux des éléments structuraux marquants comme les failles majeures. Au terme d'interprétation, ces deux zones pourraient susciter des intérêts pétroliers.

Enfin, au vue de ces résultats, on devra entamer pour plus de certitude et moins de risque une campagne sismique afin de localiser avec plus de précision les endroits exacts d'une campagne de reconnaissance de sondage. Toutefois, des campagnes de prospection sismique ont été déjà faits par la compagnie pétrolière EAX/CANDAX en 2008, mais la localisation et les résultats obtenus restent encore confidentiels. La partie Sud du bassin sédimentaire d'Ambilobe jusqu'à la région Sud de la Commune Rurale d'Ankaramibe fut concernée.

Nous suggérons de réaliser des profils sismiques sur les deux profils qu'on a interprétés conjointement entre les données d'anomalie magnétique et gravimétrique, ceci afin de confirmer l'endroit susceptible de constituer des pièges pétrolifères avant de faire des forages de reconnaissances.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] **Alliance R.M.**, 2010. Les intrusions annulaires Alcalines d'Ampasindava Analyse et interprétation des données Aéromagnétiques.
- [2] **ANDRIANJAKA F.H.T.**, 2009. Etude des intrusions de roches massives de la région Sofia par prospection gravimétrique
- [3] **ANDRIHARIZAFY R.**, 2011. Reconnaissance structurale par les méthodes gravimétrique et magnétiques de l'Ouest et du Nord- Ouest de Madagascar, Contribution à l'étude de potentialité en ressources pétrolières
- [4] **Bauer J.**, 1961. Géologie sédimentaire, Technip, Paris
- [5] **Besairie H.**, 1971. Géologie de Madagascar, Les terrains sédimentaires, Le bassin de Diego Suarez. Document du Bureau géologique de Madagascar, n° 117
- [6] **Bich F.**, 1942. Handbook of Physical Constants, Geological Society of America, Special Paper 36
- [7] **Blakely**, 1996. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications, Cambridge University Press, UK
- [8] **Catalogue des prospections géophysiques réalisées à Madagascar de 1945 à 1995**, chap8 p108
- [9] **Cazenave A.; Feigl K.**, 1994. Formes et mouvements de la Terre, satellites et géodésie, Belin, Paris
- [10] **CHOUTEAU M.**, 1999, Géophysique Appliquée I, Cours de Magnétisme, Ecole Polytechnique de Montréal. 112p.
- [11] **CHOUTEAU M.**, 2002. Géophysique appliquée I : Cours de Gravimétrie, Ecole Polytechnique de Montréal.108p
- [12] **COLLOT J. Y., MALAHOFF A.**, 1980. Anomalies gravimétriques et structure de la zone de subduction des Nouvelles-Hébrides. 66p.
- [13] **Fascicule de Département de Chimie Appliquée à la faculté des Sciences Appliquées à l'Université de Liège.** Formation de Pétrole
- [14] **Goguel J.**, 2010. Gravimétrie, Encyclopædia Universalis
- [15] **Hobson G.D.**, 1978. Development in Petroleum Geology, Applied Sci Londres
- [16] **Jorgensen**, 2004; Aydemir et Ates, 2008. Corps intrusifs, Encyclopædia Universalis
- [17] **La Flèche M.R.**, 2010. Rapport sur les levés gravimétriques et magnétométrique du lac Saint Jean, Ph.D.géo, 93p

- [18] **Nampionona A.**, 2008. Prospection des indices de Chromite de Bepilopilo à Ila Latitude d'Antsahalavakely par Méthodes magnétique et Electrique
- [19] **Perrodon A.** L'exploration pérolière, Encyclopædia Universalis
- [20] **PRAXEDE E**, 2011, Prospection Magnétique du Prospect Pétrolifère d'Ankaramibe, Mémoire de Maitrise, Fac des Sciences, Université d'Antananarivo, 56p
- [21] **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.
- [22] **RAKOTOARISOA A.A.V.**, 2005. Interprétation des données gravimétriques et magnétiques, Cas de modélisation en 2.5D de 4 petits gisements de chromite d'Andriamena, Mémoire de DEA, Fac des Sciences, Université d' Antananarivo, 85p
- [23] **RAKOTONDRAOMPIANA S.A.**, 2005. La Géodynamique de la Partie Centrale de Madagascar. Thèse de Doctorat d'Université, Université d'Antananarivo.193p
- [24] **RANDRIAMIARINA F.T**, 2011, Gravimétrie et Exploration Pétrolière autour de la Commune Ankaramibe, Mémoire de Maitrise, Fac des Sciences, Université d'Antananarivo, 58p
- [25] **RANDRIANASOLO A.**, 2004. Géodésie- Gravimétrie, DEUG
- [1] **Raune T.M.**, mars 1997. Les "ensembles morpho-pédologiques de Madagascar" modifié par Humbert et Cours- Darnes au Madagascar: les régions climatiques
- [26] **Rechenmann J.**, 1978. Cartes gravimétriques de Madagascar et autres îles du Sud Ouest de l'Océan Indien: Comores- Maurice\_ Réunion, Notice explicative N°79 ORSTOM
- [27] **ROBINSON Sylvia**, 1981. Digital foundations of time series analysis: vol.2, Wave aquation space-time processing, Holden Day Inc. CA, USA
- [28] **Smit J.; Stettler E.; Mostert R.** Les levés Magnétiques
- [29] **Smit J.; Stettler E.**, 2204. La méthode Magnétique Council for Geoscience, Afrique du Sud
- [30] **Smit J.; Stettler E.; Mostert R.** L'interprétation des données Magnétiques
- [31] **Vanié L.T.A.; Khattach D.; Houari M.R.**, 2005. Apport des filtrages des anomalies gravimétriques à l'étude des structures profondes du Maroc oriental

## **REFERENCES WEBOGRAPHIQUES**

- [32] [http://mailto:stars@mm.gouv.qc.ca](mailto:stars@mm.gouv.qc.ca); (consulté en juillet 2013)
- [33] <http://www.aviso.oceanobs.com> (consulté en juillet 2013)
- [34] <http://www.geomag.org/models/emag2.html> (consulté en juillet 2013)
- [35] <http://www.geosoft.com>, (consulté en juillet 2013)
- [36] <http://www.landcover.org> (consulté en juillet 2013)
- [37] <http://www.tuto.arcgis.com> (consulté en juillet 2013)
- [38] <http://www.tutorial.envi.com> (consulté en juillet 2013)
- [39] <http://www.omnis.mg> (consulté en juillet 2013)
- [40] <http://www.planetseed.com> (consulté en juillet 2013)
- [41] [stars@mm.gouv.qc.ca](mailto:stars@mm.gouv.qc.ca) (consulté en juillet 2013)
- [42] <http://www.sofia.gov.mg> (consulté en juillet 2013)
- [43] <http://bgi.omp.obs-mip.fr/index.php/fre/Donnees-Produits/> (consulté en juillet 2013)
- [44] <http://geomag.org/models/EMAG2/acknowledgments.html> consulté en juillet 2013)
- [45] <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook> (consulté en juillet 2013)
- [46] <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf> (consulté en octobre 2013)

## ***LISTE DES ANNEXES***

**ANNEXE 1 : Utilisations et finalités du pétrole**

**ANNEXE 2 : Extrait des données gravimétriques recueillis sur le terrain**

**ANNEXE 3 : Extrait des données magnétiques recueillis sur le terrain**

**ANNEXE 4 : Echelle stratigraphique internationale**

**ANNEXE 5 : Tableau de conversion des unités de mesure anglosaxonne**

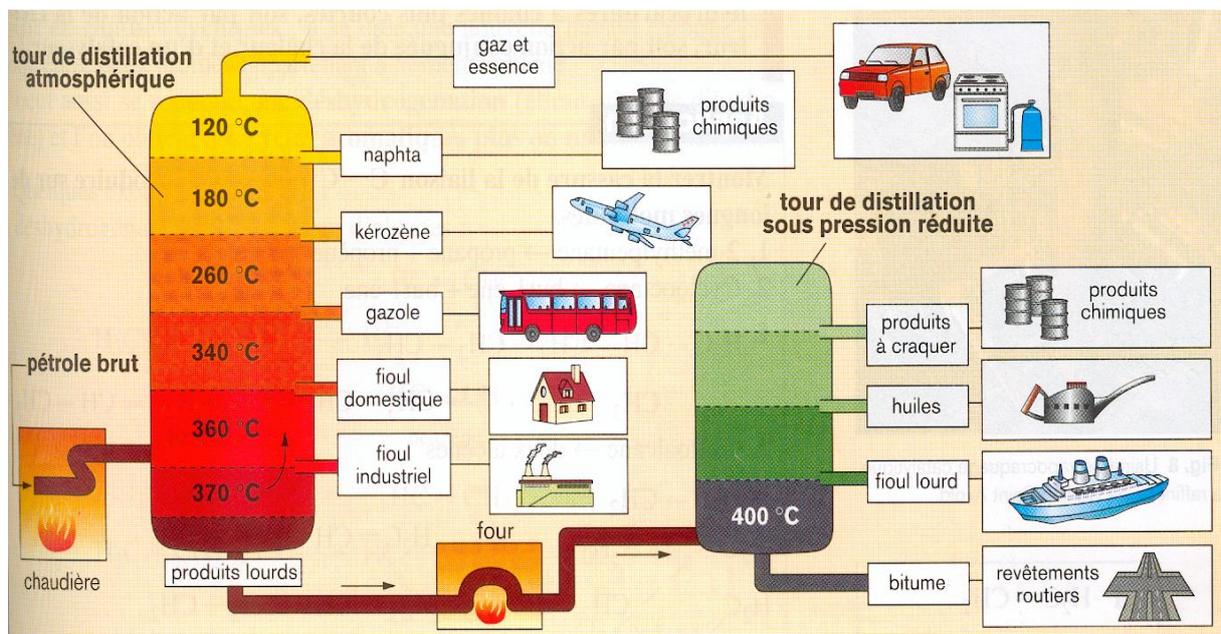
## ANNEXE 1. Utilisations et finalités du pétrole

Les dérivés pétroliers à vocation énergétique sont utilisés comme carburant :

- le fioul lourd, utilisé pour la propulsion de navires, et certaines centrales de production d'électricité ;
- le fioul domestique, utilisé par les tracteurs agricoles et la propulsion de navires, des groupes électrogènes ;
- l'essence, utilisée dans l'automobile et la petite navigation, et dans certains petits groupes électrogènes ;
- le gazole, utilisé dans l'automobile et le transport routier ;
- le kérosène, utilisé dans l'aviation pour les moteurs à réaction ;
- les gaz de pétrole liquéfiés (butane, propane), utilisés dans l'automobile.

Certains d'entre eux sont aussi utilisés comme combustibles dans des chaudières, des fours, ou pour la cuisson :

- le fioul domestique, pour le chauffage et la production d'eau chaude ;
- les gaz de pétrole liquéfiés (butane, propane), pour le chauffage, la production d'eau chaude et la cuisson ;
- et occasionnellement l'essence, dans certains réchauds.



## ANNEXE 2. EXTRAIT DES DONNEES GRAVIMETRIQUES RECEUILLIS SUR LE TERRAIN

| Date       |    | Numérotation,<br>Google | Z(m) | LAT         | LONG        | G-més         | Lecture | A-B        | Heure    |
|------------|----|-------------------------|------|-------------|-------------|---------------|---------|------------|----------|
| 07/10/2010 | 1  | B1G                     | 142  | -13,9805278 | 48,17877778 | 978346,993370 | 169,469 | 21,6405581 | 08:20:00 |
| 07/10/2010 | 2  | B1G                     | 142  | -13,9805278 | 48,17877778 | 978346,993370 | 169,549 | 21,6405581 | 09:49:00 |
| 07/10/2010 | 3  | B2G                     | 140  | -14,01835   | 48,15981667 | 978348,779489 | 171,036 | 21,4250649 | 10:03:00 |
| 07/10/2010 | 4  | B1G                     | 142  | -13,9805278 | 48,17877778 | 978346,993370 | 169,511 | 21,6405581 | 10:19:00 |
| 07/10/2010 | 5  | B2G                     | 140  | -14,01835   | 48,15981667 | 978348,779489 | 171,049 | 21,4250649 | 10:33:00 |
| 07/10/2010 | 6  | B3G                     | 141  | -14,0220667 | 48,16338333 | 978342,675430 | 165,868 | 15,3595539 | 11:10:00 |
| 07/10/2010 | 7  | B2G                     | 140  | -14,01835   | 48,15981667 | 978348,779489 | 171,000 | 21,4250649 | 11:20:00 |
| 07/10/2010 | 8  | B3G                     | 141  | -14,0220667 | 48,16338333 | 978342,675430 | 166,111 | 15,3595539 | 11:44:00 |
| 07/10/2010 | 9  | G1001                   | 150  | -14,0220333 | 48,16408333 | 978342,174772 | 165,652 | 16,6313395 | 12:01:00 |
| 07/10/2010 | 10 | G1002                   | 130  | -14,0228667 | 48,16505    | 978346,905256 | 169,565 | 17,3907319 | 12:34:00 |
| 07/10/2010 | 11 | G1003                   | 143  | -14,0232    | 48,16661    | 978343,391415 | 166,550 | 16,4208425 | 12:59:00 |
| 07/10/2010 | 12 | B3G                     | 141  | -14,0220667 | 48,16338333 | 978342,675430 | 165,868 | 15,3595539 | 13:35:00 |
| 07/10/2010 | 13 | G1004                   | 154  | -14,0221    | 48,1638     | 978342,978899 | 166,183 | 18,2197496 | 13:45:00 |
| 07/10/2010 | 14 | G1005                   | 160  | -14,0218667 | 48,16488333 | 978339,987571 | 163,746 | 16,4190387 | 13:59:00 |
| 07/10/2010 | 15 | G1006                   | 147  | -14,0213167 | 48,16591667 | 978342,173142 | 165,700 | 16,0698823 | 14:18:00 |
| 07/10/2010 | 16 | G1007                   | 147  | -14,0206333 | 48,16701667 | 978340,509596 | 164,346 | 14,4354296 | 14:26:00 |
| 07/10/2010 | 17 | G1008                   | 152  | -14,02015   | 48,16791667 | 978338,840036 | 162,981 | 13,7703495 | 14:33:00 |
| 07/10/2010 | 18 | G1009                   | 142  | -14,0208667 | 48,16956667 | 978340,823033 | 164,705 | 13,7550301 | 14:42:00 |
| 07/10/2010 | 19 | G1010                   | 151  | -14,0212833 | 48,17061667 | 978338,581486 | 162,959 | 13,2667671 | 15:06:00 |
| 07/10/2010 | 20 | B4G                     | 168  | -14,0222333 | 48,17183333 | 978334,935807 | 159,947 | 12,9259056 | 15:16:00 |
| 07/10/2010 | 21 | B3G                     | 141  | -14,0220667 | 48,16338333 | 978342,675430 | 166,586 | 15,3595539 | 15:36:00 |
| 09/10/2010 | 22 | B2G                     | 140  | -14,01835   | 48,15981667 | 978348,779489 | 170,677 | 21,4250649 | 08:30:00 |
| 09/10/2010 | 23 | G1011                   | 123  | -14,0200278 | 48,18580556 | 978348,160652 | 170,171 | 17,3895373 | 08:35:00 |
| 09/10/2010 | 24 | G1012                   | 134  | -14,0195278 | 48,16194444 | 978344,444851 | 167,059 | 15,8596068 | 08:41:00 |
| 09/10/2010 | 25 | G1013                   | 135  | -14,0206111 | 48,16238889 | 978344,815973 | 167,387 | 16,3813878 | 08:46:00 |
| 09/10/2010 | 26 | B3G                     | 141  | -14,0220667 | 48,16338333 | 978342,675430 | 165,615 | 15,3785189 | 08:51:00 |
| 09/10/2010 | 27 | B2G                     | 140  | -14,01835   | 48,15981667 | 978348,779489 | 170,766 | 21,4250649 | 08:59:00 |
| 09/10/2010 | 28 | B3G                     | 141  | -14,0220667 | 48,16338333 | 978342,675430 | 165,615 | 15,3595539 | 08:51:00 |
| 09/10/2010 | 29 | B4G                     | 168  | -14,0222333 | 48,17183333 | 978334,935807 | 159,386 | 12,9259056 | 09:10:00 |
| 09/10/2010 | 30 | G1014                   | 170  | -14,0233056 | 48,17238889 | 978333,739068 | 158,382 | 12,0770717 | 09:58:00 |
| 09/10/2010 | 31 | G1015                   | 158  | -14,0245556 | 48,17313889 | 978342,998231 | 166,183 | 18,9216401 | 10:04:00 |
| 09/10/2010 | 32 | G1016                   | 150  | -14,0253889 | 48,17422222 | 978337,878077 | 161,870 | 12,191753  | 10:10:00 |
| 09/10/2010 | 33 | G1017                   | 140  | -14,0264167 | 48,17452778 | 978340,041562 | 163,693 | 12,3436615 | 10:14:00 |
| 09/10/2010 | 34 | G1018                   | 123  | -14,0274722 | 48,17530556 | 978343,294505 | 166,434 | 12,2063793 | 10:20:00 |
| 09/10/2010 | 35 | G1019                   | 114  | -14,0285278 | 48,17655556 | 978344,369303 | 167,340 | 11,4651921 | 10:26:00 |
| 09/10/2010 | 36 | G1020                   | 118  | -14,0298611 | 48,17663889 | 978342,815000 | 166,031 | 10,6412127 | 10:31:00 |
| 09/10/2010 | 37 | G1021                   | 110  | -14,0301667 | 48,178      | 978344,182216 | 167,183 | 10,4211686 | 10:33:00 |
| 09/10/2010 | 38 | G1022                   | 115  | -14,0306944 | 48,17852778 | 978342,450739 | 165,725 | 9,65110843 | 10:41:00 |

|            |    |       |     |             |             |               |         |            |          |
|------------|----|-------|-----|-------------|-------------|---------------|---------|------------|----------|
| 09/10/2010 | 39 | G1023 | 109 | -14,0315278 | 48,179      | 978343,462834 | 166,578 | 9,44701785 | 10:45:00 |
| 09/10/2010 | 40 | G1024 | 128 | -14,0327778 | 48,18052778 | 978338,559025 | 162,447 | 8,22877799 | 10:48:00 |
| 09/10/2010 | 41 | G1025 | 139 | -14,0338611 | 48,18075    | 978335,420848 | 159,804 | 7,20902473 | 10:57:00 |
| 09/10/2010 | 42 | G1026 | 144 | -14,0352222 | 48,18080556 | 978333,320733 | 158,035 | 6,03481015 | 11:00:00 |
| 09/10/2010 | 43 | G1027 | 129 | -14,0340278 | 48,18180556 | 978337,396267 | 161,469 | 7,20953802 | 11:06:00 |
| 09/10/2010 | 44 | B5G   | 116 | -14,0378611 | 48,18330556 | 978339,668852 | 163,384 | 6,7606114  | 11:11:00 |
| 09/10/2010 | 45 | B4G   | 168 | -14,0222333 | 48,17183333 | 978334,935807 | 159,398 | 12,9259056 | 11:27:00 |
| 09/10/2010 | 46 | G1028 | 163 | -14,0237222 | 48,17186111 | 978335,000185 | 159,439 | 11,9429828 | 11:46:00 |
| 09/10/2010 | 47 | G1029 | 166 | -14,0240833 | 48,17080556 | 978334,918349 | 159,361 | 12,4361101 | 11:59:00 |
| 09/10/2010 | 48 | G1030 | 160 | -14,0243611 | 48,16997222 | 978336,949879 | 161,069 | 13,2751291 | 12:04:00 |
| 09/10/2010 | 49 | G1031 | 151 | -14,0251389 | 48,16922222 | 978339,237655 | 162,988 | 13,7587586 | 12:16:00 |
| 09/10/2010 | 50 | G1032 | 158 | -14,0261389 | 48,16838889 | 978337,495819 | 161,515 | 13,3517968 | 12:24:00 |
| 09/10/2010 | 51 | B7G   | 138 | -14,0254722 | 48,16783333 | 978342,493516 | 165,717 | 14,4422784 | 12:36:00 |
| 09/10/2010 | 52 | B4G   | 168 | -14,0222333 | 48,17183333 | 978334,935807 | 159,336 | 12,9259056 | 12:56:00 |
| 09/10/2010 | 53 | B3G   | 141 | -14,0220667 | 48,16338333 | 978342,675430 | 165,558 | 16,3415635 | 13:43:00 |
| 09/10/2010 | 54 | G1033 | 144 | -14,0225833 | 48,16358333 | 978343,083445 | 165,903 | 16,3359113 | 13:48:00 |
| 09/10/2010 | 55 | G1034 | 125 | -14,02325   | 48,16352778 | 978347,044439 | 169,242 | 16,5296903 | 13:56:00 |
| 09/10/2010 | 56 | G1035 | 124 | -14,0235833 | 48,164      | 978346,802866 | 169,040 | 16,0771424 | 14:02:00 |
| 09/10/2010 | 57 | G1036 | 138 | -14,0244167 | 48,16380556 | 978342,946578 | 165,793 | 14,940293  | 14:09:00 |
| 09/10/2010 | 58 | G1037 | 134 | -14,0249722 | 48,16441667 | 978343,344798 | 166,130 | 14,5277322 | 14:15:00 |
| 09/10/2010 | 59 | G1038 | 131 | -14,0255556 | 48,16497222 | 978343,732047 | 166,457 | 14,2997976 | 14:18:00 |
| 09/10/2010 | 60 | G1039 | 119 | -14,0259167 | 48,16438889 | 978346,195347 | 168,534 | 14,3863533 | 14:25:00 |
| 09/10/2010 | 61 | G1040 | 131 | -14,0431111 | 48,1645     | 978343,233469 | 166,040 | 13,0531271 | 14:30:00 |
| 09/10/2010 | 62 | G1041 | 140 | -14,0268889 | 48,16483333 | 978340,925329 | 164,097 | 13,2073163 | 14:36:00 |

## ANNEXE 3. EXTRAIT DES DONNEES MAGNETIQUES RECEUILLIS SUR LE TERRAIN

|    | Elévation (m) | Nom station | LAT         | LONG       | Anomalie   |
|----|---------------|-------------|-------------|------------|------------|
| 0  | 142           | A1          | -14,0220333 | 48,1634    | 34477,5    |
| 1  | 143           | A2          | -14,0221833 | 48,16385   | 34328,5    |
| 2  | 141           | A3          | -14,0222667 | 48,1642833 | 34361,5    |
| 3  | 135           | A4          | -14,02235   | 48,1647333 | 34375,5    |
| 4  | 137           | A5          | -14,02225   | 48,1651833 | 34347,1667 |
| 5  | 139           | A6          | -14,0221833 | 48,16565   | 34344,1667 |
| 6  | 127           | A7          | -14,02205   | 48,1661    | 34351,5    |
| 7  | 124           | A8          | -14,0220167 | 48,16655   | 34348,5    |
| 8  | 126           | A9          | -14,0219167 | 48,16705   | 34359,1667 |
| 9  | 133           | A10         | -14,0217833 | 48,1679667 | 34358,1667 |
| 10 | 138           | A11         | -14,0217833 | 48,1681833 | 34345,5    |
| 11 | 144           | A12         | -14,0217167 | 48,1684    | 34338,6667 |
| 12 | 150           | A13         | -14,0216333 | 48,1688667 | 34346,8333 |
| 13 | 140           | A14         | -14,0215333 | 48,1693333 | 34352,8333 |
| 14 | 137           | A15         | -14,0214667 | 48,1697667 | 34346,6667 |
| 15 | 146           | A16         | -14,0214    | 48,1702    | 34353,8333 |
| 16 | 152           | A17         | -14,0212833 | 48,1707    | 34365,8333 |
| 17 | 138           | A18         | -14,0212167 | 48,1710833 | 34355,5    |
| 18 | 134           | A19         | -14,0211167 | 48,1716167 | 34360,5    |
| 19 | 139           | A20         | -14,0210167 | 48,1720833 | 34368,1667 |
| 20 | 138           | A21         | -14,021     | 48,1723    | 34370,8333 |
| 21 | 138           | A22         | -14,0212    | 48,17235   | 34387,5    |
| 22 | 146           | A23         | -14,0215    | 48,1719333 | 34377,3333 |
| 23 | 147           | A24         | -14,0216    | 48,17145   | 34373,8333 |
| 24 | 155           | A25         | -14,0217167 | 48,1710167 | 34357,1667 |
| 25 | 153           | A26         | -14,0218333 | 48,1705667 | 34371,8333 |
| 26 | 141           | A27         | -14,0219    | 48,1701167 | 34385,5    |
| 27 | 141           | A28         | -14,022     | 48,1696167 | 34360,1667 |
| 28 | 153           | A29         | -14,0220667 | 48,1691667 | 34359      |
| 29 | 152           | A30         | -14,0221167 | 48,1687167 | 34365,5    |
| 30 | 142           | A31         | -14,0222333 | 48,1682667 | 34361,8333 |
| 31 | 131           | A32         | -14,0223    | 48,16785   | 34377      |
| 32 | 139           | A33         | -14,0225    | 48,1669333 | 34385,1667 |
| 33 | 138           | A34         | -14,0226    | 48,1664667 | 34397,5    |
| 34 | 128           | A35         | -14,0227167 | 48,1660167 | 34394,3333 |
| 35 | 128           | A36         | -14,0228    | 48,1655333 | 34409,3333 |
| 36 | 127           | A37         | -14,0228333 | 48,1651167 | 34407,1667 |
| 37 | 132           | A38         | -14,0229    | 48,1645833 | 34400,9167 |
| 38 | 134           | A39         | -14,0230167 | 48,1641167 | 34419,3333 |
| 39 | 134           | A40         | -14,0230667 | 48,1636833 | 34365,8333 |

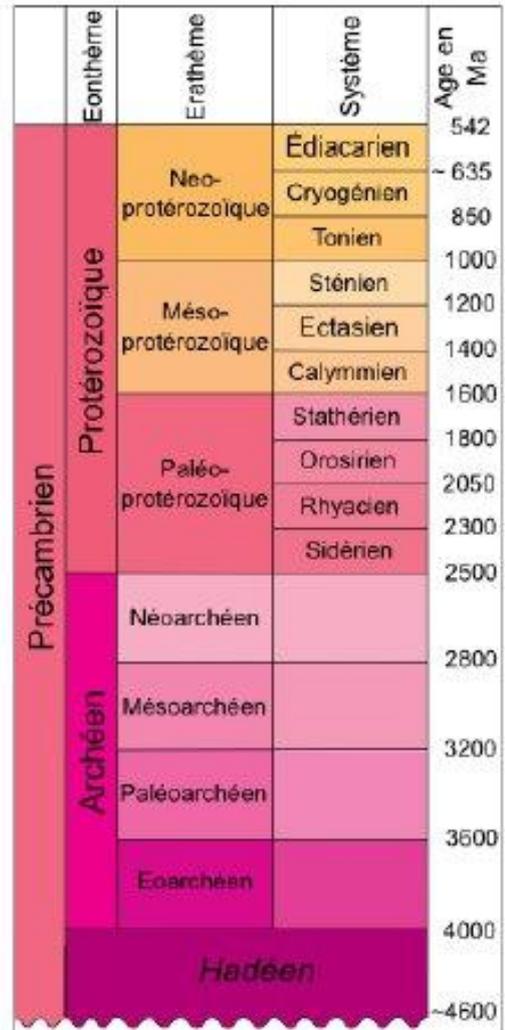
|    |     |     |             |            |            |
|----|-----|-----|-------------|------------|------------|
| 40 | 135 | A41 | -14,0234667 | 48,1633    | 34396,9873 |
| 41 | 132 | A42 | -14,0235    | 48,1637333 | 34402,9873 |
| 42 | 131 | A43 | -14,0234    | 48,1642333 | 34394,3206 |
| 43 | 132 | A44 | -14,0232833 | 48,16465   | 34401,3206 |
| 44 | 139 | A45 | -14,0232    | 48,16515   | 34415,3206 |
| 45 | 134 | A46 | -14,0231333 | 48,1656    | 34397,3206 |
| 46 | 142 | A47 | -14,02305   | 48,1660667 | 34403,654  |
| 47 | 148 | A48 | -14,0229667 | 48,1665667 | 34411,9873 |
| 48 | 148 | A49 | -14,0229    | 48,16705   | 34401,9873 |
| 49 | 141 | A50 | -14,0228333 | 48,1674833 | 34403,654  |
| 50 | 135 | A51 | -14,02275   | 48,1679333 | 34384,654  |
| 51 | 142 | A52 | -14,0226333 | 48,1684167 | 34388,3206 |
| 52 | 141 | A53 | -14,0225667 | 48,1688667 | 34395,654  |
| 53 | 143 | A54 | -14,0224833 | 48,16925   | 34408,654  |
| 54 | 135 | A55 | -14,0224    | 48,1697167 | 34378,654  |
| 55 | 145 | A56 | -14,0224    | 48,1702333 | 34389,3206 |
| 56 | 159 | A57 | -14,0222833 | 48,1706833 | 34403,9873 |
| 57 | 159 | A58 | -14,0221833 | 48,1711333 | 34403,3206 |

## ANNEXE 4. ECHELLE STRATIGRAPHIQUE INTERNATIONALE

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

| Eonthème      | Erathème      | Système     | Série        | Etage         | Age en Ma     |             |            |             |
|---------------|---------------|-------------|--------------|---------------|---------------|-------------|------------|-------------|
| Phanérozoïque | Mésozoïque    | Jurassique  | Supérieur    | Tithonien     | 145,5 ± 4,0   |             |            |             |
|               |               |             |              | Kimméridgien  | 150,8 ± 4,0   |             |            |             |
|               |               |             |              | Oxfordien     | ~ 155,6       |             |            |             |
|               |               |             | Moyen        | Callovien     | 161,2 ± 4,0   |             |            |             |
|               |               |             |              | Bathonien     | 164,7 ± 4,0   |             |            |             |
|               |               |             |              | Bajocien      | 167,7 ± 3,5   |             |            |             |
|               |               |             |              | Aalénien      | 171,6 ± 3,0   |             |            |             |
|               |               |             | Inférieur    | Toarcien      | 175,6 ± 2,0   |             |            |             |
|               |               |             |              | Pliensbachien | 183,0 ± 1,5   |             |            |             |
|               |               |             |              | Sinemurien    | 189,6 ± 1,5   |             |            |             |
|               |               | Hettangien  |              | 196,5 ± 1,0   |               |             |            |             |
|               |               | Rhétien     |              | 199,6 ± 0,6   |               |             |            |             |
|               |               | Norien      |              | 203,6 ± 1,5   |               |             |            |             |
|               |               | Trias       | Supérieur    | Carnien       | 216,5 ± 2,0   |             |            |             |
|               |               |             |              | Ladinien      | ~ 228,7       |             |            |             |
|               |               |             |              | Anisien       | 237,0 ± 2,0   |             |            |             |
|               |               |             | Moyen        | Olenekien     | ~ 245,9       |             |            |             |
|               |               |             |              | Indusien      | ~ 249,5       |             |            |             |
|               |               | Paléozoïque | Permien      | Lopingien     | Changhsingien | 251,0 ± 0,4 |            |             |
|               |               |             |              |               | Wuchiapingien | 253,8 ± 0,7 |            |             |
|               | Capitanien    |             |              |               | 260,4 ± 0,7   |             |            |             |
|               | Guadaloupien  |             |              | Wordien       | 265,8 ± 0,7   |             |            |             |
|               |               |             |              | Roadien       | 266,0 ± 0,7   |             |            |             |
|               | Cisuralien    |             |              | Kungurien     | 270,0 ± 0,7   |             |            |             |
|               |               |             |              | Artinskien    | 275,6 ± 0,7   |             |            |             |
|               |               |             |              | Sakmarien     | 284,4 ± 0,7   |             |            |             |
|               |               |             |              | Assélien      | 294,6 ± 0,8   |             |            |             |
|               |               |             |              | Assélien      | 299,0 ± 0,8   |             |            |             |
|               |               |             |              | Gzhélien      | 303,4 ± 0,9   |             |            |             |
|               |               |             |              | Carbonifère   | Pennsylvanien | Supérieur   | Kasimovien | 307,2 ± 1,0 |
|               |               |             |              |               |               | Moyen       | Moscovien  | 311,7 ± 1,1 |
|               | Inférieur     | Bashkirien  | 318,1 ± 1,3  |               |               |             |            |             |
|               | Mississippien | Supérieur   | Serpukhovien | 328,3 ± 1,6   |               |             |            |             |
| Viséen        |               |             | 345,3 ± 2,1  |               |               |             |            |             |
| Tournaisien   |               |             | 359,2 ± 2,5  |               |               |             |            |             |

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



\* 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 5. TABLEAU DE CONVERSION DES UNITES DE MESURE ANGLOSAXONNE

| GRANDEUR | UNITES DE MESURE |             |                         | EQUIVALENT<br>METRIQUE |
|----------|------------------|-------------|-------------------------|------------------------|
|          | DENOMINATION     | ABREVIATION | TRADUCTION<br>FRANCAISE |                        |
| LONGUEUR | Inch             | In (")      | Pouce                   | 0,0254 m               |
|          | Foot             | Ft (')      | Pied                    | 0,3040 m               |
|          | Yard             | Yd          | Yard                    | 0,914 m                |
|          | Statute mile     | Mile        | Mile terrestre          | 1,609 km               |
|          | Nautical mile    | mile        | Mile marin              | 1,853 km               |
| SURFACE  | Square inch      | Sq.in       | Pouce carré             | 6,452 cm <sup>2</sup>  |
|          | Square foot      | Sq.ft       | Pied carré              | 929 cm <sup>2</sup>    |
|          | Acre             | Acre        | Acre                    | 4 047 m <sup>2</sup>   |
|          | Square mile      | Sq.mile     | Mile carrée             | 2,589 m <sup>2</sup>   |
| VOLUME   | Cubic inch       | Cu.in       | Pouce cube              | 16,39 cm <sup>3</sup>  |
|          | Cubic foot       | Cu.ft       | Pied cube               | 0,028 m <sup>3</sup>   |
|          | Barrel           | Bbl         | Baril                   | 158,98 dm <sup>3</sup> |
|          | US gallon        | US gal      | Gallon américain        | 3,785 dm <sup>3</sup>  |
|          | Imper. Gallon    | Imp gal     | Gallon anglais          | 4,54 dm <sup>3</sup>   |
| POIDS    | Pound            | Lb          | Livre                   | 0,454 kg               |
|          | Short ton        | Sh.ton      | Tonne américaine        | 0,907 T                |
|          | Long ton         | Lg.ton      | Tonne anglaise          | 1,106 T                |

|             |                  |       |                    |                           |
|-------------|------------------|-------|--------------------|---------------------------|
| DENSITE     | Pound per gal    | ppg   | Livre/ gallon      | 0,1198 kg/l               |
|             | Pound per cu. Ft | pcf   | Livre/ pouce cube  | 0,0160 kg/l               |
| PRESSION    | Pound per sq.in  | psi   | Livre/ pouce carré | 0,0703 kg/cm <sup>2</sup> |
| PUISSANCE   | Horse power      | hp    |                    | 0,013 CV                  |
| TEMPERATURE | ° Fahrenheit     | °F    | ° Fahrenheit       | (9/5) (° + 32)            |
|             | ° Centigrade     | °C    | ° Celsius          | (5/9) (°F - 32)           |
| TRAVAIL     | Pound.ft         | Lb.ft | Livre.pied         | 0,1382 kg.m               |

En unités américaines :

- La signification du point placé entre chiffre est la virgule métrique
- Les fractions décimales d'une longueur sont souvent données sous forme des parties de 2, 4, 8, 16, 32, 64, etc.

Ainsi : 3 ¼ in signifie 3,75 pouce, tandis que 12 7/8 ft signifie 12,875 pied. Pour les autres grandeurs, on préfère les décimales courantes.

# ***TABLE DES MATIERES***

**REMERCIEMENTS**

**SOMMAIRE**

**LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**INTRODUCTION**

**PARTIE 1- CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE 1**

**CHAPITRE I : GENERALITES SUR L'EXPLORATION PETROLIERE 2**

**I.1. Notion sur le pétrole 3**

I.1.1. Définition 3

I.1.2. Histoire de l'utilisation du pétrole 4

I.1.3. Origine organique du pétrole 8

I.1.4. Maturation du kérogène en pétrole 9

I.1.5. Formation des gisements de pétrole 10

I.1.6. Différents « pièges à pétrole » 12

I.1.7. Différentes sortes de pétroles 14

I.1.8. Classification des hydrocarbures liquides 16

I.1.9. Enjeux par rapport à l'énergie 19

I.1.10. Acteurs majeurs 20

I.1.11. Unités de mesure et chiffres clés 21

I.1.12. Zone de présence ou d'application 21

**I.2. Activités d'exploration 23**

I.2.1. Blocs pétroliers 24

I.2.2. Contrat pétrolier 26

I.2.3. Etude gravimétrique 28

I.2.4. Etude aéromagnétique 31

I.2.5. Acquisition sismique 33

**CHAPITRE II :CONTEXTE GENERALE SUR LA ZONE D'ETUDE ET LES TRAVAUX ANTERIEURS 36**

**II.1. Présentation de la zone à étudier 36**

II.1.1. Etude géographique 36

II.1.2. Etude socio-économique 40

|  |           |
|--|-----------|
| <b>II.2. Cadre géologique</b>                                | <b>41</b> |
| II.2.1. Karoo malagasy et la zone d'étude                    | 43        |
| II.2.2. Post-Karoo dans le bassin d'Antsiranana              | 47        |
| II.2.3. Pétrographie   | 48        |
| <b>II.3. Travaux antérieurs</b>                              | <b>49</b> |
| <br>   |           |
| <b>PARTIE 2- BASES METHODOLOGIQUES</b>                       | <b>52</b> |
| <br>   |           |
| <b>CHAPITRE III : RAPPEL SUR LA PROSPECTION MAGNETIQUE</b>   | <b>53</b> |
| <br>   |           |
| <b>III.1. Principe de base</b>                               | <b>53</b> |
| III.1.1. Susceptibilité magnétique                           | 53        |
| III.1.2. Origine du champ magnétique mesuré en un point      | 54        |
| III.1.3. Composantes du champ magnétique terrestre           | 55        |
| III.1.4. Valeur théorique du champ magnétique terrestre      | 57        |
| <br>   |           |
| <b>III.2. Données magnétiques</b>                            | <b>57</b> |
| III.2.1. Levé magnétique                                     | 57        |
| III.2.2. Instrumentation                                     | 58        |
| <br>   |           |
| <b>III.3. Traitement des données magnétiques</b>             | <b>62</b> |
| III.3.1. Réduction des observations                          | 62        |
| III.3.2. Détermination du champ principal                    | 63        |
| III.3.3. Anomalie magnétique                                 | 63        |
| III.3.4. Réduction au pôle                                   | 63        |
| <br>   |           |
| <b>CHAPITRE IV : RAPPEL SUR LA PROSPECTION GRAVIMETRIQUE</b> | <b>64</b> |
| <br>   |           |
| <b>IV.1. Principe de base</b>                                | <b>64</b> |
| IV.1.1. Lois de Newton                                       | 64        |
| IV.1.2. Référence pour la terre                              | 65        |
| <br>   |           |
| <b>IV.2. Données gravimétriques</b>                          | <b>68</b> |
| IV.2.1. Instrumentation                                      | 68        |
| IV.2.2. Levé gravimétrique                                   | 71        |
| IV.2.3. Méthode de compensation                              | 72        |
| <br>   |           |
| <b>IV.3. Anomalie gravimétrique</b>                          | <b>74</b> |
| IV.3.1. Origine des anomalies gravimétriques                 | 74        |
| IV.3.2. Correction des données gravimétriques                | 74        |
| IV.3.3. Anomalie à l'air libre                               | 79        |
| IV.3.4. Anomalie de Bouguer                                  | 80        |

|  |           |
|--|-----------|
| IV.3.5. Traitement des données gravimétriques                                      | 80        |
| <b>PARTIE 3- RESULTATS ET INTERPRETATION</b>                                       | <b>82</b> |
| <b>CHAPITRE V : LIEN ENTRE GRAVIMETRIE ET MAGNETISME</b>                           | <b>83</b> |
| <b>V.1. Relation de poisson entre les anomalies de gravité et de magnétisme</b>    | <b>83</b> |
| V.1.1. Cas d'une sphère  | 83        |
| V.1.2. Cas d'un cylindre horizontal  | 86        |
| <b>V.2. Méthode d'interprétation des données</b>                                   | <b>87</b> |
| V.2.1. Méthodes directes   | 87        |
| V.2.2. Méthodes indirectes   | 87        |
| <b>CHAPITRE VI : PRESENTATION DES DONNEES, MODELISATION ET INTERPRETATION</b>      | <b>89</b> |
| <b>VI.1. Présentation et nature des données</b>                                    | <b>89</b> |
| VI.1.1. Acquisition des données  | 89        |
| VI.1.2. Logiciel de traitement des données : Oasis Montaj                          | 90        |
| VI.1.3. Elaboration des cartes   | 90        |
| VI.1.4. Interprétation qualitatives des données gravimétriques                     | 92        |
| VI.1.5. Interprétation qualitative des données magnétiques                         | 94        |
| <b>VI.2. Modélisation et interprétation à partir de la corrélation des données</b> | <b>95</b> |
| VI.2.1. Choix du profil  | 95        |
| VI.2.2. Technique de modélisation  | 95        |
| VI.2.3. Profil AA'   | 97        |
| VI.2.4. Profil BB'   | 99        |
| <b>CONCLUSION</b>  |           |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>   |           |
| <b>REFERENCES WEBOGRAPHIQUES</b>   |           |
| <b>ANNEXES</b>   |           |
| <b>TABLE DES MATIERES</b>  |           |

**Titre : « EXPLORATION PETROLIERE ET INTERPRETATION CONJOINTE DES DONNEES  
GRAVIMETRIQUES ET MAGNETIQUES DANS LA COMMUNE D'ANKARAMIBE »**

Nombre de pages : 103

Nombre de figures : 39

Nombre de tableau : 08

Nombre des annexes : 05

**RESUME**

La partie Sud du bassin sédimentaire d'Ambilobe à la latitude de la Commune d'Ankaramibe a fait l'objet d'une campagne de prospection gravimétrique et magnétique par l'OMNIS. Ainsi, 775 stations ont été implanté pour la prospection gravimétrique et 3680 stations pour celle du magnétique.

Le traitement des données a permis d'établir plusieurs cartes gravimétriques et magnétiques et ainsi d'en faire les modélisations des zones jugées intéressantes. Certes, l'analyse montre l'existence des pièges possibles dans la zone d'étude mais une prospection sismique est nécessaire pour supprimer le risque des erreurs

**Mots clés :** pétrole, exploration, Ankaramibe, Anomalie gravimétrique, Anomalie magnétique

**ABSTRACT**

The southern part of the sedimentary basin of Ambilobe to the latitude of the Ankaramibe Commune was the subject of gravimetric and magnetic prospecting campaign by OMNIS. So, 775 stations were established for the gravimetric and 3680 stations for magnetic.

The data processing made it possible several gravimetric and magnetic map and to extract model of the interesting zone. Certainly, the analysis shows the existence of possible oil traps in this zone but seismic prospecting is needed to delay the error risk

**Key words :** crude oil, petroleum exploration, Ankaramibe, gravimetric anomaly, magnetic anomaly

**Rapporteur:**

RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier  
Enseignant chercheur à l'ESPA

**Impétrant:**

RADIMBY Tendry Joasy  
Tél : 032 68 484 69