

SOMMAIRE

Remerciements

Liste des acronymes / Abréviations

Symboles et Unités

Liste des figures

Introduction

I. Généralités

- I.1 Définition de la géophysique appliquée
- I.2 Rappel des objectifs
- I.3 Notion de gisement
- I.4 Notion de cible et d'encaissant
- I.5 Problématiques

II. Axes de recherche abordés

- II.1 Historique des activités de recherche
- II.2 Domaines d'application des recherches
- II.3 Développement méthodologique

III. Perspectives de recherche

Conclusion

Références bibliographiques

Annexe

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude au directeur de ce mémoire, Monsieur RATSIMBAZAFY Jean Bruno, Professeur Titulaire Emérite, au sein du Domaine Sciences et Technologie de l'Université d'Antananarivo pour sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion tout au long de ma carrière d'Enseignant-Chercheur.

J'adresse ici mes profondes reconnaissances à Monsieur RAHERIMANDIMBY Marson, Professeur Titulaire, responsable du Domaine Sciences et Technologie et à l'équipe d'accueil de l'Ecole Doctorale Physique et Applications (EDPA), de l'Université d'Antananarivo, qui m'ont donné l'autorisation et ont accepté la présentation de ce présent mémoire de synthèse.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur RABOANARY Roland, Professeur Titulaire de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, d'avoir accepté de siéger parmi les membres du Jury en tant que Président du Jury malgré ses nombreuses responsabilités. Je suis honoré de sa présence.

Je tiens à remercier également les membres de Jury de ce travail, en particulier les rapporteurs,

- Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien Noel, Professeur Titulaire de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, rapporteur interne, qui a apporté son point de vue sur la qualité du document de synthèse et aussi donné son avis sur ma capacité à diriger l'équipe de recherche.
- Monsieur RASOLOMANANA Eddy Harilala, Professeur Titulaire, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Polytechnique de l'Université d'Antananarivo, rapporteur externe, malgré leurs multiples occupations, qui a accepté d'apporter son observation sur les deux documents, Synthèse des travaux de recherches et Curriculum Vitae.

Je remercie également les examinateurs de ce travail.

- Madame RAMANANTSIZEHENA Georgette, Professeur Titulaire de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, malgré ses lourdes tâches, elle a accepté de siéger comme membre de Jury pour apporter son observation à l'amélioration de ce présent mémoire.
- Monsieur RAKOTONIAINA Solofoarisoa, Professeur au sein de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo et Directeur de l'Institut et Observatoire Géophysique d'Antananarivo, IOGA, qui a accepté d'examiner ce travail. Je lui suis très reconnaissant.

Un grand merci à l'équipe de la SGDM, tous les chercheurs et personnels de l'IOGA pour les conseils et les soutiens que vous m'avez apporté lors de la réalisation des travaux de terrain et aussi les travaux de mises en forme du document final, ils ont grandement facilité mon travail. Je cite particulièrement ici, Zo, Riva, Ralay, Fara et Onja.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à ma famille pour leur confiance et leur soutien indéfectible.

Ko an'i Domohina,

Ny Antsa, Kalaina ary Herilala

Misaotra betsaka anareo

Liste des acronymes/abréviations

1D	Une dimension
2D	Deux Dimensions
3D	Trois Dimensions
AEP	Alimentation en Eau Potable
AEPA	Approvisionnement en Eau Potable et Assainissement
CORUS	Coopération pour la Recherche Universitaire et Scientifique
DEA	Diplômes d'Études Approfondies
EM	Electromagnétique
ERT	Electrical Resistivity Tomography
FAD	Fonds Africain de Développement
GEOFCAN	approche GÉOphysique et structurale de l'organisation spatiale et du Fonctionnement des Couvertures pédologiques Anthropisées et Naturelles
GéoPol	Géophysique appliquée à la caractérisation de zones polluées
HFR	High frequency
ICTP	International Centre for Theoretical Physics
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
IOGA	Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo
IP	Induced Polarization
ITE	Imagerie par Tomographie Electrique
Ji Ra Ma	Ji ro sy RA no MA lagasy
LFR	Low FRequency
LGA	Laboratoire de Géophysique Appliquée
MAG	Magnétique
MASW	Multi Analysis of Surface Waves
MISEI	Master d'Ingénierie en Système Electronique et Informatique
PAEAR	Programme d'Alimentation en Eau potable et Assainissement en milieu Rural
PAEPAR	Programme d'Adduction en Eau Potable et Assainissement dans le milieu Rural
PapMad	Papeterie de Madagascar
PGRM	Projet de gouvernance des ressources minières
PK	Point Kilométrique
PS	Polarisation Spontanée
PP	Polarisation Provoquée

RMS	Root Mean Square
RN13	Route Nationale numéro 13
SGDM	Société Géosciences pour le Développement de Madagascar
SIG	Système d'Information Géographique
SP	Self-Potential
UA	Université d'Antananarivo
UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund
UPMC	Université Pierre Marie Curie

Symboles et Unités

E_H	Potentiel redox
Ω	Ohm
π	Pi = 3.14159
Th	Thorium
U	Uranium
A	Ampère
kg	Kilogramme
m	Mètre
Pa	Pascal
s	seconde

Liste des figures

Figure 1: Image du sous-sol vue par le géophysicien	4
Figure 2: Utilisation de la géophysique par domaine	9
Figure 3: Zones d'intervention d'utilisation de la géophysique appliquée	10
Figure 4: Géologie régionale du Bassin de Beloha (source : Rakoto et al 2003).....	12
Figure 5: Modèle de densité suivant le profil de mesure (source : Rakoto et al, 2003).....	13
Figure 6: Relation entre conductivité électrique et morphologie du socle (source, Rakoto et al, 2003)	14
Figure 7: Localisation des profils géophysiques	17
Figure 8: Coupe géoélectrique du profil PE3	17
Figure 9: Logigramme du traitement.....	19
Figure 10: Géologie régionale de la zone d'étude (source : feuille P47, L. Laplaine 1963).....	19
Figure 11: Photo-interprétation de la zone de Dorodosy	20
Figure 12: Interprétation combinée de la géophysique, de la lithologie et de la morphotectonique	21
Figure 13: Déploiement de la géophysique	23
Figure 14: Démarche classique de l'estimation volumétrique d'une réserve	24
Figure 15: Illustration de l'étape de calcul volumétrique de la réserve	25
Figure 16: (a) - Télédétection, (b) – Photo-interprétation, (c) – Observation géologique, (d) – Gîtologie	26
Figure 17: Coupes géophysiques de résistivité électrique et de vitesse de propagation des ondes Vs et Vp.	27
Figure 18: Synoptique de l'étude structurale utilisant les données géophysiques	30
Figure 19: Les coupes de module d'incompressibilité pour l'étude d'un barrage	33
Figure 20: Localisation de la zone d'étude et état des lieux après le passage du cyclone Gafilo ..	35
Figure 21: La sensibilité pour les dispositifs les plus courants (modifié par Dahlin et al, 2004) ..	36
Figure 22: Les coupes géoélectriques	37
Figure 22: Représentation d'un dipôle magnétique	39
Figure 24: Géologie régionale et carte de champ magnétique	42
Figure 25: Cartographie magnétique et prospection électrique pour localisation des filons magmatiques	43
Figure 26: Utilisation combinée de PS et de coupe géoélectrique	44

Figure 27: Schéma d'une géobatterie associée à une lentille de graphite traversant un gradient de potentiel rédox (Sato et Mooney (1960) et Stoll et al. (1995), modifié).....	45
Figure 28: Représentation des blocs et des données de mesure de résistivité apparente	47
Figure 29: Mesure de la chargeabilité partielle à partir de la courbe de décroissance.....	49
Figure 30: Coupes géoélectriques de résistivité et de chargeabilité électriques	52

INTRODUCTION

La *Géophysique*, ou Physique de la Terre a pour but d'étudier les propriétés physiques du globe terrestre. Pour cela, le géophysicien se repère dans l'espace et le temps. Les trois mots clés qu'il a toujours à l'esprit sont la dynamique, la structure et les échelles. Généralement, on sépare la *Physique du Globe* de la *Géophysique Appliquée* pour des raisons d'échelle, mais on distingue aussi ces deux dernières de la *Géodynamique* qui s'attache plutôt à l'étude du fonctionnement dans le temps et dans l'espace des systèmes complexes qui interviennent dans la vie de notre planète (Dubois J. et al., 2011).

La géophysique applique les moyens de la physique à l'étude de la structure des terrains. Elle se pratique à partir de la surface du sol (géophysique de surface), dans un forage au moyen d'une sonde portant les instruments de mesure (diagraphies) ou entre forages, forage et surface, forage et galerie (géophysique de forage).

La géophysique fut pour la première fois utilisée par les deux frères Conrad et Marcel Schlumberger en 1919, à Pelcherborn, en Alsace. Ils ont eu l'idée de mesurer les propriétés électriques d'un terrain afin de mieux le caractériser, et qui donnèrent ainsi naissance à la géophysique.

Elle s'est développée ensuite en considérant d'autres propriétés physiques comme la conductivité électrique, la vitesse de propagation des ondes, la susceptibilité magnétique, la densité, la radioactivité,...etc. Plusieurs méthodes de prospection géophysique ont ainsi vu le jour. Il est à noter que chaque méthode est liée à une propriété physique et elle peut être appliquée dans plusieurs domaines de recherche en Sciences de la Terre.

L'exploration géophysique fait appel à l'étude de la variation des propriétés physiques des sols dans l'espace, mais aussi dans le temps (Dubois et al, 2011) :

- à l'échelle du kilomètre (recherche pétrolière et gazière, recherche minière, géothermie),
- à l'échelle du centimètre à la centaine de mètres (génie civil, hydrogéologie, géologie, prévention des risques, archéologie).

Je me suis particulièrement intéressé à l'étude du sol et du sous-sol à moins de 300m de profondeur, autrement dit à la géophysique de subsurface.

La géophysique fait partie actuellement des outils indispensables dans le cadre de

l'évaluation et de l'estimation de gisement caché dans le sous-sol, en particulier les eaux souterraines et les mines. Dans ce contexte, ce mémoire développe ce qu'est « **la contribution de la géophysique à la reconnaissance du sous-sol et à l'évaluation de ses ressources** ».

Les travaux de synthèse présentés ci-après entrent dans le cadre de l'utilisation des méthodes géophysiques. Mais l'application d'une méthode et d'une technique géophysiques nécessitent la connaissance au préalable du site de mesure et surtout de la structure cible de l'étude.

Ce mémoire s'articulera autour de trois principaux chapitres:

- le premier décrit les généralités
- le second développe les axes de recherche abordés au cours des quinze années d'activités en géophysique appliquée, pendant lesquelles le domaine d'application a été mentionné pour des cas d'études réalisées à Madagascar, et le développement méthodologique amélioré.
- le troisième annonce les perspectives de recherche.

Chapitre I : Généralités

I. GENERALITES

I.1 Définition de la géophysique appliquée

La *géophysique appliquée* est la discipline qui consiste à étudier (observer, mesurer) un champ physique à la surface du sol ou dans des cavités creusées dans le sol. Ce champ physique, dont l'origine peut être naturelle ou provoquée, dépend d'un ou de plusieurs paramètres caractéristiques des matériaux dont on cherche à déterminer la répartition dans le terrain (Lagabrielle R., 1986). On utilise la géophysique pour détecter ou pour déduire la présence et la position des concentrations de minerais et des réserves utiles dans le sous-sol.

I.2 Rappel des objectifs

Le sous-sol renferme de substances utiles que les géophysiciens appliqués délimitent et/ou évaluent en mettant en œuvre l'outil géophysique.

Ce travail a pour objectif de mettre en valeur la contribution de la géophysique à la reconnaissance du sous-sol et à l'évaluation de ses ressources. Dans le cas de la reconnaissance, l'étude se porte en général sur la détermination de la formation du sous-sol et se décline en étude structurale, en modélisation géodynamique,...etc. Par contre, l'étude beaucoup plus détaillée vise à déterminer les caractéristiques d'une substance cible définie au préalable.

I.3 Notion de gisement

La notion de gisement s'applique à toute concentration minérale, contenant une ou plusieurs substances utiles (minéraux, eaux, gaz,...etc), exploitable économiquement. Le terme gîte possède une signification proche mais il ne contient pas de connotation économique (Harcouët V., 2005). Un gisement est, selon la définition de Raguin E. (1958), « une concentration locale exceptionnelle de substances qui sont ailleurs diffuses, dans l'écorce terrestre, à faible teneur ». A la notion de teneur s'ajoute, par conséquent, la notion de quantité.

I.4 Notion de cible et d'encaissant

Une anomalie géophysique provient du contraste significatif du paramètre physique considéré entre celui du corps cible et celui du milieu encaissant.

Pour le paramètre de résistivité, la présence de certains corps métalliques (cuivre, fer, tuyauterie enfouie, etc...), de graphite et des solutions électrolytiques donne une anomalie bien accentuée sur une carte ou sur une coupe de résistivité électrique.

On utilise aussi le contraste de densité dans le cas de recherche et de délimitation de corps à masse excessive (chromite à densité supérieure à 3.2, dôme de sel les dépôts sédimentaire, etc...) ou d'un corps à défaut de masse (cavité, etc...).

L'existence d'un corps solide « indéformable » change la caractéristique mécanique du sous-sol et fait varier la vitesse de propagation des ondes mécaniques traversant le milieu considéré (roches massives sous la couverture latéritique, sable induré, dépôts consolidés, etc...). On peut alors étudier la distribution d'un paramètre physique donné s'il présente un contraste significatif entre la cible et l'encaissante (Figure 1).

Cette notion de « cible et formation encaissante » est très importante sur le choix de la méthode et de la technique géophysique à adopter (Mari J. L., 1998, Chapellier D., 2001,)

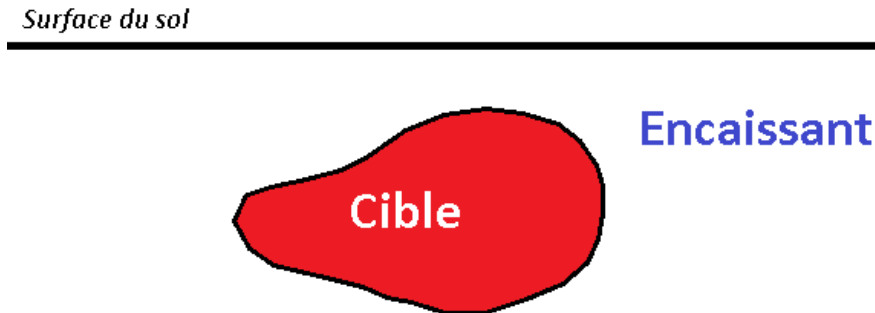


Figure 1: Image du sous-sol vue par le géophysicien

Le choix de la méthode géophysique à adopter lors d'une campagne de mesures géophysiques est d'autant plus facile si l'écart entre le paramètre physique associé à la cible P_{Cible} et celui de la formation encaissante $P_{\text{Encaissante}}$ est suffisamment appréciable.

I.5 Problématiques

La géophysique est l'un des outils utilisés pour l'étude et l'évaluation des substances utiles et pour la reconnaissance de la structure du sous-sol. Dès lors plusieurs questions dont les suivantes se posent :

- Comment fait-on pour choisir la méthode appropriée à l'étude du sous-sol?
- Quels critères sont à prendre en considération pour la détermination de la technique à mettre en œuvre?
- Quels sont le(s) apport(s) et la (les) contribution(s) de la géophysique dans le cas de son utilisation?

Dans le cas de la recherche de point d'implantation de captage d'eau souterraine, les hydrogéologues commencent toujours leur étude par le bilan hydrique pour connaître la recharge et l'apport en eau de la zone. L'étude du milieu suit immédiatement le bilan si le résultat s'avère concluant. Alors, l'outil géophysique n'est adopté que si le système aquifère considéré présente de la complexité et/ou les eaux ont des qualités différentes d'un milieu à un autre (aquifère

complètement hétérogène, eau minéralisée ou contaminée dans certains milieux, etc...). La technique géophysique à mettre en œuvre est donc fonction de la situation, caractéristique de la formation cible « aquifère » et de la disponibilité de l'espace de travail.

La réussite de l'investigation repose sur l'adéquation de la réponse aux deux premières questions évoquées précédemment. Et l'application ou non de la géophysique dépend de la pertinence de la troisième question.

Le choix de la méthode qui dépend en premier lieu du contraste du paramètre entre celui associé à la cible et celui associé à la formation encaissante doit être adapté à la morphologie du site, à la nature des structures à détecter ainsi qu'aux contraintes environnementales.

Il existe plusieurs catégories de méthode, étudiant chacune le comportement d'une grandeur physique particulière dans le sol. A chaque catégorie de méthode correspond un ou plusieurs appareillages géophysiques spécifiques. On utilise le résistivimètre pour la méthode électrique, le gravimètre pour la méthode gravimétrique, le magnétomètre pour la méthode magnétique, etc...

Le rapport dimension - profondeur et le paramètre d'échantillonnage de mesure ont également des conséquences sur l'efficacité de la technique adoptée. Cette dernière nous introduit dans la discipline de la géostatistique.

Il est nécessaire de maîtriser la propriété du gisement à explorer, ce qui demande alors des connaissances de base en géologie. Il faut dans ce cas rechercher les minerais dans les zones favorables géologiquement à leurs emplacements. On doit ainsi introduire la notion de métallogénie¹ et de gîtologie².

Certains cas importants font cependant exception: les minéraux peuvent être transportés loin du lieu de leur formation par transport mécanique dans le cas de dépôts de minerai alluvial (cas de l'or, du saphir du Sud de Madagascar, etc...) ou encore par dissolution (cas du gypse, du sel, etc...).

En plus de la précédente problématique, il existe également le problème d'exploration propre à la situation de Madagascar. L'île est constituée de formations géologiques diverses, alors l'application et l'utilisation de l'outil géophysique sont vraiment sollicitées dans plusieurs domaines, tant dans la recherche hydrogéologique (Castany, 1982), dans la recherche minière et dans l'étude structurale que dans le diagnostic et test géotechnique (Andrieux P., 2007). Il faut dans ce cas tenir compte de la situation de terrain et adopter la méthodologie adéquate pouvant donner de l'anomalie significative.

¹ Métallogénie : moyens d'approche essentiellement minéralogiques et physico-chimiques. Recherche de conclusions génétique.

² Gîtologie : moyens d'approche « naturalistes », basés sur l'observation. Recherche de relations spatiales entre la concentration minérale et le contexte géologique.

Par ailleurs, la situation semi-aride (Chaperon et al, 1993) prévalant dans le Sud de Madagascar ne fait qu'assécher les eaux de surface présentes sur le lieu. Alors l'eau n'existe dans cette zone que dans le sous-sol, de même leur qualité est à la fois indésirable, fortement minéralisée (Rabemanana, 2002, Rakoto H, 2003). Le changement climatique et les activités humaines (feux de brousse, ensablement des cours d'eau, contaminations des ressources en eau diverses...etc.) ne font qu'empirer cette situation et rendent le domaine de la recherche d'eau difficile. La demande de mise en œuvre de l'outil géophysique de prospection ne cesse d'augmenter ces derniers temps, surtout pour la localisation de point de captage d'eaux souterraines dans le grand Sud de Madagascar.

Mais on se demande jusqu'à maintenant quelle est la technique d'investigation la plus efficace dans le cas de la recherche d'eau ou l'étude hydrogéologique ? Je vais répondre à cette question dans le chapitre suivant par la présentation de cas d'études.

La présence de deux grandes entités géologiques : formation sédimentaire et formation cristalline et l'apparition de divers phénomènes géologiques indiquent que le sous-sol malgache est riche en « minerais utiles » que ce soit en hydrocarbures qu'en éléments métallifères. L'application de la géophysique est vraiment très diversifiée dans le domaine de la recherche minière. La prospection géophysique adopte souvent la méthode indirecte, faute de contraste de paramètre physique entre « l'encaissante » et « le gisement cible ». Il faut dans ce cas avoir plus d'informations avant d'entamer la partie interprétation. Même si la méthode est indirecte, le chapitre suivant donnera des cas d'étude complexe permettant d'accéder à la réussite des travaux d'évaluation de gisement.

La reconnaissance géotechnique d'un site consiste à déterminer la nature et la répartition des matériaux dont il est composé et à déterminer leurs propriétés. Ainsi, on fait appel à la géophysique pour la reconnaissance du sous-sol pendant la phase d'étude avant la construction de l'ouvrage (bâtiment, infrastructure urbaine ou infrastructure de transport, barrage...). On l'utilise également dans le diagnostic d'un ouvrage déjà en place. Ces éléments servent à préciser l'emplacement ou le tracé de l'ouvrage à construire, à concevoir ses fondations et à décider des procédés de construction.

La prospection géophysique intervient généralement à la troisième étape du programme d'exploration, après la reconnaissance géologique et la prospection hydrogéologique dans le domaine de la recherche hydrogéologique (G. de Marsily, 1975, Castany, 1982) et après la phase de géologie préliminaire et la campagne de géochimie générale (Milos K., 1986, P. Nicolini 1996), dans le domaine de la reconnaissance minière. La prospection géophysique ne sera recommandée après ces deux étapes que si son utilité est jugée « inévitable », autrement dit, si elle apporte des éléments nouveaux dans l'étude du sous-sol.

Chapitre II - Axes de recherche abordés

II. AXES DE RECHERCHE ABORDES

Connaissant les objectifs et les problématiques dans la reconnaissance du sous-sol, on abordera dans le présent chapitre le domaine d'application des travaux de recherche que menés et le développement méthodologique entrepris, dans le cadre de ces activités de recherche depuis 2003.

II.1 Historique des activités de recherche

Les travaux de recherche qu'on a menés depuis l'obtention du DEA ont été axés sur la géophysique de subsurface, formation située à une profondeur inférieure à 300m.

Mes activités de recherche ont été orientées depuis le début, aux développements méthodologiques, à l'élaboration de logiciels et à la technique d'interprétation géophysique. L'intitulé de mon mémoire de DEA (Cf. Liste des publications [17]), le rapport interne déposé à l'ICTP (Cf. Liste des publications [18]) et la communication effectuée lors des colloques scientifiques GEOFCAN (Cf. Liste des publications [22]) illustrent mon grand intérêt à ce domaine.

Elles ont été ensuite axées sur l'utilisation des différentes méthodes dans plusieurs domaines : recherche d'eaux souterraines (Cf. Liste des publications [1], [3], [4], [6], [9], [12], [14], [16], [17], [23], [26]), recherche minière (Cf. Liste des publications [5], [7], [8], [10], [15], [25]), génie civil (Cf. Liste des publications [11], [13]), géologie structurale (Cf. Liste des publications [18], [19], [20], [21], [22]) et prévention de risques (Cf. Liste des publications [2], [24]).

Devant le développement de la technique d'imagerie géophysique, j'ai été aussi attiré par son utilisation et par la recherche conduisant à son amélioration. Les travaux d'expertise que j'ai menés par le biais de la SGDM et du LGA, m'ont permis d'acquérir plus d'expériences dans le domaine d'investigation utilisant la méthode géophysique et d'analyser la technique appropriée à chaque cas d'étude.

En parallèle avec la recherche en géophysique appliquée, j'ai travaillé en étroite collaboration avec des équipes d'électronicien et de programmeur de l'IOGA, dans le but d'élaborer des matériels d'équipement géophysique simple. Je développerai cette activité dans la partie « Perspectives de recherche ».

J'ai profité, par l'intermédiaire de l'enseignement qu'on m'a confié, au sein de l'IOGA de l'Université d'Antananarivo, de monter une équipe de recherche au sein de notre laboratoire LGA. Les résultats de ces recherches sont publiés dans les mémoires et thèses (cf. Volume I) dont j'étais

plusieurs fois encadreur pédagogique et/ ou professionnel.

Après onze années de recherche en géophysique appliquée (depuis 1994), on m'a désigné en 2005 Responsable du LGA. Alors, j'ai participé intensivement à l'animation des activités de recherche, d'enseignement et de formation, effectuées dans ce laboratoire.

II.2 Domaines d'application de recherche

Les travaux de recherche que j'ai menés ont été axés principalement sur la géophysique appliquée, en particulier sur la géophysique de subsurface. L'outil géophysique a été mis en œuvre dans les domaines de recherche suivants, par ordre d'utilisation :

1. hydrogéologie
2. évaluation minière
3. reconnaissance structurale
4. géotechnique
5. détection et localisation d'objet particulier.

Ces travaux de recherche ont abouti à la rédaction de plus d'une centaine de rapports et une vingtaine de publications.

Comme on ne tient compte pour l'obtention de « l'Habilitation à Diriger des Recherches » que des travaux après l'obtention du Doctorat de Troisième Cycle, j'ai publié depuis Janvier 2003, période d'obtention de mon diplôme de Doctorat, quatre-vingt-douze (92) rapports, douze (12) articles scientifiques et quatre (04) communications avec actes (cf. Volume I).

En général, les recherches entreprises indiquées ci-dessus portent sur la recherche appliquée à l'apport d'une technique géophysique sur une étude bien définie et sur la recherche méthodologique par amélioration et adaptation d'une technique classique.

Nous avons la répartition ci-dessous de point de vue application de la méthode géophysique à l'étude et à l'auscultation du sous-sol (Figure 2).

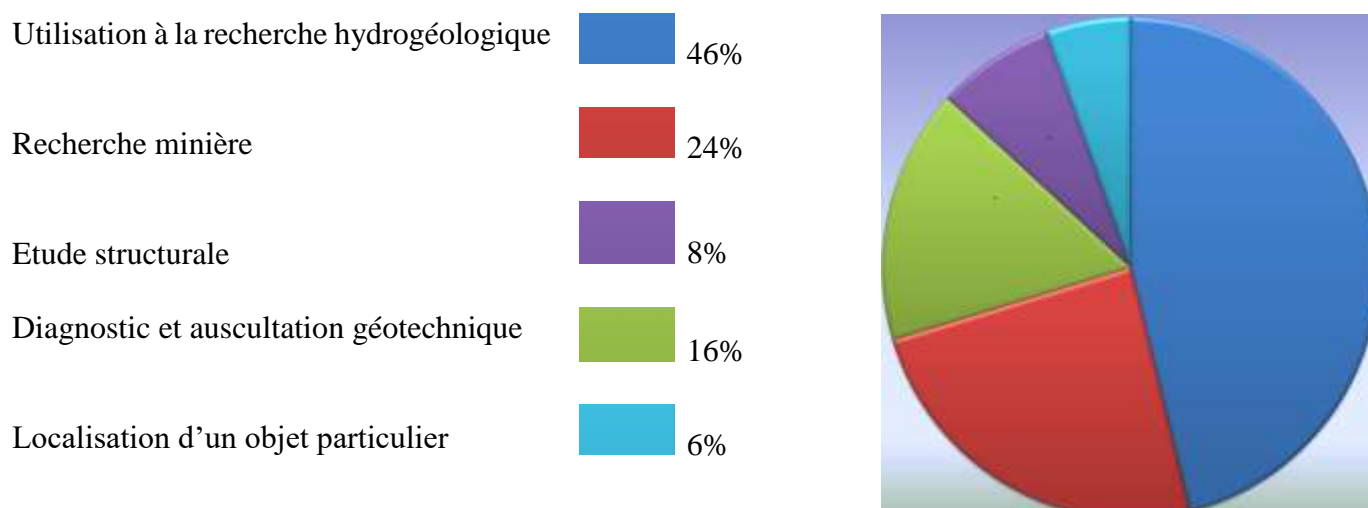


Figure 2: Utilisation de la géophysique par domaine

On peut dire ainsi que la zone prospectée par la géophysique couvre presque la totalité du territoire Malagasy (Figure 3). Mon apport, dans le domaine d'investigation du sous-sol, a été aussi sollicité à l'extérieur de Madagascar : Iles des Comores, Côte d'Ivoire, République de Congo, Gabon.

L'utilisation de la géophysique dans l'investigation du sous-sol est beaucoup plus orientée dans la recherche hydrogéologique. Elle tient plus de 46% de la totalité de mes activités de recherche (cf. Figure 3).

On a traversé presque la totalité de Madagascar en utilisant la géophysique appliquée sur ce domaine. On peut citer dans ce cas le projet 1250 forages positifs³ dans huit régions de Madagascar, Sava, Diana, Sofia, Betsiboka, Melaky, Atsimo Andrefana, Anosy et Androy (*PAEAR : 2008 – 2010*), le Projet « 700 forages positifs dans le grand Sud de Madagascar, Districts Iakora, Vohibe, Ihosy et Betroka » (*AEPA : 2005 – 2007*), le Projet « 500 forages positifs dans les régions Androy et Atsimo-Andrefana » (*PAEPAR : 2001 – 2004*), le Projet « 100 forages positifs dans les deux régions Betsiboka et Melaky » (*PAEAR, 2016 – 2017*) et le Projet « 100 forages dans le cadre de l'urgence nutritionnelle dans les régions Androy et Anosy » (*UNICEF - 2009*).

L'utilisation de la géophysique dans l'évaluation et la recherche minière est très limitée. Seules, les grandes mines nécessitant des financements et des lignes de crédit spécifique utilisent l'investigation géophysique (*Cas des gisements d'ilménite de Fort-dauphin et de Ranobe, cas des graphites de l'Est de Brickaville, d'Andramasina, ...etc, cas de gisement d'or de Dabolava et d'Analasarotra, et cas de terres rares d'Ampasindava, ...etc.*).

³ Le terme « positifs » indique qu'on doit avoir 1250 points d'eau exploitable, selon le Terme de référence (qualité de l'eau, profondeur et éloignement de point par rapport au village, etc...)

On utilise parfois l'outil géophysique dans le cas de l'exploitation artisanale et des petites mines, cependant, on a constaté que les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisants. Cet échec est lié à l'absence de méthode directe permettant la détection de la cible (Nicolini P., 1990), ou à l'inadéquation de la méthode appliquée.

L'outil géophysique est beaucoup plus sollicité ces derniers temps dans l'étude et dans le test géotechnique d'un terrain. Cette demande est liée au développement de la construction (route, bâtiments, usine de transformation, barrage,...etc.) actuellement à Madagascar. La méthode sismique et la technique de l'imagerie électrique sont les méthodes les plus utilisées dans ce domaine (Kelly W. E., 1993).

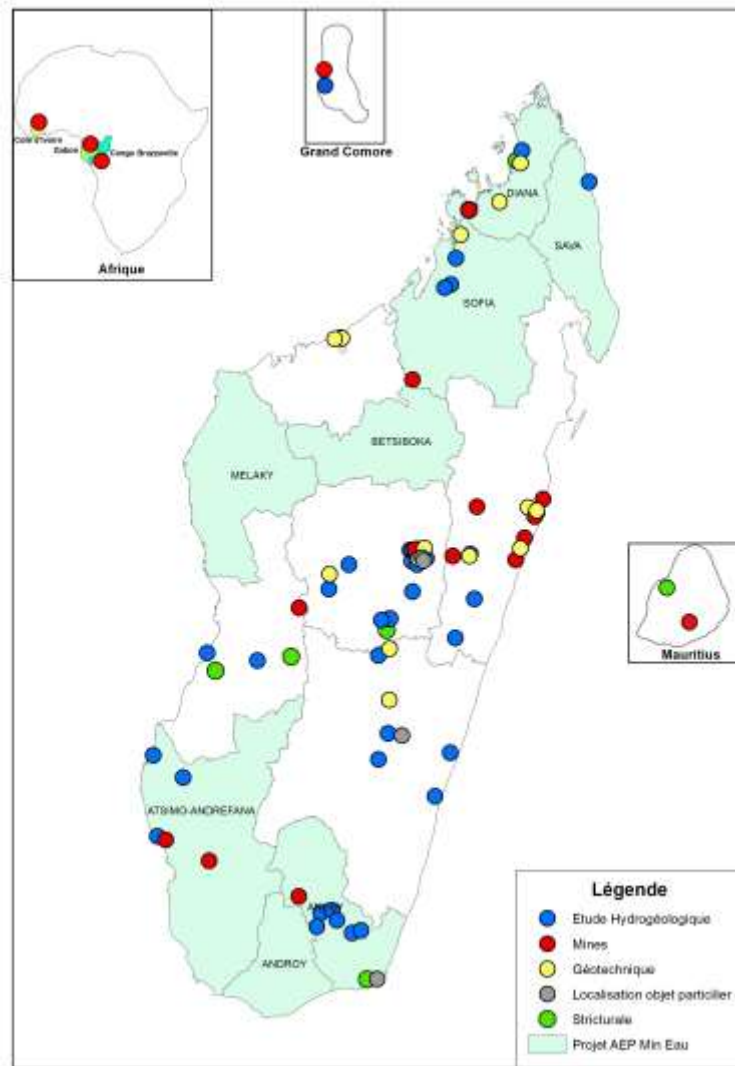


Figure 3: Zones d'intervention d'utilisation de la géophysique appliquée

II.2.1 Géophysique appliquée à la recherche hydrogéologique

Conscient de l'importance de l'accès à l'eau pour le développement d'un pays et en sachant que la chance de la trouver de meilleure qualité et en quantité suffisante dans des projets d'Adduction en Eau Potable (AEP) est incertaine, j'ai considéré comme prioritaire dans mes travaux de recherche, la géophysique appliquée à l'hydrogéologie.

Ma participation à plusieurs projets d'AEP et de recherche hydrogéologique prouve mon intérêt particulier à ce domaine. Cette participation a les proportions suivantes selon les activités considérées : 55% des études ont nécessité des rapports techniques, 45% sur les travaux de recherche ont abouti aux publications d'article scientifique et aux communications scientifiques tout en spécifiant engagement total a été réservé aux projets de recherche entrepris par le LGA (Laboratoire de Géophysique Appliquée).

Selon Kelly et al, 1993, l'investigation hydrogéologique est souvent axée sur :

- 1- la localisation d'une nouvelle ressource en eaux souterraines
- 2- le développement de stratégie d'utilisation de la ressource existante
- 3- la proposition des mesures de protection de qualité et de quantité, comprenant la modification des caractéristiques hydrogéologiques (modification de l'écoulement souterrain, ...etc.)
- 4- la proposition de mesure efficace contre la pollution et le tarissement de l'eau souterraine.

Selon les objectifs décrits ci-dessus, l'utilisation de l'outil géophysique apporte beaucoup à la gestion durable des ressources en eau parce qu'elle permet d'imager la structure de l'aquifère (BURGEAP, 1986, les rapports d'études en AEP, partie II). Elle donne des informations sur le système eau-aquifère-écoulement (Astier J. L., 1971, G. De Marsily, 1975, Castany, 1982).

II.2.1.1 Apport sur la reconnaissance de l'écoulement d'eau souterraine

L'étroite relation entre la conductivité électrique de l'eau et la morphologie de mur de l'aquifère de ma zone de thèse m'a conduit à entreprendre un nouveau thème de recherche, qui est axé sur l'utilisation de la gravimétrie dans l'étude hydrogéologique. Le résultat donnant la corrélation entre la circulation de l'eau souterraine et la morphologie du socle formé de roches volcaniques et cristalline, est publié dans la revue à Comité de lecture internationale, journal « Comptes rendus Géosciences » d'Elsevier.

La zone de Beloha, à l'extrême Sud de Madagascar, qui est la zone intéressée par notre étude, vit dans la situation d'insuffisance en eau potable. La ressource en eau de surface tarit pendant la période sèche. La plupart des eaux souterraines rencontrées par les forages de reconnaissance sont minéralisées (Rakoto H, 2003).

La zone est localisée sur le dépôt sédimentaire du Sud de Madagascar, bassin semi-profond à sédimentation post-basaltique, qui repose sur le socle précambrien et la roche basaltique par endroit.

La couverture dunaire est relativement mince au Nord de village de Beloha. Le dépôt sédimentaire allant de l'Eocène à l'actuel, couvre le substratum rocheux qui affleure sur quelques zones du littoral (Besairie, 1963).

De point de vue lithologique, le Néogène continental est constitué de grès argileux, d'argiles, de grès tendres sableux jaunâtres ou rougeâtres. Il est recouvert par des formations dunaires quaternaires (Figure 4). Son épaisseur est de l'ordre de 300m, aux environs du fossé de Saraondry (Bésairie, 1963).

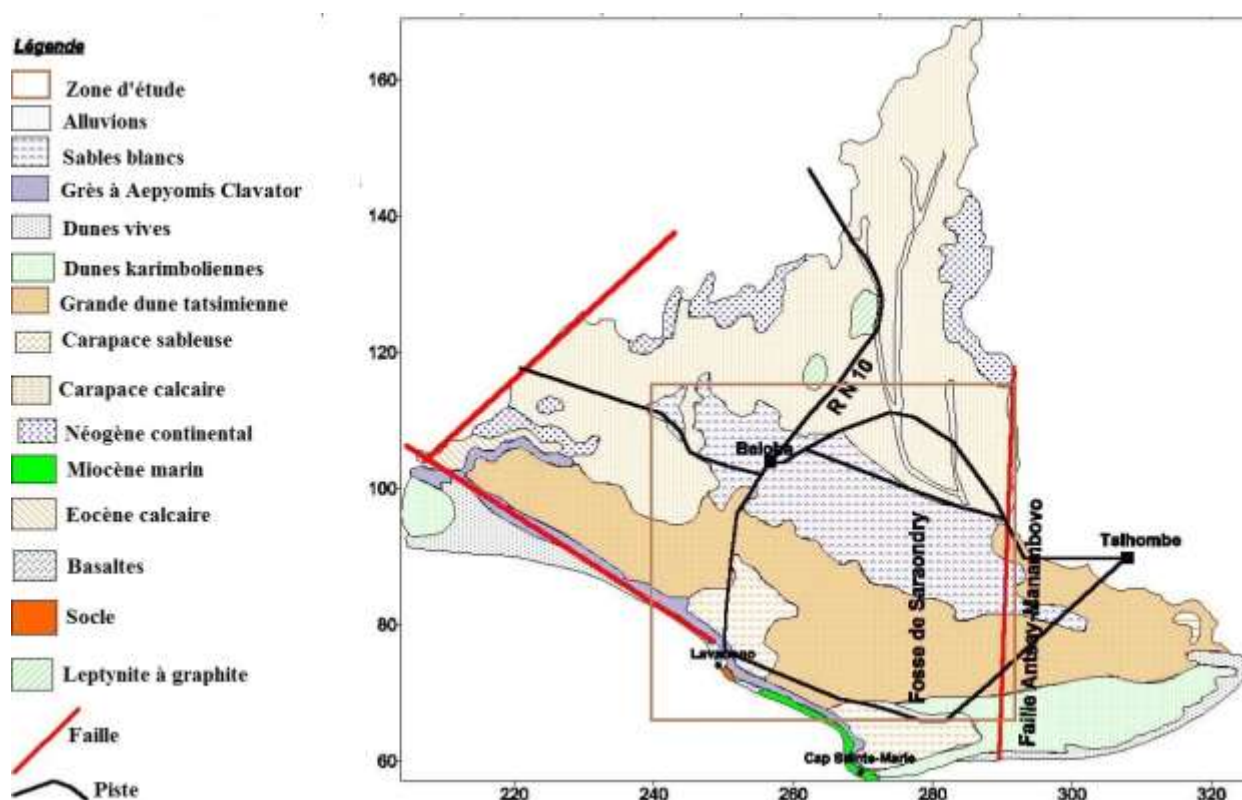


Figure 4: Géologie régionale du Bassin de Beloha (source : Rakoto et al 2003)

D'une manière générale, la méthode électrique est souvent adoptée dans la recherche hydrogéologique, du fait de la correspondance de la résistivité électrique de l'eau et de la résistivité du milieu (Loi d'Archie, 1942). Cependant, la complexité de la situation hydrogéologique comme dans les cas de l'aquifère poreux plus ou moins argileux, de l'eau d'imbibition minéralisée (Rabemanana, 2002, Rajaobelison, 2003), de la présence de plusieurs nappes à plusieurs niveaux (Aurouze, 1959, Rakotondrainibe H., 1976, Rakoto H., 2003), nous a amené à introduire la

méthode indirecte, non conventionnelle, dans le domaine de la recherche d'eau.

La méthode électrique seule ne nous permet pas de faire la modélisation de la circulation de l'eau souterraine profonde à cause de la minéralisation de l'eau (conductivité électrique de l'eau élevée) et la dominance des argiles, dans la zone.

Alors, la méthode gravimétrique a été utilisée pour modéliser le toit des socles (Figure 5), formé de roches métamorphiques et volcaniques, en considérant cinq formations : couverture sédimentaire non consolidée de densité $d=1,88$, dépôts sédimentaires consolidés de $d = 2,18$, formations volcaniques de densité d entre 3,08 et 3,28 et le substratum cristallin de densité $d=2,48$.

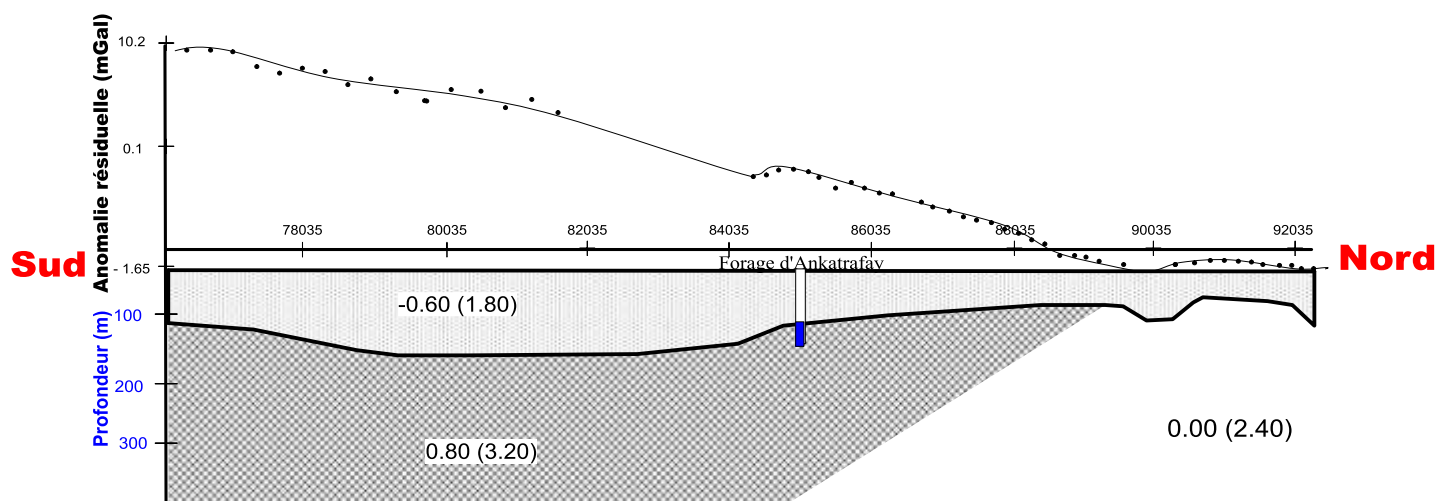


Figure 5: Modèle de densité suivant le profil de mesure (source : Rakoto et al, 2003)

Plusieurs profils ont fait l'objet de levé gravimétrique, suivant les pistes existantes et la route nationale RN13.

La combinaison de plusieurs coupes nous donne ensuite la carte du toit du socle. Cette carte après transformation donne la morphologie du socle que nous considérons comme le mur de l'aquifère poreux (Figure 6).

En se basant sur la propriété « interaction eau – aquifère », plus le séjour de l'eau dans l'aquifère est long plus elle acquiert de la minéralisation (Freeze, 1979, Appelo, 1999). La loi fondamentale de l'hydrodynamique dénommée loi de Darcy, en 1856, indique que la diminution de la section d'écoulement entraîne la perte de charge hydraulique, c'est-à-dire la diminution de la vitesse d'écoulement d'eau. En conséquence, cette diminution ralentit l'écoulement de l'eau et augmente le temps de séjour de celle-ci dans le milieu aquifère.

La comparaison faite sur les deux paramètres, conductivité électrique et morphologie du

socle, a montré que les eaux sont beaucoup plus conductrices, minéralisées dans la zone où le mur de l'aquifère a le pendage contre la direction de l'écoulement.

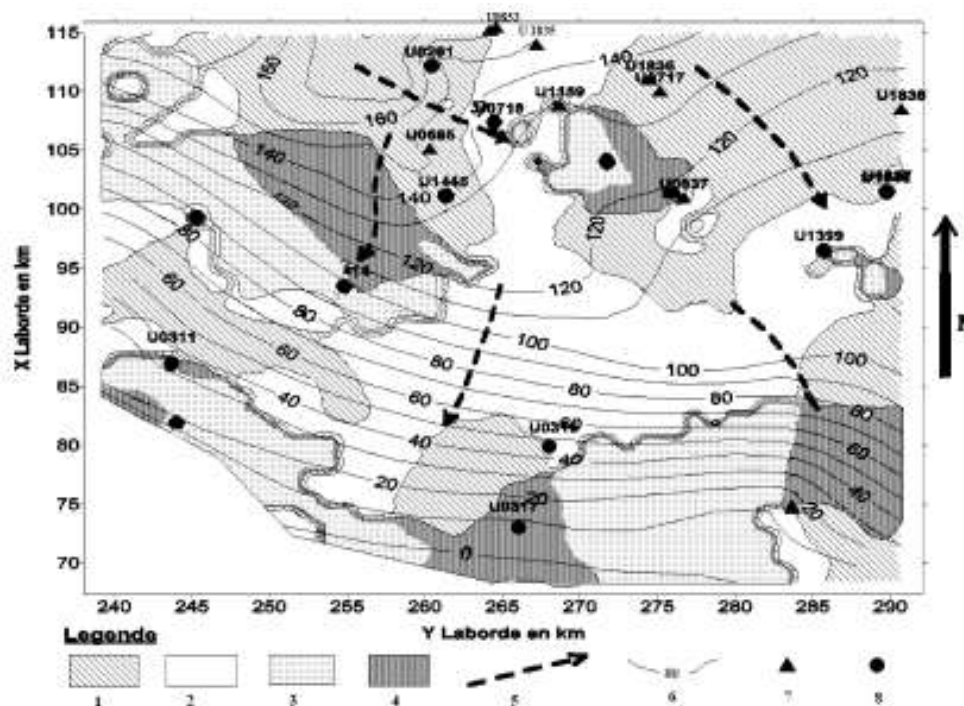


Fig. 4. Carte de la direction de pendage du toit de substratum et points de forage. 1 : Pendage vers le sud-ouest ; 2 : pendage vers le sud-est ; 3 : pendage vers le nord-est ; 4 : pendage vers le nord-ouest ; 5 : direction de l'écoulement de l'eau ; 6 : niveau piézométrique (m) ; 7 : forage où la CE de l'eau est inférieure à $4500 \mu\text{S cm}^{-1}$; 8 : forage où la CE de l'eau est supérieure à $4500 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Fig. 4. Dipping of the basement and conductivity of water. 1: Dipping towards the southwest; 2: dipping towards the southeast; 3: dipping towards the northeast; 4: dipping towards the northwest; 5: groundwater-flow direction; 6: water-table level (m); 7: borehole with WEC $< 4500 \mu\text{S cm}^{-1}$; 8: borehole with WEC $> 4500 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Figure 6: Relation entre conductivité électrique et morphologie du socle (source, Rakoto et al, 2003)

L'étude effectuée sur l'aquifère poreux de l'extrême Sud de Madagascar, zone semi-aride, vient de confirmer la corrélation entre la conductivité électrique et la morphologie du mur d'aquifère.

La connaissance de l'allure de toit du substratum d'un aquifère poreux est un apport intéressant dans la compréhension de la circulation de l'eau souterraine, qui peut compléter et confirmer les informations sur l'hydrodynamique et l'hydrochimie d'une zone. Elle peut donner des informations a priori sur la qualité probable d'eau.

Ce thème de recherche abordé dans les zones à topographie relativement plane et constituées d'un milieu poreux à conductivité électrique élevée au-dessus d'un socle imperméable m'a conduit à la conclusion suivante: l'application de la géophysique, en particulier de la gravimétrie, donne de bons résultats dans la recherche hydrogéologique. La contribution de la géophysique est considérée comme non négligeable dans la caractérisation d'un système hydrogéologique compliqué à faible

recharge et à système aquifère multi-couches, cas du Sud de Madagascar.

II.2.1.2 Evaluation de la potentialité en eaux souterraines

On va considérer dans ce qui suit la plaine d'Antananarivo où la qualité et la quantité de l'eau souterraine sont variables.

II.2.1.2.1 Estimation de la qualité de l'eau par la géophysique

L'agglomération de la ville d'Antananarivo est entourée de plaines. Cette plaine est en permanente relation avec les rivières Sisaony et Ikopa qui l'alimentent et la drainent selon la saison. Elle est aussi exposée aux contaminations que ce soit organique qu'ionique. Ainsi, plusieurs thèmes de recherche se sont penchés sur l'étude liée à la contamination d'eaux souterraines de cette plaine, projet CORUS (2003 – 2006) : « Analyse de la durabilité de l'agriculture dans l'agglomération d'Antananarivo », projet CORUS (2004 – 2007) : « Prospections électrique et électromagnétique appliquées aux problèmes de pollution, des ressources en eaux potables, posés par les déchets industriels et ménagers dans la ville d'Antananarivo et de ses environs » (*rapport de fin de projet CORUS*, Rasolomanana et al, 2011, , *projet GéoPol (2016)* : « Géophysique appliquée à la caractérisation des zones polluées ». (Rajaonarivelo S, 2016, Gnonnoue P., 2016).

En se référant à la propriété électrique de l'aquifère, il est possible d'estimer la qualité de l'eau, celle-ci en considérant une zone de référence en dehors de la zone d'influence des rejets. Alors en utilisant cette approche comparative, on peut indiquer le type de contaminant, que ce soit par hydrocarbure que par polluant ionique (Rakoto et al., 2018). L'analyse statistique différencie bien l'évènement par les valeurs de résistivité électrique et de chargeabilité électrique prédominantes.

On va se référer à la loi expérimentale d'Archie, 1942, pour la résistivité électrique. Cette loi montre que la résistivité électrique d'un milieu est fonction linéaire de la résistivité de son eau d'imbibition.

$$\rho_a = \rho_w a \Phi^m S^n \quad (1)$$

Où ρ_a est la résistivité électrique du milieu poreux en (Ωm), ρ_w est la résistivité électrique de l'eau d'imbibition en (Ωm), Φ est la porosité efficace, S représente la saturation, m le facteur de cimentation, n l'exposant de saturation dépendant de la formation, a le coefficient de saturation, fonction de la lithologie.

La diminution de ρ_w due à l'augmentation des ions dans l'eau diminue également la valeur de la résistivité du milieu poreux. Alors l'augmentation de la concentration en ions libres de l'eau dans l'aquifère ne fait que diminuer la valeur de la résistivité électrique de ce milieu.

Concernant le milieu pollué en hydrocarbures, il est généralement considéré comme un bon isolant électrique (Bocard C., 2006, Atekwana et Atekwana, 2010) dans le cas où l'hydrocarbure est non dégradé. Alors les hydrocarbures non dégradés que ce soit mouillants ou non mouillants, présents dans l'aquifère, augmentent la valeur de résistivité électrique de celui-ci.

Les travaux de recherche effectués par Blondel A., en 2014, ont montré que la chargeabilité électrique des hydrocarbures non dégradés et la conductivité en quadrature augmentent avec la teneur en hydrocarbure de l'eau polluée.

La dilution de la solution ionique dans le système aquifère augmente le nombre d'ions de l'eau. Ainsi, les ions créent le système de double couche qui présente des effets capacitifs lorsqu'un courant le traverse (Bocard C., 2006, Gourry et al, 2002). Le temps de réarrangement de la charge, avant d'atteindre l'équilibre, augmente. Ce qui signifie que la polarisation provoquée est aussi importante si le nombre des ions libres augmente.

Il est à noter que ces variations sont difficiles à détecter par l'observation simple de la coupe géoélectrique du fait qu'elles sont relativement faibles, d'où l'utilisation de l'approche statistique.

Une zone se trouvant aux alentours à proximité de deux sources de pollution a été prise comme site expérimental, bas-fonds d'Ambohimanambola (Figure 7). Deux sociétés, la PapMad et la JiRaMa, envoient respectivement leurs restes de colorant, utilisés dans la coloration des papiers, et leurs déchets d'hydrocarbures, huile de vidange des groupes générateurs d'électricité de la JiRaMa, dans des bassins de rétention d'eau.

Les tests géoélectriques faits à proximité immédiate des deux sites montrent que la conductivité électrique du milieu aquifère augmente aux alentours de PapMad et elle diminue aux environs de la JiRaMa (Tableau I). Cette variation est notée par rapport à la conductivité électrique observée sur le site de référence (Rajaonarivelo S., 2016, Rakoto et al., 2018). La résistivité électrique n'est autre que l'inverse de la conductivité électrique.

L'analyse statistique des chargeabilités de la zone aquifère donne des valeurs prépondérantes (à répétitivité élevée) beaucoup plus élevées dans les sites contaminés que celle sur le site de référence.



Figure 7: Localisation des profils géophysiques

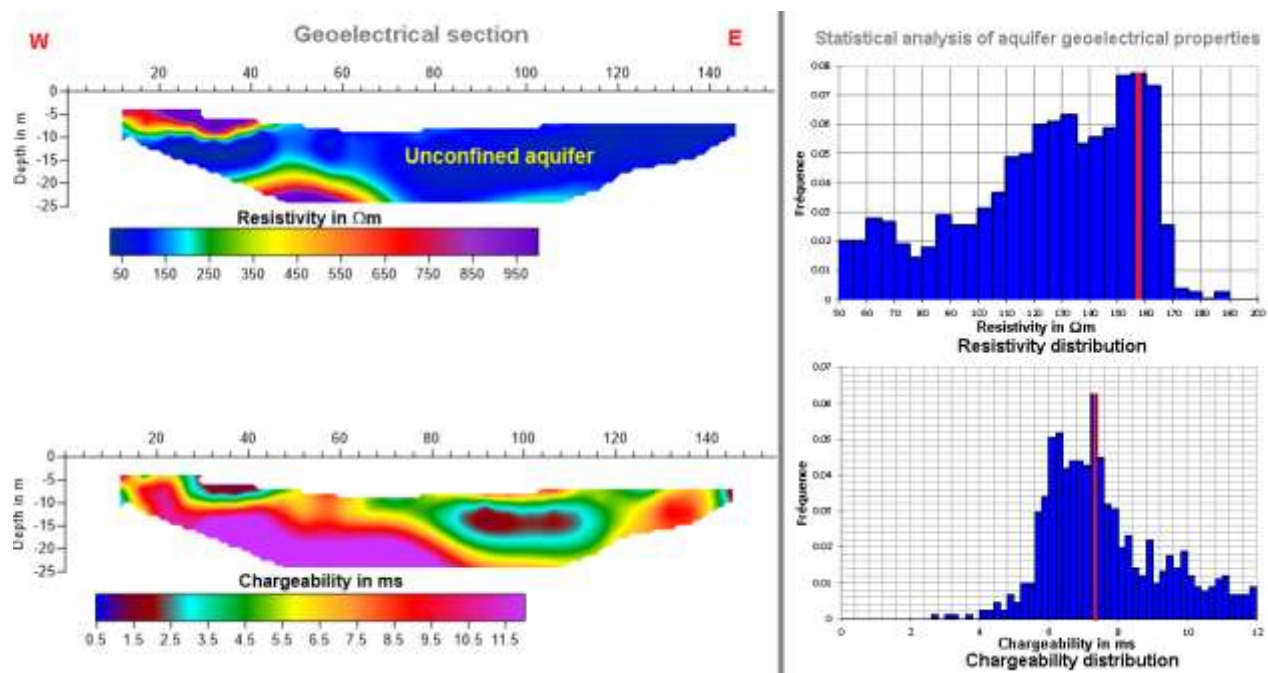


Figure 8: Coupe géoélectrique du profil PE3

Tableau I : Les caractéristiques géoélectriques des sites

Profil	Résistivité ($\Omega.m$)	Chargeabilité (ms)
PE0	140	3
PE1	120	5,3
PE2	72	5
PE3	160	7,3
PE4	160	4,2

Le résultat montre bien que la présence des pollutions dans le milieu aquifère change le comportement électrique de ce milieu (Tableau I). Les valeurs sont en bleu si elles sont inférieures à la valeur de référence normale (140 Ωm pour la résistivité électrique et 3 ms pour la chargeabilité) et elles sont en rouges si elles sont supérieures à la valeur de référence (Cf. Tableau I).

Le traitement statistique des données de résistivité et de chargeabilité électriques de ce milieu aquifère a facilité la vision des valeurs prépondérantes et il a beaucoup plus exprimé la variation de la valeur qui est relativement faible de ces deux paramètres (Figure 8).

On peut dans l'avenir utiliser cette approche pour connaître si une nappe est contaminée ou non.

II.2.1.2.2 Localisation de l'emplacement de captage d'eau souterraine

On va voir dans ce qui suit, l'utilisation de la géophysique à la localisation de la zone à puissante nappe aquifère. On va prendre encore comme zone d'application la plaine d'Antananarivo.

De point de vue hydrogéologique, la plaine présente une potentialité non négligeable de ressources en eaux souterraines (Rasolomanana et al, 2011). Elle fait l'objet d'évaluation et de recherche de nappe productive, cas d'étude hydrologique et reconnaissance hydrogéologique dans la plaine alluviale de l'Ikopa, situé à Dorodosy. Une note synthétisant la technique de modélisation géophysique 2D et le résultat de l'étude a été publié dans l'article de Rakoto et al, en 2017.

La démarche suivie pour sortir le modèle hydrogéologique du sous-sol, dans le cadre de cette étude, est donnée dans le logigramme de la figure 9 ci-après.

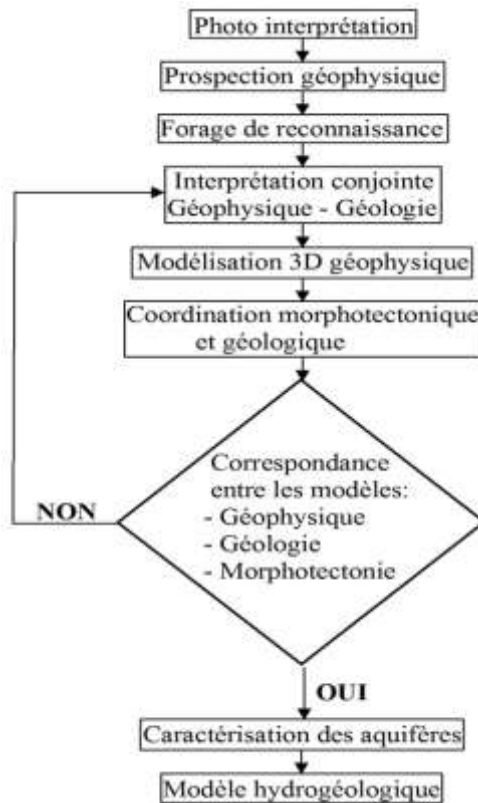


Figure 9: Logigramme du traitement

La zone se trouve sur le bas-fond de la plaine alluviale d'Antananarivo. Le substratum formé de roches cristallines est constitué de granite migmatitique et de gneiss (Figure 10).

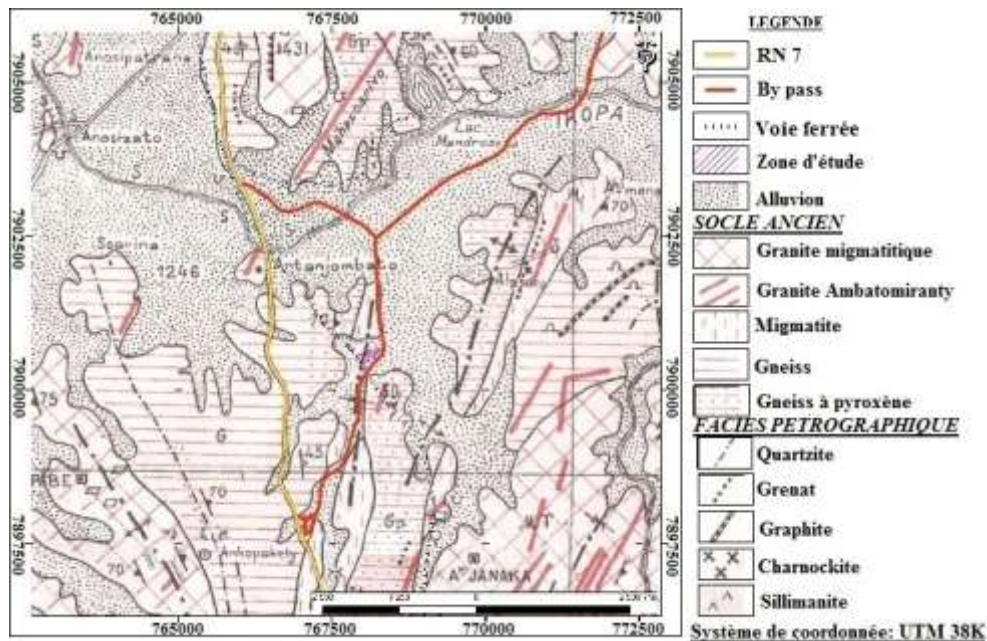


Figure 100: Géologie régionale de la zone d'étude (source : feuille P47, L. Laplaine 1963)

Figure 10:

La photographie aérienne a mis en évidence les trois principales directions, $N0^\circ$, $N60^\circ$ et $N120^\circ$, de linéament, caractérisant les lignes tectoniques majeures des Hautes Terres de Madagascar (Bertil et al., 1998). Il est à noter que ces linéaments caractérisent la direction privilégiée de l'écoulement d'eau souterraine dans les milieux fissuré et fracturé.

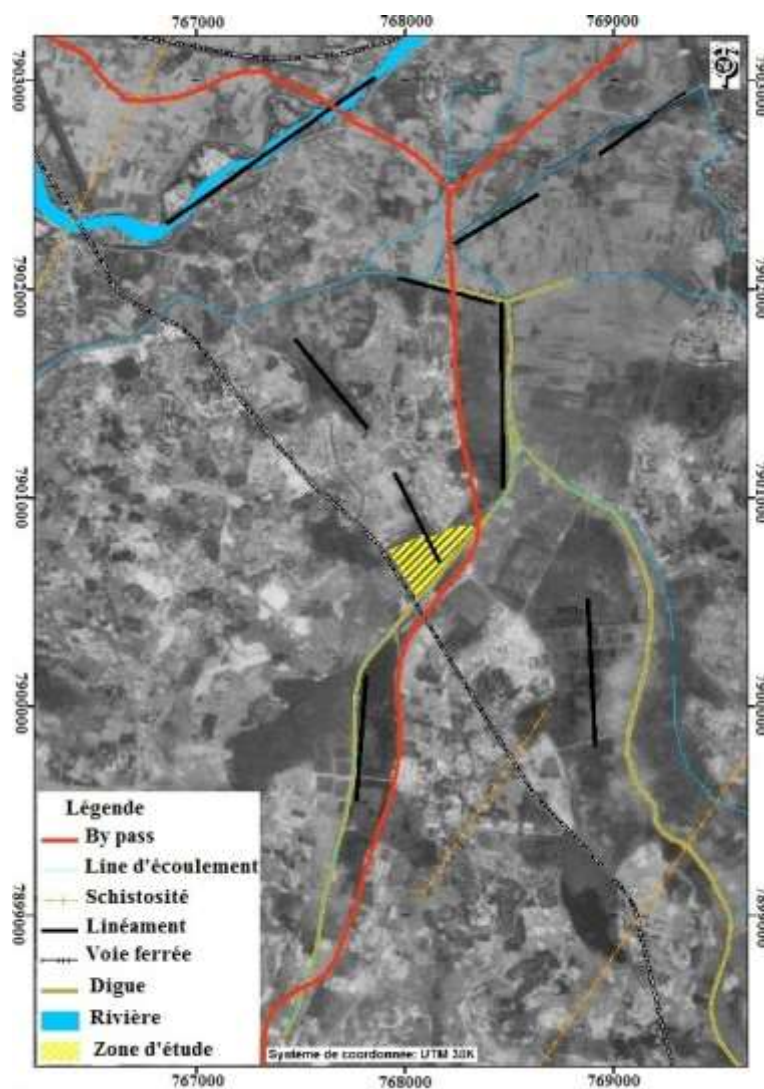


Figure 111: Photo-interprétation de la zone de Dorodosy

Les lignes électriques ont été étalées dans la direction coupant les linéaments observés (Figure 12) dans le but de mettre en évidence le passage de linéament visible sur la photographie aérienne et d'en déduire sa nature (fracture, fissuration ou schistosité).

La coupe géophysique, en particulier la coupe géoélectrique et la coupe de forage présentent

une meilleure cohérence (Figure 12). On a utilisé cette cohérence d'abord pour la cartographie électrique de bas-fonds étudié et ensuite pour déduire le modèle de circulation d'eau souterraine de la zone.

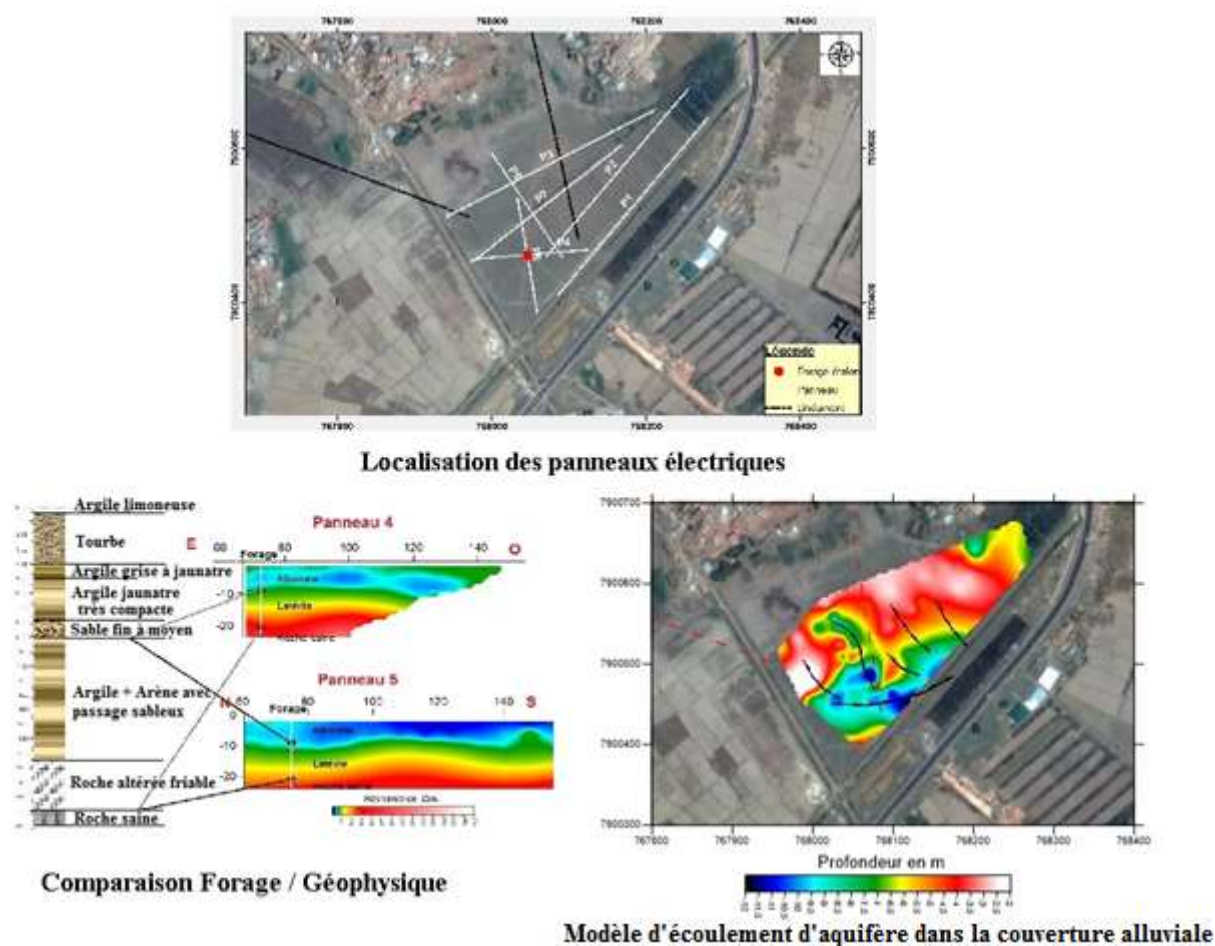


Figure 12: Interprétation combinée de la géophysique, de la lithologie et de la morphotectonique

La coupe géoélectrique en accord avec la coupe lithologique montre que le système hydrogéologique du milieu est formé de nappe à multi-couches : nappe perchée, nappe semi-captive de l'altération et la nappe de fissuration du socle. La littérature disponible sur le système aquifère des bas-fonds du haut plateau de Madagascar, y compris la plaine d'Antananarivo, avance ce modèle (Grillot, 1992, Dussarat, 1993 et 1994).

La cartographie du mur⁴ de la nappe perchée (première nappe libre) par l'intermédiaire de la coupe géoélectrique a permis de déduire l'écoulement de la nappe libre. On peut déterminer le lieu

⁴base imperméable soutenant la nappe aquifère

le plus favorable à l'implantation de l'ouvrage de captage d'eau souterraine (Zone où l'aquifère est épais), en utilisant la carte du mur de l'aquifère.

La géophysique a conduit à l'élaboration de modèle d'écoulement d'eau souterraine en utilisant les autres disciplines comme la photo-interprétation, la reconnaissance géologique du lieu et le forage test. La démarche technique utilisée et le résultat obtenu peuvent être interpolés sur les autres zones de la plaine alluviale de l'Ikopa, appelé plaine Betsimitatatra en aval.

II.2.2 Evaluation minière

Les travaux exécutés dans le cadre de l'évaluation minière peuvent être classés en deux grandes catégories : la première par estimation volumétrique directe, et la deuxième par délimitation et localisation d'un indice indiquant la présence de minerai cible, cas de localisation des poches de minéralisation de tourmaline (Rakotomalala P N J, 2011, Rakoto H., 2012), délimitation de l'extension de gisement d'apatite (Rakoto et al, 2015, Ramahatafandry V. N, 2015).

II.2.2.1 Estimation volumétrique d'un gisement

Il existe plusieurs approches possibles dans le cadre d'une étude et d'une évaluation de gisement minier donné. Mon équipe et moi-même, lors de l'étude et de recherche entreprises nécessitant le calcul volumétrique, avons utilisé souvent la modélisation à 3D (*rapport des travaux sur estimation volumétrique*, Partie II, Ada H. N. 2006 et 2008).

Il y a trois démarches possibles pour obtenir le modèle à trois dimensions (3D) :

1. la mesure par maillage régulier, suivi de l'inversion en utilisant l'algorithme respectant la relation entre données observables et le modèle vrai de terrain, *exemple de l'évaluation de réserve de chromite faite par Rasolomanana E. en 1999.*
2. les levés sur plusieurs profils, suivis de l'inversion en coupe et ensuite l'utilisation de la cartographie par maillage et interpolation, sur chaque niveau pour aboutir à un modèle 3D, *cas de calcul de réserve faite par la SGDM, sur les roches d'empierrement se trouvant proche de la RN2 et sur la roche massive de Kingele 2, Gabon (travaux d'expertise)*
3. des investigations verticales sur plusieurs stations, suivis de modélisation en une dimension (1D) et enfin la cartographie par maillage et interpolation, de chaque niveau pour donner le modèle 3D.

La précision obtenue sur chaque démarche dépend de l'échantillonnage de mesure adoptée.

J'ai évité, autant que possible, l'utilisation de levé à maillage régulier, à cause de la lourdeur des calculs théoriques qui ne reflètent pas souvent le cas réel du terrain (variation irrégulière des paramètres physique et géométrique du sous-sol), de l'absence de modèle mathématique précis sur le calcul d'inversion (utilisation des résolutions asymptotiques dans le cas de la prospection

électromagnétique, (Oristaglio et al, 1998), phénomène de non unicité de résultat et phénomène de disparition en prospection électrique (Zhdanov et al, 1998, Chapellier D, 2000, Chouteau M., 2001) et de la difficulté de sa mise en œuvre sur le terrain. Nous l'avons utilisé seulement dans le cas de modèle simple de terrain et de forme classique de la cible (sphérique, cubique, parallélépipédique et cylindrique).

Il faut bien préciser que les données géophysiques sont mieux interprétées avec l'intégration étroite des données géologiques. Ainsi, on a souvent adopté les deux dernières démarches indiquées ci-dessus, soit les levés sur profils, soit l'investigation verticale en plusieurs stations. Il est aussi possible qu'on a utilisé les deux démarches à la fois. Ces démarches sont adoptées dans le but de donner plus de pondération à la structure réelle du sous-sol pendant le processus « d'imagerie » et d'interprétation géophysique.

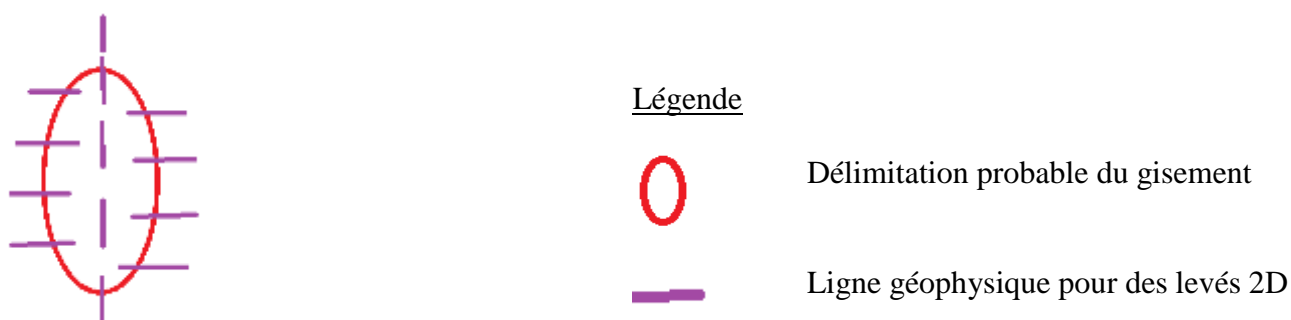


Figure 13: Déploiement de la géophysique

On a appliqué en général la technique d'optimisation des informations, autrement dit, augmenter le nombre d'échantillonnage dans la zone où la variation se fait sentir, zone de discontinuité (Figure 13). La lecture des différents indices sur le terrain aide beaucoup à l'implantation des stations géophysiques. Cette dernière a été souvent adoptée dans l'évaluation des carrières de roches massives, délimitation de l'extension de filon, etc....

La démarche suivie dans la plus part de l'évaluation volumétrique des gisements est comme décrit ci-dessous (Figure 14)

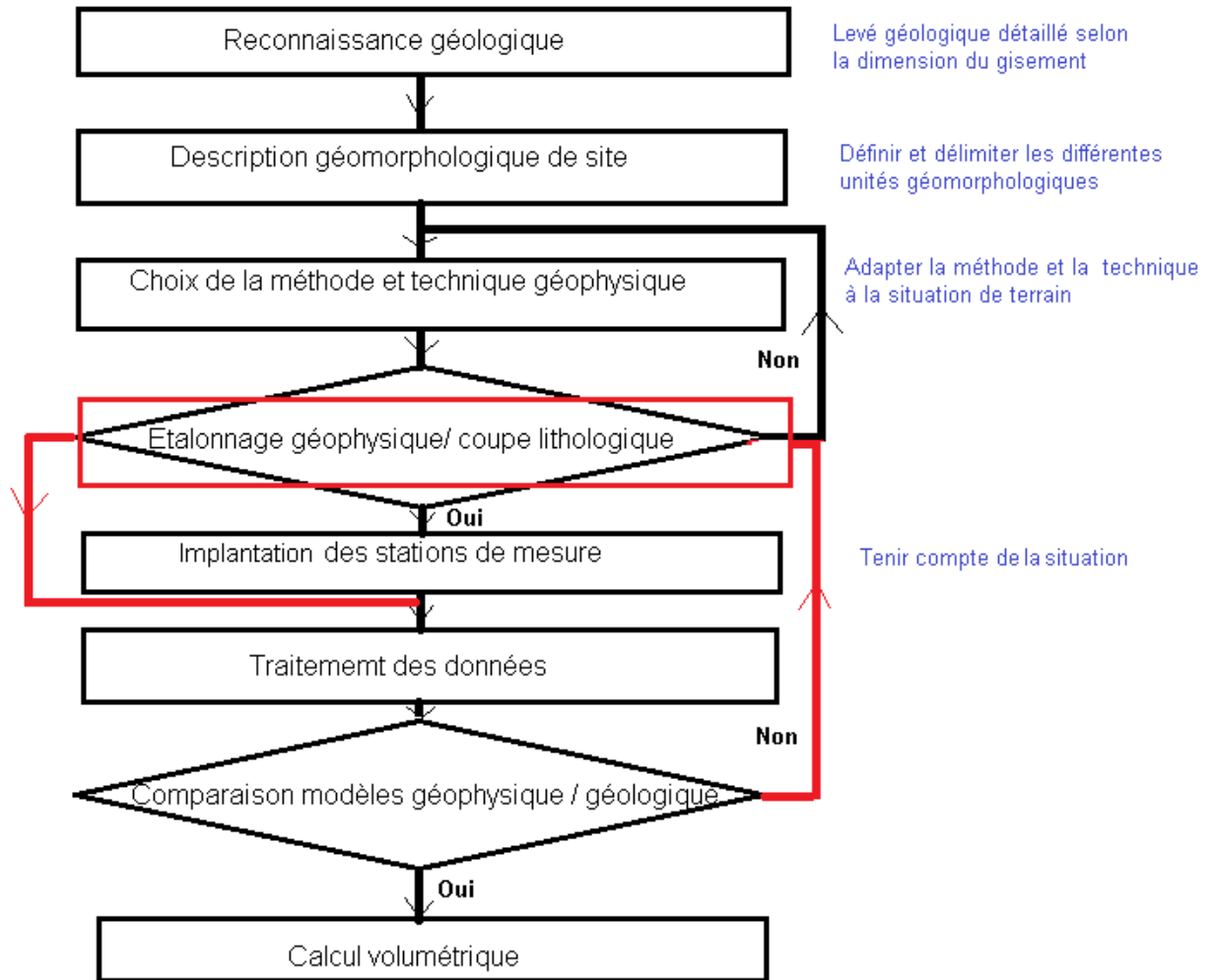


Figure 14: Démarche classique de l'estimation volumétrique d'une réserve

Une fois que l'hypothèse de modèle géologique est confirmée par les mesures géophysiques, on modélise le toit du gisement en introduisant la topographie sur le résultat de la géophysique.

Le volume de gisement peut être enfin calculé par la différence entre le toit du gisement et le niveau de référence d'exploitation (Niveau de référence) (Figure 15).

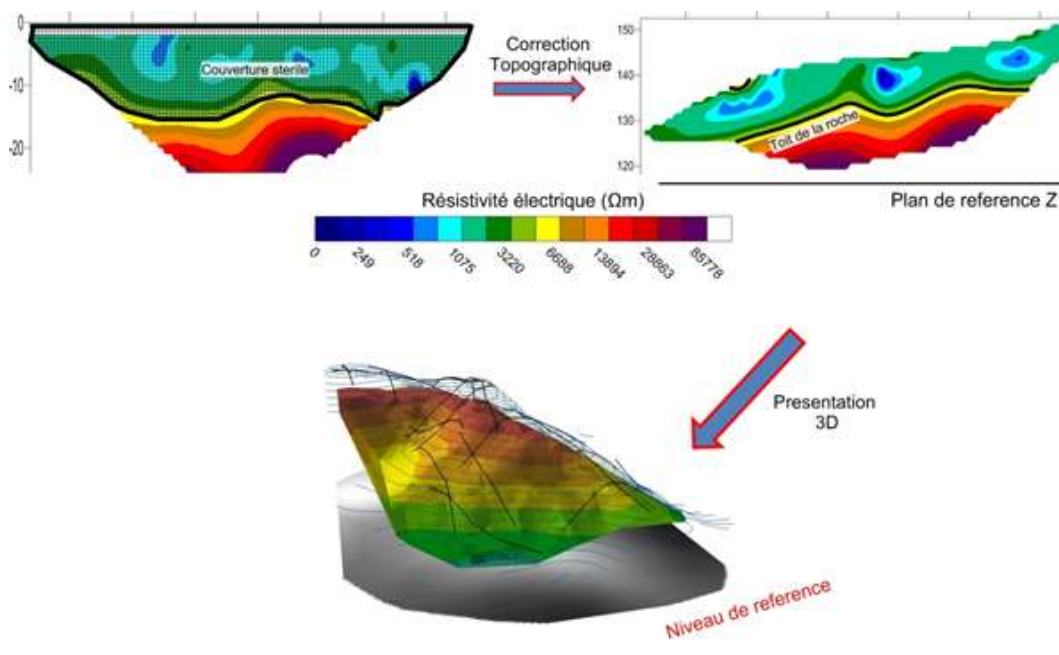


Figure 15: Illustration de l'étape de calcul volumétrique de la réserve

La géophysique a permis d'évaluer avec une certaine précision le volume exploitable de la réserve. On peut de même, à partir de cette modélisation géophysique, calculer le volume de mort-terrain et déduire la technique d'exploitation à mettre en œuvre.

Ainsi, en partant des simples levés de surface, on peut imaginer le gisement du sous-sol.

II.2.2.2 Localisation d'indice de minerai cible

Ce travail de recherche nécessite le support d'une autre discipline, considérée comme fondamentale. Parce qu'on doit, dans ce cas, introduire, comme contrainte forte, les informations provenant des autres levés et des traitements (Figure 16((a), (b), (c) et (d))) (géologie, photo-interprétation, traitement d'image satellitaire, ...etc.).

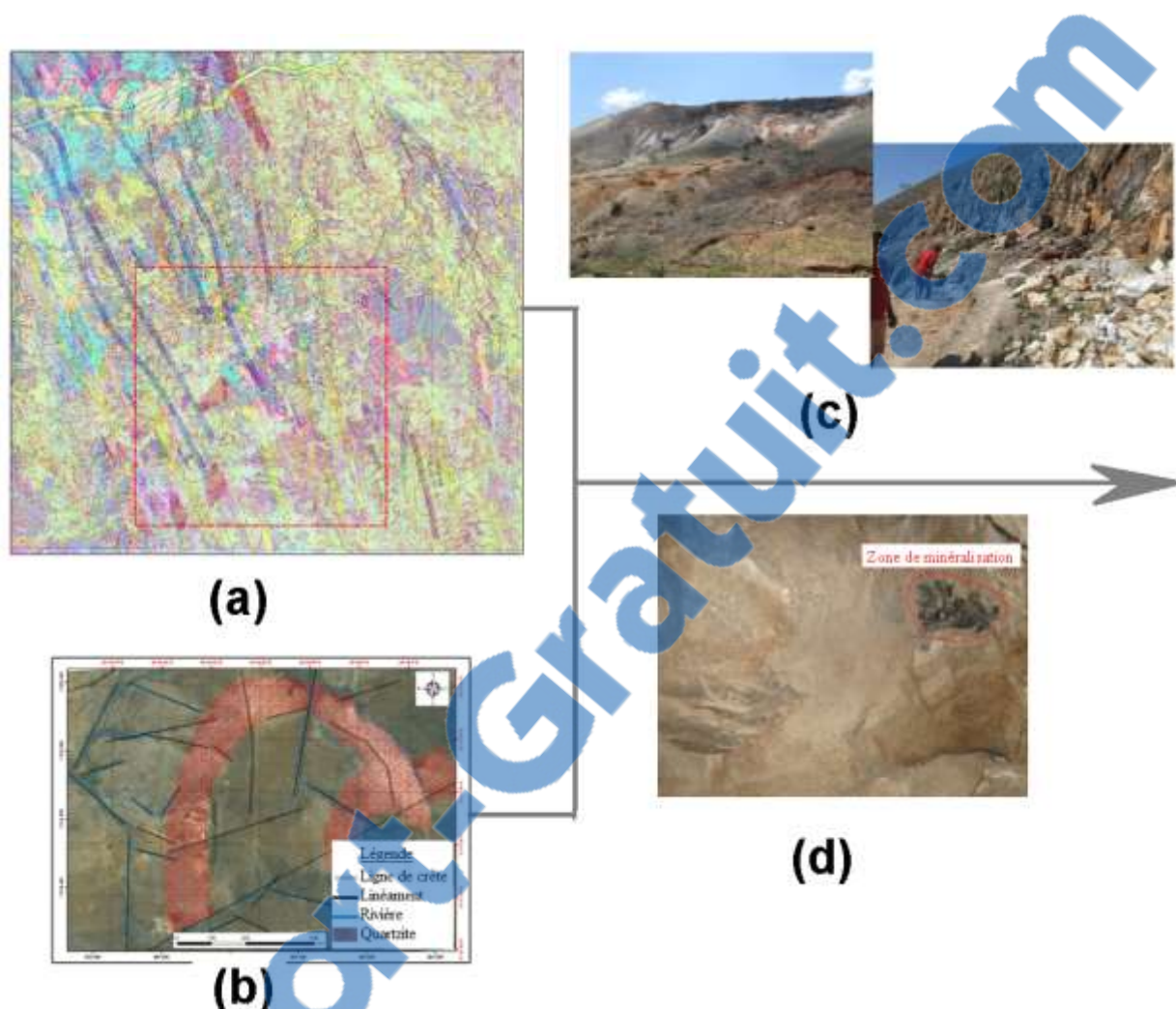


Figure 16: (a) - Télédétection, (b) – Photo-interprétation, (c) – Observation géologique, (d) – Gîtologie

La prospection géophysique ne sert qu'à détecter l'anomalie provoquée par la variation de propriété physique dans ce cas d'étude (Figure 17) (Rakotomalala P., 2011, Rakoto et al, 2012).

On va prendre le cas de la localisation des poches de minéralisation de tourmaline. La formation cible est encaissée dans la pegmatite compacte. L'encaissant devient beaucoup plus molle au niveau de la poche de minéralisation et elle y est aussi légèrement boueuse. Les deux propriétés physiques donnant les contrastes : (de) vitesse sismique et (de) résistivité électrique amènent à adopter deux méthodes complémentaires : la sismique et l'électrique en courant continu.

Les coupes de profil traversant les zones de contact de structure, observées et mises en évidence par la télédétection, ont mis en évidence des lobes d'anomalies électriques et sismiques (Figure 17). Les informations convergent et semblent indiquer la présence de corps à caractéristiques physiques différentes de celles des encaissants. Ainsi, on a proposé ces lieux pour la fouille de vérification.

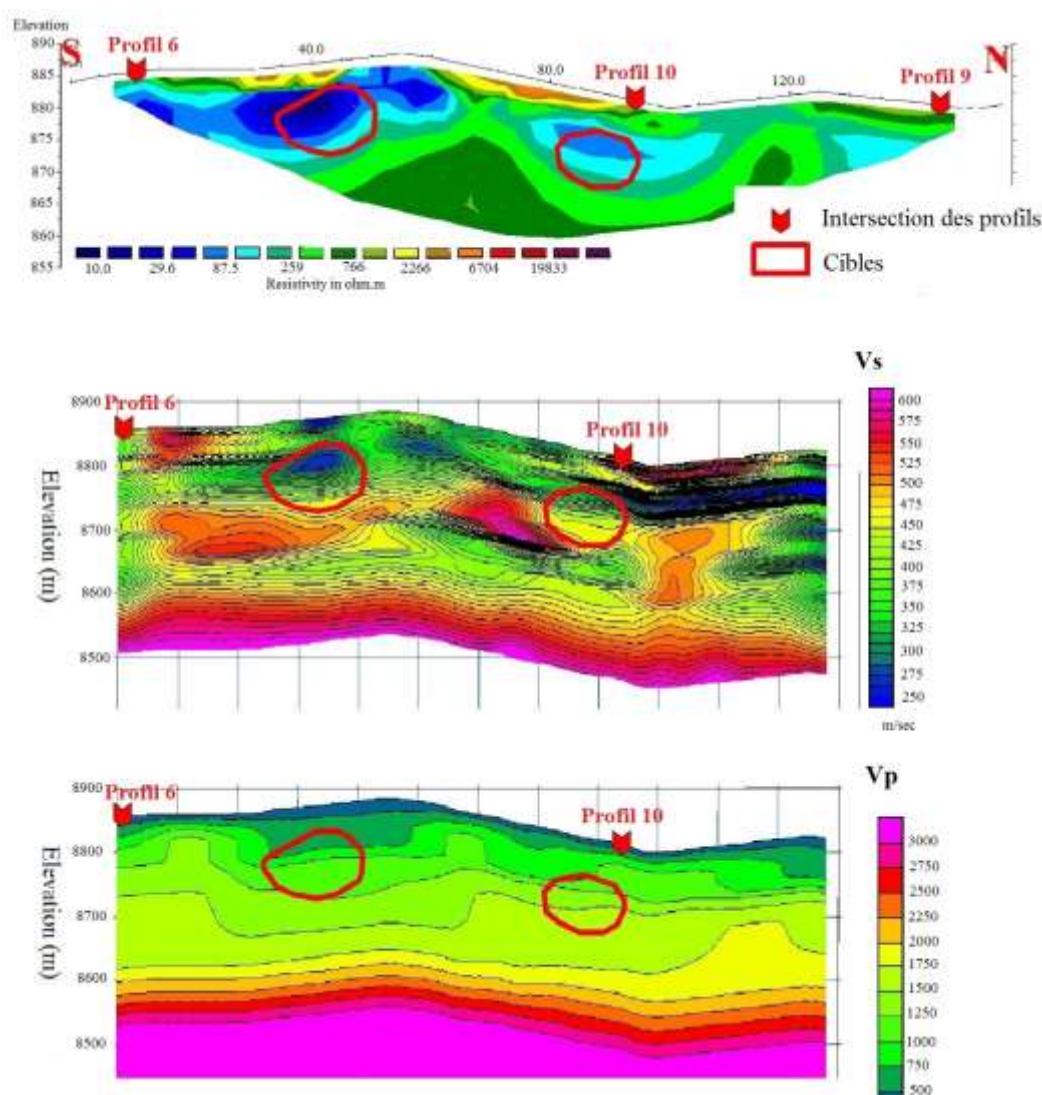


Figure 17: Coupes géophysiques de résistivité électrique et de vitesse de propagation des ondes V_s et V_p .

Le résultat de fouilles effectuées juste après l'étude a montré que l'anomalie mise en évidence par la géophysique est formée de poches plus ou moins visqueuses qui abritent les lentilles de tourmaline recherchées. La production a subi une hausse considérable après l'utilisation de l'investigation géophysique.

En outre, on a essayé d'appliquer la même technique sur un autre gisement de tourmaline. Cependant, les anomalies de vitesse et de résistivité électrique trouvées ne proviennent pas de poches de minéralisation recherchée, *cas de gisement de tourmaline dans le bas-fond, Ambositra*. Elles sont produites par le changement d'autre propriété physique (Teneur en argile).

On a aussi utilisé, dans le cas de la localisation de l'indice indiquant la présence de minéralisation, la méthode de reconnaissance simple comme la cartographie magnétique (cas de l'étude du gisement d'or de Dabolava, d'Andimaka et d'Analasarotra en 2005, 2007 et 2008, rapport de la SGDM), la cartographie gravimétrique, la cartographie de potentiel naturel (*cas de reconnaissance et délimitation des graphites, zone Brickaville, 2016 et 2017*), (Rakoto et al, 2018).

Ce travail a nécessité l'appui de la géologie qui guide la mise en place et le choix du pas de mesure en géophysique. Une fois que la carte a été établie, la vérification des différentes gammes de valeur mises en évidence a été fortement conseillée avant toute interprétation de structure de la cible.

La géophysique a beaucoup facilité la localisation de la zone de minéralisation, tant en forme filonienne qu'en forme de poche. La géophysique a été efficace et précise dans ce cas d'étude d'extension de filon de minéralisation et elle a été souvent mise à l'épreuve. Et pourtant, son utilisation a été beaucoup plus délicate dans le cas d'une poche parce qu'on y a atteint souvent la limite de résolution de méthode (profondeur assez grande devant la dimension de la cible).

II.2.3 Reconnaissance structurale

Devant l'avancée de la technologie de traitement de données, la reconnaissance structurale fait intervenir des études multidisciplinaires. Les données géophysiques sont souvent aéroportées, à défaut de données satellitaires. Elles sont utilisées en appui à la cartographie des structures géologiques et des accidents qui les affectent ou pour détecter des concentrations de minéraux particuliers.

Les interprétations des données magnétiques, gravimétriques, de spectrométrie gamma et de télédétection satellitaire, contraintes par les observations de terrain, ont prouvé leur efficacité pour déchiffrer la hiérarchie des cadres litho-structuraux régionaux des terrains (Thomas E., 2002). De façon similaire, l'intégration des données géophysiques aéroportées (aéromagnétique et spectrométrie) a été appliquée lors de renouvellement de la cartographie géologique de Madagascar, dans le cadre du projet PGRM.

J'ai utilisé également ces données aéromagnétiques et radiométriques lors de mes travaux de recherche intitulés respectivement *Étude de 32 parcelles minières et Etude structurale et évaluation minière de la zone aurifère des feuilles Tsaratanana (P41), Tampoketsa Bevoromay (Q41), Betrandraka (P42) et Ambatobe (Q42), en 2008*. Les données utilisées lors de cette étude proviennent du levé de projet PGRM.

La prospection aéromagnétique a pour objet la mesure des variations du champ magnétique terrestre, causées par des modifications des propriétés magnétiques des structures et des formations

géologiques de subsurface. L'aimantation d'une roche peut avoir été acquise lors de sa création ou lors des évolutions qu'elle a subies sous l'influence d'un champ magnétique ancien (aimantation rémanente) ou induit par le champ actuel.

$$\overrightarrow{H_{roche}} = \overrightarrow{H_{induit}} + \vec{I}(2)$$

$\overrightarrow{H_{roche}}$: vecteur de Champ magnétique de roche,

$\overrightarrow{H_{induit}} = \aleph \overrightarrow{H_p}$ vecteur de Champ induit, avec \aleph : Susceptibilité magnétique et $\overrightarrow{H_p}$ le vecteur de champ principal

\vec{I} : vecteur d'Aimantation rémanente.

La radiométrie spectrale permet d'évaluer, le contraste des concentrations des radioéléments (Uranium, Thorium et Potassium) les plus fréquents dans les sols et les formations géologiques affleurantes. Ces contrastes sont ensuite interprétés en termes de lithologie du socle et de caractérisation des formations superficielles et de l'altération.

Un levé radiométrique aéroporté permet d'obtenir rapidement une cartographie géochimique du sous-sol. Comme les autres techniques de géochimie du sol, cette méthode donne accès à la composition des matériaux de surface.

Les effets de l'altération et du métamorphisme modifient fortement la teneur en radioéléments :

- oxydation et lessivage des granites qui se déposent ensuite dans des formations sédimentaires éloignées, tandis que le Thorium qui n'a pas de forme soluble, se déplace peu, d'où une diminution de rapport U/Th.
- transport du potassium par l'eau sous forme colloïdale et dépôts dans des sédiments argileux
- enrichissement en potassium des formations acides sous l'effet du métamorphisme et de l'altération.
- concentration en éléments radioactifs dans certaines formations détritiques (concentration en minéraux lourds - enrichissement en thorium, en mica ou en feldspath - enrichissement en potassium).

Enfin, l'utilisation de la géophysique, dans l'étude structurale, permet l'identification d'un certain nombre de faits géologiques, connus pour certains d'entre eux depuis les observations de terrain. Il s'agit principalement de zonations géochimiques et plus principalement de la zonation de l'endroit à potentialité minière élevée.

La compilation des données aéroportées et satellitaires conduit à l'élaboration des cartes

structurales et géologiques. Le modèle numérique de terrain aide à l'établissement des lignes morphostructurales existant dans la zone d'étude.

La Figure 18 ci-après donne le schéma synoptique de l'élaboration de carte structurale à partir des données géophysiques, aéroportées et satellitaires. On utilise l'approche multidisciplinaire faisant intervenir, la géophysique, le plus souvent aéroportée, la télédétection et la géomorphologie, pour faire sortir les cartes structurales et géologiques. Les résultats de modélisation et de cartographie seront ensuite compilés en utilisant le Système d'Information Géographique, SIG. Il est à noter que les résultats issus du SIG nécessitent la vérification et la validation sur terrain avant d'être adoptés.

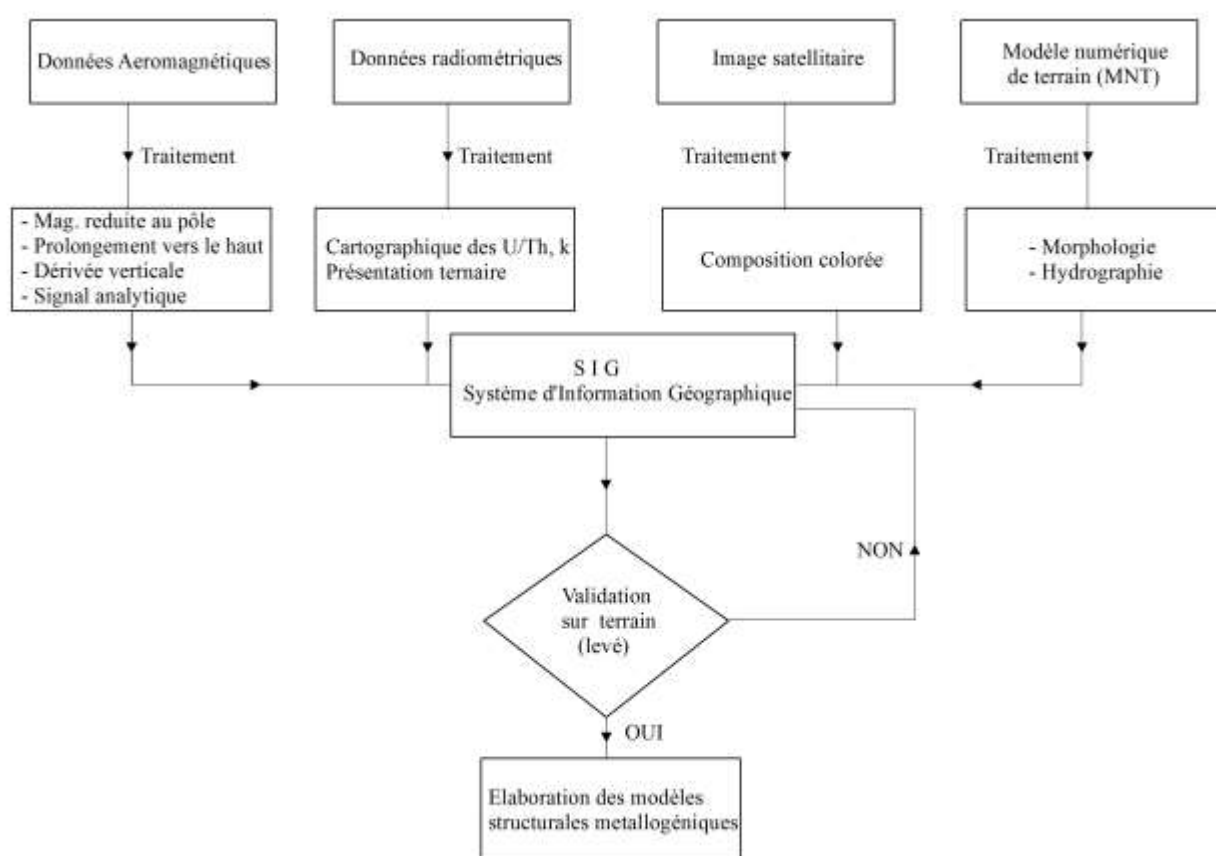


Figure 18: Synoptique de l'étude structurale utilisant les données géophysiques

En conclusion, l'approche utilisant la méthode géophysique a permis l'obtention d'un schéma structural cohérent dans l'ensemble avec les données de la géologie classique. Elle a permis en outre de mettre en évidence des structures profondes, non affleurantes, (mais) dont le rôle dans l'histoire géologique d'une région peut-être primordial. Elles ont enfin permis de différencier assez aisément les différentes unités géologiques et faciliter les différenciations (spectrométrie) au sein d'une même unité. Ces outils ont ainsi pu servir de support majeur, notamment dans les régions où

la connaissance géologique est réduite.

II.2.4 Géotechnique et structure mécanique du sous-sol

La reconnaissance au préalable de terrain d'implantation d'un grand ouvrage est une étape inévitable avant toute construction. Cette reconnaissance guide aux dimensionnements des différentes unités à mettre en place.

La géophysique intervient dans la reconnaissance des caractéristiques mécaniques (Mari J.-L, 1998) et de la disponibilité en eau souterraine du lieu d'implantation. Elle intervient parfois dans la détermination de l'état zéro ou état initial d'un lieu dans le cas d'étude d'impact environnemental d'un projet.

Dans le cas de l'étude d'un tracé de tunnel, que ce soit pour un barrage hydroélectrique que pour la voie d'accès, la géophysique a pour objet de définir l'état du socle rocheux sous-jacent. La stabilité et le dimensionnement de l'ouvrage à mettre en place dépend de cet état.

La résolution de l'équation différentielle reliant les lois de Newton 1687 et la loi de Hooke, 1678 (Telford et al, 1990), donne la solution suivante pour les vitesses des ondes de propagation des vibrations mécaniques.

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \text{ et } V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

Où V_P et V_S sont les vitesses des ondes longitudinales et transversales ou cisaillements (en m/s)

λ est le premier coefficient de Lamé et μ est le module de cisaillement (en Pa)

ρ masse volumique (en Kg/m^3).

Comme les ondes transversales donnant V_S arrivent après les ondes longitudinales de vitesse V_P , alors, il est difficile d'identifier l'arrivée des ondes transversales dans le sismogramme. Cette technique d'identification permet de définir directement la vitesse V_S .

Suite au développement de l'étude des ondes de surface, l'utilisation de l'analyse en multicanaux des ondes de surface, MASW, qui est axée sur l'étude des ondes de type Rayleigh (Park et al, 1999), nous permet de déduire les variations de vitesse des ondes de cisaillement V_S . L'algorithme de calcul est développé par Park et al en 1999.

On peut définir les propriétés mécaniques du sous-sol d'après les relations reliant la contrainte et

la déformation de la loi de Hooke, à partir des vitesses des ondes longitudinales par l'intermédiaire de pointage des ondes des premières arrivées et des vitesses des ondes transversales en utilisant l'analyse multicanal des ondes de surface ou Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW).

On utilise souvent dans le cas d'étude de stabilité d'un terrain le paramètre module d'incompressibilité ou module d'élasticité isostatique K qui traduit la variation de volume d'un corps donné suite à l'application d'une pression hydrostatique.

$$k = \lambda + \frac{2}{3}\mu \quad (4)$$

K : module d'incompressibilité en (Pa)

μ : coefficient de Lamé ou module de cisaillement ou module de rigidité en (Pa)

λ : constante de Lamé en (Pa)

On peut calculer ce paramètre en connaissant les deux vitesses V_p , V_s et ρ masse volumique.

$$k = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (5)$$

On a mis en œuvre cette technique lors de la reconnaissance de la stabilité du sol qui va recevoir une centrale hydroélectrique à Bevory (Rakotonirina et al, 2018, *rapport d'expertises de la SGDM*).

Le lieu est situé sur un terrain où la géologie est relativement complexe. Le terrain y est formé des migmatites rubanées à amphibole et biotite, de gneiss à amphibole, de granite migmatitique, de migmatite granitoïde, de migmatite dioritique ou syénitique à facies malgachitique (Besairie, 1964). C'est une zone métamorphique où les roches se sont déposées en nappe d'extension globalement Nord-Sud (Figure 19a). L'épaisseur des couvertures latéritiques est différente d'une formation à une autre et l'état mécanique de substratum rocheux sous-jacent est variable d'un endroit à un autre.

En conséquence, la reconnaissance détaillée de la structure de terrain a été recommandée. Elle a été axée plus particulièrement à la détermination des propriétés mécaniques du sol et du sous-sol dans les zones d'implantation d'importantes unités de la centrale (barrage de rétention et unité de transformation (turbine)).

Des profils sismiques coupant le prolongement des formations ont été implantés, le premier dans la zone d'Amboahangibe où le barrage de rétention d'eau sera implanté et les trois autres dans la zone de Nosimparihy, lieu d'implantation de l'usine de transformation.

Les coupes de module d'incompressibilité volumique (Figure 19(c1 et c2)) ont mis en évidence des discontinuités de structure qui se manifestent en variation brusque de l'épaisseur de couche de couverture.

La ligne 1, traversant la formation de gneiss à amphibole et la nappe de granite à micas, a rencontré deux discontinuités (1) et (2) qui matérialisent la zone de contact entre le gneiss encaissant et la nappe.

La ligne 2 a rencontré une discontinuité de formation qui se manifeste comme linéament en surface.

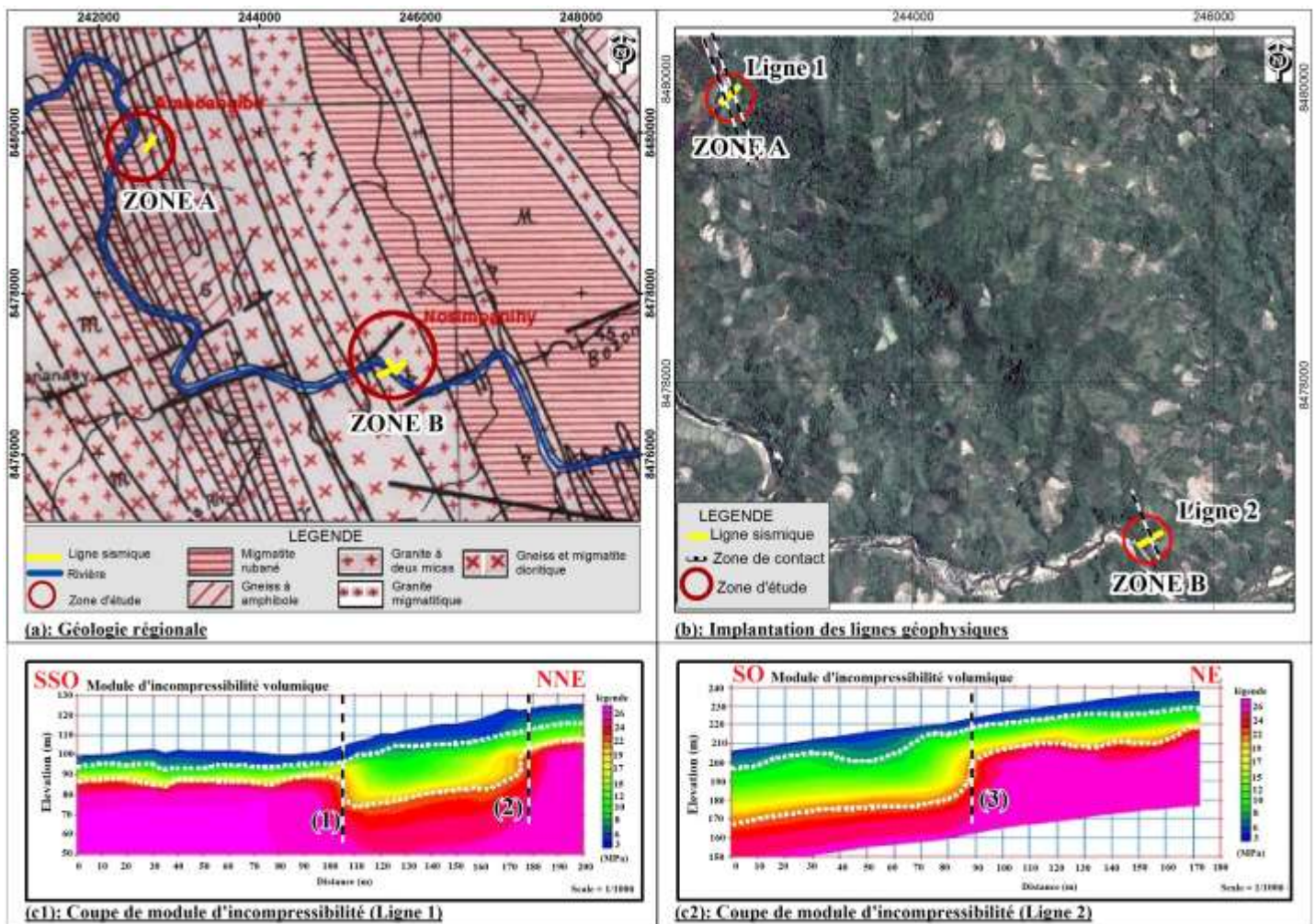


Figure 19: Les coupes de module d'incompressibilité pour l'étude d'un barrage

La géophysique a permis de localiser avec précision la zone de discontinuité due au contact de formation. Elle a apporté des informations également sur la caractéristique mécanique (dureté

relative) de chaque formation. La zone où la couverture est relativement épaisse, zone entre les deux discontinuités (1) et (2) pour la coupe c1 et la partie Sud-Ouest pour la coupe c2 (Figure 19), est moins résistante que celle où la couverture est relativement mince.

Alors, ces lieux de discontinuités nécessitent (de) l'attention particulière pour l'installation de future unité de la centrale hydro-électrique.

Dans ce même domaine, des études ont été menées par notre équipe en trois sites d'implantation d'usine de transformation d'éthanol à Madagascar, dont un à Namakia, un à Ambilobe et un à Brickaville. L'objectif de notre intervention a été d'étudier au préalable les caractéristiques mécaniques de terrain de réception de ce projet, surtout de connaître la disponibilité en eau des sites parce que l'opération de transformation nécessite beaucoup d'eau (*Rapports des projets et expertises entrepris, au titre de la SGDM et du LGA, paragraphe 4.3.3.2.4 du Volume I*)

Des modifications ont été apportées, dans le but d'optimiser l'exploitation du terrain d'implantation, sur le plan de disposition de chaque unité de transformation après notre intervention.

En bref, la reconnaissance et la prospection géophysiques contribuent beaucoup à la réussite de projet d'installation de grand ouvrage de génie civil.

Le diagnostic et le test utilisant l'outil géophysique sont vraiment nécessaires à l'étude d'un terrain de réception d'ouvrage de génie civil. La géophysique, du fait qu'elle est non destructive, est facile et rapide aussi à mettre en œuvre. Parfois on l'utilise pour avoir de l'information indirectement (cas de corrosivité, cas de stabilité dans l'étude de ripabilité,...etc.).

II.2.5 Détection et localisation d'un objet particulier

L'efficacité et la résolution d'une méthode dépendent essentiellement du contraste de paramètre physique considéré entre l'encaissante et la cible, et du pas de l'échantillonnage.

On risque de rater la cible si le pas de mesure est large. On doit tenir compte dans ce cas, de la forme et de la profondeur du corps cible.

On va prendre comme cas d'étude ici, la localisation des cavités sous le boulevard Poincaré, le fameux Bord de Mahajanga (Figure 20).

Lors de passage du cyclone Gafilo, la mer a inondé la chaussée du boulevard Poincaré. Lors de sa régression, elle a emporté les matériaux fins constituant le remblai sous l'asphalte. Ce mouvement de matériaux a créé des vides sous la chaussée.



Figure 20: Localisation de la zone d'étude et état des lieux après le passage du cyclone Gafilo

Seule, la reconnaissance géophysique peut déterminer les différentes zones contenant des cavités souterraines, sans recourir au décapage systématique de toutes les chaussées.

Les méthodes géophysiques utilisées pour le diagnostic du sous-sol doivent répondre aux impératifs suivants dans ce cas:

1. détecter les variations spatiales de la structure du remblai se trouvant juste sous l'asphalte
2. avoir une bonne résolution latérale et verticale et dans la mesure du possible, détecter et localiser les cavités
3. rendre compte des variations éventuelles de la nature physique du corps cible, la cavité est électriquement résistante à marée basse et elle devient conductrice à marée haute
4. s'adapter à un environnement urbain extrêmement dense et s'exécuter dans un temps très bref.

Ces impératifs nous ont amené à adopter la méthode d'imagerie par tomographie électrique

permettant d'établir la coupe géoélectrique du sous-sol et dont la mise en station est vraiment commode dans un environnement urbain.

Il est à noter que le changement de caractéristique électrique du corps cible a posé des problèmes d'interprétation au début et on a effectué seulement les mesures pendant la marée basse.

Pour avoir la meilleure résolution, on a dû revoir la notion de sensibilité des dispositifs électriques pour la technique d'imagerie. La fonction de sensibilité permet de se faire une idée dans quelle mesure les variations de résistivité du terrain influencent la mesure de la différence de potentiel. Plus la valeur de cette fonction est élevée à proximité des électrodes, plus elle influence la mesure de la différence de potentiel.

La sensibilité varie selon le dispositif employé (Figure 21). De façon générale, la sensibilité a une valeur élevée à proximité des électrodes, ce qui signifie qu'un objet situé à proximité de celles-ci aura un impact important sur les mesures de potentiel. Avec l'écartement des électrodes, les différences de sensibilité s'amplifient entre les différents dispositifs, Wenner, Wenner Schlumberger, Dipôle-dipôle, ...etc.

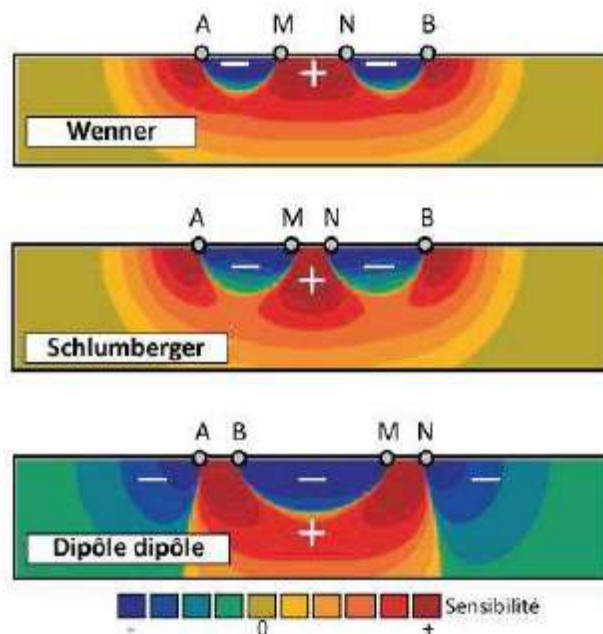


Figure 21: La sensibilité pour les dispositifs les plus courants (modifié par Dahlin et al, 2004)

La contribution d'un élément de volume de terrain homogène à la différence de potentiel est donnée par Roy et Apparao (1971). La fonction de distribution de potentiel développée par Roy permet ainsi de se rendre compte de l'influence d'un volume unitaire sur la mesure de la différence de potentiel. En l'intégrant en fonction de la profondeur, on peut calculer les coefficients (Edwards, 1977) qui permettent eux aussi d'inverser les pseudo- coupes et d'obtenir des coupes 2D du sous-

sol en résistivité et profondeur.

La présentation de la fonction de sensibilité élaborée à partir de l'équation formulée par Roy et Apparao en 1971 a été modifiée par Dahlin et al en 2004; pour plus de lisibilité. Ils ont séparé avec des signes négatifs et positifs les zones plus et moins sensibles (Figure 21).

La zone positive indique que le gradient de la différence de potentiel mesurée est élevé si le corps cible y est localisé, et inversement.

En tenant compte de la sensibilité du dispositif dipôle-dipôle pour les structures verticales, on a adopté ce dispositif en utilisant la distance inter-électrodes de 1m (Famantanantsoa N. M., 2004, Rakoto et al., 2005).

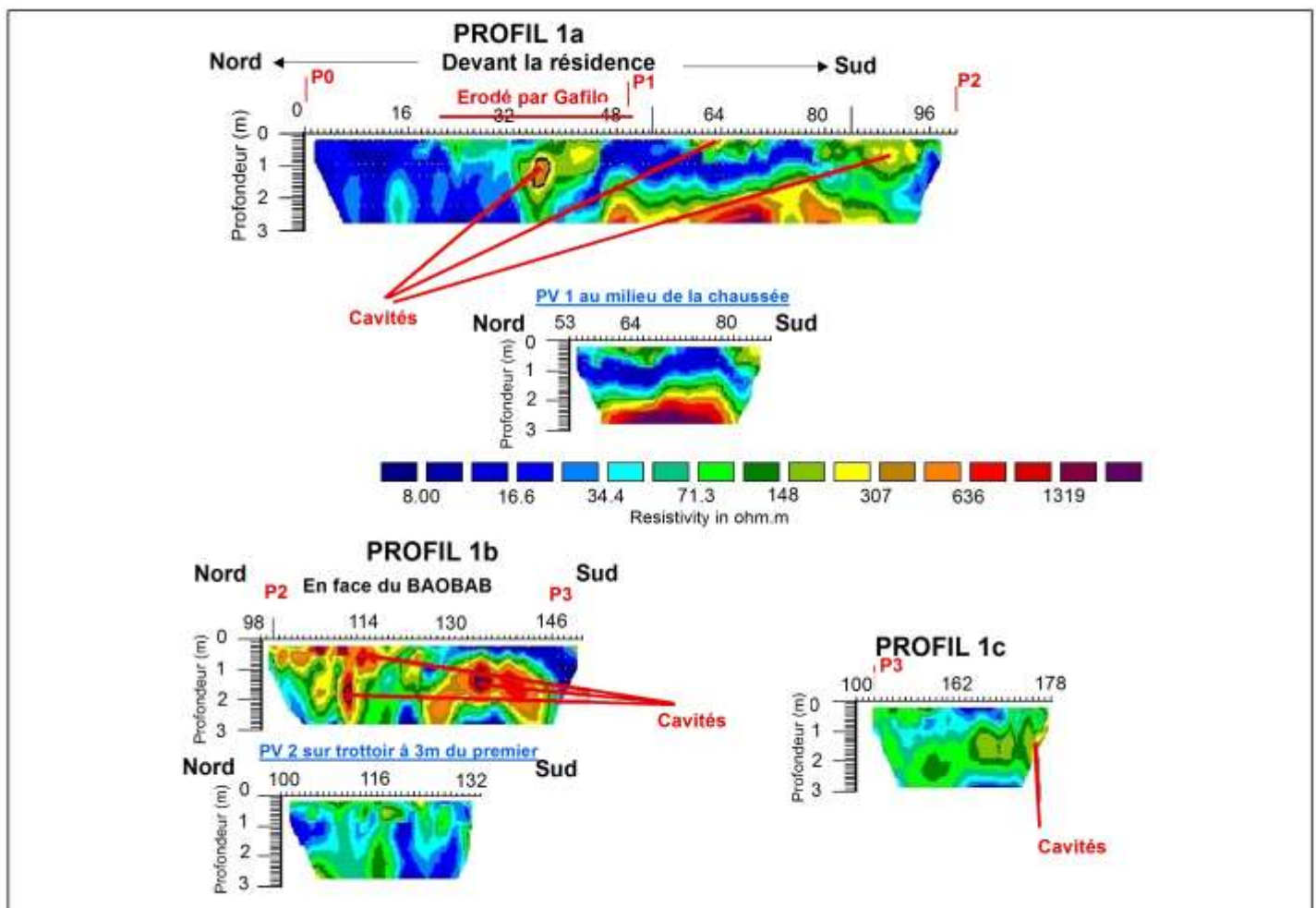


Figure 22: Les coupes géoélectriques

Les coupes géoélectriques ont mis en évidence des structures résistantes arrondies situées entre 0,25m et 2m de profondeur (Figure 22). Ces structures représentent des cavités sous la

chaussée. On a également noté la présence d'une anomalie beaucoup plus large sous le profil PV1. Cette anomalie est visible sur le Profil 1a qui se trouve beaucoup plus éloignée du bord de la mer. Le décapage effectué juste après la prospection géophysique a confirmé qu'il existe bien une cavité souterraine de diamètre environ 3m à ce lieu. La présence des buses d'évacuation d'eau d'assainissement qui sont déjà défectueuses a favorisé l'effondrement des remblais dans ce secteur.

II.3 Développement méthodologique

L'utilisation de la géophysique rencontre parfois des difficultés soit de point de vue méthodologie (la méthode a atteint sa limite de résolution), soit sur l'application d'une méthode ou d'une technique sur une situation compliquée (problème d'espace ou accessibilité quasi-impossible). Dans ce cas, les praticiens doivent trouver des astuces pour surmonter ces difficultés.

J'ai utilisé dans les deux cas développés ci-après, certaines propriétés mathématiques et physiques pour mettre en évidence des anomalies provoquées par des sources difficiles à détecter (signaux à faible amplitude à cause de sa forme et/ou de sa structure).

II.3.1 Méthode magnétique par dérivation verticale

II.3.1.1 Les anomalies du champ magnétique

En géophysique, l'anomalie est définie comme la différence entre la valeur de la grandeur mesurée et celle de la valeur de référence. La valeur de référence est donnée par l'IGRF (International Geomagnetic Field Reference) en prospection magnétique (Blakely, 1995).

$$\vec{C} = \vec{B} - \vec{R} \quad (6)$$

Avec \vec{B} vecteur champ magnétique terrestre, \vec{R} Vecteur de champ de référence après un modèle de (Blakely, 1995), \vec{C} vecteur anomalie du champ magnétique

II.3.1.2 Anomalie de l'intensité de champ magnétique

On mesure dans la pratique l'intensité du champ magnétique, noté F . Comme indiquée ci-dessus, on est intéressé particulièrement à l'aimantation induite produite par la source du champ principal qui est celui de la Terre. On va alors définir l'anomalie de l'intensité magnétique qui représente ce champ induit dénommé classiquement de façon plus succincte « anomalie du champ total ».

$$F = \|\vec{B}\| = \sqrt{\vec{B} \cdot \vec{B}} \Rightarrow F = \|\vec{R} + \vec{C}\| - R \quad (7)$$

en faisant intervenir le produit scalaire

$$\|\vec{R} + \vec{C}\| = \sqrt{R^2 + 2\cos\alpha RC + C^2} = R \sqrt{1 + 2\cos\alpha \frac{C}{R} + \frac{C^2}{R^2}} \quad (8)$$

Avec α angle entre \vec{R} et \vec{C}

L'intensité de l'anomalie est souvent très faible devant le champ principal. La différence nous amène à l'introduction de développement limité.

$$\text{On peut écrire } \frac{\|\vec{R} + \vec{C}\|}{R} = \left(1 + 2\cos\alpha \frac{C}{R} + \frac{C^2}{R^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

On peut calculer ici le développement limité de la racine et on obtient F_1 l'intensité d'anomalie magnétique d'ordre 1.

$$F_1 = C \cos\alpha$$

Géométriquement, le terme F_1 n'est que la projection du champ d'anomalie dans la direction du vecteur champ de référence.

L'analyse vectoriel montre que $\vec{C} = \text{rot } \vec{A}$

\vec{A} , Potentiel vecteur du vecteur champ magnétique

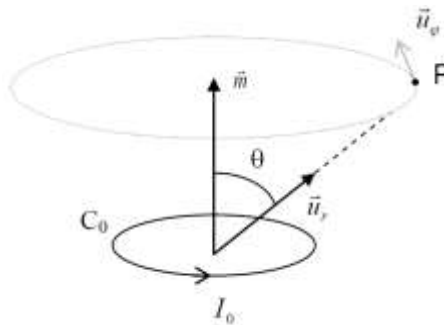


Figure 23: Représentation d'un dipôle magnétique

D'après le calcul, on obtient $\vec{A}(P) = \frac{\mu_0 \vec{m}_0 \wedge \vec{u}_r}{4\pi r^2}$ or $-\frac{\vec{u}_r}{r^2} = \vec{\nabla}\left(\frac{1}{r}\right)$

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \vec{\nabla}\left(\frac{1}{r}\right) \wedge \vec{m}_0 \quad (10)$$

$\vec{A}(P)$: Potentiel vecteur d'un champ dipolaire \vec{m}_0 en un point P de l'espace

μ_0 , perméabilité magnétique du vide, $4\pi \cdot 10^{-7} \text{kg.m.A}^{-2}\text{s}^{-2}$

\vec{m}_0 , champ dipolaire créé par une boucle de courant d'intensité I_0 , (Figure 22)

$$\vec{m}_0 = I_0 \vec{\delta} = m_0 \cdot \vec{r}_s \quad \text{avec} \quad m_0 = I_0 \pi R^2 \text{ en } \text{s.m}^2$$

Hors des charges et des boucles de courant on a l'équation, $\vec{\nabla} \vec{C} = 0$, ce qui signifie qu'il existe un potentiel scalaire associé au \vec{C} . On va noter U ce potentiel scalaire

$$U(P) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \vec{m}_0 \vec{\nabla} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (11)$$

$\vec{\nabla}$, est l'opérateur gradient dans le repère choisi, on définit alors l'opérateur de dérivation oblique dans la direction de l'aimantation par $\nabla_\mu = \vec{\mu} \cdot \vec{\nabla}$. Cet opérateur revient à projeter le gradient dans la direction de \vec{m}_0 . $U(P)$ devient alors

$$U(P) = -\frac{\mu_0}{4\pi} m_0 \cdot \nabla_\mu \left(\frac{1}{r} \right) \quad (12)$$

En posant $\widetilde{m}_0 = \frac{\mu_0 m_0}{4\pi}$, on peut exprimer le potentiel sous forme

$$U(P) = -\widetilde{m}_0 \nabla_\mu \left(\frac{1}{r} \right) \quad (13)$$

Si le dipôle est repéré par $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$, il suffit de convoluer le potentiel à l'origine par la distribution de Dirac δ .

$$U(P) = -\widetilde{m}_0 \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) * \nabla_\mu \left(\frac{1}{r} \right) \quad (14)$$

(*) est un produit de convolution.

Soit $\vec{C}(P)$ le champ magnétique au point P généré par le dipôle ; sachant qu'il n'y a pas de courant hors de la boucle alors $\vec{\text{rot}} \vec{C} = \vec{0}$. On peut déduire qu'il existe un potentiel scalaire, dans ce cas on a (10):

$$\vec{C}(P) = -\widetilde{m}_0 \vec{\nabla} \left(\nabla_\mu \frac{1}{r} \right) \quad (15)$$

Si le dipôle est repéré par $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$, dans ce cas on peut exprimer $\vec{C}(P)$ sous forme.

$$\vec{C}(P) = -\widetilde{m}_0 \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) * \vec{\nabla} \left(\nabla_\mu \frac{1}{r} \right) \quad (16)$$

(*) est un produit de convolution.

On a vu que F_1 est la projection de l'anomalie dans la direction du vecteur champ de référence. Soit $\vec{\rho}$ le vecteur unitaire de cette direction.

$$F_1 = \vec{\rho} \vec{C}(P), \text{ soit } \nabla_\rho = \vec{\rho} \cdot \vec{\nabla} \text{ dans ce cas } F_1 = -\widetilde{m}_0 \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) * (\nabla_\rho \nabla_\mu \frac{1}{r}) \quad (17)$$

II.3.1.3 Dérivée d'Anomalie d'Intensité du Champ Magnétique

On va utiliser dans ce qui suit la dérivée verticale de F_1

$$\frac{\partial}{\partial z} F_1 = -\frac{\partial}{\partial z} (\widetilde{m}_0 \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) * (\nabla_\rho \nabla_\mu \frac{1}{r})) \quad (18)$$

En géophysique, les données des levés sont toujours réduites à une altitude constante $z=h$. Cette réduction nous amène à travailler dans un plan 2D.

Pour rendre l'équation de la dérivation verticale beaucoup plus facile, on va travailler par la suite dans le domaine spectral. On va utiliser la transformation de Fourier

En utilisant la propriété de la transformation de Fourier, on a

$$TF\left(\frac{\partial}{\partial z} F_1\right) = \frac{\partial}{\partial z} TF(F_1), \text{ soit } \overline{F_1} \text{ la transformée de Fourier de } F_1.$$

On a enfin

$$TF\left(\frac{\partial}{\partial z} F_1\right) = \sqrt{u^2 + v^2} \overline{F_1}(u, v, h) \quad (19)$$

u et v sont successivement les pulsations angulaires associées à x et y

h est le niveau du levé

$$\text{Avec } \overline{F_1}(u, v, h) = \frac{\widehat{m}_0}{2\pi s} e^{-|h-z_0|s} (iLu + iMv - Ns)(ilu + imv - ns) \overline{S_d}(u, v)$$

$$s = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\overline{S_d}(u, v) = TF(\delta(x - x_0, y - y_0)) = \frac{1}{2\pi^2} (e^{-iux} e^{-ivy})$$

$$TF(\nabla_\rho) = (iLu + iMv - Ns)$$

$$TF(\nabla_\mu) = (ilu + imv - ns)$$

En 2D $\frac{1}{r} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (h - z_0)^2}}$ h est l'altitude du plan de mesure et (x_0, y_0, z_0) est les coordonnées du point de la source dipolaire.

$$TF\left(\frac{1}{r}\right) = TF\left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (h - z_0)^2}}\right) = \frac{1}{2\pi} \frac{e^{-|h-z_0|s}}{\sqrt{u^2 + v^2}}$$

Le terme $\sqrt{u^2 + v^2}$ augmente l'amplitude de la transformée de Fourier des signaux à courte longueur d'onde.

Dans la pratique, surtout dans les données aéroportées, plusieurs structures peuvent être imbriquées l'une dans l'autre et pourtant ne générer qu'une seule anomalie. Ainsi, l'opérateur de dérivation introduit à l'équation résultante, association des différentes sources, permet d'individualiser les signaux provenant des sources proches. Il amplifie les courtes longueurs d'onde au détriment des grandes longueurs d'onde.

Il est à noter que cet opérateur peut aussi être employé pour distinguer les anomalies de proche surface masquées par le signal du socle.

II.3.1.4 Application dans la zone volcanique de l'Est de Madagascar

Le problème se pose souvent dans la délimitation des filons de roche magmatique se trouvant dans une zone métamorphique à caractéristique magnétique. Les anomalies produites par les roches magmatiques sont cachées à l'intérieur de l'anomalie régionale (effet de roche encaissante).

La zone d'étude se trouve dans le système de Vohibory de l'Est de Madagascar formé essentiellement de micaschiste, de gneiss et de migmatite (Figure 24a). Les roches sont caractérisées par des corps ultrabasiques intrusifs complexes, en filons et en lentilles, notamment les basaltes à faciès doléritiques, et les microgranites appartenant à la famille de roches filoniennes. Ces filons résultent du remplissage des fractures récentes du socle qu'ils occupent avec une direction globalement Nord Sud. Ces roches filoniennes nous ont intéressé parce qu'elles sont utiles comme matériaux de construction (roches d'empierrement). Leurs localisations nécessitent le déploiement de techniques pouvant donner des précisions.

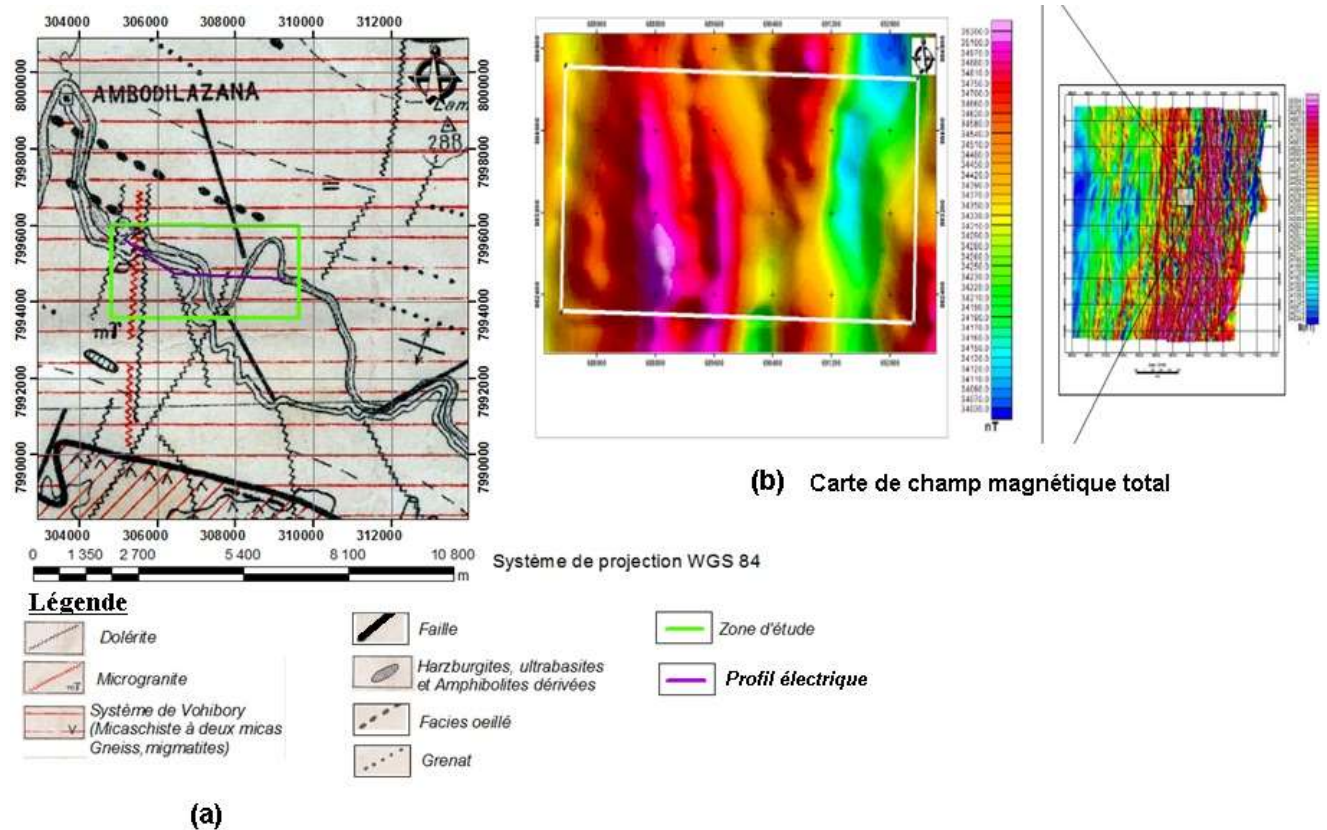


Figure 24: Géologie régionale et carte de champ magnétique

Un filon de microgranite et trois filons de dolérite longent la partie Ouest de la zone d'étude. En utilisant la propriété de la dérivée verticale développée précédemment, on a établi la carte de gradient vertical du champ magnétique provenant d'un programme de levé aéroporté (Figure 25c).

Le gradient vertical a mis en évidence trois lignes à gradient élevé. La superposition de la carte de gradient avec la carte géologique confirme que les anomalies de gradient proviennent des filons de roches magmatiques (Figure 25c).

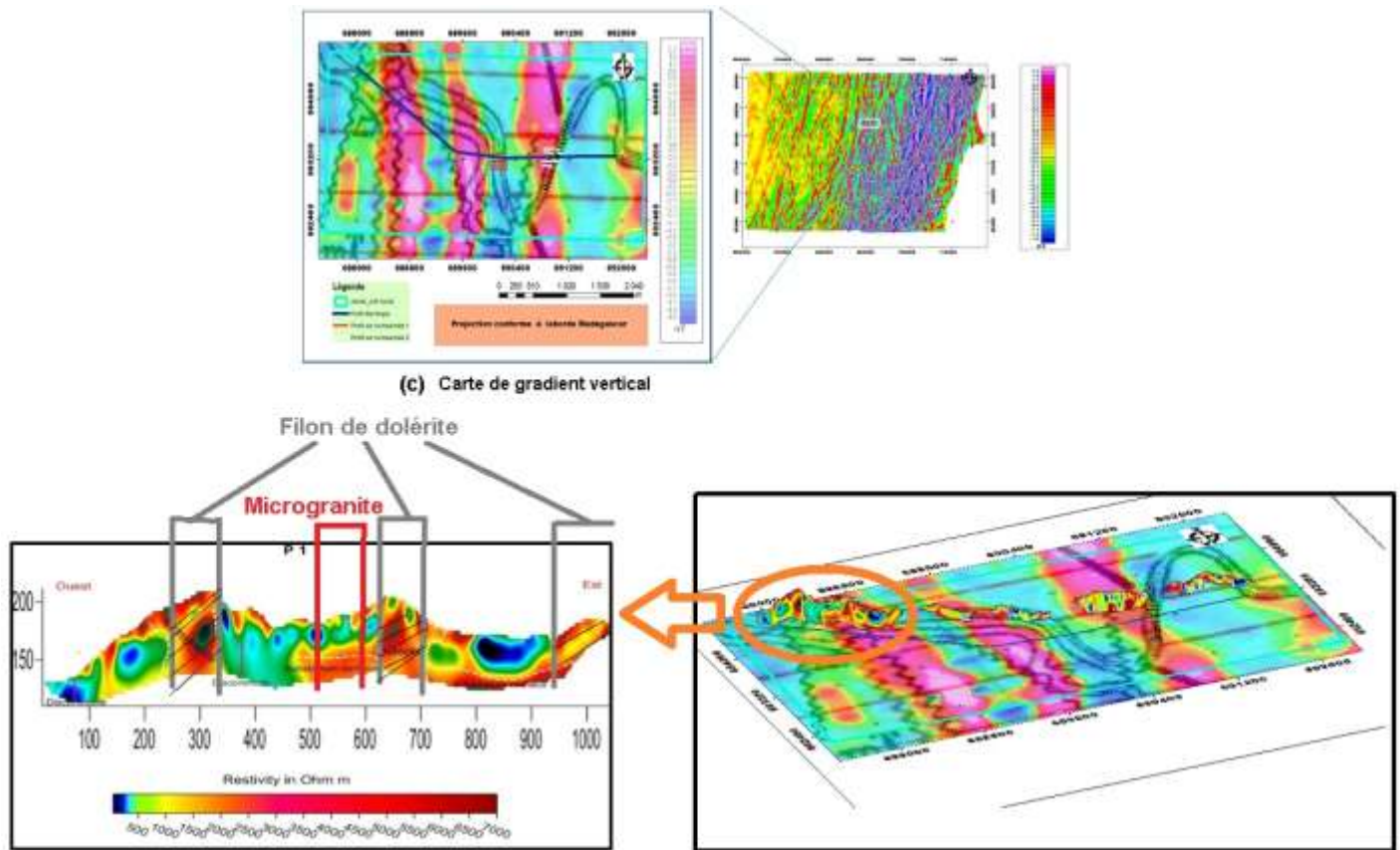


Figure 25: Cartographie magnétique et prospection électrique pour localisation des filons magmatiques

La carte de dérivée verticale a donné des anomalies aux environs des emplacements des filons de roche magmatique indiqués par la carte géologique.

On a besoin, dans le cadre d'une étude détaillée, de précision sur l'emplacement exact de ces filons. Ainsi, des lignes électriques utilisant la technique d'imagerie par tomographie électrique ont été tirées, pour bien localiser les contacts « roches magmatiques filoniennes roches métamorphiques encaissantes ».

La coupe a séparé les différentes formations traversées aussi bien la dolérite que le microgranite (Figure 25). On voit bien avec plus de précision la séparation entre les roches migmatitiques et les intrusions magmatiques.

II.3.2 Méthode combinée de polarisation spontanée et coupe géoélectrique

La plupart des ouvrages scientifiques montrent que la technique d'investigation par polarisation spontanée est bien efficace pour un gisement de type concentré et non pas disséminé (modèle de Sato et Mooney, 1960). Et pourtant, le minerai cible se trouve dans une zone latéritique où les phénomènes d'induction sont gênants à cause de la prépondérance des corps ferromagnétiques et ferrimagnétiques. On a mis en œuvre la méthode de polarisation spontanée sur le gisement de graphite disséminé qui peut également générer un potentiel naturel élevé.

La cartographie de polarisation spontanée n'a donné que la délimitation spatiale du gisement, en x et y. En conséquence, on a dû adopter une technique permettant de suivre l'épaisseur de gisement dans la zone minéralisée. On a utilisé l'imagerie de la résistivité et de la polarisation provoquée par tomographie. La cartographie permet de délimiter l'extension en surface de la réserve tandis que les coupes géoélectriques donnent la variation de l'épaisseur de la zone de minéralisation (Figure 26).

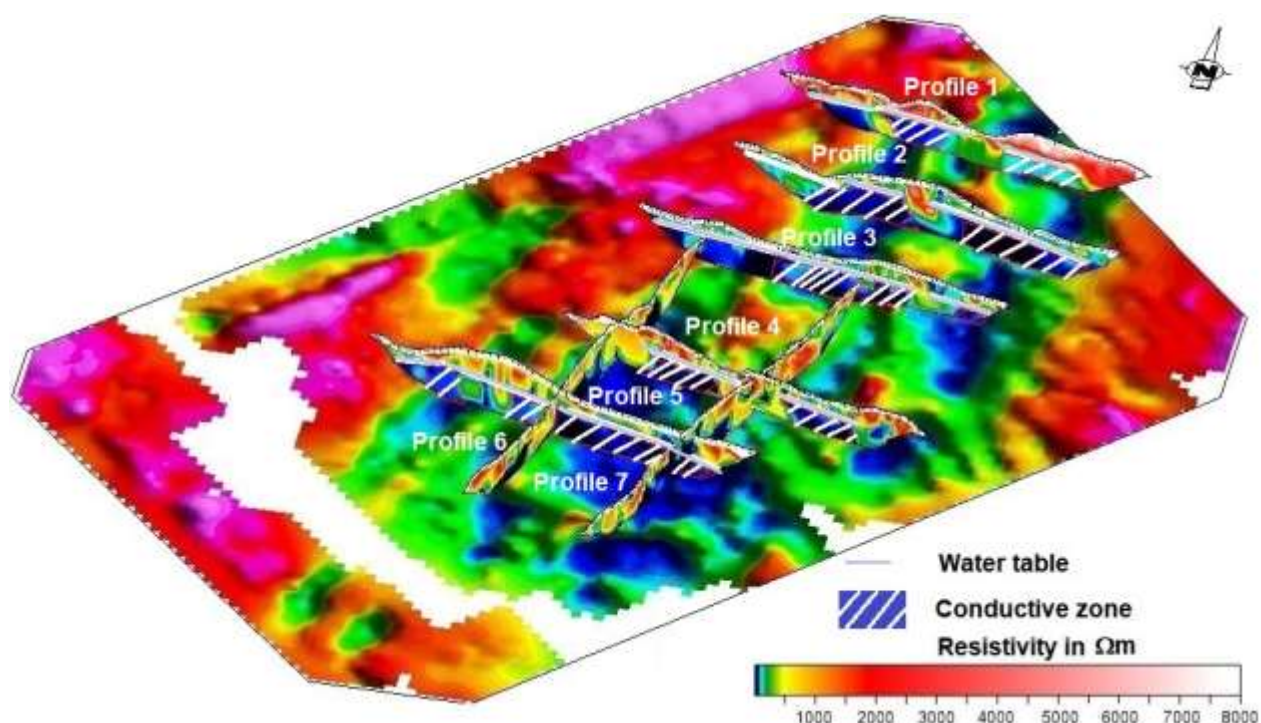


Figure 26: Utilisation combinée de PS et de coupe géoélectrique

II.3.2.1 Base méthodologique de potentiel de minéralisation

La méthode de polarisation spontanée (PS) consiste à mesurer les différences de potentiel électrique généré naturellement dans les sols. Les potentiels naturels du sol peuvent se scinder en deux composantes : une composante constante et unidirectionnelle aussi appelée potentiel minéral

et une composante variant avec le temps, dû entre autres à des processus électrocinétiques et électrochimiques (Reynolds, 1997).

La présence d'un corps conducteur, séparant deux zones de potentiels rédox (E_H) différents, constitue une cellule électrochimique appelée géobatterie (Sato et Mooney, 1960; Timm et Möller, 2001) (Figure 26). Cette géobatterie est responsable d'un champ électrique mesurable à la surface du sol (Stoll et al., 1995 ; Lile, 1996 ; Bigalke et Grabner, 1997). Prenons le cas d'un filon métallifère (pyrite, cobalt, magnétite, graphite) qui traverse le niveau piézométrique d'un aquifère.

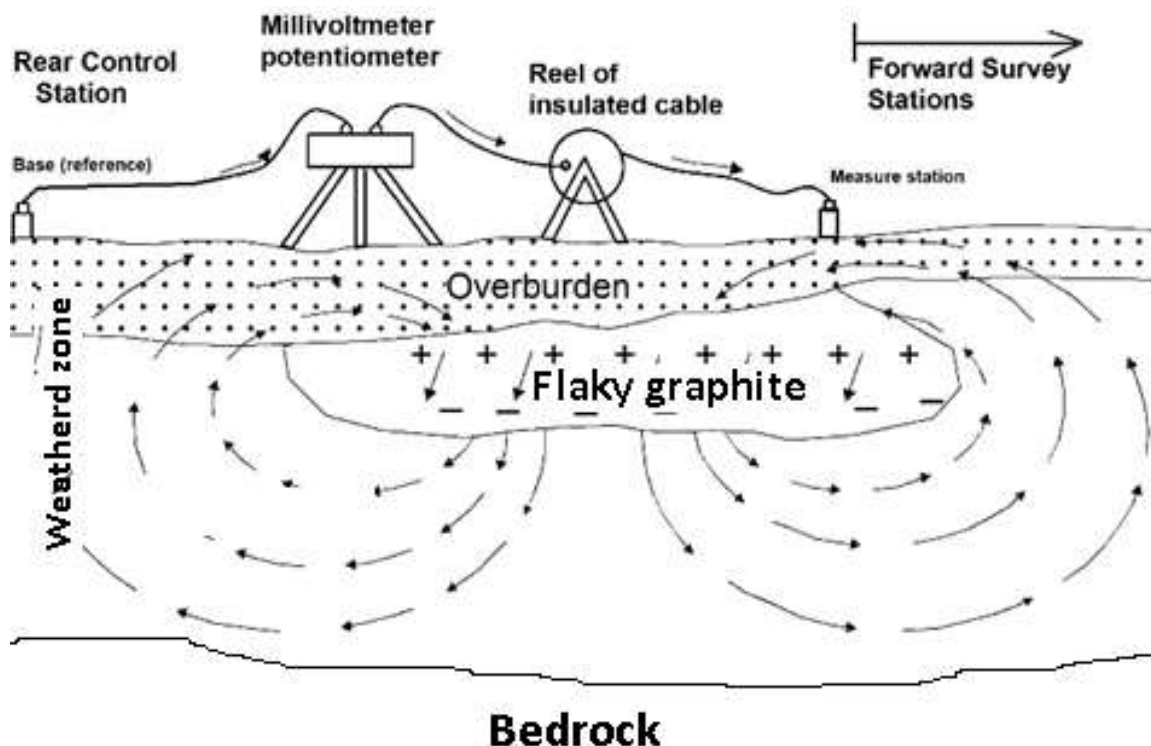


Figure 27: Schéma d'une géobatterie associée à une lentille de graphite traversant un gradient de potentiel rédox (Sato et Mooney (1960) et Stoll et al. (1995), modifié).

La partie supérieure du filon (située au-dessus du niveau piézométrique) est oxydée ($E_H > 0$), alors que la partie inférieure (située sous le niveau piézométrique) est réduite ($E_H < 0$).

Un transfert d'électrons de la partie anaérobie (en profondeur) à la partie aérobie (plus superficielle) est alors généré par le biais du minéral métallique électriquement conducteur. Simultanément, un flux d'ions est produit dans la formation géologique afin de conserver la neutralité des charges. Une densité nette de charge se crée et est responsable d'un courant électrique dont la signature électrique est mesurable en surface sous la forme d'anomalies négatives de PS.

Ce processus se passe uniquement dans la zone à charge électrique comme la graphite ou zone métallifère. Ainsi, on peut utiliser la technique de PS pour délimiter l'extension de la minéralisation.

Des tentatives ont été faites pour inverser les données de potentiel afin d'avoir le modèle à 3D de la source (Jardani et al., 2007, 2008; Mendonça, 2008; Minsley et al., 2007a; Woodruff et al., 2010). Dans tous les cas, il est essentiel d'identifier les sources de SP. Cependant, elles sont souvent inconnues et génèrent des erreurs dans l'inversion (Jackson 2015).

Alors l'inversion directe des données de potentiel n'est pas encore tout à fait au point, c'est pourquoi, j'ai utilisé d'autres méthodes, complémentaires, pour sortir la structure en 3D de gisement.

II.3.2.2 Imagerie par tomographie électrique

On va développer dans ce paragraphe les principes des méthodes électriques (Imagerie par Tomographie Electrique (ITE) et de chargeabilité). En général, toutes les méthodes électriques étudient la distribution du potentiel (pendant l'injection ERT, après l'injection PP et sans injection PS) dans le milieu pour le caractériser (Abdul Samad F., 2017).

Dans un milieu 3D, isotrope où la distribution de conductivité électrique $\sigma(r)$; le potentiel V (en V) à un point quelconque à distance r (en m) d'une source ponctuelle de courant électrique, est définie par l'équation de Poisson (Binley et Kemna, 2005):

$$\nabla(\sigma \nabla(V)) = -I\delta(r) \quad (20)$$

En imposant certaines conditions (milieu semi-infini, potentiel nul à la surface, $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$, avec δ est la fonction de Dirac et n est le normal, le calcul du potentiel se réduit à l'équation suivante :

$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (21)$$

ρ est la résistivité électrique du milieu ($\Omega.m$), I intensité de courant injecté (A) et r la distance entre le point d'injection de courant et le point considéré (m).

Dans un milieu hétérogène, le potentiel est une fonction plus compliquée. Avec les dispositifs de mesure, on introduit la notion de la résistivité apparente avec :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (22)$$

ρ_a la résistivité apparente, K le coefficient géométrique de dispositif de mesure, ΔV la différence de potentiel entre les deux électrodes de mesure, I le courant injecté.

Il existe plusieurs algorithmes dans le calcul des modèles qui sont responsables de la résistivité apparente mesurée, en 1D (Ghosh, 1971), en 2D et 3D (Loke et Barker 1996, etc...).

J'ai utilisé le logiciel d'inversion RES2DINV de Loke pour déterminer les résistivités électriques vraies à partir de la pseudo-section obtenue sur le terrain. La méthode appliquée par ce logiciel est basée sur l'optimisation par moindres carrés généralisés. La pseudo-section obtenue avec les données de terrain est divisée en un certain nombre de blocs rectangulaires dont la taille augmente avec la profondeur (Figure 28). Cette augmentation est généralement de 10 à 25 % selon le type d'acquisition (Wenner, Schlumberger, dipôle-dipôle, pôle-dipôle, pôle-pôle ...).

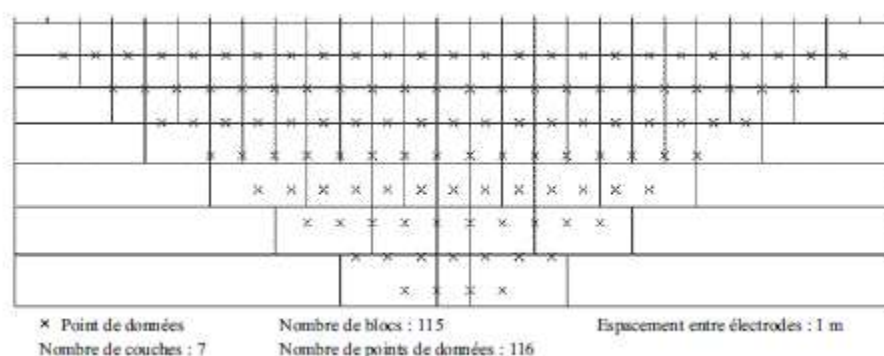


Figure 28: Représentation des blocs et des données de mesure de résistivité apparente

A chaque bloc est associée une valeur de résistivité apparente calculée à partir de l'équation (22). De façon itérative, en ajustant la résistivité vraie de chaque bloc du modèle, le logiciel d'inversion tente de minimiser une fonction coût basée sur l'écart entre les valeurs calculées et mesurées de résistivité apparente. Cette minimisation peut se faire selon une norme L1 ou L2. L'erreur RMS (Root-Mean-Square) donne une estimation de cette différence. Ce paramètre est une bonne indication de la qualité d'un profil, cependant ce n'est pas l'itération qui présente une valeur RMS la plus faible qui donne le modèle le plus juste. Quatre à six itérations suffisent habituellement pour converger vers le modèle de résistivité électrique vrai qui rend le mieux compte des observations de terrain.

Cette technique est la plus utilisée en inversion des données de panneau électrique que ce soit en mode résistivité qu'en mode polarisation provoquée.

II.3.2.3 Polarisation provoquée

Le phénomène de polarisation provoquée a été constaté et décrit par Conrad Schlumberger vers 1913 (Seigel, 1959; Seigel, 2007, Kemna et al., 2012). Il a constaté que la différence de potentiel, mesurée entre deux électrodes, ne revenait pas toujours instantanément à zéro lors de la

coupure d'un courant électrique initialement appliqué. Le potentiel décroissait progressivement vers zéro pendant un certain temps. Schlumberger a publié une monographie en 1920 (re-éditée à l'identique en 1930 (Schlumberger, 1930) sur les méthodes de prospection électrique, dans laquelle il associe, dans un court chapitre, le phénomène de décroissance lente à une polarisation du sous-sol.

Lorsqu'un courant alternatif ou en créneaux est appliqué, les charges (ions, électrons...) présentes, dans le milieu, réagissent en se déplaçant ou en se réorientant. L'ensemble des charges présentent une dépendance à la fréquence : (1) les charges ont davantage de difficultés à suivre des variations rapides du champ électrique que des variations lentes ; (2) plus la charge a une masse importante, plus sa fréquence de polarisation est basse. Pour chaque type de charge correspond un processus de polarisation qui intervient à une fréquence donnée, caractéristique du temps de relaxation du processus.

On va détailler dans le paragraphe dessous, l'utilisation de la méthode de Polarisation Provoquée (PP) à l'étude d'un gisement de graphite disséminée de Brickaville, zone Est de Madagascar. Comme, la zone de minéralisation se trouve dans la partie altérée qui contient des argiles, la polarisation provient alors des deux phénomènes : la polarisation associée à la présence des minéraux métalliques et la polarisation liée à la présence d'argiles.

De nombreux paramètres influencent significativement les mesures de PP, entre autre la nature et la teneur volumique en minéraux métalliques (Pelton et al., 1978 ; Mansoor et Slater, 2007), et la nature et la teneur volumique en minéraux argileux (Telford et al., 1990 ; Vinegar et Waxman, 1984).

Il est à noter que les mesures de polarisation provoquée peuvent être réalisées dans les deux domaines : temporel et fréquentiel (spectral). Les paramètres mesurés sont différents d'un domaine à l'autre (mais ils sont liés par les transformations de Fourier ou de Laplace).

En ce qui me concerne, j'ai toujours travaillé dans le domaine temporel, à défaut de d'appareil de mesure. Dans ce domaine, la polarisation du milieu se manifeste par une tension secondaire transitoire après l'interruption du courant injecté. Pour faire ces mesures, un courant pseudo-continu en créneaux rectangulaire (+I₀, -I₀) est injecté pendant un certaine durée (suffisamment longue pour mieux saturer le milieu) et on mesure la différence de potentiel.

A la coupure brusque de courant, le potentiel ne devient pas instantanément zéro mais il s'établit un temps de relaxation. Cette décroissance est enregistrée pour calculer la chargeabilité apparente du milieu.

$$M = \frac{V_s}{V_p} \quad (23)$$

Où V_s est le voltage secondaire mesuré après la coupure de courant à un instant t et V_p est le voltage primaire mesuré juste avant la coupure.

Il est pratiquement difficile de mesurer précisément V_s au moment de la coupure de courant car les effets électromagnétiques produisent une perturbation transitoire de la commutation (Chouteau et al, 2006). Cependant il est possible de mesurer V_s à des moments précis après la coupure.

La chargeabilité apparente est donnée par la formule :

$$m_a = \frac{1}{V_p} \int_a^b V_t(t) dt \quad (24)$$

D'après Seigel en 1959, la chargeabilité est obtenue à partir des chargeabilités partielles m_i ; de la résistivité apparente ρ_a et de la résistivité partielle ρ_i .

$$m \approx \sum_i m_i \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \rho_i} \quad (25)$$

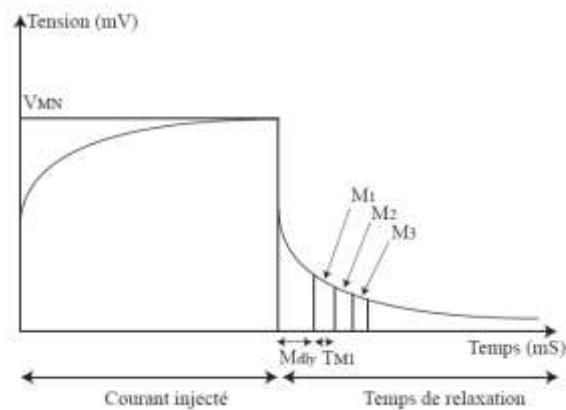


Figure 29: Mesure de la chargeabilité partielle à partir de la courbe de décroissance

En théorie, V_s devrait être mesuré au temps-zéro de coupure de courant, mais c'est difficile à réaliser à cause du défaut matériel lié au signal transitoire généré dans l'appareil de mesure au moment de la coupure de courant (Figure 29). Dans la pratique, les mesures de potentiel secondaire commencent après un certain temps $Mdly$ (The Delay time en anglais).

II.3.2.4 Application à l'étude d'un gisement de graphite

Le gisement de graphite de l'Est de Madagascar se trouve dans une zone migmatitique affectée par des intrusions magmatiques. Ces intrusions se manifestent en zones à induction magnétique élevée qui perturberaient la mesure électromagnétique. De ce fait, j'ai tenté l'utilisation de la méthode PS combinée avec l'imagerie par tomographie électrique de résistivité et de polarisation provoquée (ITE).

La situation géologique semble indiquer que la prospection électromagnétique ne serait pas capable de donner des résultats satisfaisants à cause des bruits des argiles et d'autres structures magnétiques. Le test fait par une société d'exploitation minière, en 2015, confirme cette inadéquation. La prospection EM utilisant le matériel Beep-Mat 8 est faite sur un site de gisement de graphite de l'Est. On m'a confié le retraitement de ces données EM.

Les données ont montré la présence de zones à induction magnétique élevée, zone où le Ratio est nul et le rapport LFR/MAG négatif (d'après le manuel d'utilisation de Beep-Mat 8). Dans ces zones l'interprétation des données EM ne serait pas possible à cause des bruits.

Alors, j'ai dû filtrer les données avant le traitement pour en obtenir des résultats interprétables. Le traitement et l'interprétation des données obtenues lors de cette campagne n'étaient pas concluants. La vérification par carottage géologique a été faite et les résultats n'ont donné aucune cohérence.

Ainsi, seule l'utilisation combinée de la Polarisation spontanée, la polarisation provoquée et la résistivité électrique a donné le résultat approchant la réalité sur les dépôts de graphite disséminé.

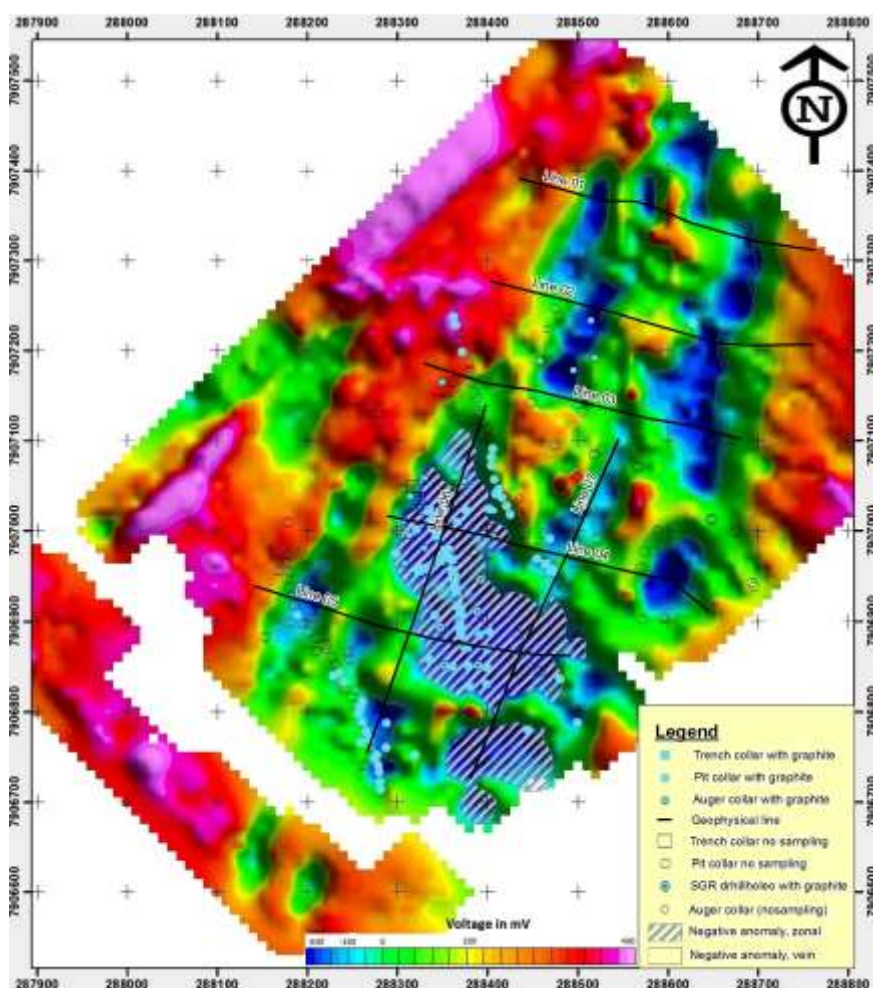


Figure 30: Carte de potentiel naturel sur une zone à filon de graphite à l'Est de Madagascar

Par ailleurs, trois sites ont fait l'objet de test dans ce secteur. Deux sites ont été déjà vérifiés avec des carottages et puits pour la modélisation 3D. La cohérence entre la géologie et le résultat géophysique est remarquable d'où la mise à publication de la technique utilisée dans une revue internationale, en cours de correction actuellement.

Les puits et les tranchées ont montré la présence de graphites dans la zone d'anomalie négative de PS, valeurs inférieures à - 100 mV (Figure 30).

La carte PS a bien montré la délimitation du gisement (zone hachurée sur la figure 30). On doit noter ici que le choix de la référence lors de l'exécution des mesures et le traitement des données sont primordiaux. La zone de référence où l'électrode fixe est implantée a dû être localisée à l'extérieur de la zone minéralisée, autrement dit, en dehors des zones d'anomalie. Elle a donné la valeur de référence à potentiel nul pour toute la zone d'étude.

Ainsi, pour avoir de l'information sur la puissance et l'épaisseur du gisement, j'ai utilisé la méthode ITE de résistivité et de polarisation provoquée.

Il est à noter qu'il y a interférence entre le graphite et les argiles pour les paramètres mesurées, résistivité électrique et chargeabilité électrique. Les deux formations sont conductrices et elles ont des chargeabilités électriques élevées. La présence de minéraux de graphite crée une conductibilité supplémentaire très importante en surface, pouvant s'expliquer par la présence de polarisation métallique. La zone minéralisée se distingue alors par sa conductivité et sa chargeabilité beaucoup plus élevées.

On a dû tenir compte des deux critères ci-après dans l'évaluation de l'épaisseur de gisement de graphite :

- les valeurs de résistivité électrique sont relativement faibles et les valeurs de chargeabilité électrique sont relativement élevées dans la zone où la minéralisation est importante
- l'extension latérale ne dépasse pas la zone définie avec la PS.

Les deux coupes prises comme exemples montrent bien que la présence de graphite change la gamme de valeurs de résistivité et de chargeabilité électrique de la zone minéralisée.

On va prendre le profil 5 (Line 05) pour illustrer la délimitation faite sur les coupes géoélectriques.

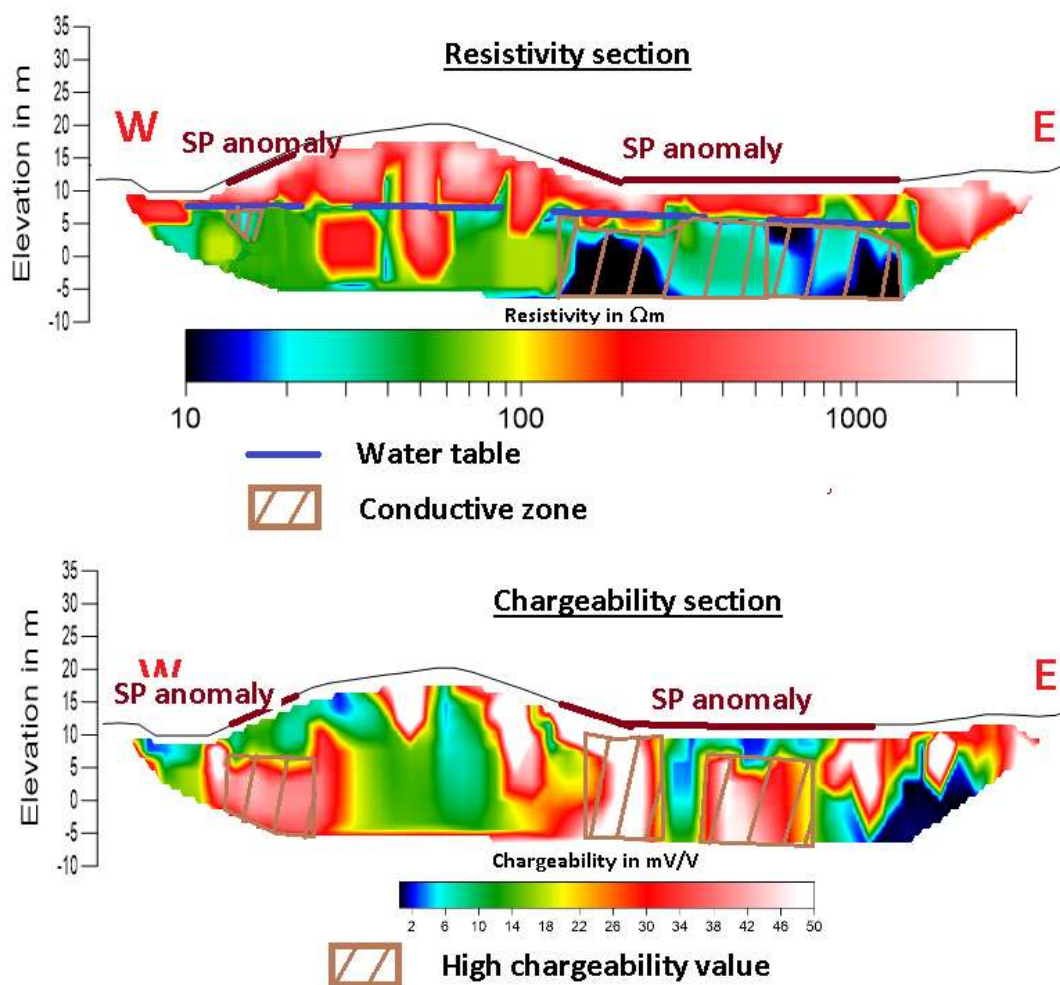


Figure 30: Coupes géoélectriques de résistivité et de chargeabilité électriques

Les zones minéralisées sont hachurées sur les deux coupes de résistivité et de chargeabilité (Figure 30). La coupe de chargeabilité a montré que la zone à graphite est bien limitée aux deux filons donnant l'anomalie de potentiel naturel (PS).

La combinaison des deux méthodes PS et coupes géoélectriques a permis de connaître la potentialité du gisement. La PS a donné l'extension latérale des filons minéralisés et les coupes géoélectriques ont renseigné sur la puissance (profondeur) de la couche minéralisée.

Chapitre III : Perspectives de recherche

III. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

J'ai constaté lors de la réalisation des projets d'AEP dans les zones de socle de Madagascar que l'ITE ou Imagerie par Tomographie Electrique est souvent incapable de détecter les fractures de faible extension affectant le substratum rocheux, alors que ces structures sont intéressantes du point de vue exploitation. On atteint dans ce cas la limite de résolution de la méthode (Apparao et al., 1997, Dahlin et al., 2004). On a dû à chaque fois avoir recours à l'utilisation de sondages électriques verticaux et de trainés électriques classiques. Un axe de recherche sur la question de résolution en technique d'inversion des données de panneau électrique est ainsi nécessaire pour déterminer cette limite.

Les avancées des techniques de prospection, surtout celles de la télédétection et du SIG, permettent d'avoir plus d'informations sur les zones à système hydrogéologique complexe. On peut à mon avis grouper une équipe multidisciplinaire pour étudier ces terrains (cas de l'extrême Sud de Madagascar, projet en cours avec l'UNICEF et IOGA). On ne doit pas se contenter de l'utilisation de méthodes classiques (méthode électrique et électromagnétique) qui n'ont pas donné systématiquement de résultats satisfaisants (cas d'une zone où l'aquifère et l'aquitard ont même propriété électrique (conducteur)). On peut tester les autres méthodes pour l'approche géophysique, comme la gravimétrie et la sismique entrant dans la modélisation de système hydrogéologique, comme la localisation des fractures dans le cas de l'étude de l'aquifère discontinu, la modélisation de mur de l'aquifère (Rakoto et al., 2003), etc.... Le modèle de réservoir hydrogéologique, déduit de l'imagerie géophysique aiderait sûrement les hydrogéologues à expliquer certains problèmes comme la salinité et l'absence des eaux souterraines de certaines zones de Madagascar.

L'application et l'utilisation de la géophysique nécessitent la connaissance au préalable des propriétés de la cible. On doit dans ce cas exploiter le changement ou la variation de paramètre mesurable créé par la cible. Si l'anomalie créée par la cible n'est pas prépondérante, un recours à d'autres méthodes ou à une combinaison de méthodes est inévitable. L'interprétation conjointe des résultats provenant de l'application des deux méthodes nécessite alors une nouvelle approche, que ce soit mathématique (inversion conjointe des deux méthodes) que ce soit méthodologique (exploitation des propriétés de dérivation et analyse statistique des résultats de l'inversion (Rakoto et al., 2018)). Cette dernière requiert une recherche beaucoup plus approfondie pour qu'elle soit acceptée et adoptée par la communauté scientifique. Il est à noter que l'application de la propriété dérivation a été mise à l'épreuve lors des travaux d'expertise effectués (*cas de recherche d'or, zone Dabolava (2005)*, cas d'évaluation des gisements de graphite (*mémoire de fin d'étude*,

2017),...etc., et elle a donné des résultats satisfaisants et a permis de détecter certains traits invisibles (filons de faible extension latérale) avec le traitement classique. Le traitement statistique des résultats a été utilisé plusieurs fois, comme dans l'étude utilisant l'approche bayésienne (Rakoto et al, 1994, 1997), l'étude de la distribution statistique des données de résistivité électrique et de la chargeabilité de l'aquifère saturé en eau contaminée (Rakoto et al., 2018).

Dans le cadre de la recherche menée par des équipes multidisciplinaires de l'IOGA, sur l'élaboration de matériels et des équipements de mesures géophysiques, les équipes en géophysique appliquée, travaillent en étroite collaboration avec des électroniciens de l'équipe de maintenance électronique de l'Institut IOGA.

Alors, plusieurs projets de recherche et de construction d'équipements de mesure géophysique sont en cours : comme le capteur et enregistreur automatique des données de potentiel naturel (*Razafiarisera R., 2019*), le résistivimètre multifréquences, pour la mesure de résistivité utiles à la polarisation provoquée dans le domaine fréquentiel (*Rasoanaivo C., 2018*), le capteur magnétique (*mémoire de Master II IMESI de Ravalomanana E. H, 2016, Randriamiharisoa D. F, 2016*), et le suivi de la décharge électrique utilisant un capteur de haute fréquence (*mémoire de Master II IMESI de Rakotomanana S., 2016, Andriamisaina T., 2016*). Le domaine de conception et d'amélioration des équipements de mesures géophysiques est très utile dans un pays comme Madagascar qui gagnerait à développer l'exploitation de ses réserves souterraines. Ainsi, l'équipe engagée dans ce domaine de conception d'outils géophysiques simples et que je dirige, reçoit mes chaleureux encouragements.

Comme le sous-sol malagasy dispose de plusieurs pierres d'origine pegmatitique (béryl, tourmaline, topaze, grenat, apatite, ...etc.), la localisation avec précision des poches de ces pierres nécessite la prospection géophysique. Alors, la recherche de la technique efficace à l'exploration de ces richesses est encore ouverte aux chercheurs malagasy. Les tests que j'ai réalisés ne sont pas tous satisfaisants : parfois on obtient des résultats positifs, parfois c'est une perte de temps.

CONCLUSION

Les travaux que j'ai menés ont été orientés beaucoup plus à l'utilisation de l'outil géophysique à l'exploration et à l'étude du sous-sol. L'expérience obtenue sur plus de-centaines de cas d'étude m'a procuré plus d'expérience sur l'adoption de la méthode géophysique pour la résolution d'un problème posé. J'ai dirigé des équipes de recherche lors de ces activités.

La majorité des travaux de recherche que j'ai entrepris porte sur la reconnaissance hydrogéologique, en termes de qualité et quantité. J'ai été souvent appelé pour apporter mon expertise sur presque tous les projets d'AEP à Madagascar.

Les études que j'ai entreprises depuis l'obtention de mon DEA en 1994, permettent de dégager la contribution de l'outil géophysique dans le domaine des Sciences de la Terre.

La prospection géophysique des eaux souterraines a permis de localiser le point le plus favorable à l'exploitation d'eau souterraine qui se manifeste en anomalie de résistivité électrique. On a pu évaluer, en considérant une zone de référence, les zones affectées par les pollutions en ions et hydrocarbures et voir l'effet de ces contaminants sur les propriétés géoélectriques de l'aquifère. Les techniques utilisées lors de la reconnaissance et de l'étude présentées dans cet ouvrage, ont montré que les apports des autres disciplines comme la géologie, la photo-interprétation, la télédétection, la géochimie,...sont loin d'être négligeables.

La géophysique à elle seule ne peut pas donner de bons résultats. Dans le cas de la recherche minière, la géophysique a permis d'évaluer et de définir la potentialité d'un gisement. Les modèles 3D, résultats des modélisations géophysiques ont aidé à la planification de l'exploitation. J'ai montré que la modélisation 3D n'a pas besoin de déploiement de maillage régulier systématique, mais il suffit d'augmenter le nombre d'échantillonnage ou de mesure dans la zone présentant une importante variation de structure. Le choix de la technique à adopter a été fonction de la situation (forme, information géologique difficile à explorer, extension limitée devant l'encaissante,...etc.) du gisement. Au cas où la formation cible présente des informations lisibles à la surface, la géophysique n'a fait que confirmer certaines hypothèses. Le calcul de la réserve a utilisé la technique d'interpolation qui fait intervenir les informations provenant de la lecture directe des affleurements.

L'étude structurale a fait appel souvent à des données aéroportées, celle-ci à cause de son étendue. La prospection géophysique a cherché ici les informations indiquées comme probables (extension d'une structure ou d'une formation couverte). La compilation des données aéroportée et satellitaire a permis d'étendre et de voir l'extension d'une formation donnant des signatures

physiques visibles. Toutefois, les résultats du traitement doivent être validés par la vérification terrain avant interprétation.

Du point de vue méthodologique, j'ai montré que l'utilisation de la polarisation spontanée combinée à l'imagerie géoélectrique donne des résultats significatifs à l'évaluation de gisement de graphite disséminé. Néanmoins, les ouvrages scientifiques indiquent que la méthode de potentiel naturel (P.S.) n'est pas efficace que si le gisement est en bloc.

L'interprétation des données magnétiques pose souvent des problèmes dans le cas de localisation d'une anomalie de faible amplitude dans une zone à champ magnétique élevé. On a dû recourir ici à la dérivation verticale pour déceler le faible effet de la variation de champ magnétique. Cette situation s'est présentée lors de l'étude d'une zone volcanique (cas de l'Est de Madagascar).

Les perspectives dégagées par mes travaux concernent principalement l'amélioration des techniques de traitement et d'interprétation des données géophysiques dans le cas d'inversion des données de panneau électrique. Je propose également de revoir les caractéristiques statistiques et les formes des signaux (par l'utilisation des propriétés de dérivation). Devant la capacité de notre équipe de chercheurs, je suis attiré par l'élaboration d'équipements géophysiques simples et facilement maniables. La réalisation de tels équipements auront certainement des impacts non négligeables en recherche utilisant l'approche ou l'outil géophysique, surtout dans les pays en développement comme le nôtre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDUL SAMAD F., 2017.** Polarisation Provoquée : expérimentation, modélisation et applications géophysiques, *thèse de Doctorat, UPMC*.
- ADA H. N., 2006.** Modélisation à trois dimensions des massifs rocheux, utilisant la technique d'imagerie électrique : Application aux trois carrières d'Andalamby, d'Ankilibobo et d'Ereheta de la RN 13, *Mémoire de DEA, Géophysique- Fac. Sciences*.
- ADA H. N., RAKOTO H.A., RAMANANTSOA H., RASOLONJATOVO E., et RASOLOMANANA E., 2008.** Modélisation en 3D des données de résistivité électrique : application au site d'Andalamby, Madagascar, *Mada-Géo : journal des sciences de la terre, Volume 12, ISSN 2074-4587 pp:19 – 24*.
- ANDRIAMISAINATSIRESY D. et RAKOTONDRAMAMY R., 2016.** Polarisation provoquée, *mémoire de fin d'étude de Master - Université d'Antananarivo*.
- ANDRIEUX P., 2007.** La place de la géophysique dans l'exploration minière, *Géologues n° 153, Société Géologue de France (SGF)*.
- APPARAO A., SASTRY R. S., and SARMA V. S., 1997.** Depth of detection of buried resistive targets with some electrode arrays in electrical prospecting, *Geophysical prospecting, Vol 45*.
- APPELO C. A. J., and POSTMA D., 1999.** Geochemistry, groundwater and pollution, *AA Balkema, otterdam, p 536*.
- ARCHIE G. E., 1942.** The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Am. Inst. Min. Metallurg. Petr. Eng. Techn., paper 1422*.
- ASTIER J. L.,** Géophysique appliquée à l'hydrogéologie, *Paris, Masson, 1971, 278 p., 236 fig.*
- ATEKWANA E. and ATEKWANA E., 2010.** Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: A review. *Surveys in Geophysics, vol. 31, issues 2, 247–283*.
- AUROUZE J. 1959,** Hydrogéologie du sud de Madagascar, *Thèses de Doctorat en Es Sciences, service géologique, M.E.M., 191p*.
- BERTIL D. and REGNOULT J. M., 1998.** Seismotectonics of Madagascar. *Tectonophysics, Vol 294, issue 1 – 2, p. 57 – 74. Elsevier*.
- BESAIRIE H., 1963,** Géologie de Madagascar, *services géologique, M.E.M*
- BIGALKE J. and GRABNERE. W., 1997.** The Geobattery model: a contribution to large scale electrochemistry. *Electrochimica Acta, 42(23–24), 3443–3452*.
- BLAKELY R.J., 1995.** Potential Theory in Gravity and Magnetic Application, *Cambridge University- Press, New York*.
- BLONDEL A., 2014.** Développement des méthodes géophysiques électriques pour la caractérisation des sites et sols pollués aux hydrocarbures, *Thèse de doctorat de l'Université Michel de Montaigne, p244*.
- BLONDEL A., SCHMUTZ M., FRANCESCHI M., TICHANÉ F. and CARLES M., 2014.** Temporal evolution of geoelectrical response on hydrocarbon contaminated site, *Journal of applied geophysics, Elsevier, vol. 103, pp 161 – 171*.

BOCARD C., 2006. Marées noires et sols pollués par des hydrocarbures, Enjeux environnementaux et traitement des pollutions, *IFP publication, Edition Technip*, 273p.

BOERNER F.D., SCHOPPER J.R., and WLLER A., 1996. Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. *Geophysics* 44, 583–601.

BONNET T., et COLBEAUX J. P., 1999. L'analyse morphologique spécialisée : apports d'une méthode à la détection des accidents, une nécessité dans l'approche hydrodynamique et karstologique des aquifères fissurés. Exemple dans le Nord de la France crayeux, *Geodynamica Acta, Vol 3-4, p 223 – 235*.

BURGEAP, 1986, Utilisation de la géophysique en milieu discontinu, *C.I.E.H.*

CASTANY G., 1982. Principes et méthodes de l'Hydrogéologie, *Dunod, Paris*, p.236.

CHAPELIER D., 2000. Principe de base, *cours online de géophysique, Lausanne*, p. 99.

CHOUTEAU M. et GIROUX B., 2006. Notes de cours: Méthodes Électriques (*cours de géophysique appliquée II, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada*).

CHOUTEAU M., 2001. Géophysique appliquée II : Méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques, *notes de cours*, 142p.

DAHLIN T. and ZHOU B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrodes arrays, *Geophysical prospecting*, 52(5), 379–398.

DE MARSILY G., 1975. Simulation en hydrogéologie, en *Traité d'information géologique*, Masson, Paris.

DUBOIS J., DIAMENT M. et COGNE J. P., 2011. Géophysique: Cours et exercice corrigé, 4^e édition, *Dunod*, 245p.

DUSSARAT B., RALAIMARO J., 1993. Caractérisation hydrogéologique de bassins versants emboîtés sur socle altéré en zone tropicale d'altitude : exemple des Hautes Terres de Madagascar. Hydrogeological characterization of drainage basins in weathered basement of a high-altitude tropical zone: Hautes Terres, Madagascar, *Hydrogéologie*, p 53-64, 1993

DUSSARAT B., 1994. Structure et fonctionnement des aquifères de socle altéré en zone tropicale d'altitude : cas du Bassin de Mahitsy (Hautes Terres de Madagascar), *thèse de doctorat*, 171 p, Montpellier 2, France.

EDWARDS L.S., 1977. A modified pseudo-section for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42 (5), 1020-1036.

FAMANTANANTSOA N. M., 2005. Imagerie électrique appliquée à la détection de cavité, le long du boulevard Poincaré, bord de la mer Mahajanga, *Mémoire de DEA, Université d'Antananarivo*.

FREEZE R. A. and CHERRY J. A., 1979. Groundwater, *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.* 07632.

GHOSH D. P., 1971. Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth, *Geophysical prospecting, Wiley, Vol. 19, issue 4, pp 769 – 775.*

GNONNOUE P.Y., 2016. Apports des méthodes géophysiques à la caractérisation de zones polluées : cas de la Commune d'Ambohimanambola-Antananarivo, *rapport de stage Master II, GARE, UPCM, Paris, p 121.*

GOURRY J. C., JEANNOT R., et PROUST E., 2002. Couplage de mesures géophysiques et d'analyses de gaz pour la détection de polluants organiques sur deux anciennes cokeries, *BRGM/ RP-51726- FR, Orléans France.*

GRILLOT J. C., 1992. Régime des eaux souterraines en milieu cristallin altéré: un exemple en zone intertropicale humide d'altitude (Madagascar), *Hydrological Sciences Journal, 37:2, 105-117.*

HARCOUËT V., 2005. Modélisations thermiques de gisements orogéniques mésothermaux : Application au Ghana. *Thèse de doctorat de l'Institut de Physique du Globe de Paris. 242p.*

JACKSON M. D., 2015. Tools and Techniques: Self-Potential Methods, *Treatise on Geophysics, Elsevier, pp.261-293.*

JARDANI A., REVIL A., BOLEVE, A., CRESPIY A., DUPONT J.P., BARRASH W. and MALAMA B., 2007. Tomography of the Darcy velocity from self-potential measurements. *Geophysical Research Letters, 34(24).*

JARDANI A., REVIL A., BOLEVE A. and DUPONT J.P., 2008. Three-dimensional inversion of self-potential data used to constrain the pattern of groundwater flow in geothermal fields. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113(B9).*

KELLY W. E. and MARES S., 1993. Applied geophysics in hydrogeological and engineering practice, *Developments in water science, 44, Elsevier, 285p.*

KEMNA A., BINLEY A., CASSIANI G., NIEDERLEITHINGER E., REVIL A., SLATER L., WILLIAMS K. H., OROZCO A. F., HAEGEL F. H., HORDT A., KRUSCHWITZ S., LEROUX V., TITOV K. and ZIMMERMANN E., 2012. An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. *Near Surface Geophysics, 10, 453–468.*

KEMNA A., BINLEY A. and SLATER D., 2004. Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications. *Geophysics, 69, 97-107.*

LAGRABRIELLE R., 1986. Nouvelles applications de méthodes géophysiques à la reconnaissance en génie civil, *Géotechnique - Mécanique des sols – Science de la terre, LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)*

LILE O. B., 1996. Self-potential anomaly over a sulphide conductor tested for use as a current source. *Journal of Applied Geophysics, 36, 97–104.*

- LOKE and BARKER, 1996.** Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudo-sections Using a Quasi-Newton Method, *Geophysical Prospecting*, Vol. 44, pp 131-152.
- MANSOOR N. and SLATER L., 2007.** On the relationship between iron concentration and induced polarization in marsh soils. *Geophysics*, 72(1), A1–A5.
- MARI J. L., ARENS G., CHAPPELIER D., et GAUDIANI P., 1998.** Géophysique de gisement et de génie civil, *Ed. Technip*, 468p
- MENDONCA C.A., 2008.** Forward and inverse self-potential modeling in mineral exploration. *Geophysics* 73: F33–F43.
- MILOS K. and MILOSLAV B., 1986.** Prospecting and exploration of mineral deposits, Developments in economic geology, 21, *Elsevier*, 508p.
- MINSLEY B.J., SOGADE J. and MORGAN F.D., 2007.** Three-dimensional source inversion of self-potential data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B2).
- NICOLINI P., 1990.** Gîtologie et exploration minière, *TEC. DOC, Lavoisier*, 576p.
- ORISTALGIO M. and BRIAN S., 1998.** Three dimensional electromagnetics, *Geophysical Developments n°7, Society of Exploration Geophysicists (SEG)*, 696p.
- PARK C. B., MILLER R.D. and Xia J., 1999.** Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, 64: 800 808.
- PELTON W. H., WARD S. H., HALOF P. G., SILL W. R., 1978.** Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multi-frequency. *Geophysics* 43(3), 588-609
- RABEMANANA V., 2002.** Origine et caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle: cas de la région de l'Androy (Sud de Madagascar), *Thèse de doctorat, Université Paris VI*
- RAGUIN E., 1958.** A propos des classifications des gites minéraux, *C. R. Soc. Géol. Fr.*, p146-148
- RAJAABELISON J., 2003.** Contribution à l'optimisation du traçage des isotopes de l'environnement en hydrogéologie, cas du sud de Madagascar N/A - *Université d'Antananarivo*.
- RAJAONARIVELO S., 2014.** Traitement et analyse des données géophysiques des zones contaminées d'Ambohimanambola, *Mémoire de Master II, Physique du Globe, Université d'Antananarivo*.
- RAKOTO H. A., 2003,** Caractérisation par géophysique, hydrogéologie classique et hydrochimie des aquifères en zone semi-aride : exemple du bassin sédimentaire de Beloha, extrême sud de Madagascar. *Thèse de Doctorat de 3ème cycle en Sciences Physiques, Université d'Antananarivo* 146p.
- RAKOTO H. A., RAZAFINDRAKOTO B., RATSIMBAZAFY J. B., RASOLOMANANA E.H., ANDRIAMIRADO L. et ANDRIAMPANARIVO E., 2005.** Imagerie électrique appliquée à la détection de sous-cavage le long du Boulevard Poincaré, bord de Mahajanga, *Journée de la recherche, MESRES*.

RAKOTO H. A., RAJAOMAHEFASOA R. and RAZAFIARISERA R., 2018. Evaluation of flake graphite ore using self-potential (SP), Electrical resistivity Tomography (ERT) and Induced Polarization (IP) methods in East coast of Madagascar, *Journal of Applied Geophysics, Elsevier, (en cours d'évaluation)*.

RAKOTO H., RAJAOMAHEFASOA R., RASOLOMANANA E. H., 2017. Optimisation de la reconnaissance hydrogéologique par modélisation géophysique 2D, cas de la zone intermédiaire Ankaraobato-Dorodosy, Madamines, *volume 1, 2017, ISSN 2220-0681*.

RAKOTO H.A., RAJAOMAHEFASOA R. and RAJAONARIVELO S., 2018. Electrical Resistivity And Induced Polarization Used On Investigation Of Ionic And Hydrocarbon Pollutants Contaminated A Shallow Area. Ambohimambola Site, *IJIRSET, vol. 7, Issue 3, pp 2136 – 2145, 2018*.

RAKOTOMALALA R. N. N. J., 2011. Localisation des poches de Minéralisation par méthode électrique et sismique carrière de Soatanimbary, Géophysique- Fac. Sciences.

RAKOTOMANANA T. S., 2016. Conception d'un appareil de mesure des potentiels spontanés pour détecter les fuites d'eau dans les digues hydrauliques à base d'arduino MEGA, *mémoire de fin d'étude de Master - Université d'Antananarivo*.

RAKOTONDRAINIBE J. H., 1976. Hydrogéologie de l'extrême Sud: zone comprise entre le Mandrare et le Menarandra, *Ministère de l'Energie et des Mines Madagascar*.

RAMAHATAFANDRY V. N., 2015. Etude des gisements d'apatite de la carrière de Tsikoroky-Isoanala par méthodes électrique et sismique, *mémoire de fin d'études - Université d'Antananarivo*.

RANDRIAMIHARISOA D. F., 2016. Système d'acquisition des données des magnétomètres fluxgate a base d'arduino - *mémoire de fin d'étude de Master - Université d'Antananarivo*.

RASOANAIVO C., 1998. Conception et réalisation d'un appareil géophysique mesurant la résistivité apparente du sous-sol, la polarisation spontanée, et la chargeabilité. *These de doctorat. Université d'Antananarivo, 109p*

RASOLOMANANA E.H., RASOLONDRAJAO L., RANDRIANJA R., ROBINSON L., RALAIMARO J. et RAKOTO H.A., 2011. Problèmes de pollution des ressources en eaux posés par les déchets industriels et ménagers dans la ville d'Antananarivo et de ses environs, *Madarevues, Madamines, Vol. 2*.

RASOLOMANANA E.H., 1999. Étude du potentiel en minéralisation chromifère du complexe basique-ultrabasique d'Andriamena par prospections gravimétrique et magnétique, *Thèse, Université d'Antananarivo/Université Paris 6/ IRD Bondy France*.

RAVALOMANANA E. H., 2016. Les composants électroniques pour la conception d'un magnétomètre fluxgate, *mémoire de fin d'étude Master II, MISEI, Université d'Antananarivo*.

RAZAFIARISERA R., 2018. . Acquisition simultanée et visualisation des données de polarisation spontanée. Thèse de doctorat. Université d'Antananarivo, 129p

REVIL A. and FLORSCH N., 2010. Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International, 181(3), 1480–1498*.

- REYNOLDS J. M., 1997.** An introduction to applied and environmental geophysics, 4^è edition, J. Wiley & Sons, 796P.
- ROY A. and APPARAO A., 1971.** Depth of investigation in Direct Current methods, *Geophysics* 36 (5):pp. 943-959.
- SATO M. and MOONEY H. M., 1960.** The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials. *Geophysics*, 25, 226–249.
- SEIGEL H. O., 1959.** Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Geophysics*, 23(4), 547–565.
- SEIGEL H. O., NABIGHIAN M., PARASNIS D. F., and VOZOFF K., 2007.** The early history of the induced polarization method, *The Leading Edge*, 26, 312-321.
- SLATER L. D. et LESMES D., 2002.** IP Interpretation in environmental investigations. *Geophysics*, 67(1), 77–88.
- STEFANESCO S., SCHLUMBERGER C. and SCHLUMBERGER M., 1930.** The distribution of electrical potential about a point electrode in an earth of horizontal, homogeneous, and isotropic beds. *J. Phys. Radium*, 1, pp.130-141.
- TELFORD W. M., GELDART L. P. and SHERIFF R. E., 1990.** *Applied geophysics*. Cambridge University Press.
- THOMAS E., MOUGIN B., DEBÉGLIA N. and PERRIN J., 2002.** Apport des levés géophysiques aéroportés à la recherche et la protection des ressources en eau : *Application à la région du Léon (Finistère)* ; BRGM/RP- 51740 – FR.
- TIMM F. and MÖLLER P., 2001.** The relation between electric and redox potential: evidence from laboratory to field experiments. *Journal of Geochemical Exploration*, 72, 115–127.
- VINEGAR H. J. and WAXMAN M. H., 1984.** Induced polarization of shaly sands. *Geophysics*, 49(8), 1267–1287.
- WOODRUFF W.F., REVIL A., JARDANI A., NUMMEDAL D., and CUMELLA S., 2010.** Stochastic Bayesian inversion of borehole self-potential measurements. *Geophysical Journal International* 183
- ZHDANOV M. S. and KELLER G. V., 1998.** The geoelectrical methods in geophysical exploration, *Methods in geochemistry and geophysics*, 31, Elsevier, 873p.

ANNEXE

Tirés à part des principaux articles

RAKOTO H., ANDRIEUX P., RATSIMBAZAFY J.B., ILICETO V., RASOLOMANANA E, PASTOR L., ZUPPI G. M., 2003. La prospection gravimétrique dans la modélisation d'un substratum sous formation sédimentaire : Apport à l'hydrogéologie d'une zone semi-aride du sud de Madagascar. *Comptes Rendus. Géoscience, Volume 335, Issue 4, Pages 355-363, Elsevier, ISSN 1631-0713 p. 355-363.*

RAKOTO H., RAJAOMAHEFASOA R., RAJAONARIVELO S., 2018 Electrical resistivity and Induced polarization used on investigation of ionic and hydrocarbon pollutants contaminated a shallow area. Ambohimambola site. *IJIRSET, Vol. 7, Issue 3, ISSN 2347 – 6710, pp 2136 – 2145.*

RAJAOMAHEFASOA R. E., RAKOTOMANDRINDRA P. F., RANDRIAMBOLOLONA T., RATSIMBAZAFY J. B., **RAKOTO H.**, 2018. Groundwater quality assessment around Sub-urban zone. Antananarivo area, in using hydrochemical approach. *IJIRSET, Vol 7, Issue 5, ISSN 2347-6710; pp 6131 – 6141*



Géophysique interne

La prospection gravimétrique dans la modélisation d'un substratum sous formation sédimentaire : apport à l'hydrogéologie d'une zone semi-aride du Sud de Madagascar

Heritiana Rakoto^{a,b,*}, Pierre Andrieux^c, Jean-Bruno Ratsimbazafy^a, Vittorio Iliceto^d,
Eddy Rasolomanana^a, Louis Pastor^c, Gian Maria Zuppi^b

^a Institut et observatoire de géophysique d'Antananarivo (IOGA), BP 3843, 101 Antananarivo, Madagascar

^b Università Cà Foscari di Venezia, Calle Larga Santa Marta, Dorsoduro 2137, 30123 Venezia, Italy

^c Département de géophysique appliquée, université Paris-6, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

^d Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica, Università degli Studi di Padova, via Giotto 1, 35137 Padova, Italy

Reçu le 24 juillet 2002 ; accepté le 3 mars 2003

Présenté par Jean-Paul Poirier

Résumé

La méthode gravimétrique a été utilisée dans le bassin sédimentaire de la zone semi-aride du Sud de Madagascar pour déterminer la morphologie du toit du substratum, qui est constitué de roches cristallines et volcaniques. La structure morphologique du substratum influe sur l'hydrogéologie et la dynamique de l'eau souterraine de la zone. La corrélation entre la répartition de la conductivité électrique de l'eau et la morphostructure du substratum (forme et linéament) confirme l'étroite dépendance des deux paramètres, et permet par la suite de délimiter la zone favorable à l'exploitation future de l'eau. **Pour citer cet article :** *H. Rakoto et al., C. R. Geoscience 335 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

A gravimetric survey to map the top of the bedrock under sedimentary formations: a contribution to the hydrogeology of the semi-arid southern area of Madagascar. A gravimetric survey has been carried out in a sedimentary basin, south of Madagascar, in order to define the bedrock morphology. The bedrock is made up of crystalline and volcanic rocks. The objective of the survey was to demonstrate whether a relationship could be established between bedrock morphology and groundwater mineralisation. Indeed, bedrock morphology has been successfully mapped and it is confirmed that most of the low mineralisation wells are located in areas where the slope of the bedrock is trending to the south-west, which ensures a higher hydraulic conductivity, i.e. a faster water flow, than in the other parts of the survey area. **To cite this article:** *H. Rakoto et al., C. R. Geoscience 335 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : gravimétrie ; bassin sédimentaire ; Sud de Madagascar ; substratum ; hydrogéologie ; minéralisation ; semi-aride

Keywords : gravimetry ; sedimentary basin ; South of Madagascar ; bedrock ; hydrogeology ; mineralisation ; semi-arid

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : h_rakoto@hotmail.com (H. Rakoto).

Abridged English version

A gravimetric survey has been carried in a southern basin of Madagascar, in order to determine its basement morphology in the framework of a hydrogeological study. The area extends over 5100 km² and is centred around 25°10'21.1" southern latitude and 45°03'31.1" eastern longitude. The basin is bound to the south, by coastal dunes, to the west by the Menarandra River, to the east by the Manambovo River and to the north by crystalline, metamorphic and intrusive formations [4,5] (Fig. 1). The area is a peneplain gently sloping to the south. It is made up of a multitude of closed basins within the plateau areas as well as within the dune zone. Post-Eocene sediments cover most of it [3,4,9]; bedrock outcrops are rare. Few drillholes within the area enables to have a sound knowledge of the geological sequence.

The climate is semi-arid with an average annual rainfall equal to 525 mm, while potential evapotranspiration is equal to 1250 mm [7].

Both Menarandra and Manambovo Rivers are ephemeral, with strong floods in summertime [14]. Recharge is ensured partly by rainfall and partly by drainance from crystalline bedrock. The water table is assumed to be continuous, starting from weathered bedrock to the northeast, through continental Neogene, down to the sea, after it has crossed the coastal part or the alluvium of the river banks (Fig. 1) [2]. The groundwater flow is generally trending from the northeast down to the southwest. During recharge and residence, groundwater gets mineralised. It is characterised by high electrical conductivities (greater than 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$), related to high concentrations of dissolved salts (NaCl) [2,14]. Water electrical conductivity distribution however appears to be random and thus cannot be explained by local geology. Besides, drilling logs tend to show different lithological origins for groundwater at the various sites (Fig. 2).

Both surface and underground waters are rare in the area. Lack of hydrogeological and hydrochemical information has led to a low drilling success rate. Assuming the bedrock to be impermeable, it is inferred that the geometry of the aquifer and that its recharging through the porous sedimentary medium will highly depend on the topography of the basement [11] and on its tectonic history, which may have an effect on the flow and thus on the hydrodynamic transit rate [6].

Morphological information regarding the bedrock will thus contribute to the knowledge of the local hydrogeology and to the groundwater flow system of the area. This is the reason why a gravimetric survey has been carried out, in order to map the structure of the basement, thought to affect the groundwater flow pattern.

Two gravimetric datasets are available for the area. The first one was collected many years ago by one IRD ('Institut de recherche pour le développement', formerly ORSTOM, France) team [13], with a large spacing between stations, of the order of 2 km; 72 stations were recorded within the study area. The second one was collected by the IOGA ('Institut et Observatoire géophysique d'Antananarivo') team, specifically for this detailed survey, with an average spacing of 200 m along roads and trails; 347 stations were surveyed. A total of 419 gravimetric stations is thus available.

The base values were extracted from the IRD dataset [13]. Since the area shows no topographic features, the technique proposed by Parasnis [12] was used to determine the average density to be introduced into the Bouguer corrections. This technique assumes that the Bouguer anomaly is a random function over the whole area [10,12]; the value of the density is thus equal to the slope of the average linear relationship between the free air anomaly and the altitude; in the study area, it is found equal to 2.48. The regional Bouguer anomaly was then computed from the IRD data, using a second order polynomial surface. Modelling of the residual gravimetric anomaly was at last performed using the software Grav2dc V2.0 by G.R.J. Cooper (1996) along each profile. Five different formations, with their specific density were introduced, referring to the known geological situation [1, 8]: the light sedimentary cover ($d = 1.88$), the average sedimentary formation ($d = 2.18$), the crystalline basement ($d = 2.48$), the heavy volcanic ($d = 3.28$) and intrusive formations ($d = 3.08$).

A general northeast/southwest dip of the basement is clearly shown; besides, three major depressions are mapped (Fig. 3).

In order to enhance the rather small altitude variations of the basement, to show the extreme and possible lineaments, the first and second horizontal derivatives of the altitudes were also computed (Fig. 4). The water electrical conductivity values measured at each well are shown on the map of the dip changes of the

basement (Fig. 4). It can be seen that eight wells out of 10, with conductivities lower than $4500 \mu\text{S cm}^{-1}$, are located in areas where the basement is dipping towards the south, which favours the flow. In other areas, the water resides during longer periods of time, so that mineralisation tends to increase.

It can thus be concluded that there is a fair correlation between the basement morphology and the water quality, so that gravity in this example appears to be a great help to locate positive water wells.

1. Introduction

Le bassin sédimentaire de l'extrême Sud de Madagascar s'étend sur une superficie de 5100 km^2 (Fig. 1) environ, centré sur $25^\circ 10' 21,1''$ de latitude sud et $45^\circ 03' 31,1''$ de longitude est.

Le bassin est limité au sud par le couloir littoral de dunes qui se développe entre la grande falaise, prolongement de la faille de Tuléar, et le canal de Mozambique, à l'ouest par le fleuve Menarandra, à l'est par le fleuve Manambovo et au nord par la formation cristalline de type métamorphique et intrusif [4,5].

Le bassin sédimentaire, formé d'une pénéplaine inclinée légèrement vers la mer de 250 à 130 m d'altitude, est constitué de plusieurs cuvettes fermées, de différentes dimensions, d'une part, dans les zones tabulaires, d'autre part, dans les régions dunaires.

La région se caractérise par une précipitation moyenne annuelle de 525 mm, répartie sur la période octobre–mars, et une évapotranspiration potentielle de 1250 mm [7].

Les deux fleuves, Menarandra et Manambovo, ont un régime irrégulier. Les orages ou les pluies de forte intensité engendrent des crues relativement importantes, dont le tarissement est rapide [7]. Le réseau hydrographique secondaire est rare et n'est pas pérenne [7,14].

Les eaux y sont rares, tant de surface que souterraines. Beaucoup de forages de reconnaissance d'eau souterraine réalisés ont été des échecs, à cause de l'insuffisance des connaissances de l'hydrogéologie régionale.

La modélisation du toit du substratum par technique gravimétrique a été réalisée dans le but de suivre la morphologie du substratum imperméable, constitué

de roches cristallines et volcaniques. Cette information devrait contribuer à une meilleure connaissance de l'hydrogéologie de la zone.

2. Contextes géologique et hydrogéologique, données gravimétriques

Le bassin sédimentaire est formé de dépôts terrigènes, allant de l'Éocène à l'Actuel [3,4,9]. Les affleurements y sont rares (Fig. 1). Les quelques forages de reconnaissance géologique réalisés ont permis d'obtenir des informations sur la succession des formations géologiques du bassin :

- des alluvions récentes dans les vallées des fleuves et rivières ;
- des sables, éventuellement dunaires, et des grès sur quelques dizaines de mètres ;
- des calcaires quaternaires et calcaires marneux, sur une épaisseur d'environ 40 m, des grès néogènes continentaux, d'une épaisseur pouvant atteindre 300 m (ces formations dont les perméabilités sont d'environ 10^{-5} m s^{-1} [2] constituent l'aquifère principal) ;
- enfin, le socle imperméable, constitué de roches granitiques et leptynitiques au nord et basaltiques au sud-ouest.

Du point de vue hydrogéologique, la continuité du niveau statique conforte l'hypothèse d'une nappe générale qui se raccorde aux eaux marines sur le littoral et aux nappes alluviales dans les vallées des grands fleuves (Fig. 1). La circulation souterraine des eaux se ferait du nord-est vers le sud-ouest (Fig. 1).

Les nappes perchées discontinues se positionnent sur les zones de recharge préférentielles en correspondance avec les cuvettes fermées.

Les eaux souterraines ont une conductivité électrique élevée, en général supérieure à $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$, qui est en relation avec les teneurs élevées en sels et en particulier en chlorures [2,14]. Une carte de conductivité a été dressée, malgré la mauvaise répartition des forages et l'insuffisance de données sur les caractéristiques physique et chimique de l'eau souterraine. Les connaissances géologiques sont insuffisantes pour expliquer les variations de la conductivité électrique de l'eau (Fig. 2).

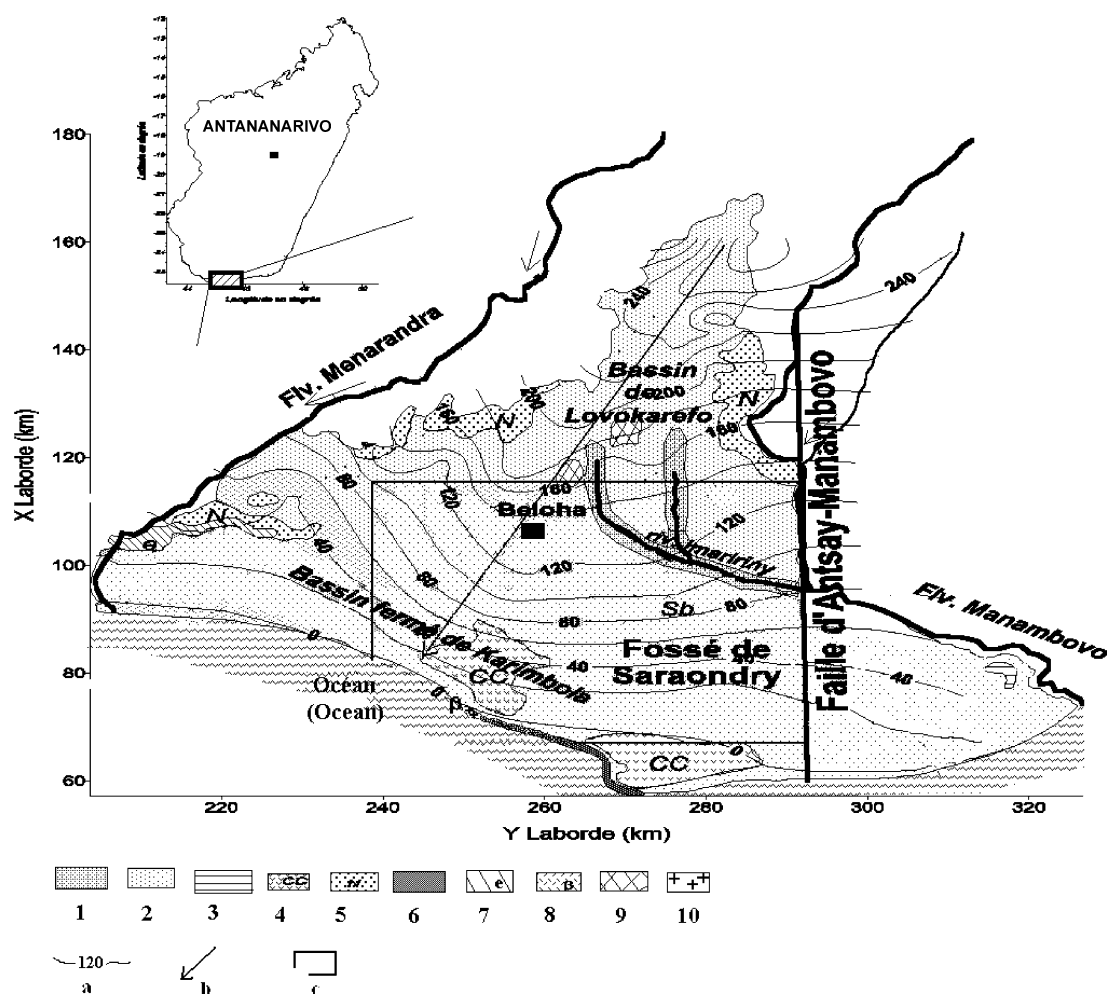


Fig. 1. Situation de la zone d'étude. 1 : Alluvions ; 2 : sables et dunes ; 3 : grès ; 4 : carapace calcaire ; 5 : Néogène continental ; 6 : Calcaires marneux ; 7 : Éocène calcaire ; 8 : basaltes ; 9 : leptynite ; 10 : granitique ; a : cote piézométrique (m) ; b : direction de l'écoulement général ; c : zone couverte par la géophysique.

Fig. 1. Location of the survey area. 1: Alluvium; 2: sands and dunes; 3: sandstones; 4: limestone shales; 5: continental Neogene; 6: marl calcareous; 7: Eocene limestone; 8: basalt; 9: leptynite; 10: granite; a: water level (m a.s.l.); b: regional groundwater flow; c: study area.

Les venues d'eau peuvent provenir d'aquifères de type lithologique, différents d'un forage à un autre (Fig. 2), ce qui complique la compréhension de la circulation et de la minéralisation de l'eau souterraine, et la délimitation des zones favorables pour son exploitation.

La zone a fait l'objet de deux campagnes de prospection gravimétrique. La première a été réalisée par Rechenmann et l'équipe de l'IRD (ex-Orstom) [13],

avec un pas de mesure de 2 km ; la seconde a été réalisée par l'équipe de l'IOGA, avec un pas de 200 m.

Les mesures ont été faites sur les pistes existantes (Fig. 3b) : 72 ont été réalisées lors de l'étude de l'IRD [13] et 347 lors de l'étude détaillée. Les données de détail n'ont pas couvert la totalité de la zone sédimentaire de l'extrême Sud : elles ont été acquises sur les zones estimées les plus intéressantes (zone à importante anomalie de Bouguer de la première

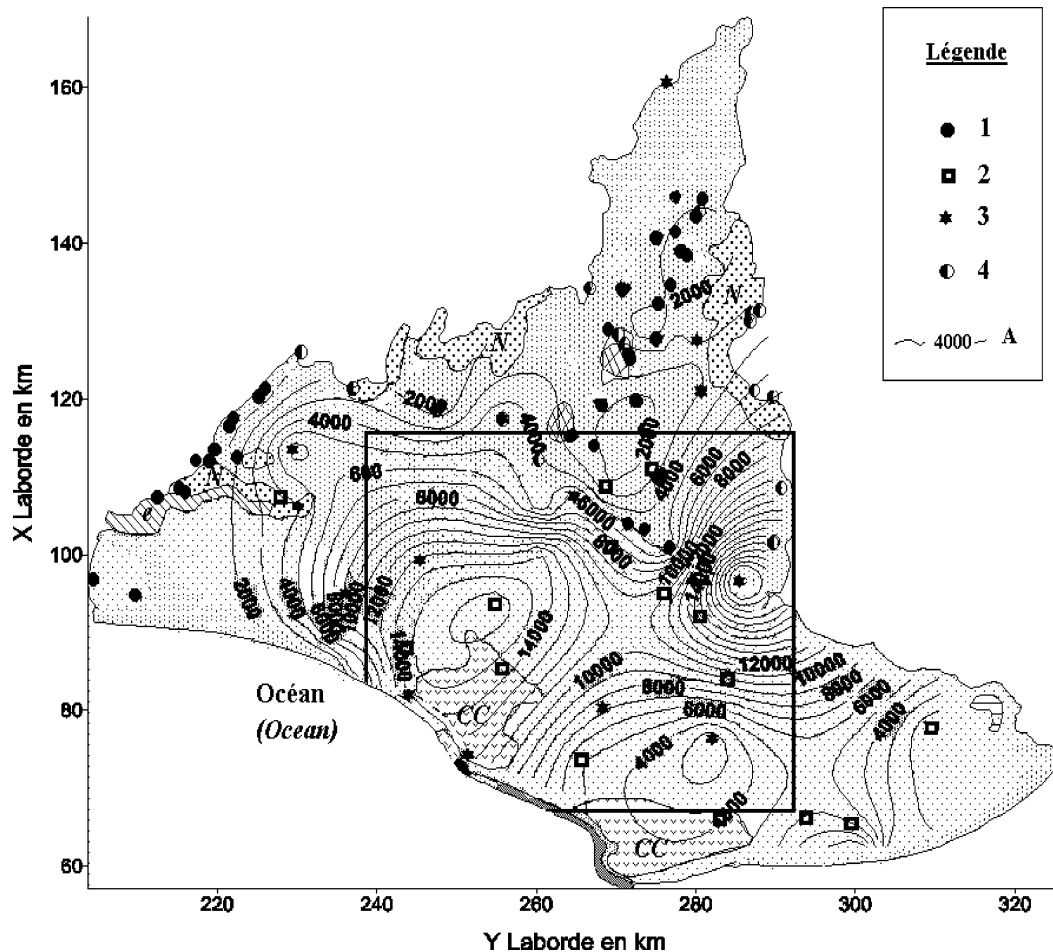


Fig. 2. Carte de conductivité électrique de l'eau. Type lithologique des aquifères. 1 : Alluvions ; 2 : Quaternaire ancien ; 3 : Néogène ; 4 : socle fissuré ; A : Conductivité électrique de l'eau ($\mu\text{S cm}^{-1}$).

Fig. 2. Electrical conductivity of water. Aquifer lithology. 1: Alluvial deposits; 2: Quaternary; 3: Neogene; 4: fractured basement; A: water electrical conductivity ($\mu\text{S cm}^{-1}$).

campagne, linéament morphologique, zones à forte probabilité d'eau souterraine).

3. Présentation et objectif de l'étude

En prenant l'hypothèse d'un substratum granitique, leptynitique et volcanique imperméable, la circulation de l'eau dans le milieu poreux devrait être fonction de la topographie et de la morphologie du substratum imperméable [11].

En outre, les accidents tectoniques pourraient jouer le rôle de zones à transfert hydrodynamique rapide [6]. La morphostructure du substratum imperméable in-

fluerait ainsi sur la circulation de l'eau souterraine. La reconstruction de cette structure par la gravimétrie, et la comparaison entre la topographie du substratum et la conductivité électrique de l'eau devraient permettre de comprendre l'hydrodynamique de la région.

4. Traitement des données gravimétriques et leur modélisation

4.1. Traitement de données

Les données gravimétriques de la deuxième campagne ont été réduites [8] en sélectionnant comme sta-

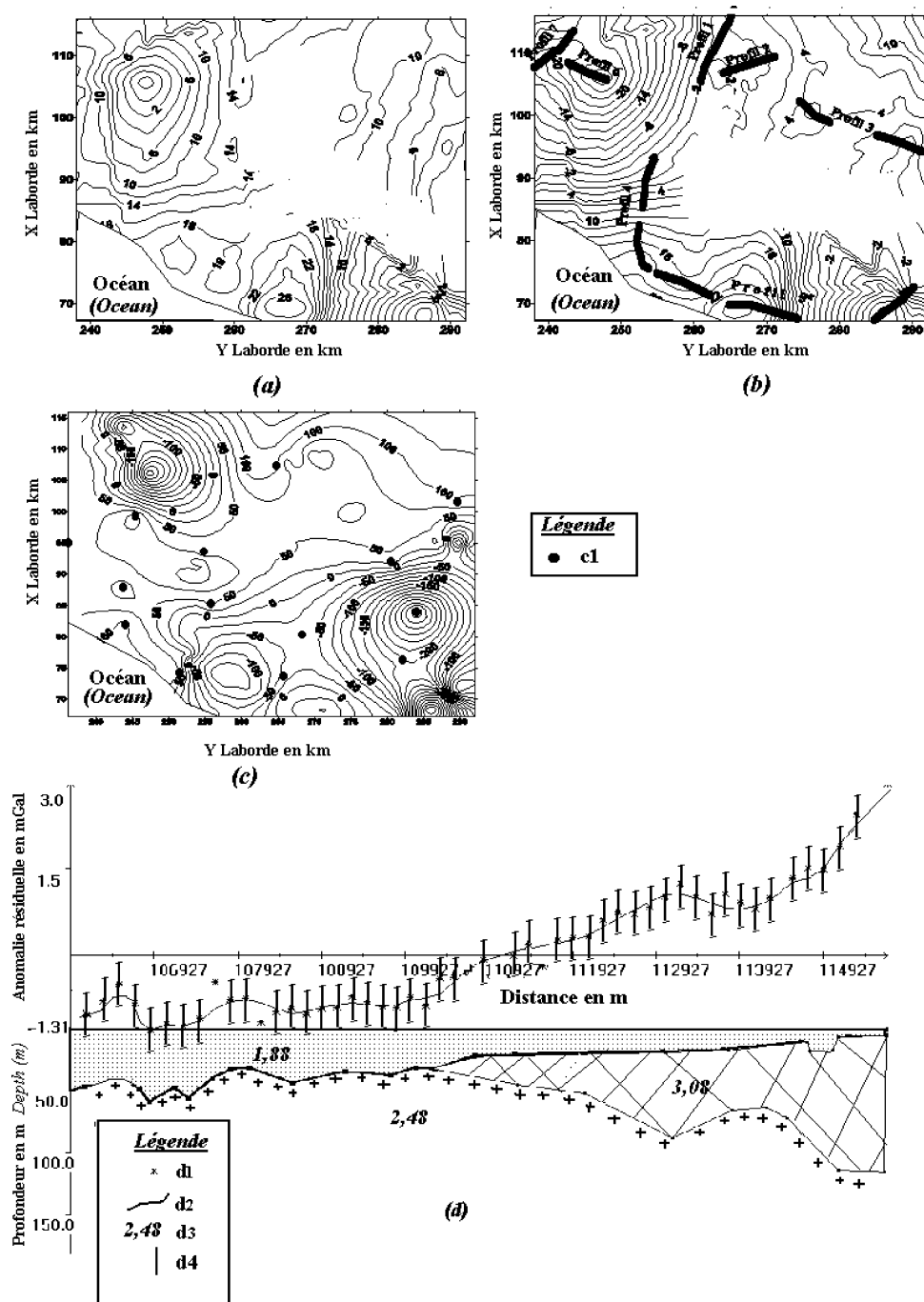


Fig. 3. Cartes d'anomalies, carte de la cote du toit de substratum et modèle de densité le long d'un profil. (a) Carte de l'anomalie de Bouguer (mGal); (b) carte de l'anomalie résiduelle (mGal); (c) cote de toit du substratum (m) – c1 : forage –; (d) modèle de densité – d1 : valeurs observées; d2 : valeurs calculées; d3 : densité, d4 : barre d'erreur.

Fig. 3. Bouguer anomalies, basement top level and density cross-section. (a) Bouguer anomaly (mGal); (b) residual anomaly (mGal); (c) basement top level (m a.s.l.) – c1: drilling –; (d): density model – d1: observed values; d2: calculated values; d3: density; d4: misfit.

tions de base des stations particulières de l'IRD (ex-Orstom) [13].

Le système de calcul du champ gravimétrique théorique utilisé dans le calcul de l'anomalie de Bouguer (Fig. 3a), est pour des raisons faciles à comprendre celui utilisé par l'IRD lors de la première phase. C'est donc la formule de Postdam, 1967, qui a été appliquée.

En ce qui concerne le calcul de la densité de la plaque de Bouguer et de la correction de relief, compte tenu de la topographie relativement plane, sans accident topographique majeur, c'est la méthode de Parasnis qui a été utilisée. En accord avec la définition de l'anomalie de Bouguer, cette méthode postule que l'anomalie de Bouguer est statistiquement nulle sur l'ensemble d'une zone d'étude dont la surface est horizontale [10,12].

Cette condition s'exprime sous la forme suivante :

$$\sum (0,0419 \rho h_i - 0,3086 h_i + \rho T_i + g_{th,i} - g_{m,i}) = 0$$

où h_i est l'altitude, ρ est la densité et les g sont successivement les champs de pesanteur théorique et calculé. Pour une topographie négligeable, $T \approx 0$, d'où :

$$\sum (g_{m,i} - g_{th,i} + 0,3086 h_i) - (0,0419 \rho h_i) = 0$$

Par conséquent, les points représentatifs des variations de l'anomalie à l'air libre en fonction de l'altitude sont distribués aléatoirement autour d'une droite, dont la pente est égale à la densité moyenne de correction à appliquer pour que cette équation soit vérifiée. La valeur moyenne de la pente obtenue sur notre zone d'étude conduit à une densité égale à 2,48. La précision sur l'anomalie à l'air libre et sur l'anomalie de Bouguer dépend bien entendu de la qualité du nivellement. Dans notre zone d'étude, l'erreur sur l'altitude est inférieure à 3 m pour les données de l'IRD [13] et inférieure à 1 m pour les données de l'IOGA. L'erreur sur l'anomalie de Bouguer ainsi calculée est alors inférieure à 0,7 mGal. Le relief de la région étant très peu accentué (entre 130 et 250 m), les corrections de relief étaient de l'ordre de 0,1 mGal, ce qui justifie qu'elles aient été négligées.

Enfin, compte tenu des longueurs d'onde spatiale des anomalies résiduelles recherchées, l'anomalie régionale [8] a été calculée à partir des données de l'IRD (1981), à l'aide d'une surface polynomiale de degré 2.

4.2. Modélisation gravimétrique

La modélisation est faite à l'aide d'un programme de modélisation directe 2,5D basée sur des prismes de section polygonale et d'allongement limité dans la direction perpendiculaire au profil.

Elle postule l'existence de cinq formations de densités différentes, à partir de la géologie régionale et des connaissances générales sur les formations [1, 8] :

- la couverture sédimentaire constituée des formations sableuses et dunaires, de densité $d = 1,88$;
- la formation moyennement dense est représentée à la fois par les calcaires et les grès néogènes, de densité 2,18 ;
- le substratum constitué de leptynites de densité 3,08 et/ou les formations granitiques de densité 2,48 (Fig. 3d) et enfin les formations basaltiques de densité 3,28.

La carte du toit du substratum a été tracée à partir des résultats des modélisations des sept profils (Fig. 3b).

5. Résultats et discussion

Outre le pendage général de direction nord-est-sud-ouest du toit du substratum, le modèle présente trois zones de dépression (Fig. 3c) : la première se situe à l'intérieur de l'alignement du fossé de Saraondry (Fig. 1), la seconde se trouve juste à l'est de Vohipa, où le basalte et le socle cristallin affleurent et la troisième est située au sud-ouest de Kirimosa.

Afin de mieux mettre en évidence les variations d'altitude de faible amplitude du toit du substratum, il nous a paru intéressant de présenter les cartes des dérivées horizontales première et seconde, calculées à partir de la carte présentée ci-dessus (Fig. 3c).

Les points hauts et bas du toit du substratum correspondent aux points où la dérivée première s'annule. La direction du pendage est celle de la direction du gradient horizontal. La dérivée seconde caractérise les variations des pentes ; ses valeurs nulles indiquent les lieux de rupture de pente.

En examinant simultanément la carte des valeurs de la conductivité électrique de l'eau mesurée dans les fo-

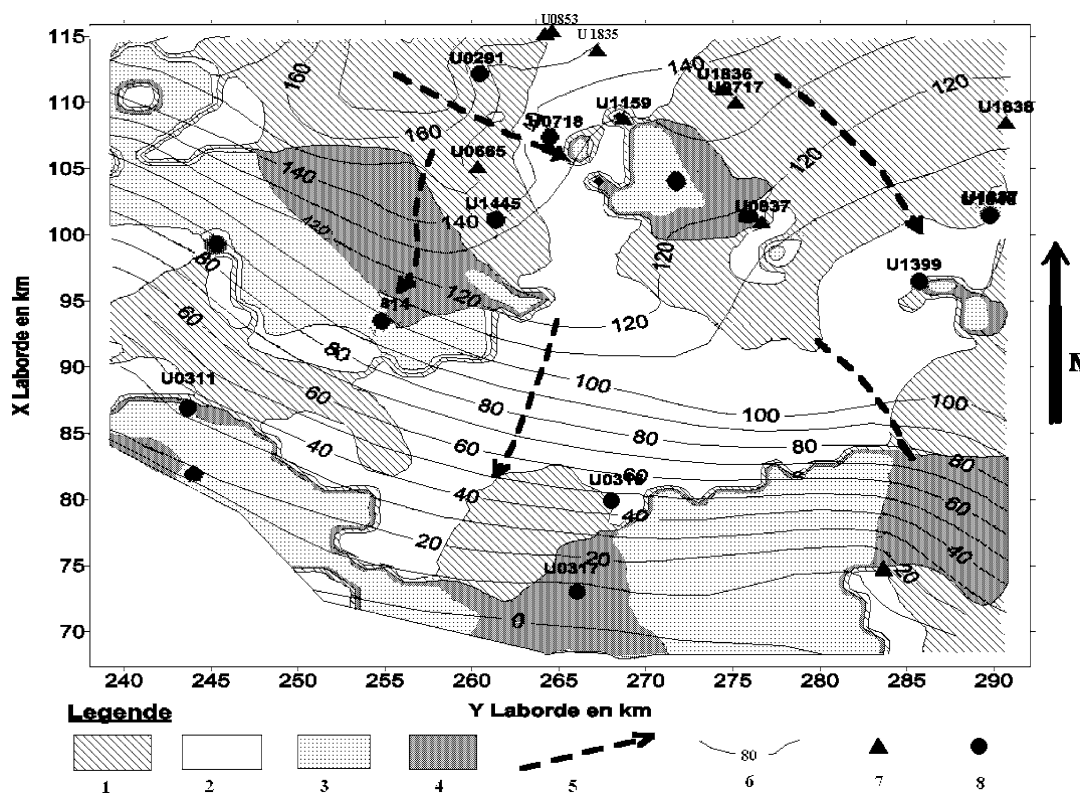


Fig. 4. Carte de la direction de pendage du toit de substratum et points de forage. 1 : Pendage vers le sud-ouest ; 2 : pendage vers le sud-est ; 3 : pendage vers le nord-est ; 4 : pendage vers le nord-ouest ; 5 : direction de l'écoulement de l'eau ; 6 : niveau piézométrique (m) ; 7 : forage où la CE de l'eau est inférieure à $4500 \mu\text{S cm}^{-1}$; 8 : forage où la CE de l'eau est supérieure à $4500 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Fig. 4. Dipping of the basement and conductivity of water. 1: Dipping towards the southwest; 2: dipping towards the southeast; 3: dipping towards the northeast; 4: dipping towards the northwest; 5: groundwater-flow direction; 6: water-table level (m); 7: borehole with WEC $< 4500 \mu\text{S cm}^{-1}$; 8: borehole with WEC $> 4500 \mu\text{S cm}^{-1}$.

rages, la carte de la direction du pendage et la carte de la dérivée de l'altitude du toit du substratum (Fig. 4), nous pouvons formuler les remarques suivantes :

- huit points d'eau sur dix, qui ont une conductivité relativement faible, se trouvent dans la zone où le toit du substratum présente un pendage vers le sud-ouest, et sept points d'eau sur onze, qui ont une conductivité relativement élevée, se situent dans la zone où le toit du substratum a un pendage nord-est et nord-ouest ;
- la conductivité électrique de l'eau augmente néanmoins progressivement en allant vers le sud-ouest.

On est donc tenté de conclure que le substratum joue un rôle important dans la circulation de l'eau : il ralentit le mouvement de l'eau quand il présente un

pendage vers le nord-ouest et le nord-est et favorise sa circulation dans le cas contraire. La faible circulation de l'eau se traduit par une augmentation de son temps de séjour au sein de l'aquifère et, par conséquent, par une augmentation de sa minéralisation, donc de sa conductivité électrique.

6. Conclusions

La connaissance de l'allure du toit du substratum d'un aquifère poreux est un apport intéressant dans la compréhension de la circulation de l'eau souterraine, qui peut compléter et confirmer les informations hydrodynamiques et hydrochimiques. Elle peut donner, en outre, des informations a priori sur la qualité probable d'eau, comme l'a montré, dans notre

zone d'étude, la corrélation avec la conductivité électrique.

En effet, la remarquable corrélation entre les données de conductivité électrique de l'eau et celles de la morphologie du toit du substratum permet de délimiter la zone d'alimentation et la (ou les) zone(s) de drainage de cette région semi-aride de Madagascar.

En conclusion, dans les zones à topographie relativement plane et constituées d'un milieu poreux à conductivité électrique élevée au-dessus d'un socle imperméable, l'application de la géophysique, en particulier de la gravimétrie, donne de bons résultats du point de vue de la recherche hydrogéologique.

Remerciements

Mes remerciements vont particulièrement à M.Y. Albouy (IRD) pour ses critiques constructives et à l'IOGA, au projet Campus et à l'ICTP (International Center of Theoretical Physics) qui ont facilité la réalisation de ce travail.

Références

- [1] M. Annechionne, La contribution de la gravimétrie à l'étude hydrogéologique de la Moraine Oak ridges, mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, École polytechnique de Montréal, Canada, 2000.
- [2] J. Aurouze, Hydrogéologie du Sud de Madagascar, thèse de doctorat ès sciences, Paris, 1959.
- [3] H. Besairie, Géologie de Madagascar, Service géologique Antananarivo–Madagascar, MEM, 1963.
- [4] H. Besairie, Carte géologique, Feuille AMPANIHY 1/500 000, Service géologique, 1970.
- [5] H. Besairie, Traits majeurs de la géologie structurale de Madagascar, RAST, 1973.
- [6] T. Bonnet, J.-P. Colbeaux, L'analyse morphologique spécialisée : apports d'une méthode à la détection des accidents, une nécessité dans l'approche hydrodynamique et karstologique des aquifères fissurés. Exemple dans le Nord de la France crayeux, *Geodin. Acta* 3–4 (1999) 223–235.
- [7] P. Chaperon, J. Danloux, L. Ferry, Fleuves et rivières de Madagascar, Orstom, CNRE, DMH, 1993.
- [8] M. Chouteau, Géophysique appliquée I, 7.440 Gravimétrie, Cours en ligne, Génie minéral, Ecole Polytechnique de Montréal, 1999.
- [9] A. Domergue, Données géologiques nouvelles apportées par les forages, Campagne 1961, Service géologique Antananarivo–Madagascar, MEM, 1963.
- [10] J. Dubois, M. Diamant, Géophysique, Masson, Paris, 1997.
- [11] R.A. Freeze, J.A. Cherry, Groundwater, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979.
- [12] D.S. Parasnis, Principles of Applied Geophysics, 4th edn., Chapman & Hall, London, 1996.
- [13] J. Rechenmann, Gravimétrie de Madagascar. Interprétation et relations avec la géologie, thèse d'État, UPMC, Paris 6, Mémoire Orstom, Orstom Éditions, Paris, 1982.
- [14] A.J. Wesselink, Stratégie du développement régional de l'eau dans le Sud de Madagascar, CGDIS, 1996.

Electrical Resistivity And Induced Polarization Used On Investigation Of Ionic And Hydrocarbon Pollutants Contaminated A Shallow Area. Ambohimambola Site

Rakoto Heritiana A¹, Rajaomahefasoa Riva², Rajaonarivelo S³

Doctor, Department of Physics and Application, University of Antananarivo, Madagascar¹

Research Engineer, Geophysical Institute and Observatory of Antananarivo, University of Antananarivo, Madagascar²

Doctorate, Department of Physics and Application, University of Antananarivo, Madagascar³

ABSTRACT:Based on the electrical resistivity and the Induced Polarization (Chargeability) properties, we have displayed on three sites the ERT techniques to see if the presence of ionic solute and hydrocarbon pollutants change the geoelectrical response of the aquifer medium.

We have taken as an experimental site the Ambohimambola area, upstream of Antananarivo plain. We have considered a reference zone, in order to have a reference value of the aquifer resistivity and chargeability without pollutant.

The studies area are located near the retention lake, where the ionic solute from the colorant product are dumped, and downstream of the current generator that spills their waste oil on shallow area.

The geoelectrical section result of the ERT show that the pollutants change the electrical resistivity of the aquifer medium and their chargeability. This change is so obvious in using the statistical tools, histogram of resistivity and chargeability values.

KEYWORDS:Electrical Resistivity Tomography (ERT), Electrical resistivity, Induced polarization, chargeability, aquifer, pollutant, ionic, hydrocarbon, statistic.

I. INTRODUCTION

Agglomeration of Antananarivo, as well as the alluvial flat around the hilly area are so favourable on reception both industrial and household wastes. Cause of the pollutant discharged, the groundwater is exposed on contamination.

Antananarivo plain, known under "Betsimitatatra plain" name, can be divided into two areas, upstream and downstream, if we refer into the river which drains and crosses it [1]. However, the presence of manufactory which discharged dumped their wastes inside the basin without adequate protection, active the contamination of the plain groundwater.

Under this study, we take particularly an upstream area where the groundwater is again in its initial state without contamination. Also to highlight the effect of both ionic and hydrocarbon wastes on geophysical parameters that we consider the Ambohimambola area where the current generator of JiRaMa Company sent its hydrocarbon waste (photo1) and the paper mill of PapMad manufactory dumped their colorants residues waste on shallow zone (Photo 2).

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 3, March 2018



(Photo 1) (Photo 2)
Photo 1: Hydrocarbon residue, Photo 2: Retention Lake of colorant

II. RELATED WORK

Location of survey area

The survey area is located at the East of Antananarivo. The Ikopa River drain the ground and surface water on our zone. This River delineate the area at its West part. Three sites, one reference and two contaminated, are considered under this study. The distance between reference and contaminated areas is about 2.3km (see fig 1).

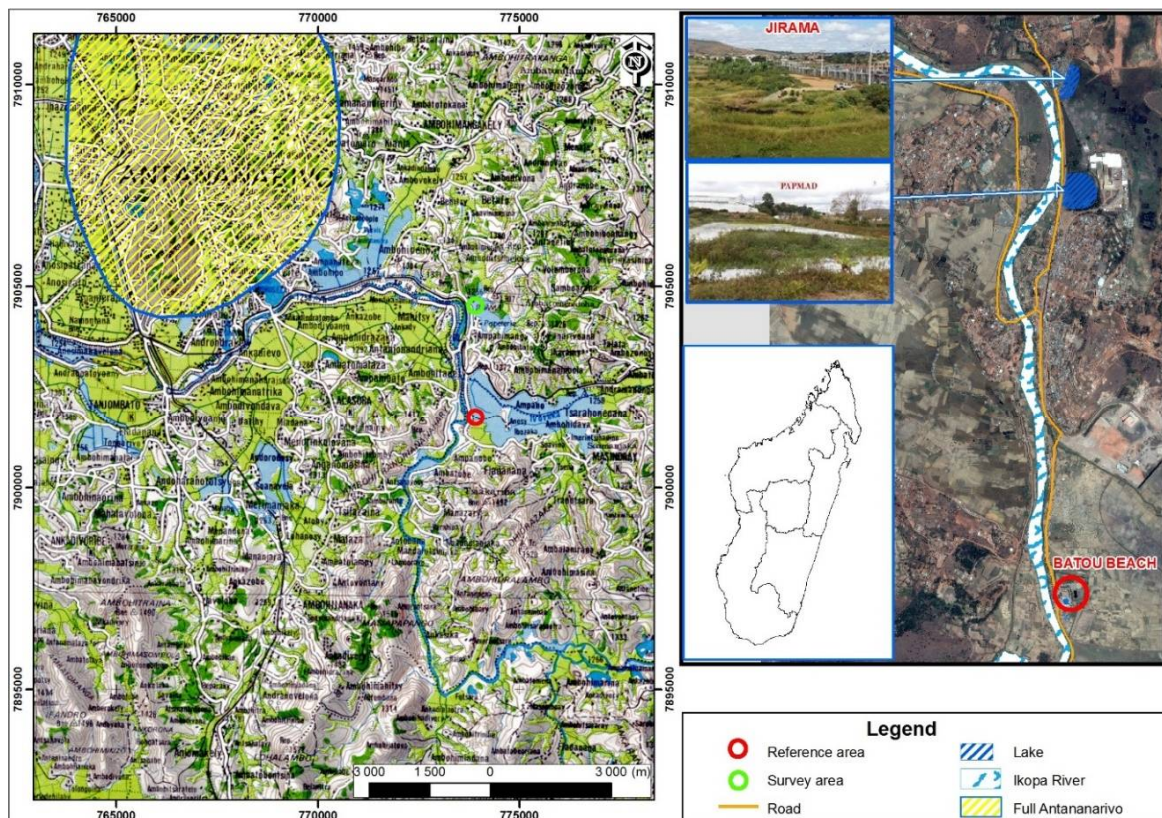


Fig. 1. Location of survey areas

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 3, March 2018

Geological setting

Each site is situated on the shallow zone, where the alluvium deposit cover the weathered and crystalline rock (Fig. 2). The underground rock is formed by old metamorphic rock of Antananarivo block. The hilly area is covered by weathered rock, especially constitute by migmatitic, mica schist, granitoid and gneiss. The plain is covered by alluvium deposit.

Two areas, affected by the pollution are located on downstream of retention pond, and the reference area is out of any groundwater contaminant influence.

The drilling done on the shallow zone, paddy field, gives us the section of the superposed layer deposited one crystalline zone (see fig 2). This alluvium deposit has about 20m thick, it is constituted by fine and medium sand and clay. Some isolated peat are sometime found and hit in some layer. The successive alluvium is lied on the weathered rock, formed by series of laterite, clayed sandy and boulders [1], [3], [4], [5]. The bedrock is constituted by migmatite.

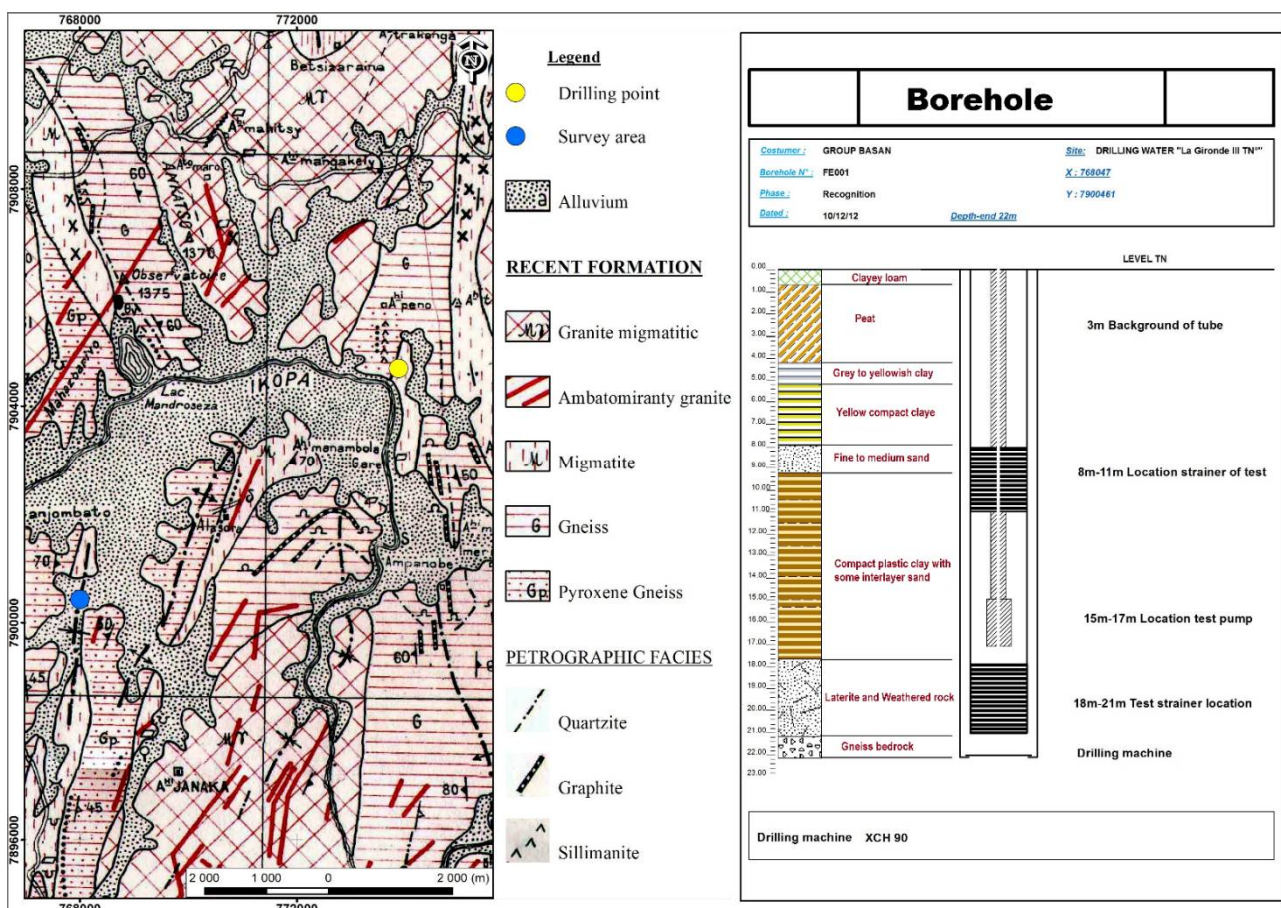


Fig 2. Regional geological map and lithological section see on borehole

Hydrology and hydrogeological settings

In order to have a same aquifer system, on reference zone and on two contaminated zones, that we have chosen the upstream of Ikopa River where contamination from the human activities is so delimited again. The Ikopa River receive on its right bank Varahina and Iovoka rivers after taken its source on Tsiazompaniry Lake. The river cross its bed in sixty kilometers distance before reaching the Betsimitatatra plain (see Fig 3).

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 3, March 2018

The multi-layer aquifers develop on this alluvial plain, unconfined (phreatic aquifer) and confined aquifers [4]. They are constituted by two types of media: a) porous and b) fissured or fractured media. The porous medium is found on lateritic and alluvium areas, and the fissured medium is developed on the crystalline rock. The groundwater system are drained by the river during the drought season and they are recharged by the river on flood season [7].

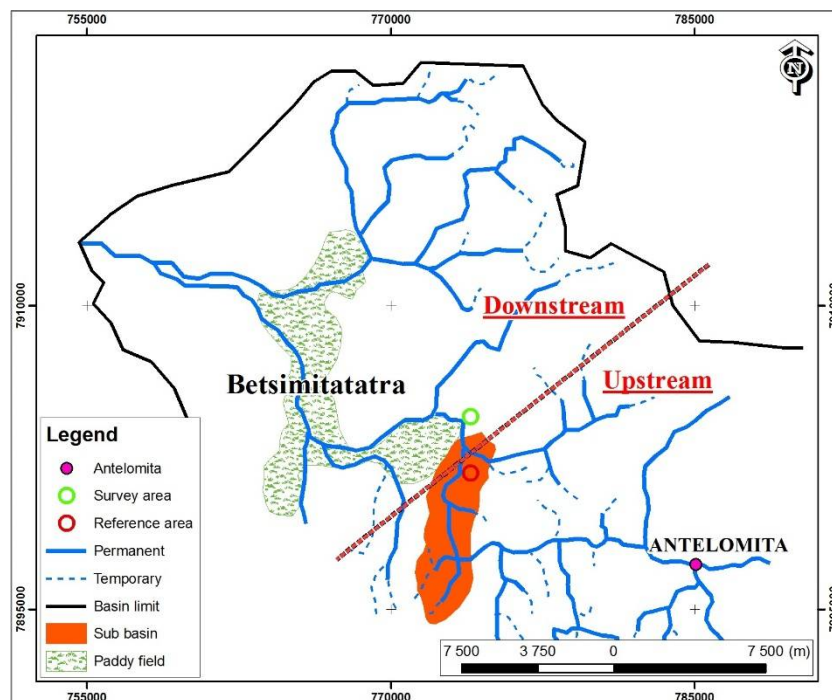


Fig 3. Hydrography of Betsimitatatra plain

III. METHODS

Notion of pollutants

Dispersions of liquid industrial pollutants are characterized by a great diversity, depending on the use of water during its process. As a good solvent, the water receive and dissolve the waste from the human activity, such as organic materials, greases (food industry), hydrocarbons (refinery), acids, bases, various chemicals (chemical industry and synthesis), metals (surface treatment, metallurgy).

Electrical resistivity and Induced polarization

The electrical resistivity is depending on lithology formation [8], on water content [9], [10], on electrical charge nature [11], [12], [13], on nature and metal quantity [14] or on temperature [15], [16]. We are interesting especially on the electrical charge nature on this work. The hydrocarbons pollutants are completely different with the ionic solution pollutant.

Considering Archie's law [17], 1942, aquifer resistivity is proportional with electrical resistivity of its brine. The hydrocarbons are electrically resistive but the ionic solutes are conductive. The electrical effect of their pollutants is so obvious on aquifer electrical properties, the hydrocarbons increase but the ionic solute decrease the aquifer electrical resistivity value.

$$\rho_a = \rho_w a \Phi^{-m} S^{-n}(1)$$

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 3, March 2018

Here, ρ_a denotes electrical resistivity of fluid saturated rock in (Ωm), ρ_w electrical resistivity of the brine in (Ωm), Φ is the porosity, S presents brine saturation, m is the cementation exponents of rock, n is the saturation exponents and a is the tortuosity factor.

The following parameters have a significant effect on induced polarization response of rock:

- Nature and bulk (volumetric) metallic mineral [14], [18].
- Ionic content of solute [19]
- Nature and bulk (volumetric) clayey mineral [20], [21]
- Water saturation [22]; [10]
- Petrophysics properties : porosity, permeability, pore size [23], [24], [12]
- Temperature [16].

Based on this induced polarization properties, both hydrocarbons and ionic presented in aquifer change successively its petrophysics properties and its water ionic content. In fact, its IP value increase, according to reference zone IP value. Note that the induced polarization is characterized by the chargeability parameter. It presents the relaxation time of rock after cutting current injection.

$$m = \frac{1}{V_p} \int_a^b V_t(t) dt \quad (2)$$

Here, m denotes chargeability in (ms or mV/V), V_p is current potential just before its cutting of, $V_t(t)$ presents potential in t time.

As the measurement of the $V_t(t)$ is physically impossible. After Seigel [25], in 1959, the chargeability can be obtained through the partial chargeability m_i , the apparent resistivity ρ_a and the partial resistivity ρ_i

$$m \approx \sum_i m_i \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \rho_i} \quad (3)$$

We are carried out the electrical method, the Electrical Resistivity Tomography (ERT) using resistivity and chargeability parameters. The Wenner was adopted on their three sites.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

Location of geophysical lines

Four geophysical lines were displayed on alluvial area, where the aquifer, unconfined and sustained by direct vertical and lateral flows, is formed by sand, gravel. The phreatic aquifer is exposed on the pollutant which can changed its geoelectrical properties.

The reference is placed upstream, at about 2.3 km from the survey area affected by pollutants (see Fig 4).

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 3, March 2018

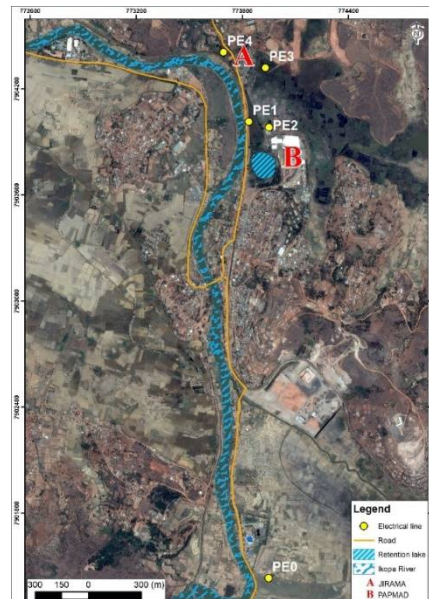


Fig 4. Location of geophysical lines

Reference geoelectrical section PE0

The line is displayed on East West direction. The adopted inter electrode distance is $a = 5\text{m}$, which reach 25m depth

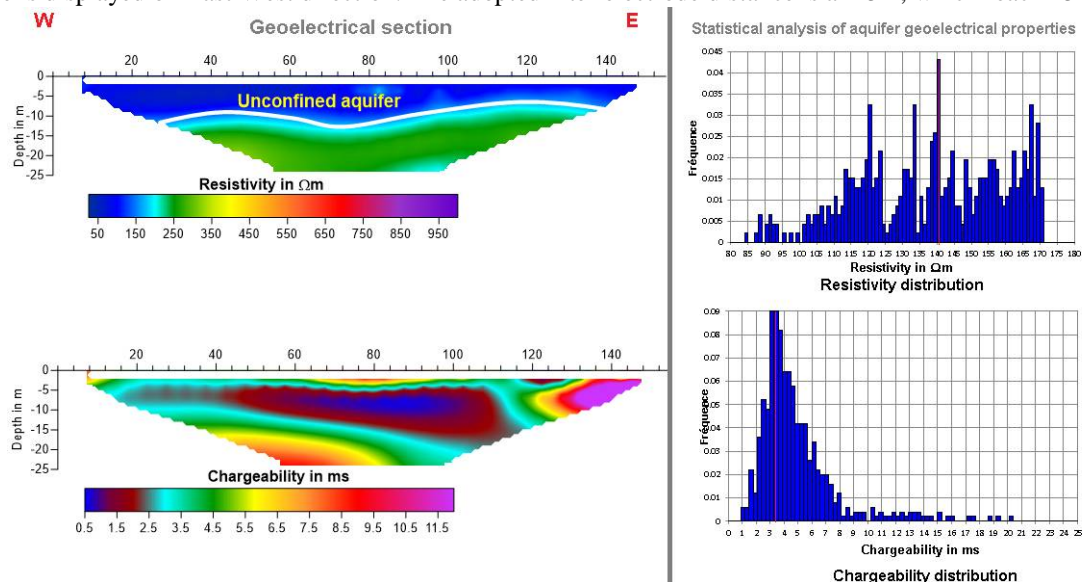


Fig 5. Geoelectrical section and histograms of resistivity and chargeability of PE0 line

The statistical analysis of the true resistivity and the chargeability, from the apparent resistivity and apparent chargeability inversions in using the res2inv software, shows that the resistivity of aquifer is about $140\ \Omega\text{m}$, and its chargeability is around 3 ms (see. Fig 5). Theirs values are the most repetitive on the unconfined aquifer zone.

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 3, March 2018

Geoelectrical sections PE1 and PE2

The two lines were displayed near the PapMad manufactory which send the ionic solute on retention basin. The unconfined aquifer is contaminated with this ionic solute, cause of direct vertical percolation and the lateral recharge. PE1 line was installed on the way which lead to JiRaMa current generator. The profile was done with inter-electrode distance $a = 5\text{m}$.

The geoelectrical section shows that the unconfined aquifer, characterized by the low value of electrical resistivity (less than $200\ \Omega\text{m}$), is about 25m thick. The weathered zone is so deep and it is not reach with the installed spread.

The chargeability section shows that the chargeability value vary from 0.5 ms to 12ms .

The statistical analysis of the geoelectrical value, resistivity and chargeability, of the aquifer zone gives us likely value $120\ \Omega\text{m}$ for electrical resistivity and 5.3 ms for chargeability.

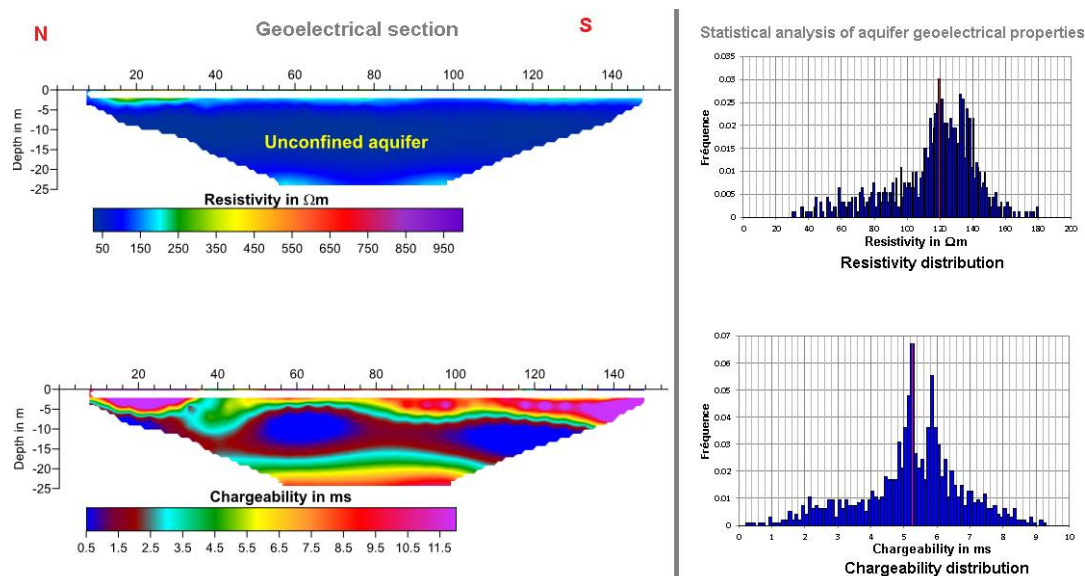


Fig 6. Geoelectrical section and histograms of resistivity and chargeability of PE1 line

PE2 line was displayed on the shallow zone, paddy field and it was installed with inter-electrode distance 3m which gives an investigation depth 15m .

The statistical analysis of aquifer geoelectrical parameters gives the following likely values: the electrical resistivity is about $72\ \Omega\text{m}$ and the chargeability is around 5ms

According to the geoelectrical properties of aquifer on reference zone, the result shows that the resistivity value on PE1 and on PE2 is less than resistivity value on PE0.

The ionic solute dissolved in the groundwater and added the free charge inside its. This phenomenon decrease considerably the resistivity value of the brine, consequently, the aquifer zone.

The change of ionic content in aquifer zone conduct on raise of chargeability value.

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 3, March 2018

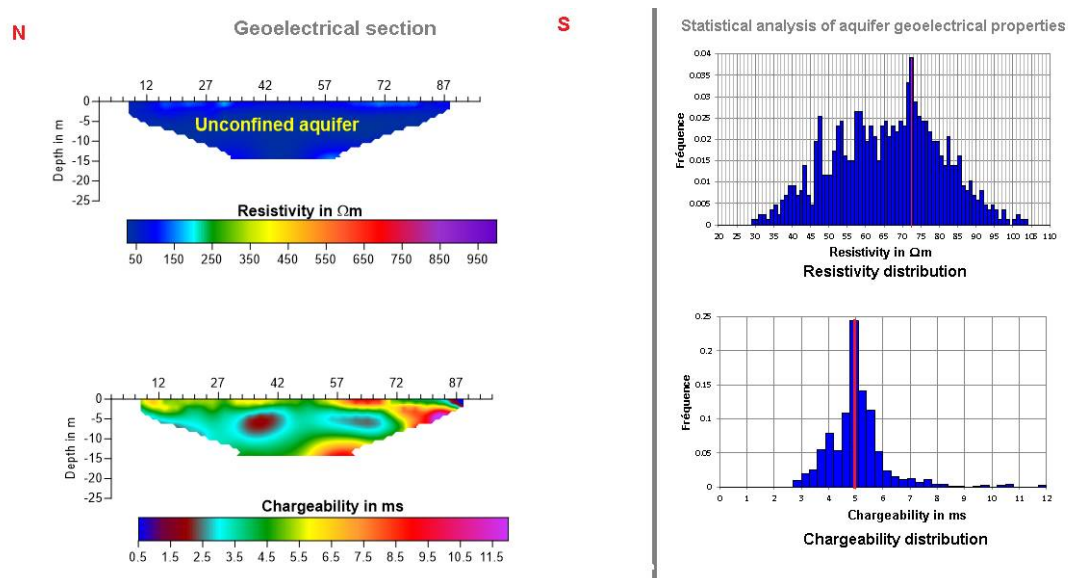


Fig 7. Geoelectrical section and histograms of resistivity and chargeability of PE2 line

Geoelectrical sections PE3 and PE4

ERT, PE3 and PE4 are implanted near the hydrocarbon waste dump by JiRaMa on shallow zone.

PE3 followed the direction West East and displayed along the pouring and reached the shallow zone covered by alluvium formation.

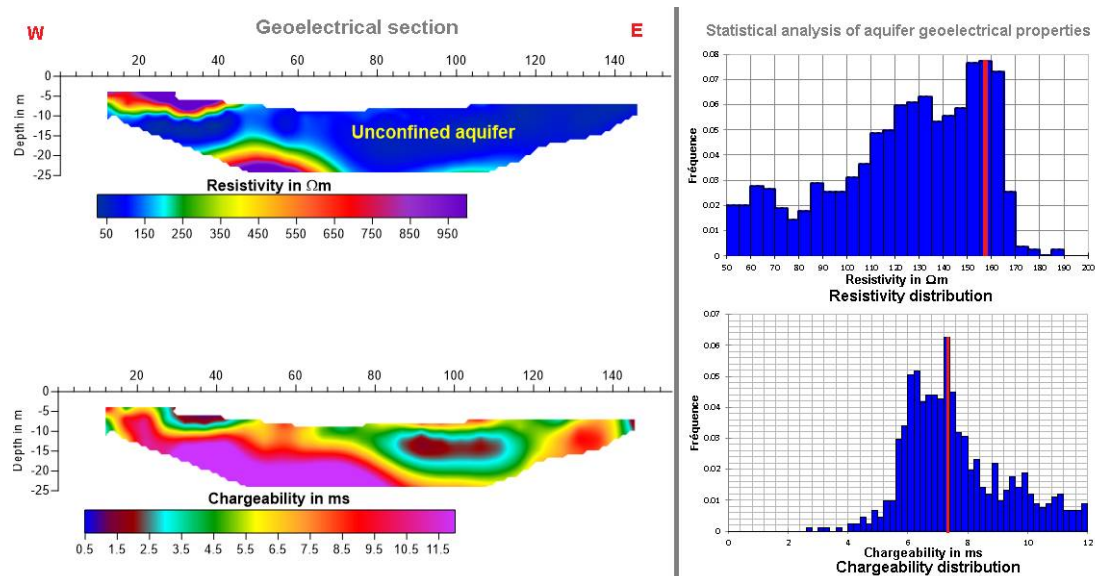


Fig 8. Geoelectrical section and histograms of resistivity and chargeability of PE3 line

The geoelectrical section bring out two resistivity's layers, conductive zone at East on flat area and resistive formation at West on lateritic area.

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 3, March 2018

The comparison of the electrical resistivity from reference zone and the PE3 sections shows that the resistivity value is so high on PE3 than on PE0.

Also, the chargeability is much higher on PE3 section, after the statistical analysis result (see Fig 8)

The PE4 line is displayed on North South direction. North part of line is installed on the lateritic area and the rest on the alluvium. As on PE3 section, the separation of lateritic couverture and the alluvium deposit is highlighted with its electrical resistivity formation. The resistivity value is less than 200 Ωm in alluvium zone. The alluvial deposit has a 15m thick, at south near the Ikopa River.

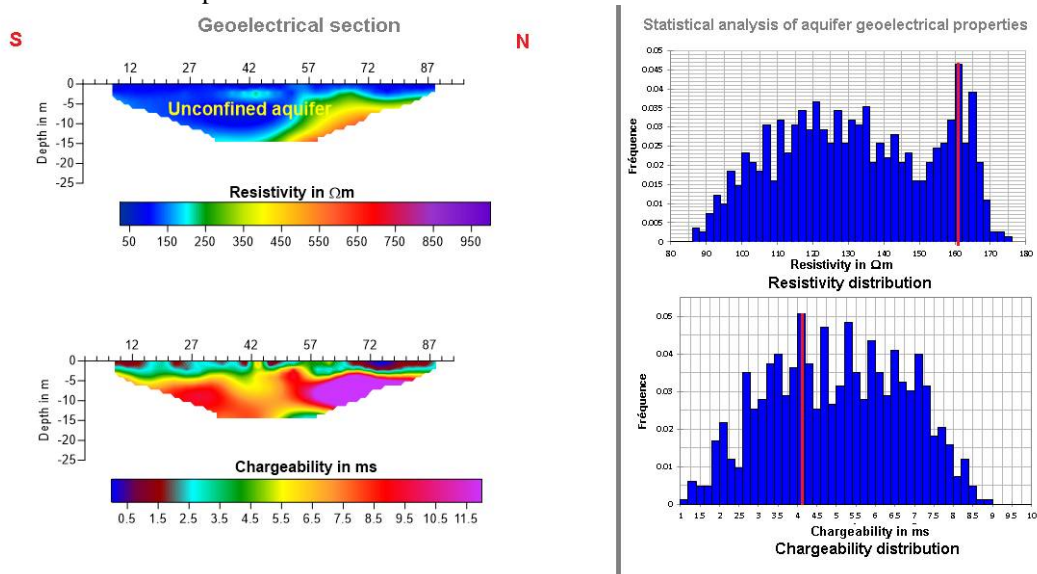


Fig 9. Geoelectrical section and histograms of resistivity and chargeability of PE4 line

The statistical analysis of the resistivity model shows that the likely resistivity value of PE4 section is around 160 Ωm . This resistivity is much higher than we see on reference zone.

The chargeability shows also this slight value increase. Its value is about 4ms under PE4 line.

V. CONCLUSION

The using of the ERT on three sites, one on reference zone (away of the pollutant source) and two sites successively polluted by ionic solute and hydrocarbon waste dump, shows the difference of theirs geoelectrical properties.

The study area is located on alluvial plain of Antananarivo, and we are interested particularly on the unconfined aquifer, which has a direct relation with the pollutant by vertical and horizontal flows.

According to the electrical resistivity of aquifer medium, the ionic solute increase the electrical charge (ion) inside the water and decrease the electrical resistivity value of aquifer. The comparison of the likely resistivity value in aquifer medium bring out this effect.

The electrical resistivity of the aquifer on reference zone, under PE0 line is around 140 Ωm , this value decrease on 120 Ωm under PE1, displayed on the way near the Ikopa River it is 72 Ωm , on flat area near the retention lake under PE2. The resistivity value is less and less weak in approaching the lake. Cause of the ionic content increase, the chargeability value is also growth. The hydrocarbon pollutant has an effect to increase the electrical resistivity and the chargeability value.

So the two pollutants are really marked by the change of the geoelectrical properties, decrease of resistivity value and grow of chargeability value for the ionic solute, increase of the resistivity and chargeability for the hydrocarbon pollutant.

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 3, March 2018

ACKNOWLEDGMENTS

I would like to thank Dr. Camerlynk C. of UPMC, for the KIT Master Project that we was undertaken together. Without this project, the data collecting processed under this article are not possible. I'd like also to address our sincere thanks to all teams of GARE, UPMC, Paris VI, our discussion during my scientific visit at you laboratory is very helpful

REFERENCES

- [1] Rasolomanana E, Rasolondrajao L., Randrianja R., Robinson L., Ralaimaro J, and Rakoto H., "Problèmes de pollution des ressources en eaux posés par les déchets industriels et ménagers dans la ville d'Antananarivo et de ses environs", Madarevues, Madamines, Vol. 2, 2011
- [2] Blondel A., "Développement des méthodes géophysiques électriques pour la caractérisation des sites et sols pollués aux hydrocarbures", Thèse de doctorat de l'Université Michel de Montaigne, p244, 2014
- [3] Colas, "Rapport fin de travaux de forage d'eau à Ambohimambola", 2016
- [4] Dussarat B. and Ralaimaro J., "Caractérisation hydrogéologique de bassins versants emboîtés sur socle altéré en zone tropicale d'altitude : exemple des Hautes Terres de Madagascar". Hydrogeological characterization of drainage basins in weathered basement of a high-altitude tropical zone: Hautes Terres, Madagascar, Hydrogéologie, p 53-64, 1993
- [5] Dussarat B., "Structure et fonctionnement des aquifères de socle altéré en zone tropicale d'altitude : cas du Bassin de Mahitsy (Hautes Terres de Madagascar)", thèse de doctorat, 171 p, Montpellier 2, France, 1994
- [6] Rajaonarivelo S., "Traitement et analyse des données géophysiques des zones contaminées d'Ambohimambola", Mémoire de Master II, Physique du Globe, Université d'Antananarivo, 2016
- [7] Chaperon P, Danloux J., and Luc Ferry, "Fleuves et rivières de Madagascar". IRD Edition, 1993
- [8] Palacky G. J., "Electromagnetic methods in applied geophysics", Resistivity Characteristics of Geologic Targets, vol. 1, 1988
- [9] Comparon L., "Étude expérimentale des propriétés électriques et diélectriques des matériaux argileux consolidés". PhD thesis, Institut de Physique du Globe de Paris, 2005
- [10] Breede K., A. Kemna, O. Esser, E. Zimmermann, H. Vereecken and J. Huisman, "Spectral induced polarization measurements on variably saturated sand-clay mixtures", Near Surface Geophysics, 10, 479-489, 2012.
- [11] Slater L. D. and Lesmes D., "IP interpretation in environmental investigations", Geophysics, 67(1), 77– 88, 2002
- [12] Revil A. and Florsch N., "Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media", Geophysical Journal International, 181(3), 1480– 1498, 2010.
- [13] Kemna, A., A. Binley and L.D. and Slater, "Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications", Geophysics, 69, 97-107, 2004
- [14] Pelton W. H., Ward S. H., Hallof P. G., Sill W. R. and Nelson P. H., "Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP", Geophysics, 43(3), 588– 609, 1978
- [15] Hayley K., Bentley L. R., Gharibi M. and Nightingale M., "Low temperature dependence of electrical resistivity: Implications for near surface geophysical monitoring. Geophysical Research Letter, Vol.34, 2007
- [16] Zisser N., Kemna A. and Nover G., "Dependence of spectral-induced polarization response of sandstone on temperature and its relevance to permeability estimation". Journal of Geophysical Research, Vol 115, 2010
- [17] Archie G. E., "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", Am. Inst. Min. Metallurg. Petr. Eng. Techn., paper 1422, 1942
- [18] Mansoor N. and Slater L., "On the relationship between iron concentration and induced polarization in marsh soils", Geophysics, vol. 72, A1– A5, 2007.
- [19] Boerner, F.D., Schopper, J.R., and Wiler, A., "Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarisation measurements", Geophysics, vol. 44, 583–601, 1996.
- [20] Telford W. M., Geldart L. P. and Sheriff R. E., "Applied geophysics", Cambridge University Press, 1990.
- [21] Vinegar H. J. and Waxman M. H., "Induced polarization of shaly sands", Geophysics, 49(8), 1267–1287, 1984.
- [22] Vanhala H., "Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (sip) method", Geophysical Prospecting, 45(2), 303–326, 1997.
- [23] Koch K., Irving J., Holliger K. and Kemna A., "Controlled changes in grain size and pore characteristics and their impact on the hydraulic conductivity and spectral induced polarization response of proxies of alluvial sediments". SEG Expanded Abstracts, 28(1), 1365– 1369, 2009.
- [24] Abdel Aal G. Z., Atekwana E. A. and Atekwana E. A., "Effect of bioclogging in porous media on complex conductivity signatures", Journal of Geophysical Research, 115, G00G07, 2010.
- [25] Seigel H. O., "Mathematical formulation and type curves for induced polarization", Geophysics, 23(4), 547– 565, 1959.

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018

Groundwater Quality Assessment around Sub-Urban Zone, Antananarivo Area, In Using Hydrochemical Approach

Rajaomahefasoa R. E.¹, Rakotomandrindra P. F.¹, Randriambololona T.¹, Ratsimbazafy J. B.³, Rakoto H.²

Engineer Researcher, Institute and Observatory of Geophysics in Antananarivo, University of Antananarivo,
Madagascar¹

Doctor and Senior Researcher, Mention Physics and Application, University of Antananarivo, Madagascar²

Highly skilled full professor, Senior Researcher, Mention Physics and Application, University of Antananarivo,
Madagascar³

ABSTRACT: The study area is located in Madagascar High land, precisely at Analamanga region, including a large plain culminate on the elevation around 1250 m. About sixty percent of its peoples do not have access on drinking water distributed by the water supply company. Most of their population use wells as water supply system. However, the wells are highly exposed on pollutants because of its location, situated inside the residential area and close to the anthropic activity and household waste.

The hydrochemical analysis was carried out on the water sample from the well. Measurement of major ions were performed at JIRAMA's laboratory where the Ca^{2+} and Mg^{2+} concentrations are obtained through the volumetric titration method in using solution EDTA, the HCO_3^- through alkalinity titration and complete alkalinity titration, Cl^- in using the acid titration, SO_4^{2-} concentration is defined with barium ethanoate; organic matter was measured in using permanganate oxidisability; Na^+ concentration is determined through the electrical conductivity method, and the colorimetric titration method was used to determinate iron, ammonium, nitrate and nitrite concentration in solution. Some Radionuclide elements (U and Th) and barium concentration analysis were also done. The test was done in using ICP- MS method (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry).

Water TDS test give the concentration value range between 10mg / L to 1200 mg / L. Waters are slightly acid with low pH, included to 4.4 and 6.87. Also, the observation done on water temperature at two seasons winter and summer show that it change and follow the ambient temperature. The chemical analysis gives high rate of nitrate cation which is in balance with both chloride and sodium concentrations. Approximately 10 % of the 31 monitored wells had nitrate concentrations above the WHO standard and more than 50 % had a TDS above 13.5 mg / L.

The result analysis done under this study conduct us to consider that the water resources inside the sub-urban zone are vulnerable on human activities, household waste, animal and human defections, and industrials discharges.

KEYWORDS: Sub-urban, Antananarivo, groundwater, cation, anion, hydrochemistry.

I. INTRODUCTION

In front of the water drinkable demand increase caused by the population increase and the urbanization development, the water potentiality assessment is unavoidable under the water sustainable management. The present study is done in order to understanding chemical quality change of groundwater in sub-urban site, around Antananarivo area. The study area is included in the Highland of Madagascar, the soil is constituted by metamorphic crystalline rock and the alluvium at the lowlands part. [5]. The map showed that the lowlands areas

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018

located on the alluvial deposits (Betsimitatatra plain) are most vulnerable of pollutants than the weathered area situated in interfluvial zone. Ralaimaro in 2004 [6] studied the hydrochemical setting in the crystalline aquifer of Highlands in Ambohitrakoho site, out of urban area. The groundwater mineralization is considerably low, even in lowland cover by flat and alluvial deposits. Groundwater electrical conductivities are between 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ at the mountain background and they are less than 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for the altered aquifer of interfluvial system. There are three types of chemical groundwater, sodium magnesium for water spring located on the mountain base, sodium bicarbonate for the water from the altered aquifer zone, and calcium bicarbonate and magnesium in the arena aquifer zone. [7] The effect of industry activity on the groundwater and surface water were studied.

Also, we are done the groundwater sampling for the chemical analysis of major ions and some radionuclide elements, in 31 wells located around Antananarivo urban area (see figure 1). The process and the interpretation of the analysis results conduct us on groundwater quality assessment and to see the vulnerability degree of this resource in sub-urban area.

II. GEOMORPHOLOGICAL AND GEOLOGICAL SETTING

The study area belongs to the Centre Highland part of Madagascar. It is formed by the succession of lateritic hills, valley and alluvial plains in lowlands zone. Antananarivo is surrounded by the alluvial plain composed of lacustrine deposit during the quaternary. Three rivers crossed this plain, Ikopa, Sisaony and Mamba. They follow generally the South-East North-West direction (see Figure 1).

The old towns are installed on isolate hills surrounding by the Bestimitatatra plain which is before transformed to paddy field and occupied progressively by the habitation. The elevation varies from 1240m to 1540m.

Weathered zones are lithologically heterogeneous. Its types were depended on rock nature [7]. The lateritic layer may reach 40m depth in some area [8].

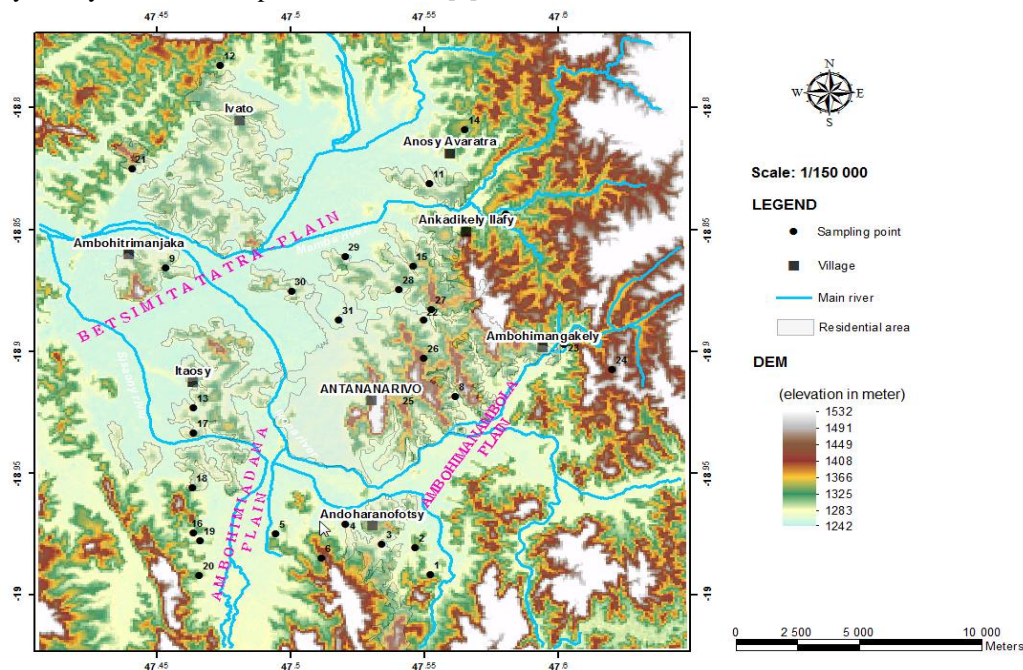


Figure 1: Sampling points and geomorphologic setting of the study area

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018

The regional geological setting conducts us on the differentiation of the aquifer type. The study area is formed principally by two types of rocks: granitic and schist. Some schist composed by the graphite series is associated with gneiss. Weathered formation from the two types of rock are completely different, also the aquifer system inside these layers.

The lateritic rocks are crossed by depressions and formed the valleys and shallows covered by alluvial deposit. These lower zones drained the regional water, such as surface than underground, which joined after the river network [9].

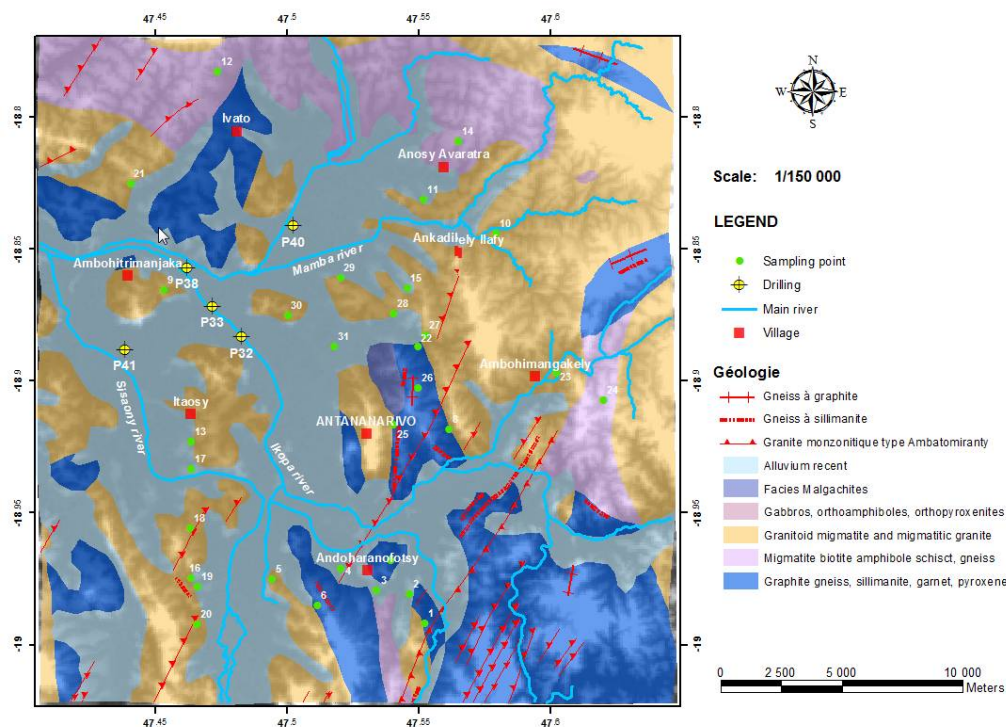


Figure 2: Geological setting of the study area and drilling, sampling points, Main River

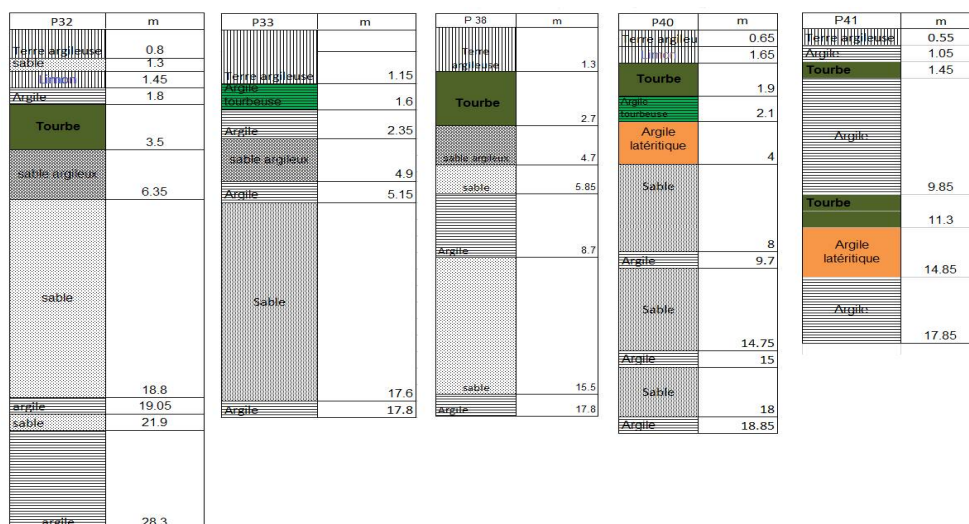
Some litho-stratigraphic sections deduced from the drilling done one Antananarivo plain, North West of Antananarivo town, drive us on the identification of the different potential aquifers and the impermeable layer which limit the aquifers. We can deduce from the four successive interest layers from top to bottom, hydrogeologically: thin sandy layer form the perched aquifer, confined aquifer form by sand isolate from the upper aquifers by an argillaceous layer, micaceous-clay arena constitute the aquifer in weathered zone and the fracture and fissured aquifer of basement(Figure 3).

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018



Legend: Terre argileuse - Clayed soil; Argile, - Sand; sable - Silt; limon, - Peat; Tourbe, - Lateritic clay ; Argile latéritique; - Sandy clayed - Sable argileux-

Figure3: Drilling in flat area and alluvial plains of the study area.

III. MATERIALS AND METHODS

Physico-chemical analyses was done on the 31 waters samples from the well and spring located around Antananarivo town (figures 1 and 2). Samples were filtered in using the 0.2µm paper pores and stored in polyethylene bottles 1.5 liters volume. The samples were immediately brought to the laboratory and then analysed as soon as possible in order to minimize the change in the hydrochemical properties.

Note that the measure of the pH, temperature, electrical conductivity and TDS were done with multi-parameter HANNA high-precision in-situ before the sampling. The variation of pH and TDS may be interpreted as existence of contamination.

The standard procedure, APHA 1995 was followed during the chemical analysis of major and minor ions. For the alkalinity, HCO₃⁻ and CO₃²⁻ titration, the standard sulphuric acid (0.02N) were used in using phenolphthalein and methyl orange indicator paper. Also, the titration of radionuclide elements (U and Th) and barium was done with ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) method.

Increase of water mineralization is result of either rock chemical elements dissolution or anthropological pollutant. After the analysis and determination of the mineralization types that we can define the mineralization origin.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

Results

Groundwaters chemistry :

TDS and pH are the parameters which allow controlling easily physical and chemical characteristics of waters. Their variation translates contamination of the water resources (FEPS).

The results reveal that all samples are slightly acid. The pH range between 4,4 during wet season and 6,87 for dry season. The mean pH is 5,6.

The TDS value is 13 mg/L for the minimum, corresponding to dry season and 1295 mg/L for wet season. TDS for wells corresponding to samples 3, 29 and 30 indicate a poor quality of water according to the WHO standard value.

Organic matters (OM) are results of urban sewer discharge, and pollutants from food industry or slaughterhouse [10], [11].

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018

The mean values of OM from the two seasons is 1,28 mg/L and 0,25 mg/L. Samples number 12 and 4 present concentrations equal to 5 mg/L and 4mg/L in dry season. These values do not exceed the WHO standard level. However, the presence of OM in the groundwater means interaction of water with a peaty formation under the surface and which is diluted during wet season.

The mean value of the electrical conductivity of the samples is 211 μ S/cm and 246 μ S/cm. The malagasy standard is fixed a maximum of 3000 μ S/cm and the rainwater have electrical conductivity equal 90 μ S/cm [12].

Ammonium concentration is less than 1mg/L for all samples except the sample 3 where the value is 4,31 mg/L in dry season. This is probably due to home wastewater discharge.

Presence of nitrates in groundwater is an indice of pollution from agriculture, urban, or industry. In this study, the samples 3, 4, 7 and 16 have respectively nitrate concentrations equal to 199,24 mg/L, 70,48 mg/L, 81,39 mg/L, 144,36 mg/L et 53,01 mg/L.

Nitrate concentrations range between 0,042 mg/L à 0,035 mg/L. Samples 3, 13, 15, 22, 30 et 31 exceed the maximum content level of the malagasy standard value.

Discussion :

a)- Nitrate

Table 1 shows statistic description of major ions and TDS.

Table 1: Descriptive Statistics

	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Calcium	31	.80	82.00	13.4710	16.77185
Magnesium	31	1.22	43.50	7.2052	9.33783
Sodium	31	1.15	144.26	23.9298	32.10368
Bicarbonates	31	4.88	135.42	21.6058	27.79029
Sulfates	31	.00	20.17	3.5623	5.00131
Chlorites	31	1.77	220.01	37.2548	49.61129
Nitrates	31	.00	199.24	18.6223	38.48656
TDS	31	13.00	1198.00	256.4516	303.58742

Nitrate concentration in groundwater is defined as follow [13], [14]:

- nitrate concentration less than 0.9 mg/L, indicate a natural value or background noise,
- nitrate concentration between 0.9 mg/L and 13.5 mg/L, correspond to transitional stage,
- nitrate concentration above 13.5 mg/L, shows a possible influence of the resources.

The results shows that 25,80% of the water samples have nitrate concentrations that exceed 13,5 mg/L during dry season and 51,6% during wet season. Among them, 37,5% in dry season and 25% in wet season exceed the maximum content level acceptable for WHO and Malagasy standard level (50 mg/L).

Consequently, we can resume that pollutions of the groundwater for the study area came from anthropic activities. Pollutants like nitrate in water may come from latrine infiltration, or leaching from waste storage in the surface. The increases of contaminant concentration after rainy season confirm this observation. Table 2 give correlation matrix between major ions and TDS.

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018

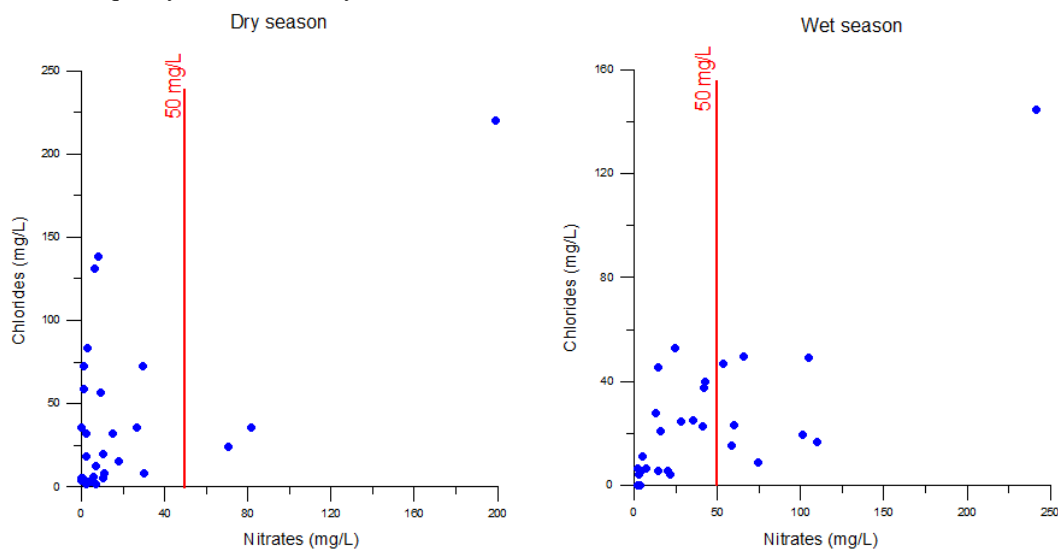
Table 2 : Correlation matrix of major ions and TDS (Red for dry season and blue for wet season)

	Ca++	Mg++	Na+	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	TDS
Ca++	1	.528(**)	.541(**)	0.162	.434(*)	.563(**)	0.314	.594(**)
Mg ²⁺	.613(**)	1	.778(**)	0.111	.497(**)	.823(**)	.686(**)	.864(**)
Na+	.584(**)	.646(**)	1	0.032	.601(**)	.974(**)	.785(**)	.876(**)
HCO ₃ ⁻	0.298	0.227	0.161	1	-0.055	0.034	-0.214	0.153
SO ₄ ⁻⁻	.752(**)	.379(*)	.384(*)	.603(**)	1	.623(**)	.728(**)	.500(**)
Cl ⁻	.578(**)	.645(**)	.995(**)	0.122	.356(*)	1	.788(**)	.927(**)
NO ₃ ⁻	0.192	0.152	.623(**)	-0.169	0.171	.604(**)	1	.654(**)
TDS	.668(**)	.768(**)	.953(**)	0.141	.416(*)	.956(**)	.499(**)	1

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Figure 4 shows that higher the nitrate concentration and chlorides and sodium concentration increase. This may indicates that water quality is influenced by human and animal wastes [15].



International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018

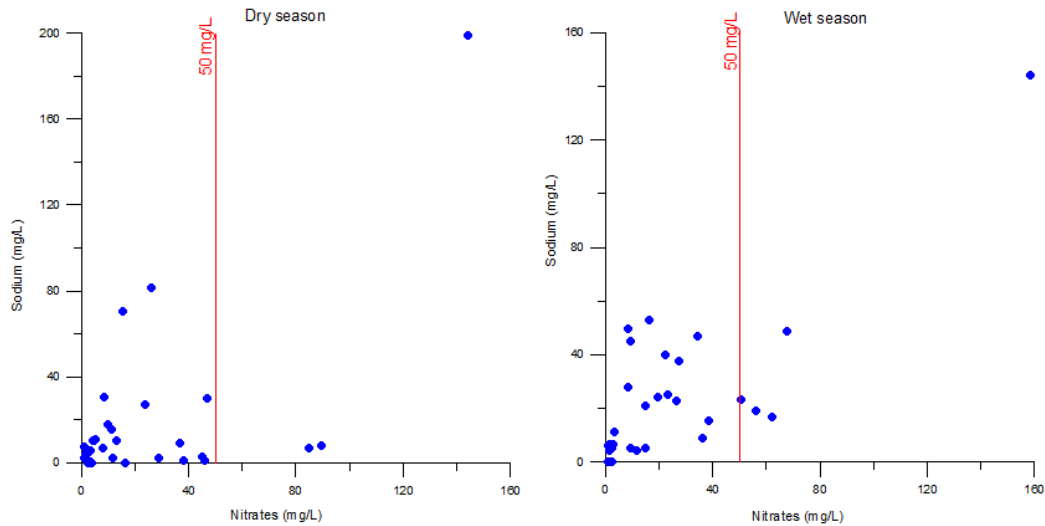


Figure 4: Chlorites Vs Nitrate and Sodium Vs nitrate in water for wet and dry season

Three groups of groundwater types are identified: $\text{Cl-SO}_4\text{-Na}$ water; $\text{Cl-CaSO}_4\text{-Mg}$ water; and $\text{CaHCO}_3\text{-Mg}$ water. Figure 5 shows piper diagramme for the 31 analysed groundwater.

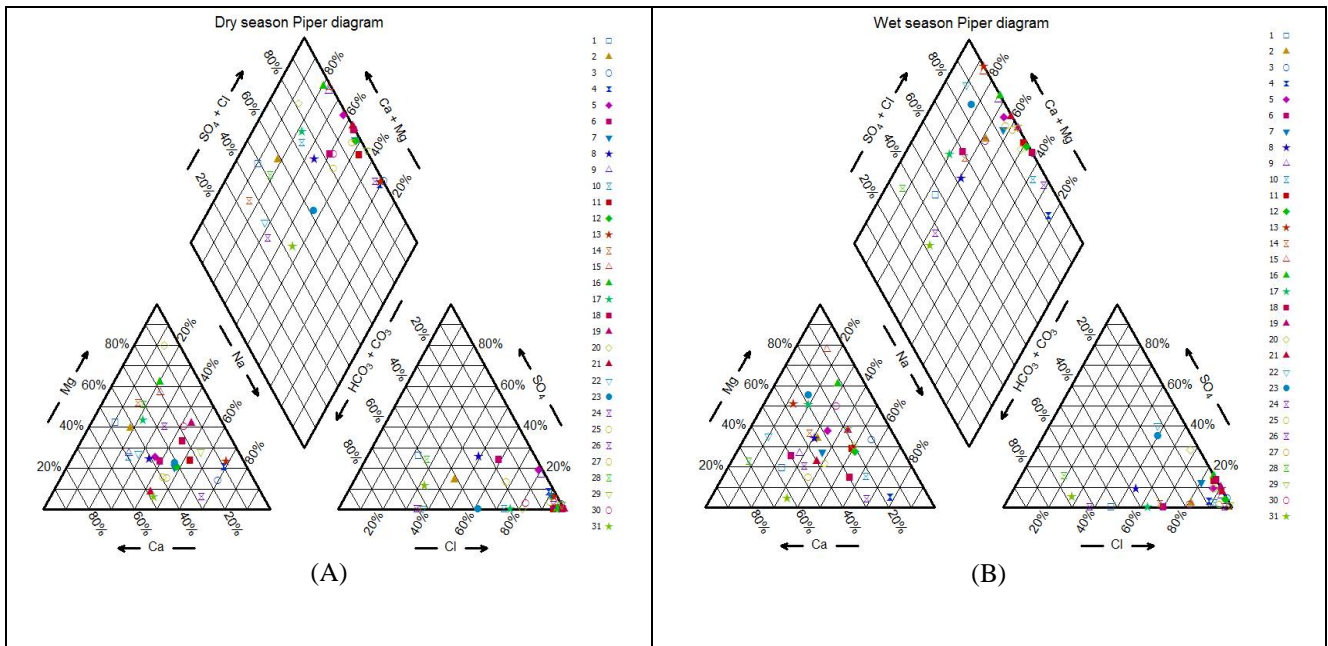


Figure 5 : Piper diagram in dry season(A) and wet season (B)

Figure 6 shows the situation of the well of the sample 3 which had the highest concentration of nitrate, chlorites and sodium.

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018

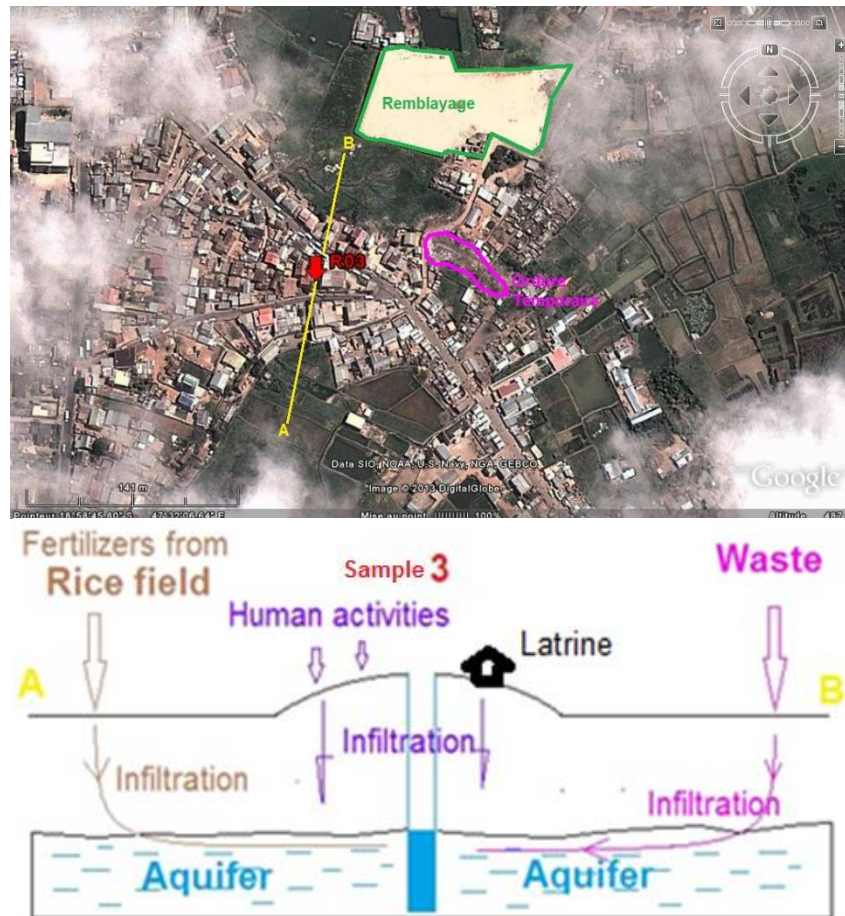


Figure 6 : Profile view of the well in sample 3

b)-Total Dissolves Salt (TDS):

About 13% of the waters samples have TDS higher than 600 mg/L. When mineralization is high, pH is low. In this case, dissolution of the pollutants from the surface throw the infiltration of the rainwater take control of the total mineralization. The Cl-SO₄-Na and Cl-CaSO₄-Mg water types highlight this situation. Figure 7 show that higher the TDS, and the pollution from human activities influence the groundwater quality. Indeed, table 2 shows significant correlation between TDS and Cl⁻, Na⁺ and NO₃⁻. A random distribution of Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻ and SO₄²⁻ according to the TDS (figure 7) verify also this hypothesis.

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018

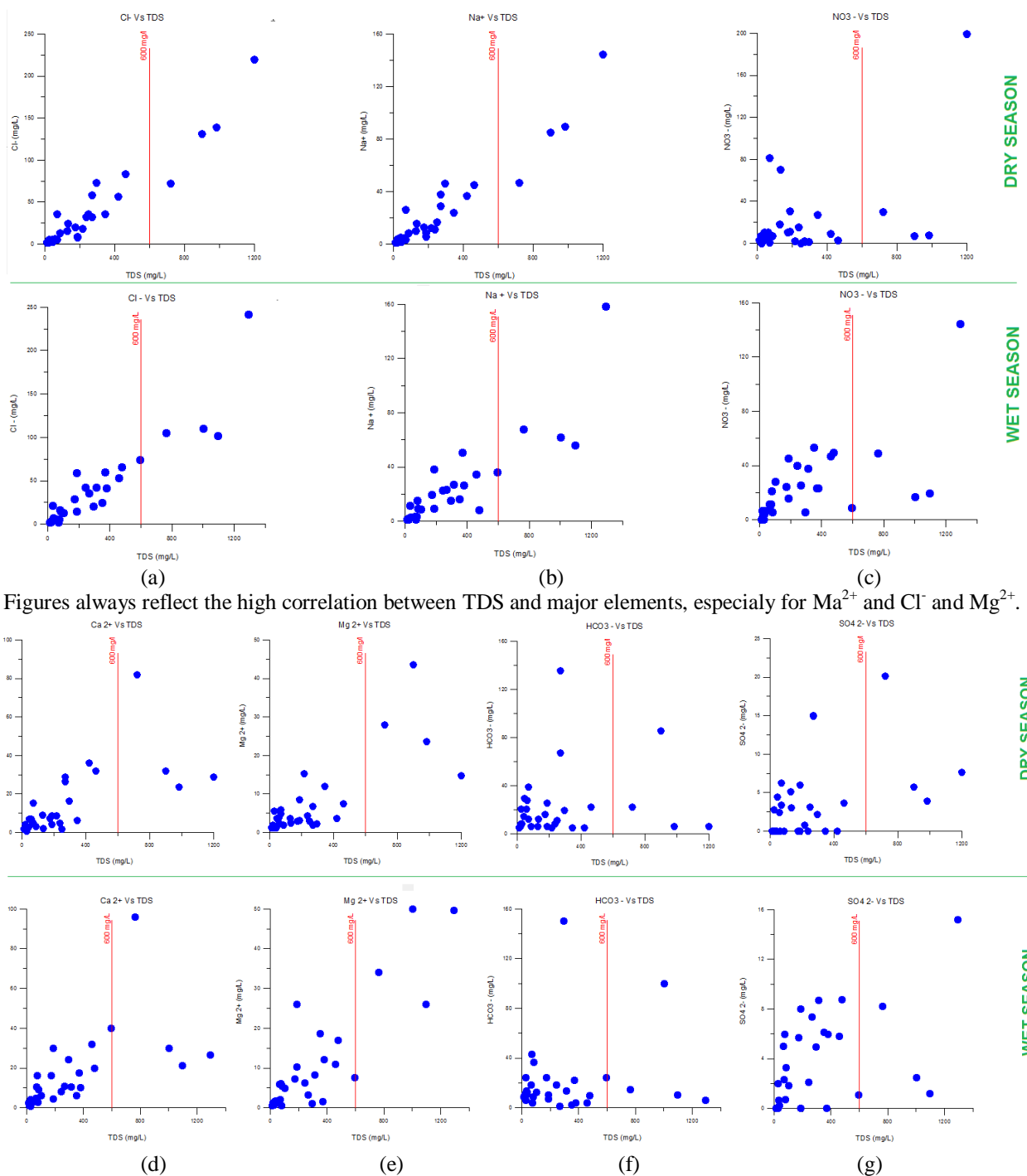


Figure 7: Plots of Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- and SO_4^{2-} Vs TDS

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018

The mean temperature of the waters range from 17,9 to 21,6°C. The variation of the T° according to the altitude is high (3,7°C for only 30 meters). In 2005, Antonio Jorge de Lima Gomes and Valiya Mannathal Hamza found a variation of the geothermal energy between 16 to 24°C/Km [16]. It means that the aquifer is vulnerable to the variation of the temperature and to the climate change. Figure 8 shows the variation of the temperature between rainy and dry season.

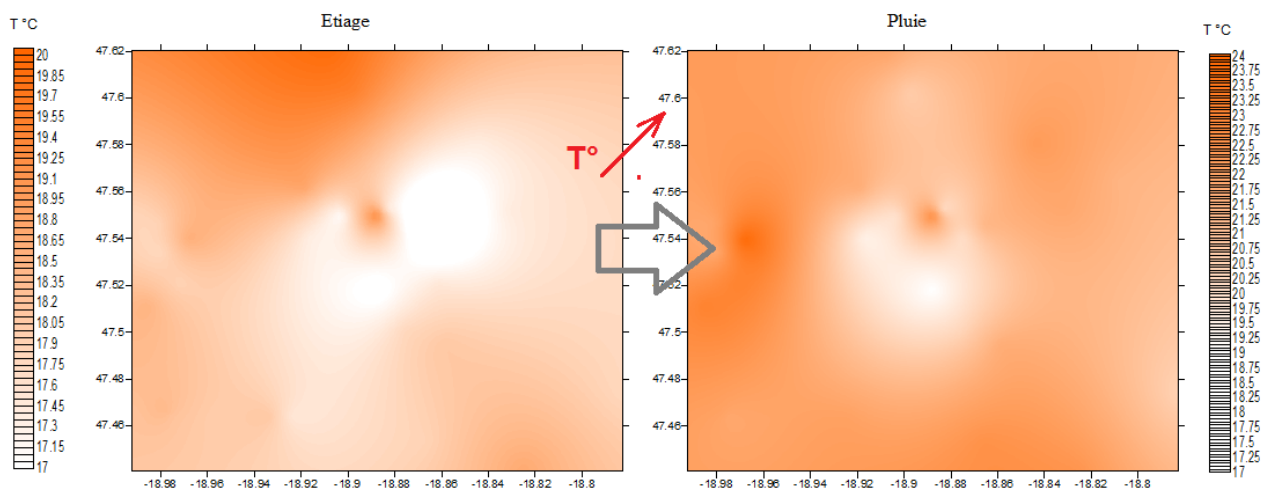


Figure 8: Variation of the temperature of the groundwater from winter time to summer time.

c)-Uranium and Barium:

According to the WHO standard for drinking water, uranium concentrations are relatively low (0.02 à 0.16 ppb). Barium concentration is low as well except one sample from the north parts of the study area where the barium concentration is equal to 3223 ppb.

It means that the groundwater resources for the study area do not present risk of exposure to uranium radioactivity. At high concentrations, barium causes vasoconstriction by its direct stimulation of arterial muscle, peristalsis as a result of the violent stimulation of smooth muscles and convulsions and paralysis following stimulation of the central nervous system [17], [18]. For the case of the study area, the maximum concentration of barium recorded is largely low than the mean daily intake of barium from food, water and air (estimated to be slightly more than 1 mg/day). It is then considered as to be not yet a risk. However, it is interesting to make a study on this subject and to better understand the evolution of the barium in groundwater of the study area.

V. CONCLUSION

Thirty one water samples from wells or sources were analyzed to study the groundwater quality. Among the 31 samples, only three have nitrate concentration more than the maximum contaminate level (50mg/L) of the WHO for the both two seasons. However, the aquifer is vulnerable to pollutants from human activities in the surface. TDS range from 13 to 1198 mg/l. More than 50% of the water samples have low mineralization. Waters are slightly acid (pH range from 4,4 to 6,87). Concentration of nitrate, chloride and sodium is correlated; that means that the contamination from human activities in the surface is significant (latrine, animal wastes, storage of domestic wastes). High concentration of Barium (3223 ppb) is recorded and concentration of uranium is low.

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology

(A High Impact Factor, Monthly, Peer Reviewed Journal)

Visit: www.ijirset.com

Vol. 7, Issue 5, May 2018

REFERENCES

- [1] Rasolondrazao, L., Guerin, R., Ratsimbazafy, J. B., Rasolomanana, E., "Groundwater contamination of Antananarivo plain. Vulnerability modelling and geophysical study". *Earth & Life* (<http://www.geofinds.com>), Vol.2, no 6, 2007.
- [2] Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G., "DRASTIC—a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings", 1987.
- [3] Ralaimaro, J., « Compréhension de la structure et du fonctionnement des aquifères par diverses approches scientifiques en vue de l'alimentation en eau potable, en zone de socle altéré des hautes terres centrales et en zone sédimentaire du sud-ouest de Madagascar ». Thèse de doctorat du 3^{ème} cycle. Université d'Antananarivo, Ecole supérieure polytechnique d'Antananarivo, 2004.
- [4] Roederer, P., « Les sols de Madagascar », Sciences de la terre, Pédologie, Vol.5, ORSTOM, Paris, 56 p, 1971.
- [5] Noizet, G., « Etude pour l'aménagement de la Plaine d'Antananarivo », 1970.
- [6] Grillot, J. C., « Régime des eaux souterraines en milieu cristallin altéré: un exemple en zone intertropicale humide d'altitude (Madagascar) ». *Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques*, Vol.37, no 2, pp.105-117, 1992.
- [7] Bentouati, L., Bouzidi, A., « Etude de l'impact de la pollution sur Oued Bousselam (Wilaya de Setif – Nord-Est de l'Algérie) ». *Science Lib Editions Mersenne : Vol. 4, no 120108*, 2012.
- [8] Kebich, et al., « Pollution des eaux superficielles dans un climat semi-aride : la région de Sétif (Algérie) ». *Sécheresse*. Vol.10, no 2, pp.137-142, 1999.
- [9] Aquavalor, « L'eau de pluie et sa qualité ». http://www.aquavalor.fr/qualite_eau-de-pluie.php, 2005.
- [10] Madison, R. J., "Overview of the occurrence of nitrate in ground water of the United States". *National Water Summary 1984-Water-Quality Issues, US Geol. Surv. Water-Supply Paper 2275*, pp.93-103, 1984.
- [11] Rasolofonirina, M., Randriamanivo, L. V., Andrianarilala, M. T., Raelina, A., "Trace Elements and Physico-chemical Quality of the Well Waters in Mahitsy, Province of Antananarivo, Madagascar". *Madagascar – Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (Madagascar-INSTN) HEPHAD'04 International Conference, Madagascar*, 2004.
- [12] Fabre, M., "Précis d'hydrologie", Ed. Masson et Cie, Paris, 1964..
- [13] Ahmed, A., « Etude des impacts sanitaires, sociaux et environnementaux liés à la pollution des eaux du lac Masay ». Mémoire de fin d'étude pour le diplôme de DUESS, Université d'Antananarivo, Ecole supérieure polytechnique d'Antananarivo, 2007.
- [14] Rasolomanana, E., Rasolondrazao, L., Randrianja, R., Robison, L., Ralaimaro, J., & Rakoto, H., « Problèmes de pollution des ressources en eaux posés par les déchets industriels et ménagers dans la ville d'Antananarivo et de ses environs ». *Madamines*, ISSN 2220-0681, vol. 2, 2011.
- [15] Wittman, A., « Antananarivo classé 3^{ème} ville la plus insalubre au monde ». *Magazine Forbes*, 2009.
- [16] Gomes, A. J. D. L., Hamza, V. M., "Geothermal Gradient and heat flow in the State of Rio de Janeiro". *Revista Brasileira de Geofísica*, vol 23, no 4, pp.325-347, 2005.
- [17] Stockinger, H.E., "The metals". In: Clayton GD, Clayton FE, eds. *Patty's industrial hygiene and toxicology*, 3rd ed. Vol. 2A. New York, NY, John Wiley, pp. 1493–2060, 1981.
- [18] WHO, "Barium in groundwater. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality", 2004.