



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
**DOMAINE SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE**

\*\*\*\*\*

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de MASTER II

Mention : Géosystème et Evolution

Parcours : Ressources Minérales et Environnement (RME)

**GEOCHIMIE DES TERRES RARES**  
**CAS DE MINERALISATION EN BASTNAESITE**  
**ET MONAZITE D'ANDOHARANO-**  
**AMBATOFINANDRAHANA**

Présenté par :

RAZAFINDRAMANGA Soafaranirina Yvette

*Soutenu publiquement le 17 juillet 2015*

**Membres de Jury :**

Président : RAKOTONDRAZAFY Raymond      Professeur

Rapporteur : RALISON André Bruno      Docteur

Co-rapporteur : RASOAMALALA Vololonirina      Docteur

Examineurs :-RAMBOLAMANANA Voahangy      Docteur

-RAZAFIMBELO Rachel      Docteur HDR

## REMERCIEMENTS

*Au terme de la rédaction de ce mémoire, je rends grâce à Dieu qui, par sa présence et la santé qu'il m'a accordé, m'a permis de réaliser ce travail. La présente étude n'aurait jamais pu être réalisée aussi sans la collaboration et l'aide précieuses des personnes de compétence. Qu'elles trouvent dans ces quelques lignes l'expression de ma profonde gratitude et de mes sincères remerciements. Il m'est permis de citer en particulier les personnes suivantes :*

- + Professeur RAHERIMANDIMBY Marson, Doyen de la Faculté des Sciences qui a bien voulu autoriser la soutenance de ce mémoire.*
- + Professeur RAKOTONDRAZAFY Raymond, Vice Doyen de la Faculté des Sciences, Enseignant Chercheur au Département des Sciences de la Terre, qui a bien voulu accepter de présider cette soutenance de mémoire.*
- + Docteur RALISON André Bruno, Responsable de la Mention Géosystème et Evolution qui m'a fait l'honneur d'être Rapporteur tout au long de cet ouvrage*
- + Docteur RASOAMALALA Vololonirina, Enseignant Chercheur au Département des Sciences de la Terre, pour son soutien et toutes les aides qu'elle m'a fournies durant l'accomplissement de cet ouvrage tant sur terrain que durant la rédaction.*
- + Docteur RAMBOLAMANANA Voahangy, Chef de Département des Sciences de la Terre, Enseignant Chercheur au Département des Sciences de la Terre, qui a accepté d'être parmi les Examineurs de ce mémoire.*
- + Professeur RAZAFIMBELO Rachel, Enseignant Chercheur au Département des Sciences de la Terre qui a accepté d'être parmi les Examineurs de ce mémoire.*

*Mes remerciements vont également à tous les enseignants du Département des Sciences de la Terre qui ont assuré ma formation et transmis leurs expériences et leurs connaissances tout au long des années d'étude que j'ai effectuée. Mais aussi à tous mes collègues de classe et mes amis qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*Je remercie mes parents qui m'ont conseillée et encouragée, surtout ma mère qui m'a soutenue moralement pendant les moments difficiles que j'ai traversés durant la réalisation de cet ouvrage. Enfin je remercie mes sœurs qui m'ont aidée moralement et financièrement.*

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Différents concepts et classifications selon divers auteurs .....	11
Tableau 2 : Analyse statistique.....	41
Tableau 3 : Résumé des formations existant dans la région d'Ambatofinandrahana avec leurs caractéristiques .....	54
Tableau 4: Analyse des éléments majeurs RASOAMALALA (2009), JACQUES (1984), MOINE (1971) .....	61
Tableau 5: Analyse des terres rares RASOAMALALA (2009), JACQUES (1984), MOINE (1971) .....	71

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte du gisement de Bayan Obo, Chine .....	7
Figure 2: carte géologique de Mountain Pass .....	8
Figure 3: Production globale de terres rares de 1950 à 2014 .....	9
Figure 4: comparaison des Cartes géologiques de Madagascar .....	12
Figure 5: Carte de localisation géographique de la région d'Ambatofinandrahana.....	13
Figure 6: Carte des infrastructures .....	16
Figure 7: Carte de l'hydrographie de la région d'Ambatofinandrahana .....	17
Figure 8: Carte géologique numérisée de la région d'Ambatofinandrahana.....	19
Figure 9: Flow chart .....	22
Figure 10: Syénite d'Andoharano. Echantillon 4, lumière polarisée, X 5 .....	29
Figure 11: Syénite d'Andoharano. Echantillon 24, lumière polarisée, X 5 .....	30
Figure 12: Microsyénite d'Andoharano. Echantillon 12', lumière polarisée, X 5.....	31
Figure 13: Amphibolite, échantillon 25, lumière polarisée, X 5 .....	33
Figure 14: Localisation de la zone d'étude sur image satellite .....	35
Figure 15: Image satellite .....	36
(a) : Composition dans le mode RVB par les bandes 123,	
(b) : Composition dans le mode RVB par les bandes 146,	
(c) : Composition dans le mode RVB par les bandes 234,	
(d) : Composition dans le mode RVB par les bandes 456	
Figure 16: Composantes principales .....	38
(a) CP1 : Composante principale 1	
(b) CP2 : Composante principale 2	
(c) CP3 : Composante principale 3	
Figure 17: Visualisation de l'image CP1 .....	39
Figure 18 : filtre directionnel 00° appliqué à l'image CP1 .....	39
Figure 19: carte linéamentaire de la zone d'étude.....	40
Figure 20: Rosace des directions des linéaments .....	41
Figure 21: Carte détaillée du gîte d'Andoharano (Rasoamalala, 2009).....	43
Figure 22 : La zone d'étude Andoharano .....	44
Figure 23: Image landsat montrant le gîte d'Andoharano et les indices de La et Ce.....	45
Figure 24: Carte d'Andoharano avec élévation et point d'échantillonnage.....	46
Figure 25 : projection d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> sur le diagramme de Harker .....	49
Figure 26 : projection de CaO sur le diagramme de Harker .....	49
Figure 27 : projection de MgO sur le diagramme de Harker .....	50
Figure 28 : projection de MnO sur le diagramme de Harker .....	50
Figure 29: projection de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> sur le diagramme de Harker .....	51
Figure 30 : projection de TiO <sub>2</sub> sur le diagramme de Harker .....	51
Figure 31 : projection de Na <sub>2</sub> O sur le diagramme de Harker .....	52
Figure 32 : projection de K <sub>2</sub> O sur le diagramme de Harker .....	52
Figure 33 : carte d'isoteneur en K <sub>2</sub> O .....	57
Figure 34 : carte d'isoteneur en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	57
Figure 35 : carte d'isoteneur en MgO .....	58

Figure 36 : carte d'isoteneur en MnO .....	58
Figure 37 : carte d'isoteneur en Na <sub>2</sub> O .....	59
Figure 38 : carte d'isoteneur en SiO <sub>2</sub> .....	59
Figure 39: Carte d'isoteneur en TiO <sub>2</sub> .....	60
Figure 40 : carte d'isoteneur en Ce .....	64
Figure 41 : carte d'isoteneur en La.....	64
Figure 42 : carte d'isoteneur en Dy .....	65
Figure 43 : carte d'isoteneur en Er .....	65
Figure 44 : carte d'isoteneur en Eu .....	66
Figure 45 : carte d'isoteneur en Gd.....	66
Figure 46 : carte d'isoteneur en Ho.....	67
Figure 47 : carte d'isoteneur en Lu .....	67
Figure 48 : carte d'isoteneur en Nd.....	68
Figure 49 : carte d'isoteneur en Pr .....	68
Figure 50 : carte d'isoteneur en Sm .....	69
Figure 51 : carte d'isoteneur en Tb .....	69
Figure 52 : carte d'isoteneur en Tm .....	70
Figure 53 : Carte d'isoteneur en Yb.....	70

## LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Bastnaésite .....	5
Photo 2 : Parisite .....	6
Photo 3 : Monazite .....	6
Photo 4 : La géomorphologie de la région .....	14
Photo 5 : La végétation existant dans la région d'Ambatofinandrahana.....	15
(a) : Tapia,	
(b) : Pin	
Photo 6 : formation existante .....	28
(a) : syénite,	
(b) : pegmatite,	
(c) : filon de quartz	
Photo 7 : syénite échantillon 4 .....	28
Photo 8 : syénite échantillon 24 .....	30
Photo 9 : microsyénite échantillon 12' .....	31
Photo 10 : Marbre avec <i>Aloe capitata</i> .....	32
Photo 11 : Filon d'Amphibolite .....	33
Photo 12 : Filon de microsyénite dans de la syénite .....	45
Photo 13 : Les fractures subites par les formations syénitiques.....	45

## LISTE DES ABREVIATION

SIG : Système d'Information Géographique

ENVI: Environment for Visualizing Images

Tm: Thematic Mapper

ACP: Analyse en Composante Principale

CP : Composante Principale

Ma : Million d'années

PGRM : Projet de Gouvernance des Ressources Minérales

SQD : Schisto-Quartzo-Dolomitique

SQC : Schisto-Quartzo-Calcaire

RN : Route Nationale

°C : degré Celsius

BD : Base de données

La : Lanthane

Ce : Cérium

Pr : Praséodyme

Nd : Néodyme

Sm : Samarium

Eu : Europium

Gd: Gadolinium

Tb: Terbium

Dy: Dysprosium

Ho: Holmium

Er: Erbium

Tm: Thulium

Yb: Ytterbium

Lu: Lutécium

Y: Yttrium

REE: Rare Earth Elements

REO : Oxyde de terre rare

N: Nord

S: Sud

E: Est

W: Ouest

Mu: Muscovite

Cc: Calcite

Q: Quartz

An: Anorthite

Or: orthoses

USGS: US Geological Survey



## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Carte géologique d'Ambatofinandrahana (1963)

Annexe 2 : Tableau périodique montrant les terres rares

Annexe 3 : Tableau montrant les terres rares et leurs propriétés physico-chimiques

Annexe 4 : Lame mince montrant les différents minéraux existant dans les formations syénitiques

(a) : abondance de feldspath (éch.27)

(b) : structure rapakiwitique (éch.4)

(c) : monazite (Rasoamalala, 2007, éch.N132)

(d) : grands cristaux de plagioclase (éch.60)

Annexe 5 : Tableau résumant les formations existant dans la région d'Ambatofinandrahana avec leurs caractéristiques

Annexe 6 : Interface du logiciel Envi 4.5

Annexe 7 : Caractéristiques de landsat 7 ETM+

Annexe 8 : Caractéristiques de landsat 5 TM

Annexe 9 : Diagramme comparant le prix des terres rares par rapport à celui de l'or

Annexe 10 : Utilisation des terres rares

Annexe 11 : Tableau montrant les minerais de terre rare et leur mode de dépôt

Annexe 12 : Interface du logiciel SPO

Annexe 13 : Interface du logiciel Stereonet.32

Annexe 14 : Données sur terrain

## SOMMAIRE

### REMERCIEMENTS

LISTE DES TABLEAUX.....	i
LISTE DES FIGURES.....	i
LISTE DES PHOTOS.....	iv
LISTE DES ABREVIATION.....	v
LISTE DES ANNEXES.....	vii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TERRES RARES.....	3
I-1-GITOLOGIE DES TERRES RARES.....	4
I-1-1-Les carbonates de terres rares.....	4
I-1-1-1-La bastnaésite.....	4
I-1-1-2-La parisite.....	5
I-1-2-Les phosphates de terres rares.....	6
I-2-LES PRINCIPAUX GISEMENTS DE TERRES RARES.....	7
I-2-1-Le gisement de Bayan Obo, Chine.....	7
I-2-2-Gisement de carbonatite de Mountain Pass, USA.....	8
I-3-PRODUCTION MONDIALE DES TERRES RARES.....	9
CHAPITRE II : CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE ET METHODOLOGIE.....	10
II-1-CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE SUIVANT L'EVOLUTION DE LA GEOLOGIE DE MADAGASCAR.....	11
II-2-CONTEXTE GENERAL DE LA REGION D'AMBATOFINANDRAHANA.....	13
II-2-1-Localisation et contexte géographique.....	13
II-2-2-Infrastructure.....	15
II-2-3-Hydrographie.....	16
II-2-4-Economie.....	17
II-2-5-Contexte géologique d'Ambatofinandrahana.....	18
II-2-5-1-Lithologie.....	20
II-2-5-2-Structures de la région d'Ambatofinandrahana.....	21
II-3-METHODOLOGIE DE L'ETUDE.....	22
II-3-1-Etude préliminaire.....	23
II-3-2-Travaux sur terrain.....	23

II-3-3-Travaux de laboratoire.....	23
CHAPITRE III : PETROLOGIE - METALLOGENIE .....	26
III-1-ETUDE PETROGRAPHIQUE.....	27
III-1-1-Syénite.....	27
III-1-2-Marbre .....	32
III-1-3-Amphibolite .....	33
III-2-ETUDES STRUCTURALES .....	35
III-2-1-La composition colorée.....	35
III-2-2-La vectorisation.....	37
III-2-2-1-L'analyse en composantes principales (ACP) .....	37
III-2-2-2-Les filtres directionnels.....	38
III-2-2-3-Cartographie linéamentaire .....	40
III-2-2-4-Analyse statistique de la carte linéamentaire .....	41
III-2-2-5-Rosace directionnelle .....	41
III-3-GISEMENT D'AMBATOFINANDRAHANA.....	42
III-3-1-Typologies des gisements de Bastnaésite .....	42
III-3-2-Typologies des gisements de Monazite .....	42
III-3-3-Cas du gîte de monazite d'Andoharano .....	43
CHAPITRE IV : GEOCHIMIE DES TERRES RARES .....	47
IV-1-CARACTERES CHIMIQUES DES DIFFERENTES FORMATIONS GEOLOGIQUES .....	48
IV-1-1-Les éléments majeurs.....	48
IV-1-1-1-Projections sur le diagramme de Harker.....	48
IV-1-1-2-Distribution des éléments majeurs.....	57
IV-1-2-Les terres rares .....	64
CHAPITRE V : DISCUSSION .....	73
V-1- Du point de vue géologique .....	74
V-2- Du point de vue métallogénique .....	74
V-3- Du point géochimique.....	75
CONCLUSION .....	76

## INTRODUCTION GENERALE

La formation de gisements des métaux (usuels, nobles, rares) résulte d'une succession cohérente d'évènement géodynamique, géochimique et minéralogique qui permettent la concentration progressive des éléments chimiques jusqu'à les amener à une concentration économiquement exploitable. Madagascar regorge de gisements métallifères d'une grande potentialité dont fait partie la région d'Ambatofinandrahana. Cette région présente une abondance en terres rares mais seules la monazite et la bastnaésite ont des intérêts miniers et économiques.

Une campagne de recherche et de prospection intense a été menée par le PGRM sur les gîtes de bastnaésite de Marovoalavo, d'Ankazohambo, de Vohiniariana, de Lesada, de Betrandraka, d'Itorendrika, d'Ambahy, d'Antomia, et d'Andakatany ainsi que sur les gîtes de monazite d'Ambatolahifotsy et d'Andoharano.

En 1983, l'OMNIS en partenariat avec la Bundesanstalt Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) le Service géologique fédéral allemand conclut que seuls les gîtes d'Ankazohambo et de Marovoalavo sont exploitables (Andritzky, 1984 et 1986). Par la suite, l'OMNIS a réorienté la prospection en utilisant la prospection géochimique, la géologie structurale et la tectonique (Rakotomanana en 1984 et 1985) vu que le Service géologique fédéral allemand a proposé de revoir le potentiel de ces gisements vers la fin de l'année 1984. En 1991, l'OMNIS en partenariat avec une firme soviétique Obidinenie Zarubezh Geologia (OZGEO) a conclu sur la forte possibilité du gisement d'Ankadintany et d'Ankazohambo ils ont respectivement évalué à 770.994t de minerais à 3,19% de TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> soit un stock de terres rares de 24.592 t et à 1200000 tonnes de minerais (Prochenko et al., 1992). En 2000, l'OMNIS avec la Chemical Metals and Minerals (CMM) a pris la décision de mettre en exploitation le gisement de Marovoalavo par le biais de la National Supply and Services Company (NASSCO).

En 2009, une étude de la minéralisation en terre rare de la région a été faite par RASOAMALALA en vue de connaître la potentialité de la région.

La présente étude qui s'intitule « Géochimie des terres rares cas de minéralisation en bastnaésite et monazite d'Andoharano-Ambatofinandrahana » a donc été faite pour pouvoir connaître plus précisément la potentialité de ce gisement même.

L'étude a pour but de faire des recherches dans le cadre métallogénique de la région et de la minéralisation en terres rares.

Pour bien mener cette étude, nous avons subdivisé le manuscrit en cinq chapitres :

- Généralités sur les terres rares : chapitre exposant les caractéristiques des terres rares tant géologiques, gîtologiques et économique,

- Contexte générale de la zone d'étude et méthodologie : ce chapitre présente la zone d'étude dans son contexte historique, géographique et géologique et montre les méthodes entreprises,
- Pétrologie-Métallogénie : chapitre qui expose les différentes formations géologiques de la zone d'étude, de leurs caractéristiques pétrographiques, accompagné d'un traitement de données et d'images satellitales à partir de la télédétection exposant les résultats obtenu sur les images satellites, et traite les études sur le gisement des terres rares dans la zone d'étude,
- Géochimie des terres rares : chapitre traitant sur les analyses de données géochimiques des terres rares,
- La discussion contient les interprétations et synthèse de tous les résultats (analyse, terrain...),
- Une référence bibliographique et des annexes terminent cet ouvrage.

## CHAPITRE I

### GENERALITE SUR LES TERRES RARES

Les terres rares représentent le groupe des lanthanides (éléments de numéros atomiques compris entre 57 et 71, du lanthane au lutétium) auquel on ajoute, du fait de propriétés chimiques voisines (même colonne de la classification périodique), l'yttrium (Y) et le scandium (Sc). On distingue les terres cériques, légères (La, Ce, Pr, Nd, Sm) des terres yttriques, plus lourdes (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y). Malgré leur nom, les éléments constituant les terres rares ne sont pas rares. Elles constituent environ 0,08 % de l'écorce terrestre. Le plus abondant, le cérium, est plus répandu dans l'écorce terrestre que le cuivre, le plus rare, le thulium, est quatre fois plus abondant que l'argent. Les teneurs sont, en général, exprimées sous forme d'oxydes.

Ces terres rares (TR) font partie des éléments hygromagmatophiles. Elles ont une affinité pour le liquide magmatique car ils y constituent un complexe stable.

## I-1-GITOLOGIE DES TERRES RARES

Plusieurs minéraux peuvent concentrer les terres rares, mais la bastnaésite, la monazite et la xénotime sont considérées comme les principaux minéraux de terres rares car ces minéraux sont ceux qui concentrent des quantités économiques. Aussi, dans certains contextes, bien que rares, l'apatite et l'allanite peuvent concentrer des quantités importantes de terres rares. Dans plusieurs gisements, ils sont généralement récupérés comme sous-produits de l'exploitation de cassitérite, ilménite, rutile, et zircon des placers fluviaux ou littoraux, et la bastnaésite est extraite de carbonatites associées à des roches alcalines (Bayan obo). Dans la région d'Ambatofinandrahana, outre ces importants minéraux, la parisite, la tchevkinite, sont aussi présents (Andriamampihantona, 1992), mais les principaux produits d'exploitation sont la monazite et la bastnaésite.

En effet il existe deux types de minerais de terres rares :

- Les carbonates de terres rares
- Les phosphates de terres rares

### I-1-1-Les carbonates de terres rares

La teneur en terres rares des carbonatites varie selon leurs types : les carbonatites primaires, calcico et magnésiocarbonatites, contiennent en moyenne respectivement 0.37% et 0.42% de terres rares, tandis que les ferrocyanatites en contiennent 1% en moyenne.

#### I-1-1-1-La bastnaésite

La bastnaésite est un minéral typique des syénites népheliniques et des granites sodiques, surtout de leurs pegmatites, qui peut également se rencontrer dans les skarns au contact de ces mêmes roches. Plus rarement, elle est présente dans les gîtes de métasomatose hydrothermale (métasomatose hydrothermale: ensemble des phénomènes qui modifient la composition chimique des roches relativement aux constituants non volatils aboutissant au remplacement, partiel ou total, d'une roche par une autre, accompagné dans certains cas de la conservation des textures initiales et, dans d'autres, de l'apparition de textures nouvelles, tout ça n'est

possible qu'en présence d'une phase fluide ou de solutions) en milieu dolomitique. Son altération aux affleurements est facile, la bastnaésite évoluant en divers composés de terres rares. La Bastnaésite provient de l'altération de la Chevkinite. Elle se présente en cristaux tabulaires à contour hexagonaux, parfois de grande taille. Transparente à translucide, elle possède un éclat vitreux, et une teinte gris jaune pâle, jaune cire à jaune brunâtre et brun rouge. La taille moyenne de grains de bastnaésite de la région d'Ambatofinandrahana est de 5 à 8cm (Andritzky, 1986). La bastnaésite a une dureté 4 à 4,5 et une densité 4,83 à 4,948. Elle cristallise dans le système rhomboédrique. Son altération se fait d'une manière progressive vers l'intérieur par la formation d'une mince pellicule terne terreuse qui s'épaissit et finalement le minéral devient progressivement pulvérulent. Le minéral perd ainsi de sa taille. Au microscope, la bastnaésite présente une irisation en bordure des fractures et des clivages.

Elle a une biréfringence très élevée (blanc, gris du 4<sup>ème</sup> ordre) (Zhang P., 1995), un caractère uniaxe. La formule générale de la bastnaésite est de  $[REE (CO_3) F]$ , c'est un fluo-carbonate de terres cériques. Selon les lanthanides dominants, on a différents types de bastnaésite, mais la bastnaésite d'Ambatofinandrahana est riche en cérium, dont l'appellation Bastnaésite-Ce.



Photo 1 : Bastnaésite

#### I-1-1-2-La parisite

La parisite est l'un des carbonates des terres rares les plus commun avec la bastnaésite mais plus calcique. C'est un fluo-carbonate de calcium et de terres rares de formule générale  $CaF_2(CO_3)_3(Ce,La)_2$  (Zhang P., 1995). C'est un minéral caractéristique de dépôts hydrothermaux liés à des syénites et granites alcalins (Zhang P., 1995). Le cérium est souvent partiellement remplacé par l'yttrium et par d'autres terres rares surtout le Lanthane. Elle se rencontre dans les granites sodiques en occurrence relevant d'un contexte sédimentaire particulier, à schistes noirs hydrothermalisés. Transparente à translucide, d'éclat vitreux à résineux, la parisite est de couleur jaune brunâtre. Elle forme des cristaux hexagonaux, atteignant plusieurs centimètre, parfois allongés en « marche d'escalier » par répétition des faces du prisme.





Photo 2 : Parisite

### I-1-2-Les phosphates de terres rares

- La monazite

La monazite est un phosphate primaire présente dans les granites et surtout de leurs pegmatites, également présente dans les syénites néphéliniques et les carbonatites, ainsi que dans certains gîtes filoniens de haute température. Sa formule générale est  $CePO_4$ , le Cérium est fréquemment remplacé par le Lanthane ou le Néodyme, ce qui a conduit à l'individualisation de trois minéraux selon la terre rare dominante : monazite-(Ce), monazite-(Nd) ou monazite-(La). Elle est translucide, avec un éclat résineux à adamantin, et de couleur variable : brun rougeâtre à brune ou dans différents tons de jaune, parfois verdâtre ou gris-jaune. La monazite se présente en cristaux allongés et aplatis, avec des faces fréquemment rugueuses, incurvés ou striées. Les cristaux de monazite sont couramment maclés en « gouttière ».



Photo 3 : Monazite

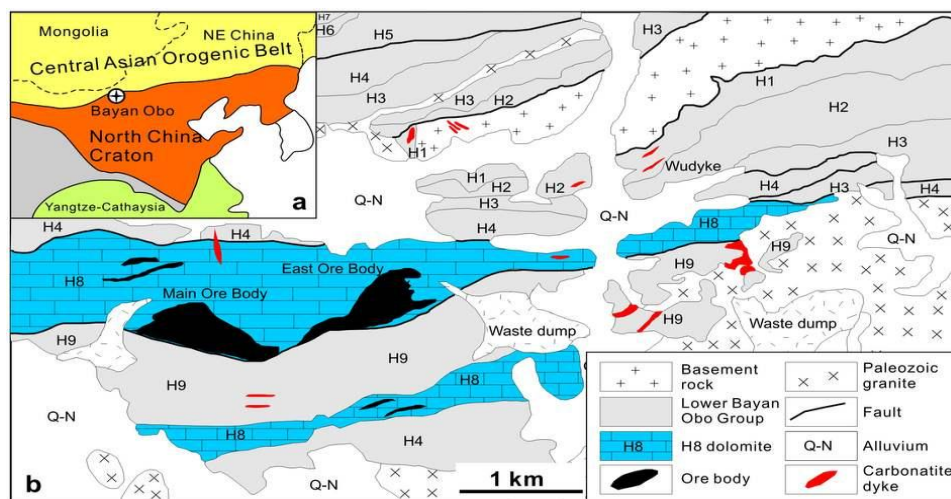
## I-2-LES PRINCIPAUX GISEMENTS DE TERRES RARES

Au niveau mondial on considère deux gisements important de terres rares qui sont les gisements de Bayan Obo (Chine) et de Mountain Pass (USA).

### I-2-1-Le gisement de Bayan Obo, Chine

Le gisement de Fer-Terre Rare de Bayan Obo est localisé à 135 Km au NE de Baotou dans la Province Autonome de Inner Mongol. Les minerais de terres rares sont étroitement associés avec le gisement de fer, et ils ont été récupérés à partir du gisement de fer exploité. Les réserves totales publiées sont au moins de l'ordre de 1.5 Milliards de tonnes de fer (avec une teneur moyenne de 35%), au moins 48 millions de tonnes d'oxydes de terres rares (REO) (avec une teneur moyenne de 6%), et environ 1 million de tonnes de Niobium (avec une teneur moyenne de 0.13%). Les principaux minéraux de terres rares sont la bastnaésite et la monazite. La formation encaissante est formée de dolomites. Il y avait plusieurs discussions sur l'origine du gisement de Bayan Obo. Une hypothèse sur la genèse du gisement a été de proposer que : le gisement du fer (hématite) s'était formé avant la minéralisation de REE-Nb, et la circulation de fluide hydrothermal aurait entraîné la minéralisation en REE. Outre le gisement de Bayan Obo, la Chine a aussi plusieurs gîtes de REE dans les carbonatites : les gisements de Wushan et Maoniuping.

Le gisement de terres rares de Bayan Obo, le plus important au monde, est exploité, à ciel ouvert, par le groupe Baogang. Les réserves sont de 600 millions de tonnes de minerai contenant 34 % de fer, 5 % d'oxydes de terres rares et 0,032 % d'oxyde de thorium. Le fer contenu est destiné à la production d'acier par la société Baotou Iron & Steel avec, en 2013, 10,7 millions de tonnes d'acier et les terres rares sont également traitées à Baotou par la société Baogang Rare Earth qui produit des concentrés contenant de 49 à 59 % d'oxydes de terres rares et des terres rares séparées sous forme d'oxydes et de métaux, avec, en 2013, une production de 65 000 t d'oxydes de terres rares.



### I-2-2-Gisement de carbonatite de Mountain Pass, USA

Le Gisement de carbonatite de Mountain Pass est le second plus grand gisement des Terres Rares après Bayan Obo. C'est une masse intrusive à pendage modéré associée à un groupe de plutons alcalins ayant un âge de 1.40 Ga, tous d'orientation et de dimensions semblables, et à un grand nombre de filons de roches alcalines et carbonatites. Le gisement de carbonatite est situé près de la bordure de la partie sud entre la Californie et le Nevada. La Syenite, la shonkinite, le granite, sont intrudés dans la roche métamorphique. Ce sont des roches alcalines fortement riches en potassium. Les réserves sont estimées approximativement à 28 millions de tonnes avec une teneur entre 5–10% de REO.

Le gisement de Mountain Pass, aux Etats-Unis, propriété de la société Molycorp, est exploité depuis 1952. Jusqu'au début des années 1990, avant le développement de la production chinoise, c'était la principale source mondiale de terres rares. Face à la concurrence chinoise et à des pollutions accidentelles, la production minière a cessé en 2002. Elle a repris en 2011 et devrait atteindre 19 050 t/an. Les réserves prouvées et probables sont de 18 millions de tonnes de minerai contenant 8,03 % d'oxydes de terres rares exprimés en RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

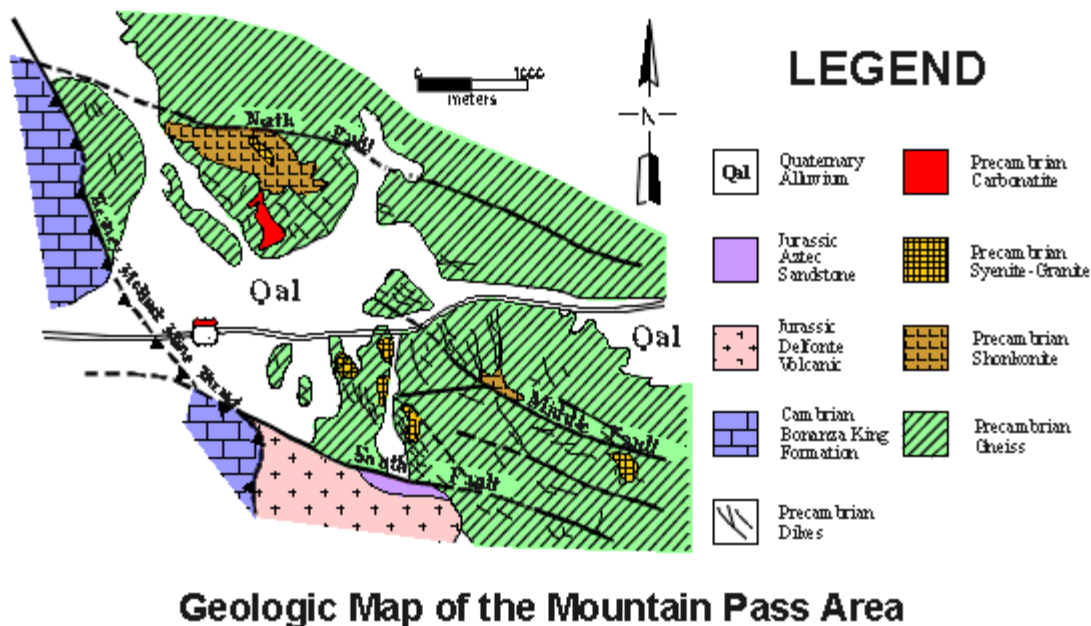


Figure 2: carte géologique de Mountain Pass

### I-3-PRODUCTION MONDIALE DES TERRES RARES

En raison de leurs usages multiples, souvent dans des domaines de haute technologie revêtant une dimension stratégique, les terres rares font l'objet d'une communication restreinte de la part des États, de sorte que les statistiques macroéconomiques à leur sujet demeurent très lacunaires. Les réserves mondiales en oxydes de terres rares étaient estimées par l'USGS (USA) à 110 millions de tonnes fin 2010 détenues à 50 % par la Chine, devant la Communauté des États indépendants (17 %), les États-Unis (12 %) et l'Inde (2,8 %). La Chine estime quant à elle détenir seulement 30 % des réserves mondiales de terres rares, bien qu'elle fournisse 90 % des besoins de l'industrie et se penche sur les techniques de recyclage de ces terres rares dans les déchets électroniques. La production mondiale d'oxydes de terres rares de la Chine s'est élevée à environ 130 000 tonnes en 2010, constituant un quasi-monopole mondial (l'Inde, deuxième producteur « déclaré », n'en aurait extrait que 2 700 tonnes), mais la production de la CEI, des États-Unis et de la plupart des autres producteurs mineurs (qui cumuleraient tout de même un cinquième des réserves mondiales) n'est pas communiquée.

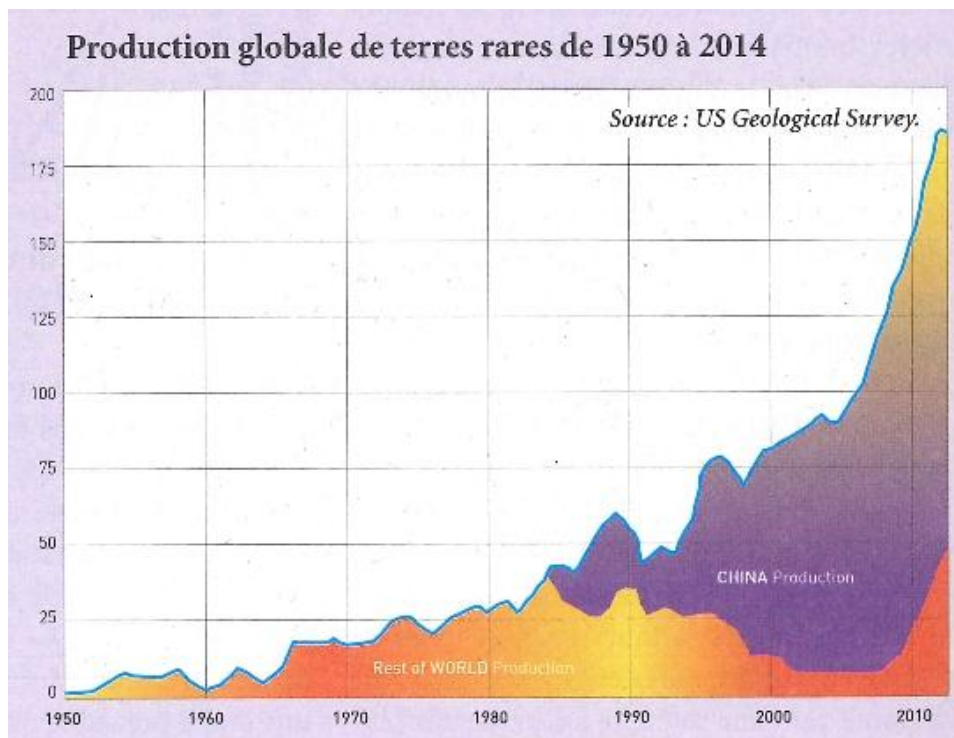


Figure 3: Production globale de terres rares de 1950 à 2014

## CHAPITRE II

### CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE ET METHODOLOGIE

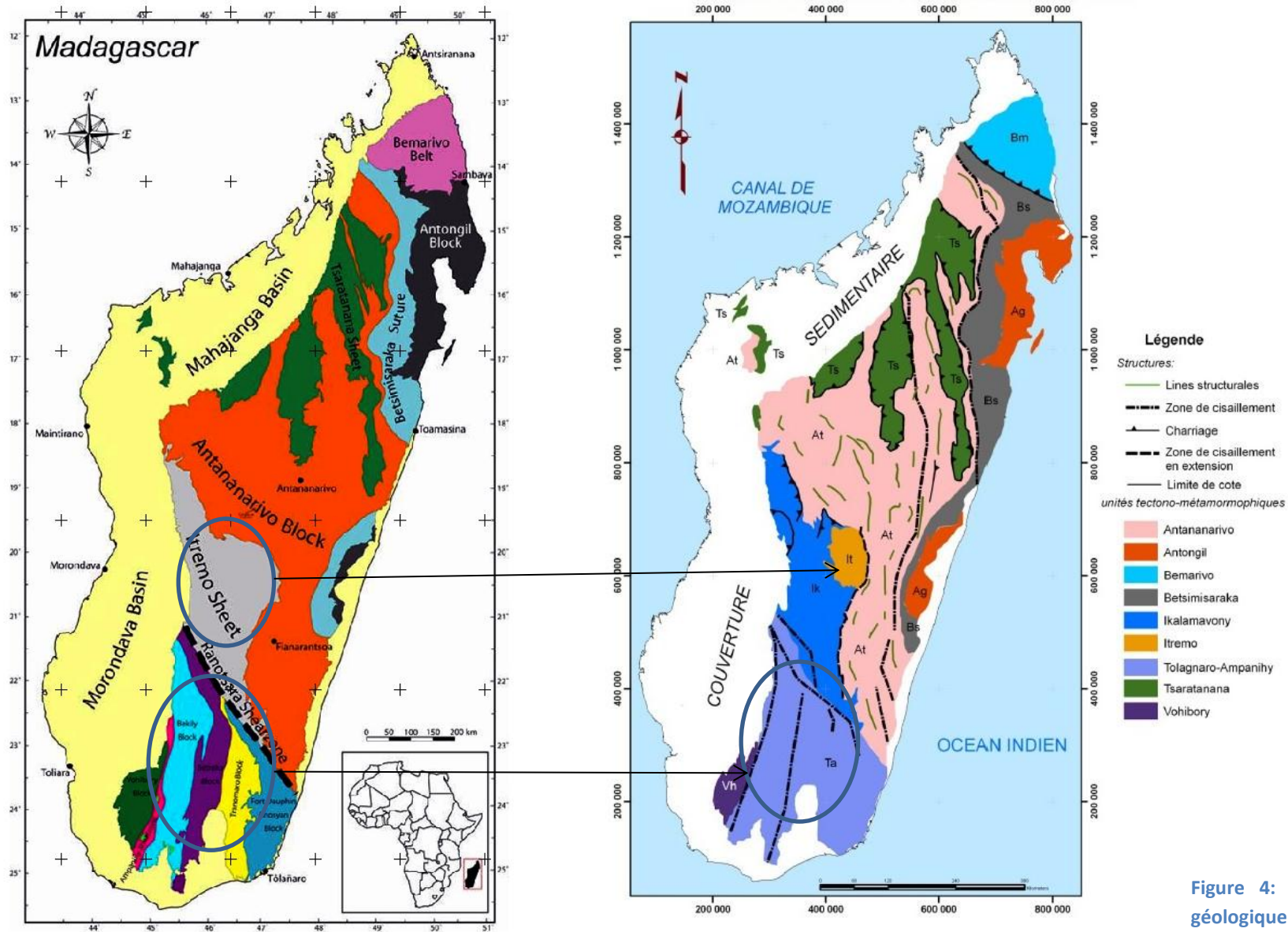
## II-1-CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE SUIVANT L'EVOLUTION DE LA GEOLOGIE DE MADAGASCAR

Au fil du temps diverses entités ont effectué des études et des révisions fondamentales sur la géologie malgache qui ont abouti à une reclassification sur la géologie de Madagascar (figure 4).

Suivant cette étude, la classification de la géologie de la zone d'étude (tableau 1) a suivi cette évolution de la vision de la géologie de Madagascar.

**Tableau 1 : Différents concepts et classifications selon divers auteurs**

Auteurs	Concepts	Classification
H.BESAIRIE (1959)		-système du Vohibory : roches amphiboliques - différents complexes: complexe intrusif d'Ambatofinandrahana
Collins et al. (2002)	-mise en place des unités basiques et ultrabasiques par chevauchement, -cette unité interprétée comme une zone de suture entre le bloc indien (Antongil) et le bloc africain (Antananarivo) au Néoprotérozoïque (Collins et al., 2000, 2002).	bloc Ikalamavony- Amborompotsy : Unité d'Itremo (quartzites, micaschistes et marbres dolomitiques, (SQD))
J.Y Roig et al, 2012	Les formations d'âge Protérozoïque dont fait partie Vohibory et Bemarivo sont aussi constituées par l'unité d'Itremo formée de quartzites, micaschistes et marbres dolomitiques (SQD)	Domaine d'Ikalamavony : roches métavolcaniques et métasedimentaires.



(a): Tectonic units in Madagascar (Collins et Windley 2002)

(b): Carte tectono-métamorphique de Madagascar (Selon J.Y Roig et al, 2012)

Figure 4: comparaison des Cartes géologiques de Madagascar

## II-2-CONTEXTE GENERAL DE LA REGION D'AMBATOFINANDRAHANA

### II-2-1-Localisation et contexte géographique

Ambatofinandrahana se localise dans la partie Sud du versant occidental des hautes terres de Madagascar, dans la région d'Amoron'i Mania. La zone d'étude a comme coordonnées géographiques Xv : 420 - 480 et Yv : 560 – 660.

C'est une région à relief de collines et constituée par un ensemble montagneux (photo 4). Des chaînons quartzitiques y forment des séries de crêtes saillantes abruptes, dénudées et inhabitées. Des zones calcaires y constituent une contrée de collines arrondies, souvent couvertes de pâturages, où la densité de la population est un peu plus élevée. Le relief y est parfois du type karstique. Les pentes sont jalonnées par des Aloès qui indiquent des cipolins dolomitiques. Les fonds alluviaux sont cultivés en rizières. Le secteur fait partie du flanc occidental de la région centrale montagneuse de l'île avec une hauteur environ de 1 500 à 1 800m. Les altitudes se situent entre 1 000 et 1 800m. Les hauteurs émergent d'une morphologie générale de plateaux. Cet ensemble est bordé de grandes plaines sur lesquelles s'est largement développée la latérite.

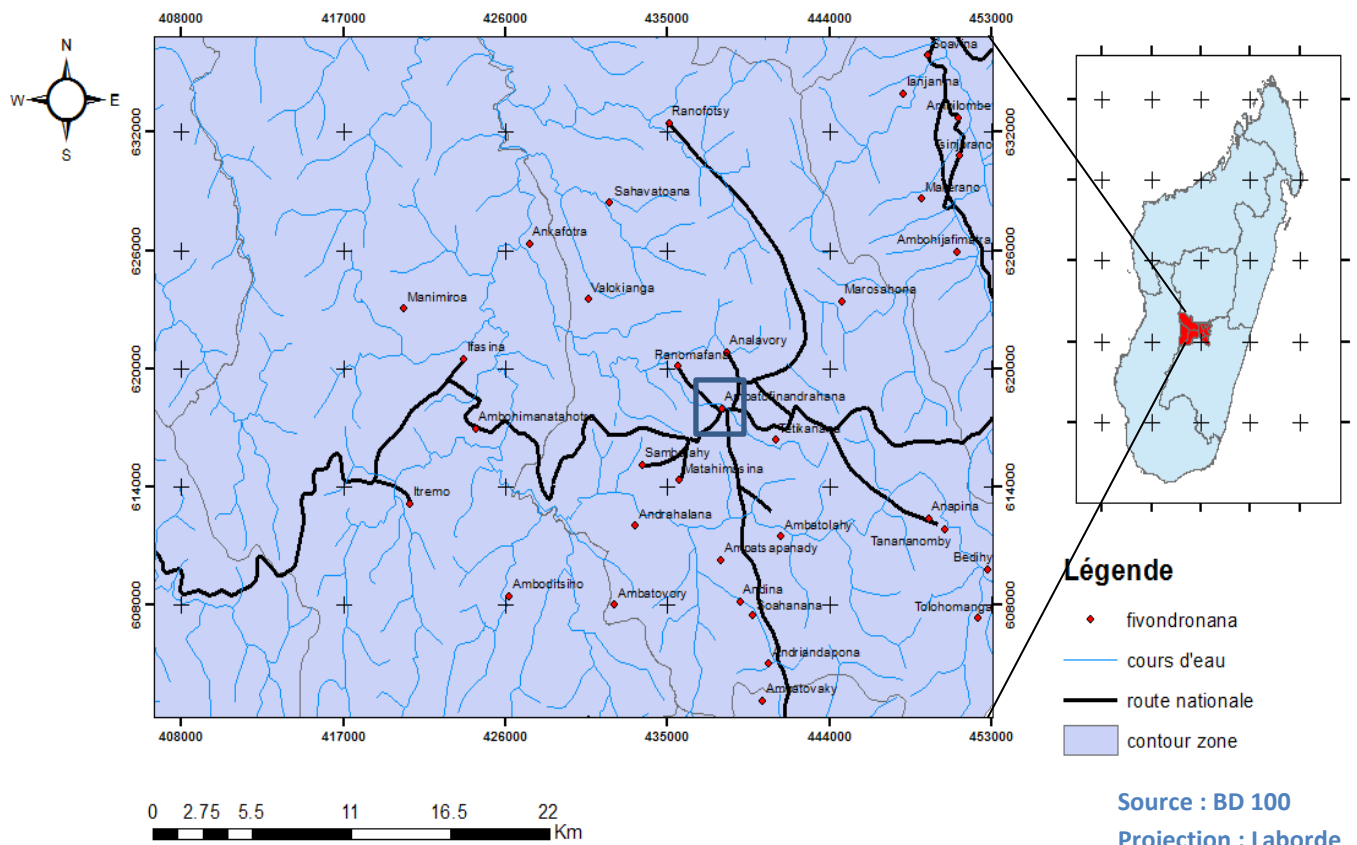


Figure 5: Carte de localisation géographique de la région d'Ambatofinandrahana





**Photo 4 : La géomorphologie de la région**

La région d'Ambatofinandrahana a un climat à deux saisons :

- La saison chaude du mois de novembre à avril pendant laquelle la pluviométrie est de 1 299mm des 1 328mm de pluie qui tombe annuellement dans cette région. Cette saison coïncide avec la saison cyclonique de Madagascar.
- La saison froide va du mois de mai au mois d'octobre pendant laquelle il tombe 184mm des 1328mm de pluie par an. Pendant cette saison, il pleut en moyenne pendant 9 jours.

Les températures minima sont basses avec une moyenne de 8°5C (4°C en août) tandis qu'en saison chaude, la moyenne est de 16°C (14°C en janvier).

La végétation est du type savane herbeuse avec localement des touffes de forêts de reboisement et de petites forêts galeries. La végétation caractéristique de cette région est l'Aloès Capitata ou Vahona qui ne pousse que sur du cipolin dolomitique. Elle permet donc de suivre cette formation. Les habitations sont bâties à mi- pente des versants, au-dessus des rizières aménagées toujours en gradins étagés d'abord dans les fonds de vallées et ensuite étendues sur les flancs des collines. En effet, pour faire face à la stérilité du sol, les ruraux ont acquis la maîtrise de l'eau par la construction de canaux d'amenée d'eau creusés à même le sol sur des kilomètres pour amener l'eau d'une source ou d'un cours vers les surfaces à cultiver. Toutes les espaces libres sont cultivées et la culture en gradins offre une apparence régulière.

Les villages sont presque toujours entourés de petits bois de mimosas et d'eucalyptus qui représentent souvent la seule haute végétation d'une région par ailleurs très dénudée mais aussi des pins souvent accompagnés de « tapia ».



(a)



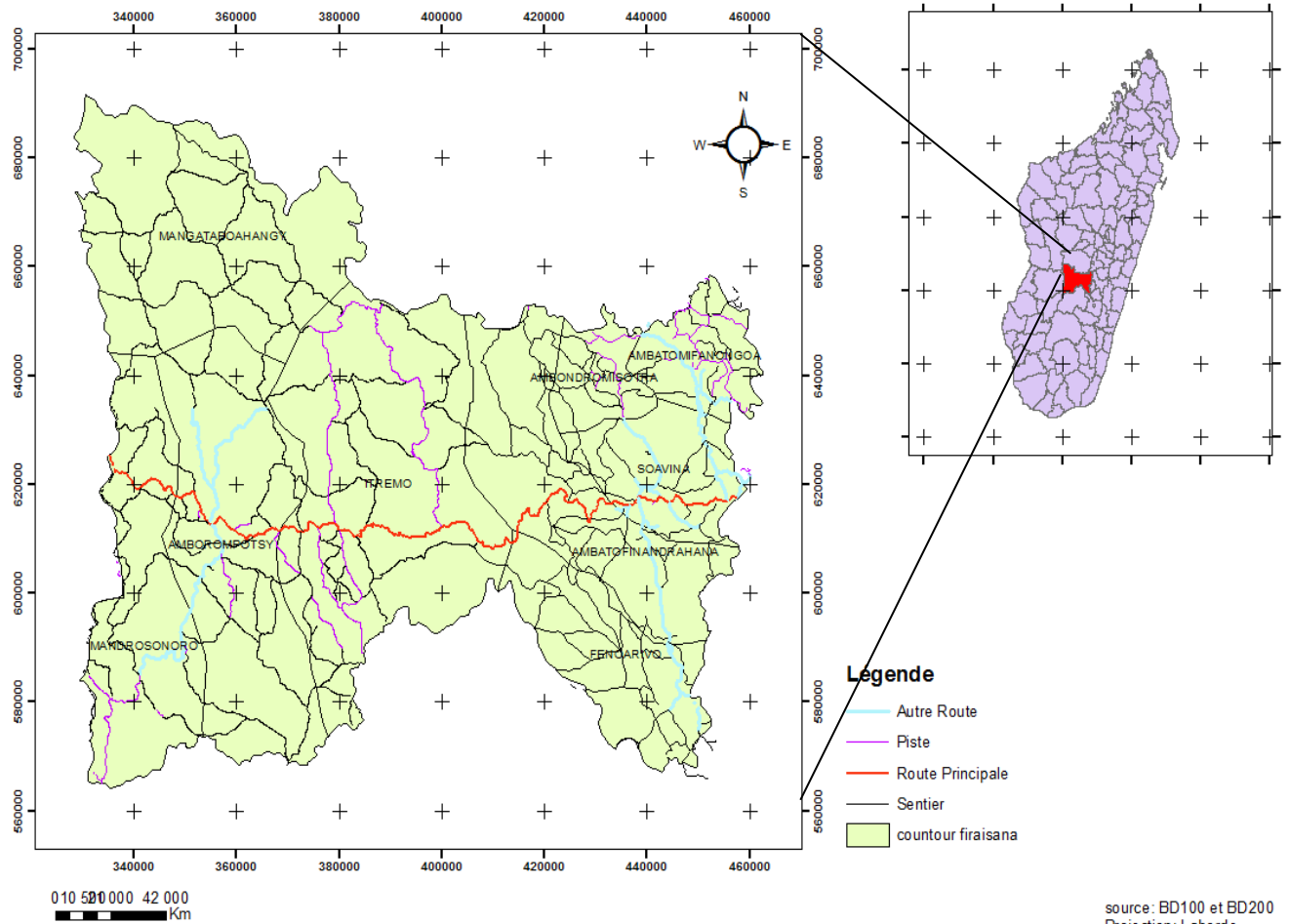
(b)

Photo 5 : La végétation existant dans la région d'Ambatofinandrahana. (a) : Tapia, (b) : Pin

### II-2-2-Infrastructure

La ville d'Ambatofinandrahana peut être jointe par des routes bitumées permanentes d'une distance de 195Km suivant les RN7 (Antananarivo-Toliary jusqu'à Ivato) et RN35 (Ivato-Morondava). Plusieurs réseaux de pistes charretières plus ou moins carrossables, et le plus généralement saisonnières ainsi que des sentiers sillonnent toute la région d'Ambatofinandrahana et permettent de joindre les différentes localités. Certaines de ces pistes charretières ont été réhabilitées pour faciliter la desserte des produits agricoles. Mais actuellement les infrastructures routières sont en très mauvais état depuis Ivato.

La ville d'Ambotofinandrahana dispose de courant électrique fourni par la société Jiro sy Rano Malagasy (JIRAMA) qui utilise un groupe électrogène de 52KVA dont le temps de fonctionnement quotidien est limitée à douze heures de 12h à 24h. L'eau supposée être potable est de captage direct et est acheminée par gravité du haut de la colline surplombant la ville à l'Est.



source : BD100 et BD200  
Projection : Laborde

Figure 6: Carte des infrastructures

### II-2-3-Hydrographie

La région d'Ambatofinandrahana est alimentée par deux grands cours d'eau, la Matsiatra et la Mania. Tous les cours d'eau qui drainent la région sont des affluents de la rivière Imorona, elle-même étant l'un des affluents de la rivière Mania. En général, les ruisseaux et les rivières sont à écoulement permanent (figure 7) malgré le fait qu'en saison froide leurs niveaux soient au plus bas et que des chenaux d'étiage se dessinent. Les bassins de réception par contre, en saison froide, ne forment que des réseaux de collecteurs asséchés.

Tous ces cours d'eau ont un régime torrentiel. Les vallées sont généralement encaissées. Les petits bassins alluviaux qui séparent les différents cours d'eau forment souvent une succession de défilés étroits.

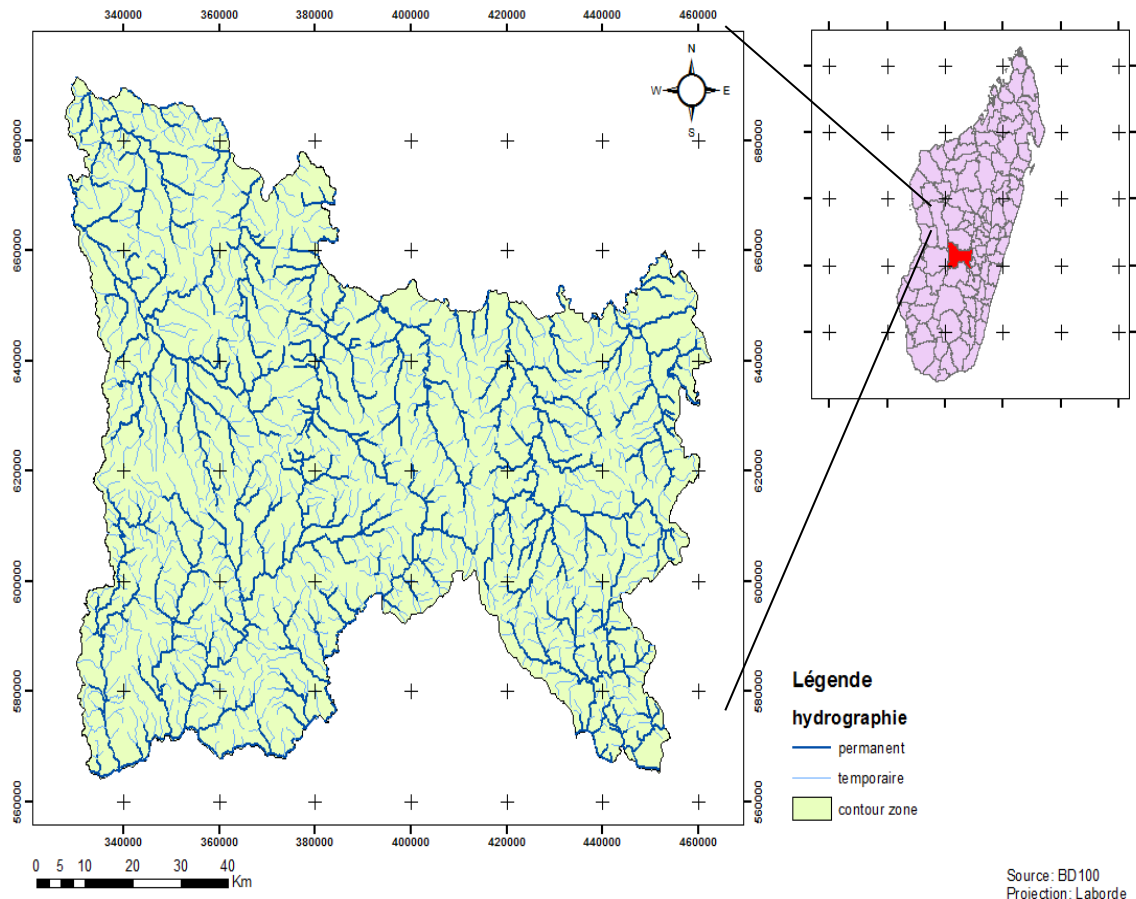


Figure 7: Carte de l'hydrographie de la région d'Ambatofinandrahana

#### II-2-4-Economie

L'économie est essentiellement agricole. Dans la région d'Ambatofinandrahana, la culture de base est celle du riz. Mais il y a quelques champs qui à côtés des villages constituent des cultures de manioc, de la patate douce, des choux, des haricots. Les hautes collines sont livrées à la prairie où paissent des troupeaux de zébus, parfois importants. On voit dans tous les villages des porcs et de la volaille. Toutefois, la région d'Ambatofinandrahana a connu de belles époques minières bien révolues. L'exploitation du cuivre a débuté vers la fin du Royaume Merina Malgache reprise par les colons dont Pachoud et Jamet. La bastnaésite a été exploitée du début du 20<sup>ème</sup> siècle jusque dans les années 85. Des pierres fines ont été extraites des environs d'Itremo.

## II-2-5-Contexte géologique d'Ambatofinandrahana

La région d'Ambatofinandrahana (feuille MN51) est localisée sur le socle cristallin Précambrien de Madagascar et est géologiquement formée par le groupe d'Itremo (A. EMBERGER, 1955) qui est une série de formations métasédimentaires d'âge protérozoïque et de roches gneissique (Collins et al. 2000), constitués par des quartzites, des micaschistes et des marbres dolomitiques à séquence sédimentaire qui était dénommé auparavant par la Série Schisto – Quartzo – Carbonatée (SQC). Ces sédiments se seraient déposés entre 1855 Ma et 804 Ma (Cox et al., 1998). Ils sont recoupés par des gabbros et granites datées de 1000 à 720 Ma (Tucker et al 2006) ainsi que des granites et des syénites datés de 570 à 520 Ma. La minéralisation en terres rares de cette région est associée à ces derniers.

La région d'Ambatofinandrahana montre deux séries stratigraphiques superposées et discordantes, recoupées par un important ensemble intrusif, accompagné d'un cortège filonien. D'après A. LACROIX en 1921 puis A. LENOBLE en 1940 des séries métamorphiques qui sont recoupées par des granites intrusifs reposeraient en discordance sur les schistes cristallins du vieux socle précambrien.

Cette zone est constituée par le complexe intrusif d'Ambatofinandrahana (1125Ma) qui comporte de gabbros, de syénites et une série granitique massive à caractère alcalin généralement recristallisé et orthogneissique.

La région est minéralisée en terres rares qui sont associées aux granites et syénites. Les minéraux contenant les terres rares qui sont la monazite et la bastnaésite sont associés avec des microgéodes de quartz et des amas de biotite.

- Mise en place de la série SQD

Les connaissances précises sur la sédimentologie de la série SQD sont dues aux travaux de Moine (1974). Une première séquence de quartzites se serait déposée directement sur le socle sur de très grandes surfaces. Cette première séquence a une structure à stratification entrecroisées et présente des ripple-marks et des graded-beddings. Sur cette première séquence sont venus se déposer les sédiments de la série SQD avec successivement les cipolins, les schistes ou micaschistes et les quartzites. Vers la fin du cycle de sédimentation une différenciation entre la plateforme et le domaine de fosse abyssale fortement subsidente s'est opérée. En effet, la plateforme stable est caractérisée par des sédiments chimiquement dégradés et évolués. Les formations de la plateforme correspondent à la série schisto-quartzo-dolomitiques (Moine, 1974 ; Daso, 1986) tandis que les sédiments de la fosse abyssale correspondent au groupe gneissique (Moine, 1974) dénommé par Bésairie le groupe d'Ikalamavony-Amborompotsy.

Les minéralisations en terre rare de la région d'Ambatofinandrahana : cas du gisement d'Andoharano

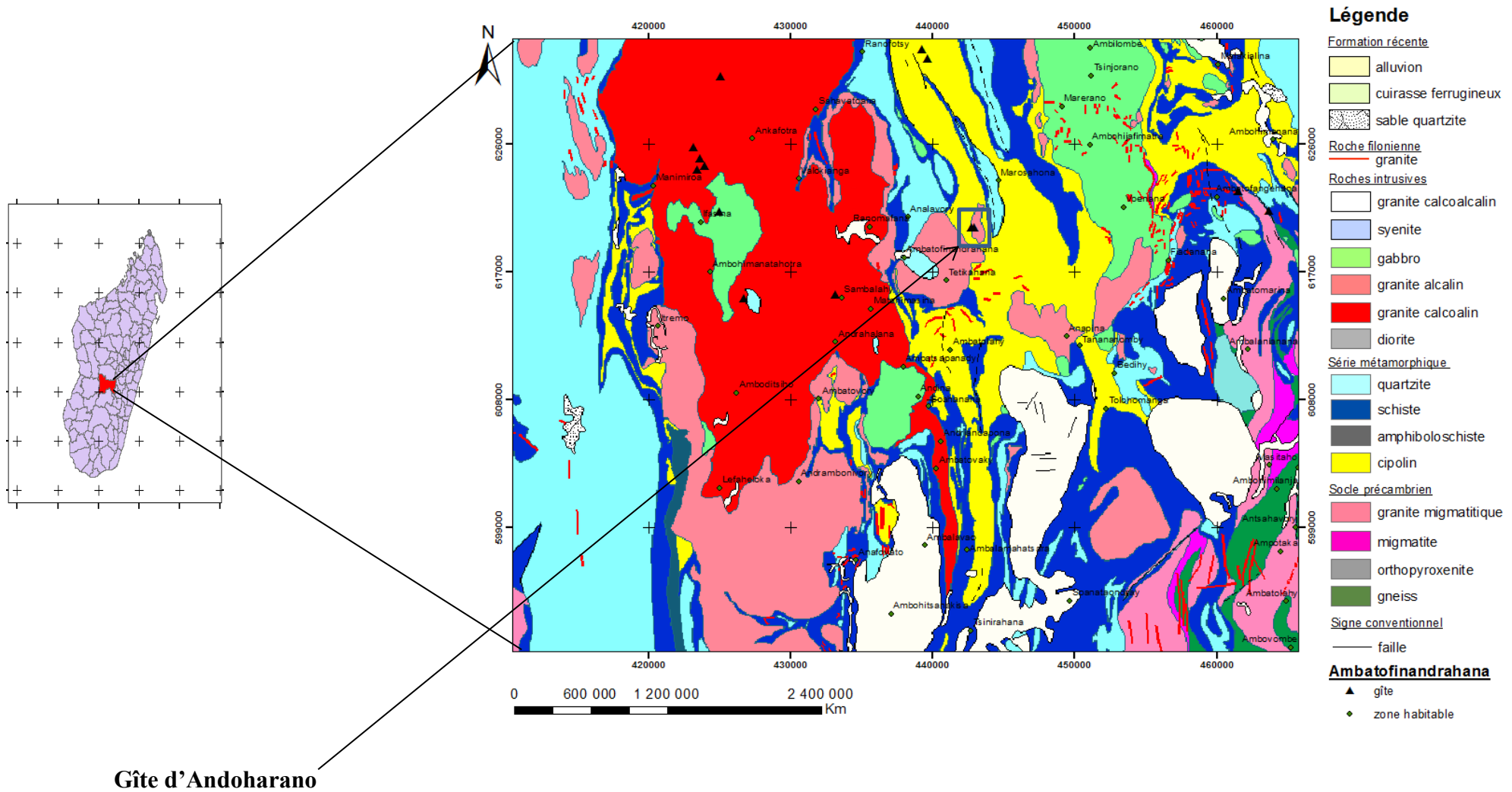


Figure 8: Carte géologique numérisée de la région d'Ambatofinandrahana (source : auteur/ projection : Laborde)

## II-2-5-1-Lithologie

La région d'Ambatofinandrahana est composée par deux types de roche (Annexe 5) dont :

- Les roches cristallophylliennes formées par la SQD et des formations gneissiques
- Les roches ignées formées par des roches ignées orogéniques et des roches gneissiques de type Imorona

### a. Les roches cristallophylliennes

Le SQD est au centre et les formations gneissiques à la bordure de la zone.

#### - SQD

Le SQD se trouve dans un environnement migmatito-gneissique sous forme elliptique avec une largeur d'environ 100km et un allongement de 160km. La zone « schisto-quartzocalcaire » (SQC) de A. Lacroix (1921-1923) a été la référence pour le terme massif « schisto-quartzo-dolomitique ». Cette référence désigne un domaine localisée au centre caractérisé par un assez développement de quartz souvent associé à des micaschistes et à des cipolins. Par contre le massif SQD est subdivisé en une zone centre orientale à quartzite, micaschiste et cipolin et une zone en bordure constituée par des quartzites, gneiss et migmatites se rattachant directement à son environnement migmatito-gneissique.

### b. Les roches ignées

Ce groupe a été divisé en deux selon le faciès et les chronologies apparentes par rapport aux plissements et au métamorphisme des schistes cristallins.

#### - Roches ignées orogéniques

Ce groupe est très varié. Elle est constituée de granites à structure équante, de gabbros et de granites porphyroclastiques dans le groupe de SQD, par contre le groupe gneissique est formé par des granites migmatitiques de type Midongy (A.Emberger, 1955) et des granodiorites.

#### - Roches gneissiques de type Imorona

Ces roches forment le massif d'Imorona du type orthogneiss granitique avec une vaste structure d'allongement sub-méridien dans la partie centrale de la zone.

Selon Moine, le granite d'Ilaka (à l'Est d'Ambatofinandrahana) est l'équivalent de l'Imorona.

Cette formation gneissique serait un pluton témoin plus ou moins remobilisé de l'aire cratonique sur laquelle s'est déposée cette série (Moine, 1974).

## II-2-5-2-Structures de la région d'Ambatofinandrahana

La région d'Ambatofinandrahana est constituée par l'unité charriée d'Itremo datée de 1855 Ma (Cox et al. 1998), elle est intrudée par les roches plutoniques datées entre 1000 à 720 Ma ainsi que des granites et des syénites de 570 Ma à 520 Ma. Moine, 1974 a montré que les formations sédimentaires de la série Schisto – quartzo – dolomitique (SQD) sont celles d'une plateforme stable dont les équivalents latéraux du domaine abyssal sont les gneiss et les migmatites du groupe d'Amborompotsy – Ikalamavony.

Du point de vue structural, les formations de la série SQD reposent en discordance sur les granites d'Ilaka d'âge 790 Ma (Handke et al., 1999) et de l'Imorona qui ont alors été considérés comme étant le socle de la série SQD qui a par la suite, été plissée avec eux (Moine, 1974) et déplacés sous forme de nappes associées à des écailles de socle. Le mouvement continue mais le tout est coincé avec des zones de cisaillement verticales (Razakamanana, 1990). L'étude récente de Fernandez 2000 – 2004 a indiqué l'existence de deux principales déformations (D1) et (D2).

- Pendant D1, ces métasédiments ont été détachés de leur substratum continental et ont été charriés sur les roches de haut grade. L'ensemble a été intrudé par les granites et les gabbros daté de 790 - 800 Ma. Mais, cela s'est produit dans les conditions de métamorphisme du faciès schiste vert à amphibolite. Ce premier épisode a donné naissance à des plis couchés, déversés vers l'Est et accompagnés d'une linéation d'étirement E – W; ces plis sont souvent replissés et affectés par des cisaillements tangentiels.
- Et D2 qui est un épisode de raccourcissement E – W en régime transgressif a affecté la nappe d'Itremo. Cette déformation est associée à la formation des zones de cisaillement et de méga-plissement de plan axial N-S à axe horizontal. Ces structures D2 sont caractérisées par une foliation subméridienne très redressée. Le groupe d'Itremo serait le siège d'un événement cisailant de compression (Handke (1999), Collins (2003)).



### II-3-METHODOLOGIE DE L'ETUDE

Ce flow chart nous montre les étapes entreprises pour la présente étude :

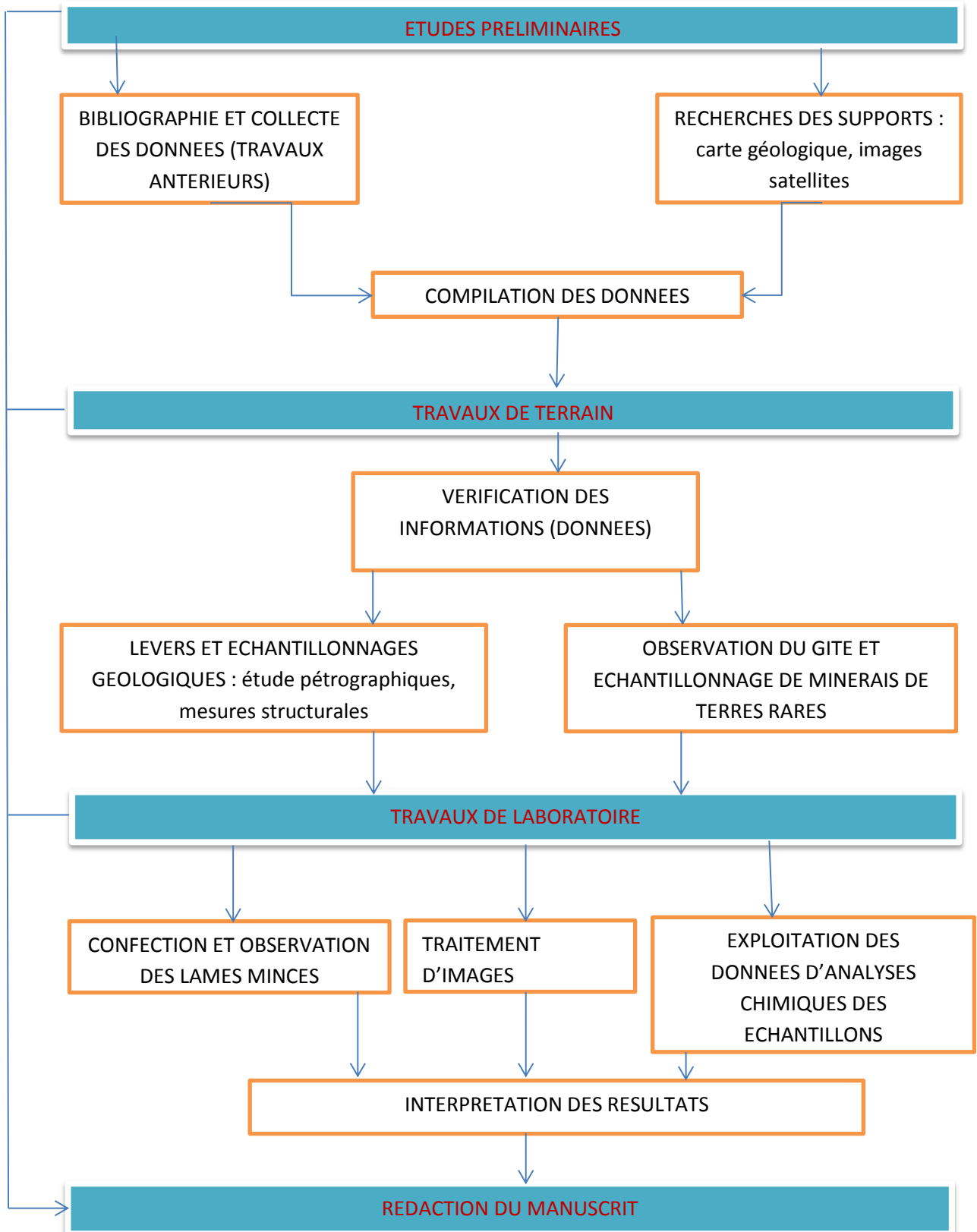


Figure 9: Flow chart

### II-3-1-Etude préliminaire

Cette étape consiste à une consultation de documents, suivie d'une collecte de données à partir des travaux antérieurs (carte géologique, images satellites). La manipulation des données existantes pourra aider une fois descendu sur terrain.

### II-3-2-Travaux sur terrain

La seconde étape, était les études sur terrain qui a duré 15 jours. Pendant cette descente, des mesures structurales et des prélèvements de 64 échantillons (figure 6) ont été également réalisé. Sans oublié surtout l'étude du gîte de monazite d'Andoharano.

Dans cette étude il est question de :

- Vérification des données acquises : réalisées en vue d'avoir une conception nouvelle de la zone d'étude,
- Réalisation de levés et d'échantillonnages géologiques : observation plus détaillées des éléments de la géologie régionale ainsi que leurs divers composants au niveau minéralogique c'est-à-dire une étude pétrographique (macroscopique) des échantillons,
- Observation du gîte et échantillonnage de minerais de terres rares : caractérisation du gîte au niveau géologique et gîtologique.

### II-3-3-Travaux de laboratoire

La présente étape se rapporte aux études pétrographiques et géochimiques des échantillons et nous ferons appel à la télédétection pour l'étude des images satellites landsat 5 TM afin de mieux comprendre la structure de la zone d'étude.

- Confection et observation des lames minces

La troisième étape consistait aux travaux de laboratoire, des lames minces des échantillons prélevés ont été confectionnées. Des études pétrographiques sous microscope polarisant des lames minces ont été effectuées par la suite pour pouvoir déterminer la nature des minéraux existants. De ce fait 7 lames minces ont été conçues pour cette étude.

- Exploitation des données d'analyses chimiques des échantillons

Cette étape consistait aux traitements des résultats d'analyses chimiques et géochimiques des éléments majeurs et des terres rares qui seront au final étudié et interprété. En effet l'étude des terres rares se fait en normalisant aux chondrites d'Evensen (1978) les valeurs modales obtenues par dosage sur roche totale et celle des éléments majeurs se fait par la projection des analyses chimiques sur le diagramme de Harker. La représentation graphique de la distribution des terres rares des échantillons se fait en reportant sur un diagramme binaire semi-logarithmique les valeurs normalisées aux chondrites. La forme des profils permet d'apprécier le fractionnement magmatique.

- Traitement des images satellites

Avec le logiciel de télédétection ENVI nous avons effectué des traitements d'images satellites qui sont des images multispectrales qui correspondent à la combinaison de trois bandes. Avec les bandes Tm 10, 40, 60; Tm 10, 20, 30 ; Tm 20, 30, 40 et Tm 40, 50, 60 qui sont des images landsat 5 TM que l'on a utilisées on a pu constituer des images de différentes bandes afin de produire des cartes de différentes couleurs.

La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. Elle utilise les propriétés d'émission ou de rayonnement des ondes électromagnétiques par les objets.

Les traitements d'images satellites améliorent la localisation des structures géologiques et permettent de cartographier les linéaments de façon raffinée et précise.

Ces travaux nous permettent d'actualiser la carte préexistante, de distinguer les différentes formations géologiques, de réaliser une carte structurale afin d'identifier les principales directions des failles et des foliations.

➤ Les étapes suivies

On a recours à deux étapes pour le traitement des images satellites.

(a) La composition colorée

La composition colorée consiste à la fusion de trois bandes de même résolution spatiale à trois couleurs fondamentales qui sont le rouge, le bleu et le vert afin de produire une composition colorée. De ce fait, on a utilisé les bandes TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM7 car ils ont les mêmes résolutions. Elle permet de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets. Mais elle est aussi dite de fausse couleur car les bandes spectrales de l'image ne correspondent pas aux trois couleurs primaires.

(b) La vectorisation

Le rehaussement de l'image est le processus qui permet de rendre une image plus facile à interpréter pour une application donnée.

- L'analyse en composantes principales (ACP)

Le principe de cette étape est de transformer des variables liées entre elles en nouvelles variables décorréélées les unes des autres. Elle permet de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante. Après le traitement on obtiendra alors une image avec presque 90% d'information dans une seule composante.

- Les filtres directionnels

Cette opération est destinée à améliorer la lisibilité des images à partir de la modification de la valeur numérique de chaque pixel en fonction des valeurs des pixels voisins.

Dans l'image filtrée, de nombreux détails fins ont disparu, et l'image apparaît plus floue mais faisant ressortir une meilleure perception des linéaments, qui correspondent à des accidents structuraux.

➤ *La télédétection appliquée à la géologie*

Le principe d'utilisation de la télédétection en exploration géologique et géomorphologique est principalement fondé sur l'analyse du paysage dont les méthodes sont héritées de la photogéologie. En fonction des conditions d'affleurement de la ressource et de l'application recherchée, les réponses attendues de l'analyse des données des différents moyens sont de type : lithologique, minéralogique, structural, morphologique, géobotanique, global, ou concernent leur variabilité temporelle et leur synergie.

L'analyse des caractéristiques d'acquisition des données de télédétection permet de définir les points sur lesquels cette technique apporte par sa complémentarité une amélioration des résultats obtenus par la seule mise en œuvre des moyens traditionnels (levés terrain, aérophotographie) ou des outils d'exploration (géophysique, géochimie).

CHAPITRE III

PETROLOGIE

### III-1-ETUDES STRUCTURALES

A partir des images satellites, on a effectué divers analyses afin d'obtenir à la fin une carte linéamentaire pour voir tous les accidents tectoniques subit par la zone d'étude.

L'image satellite ci-dessous montre la localisation de la zone d'étude.

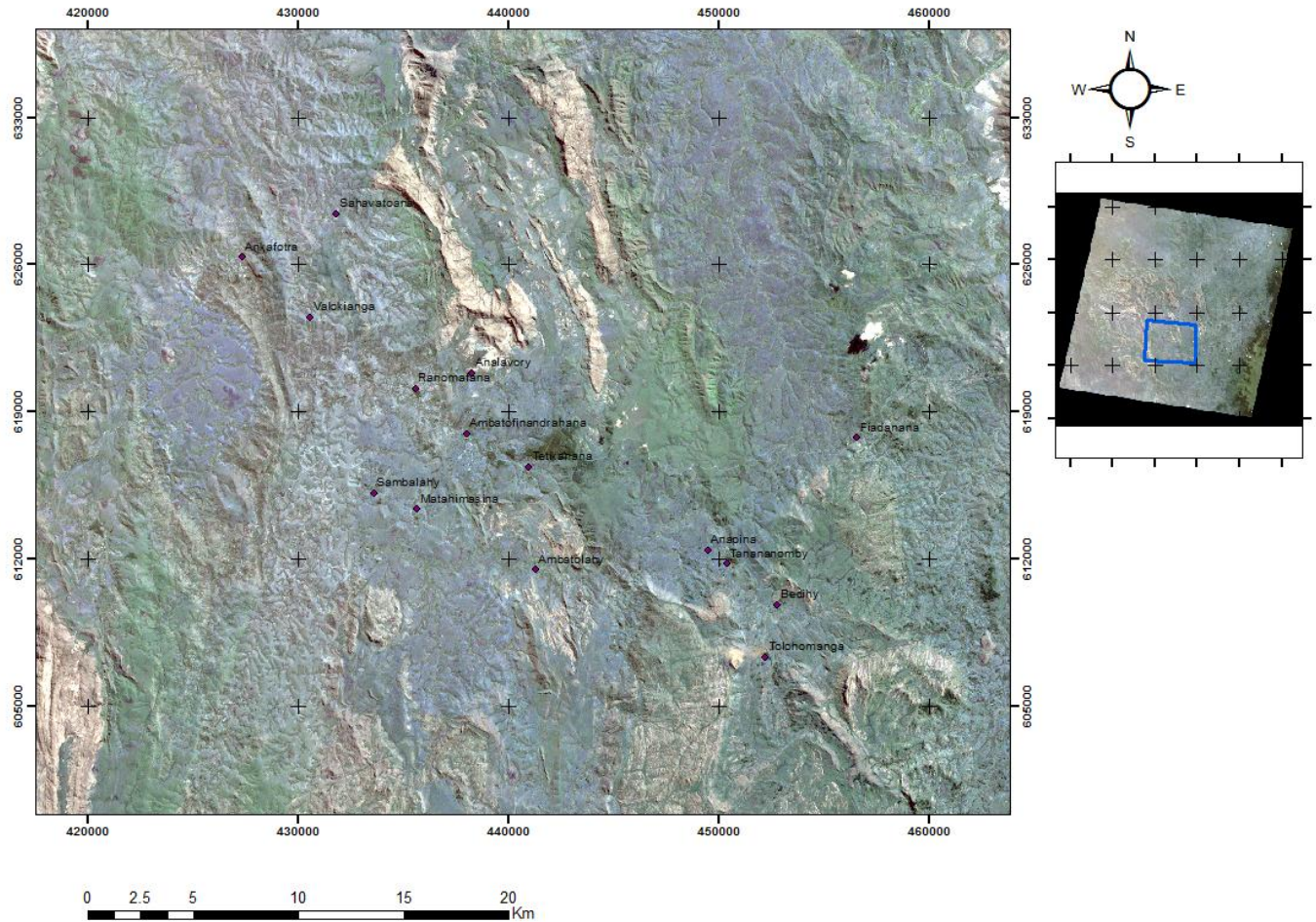


Figure 10: Localisation de la zone d'étude sur image satellite

#### III-1-1-La composition colorée

Les images satellites utilisées sont des images multispectrales qui correspondent à la combinaison de trois bandes spectrales et on a constitué beaucoup d'images de différentes bandes qui produisent des cartes de différentes couleurs. Les 6 canaux (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM7) d'une scène peuvent être combinés par trois et fusionnés dans le Rouge, Vert et Bleu, pour produire une image composite dite de composition colorée. Les deux autres canaux (TM6 et TM8) ne peuvent pas participer à la réalisation de cette composition colorée à cause de leur résolution spatiale différente par rapport aux autres. On a ainsi réalisé plusieurs compositions colorées avec les 6

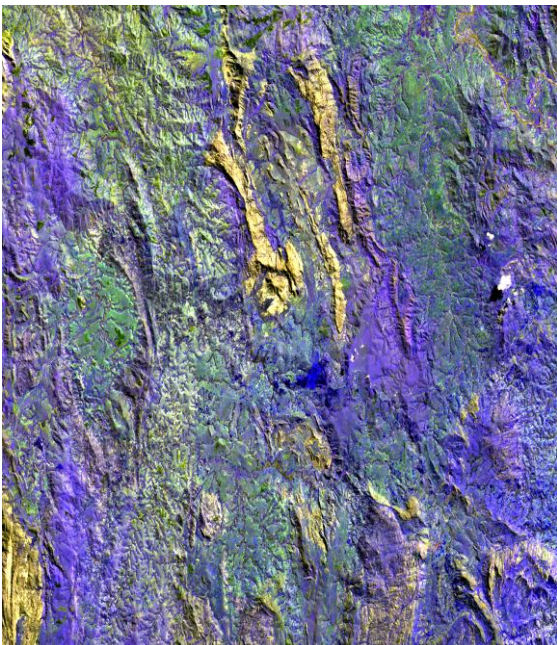
canaux possibles, et le choix s'est porté sur celle qui apporte le plus d'informations possibles dont TM1, TM2 et TM3 (figure 15).



(a)



(b)



(c)(d)



**Figure 11: Image satellite, (a) : Composition dans le mode RVB par les bandes 123, (b) : Composition dans le mode RVB par les bandes 146, (c) : Composition dans le mode RVB par les bandes 234, (d) : Composition dans le mode RVB par les bandes 456**

### III-1-2-La vectorisation

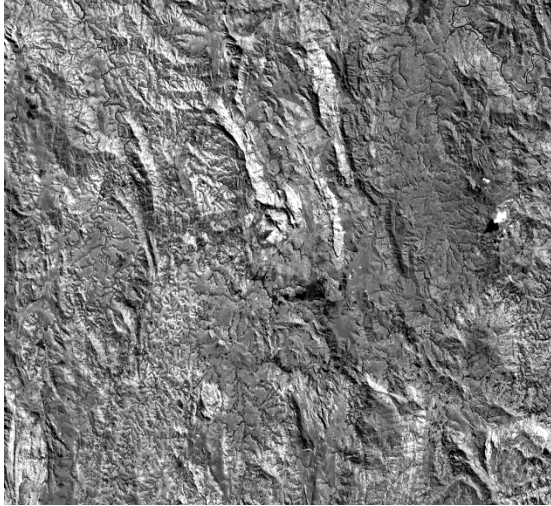
Les images ont été d'abord visualisées dans le logiciel Envi 4.5. Elles ont subi des traitements de rehaussement d'image tels que l'analyse en composantes principales (ACP) et les filtrages directionnels qui ont mis en évidence les différents accidents de la zone. Ensuite, les images ont été exportées vers le logiciel ArcGis pour la numérisation des linéaments observés

#### III-1-2-1-L'analyse en composantes principales (ACP)

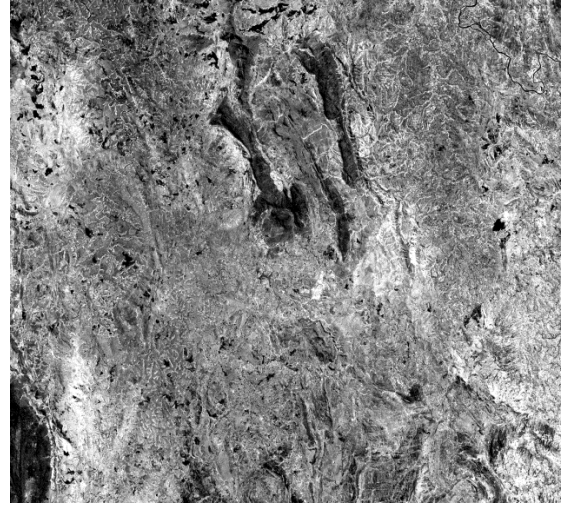
Les données multispectrales des différentes bandes contiennent très souvent des informations similaires. Des transformations sont effectuées pour réduire cette redondance.

Les néo-canaux qui résultent de ces transformations sont appelés des composantes principales (CP) et permettent de réduire l'information en un nombre plus restreint de bandes tout en conservant plus de 90% de l'information initiale. Cette technique est très efficace pour le rehaussement des images multispectrales à des fins d'interprétations géologiques.

Dans notre étude, nous avons généré 3 composantes principales (CP1, CP2, CP3) à partir de la bande 1, 2, 3, 4, 5 et 7. Mais Plus de 80% de l'information se retrouve dans la CP1, les autres CP font apparaître des différences entre les bandes spectrales.

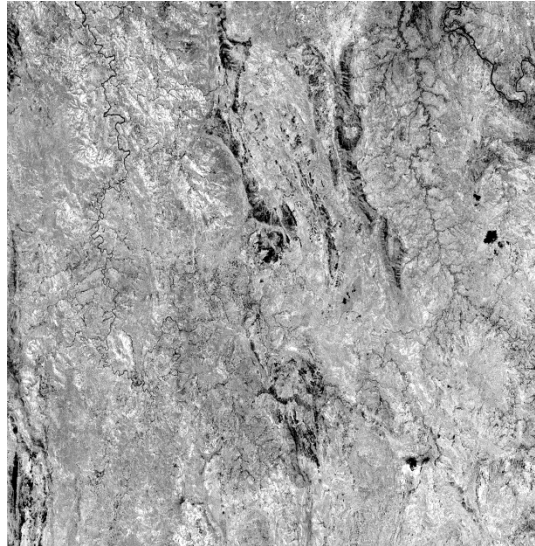


(a)



(b)





(c)

**Figure 12: Composantes principales**

- (a) CP1 : Composante principale 1
- (b) CP2 : Composante principale 2
- (c) CP3 : Composante principale 3

### III-1-2-2-Les filtres directionnels

Les filtres directionnels améliorent la perception des linéaments qui correspondent à des discontinuités lithologiques ou structurales, en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image.

Dans cette étape nous allons utiliser la composante principale CP1 (figure 45a) vu qu'elle représente le plus d'information.

Le filtre directionnel d'angle  $0^\circ$  avec une matrice  $7 \times 7$  appliqué à la première composante principale CP1 (figure 45a) a fait ressortir le plus de discontinuités dans les images et permet de voir les linéaments afin de pouvoir les tracer.

re rare

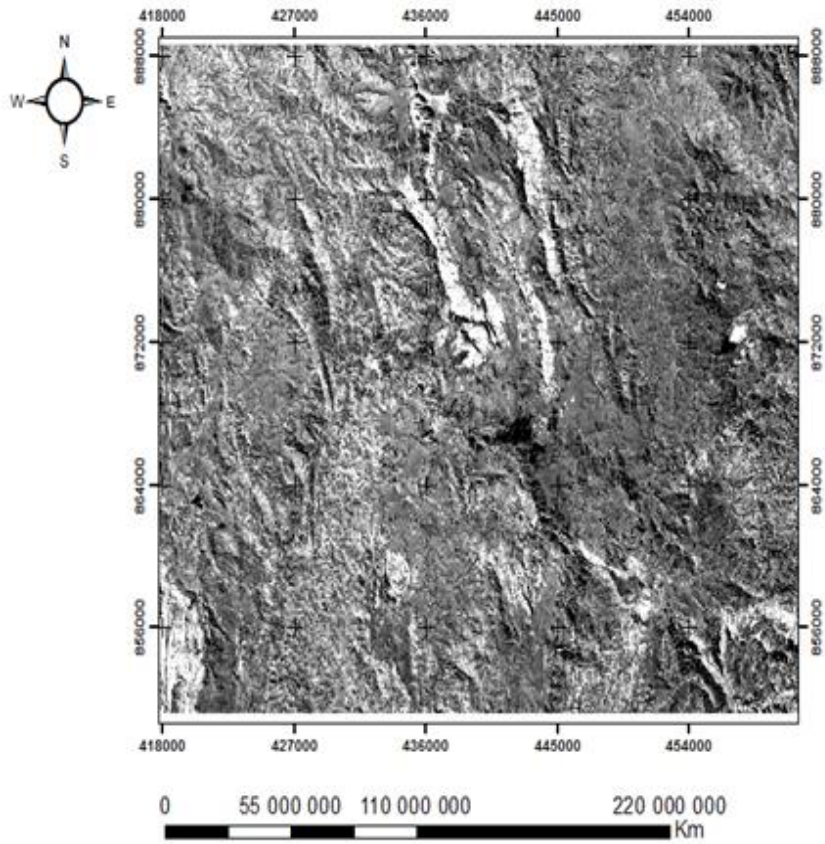


Figure 13: Visualisation de l'image CP1,

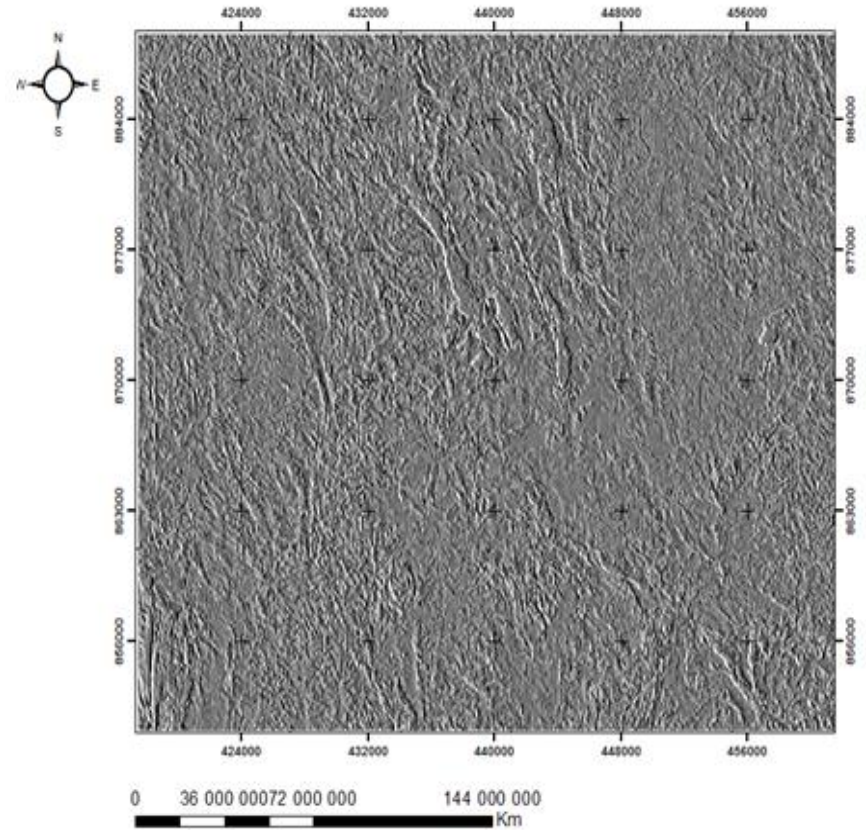


Figure 14 : filtre directionnel 00° appliqué à l'image CP1

### III-1-2-3-Cartographie linéamentaire

Les images issues des traitements par les filtres directionnels sont ensuite importées dans le logiciel Map Info pour dresser une carte linéamentaire de la zone. L'analyse de cette carte linéamentaire (figure 19) indique une direction majeure NNE-SSW

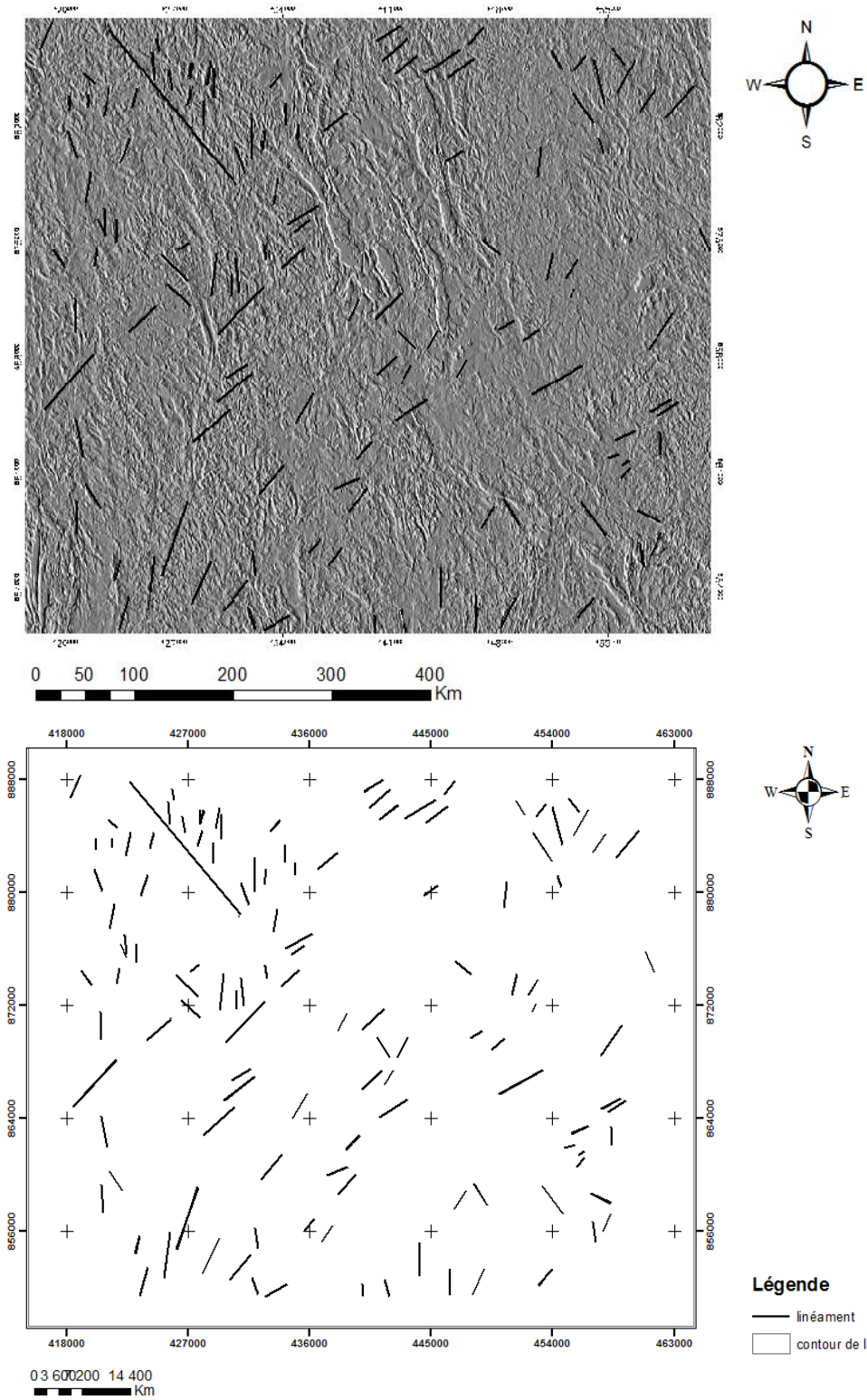


Figure 15: carte linéamentaire de la zone d'étude

### III-1-2-4-Analyse statistique de la carte linéamentaire

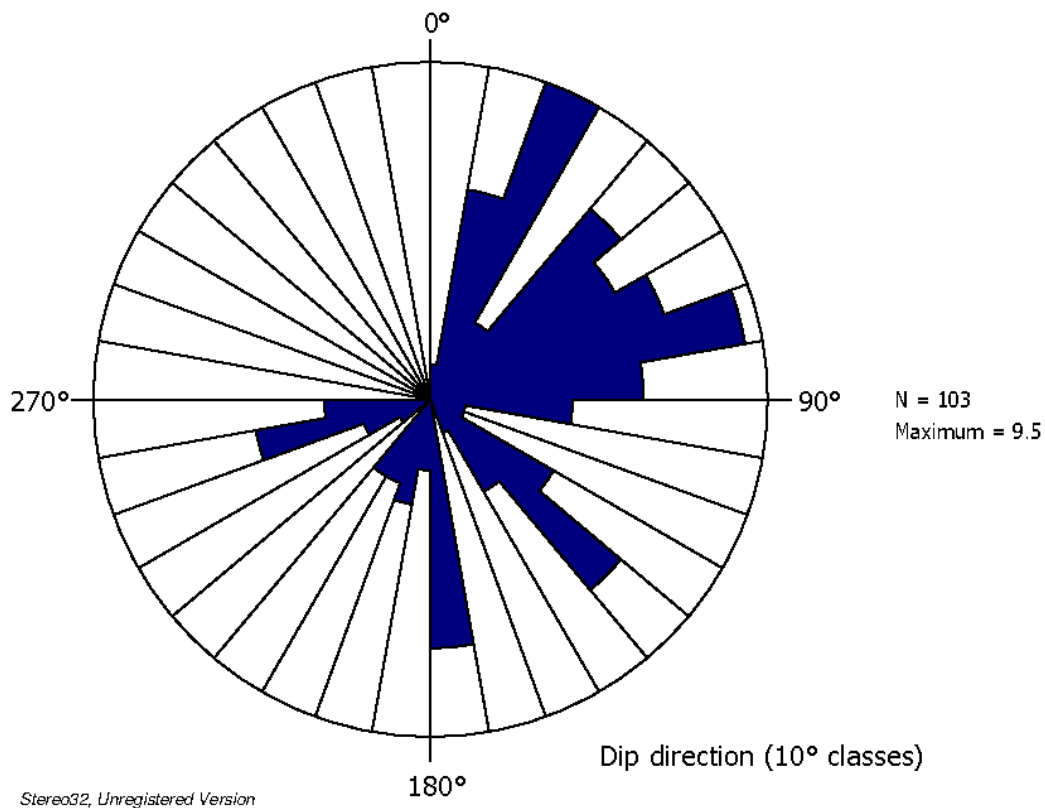
La carte linéamentaire (figure 19) obtenu montre plusieurs linéaments de taille variable. D'après les traitements des images satellites et de la carte géologique on a pu constater la généralité des linéaments (direction de foliation) par le tableau suivant :

**Tableau 2 : Analyse statistique**

Angle	Direction	Nombre	%
0-30	NW-SE	17	15
30-60	ENE-WSW	27	28
60-90	NNE-SSW	59	57

### III-1-2-5-Rosace directionnelle

Nous avons tracé les rosaces de direction à partir du logiciel Stereonet.32 à partir des néo-données obtenues. A partir de cette rosace (figure 20) on a pu constater que la direction la plus dominante est la direction NNE-SSW.



**Figure 16: Rosace des directions des linéaments**

Les fractures constatées sur la carte linéamentaire (figure 19) sont de longueurs variables avec une orientation non homogène.

Les directions majeures comprises entre NNE – SSW sur la rosace sont à peu près parallèles. Ce phénomène peut être expliqué comme étant un même mouvement tectonique qui affecte la zone.

Les autres directions s'orientent d'une façon désordonnée. Cela ne peut être due qu'au fait que notre zone d'étude a été affectée par différents facteurs tectono-métamorphiques.

## III-2-ETUDE PETROGRAPHIQUE

### III-2-1-Syéénite

- Donnée de terrain

Les syénites sont issues de l'activité alcaline ignée, elles se forment généralement dans des zones de la croûte continentale épaisse ou dans les zones de subduction de la cordillère.

La syénite d'Andoharano se trouve à 5 km au Nord Est d'Ambatofinandrahana. C'est une syénite grenue, leucocrate à microcline. Elle est formée essentiellement de feldspath, les minéraux noirs sont rares, formés de pyroxènes et de l'amphibole. On constate qu'au fur et à mesure que l'altitude diminue, les minéraux devient de plus en plus grossiers surtout l'orthose.

La formation syénitique est recoupée par des filons de pegmatite constituée de jaspe, de microsyénite et d'amphibolite avec une puissance métrique pour ce dernier. Elle est encerclée par des marbres et le contact entre ces deux formations est marqué par des formations syénitiques avec une structure pegmatitoïde avec de gros cristaux d'orthose.

Notons que la formation est constituée par de petits cristaux de tourmalines.



Syéénite

(a)



Pegmatite

(b)

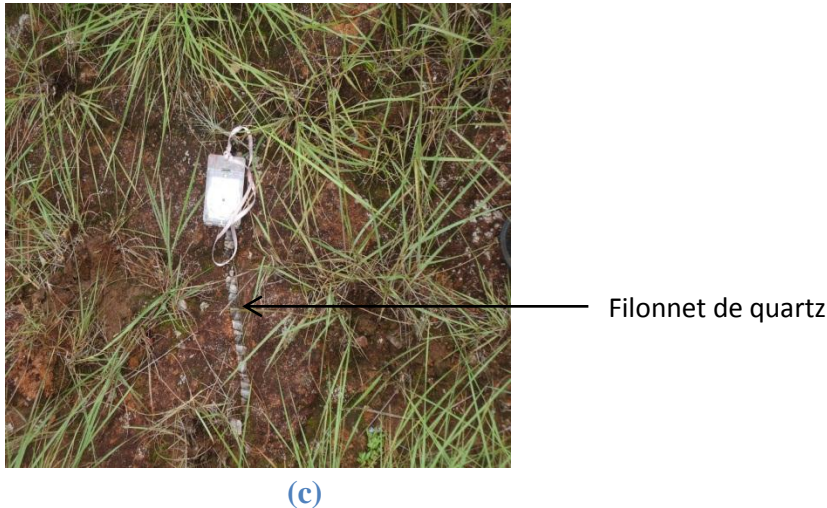


Photo 6 : formation existante (a) : syénite, (b) : pegmatite, (c) : filon de quartz

- Etude microscopique
  - Echantillon 4 : Syénite d'Andoharano



Photo 7 : syénite échantillon 4

La syénite d'Andoharano présente une texture grenue symplectitique à gros grain en conservant sa structure rapakiwitique (texture caractérisée par de grands cristaux ovales à cœur rosé d'orthose et à couronne blanchâtre d'oligoclase/Annexe 5). Cette roche en massif circonscrit est principalement constituée par un orthose fortement perthitique, roche « hypersolvus » ayant syncristallisé avec de gros cristaux anhédriques de néphéline. L'aspect « squelettique » et l'imbrication de ces deux phases correspondent à la prise d'un mélange eutectique binaire simple.

Les rares minéraux ferromagnésiens, disséminés sous l'aspect de ségrégations interstitielles, ont cristallisé à la fin du processus ; il s'agit d'agrégat d'augite aegyrienne, d'amphibole et

de biotite brun – rouge. Ce mica est le dernier à cristalliser car il englobe fréquemment le pyroxène et l'amphibole.

On n'observe pas de plagioclase libre. Cette absence est liée au fait que cette roche a une origine magmatique profonde et qu'elle a cristallisé à des températures relativement élevées (900 C) sous des conditions hypersolvus suivi d'un phénomène de métamorphisme.

Feldspath :

L'orthose constitue la phase la plus importante (40 à 50%). Elle est formée par de grands cristaux automorphes. On observe aussi le microcline (10à 20%) qui forme de grands cristaux subautomorphes.

Quartz :

Les quartz apparaissent en cristaux xénomorphes, de petites tailles (10 à 15%). Ils se trouvent dans les espaces interstitielles.

Amphiboles :

Ce sont des cristaux subautomorphes, altérées, de type hornblende verte (10 à 20%).

Mica :

Les biotites forment des cristaux subautomorphes (10 à 20%).

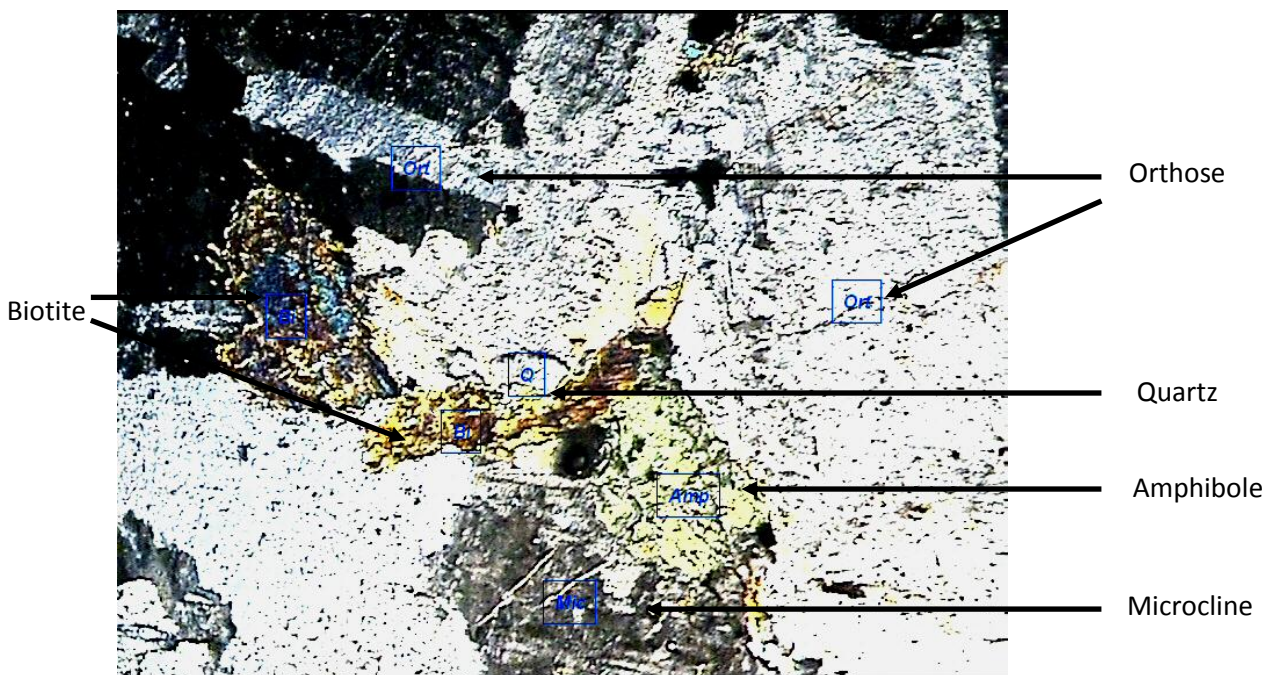


Figure 17: Syénite d'Andoharano. Echantillon 4, lumière polarisée, X 5

➤ Echantillon 24 : Syénite d'Andoharano



Photo 8 : syénite échantillon 24



Figure 18: Syénite d'Andoharano. Echantillon 24, lumière polarisée, X 5

Feldspath :

L'orthose forme de petits cristaux subautomorphes. Mais on a aussi le microcline (10à 20%) formant de grands cristaux subautomorphes, sans oublier les divers plagioclases sous forme de petits cristaux subautomorphes et aussi les grands cristaux de perthite.



Sphène : (cf.p37)

Le sphène forme de grands cristaux automorphes, de couleur vert foncé. La présence de sphène montre le développement de phase titanée de la roche et le caractère sodique de la roche.

➤ Echantillon 12' : Microsyénite d'Andoharano



Photo 9 : microsyénite échantillon 12'

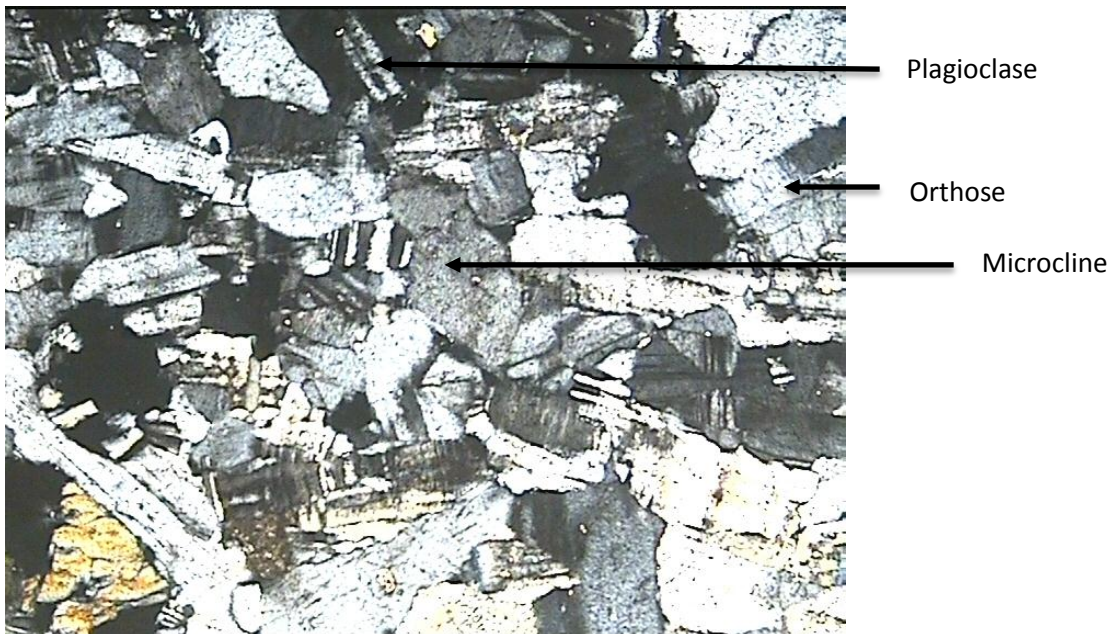


Figure 19: Microsyénite d'Andoharano. Echantillon12', lumière polarisée, X 5

Feldspath : (cf.p38)

Il y a trois types de feldspath l'orthose (10 à 20%) en petits cristaux et perthitique, le microcline (10 à 20%) et du plagioclase (15 à 30%).

Mica : (cf.p38)

Les biotites forment des cristaux subautomorphes (5 à 10%).

### III-2-2-Marbre

Cette formation encastre la formation syénitique. Elle est une formation à structure microgrenue avec une couleur blanche. Au niveau de la végétation on constate les *Aloe* qui sont des plantes ne poussant qu'en milieu à calcaire.



Photo 10 : Marbre avec *Aloe capitata*

### III-2-3-Amphibolite

L'amphibolite forme un filon métrique au niveau de la formation syénitique. Les roches sont de teinte sombre avec des feldspaths blancs sur un fond amphibolotique noir. Elles sont compactes, dures lorsqu'elles sont fraîches avec des grains fins.

- Etude microscopique



Photo 11 : Filon d'Amphibolite

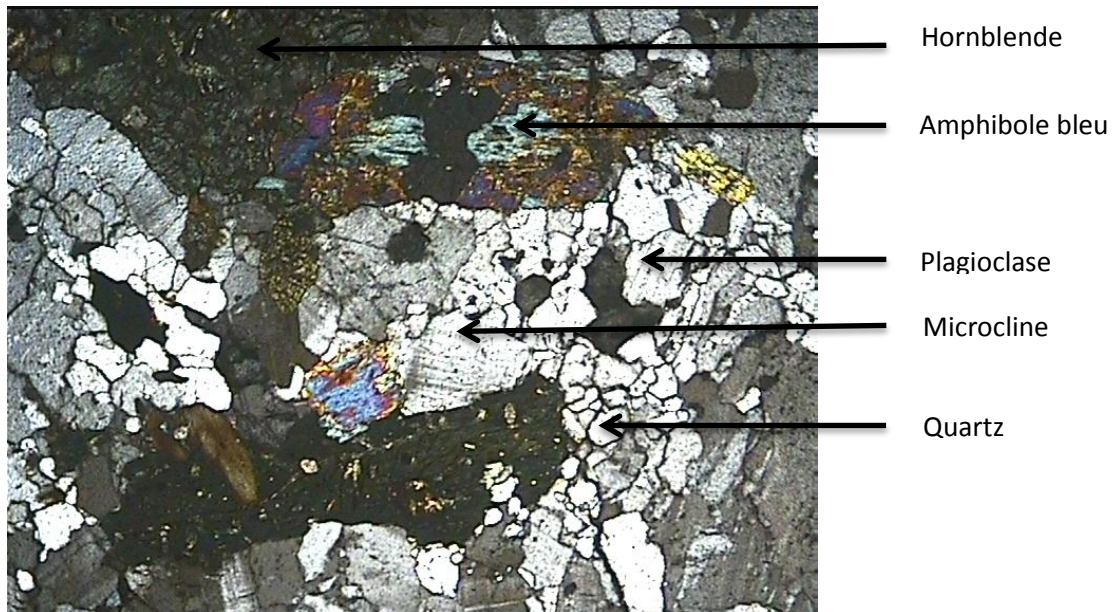


Figure 20: Amphibolite, échantillon 25, lumière polarisée, X 5

Quartz :

Les quartz apparaissent en cristaux xénomorphes, de petites tailles (10 à 15%).

Feldspath : (cf.p40)

Il y a deux types de feldspaths le microcline en petits cristaux (2 à 5%) et les plagioclases qui sont aussi sous forme de petits cristaux (2 à 5%).

Amphibole : (cf.p40)

L'amphibole qui est la hornblende constitue la phase la plus importante (40 à 50%). Ils forment de grands cristaux automorphes. Mais on a aussi des amphiboles bleues montrant l'excès de sodium (Na) par rapport à l'aluminium (Al) donc le magma a un caractère peralcalin.

**Conclusion partielle sur la pétrographie**

L'étude pétrographique des formations géologiques présente dans la zone d'étude nous a permis de voir divers points essentiels :

- La zone est métamorphisée sous le faciès Schistes Verts à Amphibolites prouvé par l'abondance des minéraux d'amphibole (hornblende), plagioclase, mica. On a à faire à un métamorphisme prograde.
- Plusieurs filons de pegmatites concordantes et discordantes sont visibles dans les formations existantes.
- L'abondance des minéraux silico-alumineux favorise la possibilité de minéralisation de terres rares.

### III-3-GISEMENT D'AMBATOFINANDRAHANA

Pour Madagascar, en parlant de gisement de terres rares on peut considérer ceux de la région d'Ambatofinandrahana. Mais ici l'étude se concentrera surtout sur le gîte d'Andoharano.

#### III-3-1-Typologies des gisements de Bastnaésite

Quatre modes de gisement de bastnaésite (Rasoamalala, 2000) dont les caractéristiques morphologiques, tectoniques et structurales variant d'un gîte à l'autre ont été définis dans la région d'Ambatofinandrahana :

- Les filons de microsyénite plus ou moins silicifiés à bastnaésite comme dans le cas du gîte du Nord Ifasina. Ces filons sont encaissés dans des environnements granitiques ou orthogneissique ;
- Les filons jaspifiés de microsyénite à bastnaésite comme le gîte d'Ankazohambo. Ils sont encaissés dans des marbres ;
- La bastnaésite disséminée dans le quartz de placage aux épontes de granite (cas du granite d'Antomia) (Fournié, 1968), et la bastnaésite disséminée dans le quartz de remplissage des fractures des filons de granite encaissés dans les schistes (cas d'Andakatany) ;
- Les nappes d'écoulement colluviaux et éluviaux (cas d'Ankazohambo et d'Ankadintany)

#### III-3-2-Typologies des gisements de Monazite

La monazite est le minerai des terres rares le plus répandu. Il existe trois modes de gisement de monazite:

- la monazite en dissémination dans le marbre encaissant. Ce type est en relation avec les filons de syénite très altérée comme Ambatolahifotsy,
- le filon jaspifié à monazite recoupant la syénite elle-même encaissée dans le marbre dolomitique (cas d'Andoharano),
- la monazite alluvionnaire

#### III-3-3-Cas du gîte de monazite d'Andoharano

Situé à 7Km au NE de la ville d'Ambatofinandrahana sur la route d'Ankazohambo, le gîte d'Andoharano est localisé dans un massif syénitique affleurant sous forme d'un massif circonscrit homogène (figure 22), encaissé dans un marbre. Des failles qui sont généralement de direction NW - SE et de direction NE – SW qui caractérisent une structure de Riedel représente le contact des syénites avec ses encaissantes (Rasoamalala, 2009). Cette structure permet de constater que les syénites sont mises en place dans un contexte de cisaillement senestre. Il est recoupé par un filon vertical de calcédoine à monazite et barytine de 200 m de long environ, et de direction N 90. Les filons ont une puissance maximale de deux mètres. Leurs textures sont rubanées soulignée par une alternance de bancs bruns de jaspe et blanc de

barytine. Il faut noter que ce filon a subi un cisaillement dextre et forme des fentes de tension à remplissage de carbonate et la monazite se trouve dans les plans de cisaillements.

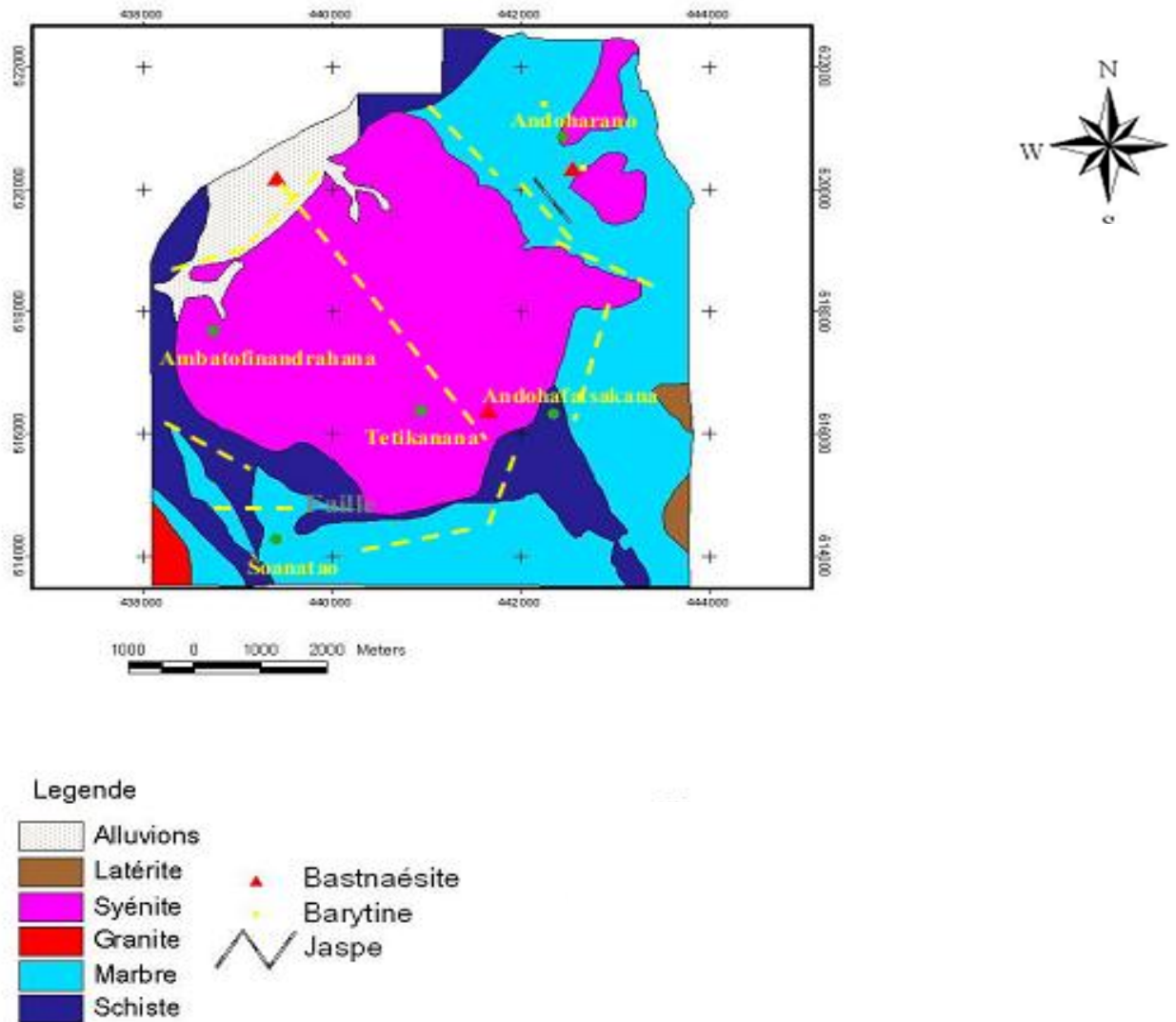


Figure 21: Carte détaillée du gîte d'Andoharano (Rasoamalala, 2009)

Il a été dit que la formation syénitique est encaissée dans un marbre (figure 21). Le contact entre ces deux formations est marqué par des formations syénitiques avec de gros cristaux d'orthose et un développement de l'albite. Cette formation syénitique est recoupée par un filon d'amphibolite avec une puissance d'environ 1m20 accompagné de jaspe rouge. Mais aussi un filon de microsyénite (photo 4) de direction NW-SE.

Notons que cette formation syénitique est caractérisée par une propriété à la fois très alcaline et potassique.

Les formations sont constituées par des fractures de direction général N-S (photo 13).

La zone d'Andoharano est constituée par deux gîtes de monazite qui ne sont pas loin l'un de l'autre. On a constaté deux indices de terres rares qui sont la Lanthane et le Cérium (figure 23).

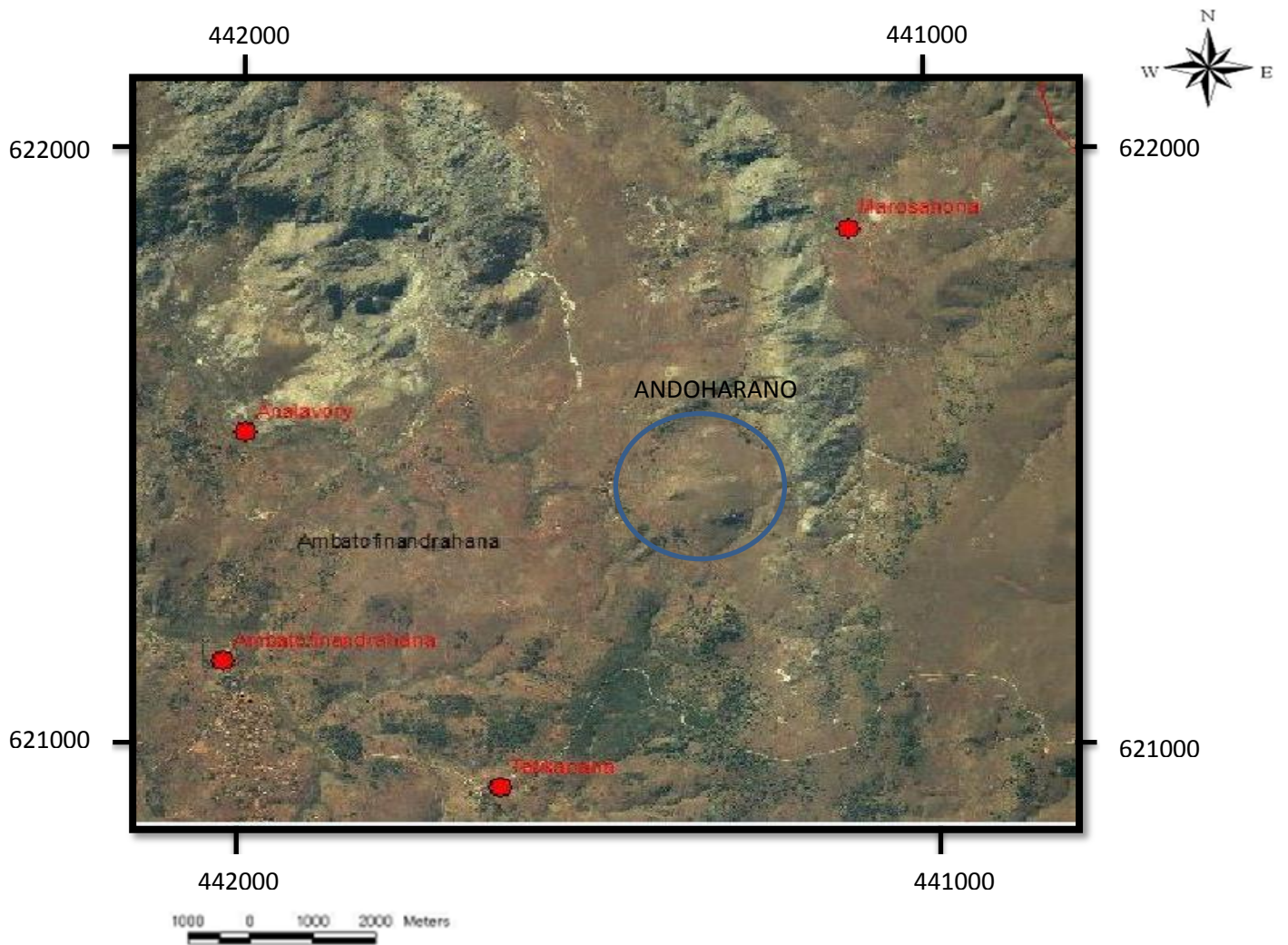


Figure 22 : La zone d'étude Andoharano



Photo 12 : Filon de microsyénite dans de la syénite



Photo 13 : Les fractures subites par les formations syénitiques

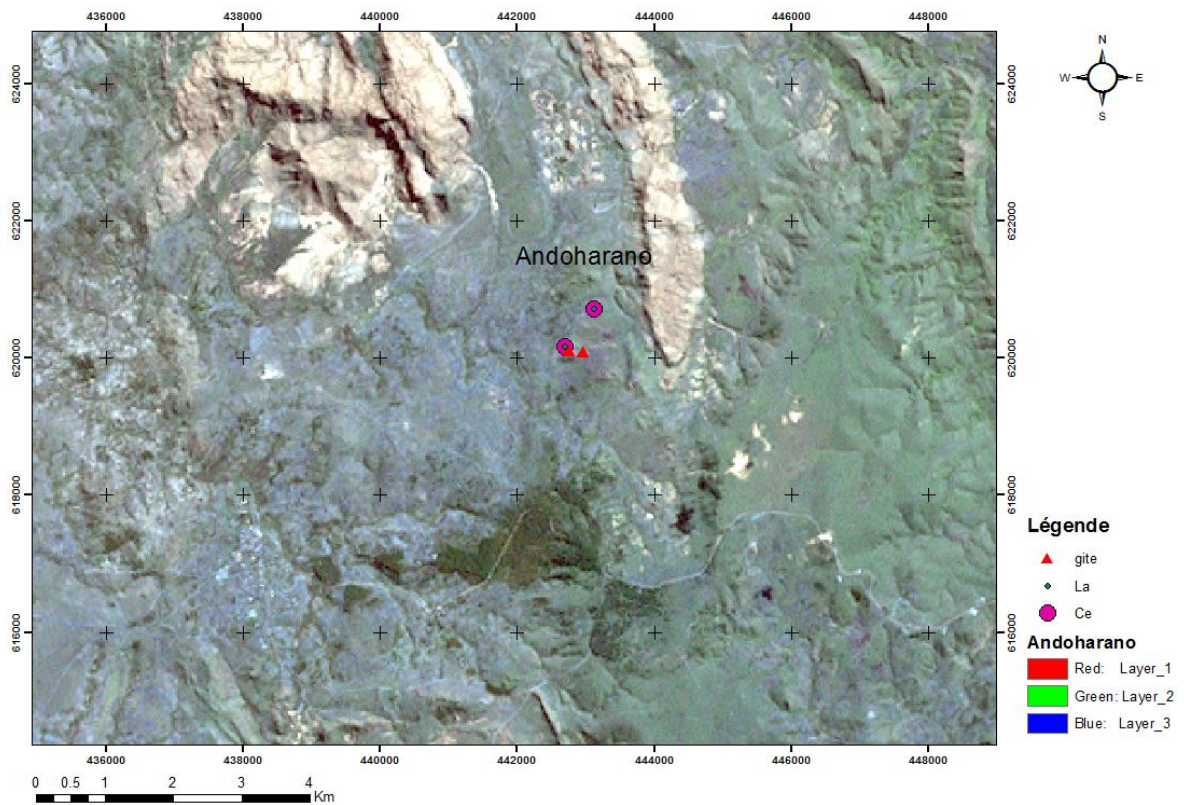
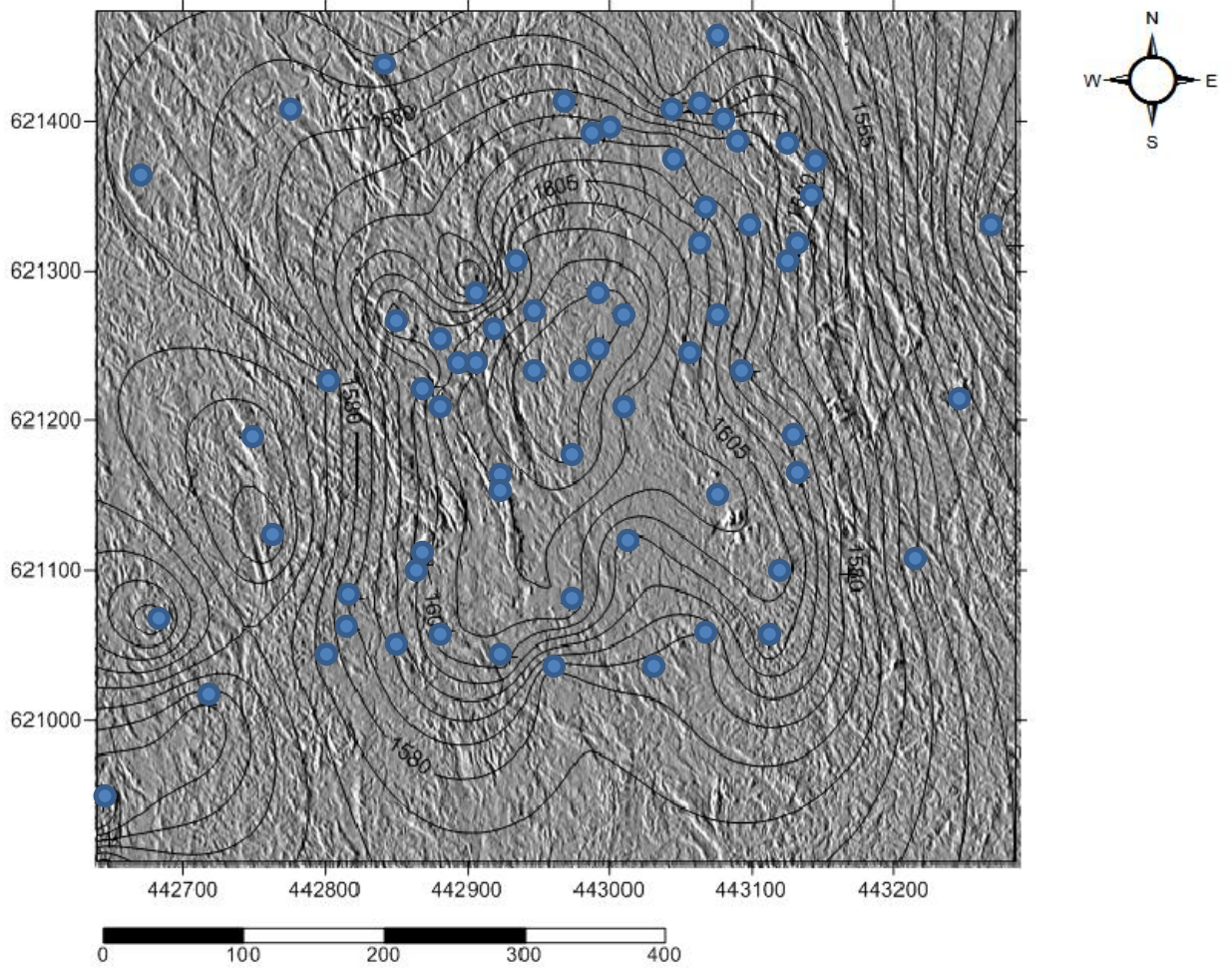


Figure 23: Image landsat montrant le gîte d'Andoharano et les indices de La et Ce





● : point d'échantillonnage

Figure 24: Carte d'Andoharano avec élévation et point d'échantillonnage

CHAPITRE IV

GEOCHIMIE DES TERRES RARES

Ce chapitre porte sur l'analyse des différents résultats obtenus par les méthodes décrites ci-dessus. Dans cette étude nous allons exploiter de données d'analyse chimique de RASOAMALALA (2009), JACQUES (1984) et MOINE (1971).

#### IV-1-CARACTERES CHIMIQUES DES DIFFERENTES FORMATIONS GEOLOGIQUES

La spécificité d'une formation géologique est basée sur les caractéristiques chimiques des éléments qui le constituent et le différencie des autres.

##### IV-1-1-Les éléments majeurs

Les éléments majeurs constituent les 95% des matériaux de l'écorce terrestre.

##### IV-1-1-1-Projections sur le diagramme de Harker

Les éléments majeurs ont été projeté sur un diagramme appelé diagramme de Harker (figure 25-32). Les projections sur le diagramme de Harker (Harker, 1932) seront utilisées pour essayer d'apporter plus de détails sur les caractères du magma. Ces diagrammes sont ceux des pourcentages pondéraux (proportion de chaque composant dans un mélange) des principaux oxydes des éléments majeurs en fonction des teneurs en silice ( $\text{SiO}_2$ ) des roches totales. La silice est utilisée comme indice de différenciation des roches.

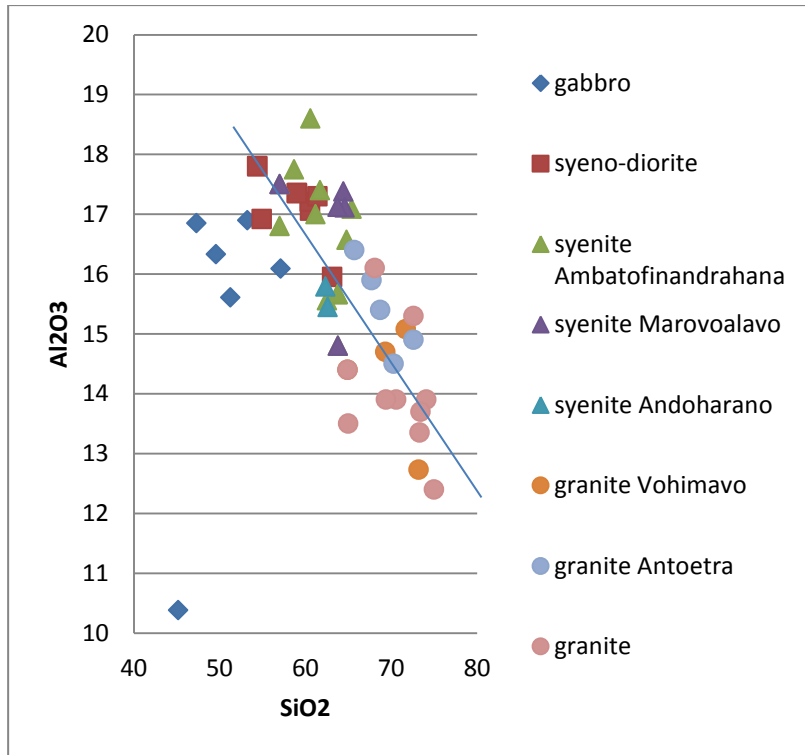


Figure 25 : projection d' $Al_2O_3$  sur le diagramme de Harker

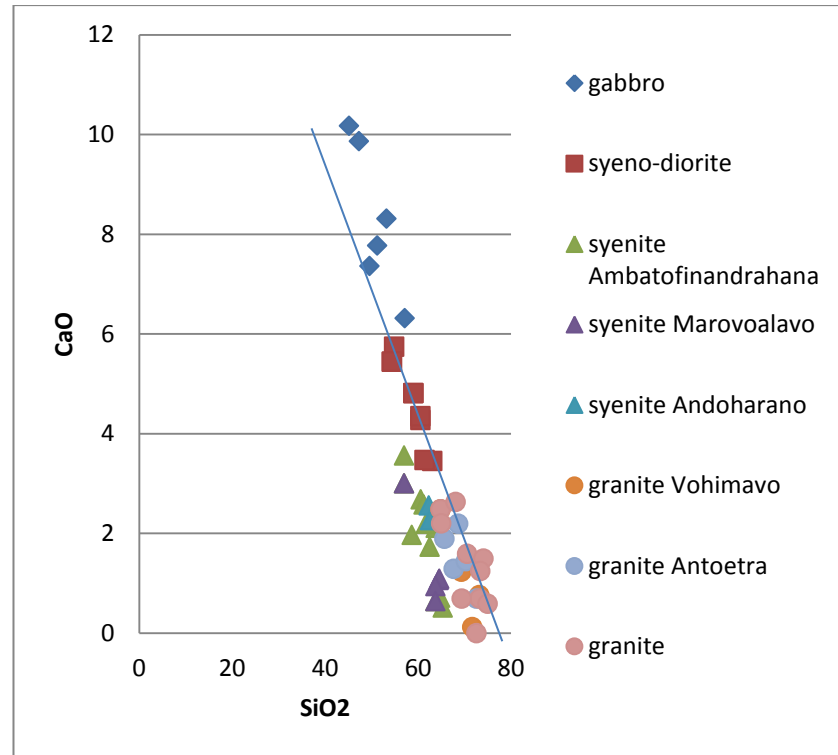


Figure 26 : projection de  $CaO$  sur le diagramme de Harker

Le teneur en  $Al_2O_3$  et  $CaO$  diminue au fur et à mesure que le liquide magmatique évolue. Mais aussi qu'il y a une évolution des gabbros en granite.

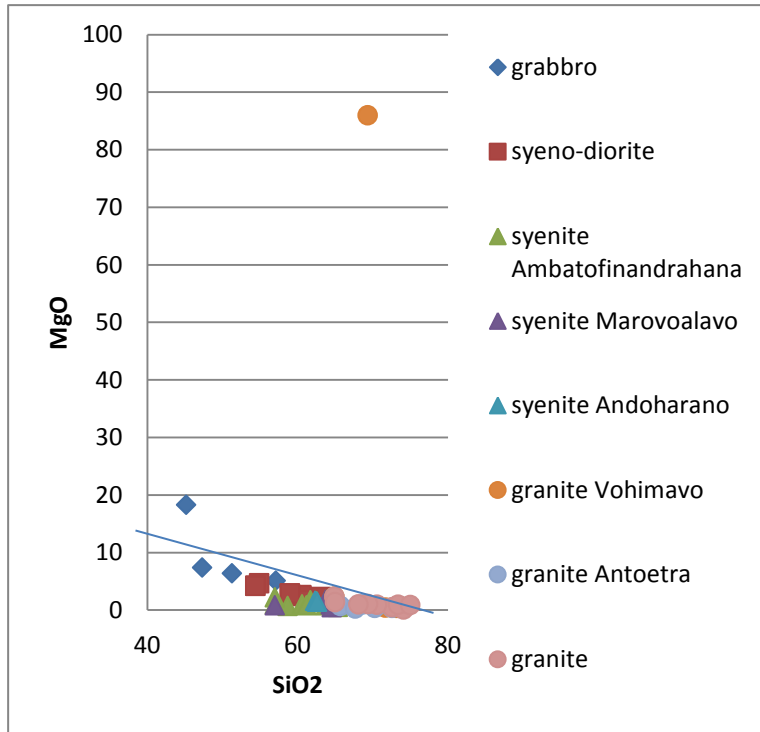


Figure 27 : projection de MgO sur le diagramme de Harker

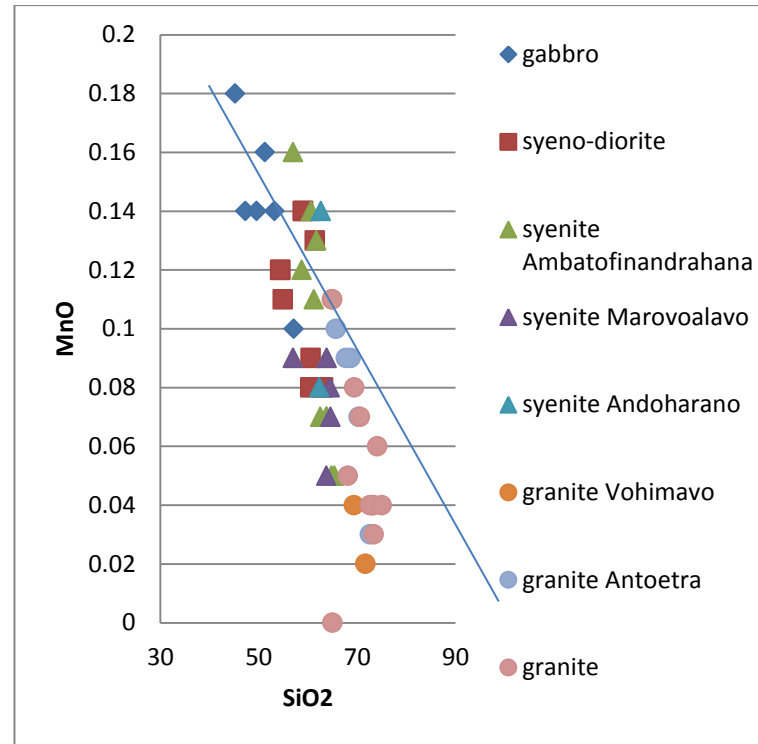


Figure 28 : projection de MnO sur le diagramme de Harker

La teneur en MgO et MnO diminue au fur et à mesure que le liquide magmatique évolue. Et les gabbros évoluent normalement en granite.

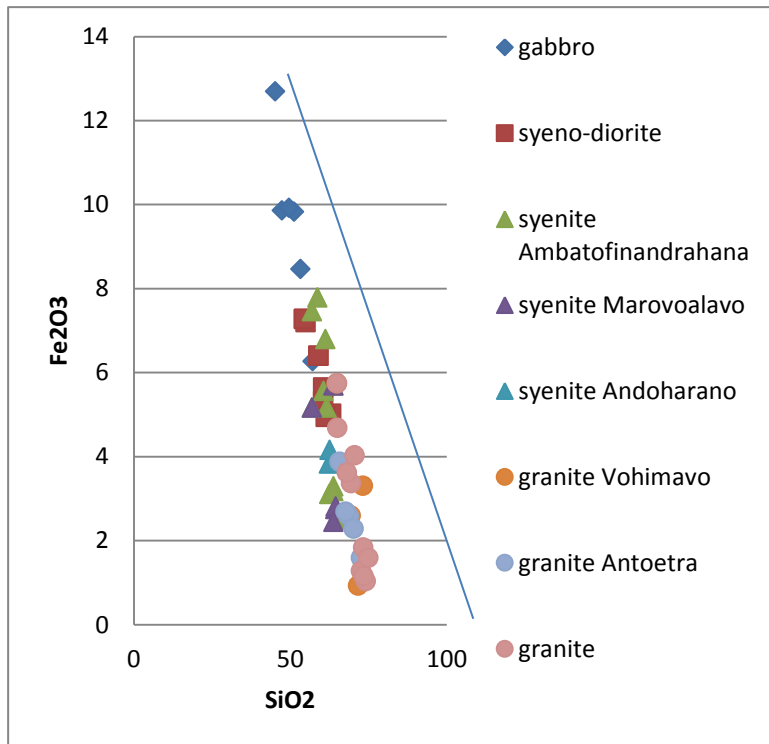


Figure 29: projection de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sur le diagramme de Harker

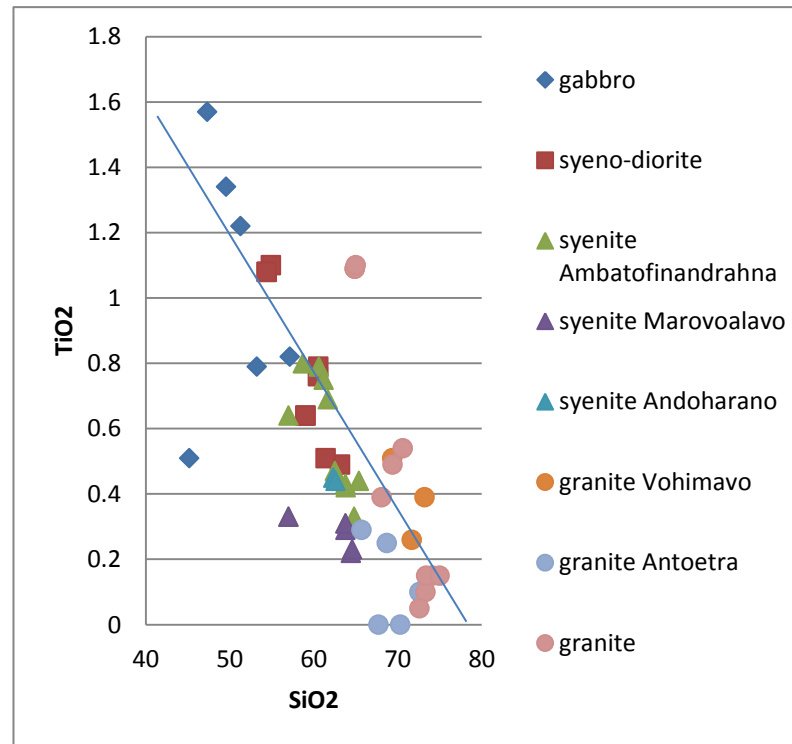


Figure 30 : projection de TiO<sub>2</sub> sur le diagramme de Harker

La teneur en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> diminue au fur et à mesure que le liquide magmatique évolue. Et une évolution des gabbros en granite est constatée.

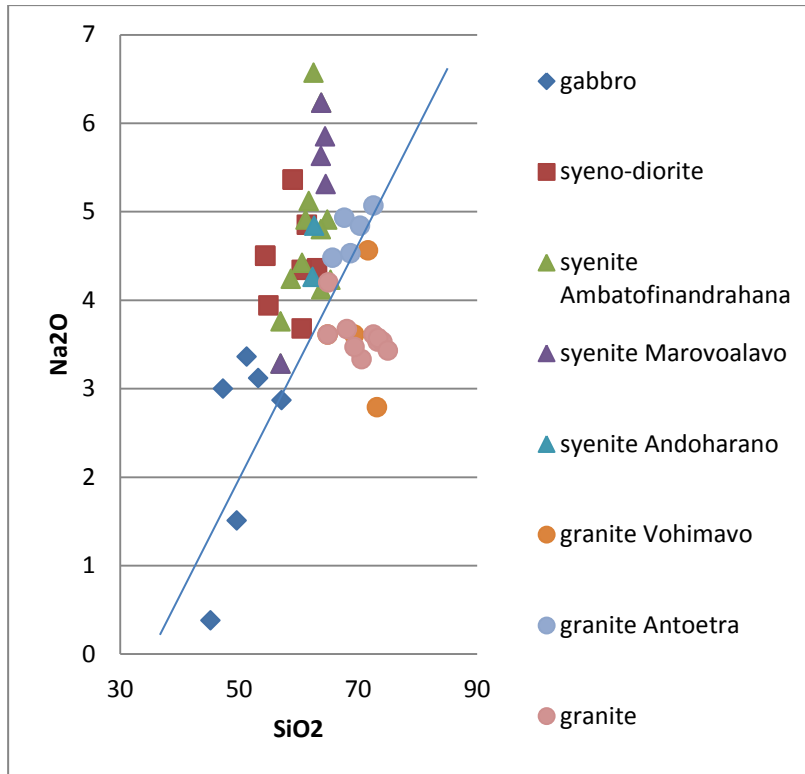


Figure 31 : projection de Na<sub>2</sub>O sur le diagramme de Harker

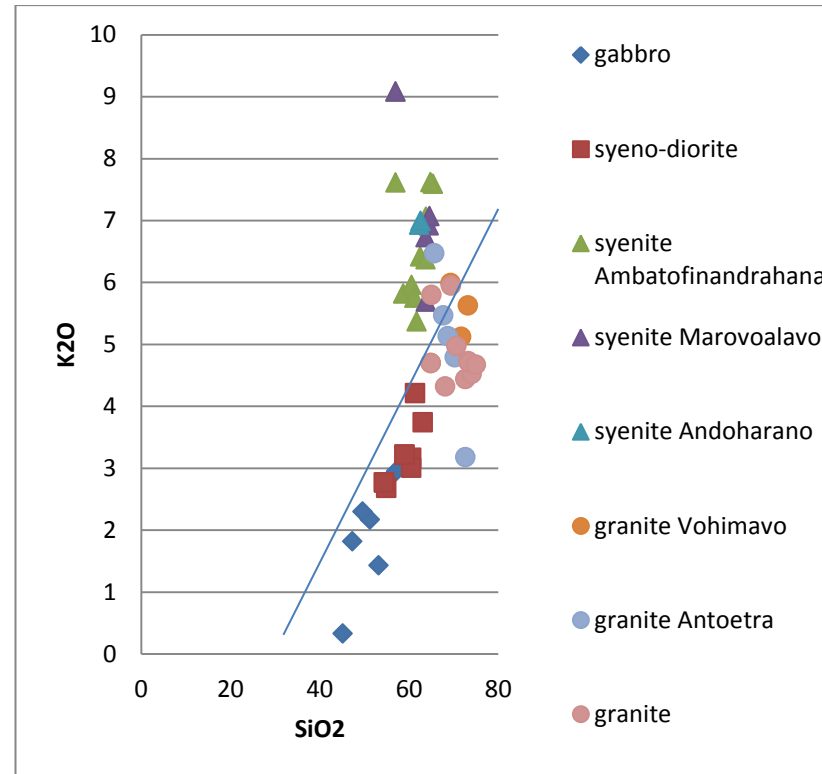


Figure 32 : projection de K<sub>2</sub>O sur le diagramme de Harker

La teneur en Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O augmente au fur et à mesure de la différenciation magmatique.

**Tableau 3 : Résumé des formations existant dans la région d'Ambatofinandrahana avec leurs caractéristiques**

nom de la roche	Echantillon	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
gabbro	N1	51.26	15.61	7.77	9.83	2.17	6.38	0.16	3.36	1.22
gabbro	N2	47.3	16.85	9.86	9.86	1.82	7.39	0.14	3	1.57
gabbro	N3	57.13	16.09	6.31	6.27	2.95	5.1	0.1	2.87	0.82
gabbro	N4	45.17	10.38	10.17	12.7	0.33	18.28	0.18	0.38	0.51
gabbro	N5	49.58	16.33	7.36	9.92	2.3	7.32	0.14	1.51	1.34
gabbro	N6	53.22	16.9	8.31	8.47	1.43	5.54	0.14	3.12	0.79
syeno-diorite	N7	63.12	15.95	3.45	5.02	3.74	2.28	0.08	4.36	0.49
syeno-diorite	N8	54.91	16.92	5.74	7.2	2.68	4.66	0.11	3.94	1.1
syeno-diorite	N9	60.54	17.06	4.27	5.65	3.17	2.46	0.09	4.34	0.79
syeno-diorite	N10	60.52	17.21	4.35	5.32	3.01	2.63	0.08	3.68	0.76
syeno-diorite	N11	54.4	17.8	5.44	7.28	2.77	4.2	0.12	4.5	1.08
syeno-diorite	N12	59	17.35	4.81	6.4	3.22	2.87	0.14	5.36	0.64
syenite ambato	N13	63.81	15.66	2.11	3.29	7.06	1.61	0.07	4.12	0.42
syenite ambato	N14	65.38	17.09	0.51	2.61	7.59	0.54	0.05	4.23	0.44
syenite ambato	N15	64.81	16.57	0.71	2.51	7.62	1.01	0.05	4.91	0.33
syenite ambato	N16	62.51	15.56	1.73	3.11	6.42	1.56	0.07	6.57	0.47
syenite ambato	N17	63.77	15.66	2.28	3.18	6.37	0.84	0.07	4.8	0.43
syenite maro	N18	57	17.5	3	5.17	9.08	1.01	0.09	3.28	0.33
syenite maro	N19	64.44	17.38	1.06	2.75	6.92	0.81	0.08	5.85	0.22
syenite maro	N20	64.57	17.11	1.09	2.81	7.07	0.98	0.07	5.31	0.23
syenite maro	N21	63.77	17.12	0.94	2.45	6.73	0.49	0.05	5.63	0.29
syenite maro	N22	63.8	14.8	0.64	5.69	5.69	1.75	0.09	6.23	0.31
syenite ando	N23	62.34	15.79	2.56	3.83	6.93	1.61	0.08	4.26	0.45
syenite ando	N24	62.61	15.45	2.26	4.16	6.99	1.45	0.14	4.84	0.44
granite vohi	N25	73.19	12.73	0.76	3.31	5.63	0.37	0.04	2.79	0.39



*Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare*

granite vohi	N27	69.33	14.7	1.23	5.75	4.7	86	0.04	3.61	0.51
granite vohi	N26	64.9	14.4	2.48	2.6	5.99	2.33	0.11	3.61	1.09
granite vohi	N28	71.69	15.08	0.12	0.93	5.12	0.46	0.02	4.56	0.26
granite porphyroclaste dans micaschiste	116	73.3	13.35	0.69	1.84	4.73	0.74	0.04	3.53	0.1
granite divers en filon ou banc	131	72.6	15.3	0	1.28	4.44	0.49	0.04	3.61	0.05
granite porphyroclaste dans micaschiste	132	70.6	13.9	1.59	4.03	4.97	0.94	0.07	3.33	0.54
syenite	162	58.7	17.75	1.97	7.79	5.82	0.74	0.12	4.24	0.8
granite d'antoetra	169	72.6	14.9	0.69	1.59	3.18	0.36	0.03	5.07	0.1
granite d'antoetra	170	65.7	16.4	1.89	3.88	6.47	0.74	0.1	4.48	0.29
syenite	177	57	17.5	3	5.17	9.08	1.01	0.09	3.28	0.33
granite divers en filon ou banc	225	69.4	13.9	0.69	3.37	5.95	1.04	0.08	3.47	0.49
syenodiorite	228	61.4	17.3	3.47	4.95	4.21	1.68	0.13	4.85	0.51
syenodiorite	233	54.4	17.8	5.44	7.28	2.77	4.2	0.12	4.5	1.08
granite d'antoetra	245	68.7	15.4	2.19	2.59	5.13	0.99	0.09	4.53	0.25
syenite	246	61.7	17.4	2.19	5.17	5.37	1.74	0.13	5.12	0.69
syenite	247	63.8	14.8	0.64	5.69	5.69	1.75	0.09	6.23	0.31
syenodiorite	248	59	17.35	4.81	6.4	3.22	2.87	0.14	5.36	0.64
granite divers en filon ou banc	250	74.1	13.9	1.49	1.04	4.52	0.1	0.06	3.53	0.15
syenite	252	57	16.8	3.56	7.46	7.61	2.24	0.16	3.76	0.64
granite divers en filon ou banc	253	73.4	13.7	1.24	1.16	4.71	0.94	0.03	3.57	0.15
granite divers en filon ou banc	255	64.9	14.4	2.48	5.75	4.7	2.33	0.11	3.61	1.09
granite divers en filon ou banc	256	75	12.4	0.59	1.59	4.67	0.89	0.04	3.43	0.15
syenite	306	60.6	18.6	2.68	5.56	5.96	0.99	0.14	4.42	0.79
granite d'antoetra	307	67.7	15.9	1.29	2.69	5.47	0.27	0.09	4.93	0

*Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare*

granite d'antoetra	308	70.3	14.5	1.44	2.29	4.79	0.4	0.07	4.84	0
syenite	65	61.2	17	2.58	6.8	5.75	0.84	0.11	4.91	0.75
granite porphyroclaste dans micaschiste	79	65	13.5	2.2	4.69	5.8	1.4	0	4.2	1.1
granite porphyroclaste dans micaschiste	87	68.1	16.1	2.63	3.62	4.32	0.99	0.05	3.67	0.39

IV-1-1-2-Distribution des éléments majeurs

L'étude de la distribution des éléments majeurs permettra de voir le lieu où l'élément étudié est le plus concentré. Des cartes d'isoteneur ont été élaborées pour montrer la répartition de ces éléments.

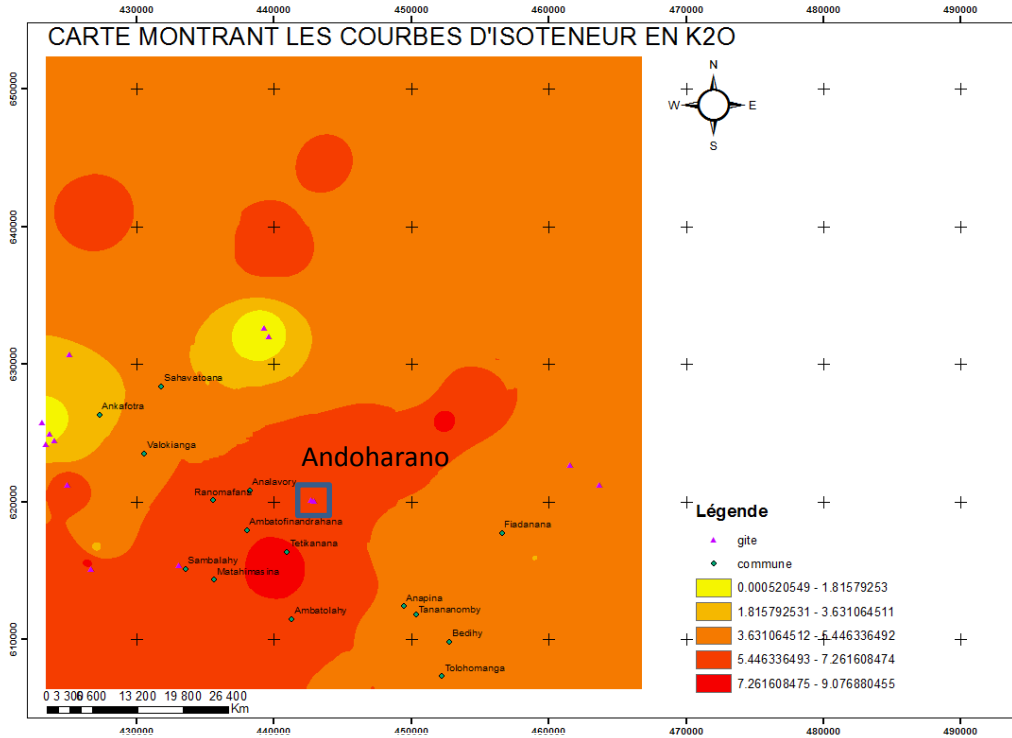


Figure 33 : carte d'isoteneur en K2O

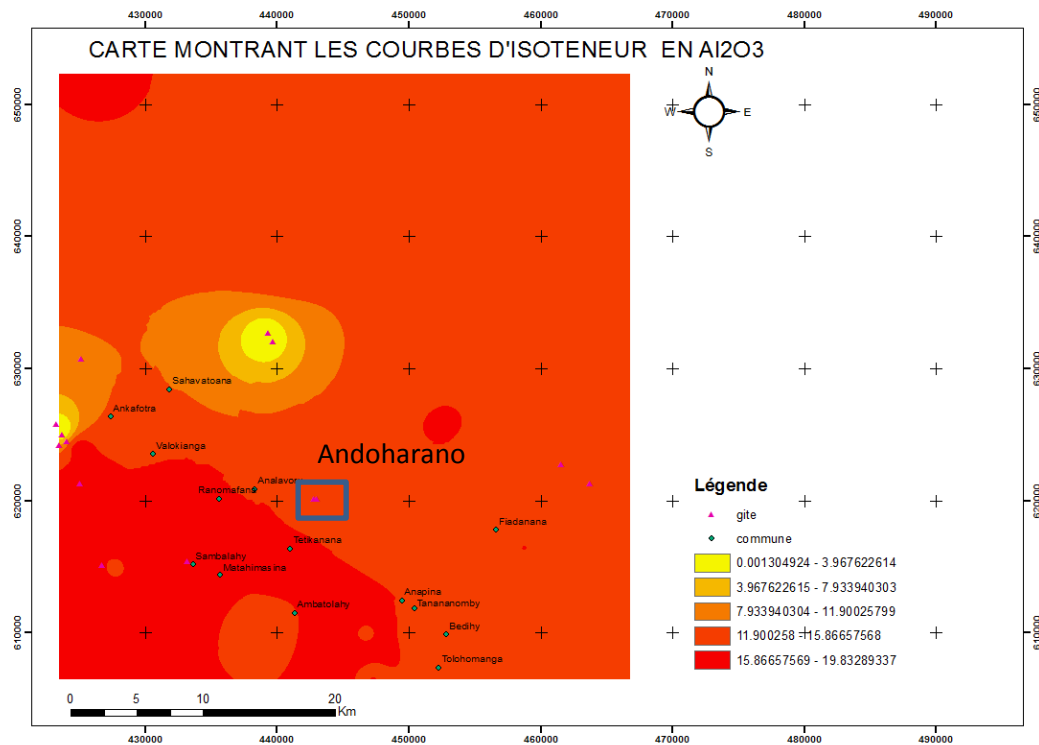


Figure 34 : carte d'isoteneur en Al2O3

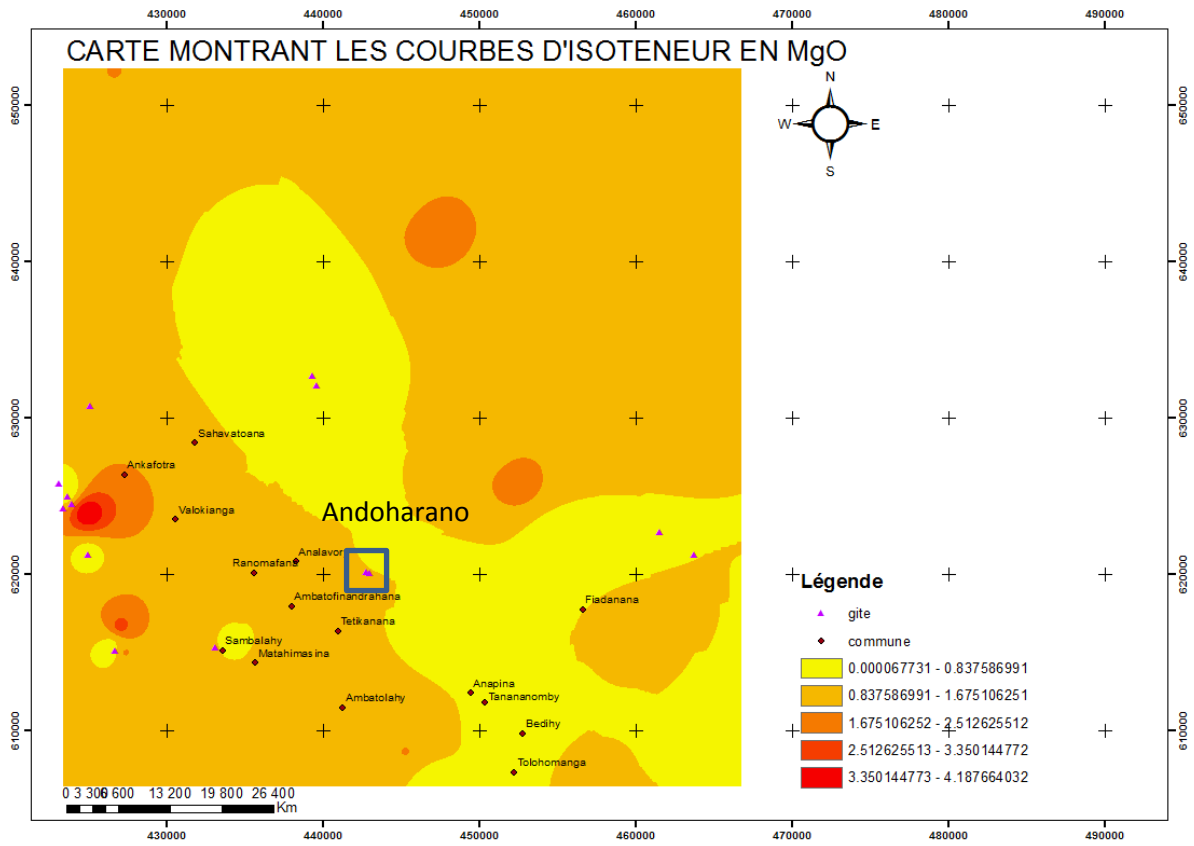


Figure 35 : carte d'isoteneur en MgO

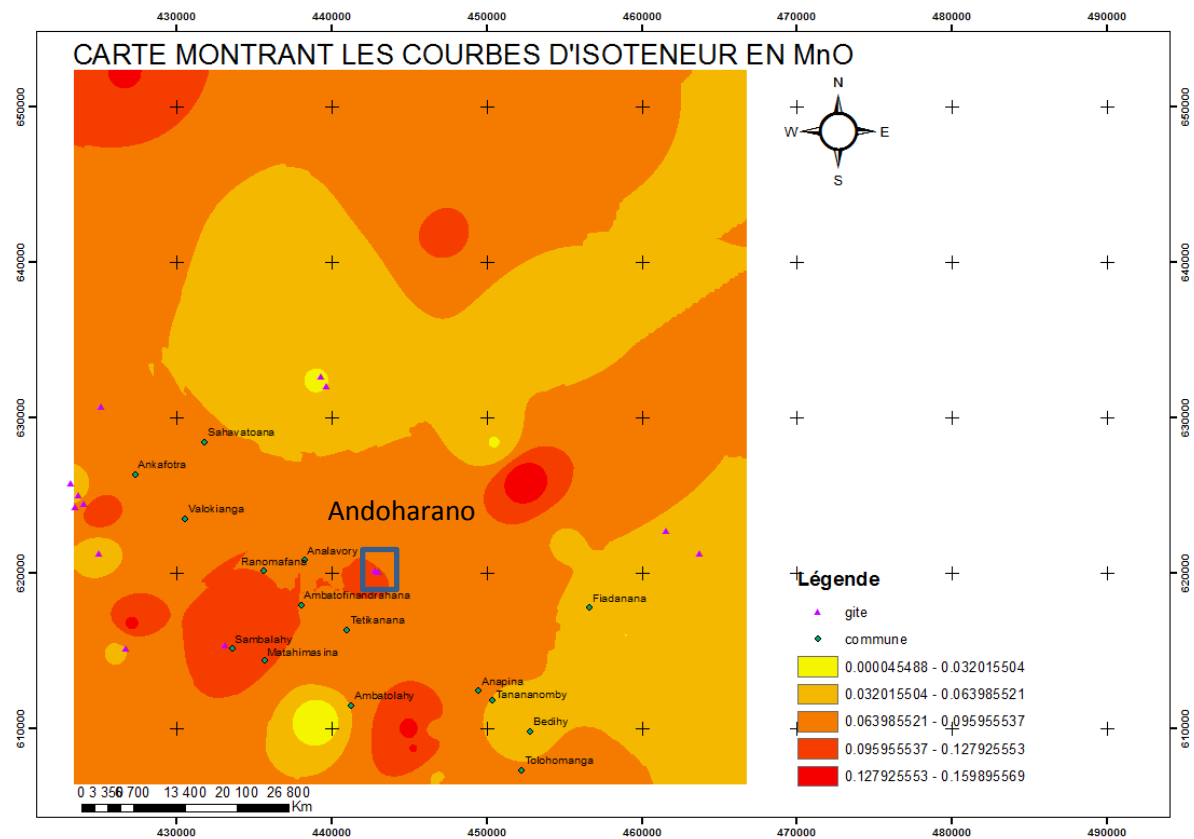


Figure 36 : carte d'isoteneur en MnO

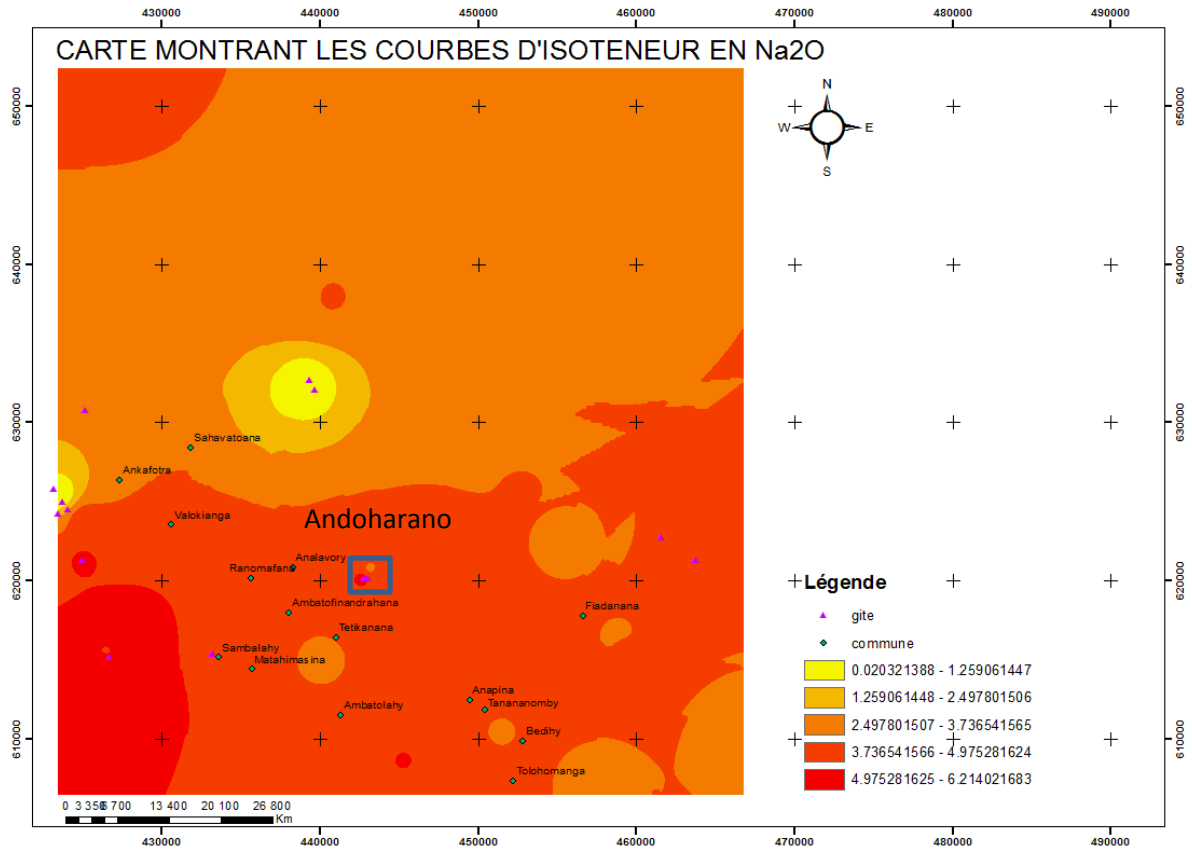


Figure 37 : carte d'isoteneur en Na<sub>2</sub>O

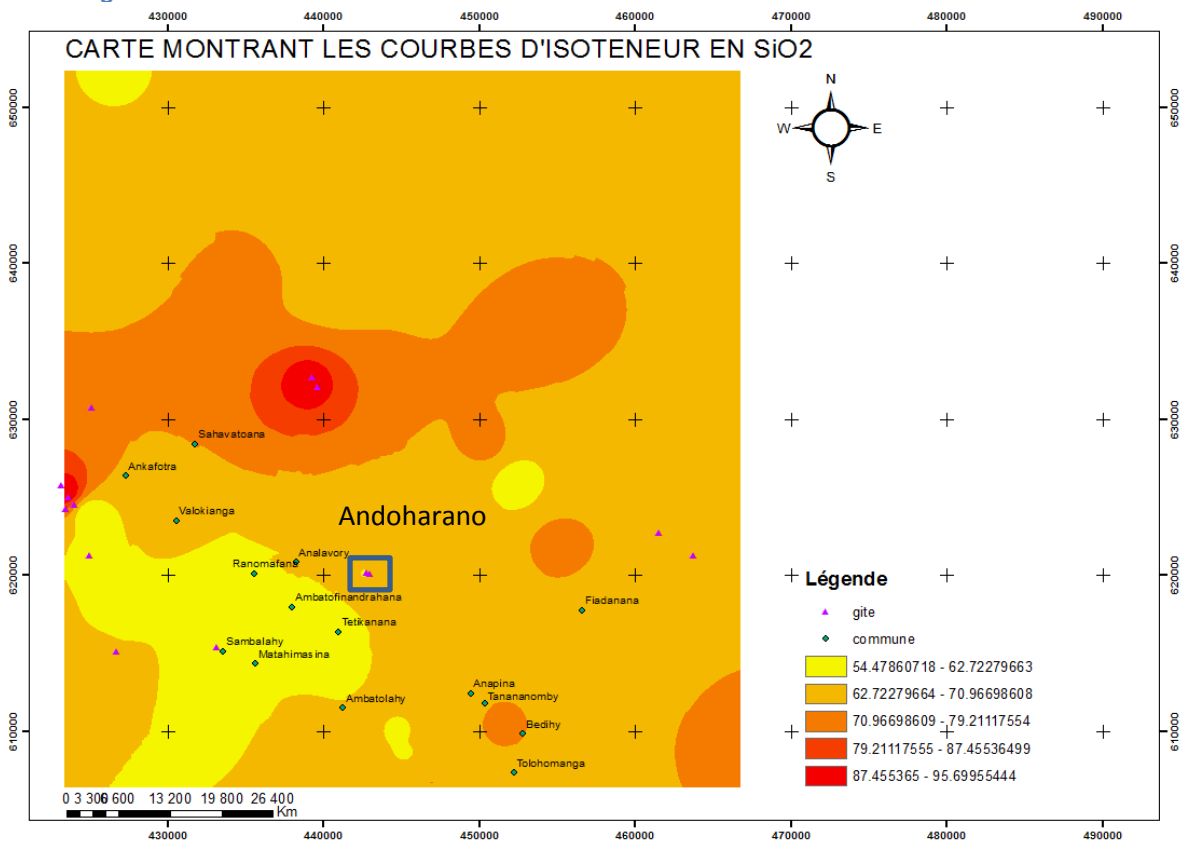


Figure 38 : carte d'isoteneur en SiO<sub>2</sub>

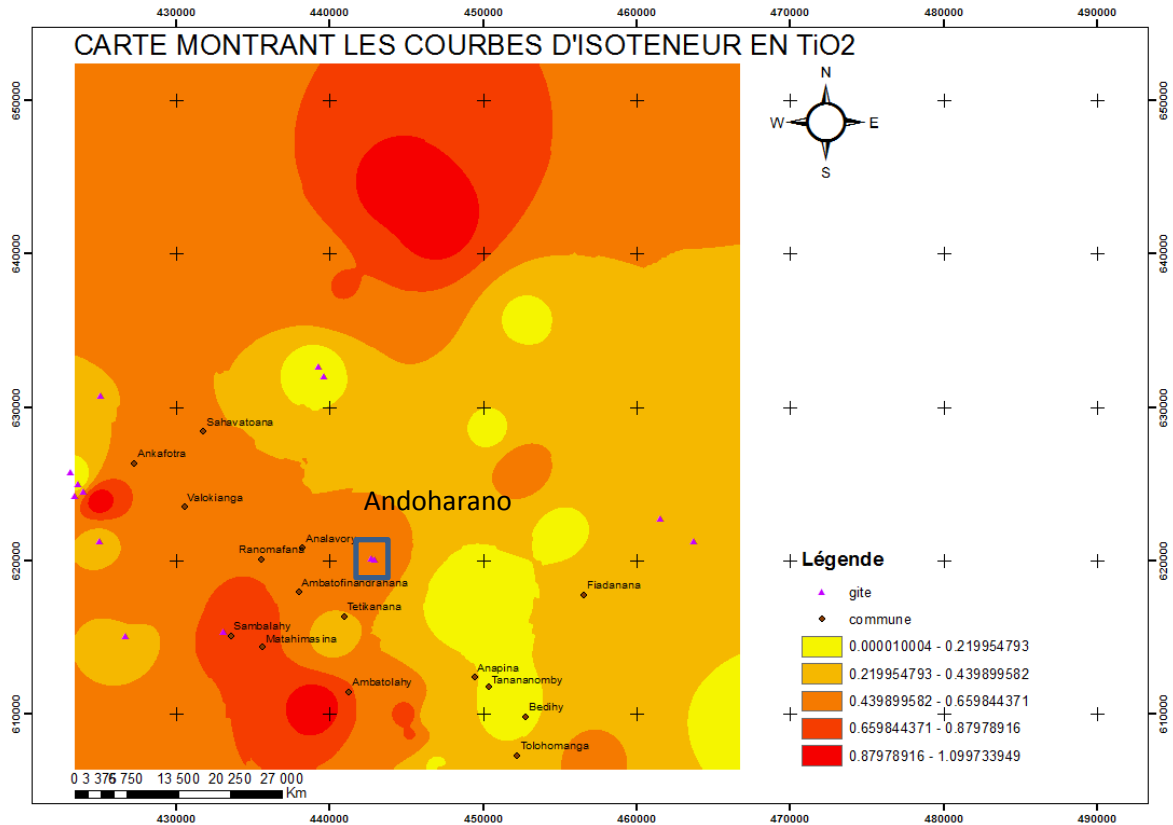


Figure 39: Carte d'isoteneur en TiO<sub>2</sub>

La zone étudiée est une zone riche en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O et MnO (figure 33 ; 34 ; 36 ; 37). L'enrichissement de la zone en ces éléments ne peut être dû que par la présence des minéraux silico-alumineux étant donné que la zone se trouve elle-même dans une zone silico-alumineuse.

L'étude de la répartition des éléments chimiques montre en général une minéralisation favorable pour des teneurs élevées en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O et MnO.

Tableau 4 : Analyse des éléments majeurs RASOAMALALA (2009), JACQUES (1984), MOINE (1971)

nom de la roche	Echantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
gabbro	N1	51.26	15.61	2.17	9.83	6.38	0.16	3.36	1.22
gabbro	N2	47.3	16.85	1.82	9.86	7.39	0.14	3	1.57
gabbro	N3	57.13	16.09	2.95	6.27	5.1	0.1	2.87	0.82
gabbro	N4	45.17	10.38	0.33	12.7	18.28	0.18	0.38	0.51
gabbro	N5	49.58	16.33	2.3	9.92	7.32	0.14	1.51	1.34
gabbro	N6	53.22	16.9	1.43	8.47	5.54	0.14	3.12	0.79
syeno-diorite	N7	63.12	15.95	3.74	5.02	2.28	0.08	4.36	0.49
syeno-diorite	N8	54.91	16.92	2.68	7.2	4.66	0.11	3.94	1.1
syeno-diorite	N9	60.54	17.06	3.17	5.65	2.46	0.09	4.34	0.79
syeno-diorite	N10	60.52	17.21	3.01	5.32	2.63	0.08	3.68	0.76
syeno-diorite	N11	54.4	17.8	2.77	7.28	4.2	0.12	4.5	1.08
syeno-diorite	N12	59	17.35	3.22	6.4	2.87	0.14	5.36	0.64
syenite ambatofinandrahana	N13	63.81	15.66	7.06	3.29	1.61	0.07	4.12	0.42
syenite ambatofinandrahana	N14	65.38	17.09	7.59	2.61	0.54	0.05	4.23	0.44
syenite ambatofinandrahana	N15	64.81	16.57	7.62	2.51	1.01	0.05	4.91	0.33
syenite ambatofinandrahana	N16	62.51	15.56	6.42	3.11	1.56	0.07	6.57	0.47
syenite ambatofinandrahana	N17	63.77	15.66	6.37	3.18	0.84	0.07	4.8	0.43
syenite marovoalavo	N18	57	17.5	9.08	5.17	1.01	0.09	3.28	0.33
syenite marovoalavo	N19	64.44	17.38	6.92	2.75	0.81	0.08	5.85	0.22
syenite marovoalavo	N20	64.57	17.11	7.07	2.81	0.98	0.07	5.31	0.23
syenite marovoalavo	N21	63.77	17.12	6.73	2.45	0.49	0.05	5.63	0.29
syenite marovoalavo	N22	63.8	14.8	5.69	5.69	1.75	0.09	6.23	0.31
syenite andoharano	N23	62.34	15.79	6.93	3.83	1.61	0.08	4.26	0.45
syenite andoharano	N24	62.61	15.45	6.99	4.16	1.45	0.14	4.84	0.44
granite vohimavo	N25	73.19	12.73	5.63	3.31	0.37	0.04	2.79	0.39
granite vohimavo	N27	69.33	14.7	4.7	5.75	86	0.04	3.61	0.51

*Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare*

granite vohimavo	N26	64.9	14.4	5.99	2.6	2.33	0.11	3.61	1.09
granite vohimavo	N28	71.69	15.08	5.12	0.93	0.46	0.02	4.56	0.26
granite porphyroclaste dans micaschiste	116	73.3	13.35	4.73	1.84	0.74	0.04	3.53	0.1
granite divers en filon ou banc	131	72.6	15.3	4.44	1.28	0.49	0.04	3.61	0.05
granite porphyroclaste dans micaschiste	132	70.6	13.9	4.97	4.03	0.94	0.07	3.33	0.54
Syenite	162	58.7	17.75	5.82	7.79	0.74	0.12	4.24	0.8
granite d'antoetra	169	72.6	14.9	3.18	1.59	0.36	0.03	5.07	0.1
granite d'antoetra	170	65.7	16.4	6.47	3.88	0.74	0.1	4.48	0.29
Syenite	177	57	17.5	9.08	5.17	1.01	0.09	3.28	0.33
granite divers en filon ou banc	225	69.4	13.9	5.95	3.37	1.04	0.08	3.47	0.49
Syenodiorite	228	61.4	17.3	4.21	4.95	1.68	0.13	4.85	0.51
Syenodiorite	233	54.4	17.8	2.77	7.28	4.2	0.12	4.5	1.08
granite d'antoetra	245	68.7	15.4	5.13	2.59	0.99	0.09	4.53	0.25
Syenite	246	61.7	17.4	5.37	5.17	1.74	0.13	5.12	0.69
Syenite	247	63.8	14.8	5.69	5.69	1.75	0.09	6.23	0.31
Syenodiorite	248	59	17.35	3.22	6.4	2.87	0.14	5.36	0.64
granite divers en filon ou banc	250	74.1	13.9	4.52	1.04	0.1	0.06	3.53	0.15
Syenite	252	57	16.8	7.61	7.46	2.24	0.16	3.76	0.64
granite divers en filon ou banc	253	73.4	13.7	4.71	1.16	0.94	0.03	3.57	0.15
granite divers en filon ou banc	255	64.9	14.4	4.7	5.75	2.33	0.11	3.61	1.09
granite divers en filon ou banc	256	75	12.4	4.67	1.59	0.89	0.04	3.43	0.15
Syenite	306	60.6	18.6	5.96	5.56	0.99	0.14	4.42	0.79
granite d'antoetra	307	67.7	15.9	5.47	2.69	0.27	0.09	4.93	0
granite d'antoetra	308	70.3	14.5	4.79	2.29	0.4	0.07	4.84	0
Syenite	65	61.2	17	5.75	6.8	0.84	0.11	4.91	0.75



*Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare*

granite porphyroclaste dans micaschiste	79	65	13.5	5.8	4.69	1.4	0	4.2	1.1
granite porphyroclaste dans micaschiste	87	68.1	16.1	4.32	3.62	0.99	0.05	3.67	0.39

IV-1-2-Les terres rares

L'étude des éléments en trace et les terres rares permet de caractériser les sources des magmas.

➤ Distribution des terres rares

L'étude de la distribution des terres rares sera nécessaire pour pouvoir déterminer le lieu de concentration de la minéralisation en terres rares. Les cartes d'isoteneur ci-dessous montrent cette distribution.

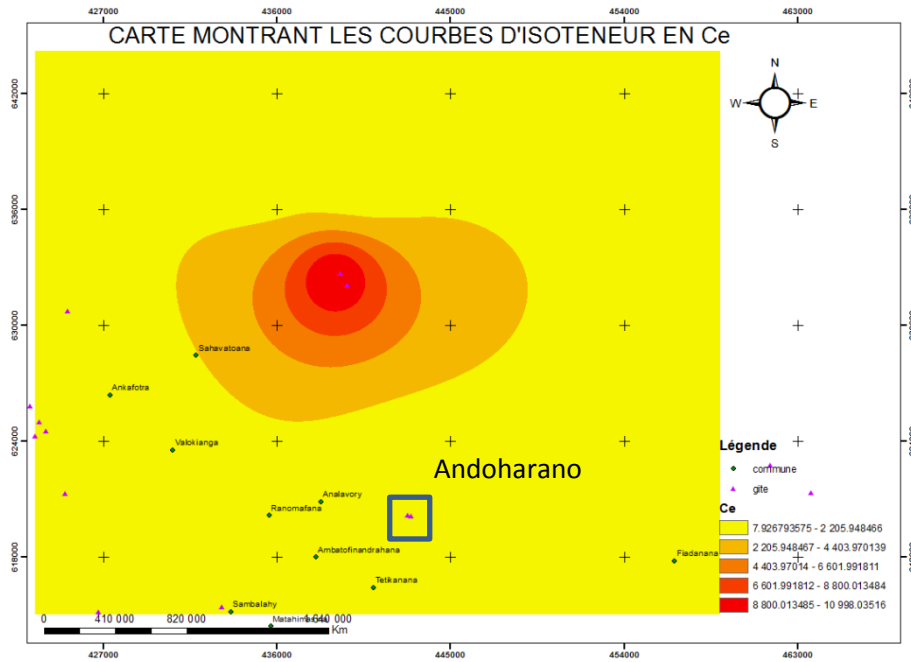


Figure 40 : carte d'isoteneur en Ce

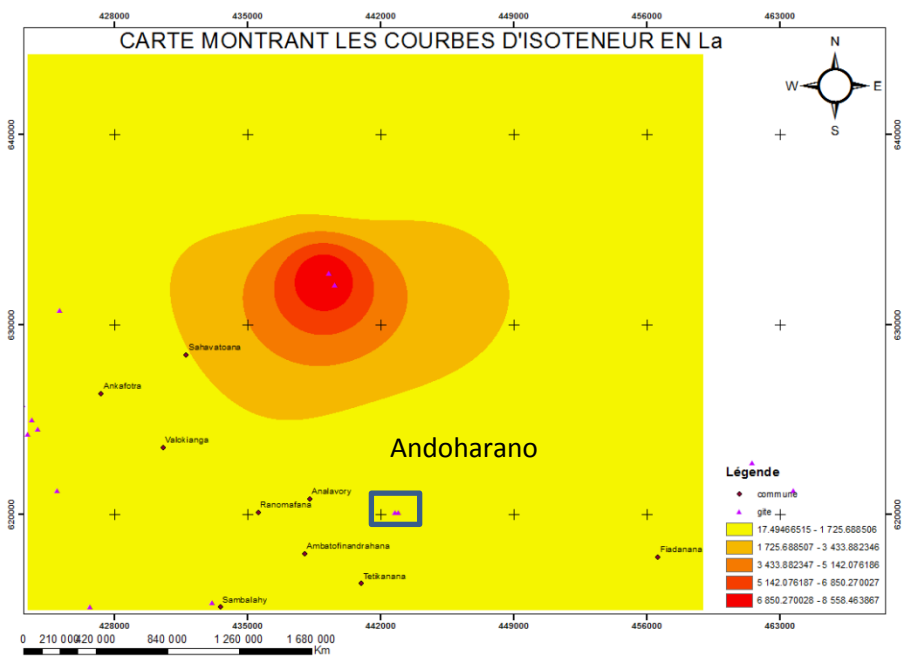


Figure 41 : carte d'isoteneur en La

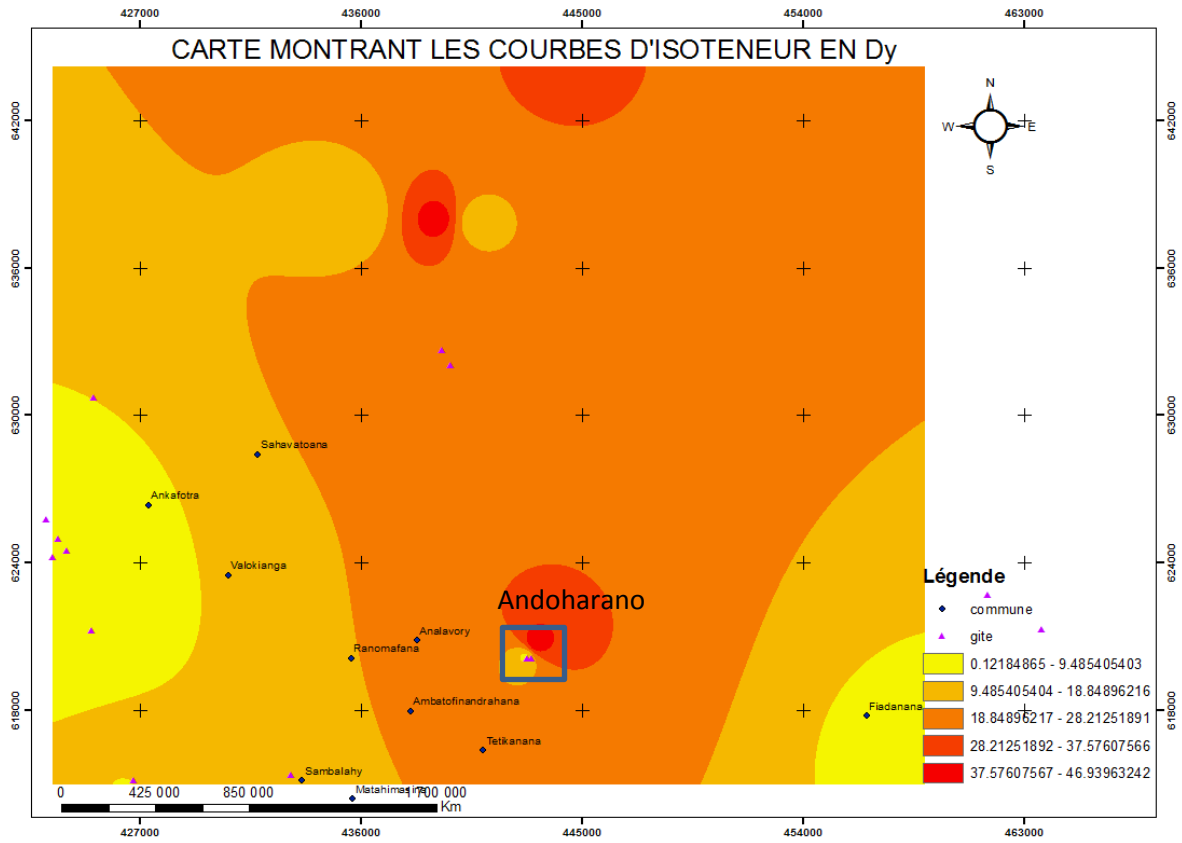


Figure 42 : carte d'isoteneur en Dy

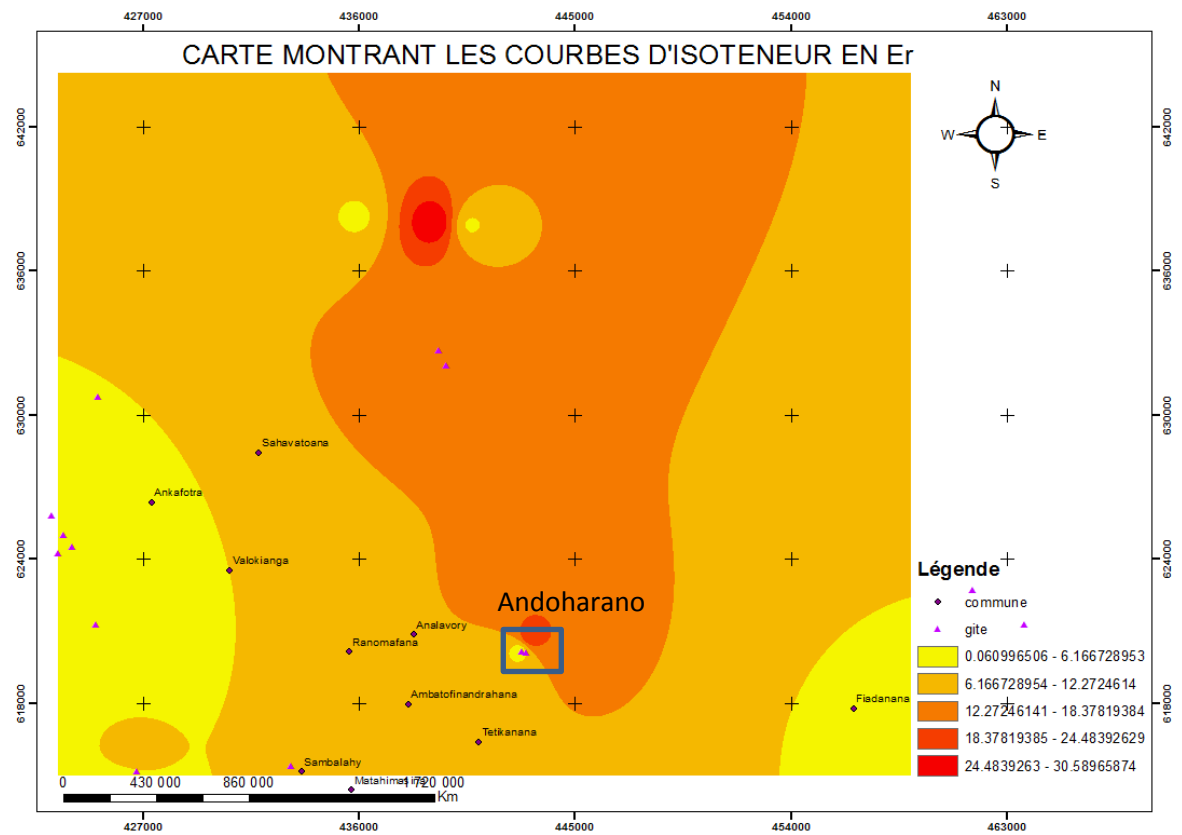


Figure 43 : carte d'isoteneur en Er

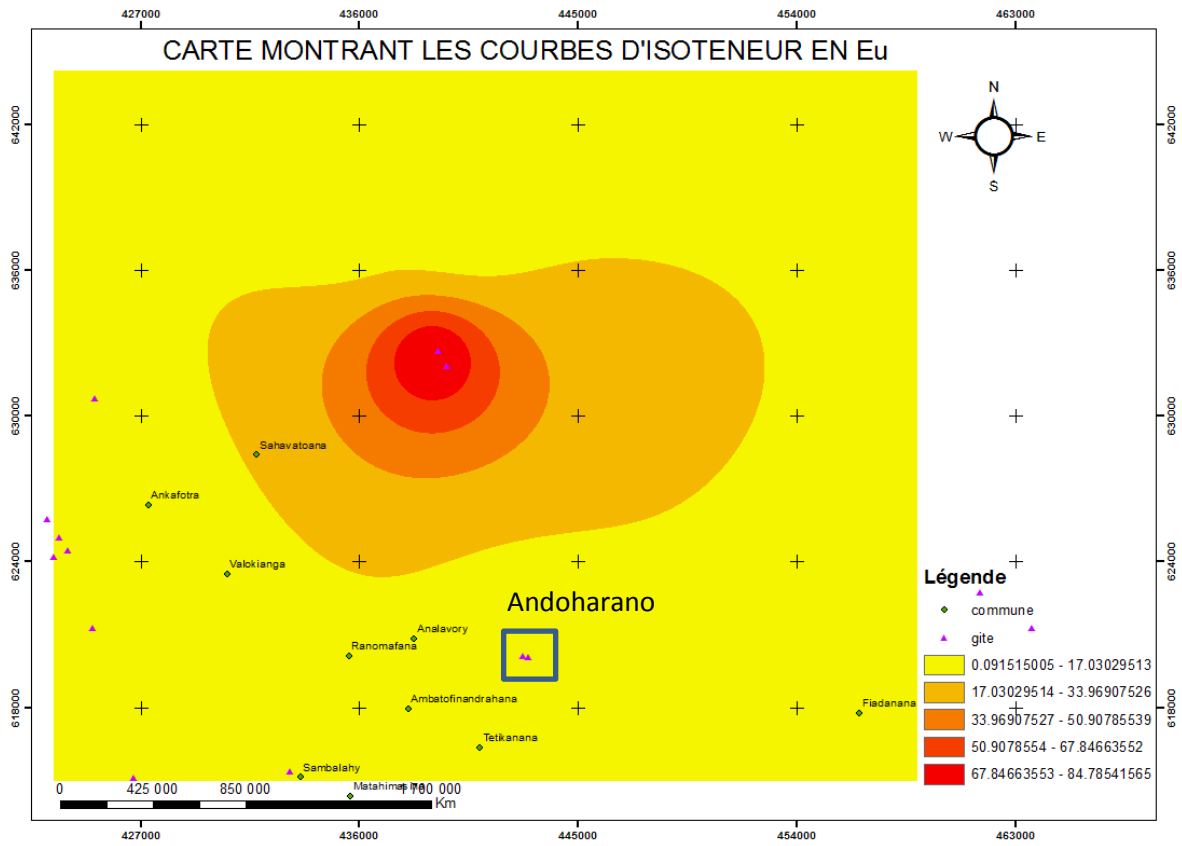


Figure 44 : carte d'isoteneur en Eu

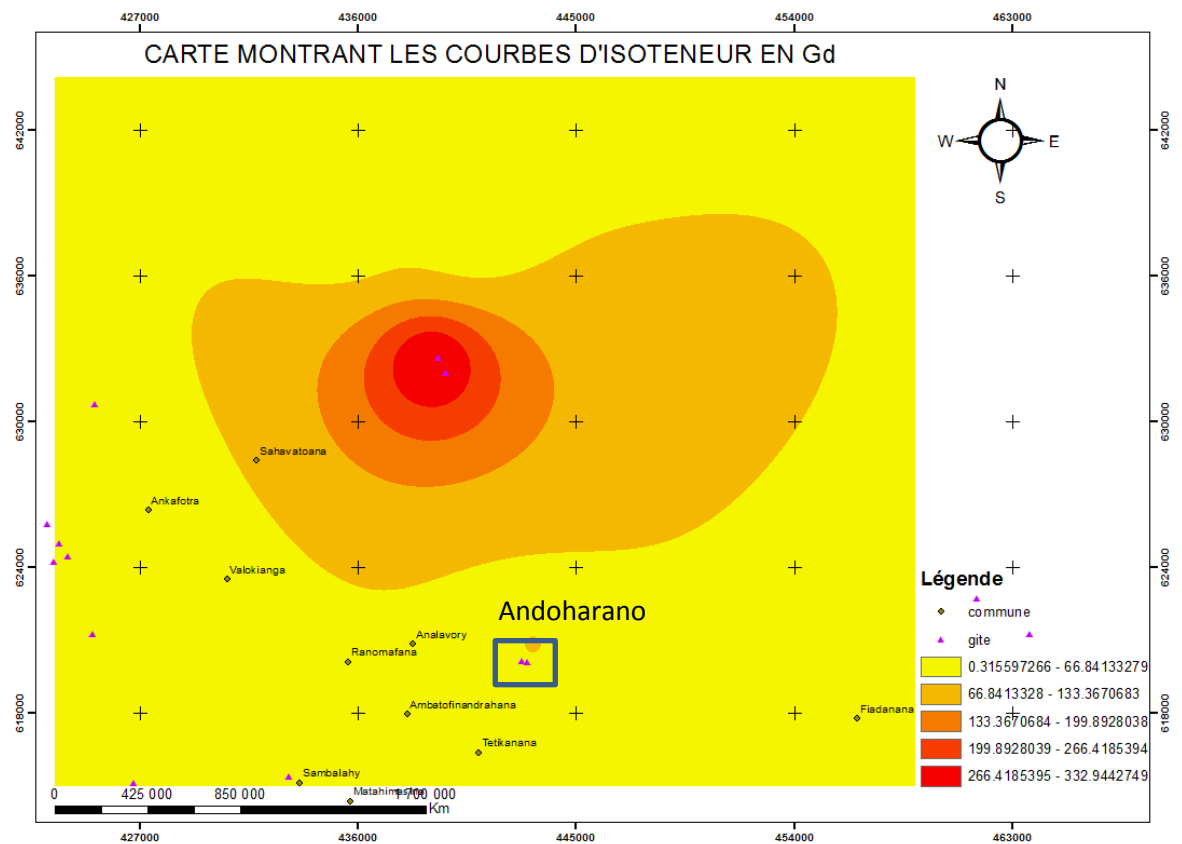


Figure 45 : carte d'isoteneur en Gd

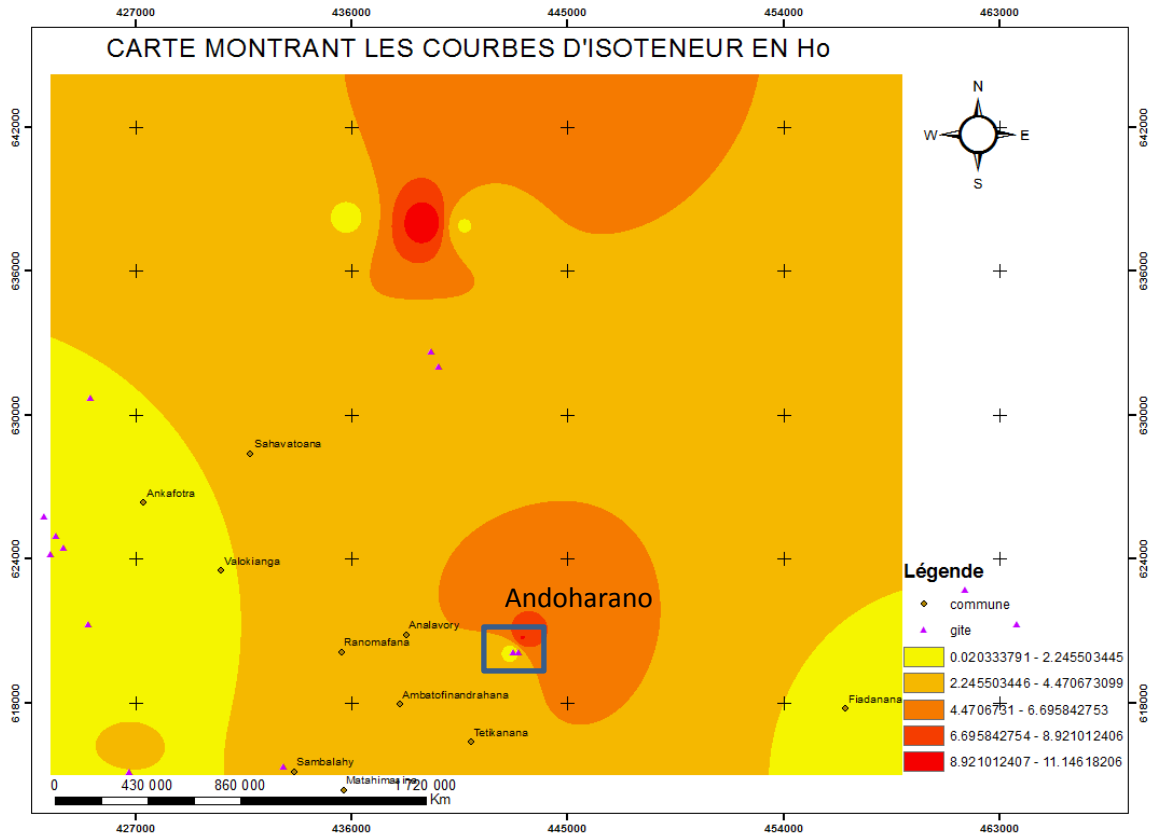


Figure 46 : carte d'isoteneur en Ho

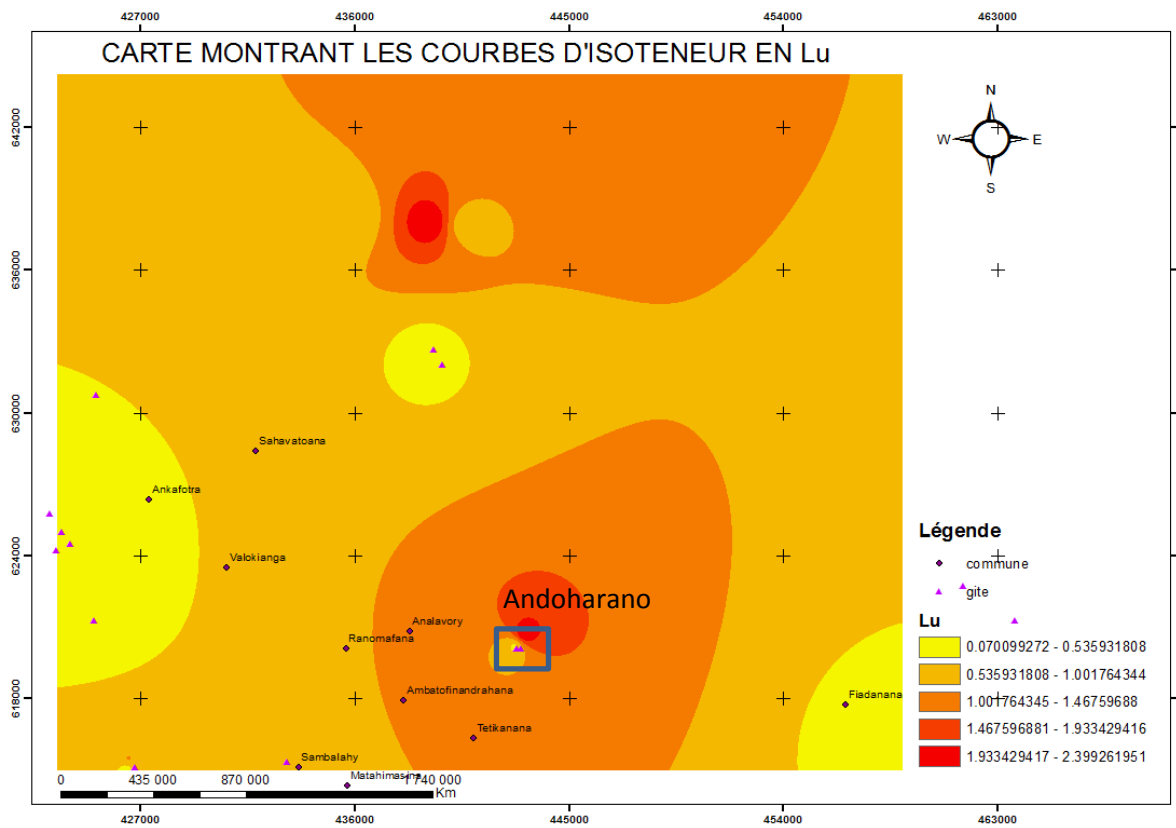


Figure 47 : carte d'isoteneur en Lu

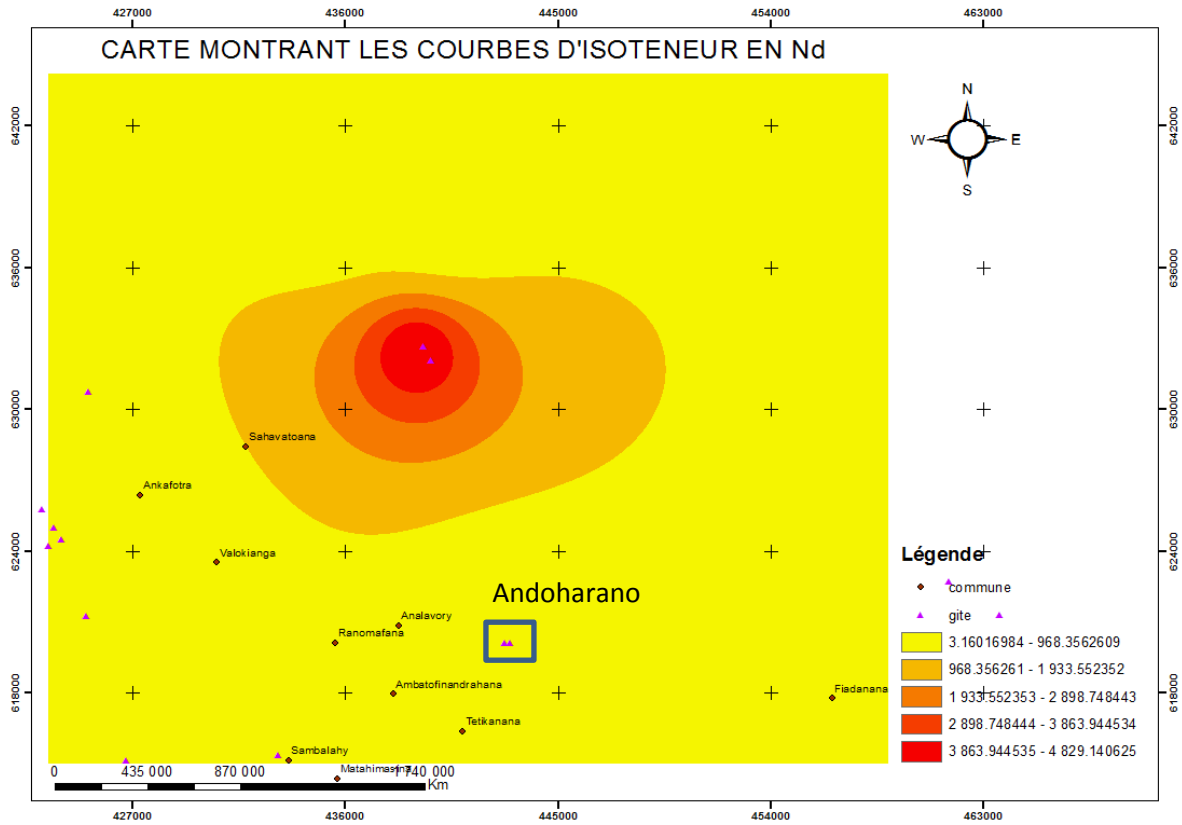


Figure 48 : carte d'isoteneur en Nd

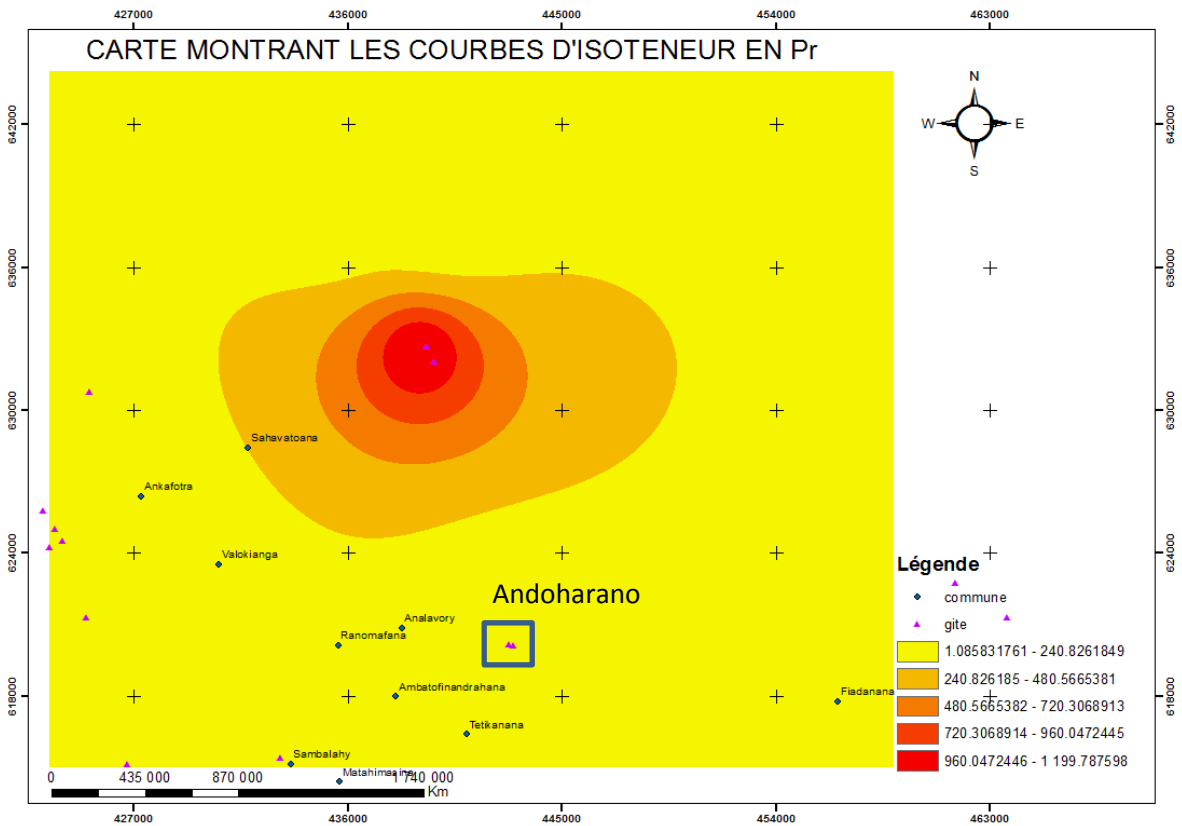


Figure 49 : carte d'isoteneur en Pr

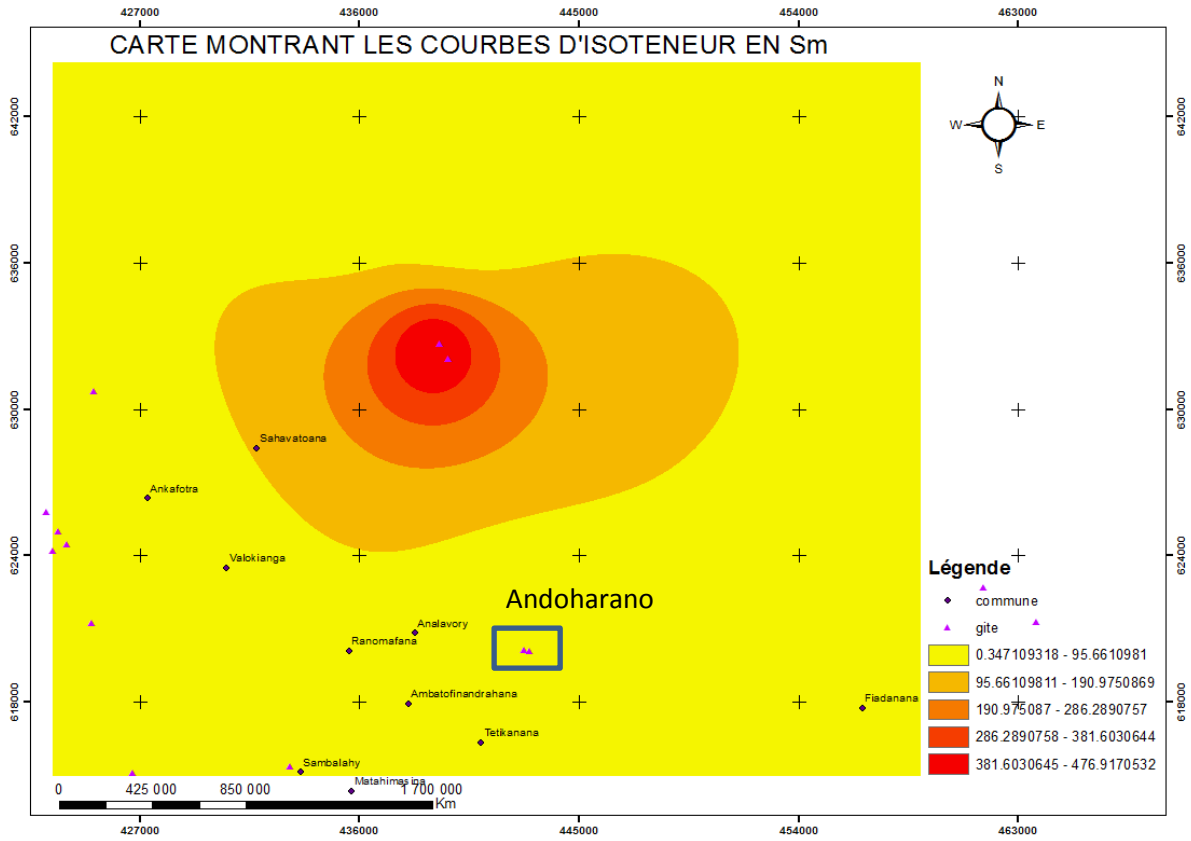


Figure 50 : carte d'isoteneur en Sm

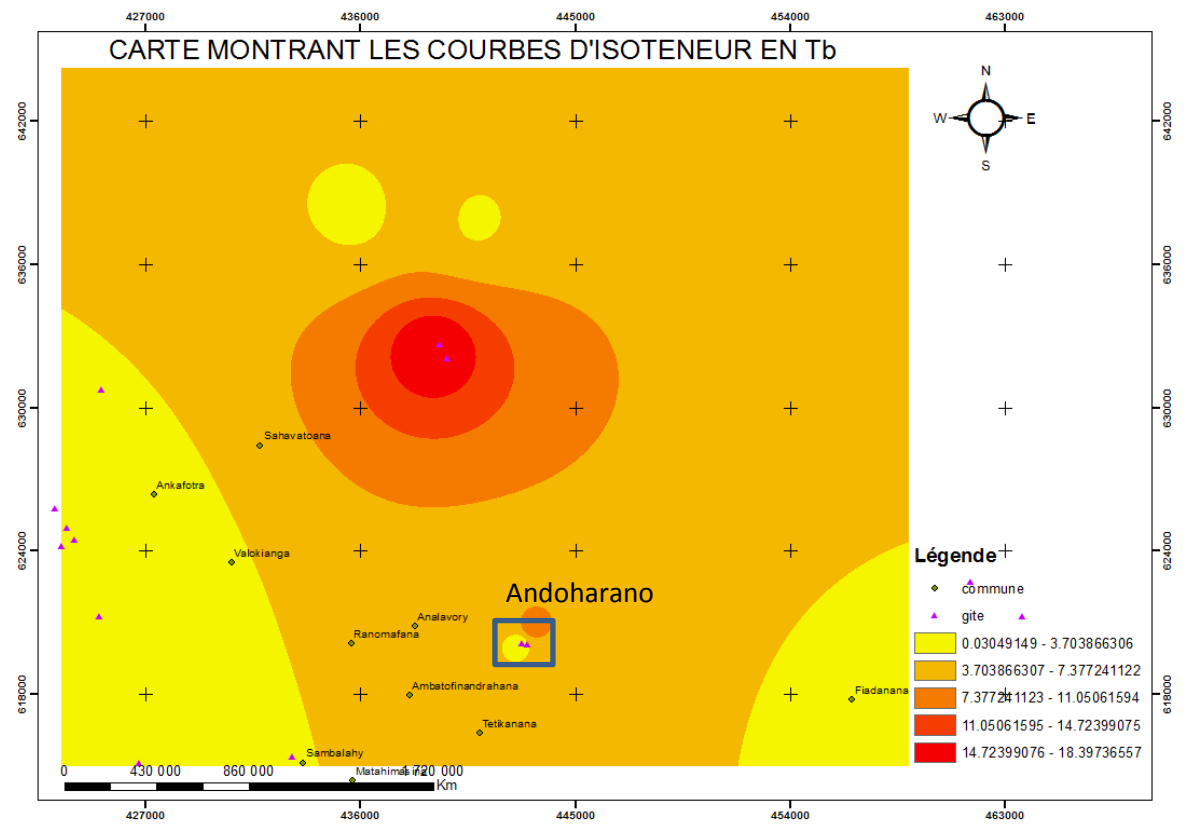


Figure 51 : carte d'isoteneur en Tb

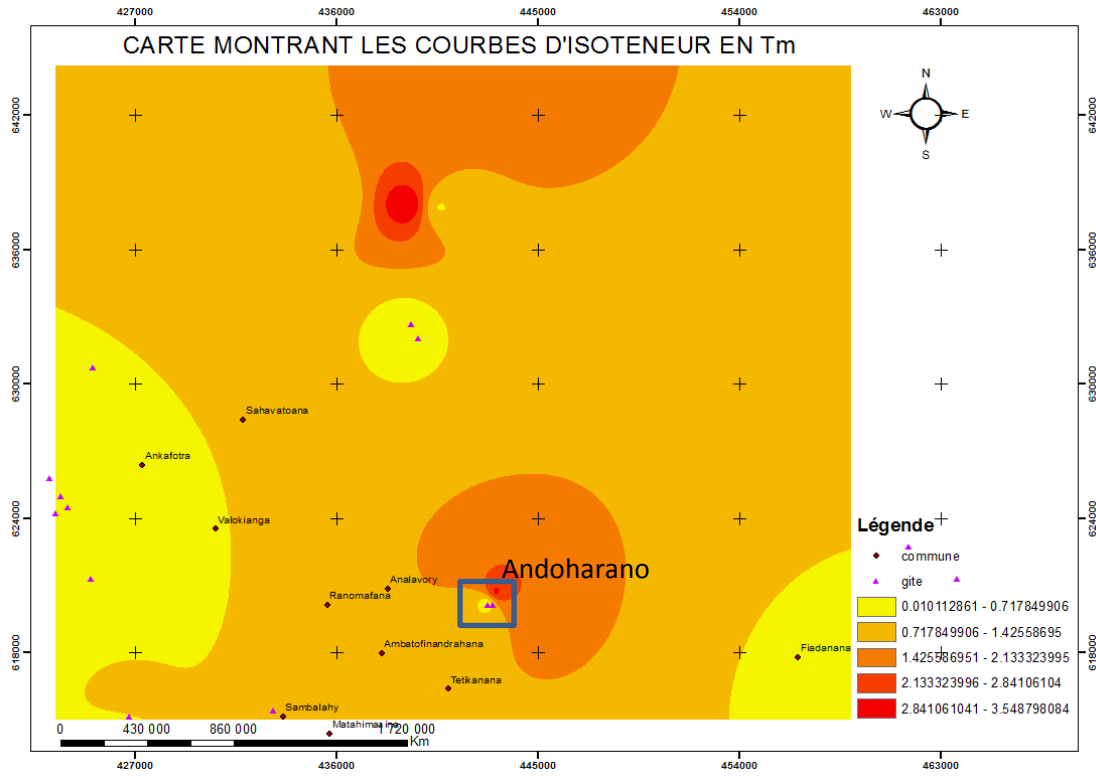


Figure 52 : carte d'isoteneur en Tm

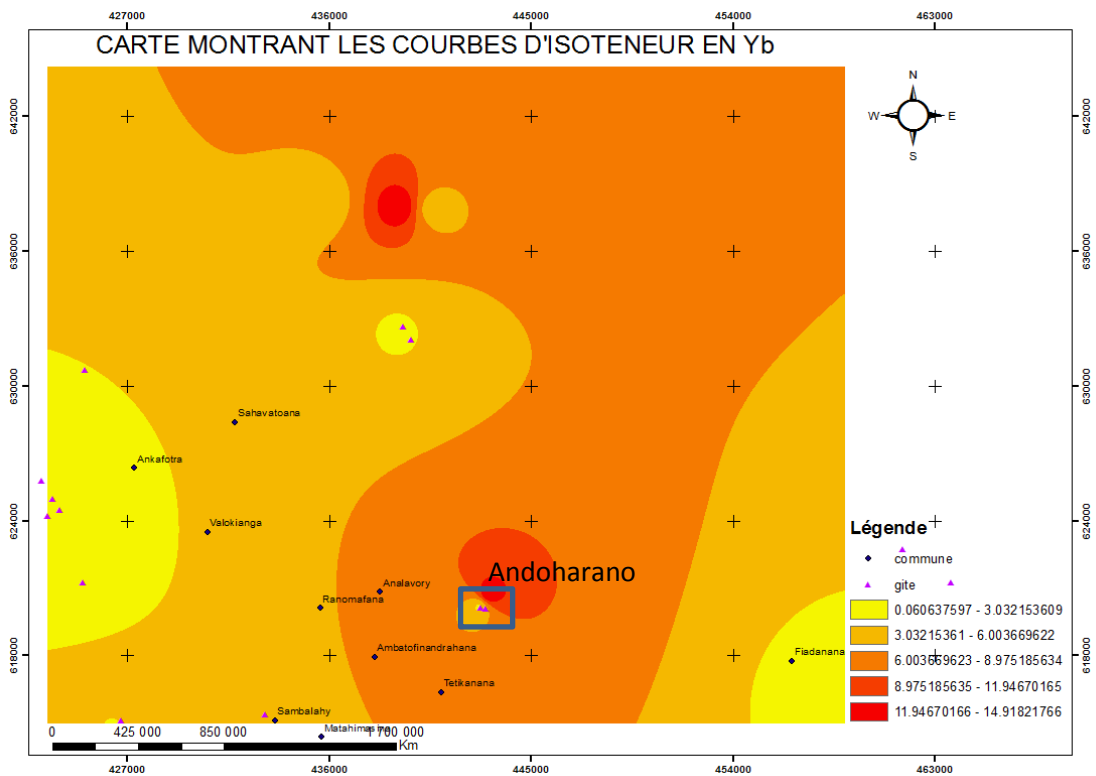


Figure 53 : Carte d'isoteneur en Yb



D'après les profils de distribution des terres rares, on constate que La et Ce (figure 40 ; 41) ont un même profil de distribution dans la zone étudiée et aussi Sm, Pr et Nd (figure 48 ; 49 ; 50).

Mais on peut constater aussi deux gisements (gisement 1 : X1=439311m, Y1=632669m ; gisement 2 : X2= 439649m, Y2= 632048m), ils ont les mêmes caractères géochimiques. En effet, ces deux gisements ont une teneur élevée en Ce, Eu, Gd, La, Nd, Pr, Sm et Tb

Mais pour le gisement d'Andoharano on constate que la teneur de toutes les terres rares est faible. D'après les profils de distribution des éléments majeurs précédemment on peut dire que le gisement d'Andoharano est caractérisé par un milieu riche en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, MnO et Na<sub>2</sub>O (figure 33 ; 34 ; 36 ; 37) montrant que le gisement est lié à des roches alcalines.

Mais en haut l'étude de la répartition des éléments chimiques montre aussi qu'en général la minéralisation est favorable pour des teneurs élevées en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O et MnO.

**Tableau 5 : Analyse des terres rares RASOAMALALA (2009), JACQUES (1984), MOINE (1971)**

Echantillon	Er	Ce	Dy	Eu	Gd	Ho	La	Lu
N09	3	349	6.75	5.88	17.2	1.1	164.5	0.39
N21	3.07	404	7.29	6.59	19.2	1.11	182	0.46
N23	13.1	507	31.3	6.6	44.6	5.2	193	1.11
N36	24	320	47.2	15.4	74.2	9.1	603	2.34
N39	1.58	67.9	2.97	1.33	4.33	0.57	31.5	0.27
N40	1.58	59.8	2.52	0.92	3.05	0.5	37	0.28
N53	30.6	422	43.8	7.89	52.5	11.15	413	2.4
N54	5.27	359	11.45	4.45	19.2	1.96	152.5	0.66
N59	1.89	153.5	3.69	2.97	8.64	0.61	138.5	0.35
N96	5.11	347	10.7	2.79	16.4	1.9	113	0.62
N101	0.06	7.8	0.12	0.09	0.31	0.02	17.4	0.07
N127	15.45	11000	26.3	84.8	333	2.67	8560	0.31
N140	8.97	361	15.95	9.08	29.3	3.2	221	1.03

Echantillon	Nd	Pr	Sm	Tb	Tm	Yb
N09	154	44	22.6	1.76	0.36	2.21
N21	176	50.1	25.8	1.92	0.38	2.48
N23	276	71.1	54.6	6.37	1.6	8.3
N36	426	112.5	61.2	9.35	2.94	15
N39	24.2	6.83	4.44	0.56	0.22	1.38
N40	20.8	6.49	3.11	0.44	0.23	1.42
N53	212	61.3	31.3	7.17	3.55	14.85
N54	148	42.4	23.6	2.47	0.68	4.03
N59	83.6	25.6	11.5	0.88	0.26	1.8

*Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare*

N96	120.5	34.3	20.4	2.21	0.72	4.27
N101	3.1	1.07	0.34	0.03	0.01	0.06
N127	4830	1200	477	18.4	0.37	2.58
N140	201	53	31.6	3.34	1.09	5.62

DISCUSSION ET INTERPRETATION

### V-1- Du point de vue géologique

La syénite, formation dominante de la zone d'étude est constituée par de feldspath alcalin perthitique, de plagioclase, de quartz, de mica (biotite ou phlogopite), d'amphibole calcique et /ou de l'amphibole sodique, de calcite. Cette formation est recoupée par divers filons tardifs. En effet de tous les éléments incompatibles, Na et K sont les derniers à se cristalliser dans le bain de fusion lorsque le magma sera proche de sa température la plus basse. Le magma au cours de sa cristallisation s'enrichit donc de ces éléments et formant ensuite la syénite qui est fortement riche en feldspath alcalin.

Pour la présence de la formation amphibolotique, vu que la zone d'étude se trouve dans un SQD on peut dire qu'au cours du métamorphisme métasomatique d'alternances sédimentaires argileuses et marneuses l'individualisation d'amphibolite est probable.

Les additions diagénétiques de potassium peuvent être plus prononcées lorsque l'évolution conduit l'authigène de feldspath potassique c'est-à-dire le minéral s'est formé dans la roche ou il se trouve. Le mécanisme évoqué pour ce phénomène, qui est fréquent mais qui reste le plus souvent quantitativement limité, est le nourrissage de grains de feldspath potassique détritique (R. R. Berg, 1952 ; W. von Engelhardt, 1967) et l'adsorption de potassium par les minéraux argileux c'est-à-dire la fixation de molécules de potassium à la surface de ces derniers (R. R. Berg, 1952 ; M. P. Weiss, 1954 ; S. H. U. Bowie et al., 1966). L'élévation de la température au cours de l'enfouissement élargit le champ de stabilité du feldspath potassique ce qui explique la néoformation de ce minéral dans la zone de diagenèse qui est la zone de dépôt de sédiment pour devenir après des roches sédimentaires après avoir subis divers processus. Par contre on peut dire aussi que le développement du feldspath potassique est dû à la déstabilisation de la muscovite (base du faciès amphibolite) et de la biotite (base du faciès granulite) avec un métamorphisme profond.

Au niveau métamorphisme on peut dire que de la surface à la diagenèse profonde, les transformations minéralogiques résultent à la fois d'une adaptation à la croissance des paramètres de pression et de température et d'additions, principalement de potassium et de magnésium, à partir des solutions interstitielles concentrées. Les systèmes soumis au métamorphisme comprennent donc une phase fluide riche en sodium et l'on peut prévoir que cet élément finisse par rejoindre les silicates, en entrant en particulier dans la constitution de l'albite et des plagioclases au cours de l'évolution métamorphique (W. D. Keller, 1963 ; G. Dunoyer de Segonzac, 1969).

Après l'observation des linéaments mis en évidence dans les traitements d'images satellitales, on constate une direction principale NNE-SSW. On a aussi découvert plusieurs linéaments tectoniques tenant un rôle important dans la minéralisation en terres rares de la zone d'étude.

### V-2- Du point de vue métallogénique

Les premières hypothèses sur la gîtologie de la bastnaésite ont été proposées par Founié en 1968. Il a proposé que la bastnaésite est associée au magmatisme calco-alcalin, plus

particulièrement aux syénites. Initialement les terres rares y étaient sous forme de monazite c'est-à-dire sous forme phosphatée. Il a distingué deux types de monazite dont la monazite de première génération et la monazite de deuxième génération. Il a précisé que la monazite de première génération est associée à la syénite batholitique et la monazite de deuxième génération, associée aux microsyténites. On a donc à faire à la deuxième génération de Monazite pour le gîte d'Andoharano.

Un premier événement hydrothermal aurait altéré la monazite en bastnaésite par épigénisation et les aurait reconcentré dans les fissurations des filons. Puis un deuxième événement hydrothermal quartzo-baryté surimposé au premier événement aurait altéré la roche préexistante. Ce deuxième événement aurait été responsable de la formation de filons de barytine et la silicification des filons de syénites.

La mise en place du gîte est contrôlée par les accidents tectoniques subis par la zone d'étude témoignée par les fractures présents dans les formations syénitiques et la présence de plusieurs filons.

### V-3- Du point de vue géochimique

Selon l'évolution magmatique indiquée par  $\text{SiO}_2$  on assiste à un appauvrissement de l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  et du  $\text{CaO}$  (figure 25,26), donc leur fractionnement donnant naissance à des minéraux tels les plagioclases calciques (prouvant la nature de la zone d'étude qui est dans le SQD riche en calcaire).

Les gabbros ont la teneur la plus élevée en  $\text{CaO}$  (figure 26) preuve de la présence de plagioclase calcique. Par contre les syénites (surtout syénite de Marovoalavo N25-N28) ont les teneurs les plus basses montrant ainsi la dominance des plagioclases sodiques.

Une corrélation négative de  $\text{MgO}$  avec l'évolution magmatique témoignée par  $\text{SiO}_2$  est constatée (figure 27), cet appauvrissement du magma en l'élément est dû à un fractionnement des minéraux ferromagnésiens. Les gabbros et les syénodiorites sont riches en  $\text{MgO}$  ce qui fait qu'ils ont les teneurs les plus élevées en cet élément même.

Un appauvrissement de  $\text{MnO}$  suivant l'évolution magmatique (figure 28) est constatée indiquant un fractionnement de minéraux. Les gabbros ont les teneurs les plus élevées en  $\text{MnO}$  qui est dû à la présence de minéraux riches en l'élément comme clinopyroxène ou olivine.

Il y a une diminution de  $\text{TiO}_2$  suivant l'évolution magmatique indiquée par  $\text{SiO}_2$  (figure 30). Les gabbros ont une teneur plus élevée que les syénites ce qui peut être dû à la présence de minéraux riches en  $\text{TiO}_2$  comme le sphène.

L'oxyde  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  montre aussi une corrélation négative en fonction de la teneur en  $\text{SiO}_2$  croissant (figure 29) et le fractionnement de cet oxyde ne peut être dû que par la cristallisation des minéraux dont la composition inclut le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dont la magnétite et l'ilménite. De plus, la

cristallisation du clinopyroxène a également pu influencer le fractionnement du  $Fe_2O_3$ . Tout ceci a pu entraîner un appauvrissement en  $Fe_2O_3$  dans le liquide résiduel.

Il y a corrélation positive de  $Na_2O$  et  $K_2O$  montrant que pendant l'évolution magmatique il y a enrichissement en ces éléments (figure 31,32) traduisant la présence des minéraux tels les microclines. Cette augmentation de teneur peut aussi être due à un apport le long de la cheminée magmatique soit d'un liquide hydrothermal qui a transporté les éléments  $Na_2O$  et  $K_2O$  jusqu'à leur solidification d'où une augmentation considérable de leur teneur.

Pour les syénites minéralisées, elles sont le résultat d'un apport en oxyde  $K_2O$  accompagné d'éléments chimiques comportant des terres rares.

Les termes granitiques se projettent dans les valeurs les plus élevées des teneurs en  $SiO_2$  Cette évolution linéaire reflète le processus de cristallisation fractionné du magma.

Sur le diagramme de Harker donc les éléments majeurs tel  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $Fe_2O_3T$  et  $TiO_2$  montrent une corrélation négative autrement dit il y a une décroissance de la teneur en ces éléments avec l'évolution magmatique témoignée par la croissance de  $SiO_2$  par contre une corrélation positive en  $K_2O$  et  $Na_2O$  est constatée . Ceux - ci suggèrent que le magma a évolué suivant une cristallisation fractionnée et un fractionnement initial des phases ferromagnésiennes et de plagioclases.

L'étude des éléments en trace montre un niveau de distribution inégal, la zone d'étude est pauvre en terres rares. Le déficit de ces terres rares comme le Ce est certainement dû à un lessivage, un départ sélectif de cet élément. De même pour La, un lessivage sélectif tardif, de la syénite vers la monazite. Cependant le gîte de Monazite d'Andoharano se caractérise par un enrichissement d'éléments silico-alumineux d'où on peut dire que cette minéralisation en terres rares est lié aux formations syénitiques.

## CONCLUSION

Des révisions cartographiques et minières de Madagascar ont été réalisées par plusieurs entités dont fait partie le Projet de Gouvernance des Ressources Minérales (PGRM) dans le but de faire connaître la capacité tant géologique que minière de la grande île. Une étude métallogénique et gîtologique du gîte d'Andoharano de la région d'Ambatofinandrahana a été effectuée et a pu montrer que la région est constituée d'une formation dans l'ordre de différenciation magmatique (basique à acide). La zone d'étude qui est le massif d'Andoharano est constituée d'une formation acide à caractère alcalin potassique à sodi-potassique. Les roches dominantes sont les syénites à amphibole accompagnées de phases riches en terre rare.

D'après le diagramme de Harker, il apparaît que la zone d'étude est très riche en élément silico-alumineux avec une concentration moyenne en terres rares comme Ce, La et Nd. On assiste à une évolution normale du magma c'est à dire une évolution basique vers acide (gabbro évoluant en granite). On en déduit qu'il n'y a eu qu'une seule lignée magmatique.

Après les études géochimiques faites, les minéraux de terre rare considérés ici qui sont la monazite et la bastnaésite, se rapportent incontestablement à des roches alcalines associés à un environnement carbonaté, ceci à partir de leurs caractéristiques chimiques et d'une comparaison des gisements mondiaux connus.

En effet, les cipolins et autres roches carbonatées de la SQD d'Ambatofinandrahana pourraient constituer un environnement favorable pour délivrer du CO<sub>2</sub> et faciliter la collecte hydrothermal d'un stock de lanthanides au sein des roches alacalino-potassiques. Tout cela permet la formation de fluorocarbonates (bastnaésite) et de phosphates (monazite) (Jacques, 1984).

La géochimie des terres rares des syénites d'Andoharano offre des spectres avec une anomalie négative en Ce montrant un caractère cogénétique de ces différents syénites.

Les résultats montrent que le gîte d'Andoharano est un gîte de monazite dans des filons de calcedoines et est encaissé dans du marbre.

Les minéralisations en terre rare, qui se développent préférentiellement dans la partie carbonatée de la SQD, se présentent soit en filons de roches siliceuses à minéraux de terres rares soit en éluvion c'est-à-dire la désagrégation et remaniement des filons précédents.

Les formations géologiques sont traversées par des failles de directions NW-SE, la minéralisation lui est associée. Des failles tardives de direction NE-SW recourent ces formations et entraînent la discontinuité de la zone minéralisée.

L'évaluation du gîte d'Andoharano dans la région d'Ambatofinandrahana a une réserve pas assez importante pour le considérer comme ayant un intérêt minier.





Annexe 2 : Tableau périodique montrant les terres rares

**Rare Earth Elements**  
by Geology.com

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
Lanthanides																	
La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu																	
Actinides																	
Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr																	

Annexe 3: Tableau montrant les terres rares et leurs propriétés physico-chimiques

Element	Symbol	Atomic		Valence	Crustal			
		Number	Weight		Abundance <sup>2</sup>	Oxides	REO/RE	
Lanthanum	La	57	139	3	30.0	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.17	
Cerium	Ce	58	140	3,4	64.0	CeO <sub>2</sub>	1.23	
LREE	Praseodymium	Pr	141	3,5	7.1	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	1.21	
	Neodymium	Nd	144	3	26.0	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.17	
	Promethium <sup>4</sup>	Pm	61	145	3	0.0		
	Samarium	Sm	62	150	2,3	4.5	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.16
Europium	Eu	63	152	2,3	0.9	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.16	
Gadolinium	Gd	64	157	3	3.8	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.15	
Terbium	Tb	65	159	3,4	0.6	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	1.18	
Dysprosium	Dy	66	163	3	3.5	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.15	
HREE	Holmium	Ho	67	165	3	0.8	Ho <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.24
	Erbium	Er	68	167	3	2.3	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.14
	Thulium	Tm	69	169	3	0.3	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.14
	Ytterbium	Yb	70	173	2,3	2.2	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.14
	Lutetium	Lu	71	175	3	0.3	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.14
Yttrium	Y	39	89	3	22.0	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.27	

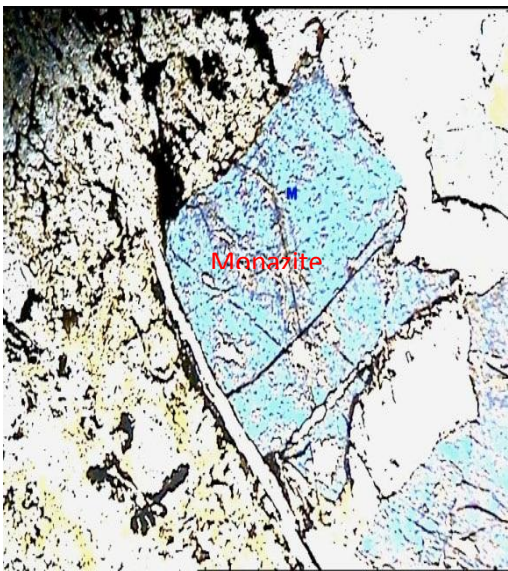
Annexe 4 : Lames minces montrant les différents minéraux existant dans les formations syénitiques



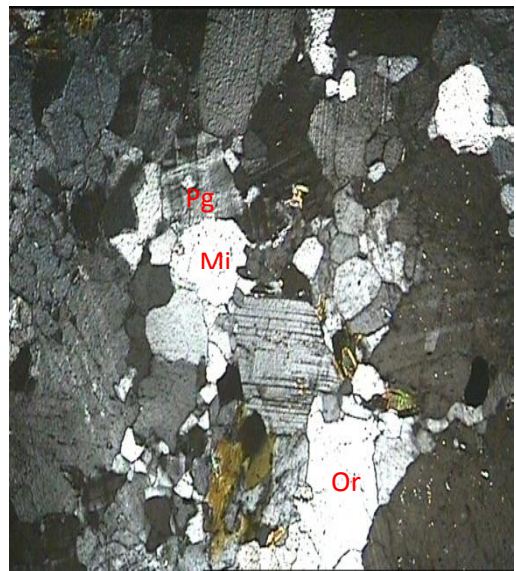
(a)



(b)



(c)(d)



(a) : abondance de feldspath (éch.27)

(b) : structure rapakivitique (éch.4)

(c) : monazite (Rasoamalala, 2007, éch.N132)

(d) : grands cristaux de plagioclase (éch.60)

Annexe 5 : Tableau résumant les formations existant dans la région d'Ambatofinandrahana avec leurs caractéristiques

Dénomination général	Associations lithologiques régionales		Métamorphisme
Massif SQD	Quartzites Micaschistes Cipolins	Groupe SQD= Groupe Itremo	Métamorphisme épizonal- mésozonal profonde
	Quartzites Gneiss Migmatites	Groupe gneissique	Métamorphisme mésozonal profonde-catazonal
Environnement migmatito-gneissique			

Annexe 6: Caractéristiques de landsat 7 ETM+

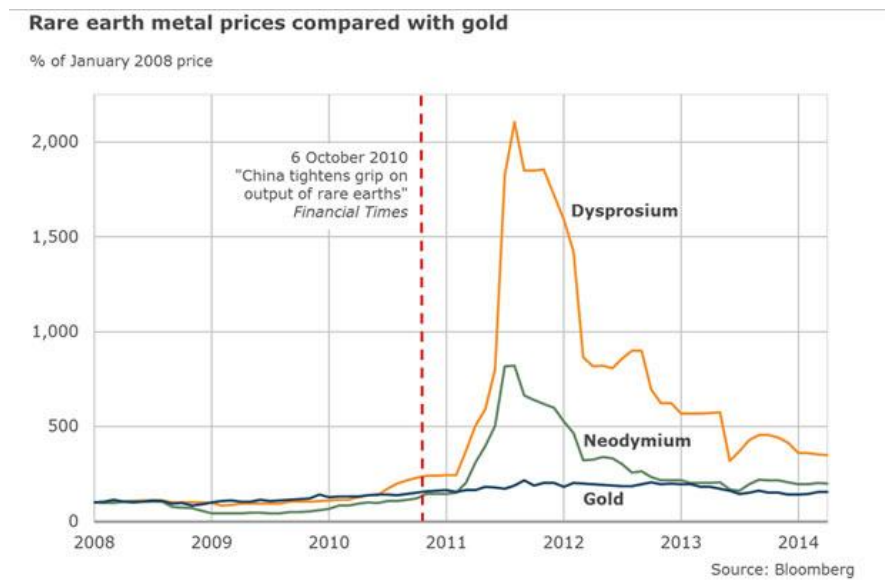
Landsat 7 (capteur ETM +)	Longueur d'onde (µm)	Résolution (mètres)
Bande 1 (Bleu)	0,45 au 0,515	30
Bande 2 (Vert)	De 0,525 à 0,605	30
Bande 3 (Rouge)	0,63 à 0,69	30
Bande 4 (Proche infrarouge)	0,75 à 0,90	30
Bande 5 (Infrarouge Moyen)	1,55 à 1,75	30
Bande 6 (Infrarouge Thermique)	10,40 à 12,5	60
Bande 7 (infrarouge Moyen)	2,09 à 2,35	30
Bande 8 (Panchromatique)	0,52 à 0,90	15

Annexe 7 : Caractéristiques de landsat 5 TM

Landsat 5 (capteur TM)	Longueur d'onde (µm)	Résolution (mètres)
Bande 1(Bleu)	0,45 à 0,52	30
Bande 2 (Vert)	0,52 à 0,60	30
Bande 3 (Rouge)	0,63 à 0,69	30

Bande 4 (Proche infrarouge)	De 0,76 à 0,90	30
Bande 5 (Infrarouge Moyen)	1,55 à 1,75	30
Bande 6 (Infrarouge Thermique)	De 10,40 à 12,50	120
Bande 7 (infrarouge Moyen)	2,08 à 2,35	30

Annexe 8 : Diagramme comparant le prix des terres rares par rapport à celui de l'or



Annexe 9 : Tableau montrant les minerais de terre rare et leur mode de dépôt

### Rare Earth Element Minerals & Deposit Types

Group-Mineral	Formula	Carbonatite	Alkaline Intrusion-Related	Placer	Phosphorite
<b>Oxides</b>					
Aeschnite	(Ln,Ca,Fe)(Ti,Nb) <sub>2</sub> (O,OH) <sub>6</sub>		X		
Euxenite	(Y,Ln,Ca)(Nb,Ta,Ti) <sub>2</sub> (O,OH) <sub>6</sub>		X	X	
Fergusonite	YNbO <sub>4</sub>		X		
<b>Carbonates</b>					
Bastnäsite	(Ln,Y)CO <sub>3</sub> F	X	X		
Parisite	Ca(Ln) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> F <sub>2</sub>	X	X		
Synchisite	Ca(Ln,Y)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F	X	X		
Tengerite	Y <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> •n(H <sub>2</sub> O)		X		
<b>Phosphates</b>					
Apatite	(Ca,Ln) <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH,F,Cl)	X	X		X
Monazite	(Ln,Th)PO <sub>4</sub>	X	X	X	
Xenotime	YPO <sub>4</sub>		X	X	
<b>Silicates</b>					
Allanite	(Ln,Y,Ca) <sub>2</sub> (Al,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)		X		
Eudialyte	Na <sub>4</sub> (Ca,Ce) <sub>2</sub> (Fe <sup>2+</sup> ,Mn <sup>2+</sup> ,Y)ZrSi <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH,Cl) <sub>2</sub>		X		
Thalenite	Y <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>		X		
Zircon	(Zr,Ln)SiO <sub>4</sub>		X	X	



Ln: Lanthanide (a.k.a. REE)

Annexe 10 : Tableau des données sur terrain

N°échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	12'	
Nom	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	microsyé nite	
Position	X	442947	442977	442993	443006	442987	442935	442947	442847	442916	442903	442893	442893
	Y	621235	621242	621259	621279	621297	621317	621283	621273	621269	621242	621246	621246
	Z	1629	1629	1627	1627	1622	1615	1618	1613	1613	1613	1611	1611
Affleurement	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En filon	En bloc	En bloc	En filon
Patine	Noir	Noir	Noir	brunâtre	Blanc grisâtre	Noirâtre	Beige	Rouge brique	grisâtre	Brun noirâtre	Grisâtre	Jaunâtre	
Altération	Plus ou moins altéré	Plus ou moins altéré	Plus ou moins altéré	non	Plus ou moins altéré	Non	Plus ou moins altéré	Plus ou moins altéré	non	Non	Plus ou moins altéré	Plus ou moins altéré	
Couleur	Rose	Rouge	Rouge	Brun grisâtre	Rouge brique	Beige brunâtre	Beige	Rouge brique	grisâtre	Blanc grisâtre	brun	Jaunâtre	
Structure	Plus ou moins grenue	Plus ou moins grenue	Plus ou moins grenue	grenue	grenue	Grenue	Microgr enue	Microgre nue	Microgre nue	Plus ou moins grenue	Microgr enue	Presque grenue	
texture	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	
Granulométrie	fin	fin	fin	Plus ou moins grossier	grossier	Fin à grossier	Fin poussiér eux	Fin poussié reux	Fin poussié reux	Presque grossier	Fin poussiér eux	Presque grossier	
Composition minéralogique	Orthose -biotite- anorthite- quartz	Orthos e- biotite- quartz	Orthos e- biotite- quartz	Orthose- muscovite- anorthite- tourmaline - amphibole	Orthose- biotite- anorthite- quartz	Orthose - anorthite	Orthose - biotite	Orthose- biotite- anorthite	Orthose - anorthite- tourmalin e	Orthose - anorthite- tourmalin e	Orthose (domina nte)- anorthit e	Orthose- anorthite- quartz	
Mesure	Foliation	D : N65 α: 65° NW-SE	D : N73 α: 70° WNW-	D : N69 α: 70° WNW-			D : N90 α: 90° E-W	D : N56 α: 90° ESE-	D : N53 α: 83° SE- NW	D : N83 α: 45° ESE-WNW	D : N72 α: 75° WNW-	1) D : N15 α: 51° N-S 2) D : N26	

Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare

			ESE	ESE				WNW				ESE		$\alpha$ : 45° NNW-SSE 3) D: N39 $\alpha$ : 30° NW-SE
	fracture											D : N85 $\alpha$ : 56° E-W		
Autres					Les cristaux d'albite sont en grain grossier	Existence de phénocristaux d'albite	Structure concentrique grenue vers l'intérieur				Sous forme de filon de direction E-W	Sous forme de filon de direction E-W		

N°échantillon	13	14	15	16	17	18	19		20	
Nom	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Pegmatite	Syénite	
Position	X	442878	442873	442879	442919	442921	442867	442861	442849	442971
	Y	621259	621227	621217	621160	621152	621100	621094	621045	621178
	Z	1607	1598	1612	1615	1613	1604	1598	1590	1627
Affleurement	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	Filon	En bloc	
Patine	Noirâtre	Noir rouille	Grisâtre	Brun	Rouge brique	Noir	Rouge brique	Rosâtre	Noir brunâtre	
Altération	Moins altéré	Moins altéré	Moins altéré	Moins altéré	Moins altéré	Altéré	Moins altéré	Non altéré	Altéré	
Couleur	Grisâtre	Blanchâtre	Rouge brique	Rosâtre	Rouge brique	Blanc	Jaunâtre	Rosâtre	Rouge	
Structure	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue à grenue	Microgrenue	pegmatitique	Microgrenue	
Texture	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	

Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare

Granulométrie		fin	fin	fin	fin	fin	Fin à grossier	fin	grossier	fin
Composition minéralogique		Orthose-albite-biotite	Orthose-biotite-quartz	Orthose-biotite-quartz	Orthose-quartz	Orthose-anorthite-tourmaline	Orthose-anorthite-muscovite-orthite	Orthose-anorthite-quartz		Orthose (dominant)-anorthite-quartz
Mesure	Foliation	D : N43 α: 65° NW-SE		D : N73 α: 34° W SW-ENE	D : N15 α: 53° S-N		D : N63 α: 52° ESE-WNW	D : N45 α: 70° SE- NW	D : N65 ENE-WSW	D : N65 α: 73° ESE-WNW
	Fracture	D : N27 α: 63° NNW-SSE								
Autres		Orthose en batonnet	Il existe des phénocristaux d'anorthite à la périphérie de la roche	La biotite forme une linéation d'environ 2cm dans la roche		écailleux		L'orthose forme une linéation dans la roche	Puissance environ 9cm	

N°échantillon		21	22	23	24	25	26	27	28	29
Nom		Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Amphibolite	Syénite	Pegmatite	Syénite	Pegmatite (Cipolin)
Position	X	443010	443057	443073	443064	443064	443095	443043	443057	443044
	Y	621212	621247	621279	621330	621352	621344	621388	621423	621421
	Z	1613	1608	1604	1604	1594	1591	1594	1567	1560
Affleurement		En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	Filon	En bloc	Filon
Patine		Noir brunâtre	Noirâtre	Brun	Rosâtre	Noir	Rosâtre	Gris	Brunâtre	Verdâtre
Altération		Altéré	Altéré	Moins altéré	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Couleur		Rouge	Blanchâtre	Jaunâtre	Rose clair	Noir	Rosâtre	Gris	Brun	Jaune

Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare

		brique								verdâtre
Structure		Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Vitreux
Texture		Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive
Granulométrie		Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin
Composition minéralogique		Orthose-magnétite	Orthose-biotite-anorthite-tourmaline	Orthose (dominant)-anorthite-biotite	Orthose-biotite	Quartz-amphibole	Orthose-biotite	Amphibole-calcaire-orthose-anorthite	Orthose (dominant)-biotite-quartz	calcite
Mesure	Foliation	D : N12 α: 80° SSE-NNW	D : N63 α: 25° ESE-WNW	D : N70 α: 55° ESE-WNW	D : N65 α: 75° ESE-WNW		D : N15 α: 25° N-S	D : SE-NW/ESE-WNW/S-N	D : N10 α: 20° N-S	D: ESE-WNW
	Fracture		D : N7 α: 88° N-S							
Autres						Ecailleux	Orthose en batonnet	-Orthose en grands cristaux -en courbe		

N°échantillon		30	31	32	33	33'	34	35	36	37
Nom		Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Amphibolite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite
Position	X	443078	443093	443125	443144	443144	443143	443132	443099	443124
	Y	621412	621399	621400	621386	621386	621369	621325	621237	621316
	Z	1570	1584	1581	1568	1568	1581	1577	1587	1584
Affleurement		En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc
Patine		Grisâtre	Noir	Beige noirâtre	Noir grisâtre	Noirâtre	Rose	Rose	Gris	Noir
Altération		Moins latéré	Altéré	Non	Non	Non	Altéré	Altéré	Non	Moins altéré
Couleur		Verdâtre	Rouge brique	Rosâtre	Rose	Noirâtre	Blanchâtre	Rouge brique	Rosâtre	Rouge brique
Structure		Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue
Texture		Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive
Granulométrie		Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin



Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare

Composition minéralogique		Anorthite-microcline-orthite	Orthose-biotite	Orthose-quartz	Orthose-biotite	Amphibole-quartz	Orthose-biotite	Orthose-biotite-tourmaline	Orthose-quartz	Orthose-anorthite
Mesure	Foliation	D : N87 α: 62° W-E	D : N27 α: 8° NNE-SSW	D : N45 α: 58° NW-SE	D : N32 α: 35° NNW-SSE	D : WNW-ESE	D : N70 α: 87° ESE-WNW	D : N59 α: 72° SW-NE	D : N80 α: 12° W-E	D : N28 α: 50° NNE-SSW
	Fracture				1) D : N54 α: 90° WNW-ESE 2) D : N87 α: 63° E-W		D : N22 α: 43° SSE-NNW	D : N62 α: 44° SE-NW		
Autres						Puissance environ 1m20				

N°échantillon		38	39	40	41	42	43	44	45	46
Nom		Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Pegmatite	Syénite	Syénite
Position	X	443132	443133	443119	443076	442958	443027	443066	443215	443111
	Y	621192	621162	621101	621151	621028	621028	621053	621107	621047
	Z	1592	1595	1610	1615	1575	1582	1583	1560	1603
Affleurement		En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc
Patine		Gris	Noir	Grisâtre	Noir	Noir brunâtre	Noir grisâtre	Rouge brique grisâtre	Grisâtre	Brun grisâtre
Altération		Altéré	Altéré	Altéré	Altéré	Moins altéré	Moins altéré	Moins altéré	Moins altéré	Non
Couleur		Rouge brique	Rouge brique	Blanchâtre	Jaunâtre	Jaunâtre	Jaunâtre	jaunâtre	Jaunâtre	Blanchâtre
Structure		Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Grenue	Grenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue
Texture		Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive
Granulométrie		Fin	Fin	Fin	Plus ou moins	Plus ou moins	Fin	Fin	Fin	Fin

*Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare*

				grossier	grossier					
Composition minéralogique		Orthose-biotite	Orthose-anorthite	Orthose-biotite	Orthose	Orthose-biotite	Orthose-biotite-quartz-tourmaline	Orthose-biotite	Orthose-biotite	
Mesure	Foliation	D : N75 α: 48° E-W	D : N72 α: 30° WNW-ESE	D : N72 α: 40° ESE-WNW	D : N50 α: 40° SE- NW	D : N82 α: 60° E- W	D : N50 α: 23° SE- NW	D : N75 α: 55° E-W	D : N72 α: 52° E-W	D : N28 α:48° NE- SW
	Fracture									D : N32 α: 24° SE- NW
Autres										

N°échantillon		47	48	49	50	51	52	53	54	55
Nom		Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Pegmatite	Syénite	Syénite
Position	X	443167	443013	442970	442928	442883	442815	442796	442818	442679
	Y	621094	621115	621074	621035	621053	621055	621037	621077	621064
	Z	1582	1596	1615	1605	1608	1582	1576	1586	1590
Affleurement		En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc
Patine		Grisâtre	Gris	Noir brunâtre	Noir	Gris brunâtre	Gris noirâtre	Gris	Brunâtre	Noir
Altération		Altéré	Non	Altéré	Moins latéré	Non	Non	Altéré	Non	Non
Couleur		Gris noirâtre	Rosâtre	Rouge brique	Gris rosâtre	Rouge brique	Blanchâtre	Brun	Jaune caca	Brun
Structure		Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Grenue	Grenue	Microgrenue	Microgrenue	Grenue	Grenue
Texture		Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive	Massive
Granulométrie		Fin	Fin	Fin	Grossier	Grossier	Fin	Fin	Grossier	Grossier

*Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare*

Composition minéralogique		Anorthite-tourmaline	Orthose-biotite	Orthose-biotite-anorthite	Orthose-anorthite-tourmaline	Orthose-anorthite-tourmaline	Orthose-biotite-anorthite	Orthose-biotite-anorthite	Orthose-anorthite (même quantité)	Orthose (dominant)-biotite
Mesure	Foliation	D : N27 α: 40° NNE-SSW	D : N75 α: 50° E-W	D : N80 α: 72° EW-E	D : N65 α: 52° WSW-ENE	D : N82 α: 50° E-W	D : N60 α: 28° ESE-WNW	D : N75 α: 40° E-W	D : N20 α: 20° NNE-SSW	D : N75 α: 40° E-W
	Fracture					D : N38 α: 75° NE-SW				
Autres							Sous forme de ligne de crête avec une direction ENE-WSW			

N°échantillon		56	57	58	59	60	61	62	63	64
Nom		Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Syénite	Pegmatite	Marbre	Syénite
Position	X	442758	442714	442639	442643	442742	442801	442906	443285	442773
	Y	621118	621002	620931	620905	621191	621230	621293	621327	621425
	Z	1549	1545	1540	1573	1556	1570	1576	1505	1578
Affleurement		En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc	En bloc
Patine		Brunâtre	Noir	Brun blanchâtre	Noir	Noir	Noir	Noir	Blanc	Noir
Altération		Altéré	Non	Non	Non	Non	Altéré	Non	Non	Altéré
Couleur		Blanchâtre	Jaunâtre	Brun blanchâtre	Rouge brique	Jaune verdâtre	Brun	Rougeâtre	Blanc jaunâtre	Rouge brique
Structure		Microgrenue	Grenue	Microgrenue	Grenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue	Microgrenue

*Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare*

Texture		Massive	Massive	Massive	Massive	Porphyroïde	Massive	Massive	Massive	Massive
Granulométrie		Fin	Grossier	Fin	Grossier	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin
Composition minéralogique		Orthose-anorthite-microcline	Orthose-anorthite	Orthose-biotite-quartz	Orthose-biotite	Orthose-anorthite-microcline-tourmaline	Orthose-anorthite-biotite	Orthose-biotite	calcite	Orthose - biotite
Mesure	Foliation	D : N12 α: 48° N-S	D : N75 α: 31° E-W	D : N82 α: 52° E-W	D : N40 α: 60° NE-SW	D : N58 α: 58° SE-NW	D : N35 α: 40° NW-SE	D : N33 α: 62° NE-SW	D : N60 α: 20° WNW-ESE	D : N25 α: 36° NNW-SSE
	Fracture			D : N72 α: 64° W-E						
Autres			Anorthite grossier en forme de batonnet		Orthose forme de grands cristaux à la périphérie de la roche	-Orthose forme de grands cristaux à la périphérie de la roche -porphyre d'anorthite	Filon de quartz perpendiculaire à la foliation			

*Geologie d'Andoharano et ses mineralisations en terre rare*

N°échantillon			
Nom		Marbre	Pegmatite
Position	X	442773	442839
	Y	621425	621455
	Z	1578	1567
Affleurement		Bloc	Filon
Patine		Noir	Rose
Altération		Non	Altéré
Couleur		Blanc	Rose
Structure		Microgrenue	Pegmatitique
Texture		Massive	Massive
Granulométrie		Fin	Grossier
Composition minéralogique		Calcite	Calcite-orthose
Mesure	Foliation		
	Fracture		
Autres			Puissance environ 2m

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Andriamampihantona, M.J., 1992, Contribution à l'étude du complexe alcalin d'Ambatofinandrahana et de ses minéralisations à lanthanides (Région centrale de Madagascar), Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble I, 174p
- [2] Besairie, H., 1957, La géologie de Madagascar en 1957, Service géologique, 159p
- [3] Besairie, H., 1960, Rapport annuel du service géologique, U.S Geological Survey, 20p
- [4] Bøespflug X., 1990, Evolution géodynamique et géochimique des bassins arrière-arcs. Exemples des bassins d'Okinawa, Delau, et Nord-Fidjien, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 181p
- [5] BONNOT-COURTOIS C., 1981, Géochimie des Terres Rares dans les principaux milieux de formation et de sédimentation des argiles, Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, 251p
- [6] Castor, S.B., 2008, The Mountain Pass rare-earth carbonatite and associated ultrapotassic rocks, California, *The Canadian Mineralogist*, Vol. 46, 779-806
- [7] Collins, A., 2003, Madagascar and the amalgamation of central Gondwana, *Gondwana Research*, Publ. N°9, 3-16
- [8] Cox R. Armstrong R.A., Ashwal LD., 1998. Sedimentology, geochronology and provenance of the Proterozoic Itremo Group. Central Madagascar and implications for pré-Gondwana palaeogeography. *J. Geol.Soc.London*.155, 1009 - 1024.
- [9] Fernandez, A., and Schreurs, G. 2003. Tectonic evolution of the Proterozoic Itremo Group metasediments in central Madagascar. In Dasgupta, S., ed. Proterozoic East Gondwana: supercontinent assembly and breakup. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 206:381–399.
- [10] Fernandez, A.; Schreurs, G.; Villa, I.M.; Huber, S.; and Rakotondrazafy, M. 2004. Age constraints on the tectonic evolution of the Itremo region in central Madagascar. *Precambrian Res.* 123:87–110. *Evolution. Geol. Soc. Am. Abstr. Program* 34:64.
- [11] Fournié L., et Trotterea G.(1968). Notesur un nouvel indice de bastnaésite (Mont Tomy) de la region d'Ambatofinandrahana.
- [12] Handke, M.J., Tucker, R.D. and Ashwal, L.D., 1999. Neoproterozoic continental arc magmatism in west-central Madagascar. *Geology*, 27, pp. 351-354.
- [13] Harker, A., 1932. Metamorphism. Chapman and Hall, London, pp.362.
- [14] Hetzel P., Bataille, D., 2014, Etude de faisabilité de la saisine sur « les enjeux stratégiques des terres rares », *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, Paris, 73p.

- [15] Hulscher B., Ian C.W. Fitzsimons, 1987, Back to the source: shrimp U/Pb ages of zircons from the itremo group and molo sequence of central Madagascar, *Tectonics Special Research Centre*, Publ. N° 6845
- [16] Moine, B., 1974, Caractères de sédimentation et de métamorphisme des séries Précambriennes épizonales a catazonales du centre de Madagascar (Région d'Ambatofinandrahana), Thèse de doctorat, Université Nancy, 300p
- [17] M.SHAW, D., 1964, Interprétation géochimique des éléments en traces dans les roches cristallines, Masson et C<sup>ie</sup>, Paris, 237p
- [18] NDONG F. B., NTOMBA S. M., MESSI E. J., OKIA D., et MVONDO J. O., 2014, Définition structurale des linéaments par traitement d'image satellitaire : cas du massif de Ngovayang (Sud Cameroun), *Afrique Science*, Publ. N° 10, 107 – 112
- [19] Ozer, A., Marion, J.M., Roland, C., Trefois, Ph., 1988, Signification de linéament sur une image spot dans la région Liegeoise, *bulletin de la société Belge de la Géologie*, vol.97, 153-172
- [20] Radelli, L., 1970, Notice explicative de la carte tectonique du socle de Madagascar, Laboratoire de géologie
- [21] Rakotoariniaina A. M. H., 2005, Projet de création d'une unité d'exploitation et de commercialisation de la bastnaésite d'Andakantany Ambatofinandrahana, Mémoire de maîtrise en gestion, Université d'Antananarivo, 95p
- [22] Rasoamalala V., 2000. Le magmatisme syénitique du complexe intrusif d'Ambatofinadrahana. Chimisme et minéralisation en bastnaésite associée. Mémoire de DEA de Géochimie Appliquée, Université de Fianarantsoa.
- [23] Rasoamalala, V., 2009, Les minéralisations en terres rares liées aux syénites et granites d'Ambatofinandrahana, Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, 196p
- [24] Rasoamalala V., Salvi S., Béziat D., Ursule J.-Ph., Cuney M., Parseval Ph., Guillaume D., Moine B., Andriamampihantona J., 2014, Geology of bastnaesite and monazite deposits in the Ambatofinandrahana area, central part of Madagascar: An overview, *Journal of African Earth Sciences*, Publ. N° 94, 128–140
- [25] Ravoniarisoa C., 2002, Contribution à la connaissance de la géologie de la bastnaesite d'Ankaditany Marovoalavo (Région d'Ambatofinandrahana), Mémoire d'ingénieur de géologie ESPA, Université d'Antananarivo., 91p
- [26] Razafimaharavo H., 2006, Contribution à l'étude pétrologique du batholite gabbroïque d'Ifasina, région d'Ambatofinandrahana centre sud de Madagascar, Mémoire d'ingénieur de géologie ESPA, Université d'Antananarivo., 105p

- [27] Razakamanana T, (1990) : \_Les formationsprotérozoïque de Vohidava : un témoin de l'évolution polytectono-métamorphique du Centre-Sud de Madagascar. Thèse de doctorat de Troisième Cycle Université d'Antananarivo, 189p
- [28] Rónadh Cox, Richard A. Armstrong and Lewis D. Ashwal, 1998, Sedimentology, geochronology and provenance of the Proterozoic Itremo Group, central Madagascar, and implications for pre-Gondwana palaeogeography, *Journal of the Geological Society*, Vol. 155, 1009–1024
- [29] Roubeault, M., 1963. Détermination des roches au microscope polarisant. Ed. Lamarre-Pincet, Paris, 363 p.
- [30] Zhang Peishan, Yang Xueming, Tao Kejie, 1995. Mineralogy and Geology of Rare Earths in China. Science Press
- [31] Zouita, F., 1986, Etude de la distribution des terres rares et des autres éléments en trace dans les roches carbonatées du district minier de Bou-Azer-Bleida (Anti-Atlas, Maroc) : conséquences génétiques et variations à l'approche des minéralisations, Thèse de doctorat, 105p



Titre : GEOLOGIE D'ANDOHARANO ET SES MINERALISATIONS EN TERRE RARE  
Auteur : RAZAFINDRAMANGA Soafaranirina Yvette  
E-mail : nirina.faraso@gmail.com  
Tél : +261 34 17 596 27  
Nombre des pages : 76  
Nombre des figures : 53  
Nombre des tableaux : 5  
Nombres des annexes : 10  
Encadreur : RALISON André Bruno  
Co-encadreur : RASOAMALALA Vololonirina

### **Résumé**

La réactualisation des données géologiques et minières sont indispensables pour des travaux de recherches. Il est proposé dans cette étude que le gîte d'Andoharano de la région d'Ambatofinandrahana encastré dans une formation carbonatée se développe dans un milieu silico-alumineux associée à des failles.

Pour ce faire, des traitements de diverses analyses des éléments à partir des diagrammes utilisés et les traitements d'image satellite par l'intermédiaire des logiciels de télédétection, de SIG, de SPO, de Stereonet et de Surfer nous ont permis de mettre en évidence les conditions de formation des gisements de terre rare, le milieu favorable à ces derniers même et les accidents tectoniques comme les failles généralement de direction NW-SE qui sont particulièrement un piège pour la minéralisation. La zone paraît être d'intérêts scientifiques et géologiques mais au niveau teneur en terre rare il paraît ne pas être favorable à une fin d'exploitation minière.

**Mots clés** : Terres rares, Bastnaésite, Monazite, Ambatofinandrahana, Syénite, Granites

### **Abstract**

The updating of geological and mining data is indispensable for research works. It is proposed in this study that Andoharano's deposits in Ambatofinandrahana's region develops in an alumino-silicate environment associated with faults and is embedded in a carbonate formation.

To do so, treatment of various analysis elements from used charts and satellite Image processing through the intermediary of remote sensing software, GIS, SPO, Stereonet and Surfer allowed us to evidence the conditions of formation of rare earth deposits, favorable environment for them and even tectonic faults as generally NW-SE direction which are particularly a trap for mineralization. The area seems to be of geological interest but the metallogenic rare earth content is not favorable to an end mining.

**Keywords**: Rare earths, Bastnaesite, Monazite, Ambatofinandrahana, Syenite, Granites