



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
DOMAINE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

MENTION SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'ENVIRONNEMENT

PARCOURS R.M.E

(Ressources Minérales et Environnement)



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de MASTER

**TELEDETECTION ET
GEOPHYSIQUE APPLIQUEE A
L'EXPLORATION DES GISEMENTS
D'OR DE BESAONJO - MANANJARY**

Présenté par : DAMOSOA Lucia Carmen

Soutenu publiquement le 14 Juillet 2017

Devant les membres du Jury composé de :

- **Président du jury** : Monsieur ANDRIAMAMONJY Solofomampielly Alfred, Maitre de Conférences
- **Encadreur pédagogique** : Madame RASOAMALALA Vololonirina, Maitre de Conférences
- **Encadreur professionnel** : Monsieur RAZANANIRINA Henri Délice, Manager du cabinet MGC
- **Examineurs** : Madame RAHANTARISOA Lydia, Maitre de Conférences
Monsieur RALISON André Bruno, Maitre de Conférences

Remerciements

Au terme de cette étude, je tiens à remercier Monsieur RAHERIMANDIMBY Marson, Professeur Titulaire, Doyen de la Faculté des Sciences qui a bien voulu accepter la réalisation de ma soutenance. Je tiens à remercier également les membres du jury qui ont bien voulu accepter de consacrer du temps pour juger ce travail.

Je voudrais commencer mes remerciements par le Président de jury, Monsieur ANDRIAMAMONJY Solofomampielly Alfred, Maitre de Conférences, Responsable de la Mention Sciences de la Terre et de l'Environnement de la Faculté des Sciences, qui a bien voulu accepter de présider la soutenance de ce mémoire.

Mes sincères remerciements à mes examinateurs Madame RAHANTARISOA Lydia, Maitre de Conférences et Monsieur RALISON André Bruno, Maitre de Conférences malgré vos multiples occupations, vous nous avez fait l'honneur d'accepter à lire et de juger ce travail.

Je tiens ensuite à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadreur pédagogique Madame RASOAMALALA Vololonirina, Maitre de Conférences, qui a bien voulu accepter de m'encadrer dans ce travail de Recherche.

Je dois également remercier mon encadreur professionnel Monsieur RAZANANIRINA Henri Délice, Manager du cabinet Madagascar Géoconsulting d'avoir accepté pour que je puissais faire un stage de 19 mois au sein de son cabinet et de m'avoir encadré. Je tiens donc à remercier mes deux encadreurs pour l'aide et le soutien qu'ils ont apporté. Ce fut pour moi une grande chance d'avoir profité de leurs connaissances dans différents domaines.

Je souhaite remercier également les enseignants chercheurs et tout le personnel au sein de la Mention Sciences de la Terre et de l'Environnement ainsi qu'à l'équipe du cabinet MGC et mes collègues qui ont collaboré vivement à la réussite de ce travail de fin d'études.

Je tiens à remercier cordialement mes parents qui n'ont pas cessé de me soutenir moralement et financièrement jusqu'à l'étape finale de mon parcours étudiant. Mon éternelle reconnaissance pour tous vos sacrifices.

Enfin j'exprime ma grande reconnaissance à ma famille toute entière surtout mes frères et sœurs toute entière. J'ai toujours pu compter sur vous, restons unis et soyons dignes de nos parents. Sachez que mon succès est le vôtre. Vos soutiens m'ont beaucoup encouragé. Nos vifs remerciements à tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire.

SOMMAIRE

Remerciements	i
Sommaire	ii
Liste des abréviations	iv
Acronyme	iv
Listes des figures	v
Listes des tableaux	vi
Listes des annexes	vii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I GENERALITES	3
I-1- APERÇU GEOLOGIQUE DE MADAGASCAR	3
I-2- PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE	6
I-3- CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D’ETUDE	7
I-4- PROPRIETES DE L’OR	9
I-5- DIFFERENTS TYPES DES GITES D’OR MONDIAUX.....	12
I-6- CLASSIFICATION DES GITES AURIFERES A MADAGASCAR.....	13
I-6-1. Gites primaires.....	13
I-6-2. Gites secondaires.....	14
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES	16
II-1- TRAVAUX ANTERIEURS.....	17
II-2- TRAVAUX DE TERRAIN.....	17
II-3- TRAVAUX EN LABORATOIRE.....	19
II-3-1. Apport de la télédétection	19

II-3-2. Logiciel ENVI 4.7	19
II-3-3. Apport de la géophysique	22
II-3-4. Logiciel Geosoft Oasis Montaj	22
II-3-5. Données géochimiques	27
II-3-6. Logiciel ArcGIS 10.4	27
CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATION	28
III-1- PETROGRAPHIE DES ROCHES ENVIRONNANTES	28
III-1-1- Filon, veines et galets de Quartz	28
III-1-2- Les dykes gabbroïques et doléritiques	30
III-1-3- Paragneiss et schistes	31
III-2- RESULTATS STRUCTURAUX	32
III-2-1-Déformation ductile	32
III-2-1-1. Structures précoces (plis isoclinaux : anticlinaux et synclinaux)....	32
III-2-1-2. Structures tardives (plis antiformes et synformes)	34
III-2-2. Déformation cassante	36
III-2-2-1. Les cisaillements principaux C1 et C2	38
III-2-2-2. Coupe en deux dimensions (2D)	40
III-2-2-3. Les fractures de Riedel	42
III-3- TYPES DE MINERALISATION A BESAONJO	45
III-3-1- Minéralisation primaire d'or contrôlée par des structures précoces et tectoniques.....	45
III-3-2. Minéralisation secondaire associée à des structures tardives et paléochenal	48
III-4- RESULTATS GEOCHIMIQUES ET POTENTIEL EN OR DE LA ZONE	53
III-5- ECONOMIE DE L'OR	56

CHAPITRE IV DISCUSSIONS	58
CONCLUSION	61
Perspectives	62
Références bibliographiques	64
Références Webographiques	68
ANNEXES	I
RESUME	

LISTES DES ABREVIATIONS

- Ag : Argent
- As : Arsenic
- AS : Analytic signal
- ASTA: Analytic Signal of Tilt Angle
- Au: or
- BD : Base des Données
- E : Est
- HD: Horizontal Derivative
- HD_TDR: Total Horizontal Derivative of Tilt Derivative
- m: mètre
- MGC : Madagascar GeoConsulting
- N : Nord
- nT : nano Tesla
- ppm : particule par million
- ppb : particule par billion
- rad: radian
- S: Sud
- TA ou TDR: Tilt Angle ou Tilt Derivative
- Te : Tellurium
- THDR : Total Horizontal Derivative

- TMI: Total Magnetic Intensity
- VD: Vertical Derivative
- W : Ouest

ACRONYMES

- ASTGTM: The ASTER Global Digital Elevation Model
- Biomasse : végétation chlorophyllienne
- BIF : Banded Iron Formation (quartzite à magnétite)
- BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus
- Ga : Giga année ou Milliard d'année
- MNT : Modèle Numérique de Terrain
- OLI : Operational Land Image
- PGRM : Projet de Gouvernances des Ressources Minérales
- SRTM: Shuttle Radar Topography Mission
- SWIR: Short Wave Infrared Red
- TIRS : Thermal Infrared Sensor
- UTM: Universal Transverse Mercator
- VNIR: Visible Near Infrared Red

LISTES DES FIGURES

- **Figure 01** : Carte tectono - métamorphique de Madagascar
- **Figure 02** : Relation entre la lithologie du Craton Dharwar de l'Inde et du socle cristallin de Madagascar
- **Figure 03** : Carte de localisation de la zone d'étude
- **Figure 04** : Carte géologique du sous- domaine Masora
- **Figure 05** : Carte géologique de la région d'étude
- **Figure 06** : Les variétés de couleurs d'or selon son alliage avec d'autres métaux
- **Figure 07** : Organigramme de la méthodologie
- **Figure 08** : Quelques matériaux du terrain : **A)** Boussole, **B)** Batée, **C)** marteau et **D)** loupe
- **Figure 09** : **A)** système additif et **B)** système soustractif

- **Figure 10** : Spectres de réflectance et d'absorption
- **Figure 11** : Relation entre le vecteur champs magnétiques, ses composantes et les variables des filtres mathématiques
- **Figure 12** : Graphes montrant les courbes correspondant aux filtres **a)** Modèle géologique, **b)** Anomalie gravimétrique, **c)** Tilt angle, **d)** THDR, **e)** Theta map, **f)** Vertical derivative, **g)** Analytic signal
- **Figure 13** : **A)** blocs des quartz, **B)** quartz laiteux,
- **Figure 14** : **A)** quartz à grains fins à oxyde de fer (**1**); **B)** Veine de quartz très fracturé à oxyde de fer (**1**), à feldspath (**2**) et à sulfure (**3**)
- **Figure 15** : Galets de quartz arrondis (**1**) et anguleux exploités (**2**) par les villageois
- **Figure 16** : Dykes gabbroïques et doléritiques, **A)** affleurement des dykes, **B)** affleurement du gabbro, **C)** affleurement de dolérite
- **Figure 17** : Schistes interstratifiés avec des veines de Quartz
- **Figure 18** : Carte de foliations, des affleurements de BIF et des structures précoces
- **Figure 19** : Carte de foliations et des structures tardives
- **Figure 20** : Carte magnétique HD_TDR montrant les déplacements de zones de cisaillement principal
- **Figure 21** : Carte géologique et coupe en deux dimensions de Besaonjo
- **Figure 22** : carte des différents types de fractures de Riedel
- **Figure 23** : **A)** Rosace directionnelle des fractures de Riedel, **B)** Modèle géométrique des fractures de Riedel
- **Figure 24** : Carte montrant la relation entre déformations ductiles, fractures et minéralisation aurifère
- **Figure 25** : **A)** Carte de la dérivée de Tilt Derivative, **B)** représentation en trois dimensions de la coupe géologique de Besaonjo
- **Figure 26** : Carte d'U+Th montrant l'accumulation des sédiments
- **Figure 27** : Carte montrant la relation entre les structures tardives et minéralisation aurifère secondaire
- **Figure 28** : Relation entre les structures tardives et les nouvelles limites du paléochenal
- **Figure 29** : Carte d'échantillonnage et du potentiel en or
- **Figure 30** : Variation de prix de l'or en dollar par once en 2003 à 2015

- **Figure 31** : Variation de prix de l'or en dollar par once en Mars 2012 à Mars 2017

LISTES DES TABLEAUX

- **Tableau 01** : Classification de l'or suivant sa couleur, son carat et son alliage avec d'autre métaux
- **Tableau 02** : Les compositions colorées usuelles obtenues à partir des données Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI
- **Tableau 03** : Les rapports des bandes pour les minéraux d'altération hydrothermale sur Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI
- **Tableau 04** : Tableau montrant les noms, les formules et les caractéristiques des quelques filtres mathématiques
- **Tableau 05** : Résultats d'analyses géochimiques du PGRM 2008
- **Tableau 06** : Résultats d'analyses des échantillons par ICP-MS (Inductively Coupled plasma- Mass Spectrometry)
- **Tableau 07** : Prix de l'or à Madagascar

LISTES DES ANNEXES

- **Annexe 01** : Tableau des caractéristiques des satellites Landsat 7 ETM+ et Landsat 8
- **Annexe 02** : Les différentes courbes obtenues à partir du TMI, VDR, THDR, AS, TDR et THDR_TDR
- **Annexe 03** : Tableau des données de terrains
- **Annexe 04** : Ancien site d'exploitation artisanale à l'Est de Besaonjo
- **Annexe 05** : Ancien site d'exploitation artisanale Nord Est de Besaonjo
- **Annexe 06** : Ancien site d'exploitation artisanale au Sud de Besaonjo
- **Annexe 07** : Limite Est de la terrasse de Besaonjo
- **Annexe 08** : Les différents types de placers aurifères
- **Annexe 09** : Les différents pièges pour le dépôt de l'or au niveau de la rivière :
 - A)** perturbation de courant d'eau, **B)** élargissement du cours d'eau,
 - C)** présence de flux de sables lourds et **D)** méandre

INTRODUCTION

La géologie de Madagascar est liée à l'orogénèse Panafricaine tardive. Ce phénomène a affecté la quasi-totalité du pays et était à l'origine des différentes structures majeures contrôlant la mise en place des différentes minéralisations y compris l'or. Le contexte géologique de Madagascar est favorable à la minéralisation aurifère. Les gisements secondaires sont plus répandus que les gisements primaires à cause du climat tropical du pays responsable de l'érosion des roches hôtes minéralisées. Malgré la difficulté de leurs méthodes d'exploration, la nouvelle technologie incluant les méthodes à distance et indirecte permet d'identifier à la fois les gisements primaires et secondaires. Ceci nous a amené à choisir le thème de mémoire qui s'intitule : « **TELEDETECTION ET GEOPHYSIQUE APPLIQUEE A L'EXPLORATION DES GISEMENTS D'OR DE BESAONJO – MANANJARY** ». Cette étude a pour objectif d'identifier les gites primaires et les accumulations secondaires à l'aide d'une approche structurale afin de découvrir la relation entre ces minéralisations et les éléments structuraux la contrôlant. Elle est basée sur le traitement et l'interprétation des données satellitaires et géophysiques. Ceci mène à une question : quels sont les contrôles tectoniques responsables de la mise en place d'une minéralisation aurifère à Besaonjo ?

Pour mieux cerner le problème, les travaux entrepris incluent une étude structurale de la zone d'étude basée sur le traitement et interprétation d'images satellites et des données géophysiques et géochimiques ainsi que l'étude pétrographique.

Ce travail est divisé en quatre chapitres :

En premier lieu on va parler des généralités sur l'aperçu géologique de Madagascar, la présentation et contexte géologique de la zone d'étude, quelques propriétés de l'or ainsi que la classification des gites d'or.

Deuxièmement, on va présenter les matériels et méthodes incluant les travaux antérieurs, les travaux de terrain et les travaux en laboratoire.

Ensuite, on va interpréter des résultats pétrographiques, structuraux et géochimiques ainsi que les types de minéralisation aurifère à Besaonjo. Il inclut également l'économie de l'or.

Après on va continuer à la discussion des résultats précédents. Enfin, on termine avec les perspectives avant de passer à la conclusion.

CHAPITRE I

GENERALITES

I-1- APERÇU GEOLOGIQUE DE MADAGASCAR

Madagascar faisait partie du Gondwana de l'Est avec l'Inde et l'Antarctique. L'étude géodynamique du pays a montré qu'il se divise en deux grandes parties. Le socle Précambrien qui couvre les deux tiers (2/3) de sa superficie et le reste par des terrains sédimentaire et volcanique d'âge Carbonifère Supérieur à quaternaire. Ce socle cristallin comprend également des grandes zones de cisaillement.

Il est constitué de six (6) grands domaines géologiques (**figure 01**) : le domaine d'Antongil-Masora, domaine d'Antananarivo incluant le groupe de Tsaratanana, domaine Androyen-Anosyen, domaine d'Ikalavavony, de domaine Vohibory, et celui de Bemarivo (*J.Y Roig et al, 2012*).

Madagascar est composé de trois (3) grandes suites magmatiques. Elles sont classifiées respectivement suivant leurs âges (*J.Y Roig et al, 2012*) :

➤ **Suite de Dabolava** datée de 1 Ga est constituée par un faciès basique avec de gabbro et diorite et un faciès intermédiaire à acide formé par de tonalite et de granite. Cet arc magmatique est à la limite entre le domaine d'Antananarivo (Archéen) et le domaine Anosyen- Androyen d'âge Paléoproterozoïque (*J.Y Roig et al, 2014*). Une subduction vers l'Est a réuni les domaines d'Ikalavavony et Anosyen avant 1 Ga.

➤ **Suite d'Imorona-Itsindro** d'âge Néoproterozoïque (820 à 760 Ma) est présentée par un faciès ultrabasique du type Ambodilafa (Harzburgite, pyroxenite et peridotite), un faciès basique de type Imorona (granite et orthogneiss felsique), un faciès intermédiaire à acide de type Itsindro (granite et orthogneiss mafique). C'est un arc magmatique dû à la distension intracontinentale (extension à l'intérieur de continent).

➤ **Suite d'Ambalavao- Kiangara- Maevarano** datée du Cambrien (570 à 520 Ma) dominée par des granites. Il y a deux types de granite selon l'évènement tectonique : les granites pré-tectoniques d'Anosyen- Androyen vers 570 Ma et les granites syn- post tectoniques vers 540 à 520 Ma. Ce dernier est lié à l'orogénèse Pan Africaine. Ainsi celle-ci marque la fin de l'histoire du socle Précambrien de Madagascar.

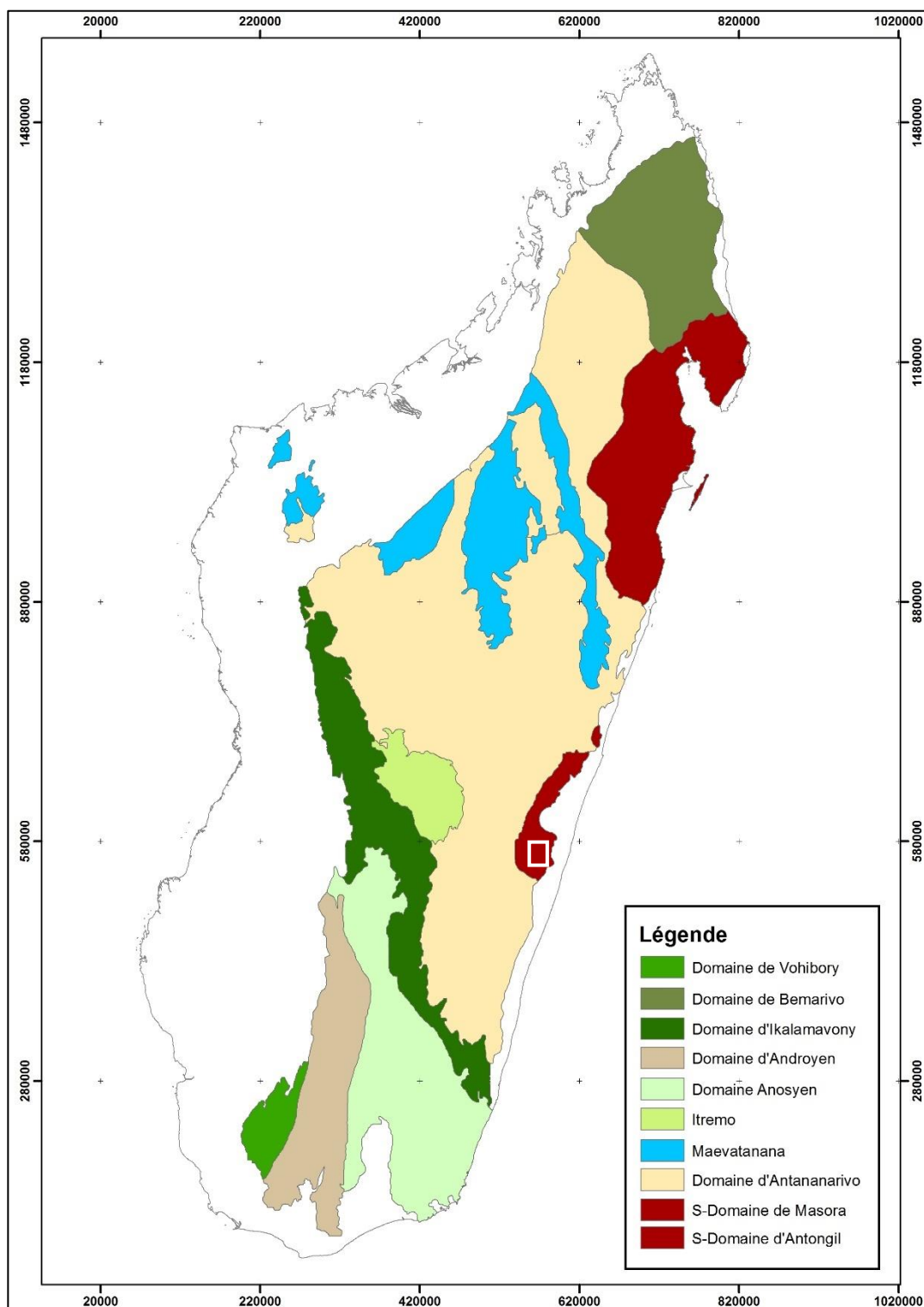


Figure 01 : Carte tectono - métamorphique de Madagascar (*J.Y Roig, 2012*)

Quelques études ont mentionné que le bloc d'Antananarivo et le bloc d'Antongil-Masora sont séparés par la suture de Betsimisaraka, le premier est un fragment de l'Afrique de l'Est et la deuxième appartient au craton de Dharwar de l'Inde (*Tucker et al, 2011 ; Raharimahefa et al, 2005*). Mais d'après des études récentes le domaine d'Antananarivo et le domaine d'Antongil-Masora appartiennent au « Greater Dharwar Craton » (**figure 02**). Antongil-Masora faisait partie du vieux noyau de ce craton. Il est entouré des formations Néoarchéennes (y compris le domaine d'Antananarivo) résultat d'un phénomène d'accrétion (*J.Y Roig et al, 2012 ; J.Y Roig et al, 2014*). Ceci suppose que ces blocs d'Antongil-Masora et Antananarivo étaient unis depuis 3 Ga et amène à l'annulation de la suture de Betsimisaraka dans quelques documents récents (*J.Y Roig et al, 2012 ; J.Y Roig et al, 2014*).

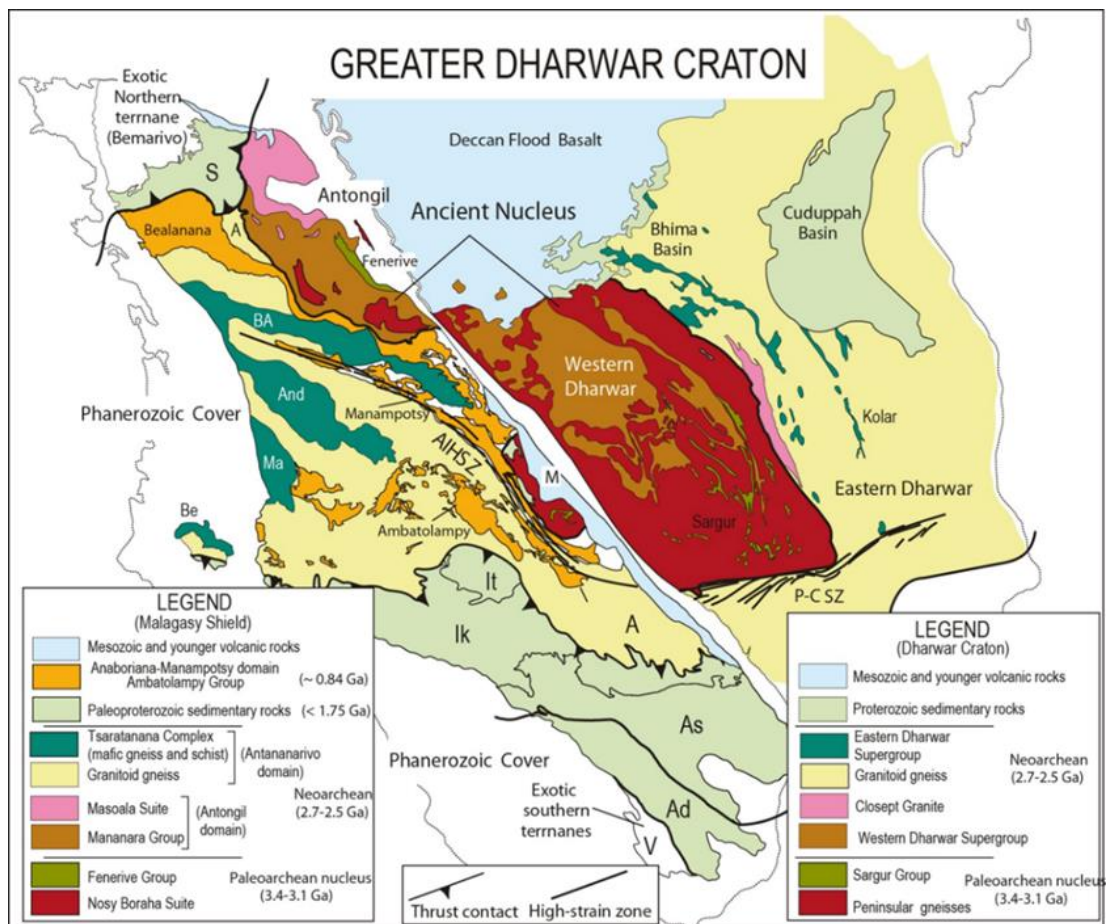


Figure 02 : Relation entre la lithologie du Craton Dharwar de l'Inde et du socle cristallin de Madagascar (*R.D Tucker et al. (2011a) and J.Y Roig, 2012*)

I-2- PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude est délimitée par les coordonnées Laborde suivantes :
X 571585 (m) à 576030 (m) et **Y** 562675 (m) à 557500 (m).

I-2-1. Voie d'accès

La zone d'étude se trouve à environ 70km de Mananjary. Elle est accessible par les routes nationales RN7, RN25, RN11, RN24 menant à la commune rurale de Vohilava et 20 km de piste jusqu'à Besaonjo. Elle est accessible seulement aux véhicules 4x4 (*figure 03*).

I-2-2. Limite administrative

La zone d'étude appartient à la région Vatovavy Fitovinany, au district de Mananjary et à la commune rurale de Morafeno. La carte suivante montre sa localisation par rapport aux communes environnantes.

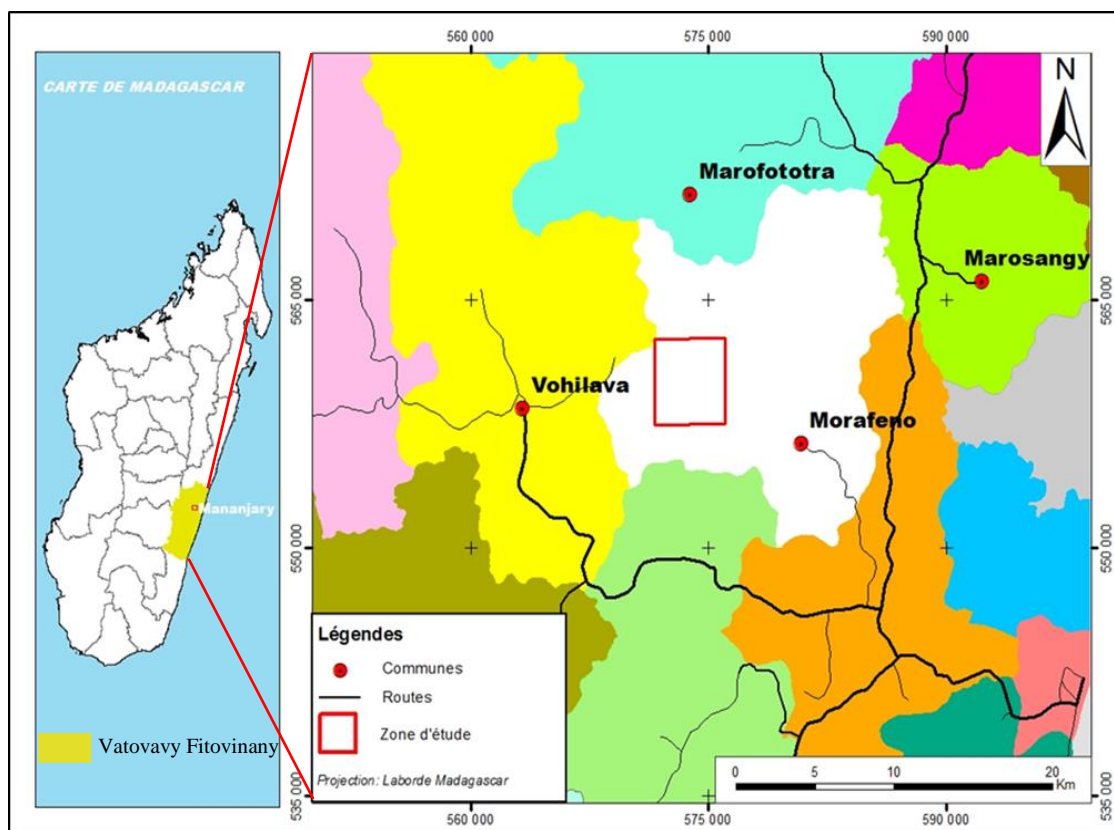


Figure 03 : Carte de localisation de la zone d'étude (source : Base de Données Atlas)

I-3- CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Du point de vue géologique, la zone d'étude appartient au domaine d'Antongil - Masora et au sous domaine de Masora. Il a été affecté par des phases de déformations (*Raharimahefa et al., 2005*) et par du métamorphisme intense pendant le Néoproterozoïque tardif (*figure 04*).

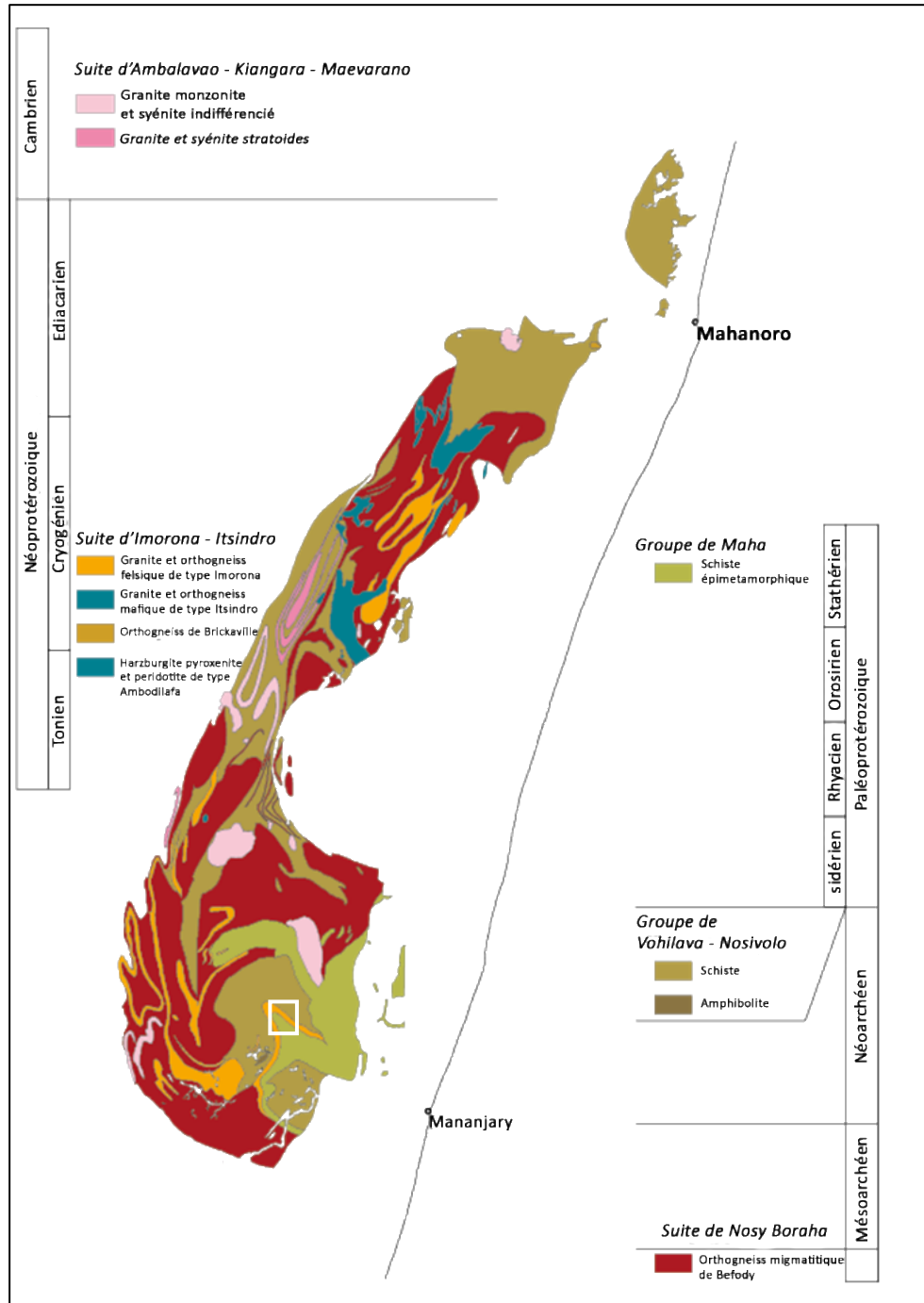


Figure 04 : Carte géologique du sous-domaine de Masora (J.Y Roig, 2012)

En général, ce sous domaine est constitué de trois grands principaux groupes tels que le groupe de Vohilava, le groupe de Maha, le groupe de Mananjary et aussi par une formation quaternaire (*figure 05*).

I-3-1. Groupe de Vohilava d'âge Néoarchéen

Il est composé principalement de paragneiss à biotite et à micaschiste, avec ou sans graphite (*nANBv*). Des formations riches en fer (BIF-Itabirite), de quartzites, de schistes à hornblende, de chloritoschistes, de schistes à trémolite ainsi que de roches ultrabasiques sont présents dans le groupe de Vohilava. L'orthogneiss de Befody a été mis en place pendant le Mésoarchéen.

I-3-2. Groupe de Maha d'âge Paléoproterozoïque

Il est dominé par du micaschiste avec ou sans graphite, de gneiss quartzofeldspathique et de formation riche en graphite (*pPMHm*). Il est aussi marqué par la présence de deux grandes suites magmatiques telles que :

- La suite d'Imorona-Itsindro d'âge Néoproterozoïque (820- 760 Ma), à gneiss migmatitique (*nPgsm*) et de granitogneiss (*nPIIhg*) ;
- La suite d'Ambalavao datée de Paléozoïque (570-520 Ma) à syenogranite (*Easg*).

I-3-3. Groupe de Mananjary d'âge Crétacé supérieur

Il est composé de roches volcaniques telles que le Rhyolite (*CrMgr*) et le Basalte (*CrMsb*).

I-3-4. Formation quaternaire

Elle englobe toutes les formations récentes telles que les alluvions indifférenciées et les dunes sableuses (*Qd*).

Les formations géologiques présentes dans la zone d'étude sont le paragneiss (groupe de Vohilava), le micaschiste (groupe de Maha), et le granitogneiss (appartenant à la suite d'Imorona – Itsindro)

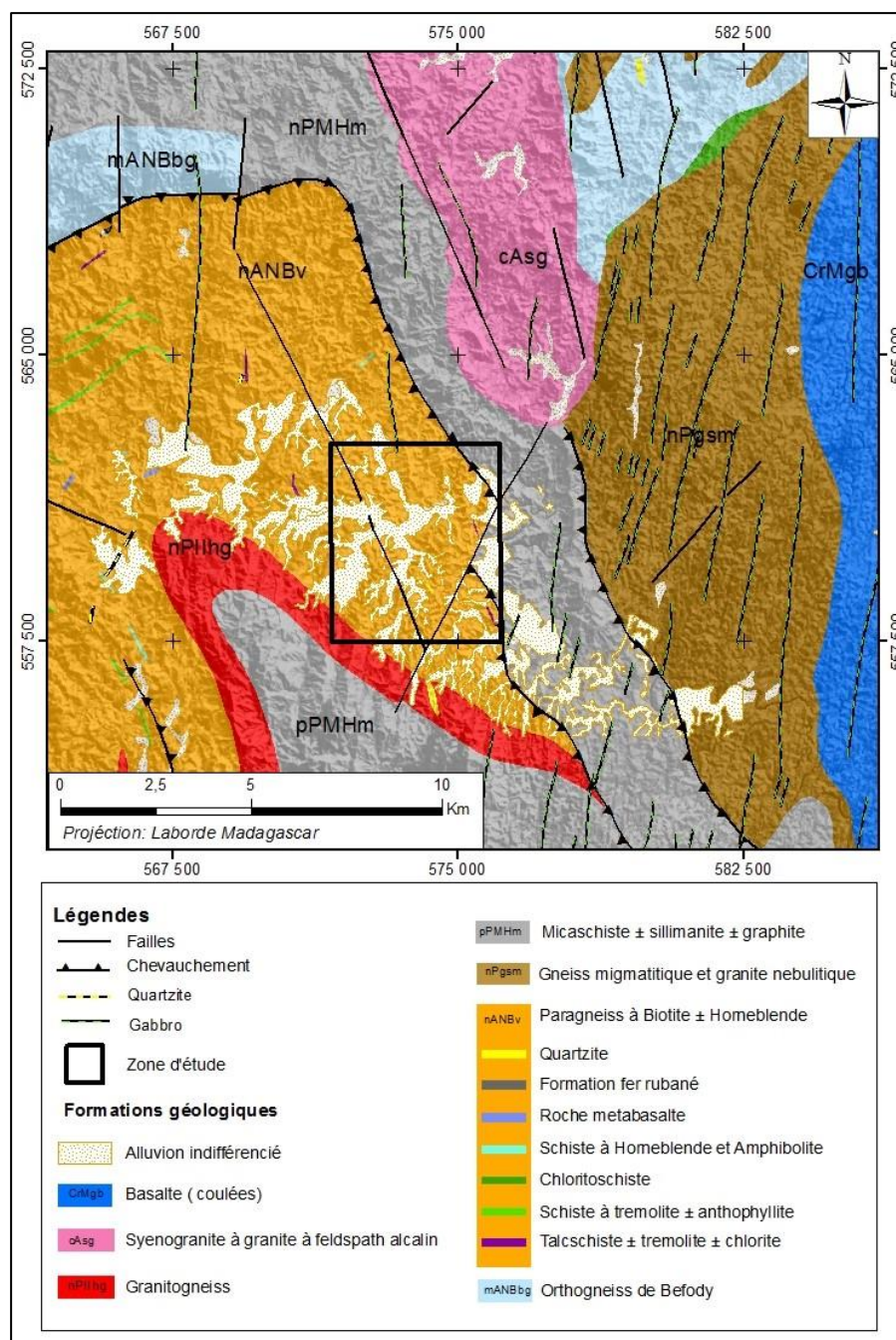


Figure 05 : Carte géologique de la région d'étude (*extrait de la carte de J.Y Roig, 2012*)

I-4- PROPRIETES DE L'OR

D'après le tableau de Mendeleïev, l'or appartient au bloc D. Il se situe à la sixième période ($n = 6$) et à la onzième colonne. Sa configuration de valence est $5d^9 6s^2$. Son numéro atomique est 79 avec une masse atomique de $196, 9655 \text{g.mol}^{-1}$. Son point de fusion est 1064°C ainsi que son point d'ébullition est de 3080°C .

L'or est plus malléable et plus ductile de tous les métaux. Il est aussi un bon conducteur thermique et électrique ; il résiste aussi à l'action de nombreux produits chimiques. L'or se présente sous plusieurs couleurs après son alliage avec d'autres métaux (*figure 06*). Il existe un alliage naturel comme l'électrum et les alliages artificiels (l'or jaune, blanc, gris, rose et rouge) ainsi que les couleurs exotiques de l'or (l'or noir, bleu et violet).

Tableau 01 : Classification de l'or suivant sa couleur, son carat et son alliage avec d'autre métaux

COULEURS	CARATS	COMPOSITIONS PRINCIPALES
Or jaune	22	91,7% Au + 5% Ag + 2% Cu + 1,3% Zn
	18	75% Au + 12,5% Ag + 12% Cu
	14	58,3% Au + 11,5 à 25% Ag + 11,5 à 23% Cu + 2 à 7% Zn
	9	37,5% Au + 12,1% Ag + 44,4% Cu + 6% Zn
Or blanc	20	83,3% Au + 16,7% Ag
	18	75% Au + 18,5% Ag + 1% Cu + 5,5% Zn
	14	58,3% Au + 17% Ag + 17% Cu + 7,7% Zn
	9	37,5% Au + 5% Ag + 62,5% Cu
Or gris	18	75% Au + 17% Fe + 8% Cu
Or rose	18	75% Au + 5% Ag + 22,5% Cu + 2,75% Zn
	14	58,3% Au + 24,5% Ag + 17,2% Cu
	9	37,5% Au + 42,5% Ag + 20% Cu
Or rouge	18	75% Au + 25% Cu
	14	58,3% Au + 32,5% Cu
	9	37,5% Au + 55% Cu + 7,5% Ag
Or vert ou électrum	18	75% Au + 25% Ag
	14	58,3% Au + 32,5% Ag + 9% Cu + 0,3% Zn
Or noir	18	75% Au + 17% Fe + 8% Cu + traitement de surface au rhodium noir
Or bleu	18	75% Au + 24,4% Fe + 0,6% Ni + traitement thermique d'oxyde de fer
	11	46% Au + 54% In
Or violet	19	79% Au + 21% Al

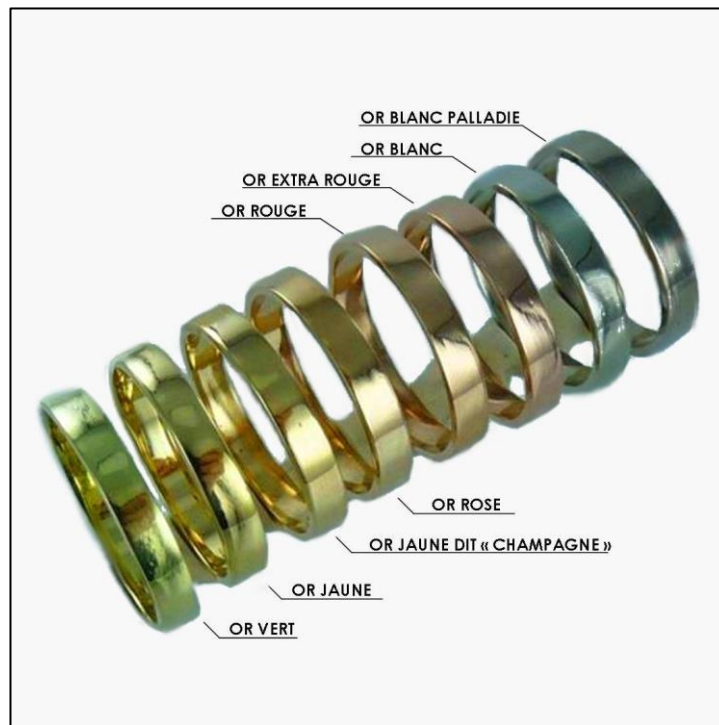


Figure 06 : Les variétés de couleurs d'or selon son alliage avec d'autres métaux (www.eleonaure-com-couleur-or.fr)

L'or a une affinité avec les éléments suivant : l'arsenic, le fer, le calcium, le bismuth, le silicium et le baryum. Il est parfois associé aux minéraux sulfurés comme la pyrite (FeS_2), le chalcopryrite (CuFeS_2), la pyrrhotine (Fe_{1-x}S). Il se trouve souvent dans les filons ou veines de quartz ou associé à ces sulfures métalliques sous forme d'inclusion.

Les principaux utilisateurs de l'or sont la bijouterie, la banque, l'horlogerie, l'orfèvrerie, la fabrication des appareils électroniques et les dentistes. Et les principaux pays producteurs de l'or sont l'Afrique du Sud, les Etats Unis d'Amérique, l'Australie, l'Amérique centrale, l'Inde, la Chine et le Japon.

Au niveau de la production aurifère mondiale, on peut dire que Madagascar ne figure pas parmi les producteurs à cause de l'absence de statistique officielle sur l'exportation du métal jaune.

I-5- DIFFERENTS TYPES DES GITES D'OR

I-5-1. Gites hydrothermaux

Une minéralisation primaire d'or est associée à une activité hydrothermale contrôlée par des fractures, des failles et des zones de cisaillements. L'or se trouve piégé dans des veines ou filons de quartz hydrothermaux. On distingue trois types de gites hydrothermaux :

- *Les gites épithermaux* sont mis en place sous une température de 150 à 300° C et à une profondeur allant de la surface jusqu'à 2 km dans un régime tectonique d'extension et caractérisés par des veines de quartz et des réseaux des filons associés aux minéraux de calcite, kaolinite, alunite, chlorite, épidote et pyrite.

- *Les gites mésothermaux* se forment dans des terrains métamorphiques de faciès schiste vert à faciès amphibolite inférieur de tous âges à une profondeur de 2 à 4,5 km et à une température de 200 à 400 ° C. Ces gites constituent également des réseaux filoniens qui s'étendent sur des grandes distances au sein des roches volcaniques, plutoniques et sédimentaires déformés et métamorphisés. Ils se trouvent dans des cadres tectoniques de compression. Ils sont associés aux contextes structuraux ductiles – cassants plus précisément liés aux zones de cisaillement et aux plis. Les filons se trouvent dans des zones de cisaillement, des failles, des fractures d'extension. Ils sont caractérisés par des minéraux tels que quartz, calcite, pyrite, tourmaline, talc, scheelite, fuschite, arsénopyrite, mica et hornblende.

- *Les gites hypothermaux* se forment sous une température supérieure à 400°C et à une profondeur supérieure à 5 km. Ils sont caractérisés par la présence du grenat, de la magnétite, de la pyrrhotite, du pyroxène, d'amphibole, de la sillimanite, du disthène et du mispickel.

I-5-2. Gites secondaires ou placers

Ils résultent de l'érosion d'anciens gites d'or par les rivières. L'or se dépose aux endroits où le courant est le plus faible, comme à l'intérieur des coudes des méandres et en aval des obstacles.

I-6- CLASSIFICATION DES GITES AURIFERES A MADAGASCAR

Les anciens chercheurs ont classifié les gites aurifères de Madagascar en gites primaire et secondaire.

I-6-1. Gites primaires

La plupart de ces gites se trouve dans les terrains métamorphiques. En général, l'or se trouve dans les veines ou filons de quartz discontinus ou disséminé dans les schistes cristallins. D'après les travaux de synthèses effectués par le BGRM (1985), on distingue trois types de gites primaires selon l'âge de formations encaissantes. Ce sont les gites appartenant au domaine Archéen, les gites du Protérozoïque et les gites liés à la tectonique Permo-triasique.

➤ *Gites appartenant au domaine Archéen*

Ils sont les plus nombreux à Madagascar. La minéralisation aurifère se trouve dans le système des veines ou filons interstratifiés concordants dans des formations métamorphiques. Ces veines et filons sont associés à :

- Des séries de roches amphiboliques basiques. Par exemple le cas d'Andriamena, Maevatanana, Alaotra et Ampasary (Mananjary) ;
- Des quartzites à magnétites comme à Andriamena, Maevatanana, Alaotra ;
- Des séries silico-alumineuses constituées par de quartzites, gneiss, migmatites, micaschistes alumineux et souvent graphiteux. C'est le cas d'Ambatolampy- Andriba et de la région Ouest d'Antananarivo, série de Sahantana et de Vavatenina, plus accessoirement séries de Maha et de Vohilava-Ampasary et Sud- Est.
- Des filons péribatholitiques, des stockwerks est une dissémination étendue dans les roches métamorphiques grâce aux intrusions granitoïdes tardives affectant localement les faciès cités précédemment. L'interface des phénomènes intrusifs avec les anciennes séries porteuses constitue le métallotecte le plus favorable

➤ *Gîtes du Protérozoïque*

Ils sont souvent associés aux faciès à micaschistes ou à quartzite de la série SQC « Schisto-Quartzo-Calcaire », actuellement connue dans la nouvelle cartographie sous le nom de groupe d'Ikalavony transformés soit par un métamorphisme régional soit par un métamorphisme de contact intrusif. Ils apparaissent le plus souvent sous forme de disséminations de sulfures aurifères telles que la pyrite, l'arsénopyrite, pyrrhotite... Les deux cas les mieux connus sont :

- La région de Betsiriry, à l'Est de Miandrivazo, où les indices aurifères se trouvent dans la zone de passage entre les gneiss migmatitiques et la série épimétamorphique « Schisto-Quartzo-Dolomitique ».

- La région d'Itea, au Sud-Ouest d'Ambositra, où les indices d'or sont localisés dans des formations métamorphiques de contact. Ils s'alignent dans des formations plus ou moins silicifiées bordant le massif granitique intrusif d'Itea.

➤ *Gîtes liés à la tectonique Permo-triasique*

Ces gîtes se présentent sous forme des filons hydrothermaux à remplissage quartzo-barytiques de fractures, avec de l'or natif et sulfures associés. Ils ne se rencontrent que sur la bordure socle-sédimentaire de l'extrémité Nord de Madagascar, plus précisément à Andavakoera.

I-6-2. Gîtes secondaires

Ils résultent de l'altération des gîtes primaires due aux phénomènes mécaniques et/ou chimiques, et de la reconcentration de l'or par les eaux de surfaces (fleuves, rivières, ruisseaux). On distingue trois types de gîtes secondaires ou placers aurifères: placers résiduels, placers éluvionnaires et placers alluvionnaires.

➤ *Les gîtes résiduels et éluvionnaires*

Il s'agit d'altération mécanique des roches où l'or se concentrent près de la zone d'altération, sans déplacement (gîtes résiduels) ou avec une mobilisation à faible distance le long des pentes (gîtes éluvionnaires).

Le transport des éléments lourds tels que l'or à quelques distances du gîte primaire ou du gîte résiduel conduit à une concentration éluvionnaire aurifère sous l'effet du lessivage météorique et de la gravité.

Dans ce cas, la limite des roches saines présente la plus forte teneur, plus précisément au niveau de la base de profil d'altération latéritique. En effet, l'exploitation des gîtes éluvionnaires est intéressante puisqu'il est facile à exploiter.

➤ *Les gîtes alluvionnaires*

Ils résultent de la concentration des métaux dans les alluvions après un transport très significatif par des cours d'eau à une certaine distance selon leur taille, densité et dureté. L'or se dépose aux endroits où le courant est le plus faible, comme à l'intérieur des coudes des méandres et en aval des obstacles.

- *Les gîtes alluvionnaires anciens ou paléoplacers ou paléochenal*

Ils résultent également du démantèlement de la latérite sous l'effet des agents de transport, associées aux phénomènes physiques (la hauteur, les précipitations et la dynamique gravitationnelle), et se déposent dans les talwegs et leurs voisinages. Des terrasses surélevées le long des vallées sont formées par des alluvions aurifères plus ou moins consolidées, et entaillées par les cours d'eau actuels.

- *Les gîtes alluvionnaires actuels*

Ils sont enrichis en or soit par le démantèlement des terrasses anciennes en amont soit directement par des gîtes primaires ou éluvionnaires érodés. Ils sont marqués par des lits actuels de cours d'eau constitués de sable et de graviers. Ils sont actuellement les plus activement exploités par les orpailleurs à cause de leur facilité d'exploitation.

CHAPITRE II

MATERIELS ET METHODES

La figure suivante montre l'organigramme de la méthodologie à suivre pour la réalisation de cette étude.

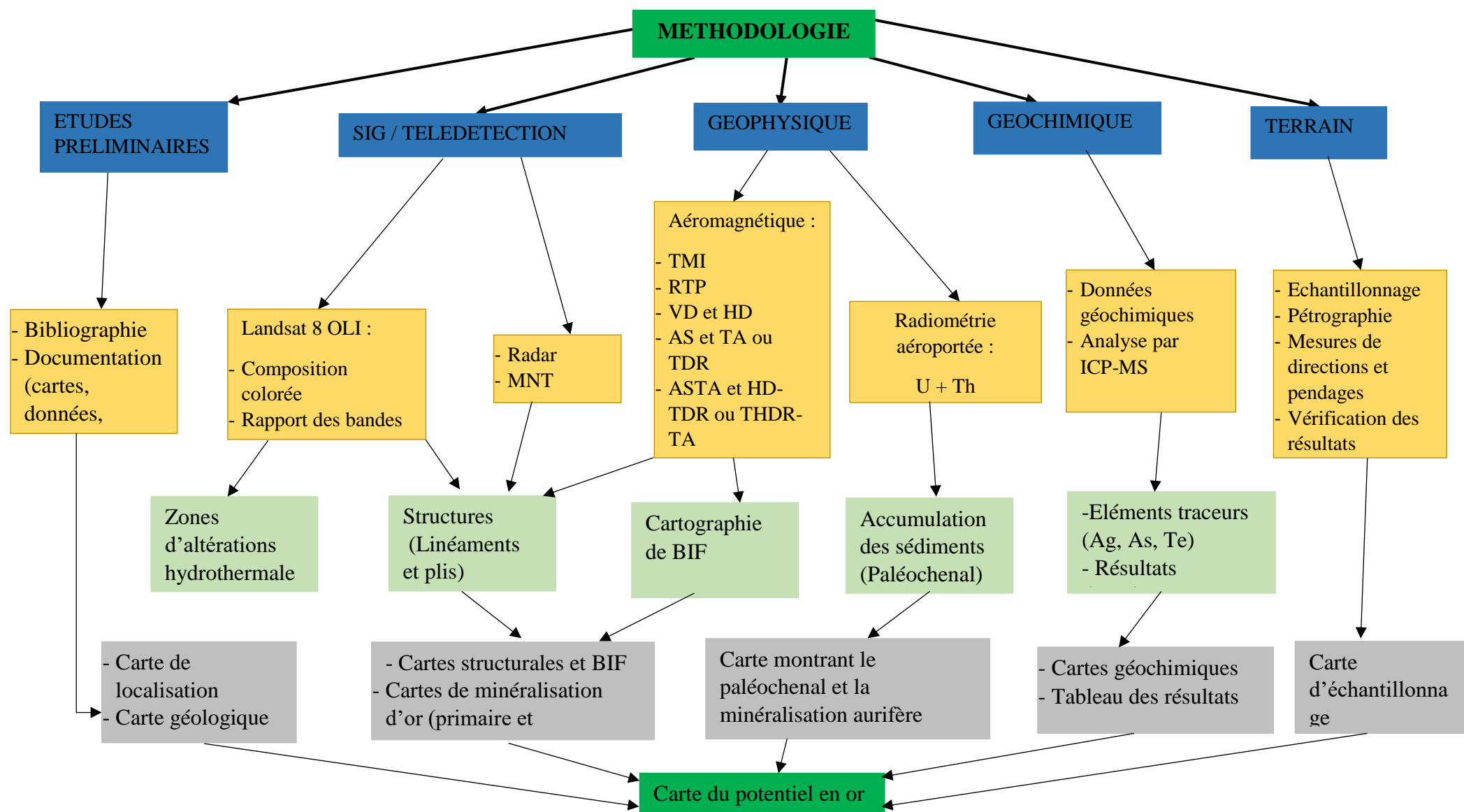


Figure 07 : Organigramme de la méthodologie

Les travaux ont nécessité des études antérieures et des collectes des données ainsi que l'utilisation des matériels et données suivants :

- Des matériels de terrain tels que boussole, loupe, GPS, marteau, aiguille aimantée, appareil photographique, sac à échantillon, batée, carnet de note et carte géologique ;
- Des images satellites à l'occurrence des images Landsat 8 OLI, radar JERS (résolution de 12,5 m) et des modèles numériques de terrain (MNT) dont SRTM (100 m de résolution) et ASTGTM (résolution 15 m) ;
- Des données géophysiques aéroportées (magnétométrie et radiométrie) et résultats d'analyse chimique du PGRM ont été utilisées ;
- Les logiciels ENVI 4.7, Geosoft Oasis Montaj et ArcGIS 10.4

II-1- TRAVAUX ANTERIEURS

Des études bibliographiques et webographiques ont été faites sur la zone d'étude et le sujet traité. Les données hydrographiques et géologiques ont été extraites de la carte topographique feuille N° R52 et de la carte géologique du PGRM 2012 feuille N°R52 de Marofototra / Vohilava à une échelle de 1/100000 respectivement. Les indices de minéralisation provenaient de la base de données SIGM du ministère des Mines et de la carte de la Mission Soviétique en 1980 et des cartes du PGRM. Concernant les images satellites Landsat 8 OLI (1580752015207LGN00) prise en 2015, elles ont été téléchargées du site de la NASA. En outre, une image radar (référence o209336nn8b), des modèles numériques du terrain (SRTM 46_17 et ASTGTM S21E047), une carte de classification de la zone d'étude et une base des données Atlas étaient disponibles au cabinet MGC. Des cartes magnétiques et radiométriques ont été produites par le cabinet.

II-2- TRAVAUX DE TERRAIN

L'orientation des cartes, les directions des formations et des failles ainsi que les pendages ont été prises à l'aide d'une boussole tandis que les points d'échantillonnage et les coordonnées des affleurements ont été enregistrés dans un GPS et notés dans un carnet simultanément. Des cartes géologiques préalablement préparées ont été mise à notre disposition.

Concernant la collecte d'échantillon de roches, un effort particulier a été fait pour avoir des fragments de roches à cassure fraîche à l'aide d'un marteau afin de pouvoir identifier les différents minéraux constituant la roche.

Une observation macroscopique ou à l'aide d'une loupe 10 X de la roche a été effectuée au site de prélèvement. Les échantillons prélevés étaient conservés et transportés dans des sacs numérotés. Dans le cas des roches contenant des oxydes de fer, une aiguille aimantée était également à notre disposition. Chaque échantillon collecté était photographié et décrit dans le carnet comme les affleurements des formations géologiques.

Une batée était indispensable pour tester la minéralisation des terrasses ou des lits vifs de cours d'eau.

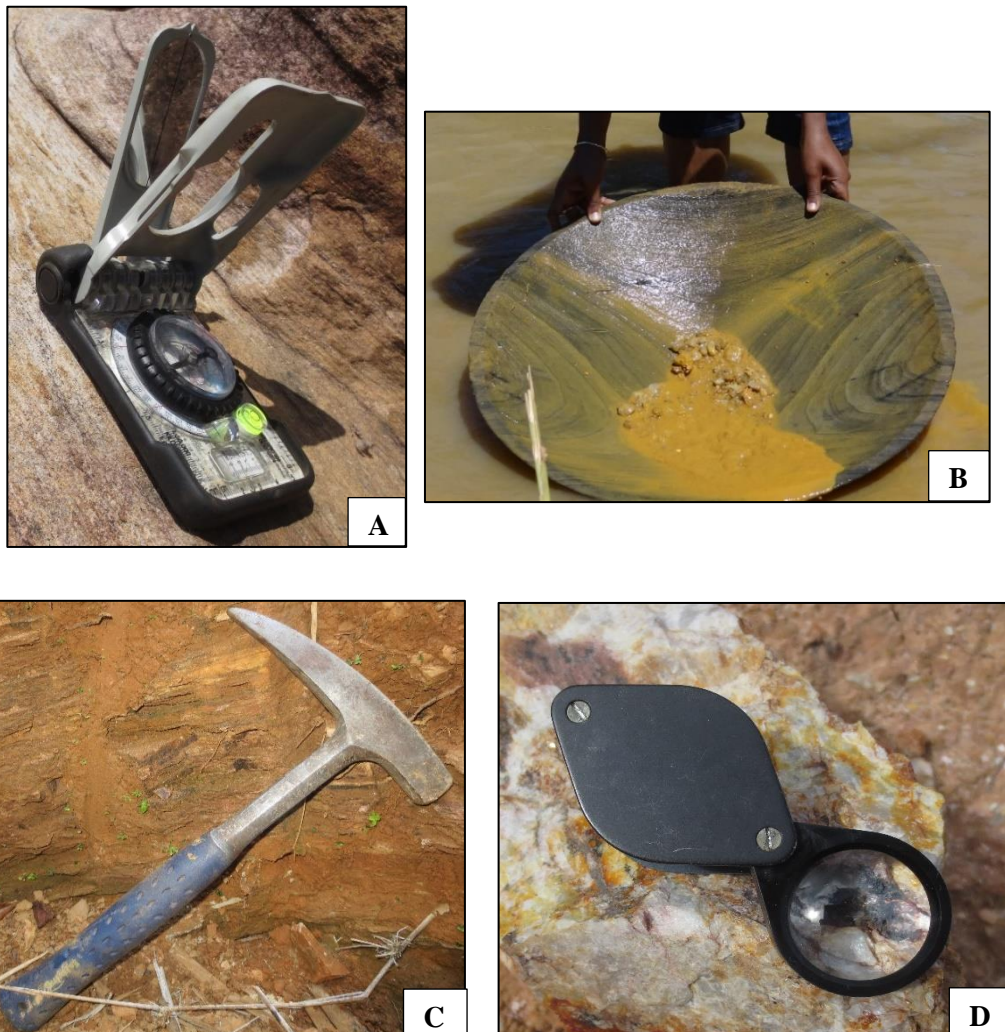


Figure 08 : Quelques matériaux du terrain : A) Boussole, B) Batée, C) marteau et D) loupe

II-3- TRAVAUX EN LABORATOIRE

II-3-1. Apport de la télédétection

La télédétection est une technique qui permet d'acquérir à distance (sans contact direct) des informations de la surface de la terre à l'aide d'un ou plusieurs capteurs d'ondes électromagnétiques montés à bord d'un satellite afin d'obtenir des images. Cette méthode nous permet d'identifier les zones d'altérations hydrothermales ainsi que les différentes structures (plis, failles, cisaillements, fractures, foliations).

II-3-2. Logiciel ENVI 4.7

Un logiciel ENVI 4.7 servait pour le traitement des images satellite (Landsat 8). La composition colorée et les rapports des bandes étaient les techniques utilisées. Il fallait d'abord sélectionner la scène d'image de la zone d'étude. Ensuite, on fait une superposition des bandes appelée « layer stacking » avant de faire un découpage de l'image. Et après on a fait les traitements suivants :

-La **Composition colorée** basée sur la composition de trois bandes spectrales en utilisant le mode de visualisation d'image RVB (Rouge, Vert et Bleu). Une composition des trois couleurs primaires (Rouge, Vert et Bleu) donne des couleurs secondaires (le Magenta, le Cyan et le Jaune). Cette technique est appelée *système additif*. Ainsi, la couleur blanche est obtenue à partir de la composition de ces trois couleurs ensemble. A l'inverse, la composition des couleurs secondaires va donner des couleurs primaires, c'est un *système de couleur soustractif*. Le Noir est le résultat de la combinaison du Cyan, du Jaune et du Magenta.

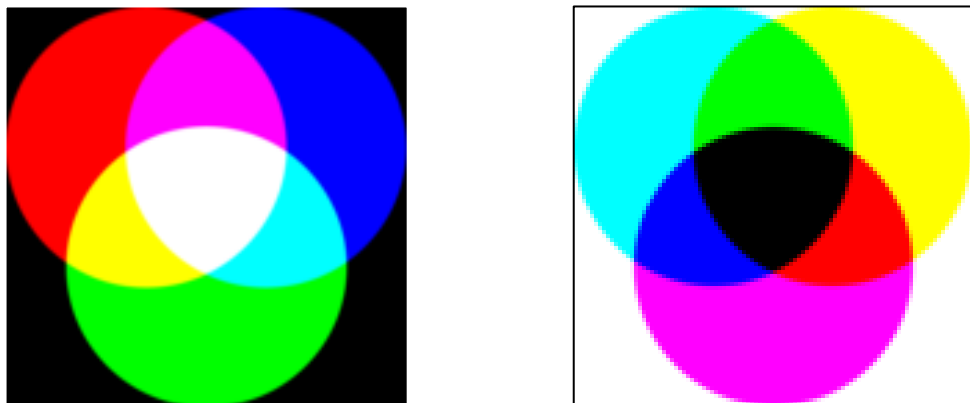


Figure 09 : A) système additif et B) système soustractif

Une équivalence des bandes de Landsat 7 ETM+ et de Landsat 8 OLI est donnée ci – dessous. Des compositions usuelles ont été recommandées pour une étude structurale et la détection des altérations hydrothermales. D'autre composition colorée notamment le RVB 531 a été utilisée.

Tableau 02 : Les compositions colorées usuelles obtenues à partir des données Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI

Landsat 7 ETM +			Landsat 8 OLI			Noms
R	V	B	R	V	B	
3	2	1	4	3	2	Vraie couleur
3	4	2	4	5	3	Couleur naturelle
4	3	2	5	4	3	Fausse couleur (la végétation apparait en rouge)
7	4	1	7	5	2	Pour détection des altérations des Roches
7	5	1	7	6	2	Pour détection des altérations des Roches
7	4	2	7	5	3	Pour détection des altérations des Roches
7	5	4	7	6	5	Pour détection des altérations des Roches

Cette méthode a permis d'identifier les structures cassantes ou fragiles (failles, fractures) et ductiles (foliations) ainsi que les zones de silicification (RVB 765).

- Les **Rapports des bandes** ou « **bands ratios** » ont permis de diviser la bande comportant la réflectance d'un minéral par la bande où on observe l'absorption. Les valeurs ainsi obtenues sont utilisées pour délimiter les zones d'altération. Les pixels classés anormaux sont ceux qui ont des valeurs supérieures à la moyenne plus ou moins la valeur de l'écart type.

Il est utilisé pour identifier les zones d'altération hydrothermale. Sur une image traitée, il est représenté par des pixels. Voici quelques exemples de rapports des canaux utilisés pour mettre en évidence les minéraux ou les zones d'altération hydrothermale.

Tableau 03 : Les rapports des bandes pour les minéraux d'altération hydrothermale sur Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI (Takashi Ooka, March 6-7, 2008, Japan)

Minéraux d'altérations	Ratio de Landsat 7 ETM+	Ratio de Landsat 8 OLI
Oxyde de fer	3/1	4/2
Argiles	5/7	6/7
Silicates ferreux	5/4	6/5

Les spectres de réflectance et ceux d'absorption de l'eau, des végétations, du sol et des roches sont résumés dans la figure suivante. L'eau apparaît au TM10 (il y a une réflectance de l'eau en ce canal). L'onde électromagnétique correspondant au TM30 est absorbée par la biomasse tandis que celle correspondant au TM40 est réfléchiée par cette dernière. Les TM40, TM50 et TM70 font apparaitre les sols.

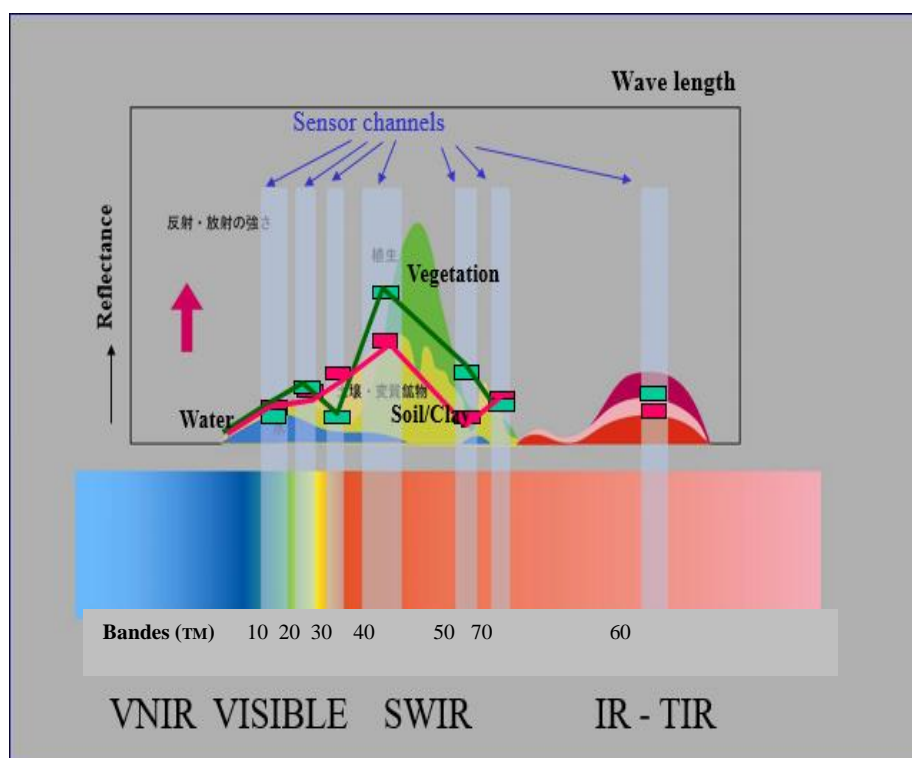


Figure 11 : Spectres de réflectance et d'absorption (Takashi, 2008,)

II-3-3. Apport de la géophysique

Les cartes aéromagnétiques ont permis d'identifier les déformations ductiles y compris les structures (plis), les déformations cassantes (failles) et les dykes.

Les cartes radiométriques ont permis de cartographier les différentes formations géologiques y compris les accumulations de sédiments.

II-3-4. Logiciel Geosoft Oasis Montaj

En ce qui concerne le traitement des données géophysiques, le logiciel Geosoft Oasis Montaj a permis de filtrer les bruits, d'amplifier les signaux et d'établir des cartes thématiques.

➤ *Magnétométrie*

La prospection magnétique est basée sur le champ magnétique et la susceptibilité magnétique des minéraux. Selon leur susceptibilité magnétique, les minéraux sont divisés en trois groupes :

- Les minéraux diamagnétiques, caractérisés par une susceptibilité magnétique $k < 0$ ne réagissent pas au champ magnétique. Le quartz, le calcite, l'orthoclase, l'or, la galène, la sphalérite et le graphite font partie de ce groupe.

- Les minéraux paramagnétiques, ayant une susceptibilité magnétique $k > 0$ réagissent sous l'effet d'un champ magnétique externe et deviennent magnétique. Leur magnétisation disparaît une fois qu'ils sont placés en dehors du champ magnétique externe ; le talc, la hornblende, la serpentine, la biotite, la muscovite ainsi que la majorité des sulfures (pyrite et chalcoppyrite) et des oxydes sont inclus dans ce groupe.

- Les minéraux ferromagnétiques ont une susceptibilité magnétique élevée. Ils gardent leur magnétisation même en dehors du champ magnétique. Les principaux minéraux ferromagnétiques sont la magnétite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$), le titanomagnétite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeTiO}_3$), la maghémite ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) et le pyrrhotite (Fe_{1-x}S). Comme les moments magnétiques au niveau des domaines de l'hématite ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) sont parallèles mais de sens opposé, le moment magnétique de l'ensemble reste faible d'où sa faible susceptibilité magnétique. *L'hématite est classée antiferromagnétique.*

La susceptibilité magnétique d'une roche dépend de sa teneur en minéraux ferromagnétiques. Notre étude s'intéresse aux minéraux de ce dernier classement.

Le traitement des données aéromagnétiques a permis de produire des cartes thématiques telles que champ magnétique total (TMI), champ magnétique total réduit au pôle (RTP), gradient horizontal (HD), gradient vertical (VD), gradient horizontal total (THDR), signal analytique (AS), tilt derivative (TDR) ainsi que d'autres cartes provenant des filtres plus sophistiqués. L'interprétation de ces cartes a permis d'identifier les déformations ductiles y compris les structures anticlinales, synclinales ainsi que les déformations fragiles ou cassantes (fractures et failles). Des dykes mafiques ont été également identifiés. Pour isoler le champ magnétique associé aux structures géologiques, le champ magnétique terrestre a été déduit du champ magnétique mesuré.

Tableau 04 : Tableau montrant les noms, les formules et les caractéristiques des quelques filtres mathématiques

Noms de filtres et ses formules mathématiques	Caractéristiques
TMI (Total Magnetic Intensity ou Champ Magnétique Total) $TMI = T_{\text{mesuré}} - T_{\text{diurne}}$	Anomalie asymétrique sauf au deux pôles. Difficile à interpréter.
RTP (TMI Reduced To Pole ou Champ magnétique total Réduit au Pôle)	Anomalie symétrique. Le sommet de la courbe correspond au centre de la source.
HD (Horizontal Derivative ou Gradient Horizontal) $HD = \frac{T_2 - T_1}{dx} \quad \text{ou} \quad HD = \frac{\delta T}{\delta x}$	Anomalie asymétrique. C'est la variation de champ magnétique suivant l'axe horizontal. Utiliser dans l'interprétation des anomalies linéaires (dykes, failles).

<p>VD (Vertical Derivative ou gradient vertical)</p> $VD = \frac{T_2 - T_1}{dz} \quad \text{ou} \quad VD = \frac{\delta T}{\delta z}$	<p>Meilleure détection des sources peu profondes. Il a permis de cartographier le BIF (Banded Iron Formation).</p>
<p>TDR (Tilt dérivative ou Tilt Angle)</p> $TDR = \tan^{-1} \left(\frac{VD}{THDR} \right)$ <p><i>(Miller & Singh, 1994)</i></p>	<p>Fonctionne comme un régulateur d'amplitude en limitant les amplitudes à $\pm \pi/2$. Les signaux de faibles amplitudes sont relativement plus visibles par rapport aux signaux à amplitude élevée. Il permet de déterminer l'épaisseur d'un dyke ou BIF. Spécifique pour les sources peu profondes. Les bords de la source se trouvent approximativement à l'endroit où $TDR = 0$.</p>
<p>AS (Analytic Signal) ou signal analytique</p> $ASA = \sqrt{\left(\frac{\delta M}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta M}{\delta y}\right)^2 + \left(\frac{\delta M}{\delta z}\right)^2}$ <p><i>(Nabighian, 1972, 1974; Roest et al., 1992; Cooper, 2009)</i></p>	<p>Amplifie les bords de la source peu profonde. Spécifique pour les sources de taille importante. Il est indépendant de l'orientation du vecteur magnétique. Le manque de résolution est à l'origine d'interférence des signaux.</p>
<p>HD_TDR (Total Horizontal Derivative of Tilt Derivative)</p> $HD_TDR = \sqrt{\left(\frac{\partial TDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TDR}{\partial y}\right)^2}$ <p><i>(Verduzco et al., 2004)</i></p>	<p>Détecte les sources superficielles. Les valeurs de l'amplitude des anomalies à l'entrée du traitement sont comprises entre $\pm \pi/2$. Il a permis de déterminer la puissance des dykes, de voir clairement les déformations ductiles, par conséquent d'identifier le sens de cisaillement.</p>
<p>ASTA (Analytic signal of tilt angle)</p> $ASTA = \sqrt{\left(\frac{\delta T}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\delta y}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\delta z}\right)^2}$ <p>Avec T= Tilt angle</p> <p><i>(A. H. Ansari and K. Alamdar, Juillet 2011)</i></p>	<p>Utile dans la détection des sources profondes. Il est insensible aux bruits superficiels. Et les résultats sont convenablement stables même en cas de l'interférence causée par des sources étrangères. On l'a utilisé pour délimiter les structures de direction N-S.</p>

Ces formules mathématiques ont servi pour l'établissement des filtres et ont été introduites dans le processus de calcul. Certains de ces filtres sont déjà préprogrammés (TMI, RTP, HD, VD, AS, TDR et HD_TDR) dans le logiciel, tandis que d'autres filtres plus sophistiqués sont à programmer (ASTA, TAHG, Theta Map, la dérivée de TDR et THDR).

Les relations entre le vecteur champ magnétique M ou gravimétrique, ses composantes (G_x , G_y , G_z), et les autres variables matérialisées par des filtres mathématiques sont illustrées ci-dessous (*figure 11*).

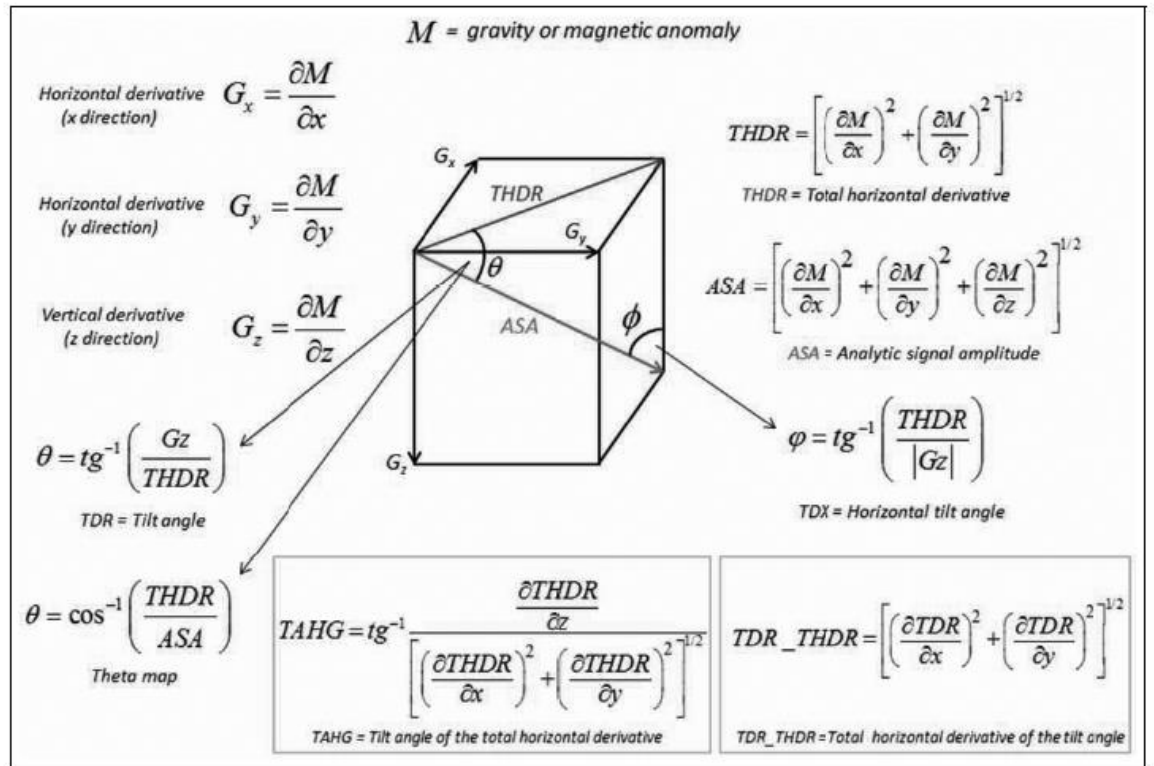


Figure 11 : Relation entre le vecteur champs magnétiques, ses composantes et les variables des filtres mathématiques

L'acquisition des données se fait le long d'une ligne de vol et les résultats sont représentés sous forme de courbes. Des lignes de vol parallèles peuvent être assimilées à une maille et les résultats sont représentés sous forme de carte.

Comme on peut observer sur les graphes ci-dessous (**figure 12**), l'amplitude maximale de (**b**, **c** et **f**) est représentée par le centre du modèle géologique (marqué par la ligne rouge) et ces amplitudes minimales représentent ses bords. Tandis que la courbe représentative de l'AS (**g**) est même allure que les précédentes ce qui explique la présence d'interférence des signaux. Mais pour le cas de (**d** et **e**), les bords sont marqués par les amplitudes maximales et le centre par une amplitude minimale ou de zéro. Les bords ne coïncident pas exactement aux amplitudes maximales des courbes car lorsque le corps est en profondeur la courbe devient pas précise.

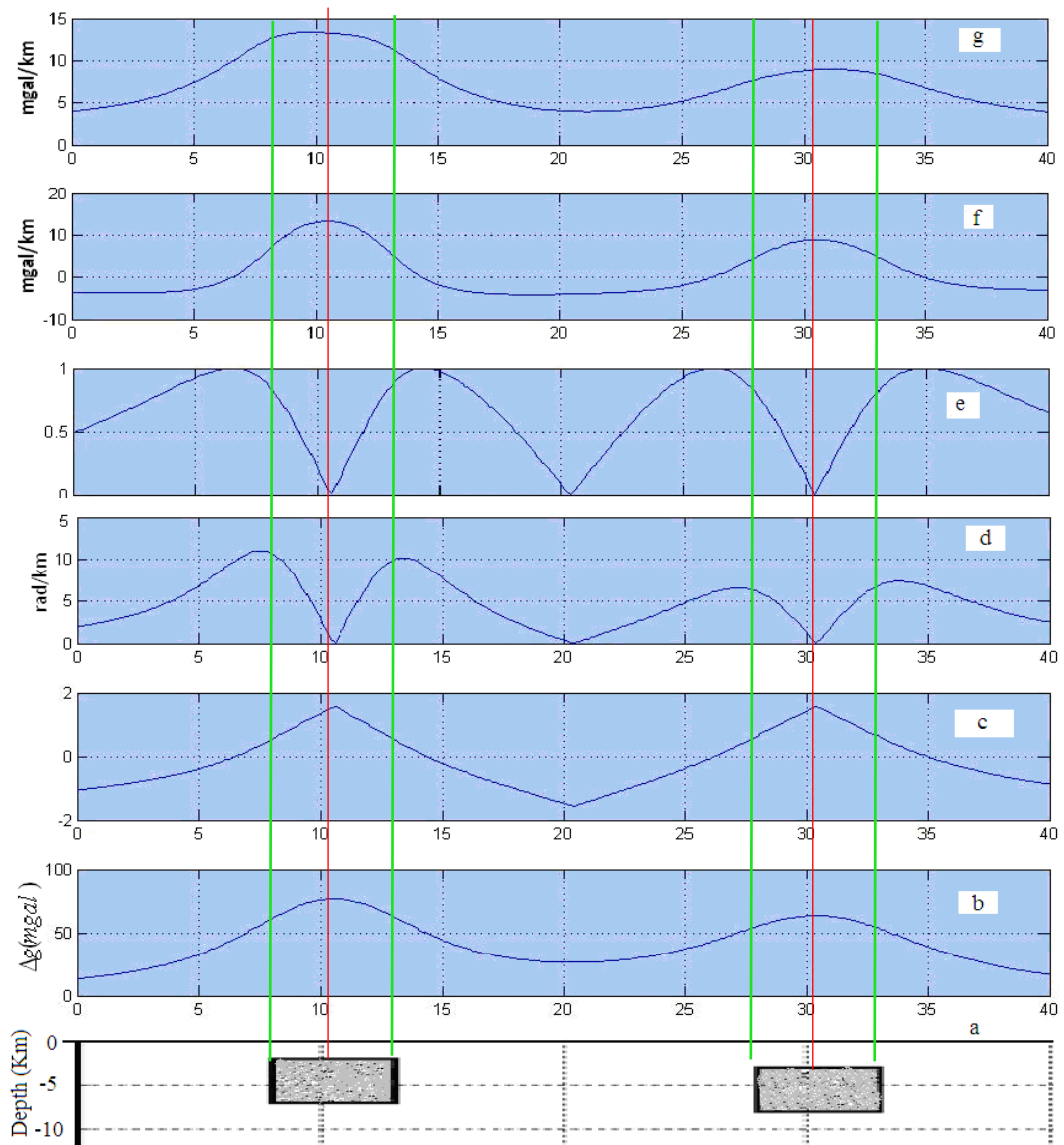


Figure 12 : Graphes montrant les courbes correspondant aux filtres **a)** Modèle géologique, **b)** Anomalie gravimétrique, **c)** TA, **d)** THDR, **e)** Theta map, **f)** VD, **g)** AS (*Int J Min & Geo-Eng (IJMGE), 2013*)

Les cartes aéromagnétiques permettent de cartographier les BIF (Banded Iron Formation ou quartzite à magnétite) ainsi que d'identifier et de tracer les structures (foliation et fracture).

➤ **Radiométrie**

Les cartes radiométriques traitées par Geosoft peuvent montrer des anomalies en uranium (U), thorium (Th), potassium (K), leurs rapports (U/Th ou U/K) et leurs combinaison (image ternaire, U + Th). La présence de feldspath potassique est souvent à l'origine des anomalies en potassium. L'uranium et le thorium sont présents à l'état de trace ; ce sont des éléments mobiles et peuvent supporter un long transport par des cours d'eau. La concentration de ces éléments varie selon le type de roche. Seules les sources superficielles sont détectables par cette méthode. Parmi les cartes obtenues, l'U+Th a révélé l'existence d'une accumulation de sédiments associée à un paléochenal.

II-3-5. Données géochimiques

L'ensemble des données géochimiques est représenté sous forme d'une carte d'anomalie. Ces anomalies peuvent indiquer des zones de concentrations élevées qui pourraient être associées à des sources de minéralisation.

L'analyse quantitative a été faite à l'aide d'une spectrométrie de masse (ICP-MS) pouvant détecter des teneurs (en ppm) en métaux et non métaux à des concentrations très faibles allant jusqu'à une partie par milliard ($1 / 10^{15}$).

II-3-6. Logiciel ArcGIS 10.4

Les données spatiales telles que les données géochimiques, les informations géologiques et géophysiques sont ensuite gérées par le logiciel ARCGIS 10.4 (Arcmap et Arcscene). Les procédures à suivre sont :

- Géoréférencement des cartes géologiques, topographique et géochimique.
- Création des fichiers « shapes » pour chaque couche d'information (formation géologique, cours d'eau, indices, failles, point d'échantillon) ;
- Digitalisation sous forme de polygone, de polyline ou de point ;
- Enfin on termine avec la mise en page (édition de nouvelles cartes).

CHAPITRE III
RESULTATS
ET
INTERPRETATION

Les méthodes utilisées ont permis de tracer les foliations et d'identifier les différentes structures (failles, fractures et les plis) présentes dans la zone d'étude ; elles ont permis également de mieux connaître la pétrographie, la relation entre ces structures et la minéralisation aurifère confirmée par les résultats des analyses géochimiques. Les résultats de l'interprétation structurale des données géophysiques et des images satellites sont :

- carte structurale du BIF ;
- mise en évidence de deux générations de plis ;
- carte tectonique ;
- identification des fractures associées à la minéralisation aurifère.

III-1- PETROGRAPHIE DES ROCHES ENVIRONNANTES

III-1-1- Filon, veines et galets de Quartz

- Des blocs de quartz laiteux se trouvaient à l'Est du village de Besaonjo. Ils formaient un filon métrique de direction N060 (*figure 13A*). Ils sont composés de quartz opaque, à grains grossiers et sont très fracturés et (*figure 13B*).

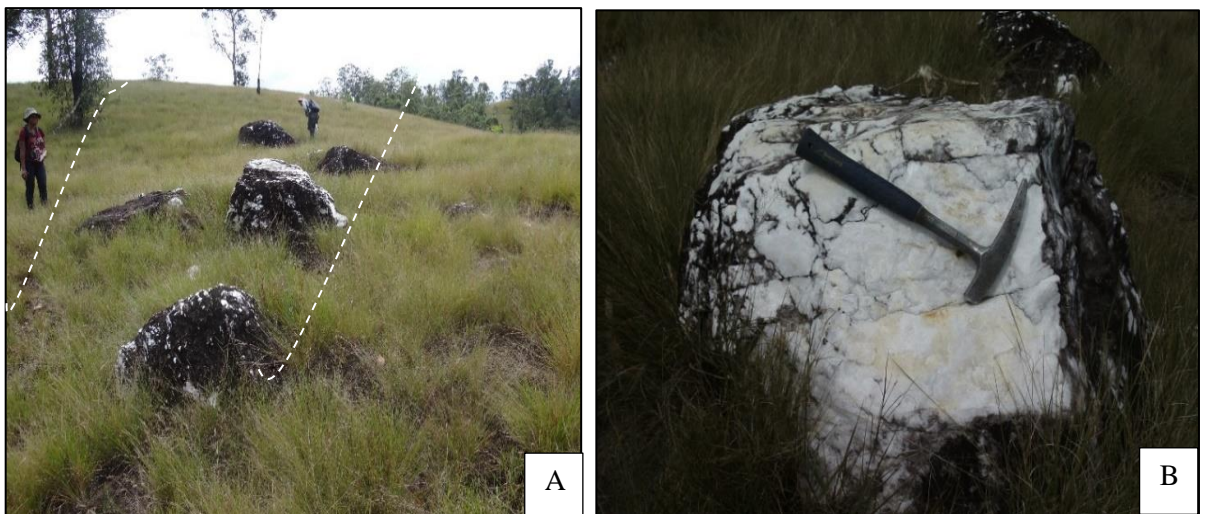


Figure 13 : A) Affleurement quartz laiteux, B) Bloc de quartz laiteux (X 573732 (m), Y 559130 (m))

- Il y a aussi des veines de quartz à grains fins discordantes à l'encaissante, constitué de quartz, de micas, de feldspath, de talcs et des oxydes de fer (**figure 14 A**). Ainsi que des veines de quartz gris à gros grains très fracturés et composé de quartz dont les interstices sont remplis d'oxydes de fer (hematite), de minéraux sulfurés, des micas (biotite, muscovite et fuschite) et des feldspaths altéré (kaolinite). Leur couleur plutôt grise est due à la présence des minéraux sulfurés. Ces veines sont centimétriques et concordantes aux schistes(**figure 14 B**). Deux groupes d'orientation de veines ont été observés lors des travaux de terrains. Les veines de direction allant N70 à N110 et celles de direction allant N155 à N170. Il est à noter que les veines de direction N090 et N160 sont concordantes aux schistes.

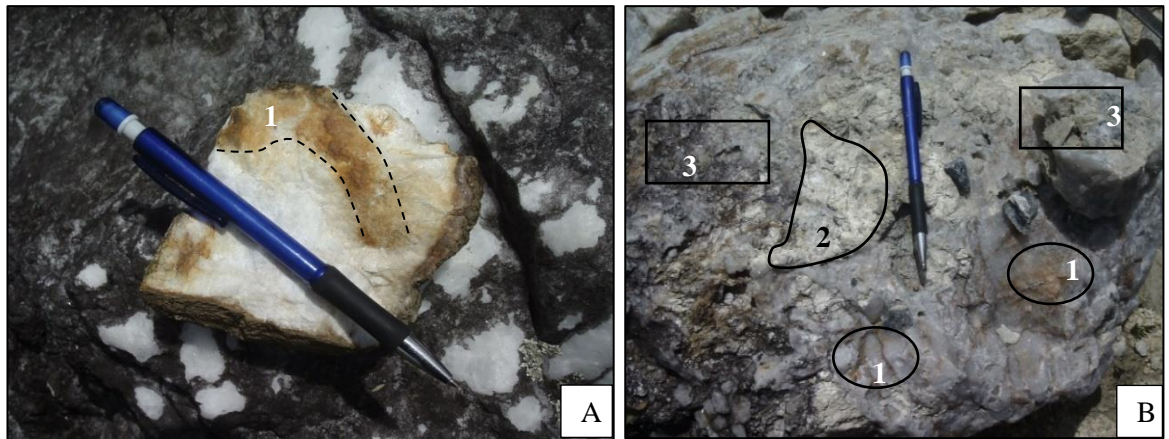


Figure 14 : **A)** quartz à grains fins à oxyde de fer (**1**) (X 573728 (m), Y 559192 (m) ; **B)** Veine de quartz très fracturé à oxyde de fer (**1**), à feldspath (**2**) et à sulfure (**3**) (X 573824 (m), Y 559102 (m)

Les veines de quartz discordantes, très fracturées et riches en oxyde de fer contribuent plus à la minéralisation aurifère de Besaonjo que les veines concordantes.

- Des galets de quartz plus ou moins arrondis et anguleux (**figure 15**) ont été trouvés. Leur granulométrie permet de conclure que des veines proximales et distales sont à l'origine de ces galets. Ces galets montrent la présence des sources d'or résiduel.



Figure 15 : Galets de quartz arrondis (1) et anguleux (2) exploités par les villageois

X : 573824 (m) et Y 559102(m)

III-1-2- Les dykes gabbroïques et doléritiques

Les gabbros et les dolérites sont des roches plutoniques basiques à intermédiaires. Nous avons pu mesurer leur direction N 020 sur un affleurement d'une dizaine de mètres environ (*figure 16*). Ils ont une texture microlitique mais quelques minéraux sont visibles à la loupe.

Les microgabbros ont une couleur sombre due à l'enrichissement en minéraux ferromagnésiens tels que les pyroxènes, les plagioclases et les hornblendes. Ils contiennent en faible proportion du quartz. Par contre, les dolérites sont de couleur un peu plus claire. Puisqu'ils sont avoisinés de gabbro, ils sont constitués de plagioclases, de pyroxènes et d'amphiboles. Ils contiennent également peu de quartz et d'oxyde de fer.

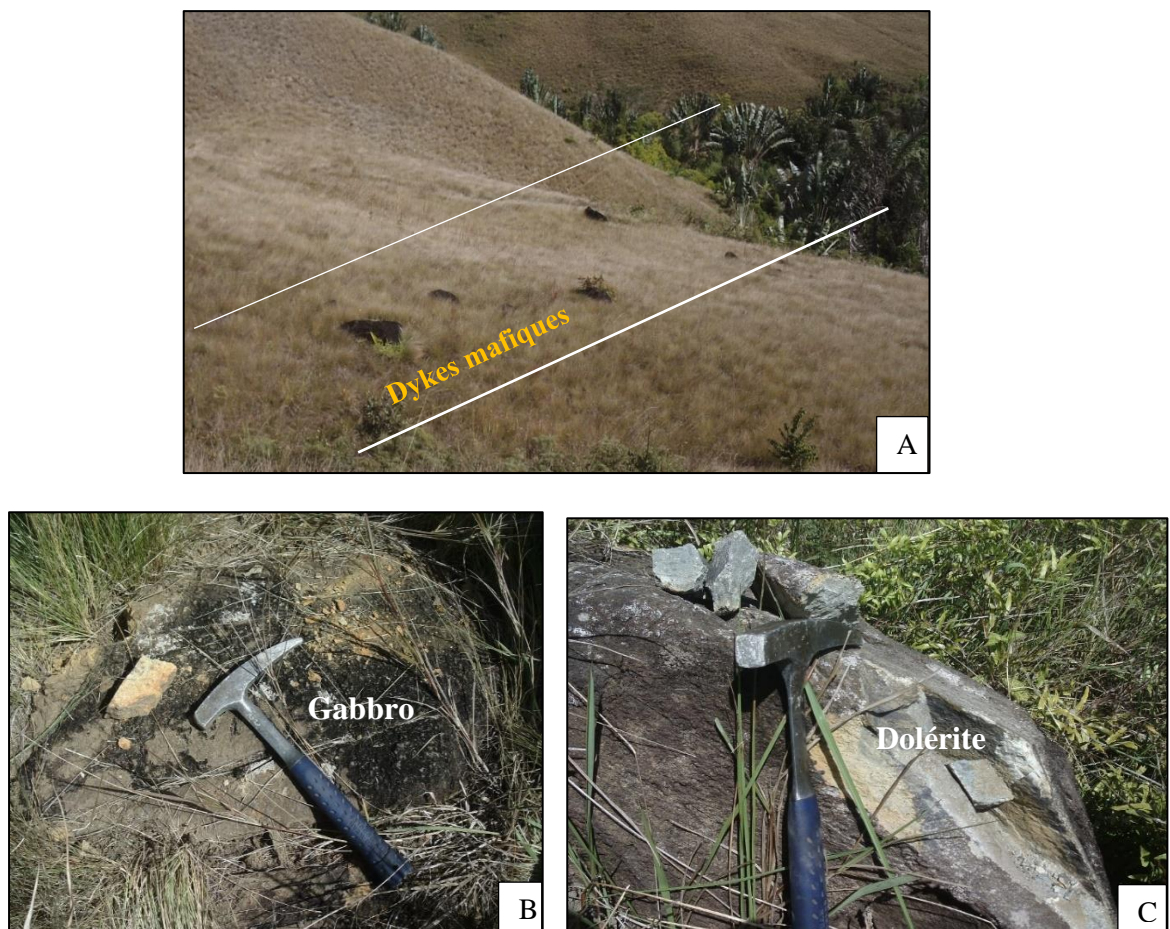


Figure 16 : Dykes gabbroïques et doléritiques, **A)** Affleurement des dykes X 574142 (m) et Y 558685 (m), **B)** Affleurement du gabbro X 574170 (m) et Y :558735(m), **C)** Affleurement de dolérite (X :574153 (m) et Y 558609(m))

III-1-3- Paragneiss et schistes

L'unique affleurement de paragneiss était dans un lit de rivière aux coordonnées X 573550/Y 559144. C'est pour cela qu'on n'a pas d'illustration et de photo du paragneiss. Il a un pendage de 60° et orienté à N180.

Les schistes affleurent sur la quasi-totalité de la zone. Ils sont constitués de quartz, de feldspath et riches en minéraux en feuillets (biotite, muscovite et phlogopite) d'où son appellation micaschiste.

D'après les mesures faites sur terrain, deux directions de schistes ont été révélées : le premier groupe est orienté de N140 à N170 et le deuxième groupe N090.

Les schistes sont concordants aux veines de quartz centimétriques de directions N090, N160 et N170 et de pendages 60° et 70° (*figure 17*).

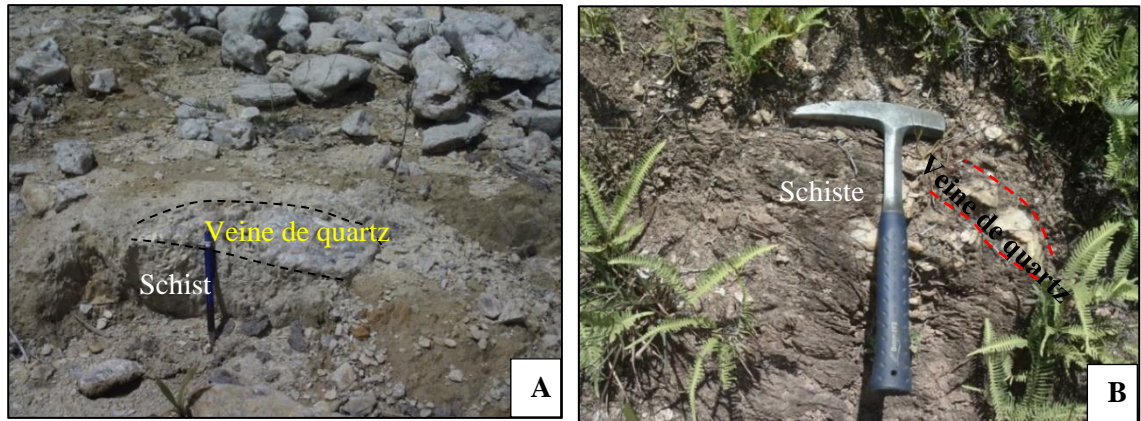


Figure 17 : Schistes interstratifiés avec des veines de Quartz, **A**) schiste peu altéré X 573824 (m) et Y 559102(m), **B**) schiste sain X 573747 (m) et Y 558978 (m)

III-2- RESULTATS STRUCTURAUX

L'interprétation des cartes magnétiques et radiométriques ainsi que des images satellites notamment les images radar et Landsat 8 a permis d'élaborer des cartes structurales et tectoniques ainsi que celle du potentiel aurifère.

III-2-1-Déformation ductile

La déformation ductile ou élastique est une déformation lieu à une forte température et pression. Les éléments structuraux de ce type de déformation sont les foliations.

III-2-1-1. Structures précoces (plis isoclinaux : anticlinaux et synclinaux)

Parmi les cartes aéromagnétiques traitées, c'est la carte de « second order tilt angle » (tilt angle of the tilt angle) qui nous a donné des anomalies nettes du BIF et de dyke sans interférence des bruits. Les indices d'itabirite (quartzite à hématite) coïncident au BIF cartographié.

C'est à partir de la cartographie du BIF qu'on a pu identifier des structures (plis) associées à la formation de Vohilava. Les plis ont des plans axiaux orientés N – S représentés sur le diagramme en rosace de ces foliations (*figure 18*).

Les pendages, la topographie, les cours d'eau et l'agencement des formations géologiques (chronologie des formations, la présence des alluvions dans les structures synclinales, ...) ont été utilisés pour définir la nature des plis obtenus (anticlinal ou synclinal).

La carte « second order Tilt angle » ci-dessous montre une valeur maximale du gradient égale à 1.240 rad / m colorée en violet ou magenta correspondant aux centres des anomalies tandis que les bords du corps se trouvent à la valeur zéro de la courbe (colorée en vert). Les valeurs positives du gradient se trouvent au-dessus de la source tandis que les valeurs négatives sont situées en dehors.

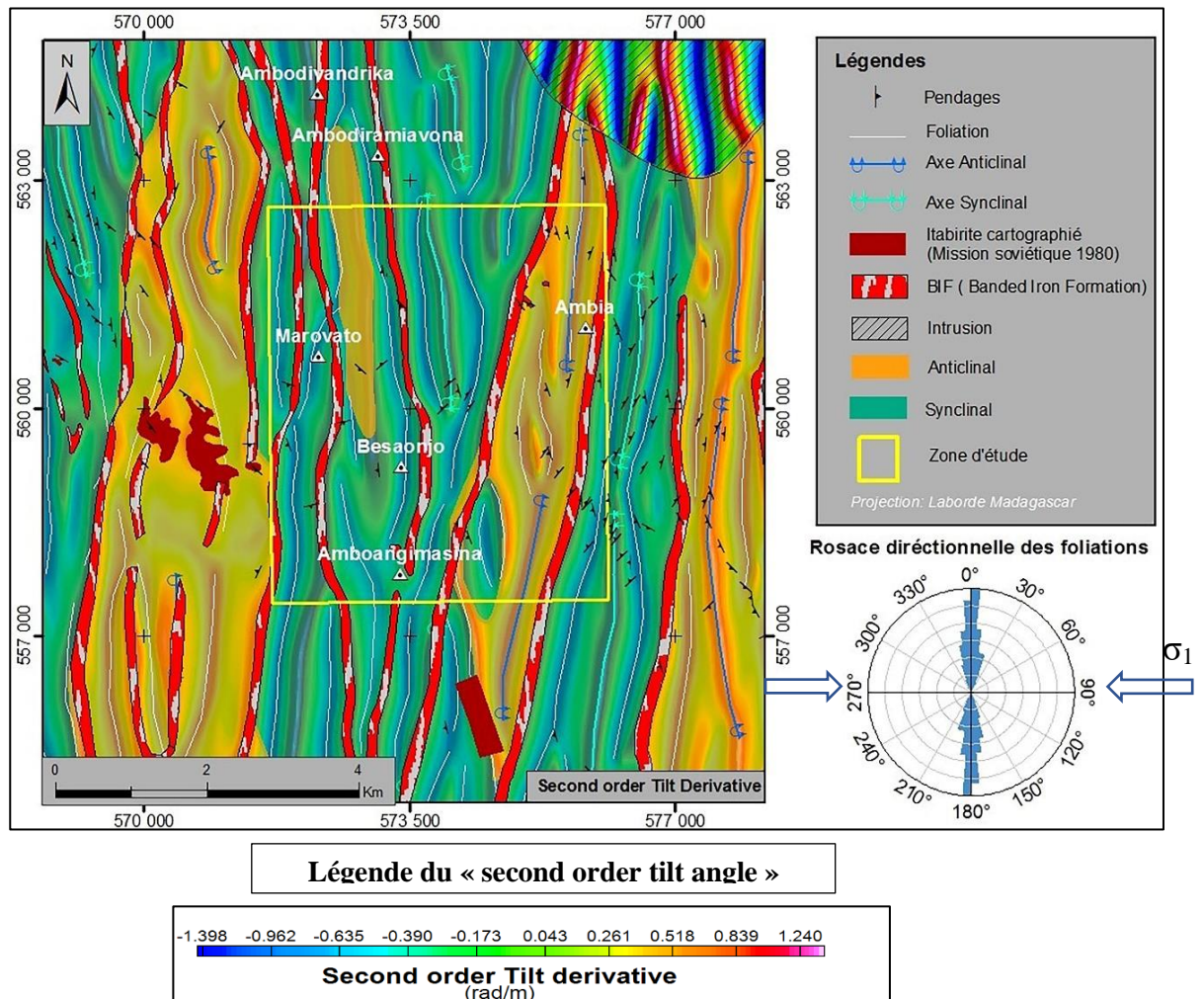


Figure 18 : Carte de foliations, des affleurements de BIF et des structures précoce (Damosoa L, 2017)

III-2-1-2. Structures tardives (plis antiformes et synformes)

Parmi les compositions colorées réalisées, la composition (RVB : 531) a donné les meilleurs résultats et a été retenue pour analyse. Elle a fourni avec l'image radar des images de structures circulaires et elliptiques nettes. D'après notre observation, la structure à l'extrême nord-est de la zone d'étude confirme la présence de l'intrusion syénitique, tandis que les autres structures sont des plis (antiformes et synformes). La rosace montre que ces plans axiaux sont orientés de NW-SE (*figure 19*).

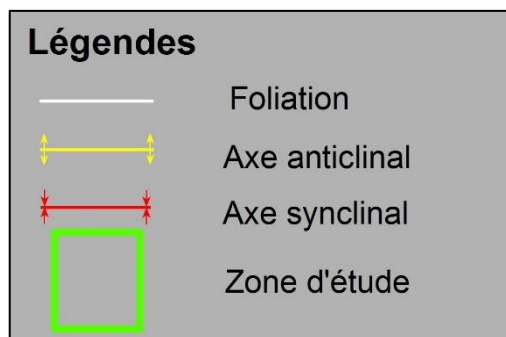
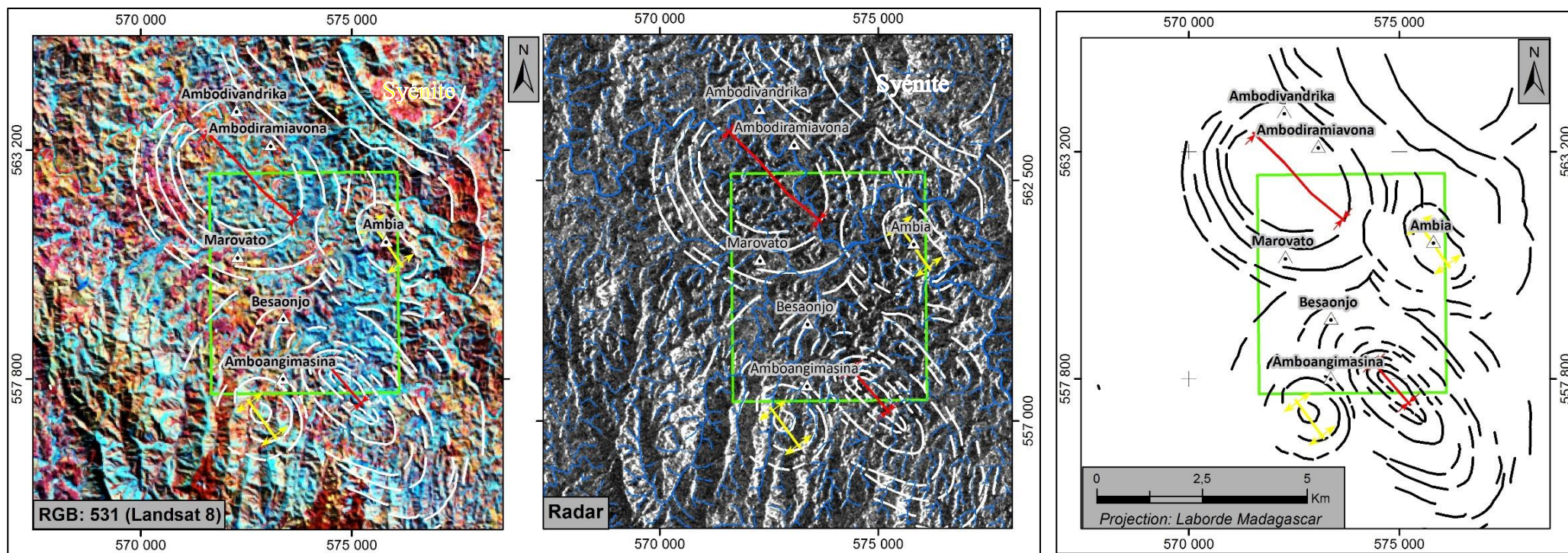
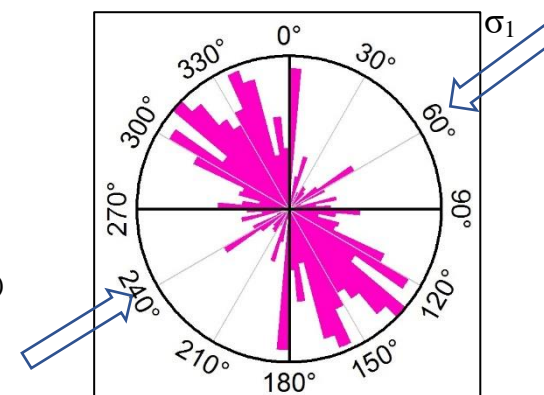


Figure 19 : Carte de foliations et de structures tardives (*Damosoa L, 2017*)



III-2-2- Déformation cassante :

Une déformation cassante ou fragile se produit à basse température et à basse pression. Elle est constituée de fractures et de failles.

Une composition colorée RVB 543 a montré clairement les structures cassantes. Elle a révélé l'existence des failles et fractures orientées dans plusieurs directions illustrées dans le diagramme en rosace ci-dessous (*figure 20*). Deux directions principales N120 et N060 des fractures et failles ont été détectées.

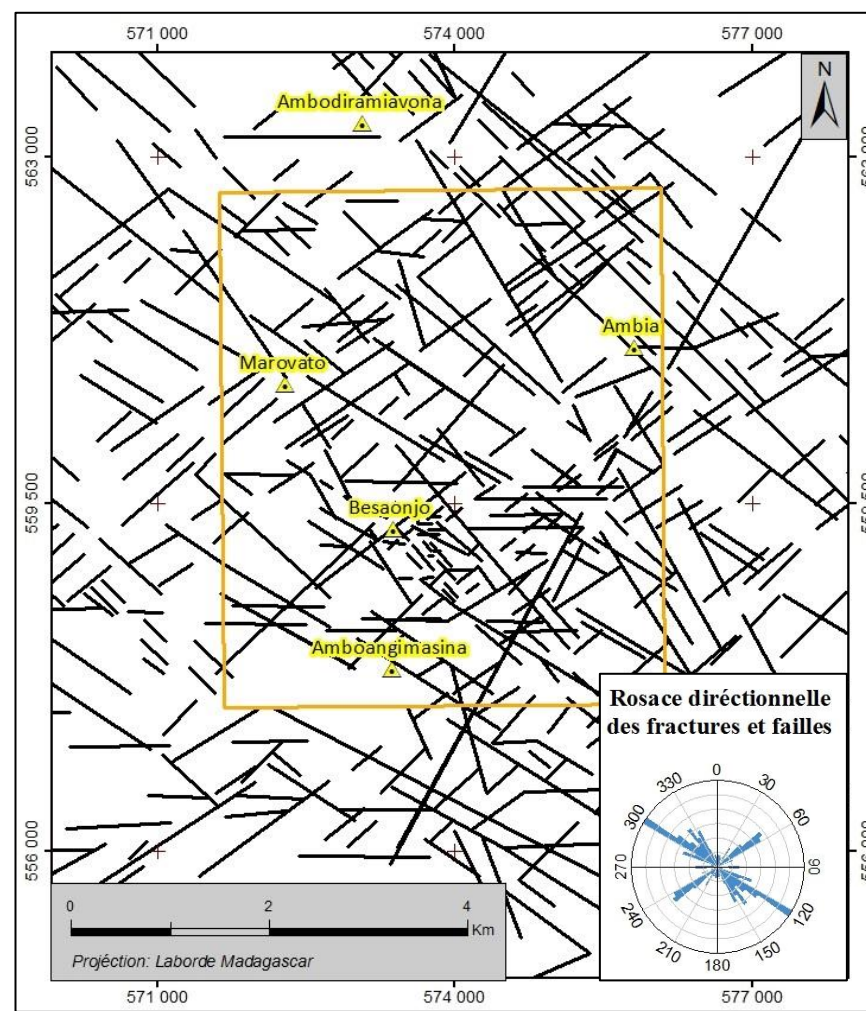


Figure 20 : Carte montrant les fractures et failles affectant la zone d'étude (Damosoa L, 2017)

III-2-2-1. Les cisaillements principaux C1 et C2

L'analyse des fractures et des failles a montré des déplacements horizontaux dont les sens ont été extraits de la carte magnétique HD_TDR. Dans la zone de Besaonjo, on a identifié deux groupes de zones de cisaillements dont le cisaillement dextre C1 et celui de direction senestre C2. La valeur maximale (0.0095rad/m) de HD_TDR indiquée par la couleur violette ou magenta correspond aux bords des anomalies tandis que la valeur zéro (en bleu) comprise entre les deux maximas correspond au centre du corps (*figure 21*).

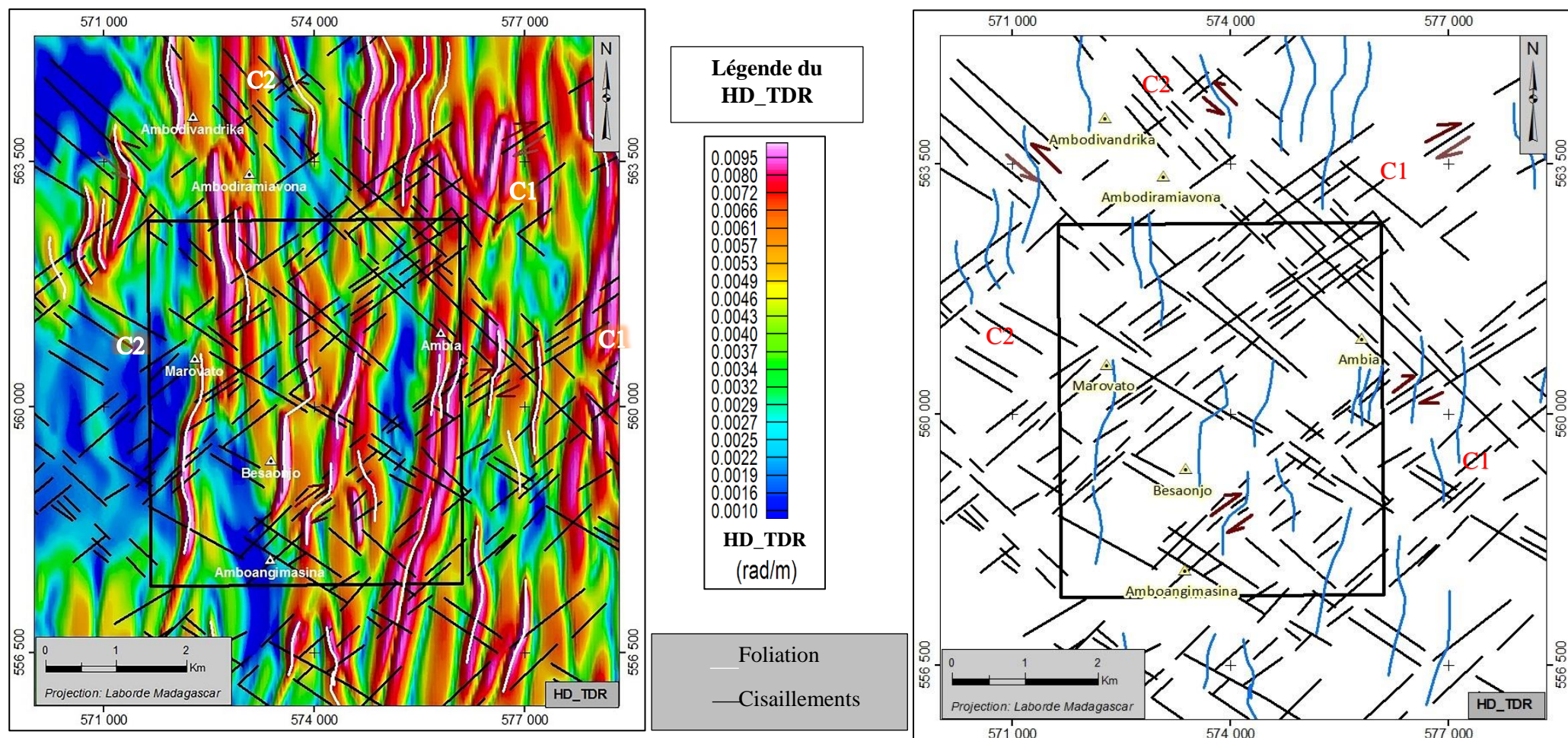


Figure 21 : Carte magnétique HD_TDR montrant les déplacements de zones de cisaillement principal (*Damosoa L, 2017*)

III-2-2-2. Coupe en deux dimensions (2D)

La **figure 22A** ci-dessous montre une carte géologique avec un trait de coupe AB associée à des couches de BIF, à des structures précoces (plis isoclinaux renversés N-S), aux cisaillements (dextre et senestre) et associée également à une faille chevauchante. L'interprétation et la cartographie de BIF à partir des cartes aéromagnétiques ont révélé l'existence de trois couches de BIF. La **figure 22B** illustre la coupe en deux dimension (2D) de la carte mentionnée précédemment. Elle montre la nature des plis (anticlinal et synclinal), agencement des différentes couches de BIF et la présence des zones considérées favorables à la minéralisation.

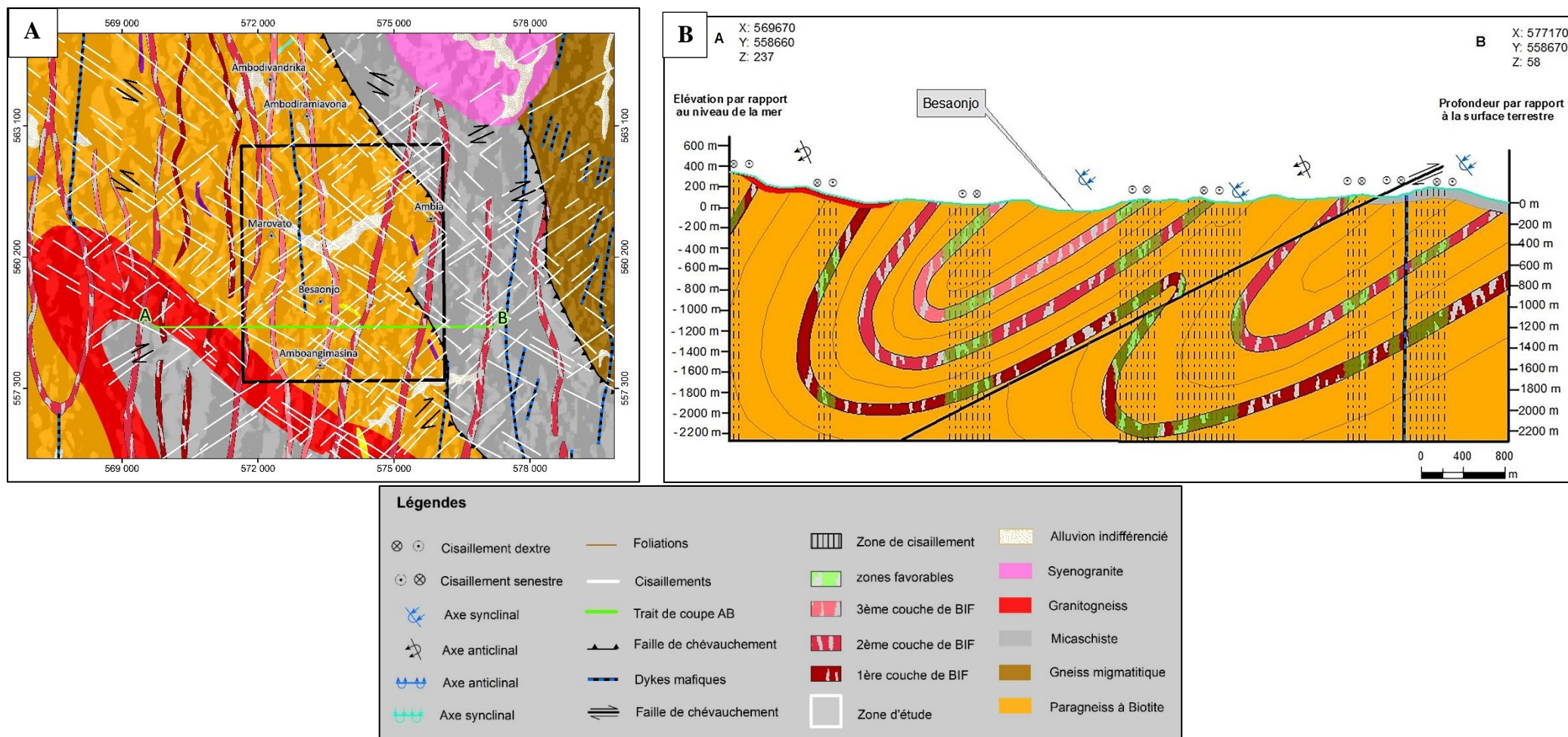


Figure 22 : Carte géologique et coupe en deux dimensions de Besaonjo (*Damosoa L, 2017*)

III-2-2-3. Les fractures de Riedel

Le modèle numérique de terrain a permis de détecter plus précisément les fractures et failles au niveau de la zone d'étude. Ces structures ont été classées selon le modèle de Riedel. Il est basé sur l'identification de zones de cisaillement principal appelées C contrôlant les fractures cisailantes de Riedel de types (R, R', P et P'). Pour le cas de Besaonjo, il s'agit de la zone de cisaillement dextre C1 de direction NE – SW et de la zone de cisaillement senestre C2 orientée NW – SE. Des fractures synthétiques (R1, R2, P1 et P2) de même sens que les zones du cisaillement principal C1 et C2 et des fractures antithétiques (R'1, R'2, P'1 et P'2) de sens contraire aux C1 et C2 (*figure 23*) ont été identifiées. En plus de leur sens de déplacement, le deuxième critère de classification de ces types de fractures est la valeur de l'angle formé par ces fractures par rapport aux directions de C1 et C2. Les R et P formant un angle inférieur à 25° et les R'et P' autour de 75°. Les fractures formant un angle autour 45° par rapport au cisaillement principal sont considérées comme des fentes de tension et elles sont souvent en échelon. On a pu identifier des fractures T1 associées à C1. Par contre aucune fracture fente de tension T2 associée à C2 a été identifiée. Ces fractures de Riedel sont les résultats de contraintes régionales. Et elles sont aussi associées non seulement aux zones de cisaillements mais également aux failles de décrochement.

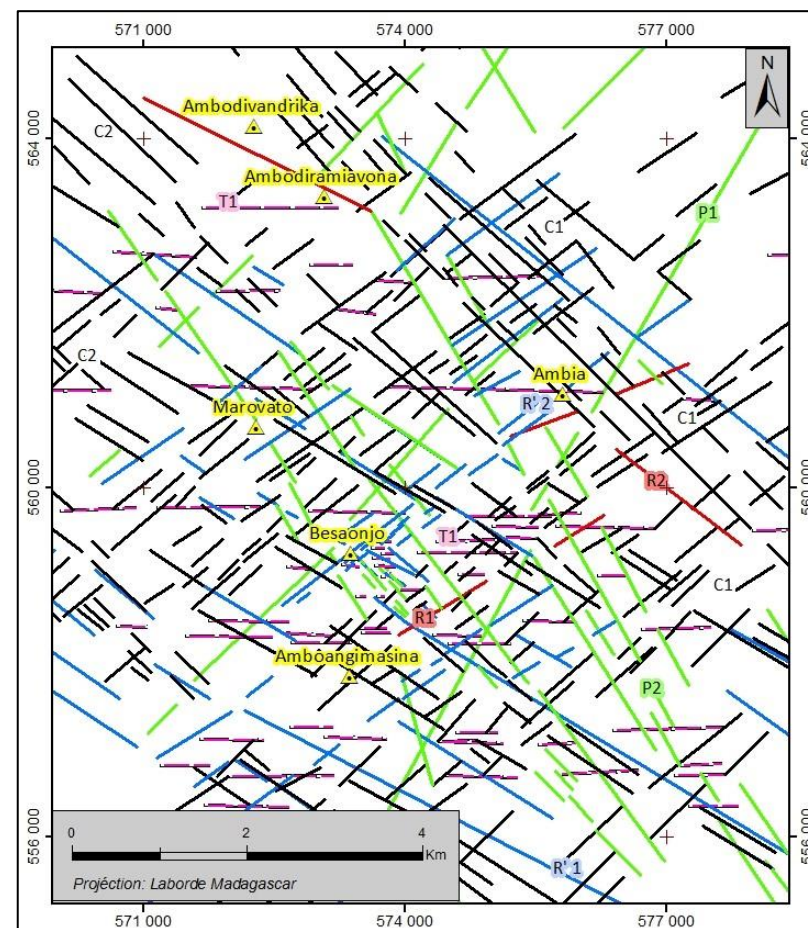
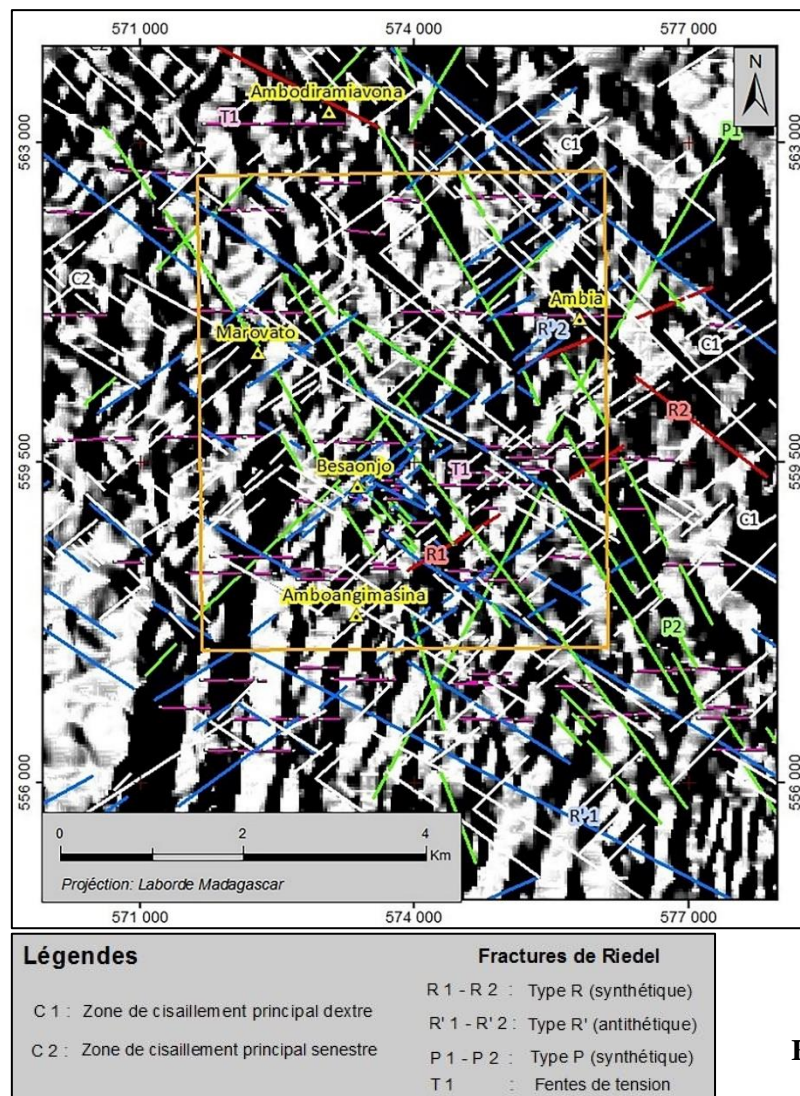


Figure 23 : Carte des différents types de fractures de Riedel (Damosoa *L*, 2017)

La rosace directionnelle ci-dessous (*figure 24A*) montre les directions des fractures et celles de cisaillements principaux. Les cisaillements C1 sont orientés N060 et les C2 N120. Toutes les fractures ou failles parallèles aux directions précédentes appartiennent à C1 et à C2. Une interprétation faite par le cabinet MGC à l'aide du méthode géophysique a révélé la présence de failles de décrochement non coaxiales séparées par une zone duplexe. C'est la direction des fractures traversant la zone duplexe qui est représentée par le diagramme orienté à N155. Les *figures 24B* montrent la représentation géométrique des types de fractures de Riedel dans des zones de cisaillement dextre et senestre respectivement.

- Les directions des fractures de Riedel associées à C1 :

- R1 : N065
- R'1 : N135
- P1 : N035
- P'1 : N150
- T1 : N090

- Les directions des fractures de Riedel associées à C2 :

- R2 : N115
- R'2 : N045
- P2 : N145
- P'2 : N015 – N020

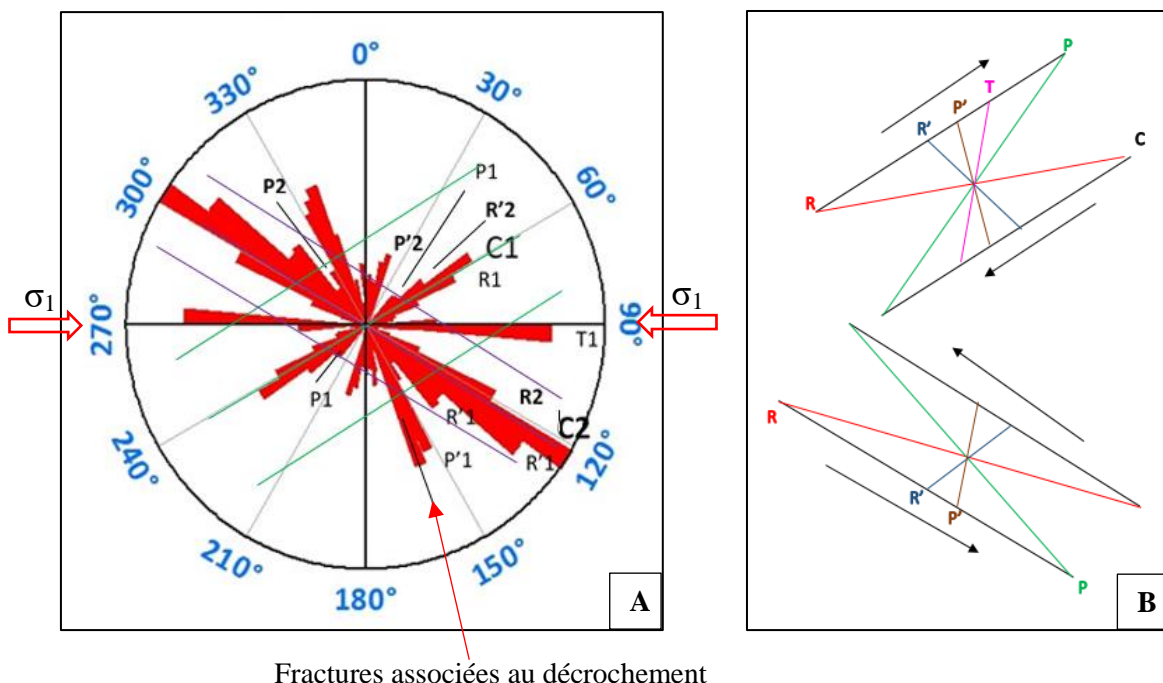


Figure 24 : A) Rosace directionnelle des fractures de Riedel, B) Modèles géométriques de fractures de Riedel

III-3- TYPES DE MINERALISATION A BESAONJO

L'étude structurale a révélé que la minéralisation aurifère de Besaonjo fait partie du gîte hydrothermal à moyenne température (200 à 400 °C) ou du gîte mésothermal. A Besaonjo, on distingue deux types de gîtes dont les gîtes primaires appartenant au domaine Archéen et les gîtes secondaires ou placers (paléoplacers, placers résiduels et placers alluviaux).

III-3-1- Minéralisation primaire d'or contrôlée par des structures précoces et tectoniques

L'identification des fractures de Riedel a permis de séparer les fractures prometteuses des fractures stériles. Les indices d'or extraites des cartes du PGRM, de la mission Soviétique ainsi que ceux obtenus lors des travaux de terrain coïncident aux zones de cisaillement C1-C2 et aux fractures associées R1-R2, R'1-R'2 et T (*figure 25*). L'or se concentre plutôt au niveau des structures anticlinales et à l'intersection des failles ou des zones de cisaillement.

La carte suivante (*figure 26A*) résume la relation entre le BIF, les structures N – S (anticlinales et synclinales), les cisaillements principaux (dextres et senestres) et les dykes mafiques ainsi que le trait de coupe AB avec une carte de « Second order Tilt derivative » pour fond.

Pour une meilleure visualisation, une représentation en trois dimensions (3D) a été faite (*figure 26B*). Les indices d'or sont concentrés au niveau de charnières des plis et sont contrôlés par des failles de cisaillements.

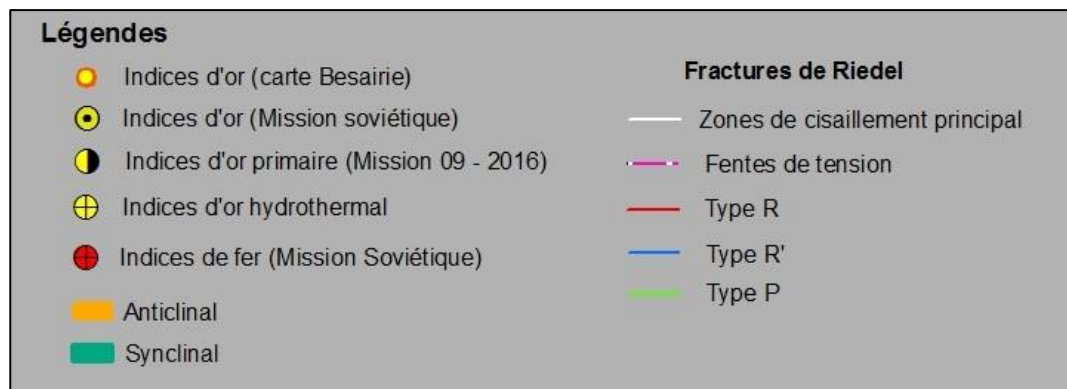
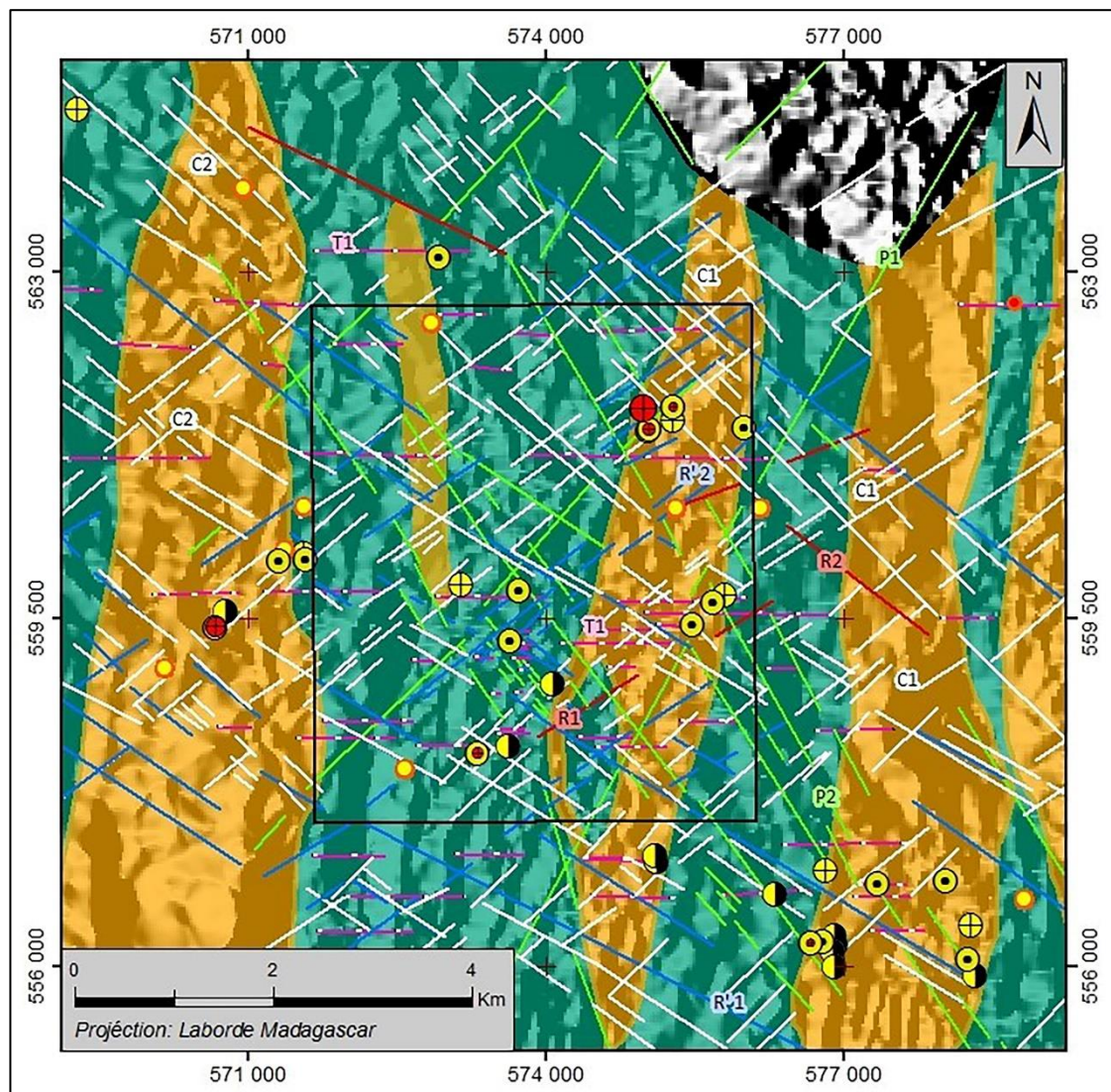
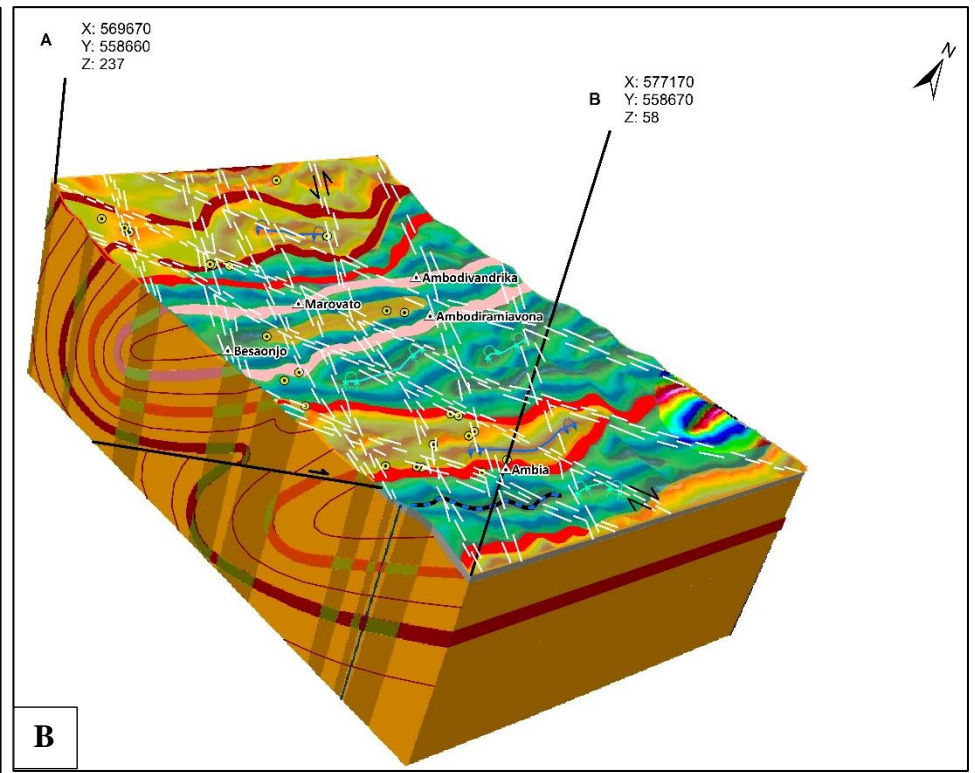
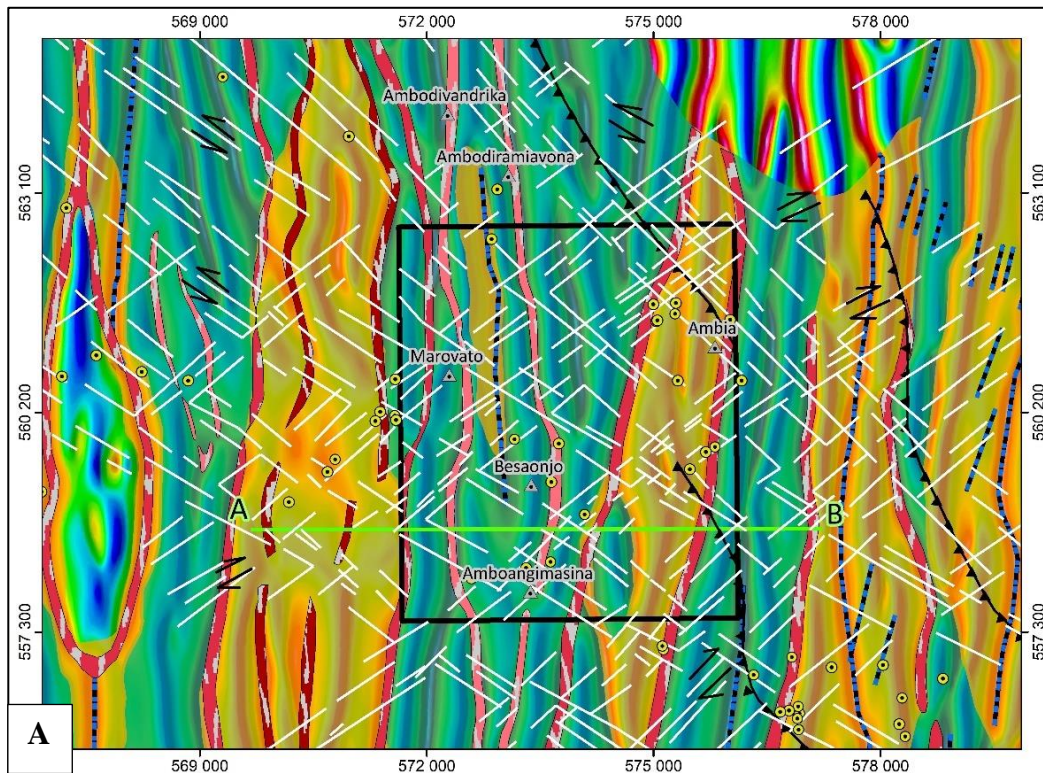


Figure 25 : Carte montrant la relation entre déformations ductiles, fractures et minéralisation aurifère (Damosoa L, 2017)



Légendes

- | | |
|------------------|--------------------------------|
| ● Indices d'or | Anticlinal |
| — Foliations | Synclinal |
| — Cisaillements | Zones de cisaillement |
| — Chévauchement | Zones favorables |
| — Dyke | 3 ^{ème} couche de BIF |
| — Axe anticlinal | 2 ^{ème} couche de BIF |
| — Axe synclinal | 1 ^{ère} couche de BIF |

Figure 26 : A) Carte de Second order Tilt Derivative, B) Représentation en trois dimensions de la coupe géologique de Besaonjo (*Damosoa L, 2017*)

III-3-2. Minéralisation secondaire associée à des structures tardives et paléochenal

Une anomalie U+Th de direction N-S a été détectée dans la zone d'étude. Cette structure n'a pas été détectée sur la carte magnétique ; elle n'est donc pas associée au socle cristallin mais plutôt à une formation sédimentaire. Comme l'uranium et le thorium supportent un long transport par les cours d'eau, une anomalie de la somme de ces deux isotopes est souvent associée aux sédiments fluviaux. L'allure de la structure détectée ressemble beaucoup à un ancien lit de rivière (paléochenal). Le lessivage de la structure par l'actuelle rivière Maha a entraîné un amincissement du sédiment provoquant ainsi à une diminution de l'intensité de l'anomalie radiométrique et la séparation de cette dernière en deux parties. Des galets provenant du remaniement des sédiments ont été identifiés le long de cette anomalie. Les informations extraites de la carte de la mission soviétique, celles extraites de la carte de PGRM et les données acquises pendant nos travaux de terrain confirment la minéralisation en or du paléochenal. La valeur maximale (9,006 ppm) représentée par une couleur violet ou magenta montre l'enrichissement en U + Th d'accumulation de sédiments (**figure 27**).

La présence de la structure synforme tardive à l'extrême NW de la zone d'étude était à l'origine de l'appel de sédiments provoquant ainsi l'écoulement de l'ancienne rivière du Sud vers le Nord. En outre, la structure antiforme d'Ambia à l'Est constituait une barrière pour ladite rivière de s'écouler vers l'Est. C'est ainsi que le paléochenal est né. Nos travaux d'interprétation et ceux de terrain ont permis de délimiter des nouvelles terrasses qui n'ont pas été identifiées par la mission soviétique. Après test à la batée et analyse au laboratoire, les terrasses sont belles et bien minéralisées en or (**figure 28**).

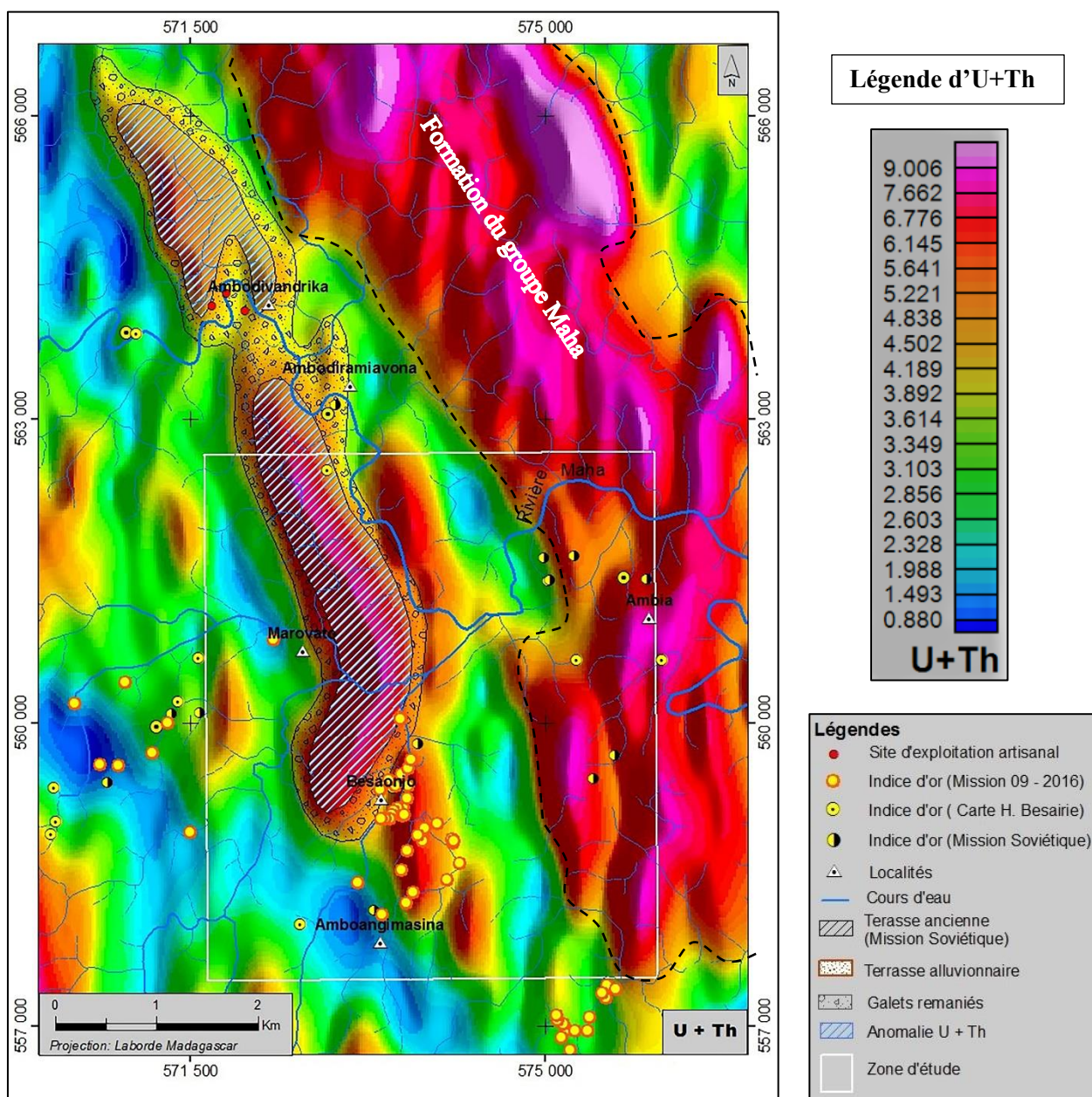


Figure 27 : Carte d'U+Th montrant l'accumulation des sédiments (*Damosoa L, 2017*)

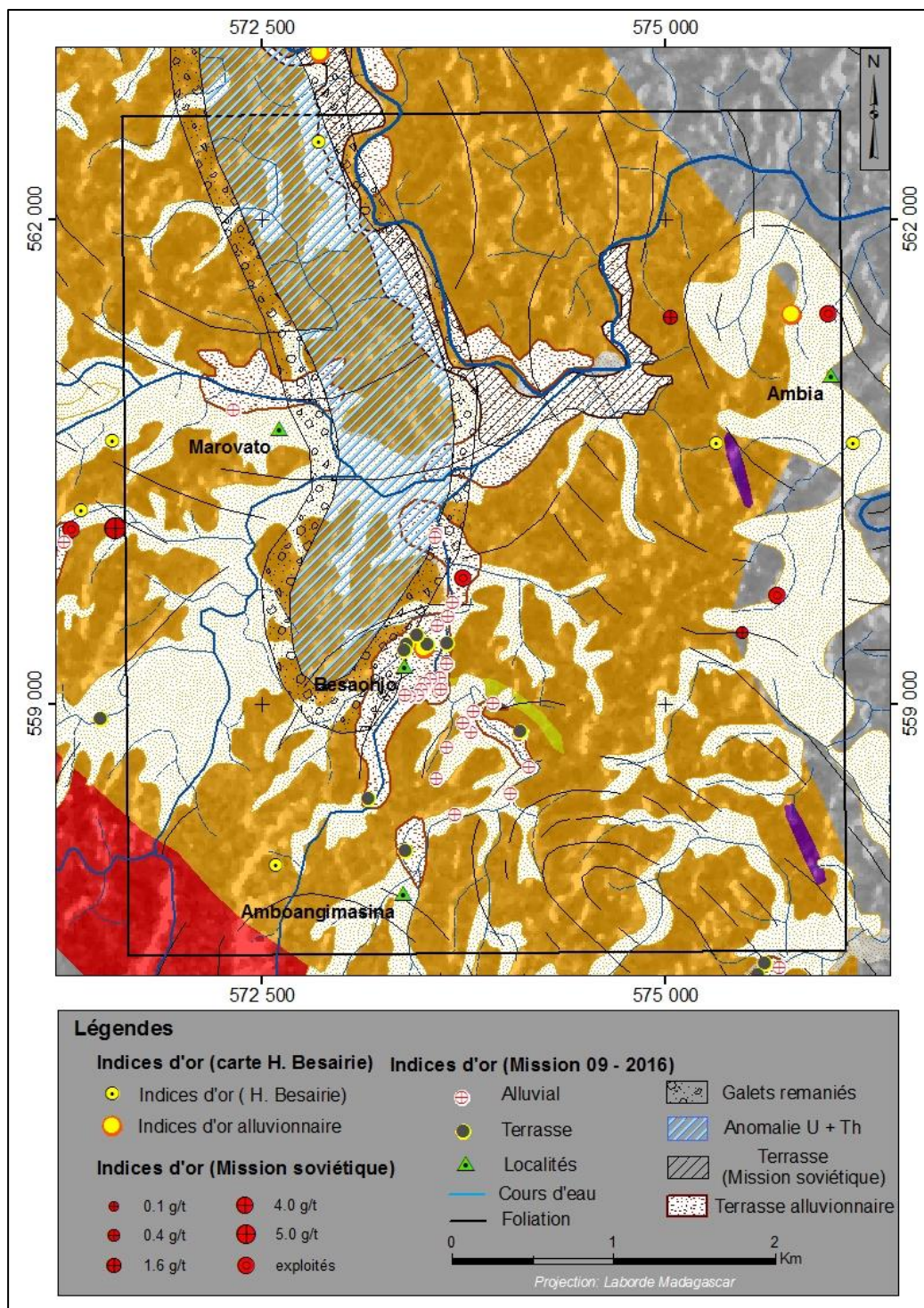


Figure 28 : Carte montrant la relation entre les structures tardives et minéralisation aurifère secondaire (Damosoa L, 2017)

Une accumulation de sédiments présentant les mêmes signatures spectrales que la formation de Maha et le granitogneiss a été identifiée à partir d'une classification d'image satellite (*MGC, 2017*) ; elle est localisée au niveau du paléochenal identifié par la radiométrie et s'étend dans une partie de la structure synforme tardive.

Il est à remarquer que la formation de Vohilava affleure aux endroits où les cours d'eau lessivent les sédiments du paléochenal. Donc ce dernier est formé d'une mince couche de sédiments qui est facilement érodée (lessivée) par le cours d'eau. La carte ci – dessous montre le résultat d'une classification supervisée d'une image obtenue par la composition des Composantes Principales (RVB : CP3 CP2 CP1) (**Figure 29**).

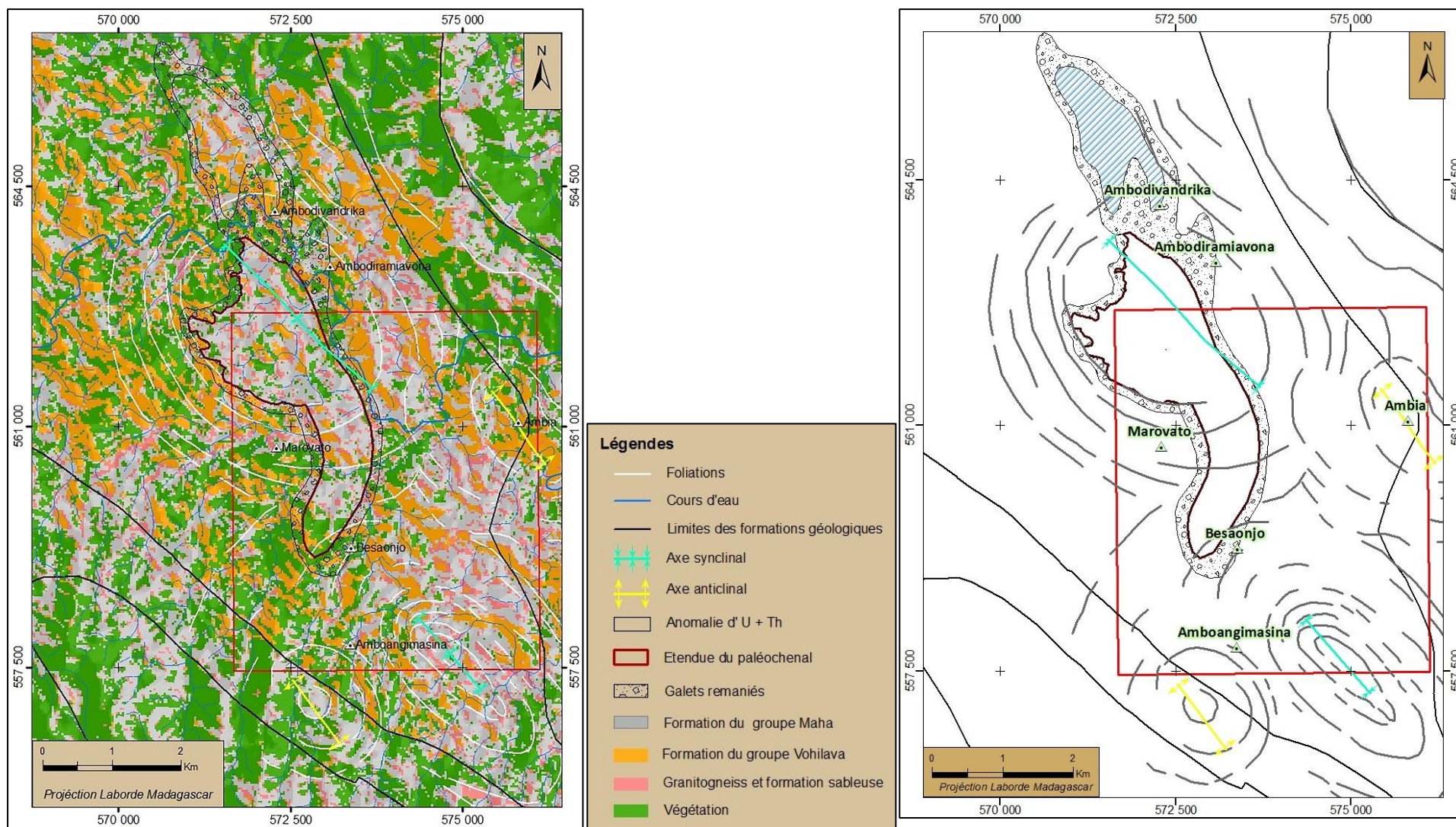


Figure 29 : Relation entre les structures tardives et les nouvelles limites du paléochenal (MGC, 2017)

III-4- RESULTATS GEOCHIMIQUES ET POTENTIEL EN OR DE LA ZONE

- Les travaux géochimiques effectués lors de la cartographie du PGRM ont révélé la présence des éléments traceurs d'or à l'occurrence Ag, As et Te. On peut remarquer une corrélation positive entre l'Au, Ag et As. Les résultats obtenus pour le Te sont tous en dessous du seuil de détection de la méthode d'analyse.

Tableau 05 : résultats d'analyses géochimiques du PGRM 2008

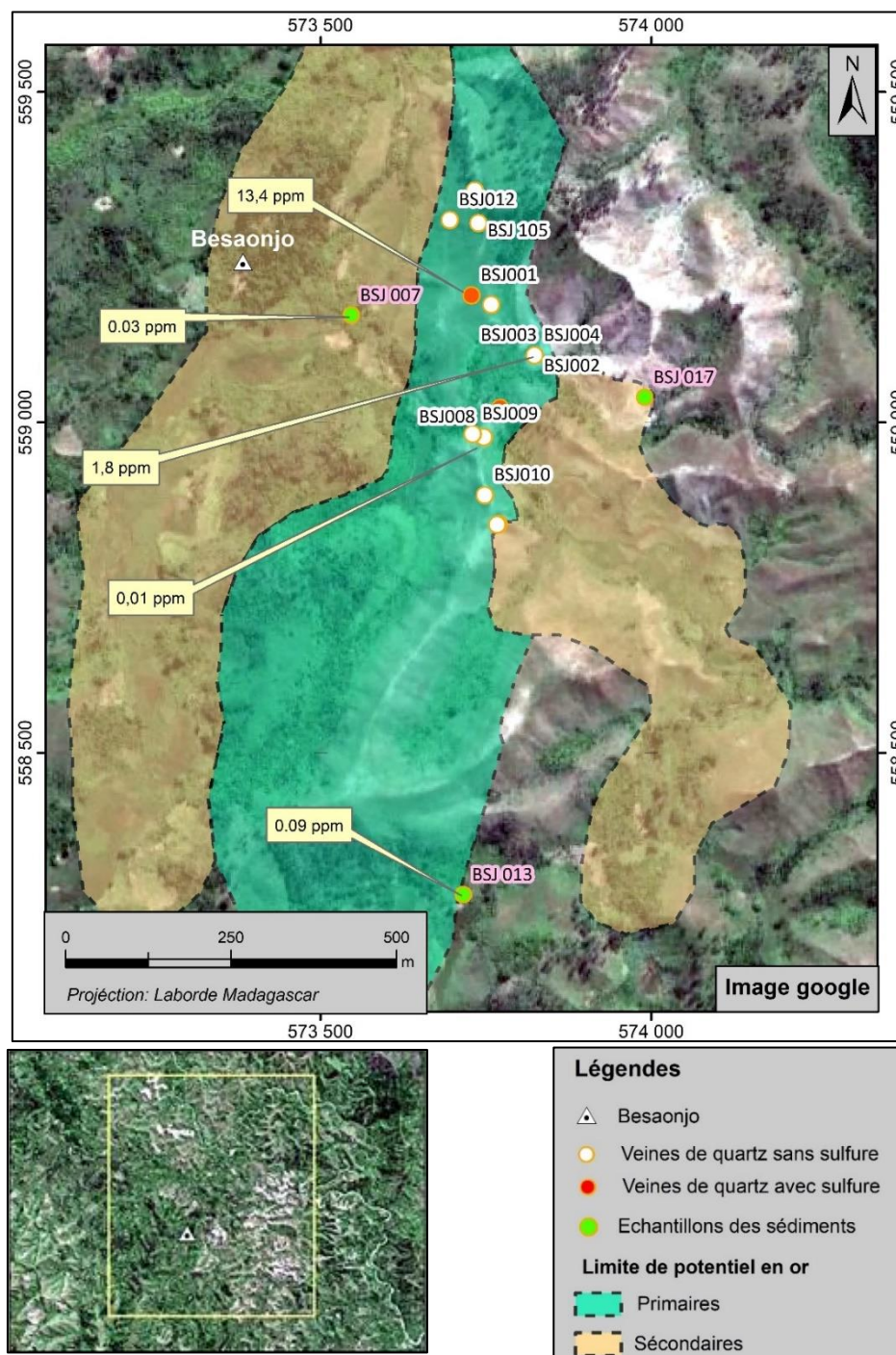
Echantillons	Coordonnées	Au (ppm)	Ag (ppb)	As (ppb)	Te (ppm)
E1	512184 / 560856	<0.5	<0.5	0.9 – 1.2	<0.020
E2	575493 / 559230	<0.5	<0.5	0.6 -0.9	<0.020
E3	575688 / 559869	<0.5	<0.5	0.6 -0.9	<0.020
E4	575883 / 558714	0.9 - 1.2	0.9 - 1.2	3.6 – 9.7	<0.020

- Des échantillons des veines de quartz et des sédiments ont été analysés. Les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous (**Tableau 06**). Le BSJ001 a donné la valeur la plus élevée de 13,4 ppm d'or et 1,8 ppm pour BSJ002. La valeur la moins élevée d'or est de 0,01 ppm pour BSJ008. Compte tenu du coût, l'analyse multiélément n'a pas été faite systématiquement. Nos résultats montrent que les éléments traceurs ont donné des valeurs en dessous des seuils de détection de la méthode ICP-MS. On peut conclure que l'or de Besaonjo n'est pas associé aux éléments traceurs.

Tableau 06 : résultats d'analyses des échantillons par ICP-MS (Inductively Coupled plasma- Mass Spectrometry)

Echantillons	Types d'échantillon	Coordonnées	Au (ppm)	Ag(ppb)	As(ppb)	Cu(ppb)	Mo(ppb)
BSJ001	Veine de quartz à oxyde de fer, à mica et à talc	573728/559192	13.4	Non disponible	Non disponible	Non disponible	Non disponible
BSJ002	Veine de quartz à oxyde de fer, à feldspath, à sulfure et concordante aux schistes	573824/559102	1.8	<0.5	<0.2	<0.5	<0.5
BSJ004	Quartz à séricite	573824/559102	0.10	Non disponible	Non disponible	Non disponible	Non disponible
BSJ005	Quartz à séricite, à oxyde de fer, à mica et à feldspath	573772/559022	0.09	Non disponible	Non disponible	Non disponible	Non disponible
BSJ007	Sédiments alluviaux	573547/559162	0.03	<0.5	<0.2	<0.5	<0.5
BSJ008	Veine de quartz concordante aux schistes	573747/558978	0.01	<0.5	<0.2	<0.5	<0.5
BSJ010	Veine de quartz	573749/558890	0.08	Non disponible	Non disponible	Non disponible	Non disponible
BSJ012	Veine de quartz	573716/558286	0.07	<0.5	2020	<0.5	<0.5
BSJ013	Sédiments alluviaux	573739/559302	0.09	<0.5	<0.2	<0.5	<0.5
BSJ014	Veine de quartz	573733/559351	0.08	Non disponible	Non disponible	Non disponible	Non disponible
BSJ015	Veine de quartz	573696/559306	0.10	Non disponible	Non disponible	Non disponible	Non disponible

Les points d'échantillonnage et de test de sédiments sont représentés sur la carte de la **figure 30**. Notre échantillonnage s'intéresse plutôt aux veines de quartz et aux sédiments. L'interprétation des données et les travaux de terrains ont permis de conclure que des minéralisations primaire et secondaire d'or se trouvent dans la zone d'étude.



III-5- ECONOMIE DE L'OR

Les graphes ci-dessous montrent les variations de prix de l'or de 2003 à 2017. Depuis 2003, le prix de l'or n'a pas cessé d'augmenter pour atteindre un record de 1750 \$ l'once en 2012. Un prix élevé a stagné pendant une période de 2 ans pour ensuite diminuer et varier autour de 1250 \$ l'once jusqu'en 2017. Le coût moyen d'exploration de l'or varie de 550 à 650 \$ l'once. Les investissements dans l'exploration et le développement des gisements sont favorables pendant la période où les prix sont faibles pour que le début de la production coïncide avec la reprise de la valeur de l'or



Figure 30 : Variation de prix de l'or en dollar par once de 2003 à 2015



Figure 31 : Variation de prix de l'or en dollar par once
de Mars 2012 à Mars 2017 (www.kitco.com)

Le prix de l'or en date du 01 Juillet 2017 à Madagascar est représenté dans le tableau suivant.

Tableau 06 : prix de l'or à Madagascar (le 01 Juillet 2017)

(<http://www.goldrate24.com/fr/prix-de-lor/afrique/madagascar/>)

Unité d'or	Prix de l'or en ariary malgache (MGA)	Prix de l'or en Etats-Unis Dollar (USD)
Once or	3,747,883.66	1,241.33
Or gramme carats 24	120,510.73	39.91
Or gramme carats 22	110,459.29	36.59
Or gramme carats 21	105,425.70	34.92
Or gramme carats 18	90,353.99	29.93
Or gramme carats 14	70,316.77	23.29
Or gramme carats 12	60,255.36	19.96
Or gramme carats 20	50,212.80	16.63

CHAPITRE IV

DISCUSSION

Les études antérieures et l'interprétation des données du PGRM, de la mission soviétique et des données du cabinet MGC ainsi que la descente sur terrain ont permis de conclure que :

- Nos travaux de terrain s'intéressaient plus à l'observation des filons et des veines de quartz. Deux générations de quartz ont été observées : la mise en place des veines concordantes aux micaschistes de direction N090, N160 et N170 (*figure 17*) est antérieure à celle des filons ou veines discordantes de direction comprise entre N060 à N110 et N155 à N170 et qui remplissent des ouvertures tardives. L'arrivée tardive des fluides provoque une remobilisation de l'or fin qui permettra la libération de l'or intégré au réseau des sulfures dans les cœurs de zones de cisaillements existantes (*Bonnemaison et Marcoux 1987*), et une concentration de l'or remobilisée dans les veines de quartz.

Le filon de quartz blanc laiteux se cristallise dans des conditions de température un peu plus basse que les quartz cristallisés et rarement bien cristallisé mais remplit uniformément des fissures (*Deferne, 2015*). D'après l'analyse pétrographique et géochimique, on a constaté que l'or se concentre dans les veines des quartz très fracturées et associées aux oxydes de fer, aux sulfures ainsi qu'aux micas (*figure 14*) (*Hassan, 1999*). La présence des veines de quartz et des minéraux hydrothermaux (oxyde de fer, les sulfures et les micas) est une évidence d'une activité hydrothermale contrôlée par des fractures.

Pour le cas de Besaonjo, l'or se concentrent plus dans les veines de quartz discordantes que celles concordantes.

- Les interprétations des images satellites et radar, le MNT ainsi que des données géophysiques faites au sein du cabinet MGC ont permis de découvrir les différentes structures à Besaonjo. Nous avons pu identifier deux (02) générations de plis ainsi que deux groupes de cillaiements majeurs.

- Les plis précoces isoclinaux renversés (anticlinaux et synclinaux) de plan axial N-S affectant la formation de Vohilava ont été identifiés à partir des données magnétiques. Ce qui implique l'existence d'une contrainte E – W après la mise en place du BIF ou quartzite à magnétite (*Moine, 2013*).

- Les plis tardifs (antiformes et synformes) orientés NW à NNW affectant la formation de Vohilava et celle de Maha sont mis en évidence par les images satellites.

Les réseaux de fractures observés pourraient être associés aux mêmes contraintes qui ont généré les plis cités ultérieurement. D'après *Loumi. K (1994)* des plis et des réseaux de fractures se forment lors d'une déformation compressive .

- Une faille de décrochement associée à la mise en place des dykes mafiques (gabbro et dolérite) de direction N – S a été détectée dans la zone d'étude. Le modèle de Riedel a permis d'étudier les autres fractures et failles. Deux familles des zones de cisaillement principal C1 et C2, dextre et senestre respectivement ont été observées (*figure 21*).

Les fractures de Riedel (R1, R2, R'1, R'2 et T1) associées à ces cisaillements présentent des ouvertures pour les fluides minéralisateurs tandis que les fractures de Riedel (P1 et P2) se referment et sont défavorables à la mise en place d'une minéralisation. En cas d'une réactivation postérieure par d'autres cisaillements , les fractures P pourraient être réouvertes et empruntées par les fluides. Dans la zone d'étude, les fractures assimilées comme les fentes de tension (T1) sont orientées parallèlement à la contrainte E – W d'où la présence des filons ou des veines de quartz orientés E – W. Les expériences au laboratoire ont montré que les fractures R se forment en premier lieu, suivi de R'. Les fractures P et P' ne se développent que sous une contrainte intense.

- Deux types de minéralisation ont été identifiés à Besaonjo.

- **Minéralisation primaire** : contrôlée par les zones de cisaillements servant de conduite pour les fluides minéralisateurs, les structures anticlinales en guise de piège pour concentrer ces derniers, la lithologie mafique (riches en éléments ferromagnésiens) des groupes de Vohilava et de Maha pour favoriser le dépôt de l'or à l'état natif ou associé à des sulfures dans des microfractures. Les fractures de Riedel (C, R, R' et T1) et leurs intersections sont perméables aux fluides minéralisateurs et constituent les endroits favorables pour contenir la minéralisation (*figure 25*).

Cela est confirmé par *Harcou en 2005* qui a mentionné que les structures porteuses de la minéralisation sont diverses, avec notamment des failles cassantes, des plis, des zones de tension ou des zones de cisaillement en milieu ductile-cassant à ductile.

• **Minéralisation secondaire** : trois types de placers ont été observés dans la zone d'étude.

✓ Placer résiduel : des galets décimétriques plus ou moins arrondis montrant son origine proximale ont été déterrés d'une formation riche en kaolin. Quelques fragments de quartz fracturés renferment du kaolin dans ses fractures. Des veines de quartz en place ont été également trouvées au même endroit.

✓ Placers alluvionnaires : fréquents à Besaonjo et ses environnants. Ils sont formés de galets de base et de sol argileux ou latéritique.

✓ Paléoplacer : il s'agit de paléochenal de direction N – S et représente la source principale de la minéralisation des alluvions remaniées.

- D'après nos analyses effectuées au laboratoire de l'OMNIS, les teneurs en Ag de cinq échantillons sont toutes en dessous du seuil de détection (< 0,5 ppb). Quant à l'As, un seul échantillon sur cinq a donné du résultat égal à 2020 ppb tandis que les quatre autres ont donné des résultats inférieurs au seuil de détection (< 0,2 ppb). Malgré les faibles teneurs en éléments traceurs (Ag et As), des pépites d'or ont été récupérées du fond de batée. Ainsi on peut conclure que *l'or de Besaonjo se trouve à l'état natif*. Nos observations à l'œil nu ou à la loupe des fragments ou des galets de quartz n'ont pas permis de trouver de l'or. L'or se trouve donc soit sous forme d'inclusion dans les sulfures soit sous forme de grains microscopiques.

- Un essai d'analyse spectrale des images Landsat 8 a été fait pour détecter les altérations hydrothermales associées aux veines minéralisées. Les techniques de composition colorée et de rapports des bandes n'ont pas donné des résultats positifs. Les altérations trouvées lors de nos travaux de terrains étaient non seulement d'une étendue très limitée mais couverte de végétation.

CONCLUSION

CONCLUSION

En effet, la zone d'étude appartient au sous domaine de Masora appartenant au « Greater Dharwar Craton ». Madagascar était affecté par une déformation due à l'orogénèse panafricaine. Ce dernier est marqué par une déformation ductile avec des degrés de métamorphisme variables et une déformation cassante.

L'analyse de surface basée sur l'étude des linéaments détectés à partir du MNT (ASTGTM), de Landsat 8 OLI et radar nous a conduit à établir une disposition spatiale des fractures et des failles, à partir de laquelle nous avons pu extraire un modèle compatible à celui de Riedel en tenant compte des cisaillements principaux C et les fractures R, R', P et P' et T. Une faille de décrochement dextre de direction N – S a été observée. La mise en place de ces fractures et failles est associée aux plis isoclinaux renversés précoces de direction N – S et NW – SE tardifs. Ces différents types des plis sont identifiés à partir de l'interprétation des cartes aéromagnétiques en se basant sur la cartographie de BIF et de l'interprétation des images satellites.

L'ouverture ou la fermeture des failles (y compris les cisaillements et décrochements) et fractures ont une influence sur la perméabilité aux fluides minéralisateurs et fluides silicatés. Ces derniers jouent le rôle de remplissage des vides en formant les filons ou veines de quartz. A Besaonjo, il y a des veines de quartz gris à oxyde de fer et à sulfure concordantes aux micaschistes (de direction N090 et N160) ainsi que des veines de quartz blanc laiteux tardivement cristallisés et quelque fois riche en oxyde de fer et sulfure qui sont discordantes aux encaissantes (de direction N070 à N110 et N155 à N170). Ce sont les veines discordantes qui sont porteuses de la minéralisation aurifère de cette zone d'étude. Nos travaux de terrain ont révélé la concentration de l'or de Besaonjo dans les microfractures des veines de quartz riches en minéraux hydrothermaux (l'oxyde de fer, les micas et les sulfures). L'or se présente sous forme de grains fins microscopiques ou d'inclusion dans les minéraux sulfurés. Les échantillons prélevés à Besaonjo ont montré une faible teneur en éléments traceurs d'or. On peut en déduire que l'or de Besaonjo est à l'état natif (présence de pépite dans le fond de batée).

Les minéralisations en or sont typiquement hydrothermales. Deux types de minéralisations aurifères sont présents à Besaonjo : la minéralisation primaire contrôlée par des zones de cisaillements régionales C et les fractures prometteuses de Riedel (R, R' et T), des structures (plis anticlinal N – S) comme piège ainsi que la nature des formations géologiques (renfermant des minéraux ferromagnésiens). La minéralisation secondaire constituée de placer résiduel (près de la source), placers alluviaux (aux bords de cours d'eau et dans les rizières) et le paléoplacer (représenté par le paleochenal et les anciennes terrasses). Les structures tardives en particulier la synforme, sont à l'origine de l'appel de sédiments et ont favorisé la formation du paleochenal. Ce dernier étant rempli de sédiments résultant de l'érosion du micaschiste du groupe Maha et du granitogneiss d'Imorona-Itsindro.

La détection des altérations hydrothermales est très importante dans l'exploration d'un gisement aurifère. Malheureusement, ces altérations sont difficilement identifiables car non seulement leurs extensions spatiales sont très limitées, mais également la zone d'étude se trouve dans une région couverte de végétation.

L'utilisation des méthodes géophysiques et de la télédétection à Besaonjo, nous a permis d'identifier non seulement des sources primaires et secondaires mais également elle a permis de connaître la relation entre les structures, la tectonique et la mise en place de la minéralisation aurifère.

PERSPECTIVES

En perspective, une prospection magnétique au sol à maille serrée 10x10m serait nécessaire pour trouver les accumulations des minéraux lourds avec lesquels sont associés l'or au niveau du paléochenal.

- La confection des lames minces pour mieux connaître la pétrographie des roches environnantes ainsi que ses minéraux constitutifs (les natures exactes de l'oxyde de fer, de micas et des sulfures contenus dans le quartz) est recommandée. La fabrication d'une lame épaisse dans le but d'étudier les inclusions fluides et l'origine

des quelques minéraux (à l'occurrence les oxydes de fer) permettra de mieux comprendre la minéralisation de Besaonjo.

- Plus d'analyses chimiques multiéléments des veines de quartz et des roches encaissantes apportera une idée claire sur les éléments traceurs de l'or.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUE ET
WEBOGRAPHIQUE

Références bibliographiques

- [1] ANSARI A. H et ALAMDAR K, 2011. A new edge detection method based on the analytic signal of tilt angle (ASTA) for magnetic and gravity anomalies. Iranian Journal of Science & Technology, p. 81-88.
- [2] ANSARI A. H et ALAMDAR K, 2010. An improved method for geological boundary detection of potential field anomalies. Journal of Mining & Environment, Vol.1, No.2, p. 37-44.
- [3] ALESSANDRA de B. S et FRANCISCO J.F Ferreira, 2012. Evaluation of enhancement techniques of magnetic anomalies applied to structural interpretation of the itaituba region, state of par'a – brazil. Revista Brasileira de Geofísica, p.373-388.
- [4] BONNEMAISON M. et MARCOUX E, 1987. Les shears zones aurifères – Proposition d'un modèle Conceptuel. Bureau de Recherche Géologiques et Minières, p 39
- [5] BEAUDOIN G, 2006. Manuel de géologie et métallogénie. Thèse de doctorat au Faculté des Sciences et de Génie à l'Université Laval, Québec, p 56 – 103.
- [6] BRODIE R C, 2002. Airborne and ground magnetics. Geoscience Australia, Geophysical and Remote Sensing for Regolith Exploration, Vol 144, p. 33 – 45.
- [7] CORBETT G, 2007. Controls to low sulphidation epithermal Au – Ag mineralization. p 28
- [8] CHRISTINE V, ALAIN T., LECERC F et al, 2015. Analyse structurale de la zone de cisaillement de la rivière France et de ses minéralisations aurifères, région de Chibougamau, Québec. Université de Quebec à Montréal, p. 39
- [9] DE WAELE B., THOMAS R.J., MACEY P.H. et al., 2011. Provenance and tectonic significance of the Palaeoproterozoic metasedimentary successions of central and northern Madagascar. Precambrian Research, Vol 189, p. 18– 42
- [10] DAMIEN G, 2004. Paramètre des altérations hydrothermale des gisements de type VMS et aurifère : Comparaison de la performance d'indicateur d'altération. Thèse de Doctorat en géologie. Rapport du projet Consortium de Recherche en Exploration Minérale, 2A, p. 77.

- [11] DAVID D. W, KWASI P, REGINALD M. N et al, 2015. Geophysical Interpretation of Possible Gold Mineralization Zones in Kyerano, South-Western Ghana Using Aeromagnetic and Radiometric Datasets. *Journal of Geoscience and Environment Protection* Vol 3, p. 67-82.
- [12] DEFERNE J, 2007. Presque tout sur le quartz. P 20
- [13] FRANÇOIS B. et al, 1994. Relations entre cristallisations de quartz et concentrations aurifères (exemple des filons aurifères du Birimien du Burkina Faso, Afrique de l'ouest), p 543-550.
- [14] FRANCISCO J. F. F, JEFERSON de S, ALESSANDRA de B. S. B, et al, 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Article de géophysique*, VOL. 78, NO. 3, P. J33–J41.
- [15] HARCOUET V, 2005. Modélisations thermiques de gisements orogéniques mésothermaux : Application au Ghana. Thèse de doctorat de l'Institut de Physique du Globe de Paris, p 1 – 267.
- [16] HASSAN Z. H, 2000. A genetic model for a mesothermal fluid inclusions and stable isotopic studies at El Sid Gold Mine, Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, vol 30, No 2, p 267 - 282.
- [17] JON H., 2013. Controls on high – grade Au ore shoots: towards a new paradigm. *East Asia – Geology, Exploration Technologies and Mines*, p. 40.
- [18] KAMAR S. A, 2012. Mesothermal Lode Gold Deposit Central Belt Peninsular Malaysia”. *University Sains Malaysia. INTECH*, p 313 – 342.
- [19] KERRICH, 1983 et PHILIPS, 1986. Chemical equation summarizing some of the reaction that take place in alteration zones in deposits in greenschist facies.
- [20] KRÖNER A., et STERN R J, 2004. Pan-African Orogeny. *Encyclopedia Of Geology* vol. 1, p. 1 – 26.
- [21] LISA J. V, 1994. GOLD: Geophysical setting of BIF-hosted gold deposits at Tuckabianna, Western Australia. *ASEG Special Publications*, p241 – 256.

- [22] LOUMI, K., ASSES A., BOUSSAD et al, 2015. A analyse du reseau de fractures du complexe de tirechouminen (ahnet central-algerie) et impact sur le potentiel petrolier. Université M'hamed Bougara Boumerdes. Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie, p 01 – 23.
- [23] LE CORRE Cl., et al, 1987. Télédétection des structures tectoniques par l'analyse de la texture d'image (Spot, Maroc Hercyenne). Université de Rennes, centre Armoricaïn d'Etude Structurale des Socles, p 331
- [24] MOHAMED K. E, 2010. Structural Control on Banded Iron Formation (BIF) and Gold Mineralization at Abu Marawat Area, Central Eastern Desert, Egypt. Department of Structural Geology & Remote Sensing, Faculty of Earth Sciences, King Abdulaziz University, Vol 22, No.2, pp 155-178.
- [25] MCMILLAN R.H, 1996. Iron formation-hosted Au. British Columbia Ministry of Employment and Investment, p 63-66.
- [26] MUZAFFER Ö A et ÜNAL D, 2013. Edge Detection of Magnetic Sources Using Enhanced Total Horizontal Derivative of the Tilt Angle. *Yerbilimleri*, VOL 34, NO.1, p. 73-82.
- [27] RAZANATSEHENO M. M. O, 2003. Le granite porphyroïde de carion (centre Madagascar) témoin d'un magmatisme shoshonitique à la fin de l'orogénèse est Africaine. Thèse de doctorat du troisième cycle de géologie appliquée, Faculté Sciences, Université d'Antananarivo. P 202
- [28] RAHARIMAHEFA T, TIMOTHY M. K et al, 2006. Structural and remote sensing studies of the southern Betsimisaraka Suture, Madagascar. *Revue de Gondwana Research* Vol 10, p. 186–197.
- [29] RAMIANDRISOA N. L, 2010. Etude métallogénique du gisement d'or de Dabolava, Centre Ouest de Madagascar - Un exemple de minéralisation aurifère mésothermale dans des formations protérozoïques. Thèse de doctorat à l'Université d'Antananarivo, p157.

- [30] RAZAFINDRAMAKA N. O, 2009. Monographie des gisements auriferes de Madagascar. Memoire de fin d'etude pour l'obtention du Diplome d'etudes approfondies, Ecole superieure polytechnique d'antananarivo, Universite d'Antananarivo, p 161.
- [31] REEVES C, 2015. Aeromagnetic surveys Principles, practice and interpretation earthwork., Énergie et Ressources naturelles. Géosoft, p. 155
- [32] ROIG J.Y, TUCKER R.D., PETERS S.G et al, 2012. Nouvelles cartes géologique et métallogéniques de Madagascar à l'échelle du millionième Antananarivo. P 18
- [33] ROIG J.Y., TUCKER R.D., MOINE B et al, 2014. A geological synthesis of the Precambrian shield in Madagascar. Journal of African Earth Sciences Vol 94, p. 9–30.
- [34] SEYED A. A. H, FARAMARZ D. A, SEYED H. T et al, 2013. Edge Detection in Gravity Field of the Gheshm Sedimentary Basin. Int J Min & Geo-Eng (IJMGE), Vol. 47, No. 1, pp. 41-50.
- [35] STEPHEN G. A, 2017. The Nucleation and Evolution of Riedel Shear Zones as Deformation Bands in Porous Sandstone. Master of science In the Graduate College, University of arizona. The Journal of Structural Geology, p 60
- [36] TAKASHI O, 2008. The Use of GIS and Remote Sensing for Mineral Exploration. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, MINTEC 6-7-part 1a et part 1b, p 144.
- [37] TUCKER R.D, ROIG J.Y, DELOR C et al, 2011. Neoproterozoic extension in the Greater Dharwar Craton: a reevaluation of the “Betsimisaraka suture” in Madagascar. Can. J. Earth Sci. Vol 48, p. 389–417.
- [38] VERDUZCO B, DEREK F.J, GREEN C.M et al, 2004. New insights into magnetics derivatives or structural mapping. The Leading Edge, p.116 – 119.
- [39] WHITE and HEDENSQUIST, 1990. Epitermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. The society of Ressources Geology. Publication No.1 p. 1, 9-13.

[40] WILLIAM O, MICHEL M, SÉBASTIEN C et al, 2016. Geological Setting of the World-Class Musselwhite BIF Hosted Gold Deposit, Ontario, Canada. Mineral Resources in a Sustainable World Vol 3, p 1115 – 1118.

Références Webographiques

[1] ABDELLAH, Boushaba. Eléments de métallogénie et de géologie minière. Ouvrage, Ecole de Mine de Nancy. Disponible sur <[http:// www.academia.edu](http://www.academia.edu) > (consulté le 02/03/17)

[2] BOUR I. Tectonique et types de déformation des roches. Laboratoire Biogéosciences Université de Bourgogne. Disponible sur <[http:// www.ivanbour.files.wordpress.com](http://www.ivanbour.files.wordpress.com)> (consulté le 15/06/17)

[3] Contraintes et déformations. Disponible sur <<http://www.step.ipgp.fr> > (consulté le 15/06/17)

[4] Conjuguate Riedel deformation. Disponible sur <[http:// www.geo.arizona.edu](http://www.geo.arizona.edu) > (consulté le 15/06/17)

[5] Cyril Langlois. Plutonisme en France. Disponible sur <<http://www.masterbgstu1.free.fr> > (consulté le 24/05/17)

[6] Jean François (2009). Déformation et contraintes. Disponible sur <<http://www.jfmoyen.free.fr> > (consulté le 15/06/17)

[7] Les variétés de couleurs d'or. Disponible sur <[http : //www.eleonaure-com-couleur-or.fr](http://www.eleonaure-com-couleur-or.fr)> (consulté le 06/03/17)

[8] Les placers aurifères. Disponible sur <[http : //www.akmining.com](http://www.akmining.com) > (consulté le 06/03/17)

[9] Les différentes piège d'or. Disponible sur <[http : //www.pujol.chez-alice.fr](http://www.pujol.chez-alice.fr) > (consulté le 06/03/17)

[10] Les failles : analyses de cas et compléments. Disponible sur <<http://www.elements-geologie.com> > (consulté le 09/06/17)

- [11] London Gold price. Disponible sur <<http://www.kitco.com>> (consulté le 30/03/17)
- [12] Mécanisme de la déformation Cassante. Disponible sur <<http://www.geologues-prospecteurs.fr>> (consulté le 02/03/17)
- [13] Notion sur a tectonique. Disponible sur <<http://www.ft.univ-tlemcen.dz>> (consulté le 02/03/17)
- [14] Pierre Freyet. Fracturation initiale des matériaux alimentant les formations superficielles : notions de tectonique et de mécanique des roches. Disponible sur <<http://www.editions-ellipses.fr>> (consulté le 02/03/17)
- [15] Riedel – shear control on the development of pennant veins. Disponible sur <<http://www.tekphys.geo.uni-mainz.de>> (consulté le 15/06/17)
- [16] Stephen G. Ahlgren. The nucleation an evolution of Riedel shear zones as Deformation Band in Pourous Sandstone. Disponible sur <<http://www.Arizona.openrepository.com>> (consulté le 15/06/17)
- [17] Structural geology and structural analysis. Disponible sur <<http://www.assets.cambridge.org>> (consulté le 16/06/17)
- [18] Stricke-slip and oblique-slip tectonics. Disponible sur <<http://www.files.ethz.ch.com>> (consulté le 16/06/17)
- [19] Synthesis: Structural – tectonic Model and timing reconstructions. Disponible sur <<http://www.users.telenet.be>> (consulté le 16/06/17)
- [20] U.S. Geological Survey (January 2015). Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor) Disponible sur <<http://www.lta.cr.usgs.gov>> (consulté le 29/06/17)
- [21] Prix d'or et d'argent en Madagascar en ariary malgache (MGA). Disponible sur <<http://www.goldrate24.com/fr/prix-de-lor/afrique/madagascar/>> (consulté le 01/07/2017)

ANNEXES

Télédétection

Annexe 01 : Tableau des caractéristiques des satellites Landsat 7 ETM+ et Landsat

8 OLI

Caractéristiques	Landsat 7 ETM + (Enhanced Thematic Mapper Plus)	Landsat 8 OLI (Operational Land Image) et TIRS (Thermal Infrared Sensors)
<i>Début de mission</i>	Lancé le 15 avril 1999 par une fusée Delta II 7920	Lancé le 11 février 2013 par une fusée Atlas V 401
<i>Statut satellite</i>	Actif	En développement
<i>Masse</i>	2200 kg	2600 kg
<i>Instruments</i>	ETM +: radiomètre	OLI et TIRS: radiomètre
<i>Bandes spectrales</i>	<div>1 - Bleu 0,45-0,52 µm</div> <div>2 - Vert 0,53-0,61 µm</div> <div>3 - Rouge 0,63-0,69 µm</div> <div>4 - Infrarouge proche 0,78-0,9 µm</div> <div>5 - Infrarouge moyen 1,55-1,75 µm</div> <div>7 - Infrarouge moyen 2,09-2,35 µm</div>	<div>1- Aérosols 0,433 - 0,453 µm</div> <div>2 -Bleu 0,450 - 0,515 µm</div> <div>3 - Vert 0,525 - 0,600 µm</div> <div>4 - Rouge 0,630 - 0,680 µm</div> <div>5 - Infrarouge proche 0,845 - 0,885 µm</div> <div>6 - Infrarouge moyen 1,560 - 1,660 µm</div> <div>1</div> <div>7 - Infrarouge moyen 2,100 - 2,300 µm</div> <div>2</div>

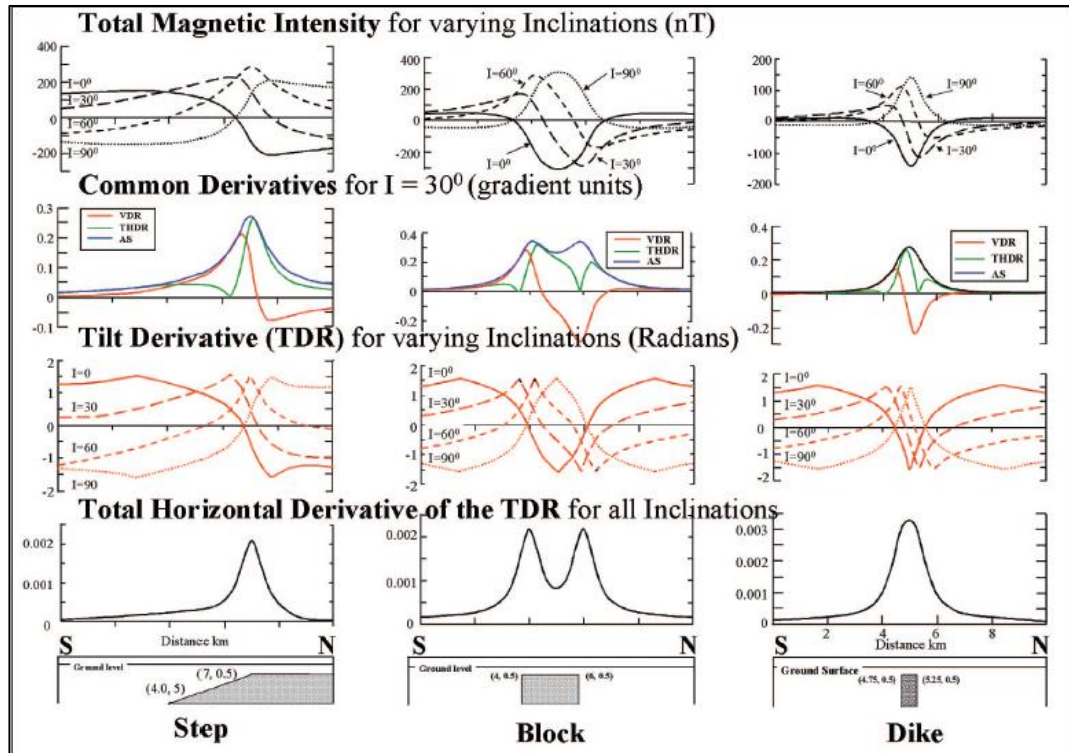
		9 - Cirrus 1,360 - 1,390 μm
<i>Infrarouge Thermique</i>	6 - Infrarouge 10,4-12,5 μm	10 - Infrarouge 10,30 - 11,30 μm moyen 11 - Infrarouge 11,50 - 12,50 μm moyen
<i>Panchromatique</i>	8 - Panchromatique 0,52-0,9 μm	8 - Panchromatique 0,500 – 0,680 μm
<i>Resolution</i>	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique : 100 m	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique : 60 m
<i>Orbite</i>	Altitude : 705 km cycle : 16 jours heure : 10 h-10 h 15	Altitude : 705 km cycle : 16 jours heure : 10 h

- Les données d'acquisition sont plus souvent fournies en format d'images numériques. Et chaque image correspond à une matrice de pixels. Tandis que la taille du pixel correspond à la résolution spatiale et son contenu correspond à l'intensité du rayonnement réfléchi ou émis. Cette intensité est exprimée à niveau gris.

La valeur d'un pixel est de 0 à 256 (2^8) pour le Landsat 7 ETM+ et pour le Landsat 8 de 0 à 65536 (2^{16}) dont le 0 correspond au Noir sombre et le 256 et 65536 correspondent au couleur Blanc.

Géophysique

- La figure suivante montre les différentes formes des corps minéralisés et les courbes correspondantes utilisant quelques filtres mathématiques.



Annexe 02 : Les différentes courbes obtenues à partir du TMI, VDR, THDR, AS, TDR et THDR_TDR (Verduzco and al. Février 2004)

Données de terrains

Les données acquises lors des travaux sont résumées dans le tableau suivant.

Annexe 03 : Tableau des données de terrains

X	Y	Z	Directions	Pendages	Descriptions	Echantillons	Indices d'or	Indices de Sulfure_
572211	560801	71	0	0	Affleurement de veine de quartz			
572325	560830	70	0	0	Orpillage alluvionnaire		Au	
573581	560067	68	0	0	Orpillage alluvionnaire		Au	
573590	559491	92	0	0	Orpillage alluvionnaire		Au	
574040	558449	75	0	0	Orpillage alluvionnaire		Au	
574007	558549	74	140	40	Schiste affleurée dans le rivière			
574014	558577	81	0	0	Affleurement de veine de quartz			-
574020	558617	79	0	0	Affleurement de veine de quartz			
574044	558649	90	0	0	Affleurement de veine de quartz			
574156	558615	71	0	0	Orpillage alluvionnaire		Au	
574126	558692	75	0	0	Affleurement de schiste			
574094	558818	73	0	0	Orpillage alluvionnaire		Au	
574087	558851	71	0	0	Site exploitation abandonné			

574226	558729	79	0	0	Affleurement de microgabbro			
574291	558686	107	0	0	Affleurement de microgabbro			
574362	558723	121	0	0	Fragment des quartz			
574349	558798	116	0	0	Affleurement de microgabbro			
574343	558896	118	0	0	Microgabbro altéré			
574169	558952	99	0	0	Affleurement de veine de quartz			-
573550	558145	61	180	60	Affleurement de paragneiss dans un ruisseau			
573780	559001	63	150	30	Veine de quartz centimétrique concordante au schiste			
573766	559970	95	0	0	Veine de quartz centimétrique concordante au schiste			
573801	558899	93	0	0	Veine de quartz centimétrique concordante au schiste			
573736	558712	93	0	0	Veine de quartz (15 cm) concordante au schiste			
573676	558588	91	0	0	Veine de quartz centimétrique concordante au schiste			
573647	558563	101	0	0	Affleurement de schiste			
573582	558522	130	250	0	Affleurement de veine de quartz			
573751	558946	105	70	0	Affleurement de veine de quartz			
573726	558081	67	0	0	Veine de quartz centimétrique concordante au schiste			
573732	559130	83	0	0	Bloc de quartz			
573761	559215	91	0	0	Affleurement de veine de quartz			
573724	559265	106	0	0	Affleurement de veine de quartz			
573738	559410	101	0	0	Affleurement de veine de quartz			
573722	559458	110	0	0	Affleurement de veine de quartz			

573669	559503	91	0	0	Affleurement de veine de quartz			
573920	559553	63	200	30	Veine de quartz centimétrique concordante au schiste			

573601	559172	66	0	0	Orpillage alluvionnaire		Au	
573639	559099	75	0	0	Filon de quartz			
573697	559129	90	0	0	Filon de quartz			
573698	559193	95	0	0	Filon de quartz			
573728	559192	96	0	0	Filon de quartz fracture (présence d'oxyde de fer, mica)	BSJ001		+
573827	559142	82	0	0	Filon de quartz			
573824	559102	67	160 170	60 70	-Veine de quartz très fracturé concordante au schiste (présence d'oxyde de fer, feldspath altéré) - Présence des galets plus ou moins arrondis (orpillage résiduelle)	BSJ002		+
573824	559102	67	0	0	Quartz à grains fins	BSJ003		
573824	559102	67	0	0	Quartz à séricite	BSJ004		
573937	559010	74	0	0	Ancien terrasse		Au	
573815	558961	70	0	0	Orpillage alluvionnaire		Au	
573772	558022	72	0	0	Quartz à séricite (galet quartz, oxyde de fer, mica, feldspath) dans un puit de 3-4 m de profondeur	BSJ005		+
573769	558846	98	0	0	Filon de quartz avec oxyde de fer			+

573799	558835	92	0	0	Quartz, latérite		Au	
573585	558543	122	0	0	Ancien et actuel site exploitation, présence des quartz lobés		Au	
573159	558420	105	0	0	Ancien terrasse		Au	
573390	558103	110	0	0	Ancien terrasse, site d'exploitation actuel		Au	
574133	558669	67	0	0	Microgabbro	BSJ006		
574142	558685	72	0	0	Dyke gabbroïque			
574170	558735	74	0	0	Gabbro intacte (saine)			
574210	558774	82	0	0	Zone alteration			
574203	558916	95	0	0	Zone potassique et silicifiée			
574102	558838	75	0	0	Ancien terrasse		Au	
573652	559551	61	0	0	Orpaillage alluvionnaire			
573682	559639	64	0	0	Orpaillage alluvionnaire		Au	
573576	560038	57	0	0	Orpaillage alluvionnaire		Au	
572115	560866	80	0	0	Filon de quartz			
572024	560856	78	0	0	Filon de quartz			
573547	559162	66	0	0	Ancien terrasse			
573547	559162	66	0	0	Echantillon de sédiment, présence de pépite (14 grains d'or)	BSJ007	Au	
573595	559085	63	0	0	Ancien terrasse, présence de puit artisanal			
573511	559132	61	0	0	Ancien terrasse, présence de puit artisanal			

573491	559096	63	0	0	Ancien terrasse, présence de puit artisanal			
573467	559059	64	0	0	Ancien terrasse, présence de puit artisanal			
573420	559055	64	0	0	Ancien terrasse, présence de puit artisanal			
573386	559059	65	0	0	Ancien terrasse, présence de puit artisanal			
573338	559051	66	0	0	Présence d'oxyde de fer			
573347	559043	69	0	0	Galet de quartz			
573346	559025	76	0	0	Quartz			
573449	559149	65	0	0	Galet de quartz			
573550	559144	61	180	60	Affleurement de paragneiss			
573611	559095	64	0	0	Orpillage alluvionnaire			
573747	558978	80	170	60	Quartz concordant au schiste, 10cm d'épaisseur	BSJ008		
573730	558982	76	155	60	Quartz vein intercalated with schist	BSJ009		
573706	558962	80	110	0	Quartz filon			
573749	558890	91	0	0	Quartz filon	BSJ010		
573648	558739	60	0	0	Orpillage alluvionnaire		Au	
573568	558582	111	0	0	Echantillon métallique (lourd)	BSJ011		
573738	558790	108	90	0	Filon de quartz			
573767	558845	100	110	0	Filon de quartz			
573761	558922	1016	70	0	Filon de quartz (présence de stockwerk)			
573756	588931	99	0	0	Veine de quartz			
573752	558945	105	70	0	Veine de quartz			

573749	558954	105	0	0	Fragments de quartz			
573646	559257	72	0	0	Point de prélèvement d'échantillon de sédiment			
573688	559281	85	0	0	Veine de quartz fragmenté au niveau des schistes			
573689	559299	87	0	0	Veine de quartz fragmenté			
573696	559306	90	80	0	Veine de quartz très fracturé, présence de mica	BSJ012		
573688	559368	89	160	50	Veine de quartz			
573650	559382	113	0	0	Limite Est de la terrasse de Besaonjo		Au	
573529	559377	65	0	0	Terrasse		Au	
573518	559416	70	0	0	Bloc de quartz			
573462	559435	65	0	0	Terrasse, présence de puit artisanal		Au	
573421	559390	67	0	0	Galet de quartz arrondis et anguleux			
573398	559375	67	0	0	Terrasse, argile sterile (1m d'épaisseur), blocs et fragments de quartz		Au	
573379	559344	67	0	0	Terrasse, 200m x 80 m	BSJ013		
573716	558286	72	0	0	Échantillon de sédiment : 13 grains d'or dans 4 batées	BSJ 014		
573985	558992	70	0	0	Echantillon des sédiments dans un ancien site d'exploitation : 1 grain d'or dans 3 pans	BSJ 015	Au	-
573758	559178	90	0	0	Affleurement de veine de quartz	BSJ 016		
573739	559302	110	90	0	Veine de quartz centimétrique concordante au schiste	BSJ 017		
573733	559351	112	0	0	Affleurement de veine de quartz	BSJ 018		
573733	559351	112	0	0	Affleurement de veine de quartz	BSJ 019		

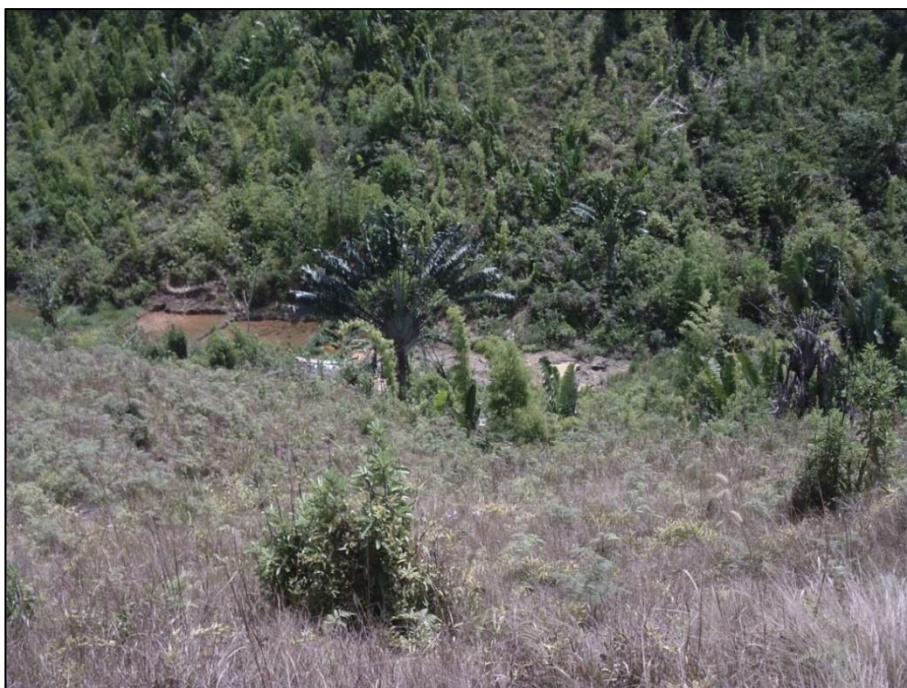
- Les photos suivantes illustrent les sites d'exploitation artisanale observés sur terrain.



Annexe 04 : Ancien site d'exploitation artisanale à l'Est de Besaonjo
(X 573585 (m) / Y 558543 (m))



Annexe 05 : Ancien site d'exploitation artisanale Nord Est de Besaonjo
(X 573585 (m) / Y 558543 (m))

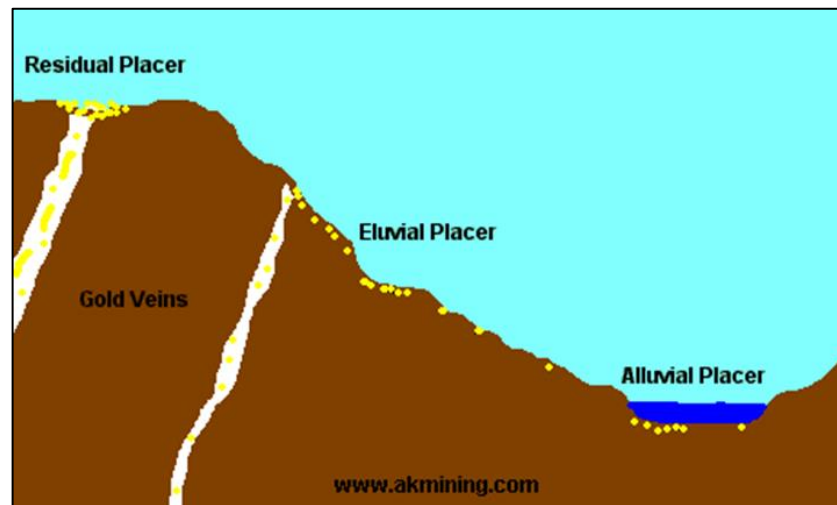


Annexe 06 : Ancien site d'exploitation artisanale au Sud de Besaonjo
(X 573159 (m) / Y 558420 (m))

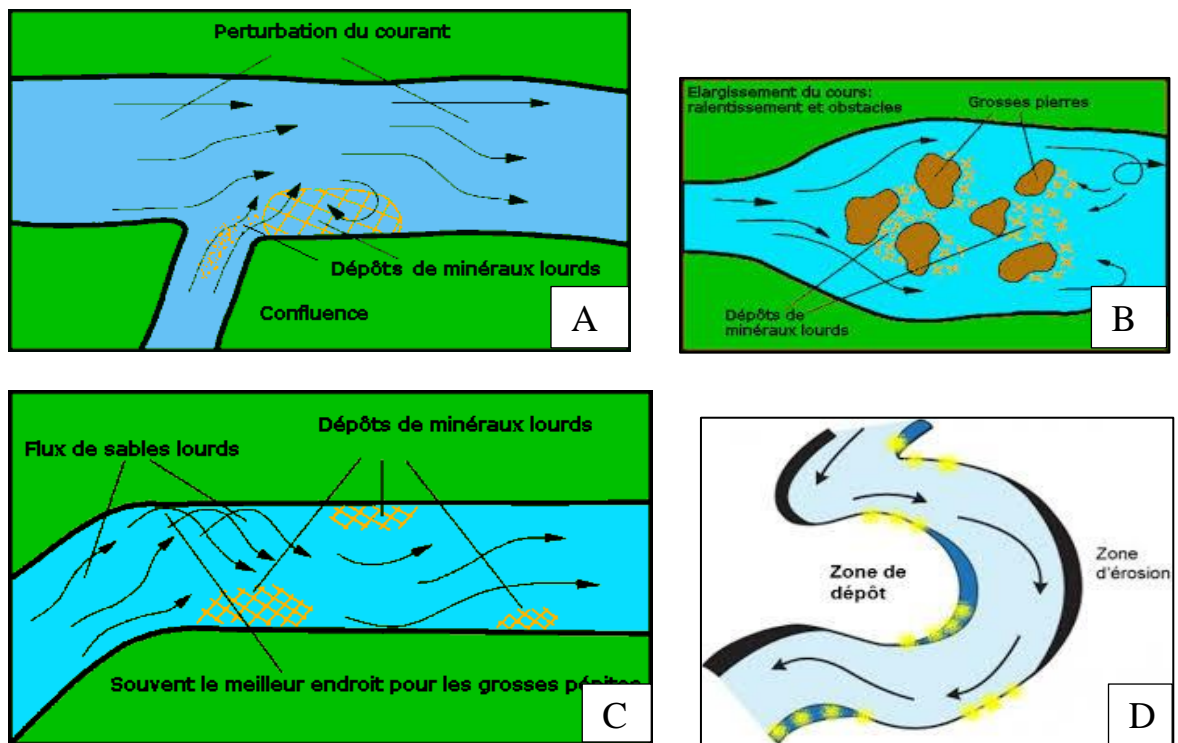


Annexe 07 : Limite Est de la terrasse de Besaonjo
(X 573650 (m) / Y 559382 (m))

Les gîtes ou gisements secondaires



Annexe 08 : Les différents types de placers aurifères(www.akmining.com)



Annexe 09 : Les différents pièges pour le dépôt de l'or au niveau de la rivière : **A)** perturbation de courant d'eau, **B)** élargissement du cours d'eau, **C)** présence de flux de sables lourds, **D)** méandre (www.pujol.chez-alice.fr)

**TELEDETECTION ET GEOPHYSIQUE APPLIQUEE A
L'EXPLORATION DES GISEMENTS D'OR DE
BESAONJO – MANANJARY**



Auteur : DAMOSOA Lucia Carmen

N° tel: 0346144726

Nombres de pages : 69

Nombres des figures : 31

Nombres des tableaux : 07

Email : luciacarmend@gmail.com

Encadreur : Docteur RASOAMALALA Vololonirina

Résumé : Les données satellitaires et la magnétométrie aéroportée ont révélé l'existence de deux générations de plis et de deux groupes de zones de cisaillement ainsi qu'une faille de décrochement dans la zone de Besaonjo Mananjary. Nos résultats ont montré que la minéralisation primaire est contrôlée par des plis anticlinaux et les fractures de Riedel associées à ces zones de cisaillement. Une minéralisation secondaire associée à des placers résiduel et alluvial a été identifiée. En outre, la carte radiométrique a révélé une anomalie associée à un paleochenal, empreinte d'un appel de sédiments initié par la structure synforme tardive. L'or remobilisé de Besaonjo se concentre dans les veines de quartz riches en oxydes de fer et en sulfure. Il se présente sous forme d'inclusion dans les minéraux sulfurés, de grains fins (or natif) sans éléments traceurs et sous forme de pépite dans les placers.

Mots clés : Or, Besaonjo, géophysique, télédétection, fractures de Riedel, veines de quartz

Abstract: Satellite data and airborne magnetometry revealed the existence of two generations of folds and two groups of shear zones as well as a strike-slip fault in the Besaonjo Mananjary area. Our results have shown that primary mineralization is controlled by anticline folds and Riedel fractures associated with these shear zones. A secondary mineralization associated with residual and alluvial placer was identified. In addition, the radiometric map revealed an anomaly associated with a paleochannel, footprint of a sediment call initiated by the late synform structure. The remobilized gold of Besaonjo is concentrated in the quartz veins rich in iron oxides and sulphide. It occurs in the form of either inclusion in sulphide minerals, or fine grains (native gold) without pathfinder elements or a nugget in the placers.

Key words: gold, Besaonjo, geophysics, remote sensing, Riedel fractures, quartz veins