

Facteurs tectoniques responsables de la mise en place des gîtes aurifères d'Antalaha Nord-Est de Madagascar

**Quinti RAZANADRAINA^{1*}, Beby Victoire Lalaseheno RAMANIVOSOA¹,
Njararivelo Louisa RAMIANDRISOA² et Voahangilalao Lucienne RAKOTOZAFY³**

¹ *Université de Mahajanga, Faculté des Sciences, Laboratoire Mixte International de l'Université de Mahajanga, BP 652, Mahajanga, Madagascar*

² *Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Laboratoire Géoressources et Environnement, BP 906, Antananarivo, Madagascar*

³ *Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, Laboratoire INSTN - Madagascar, BP 4279, Antananarivo, Madagascar*

(Reçu le 12 Septembre 2022 ; Accepté le 15 Janvier 2023)

* Correspondance, courriel : qrazanadrainy@gmail.com

Résumé

Dans l'intérêt de la pré-exploration des gîtes primaires qui alimentent les dépôts placers dans la région d'Antalaha, le présent travail étudie les facteurs tectoniques responsables de la mise en place des gîtes aurifères dans ce lieu. Le but est de connaître les déformations tectoniques qui affectent la zone aurifère, en identifiant les structures tectoniques cassantes et la trajectoire de foliation, ainsi que les anomalies magnétiques présentées dans la zone d'étude. Des traitements de la carte aéromagnétique par un logiciel géophysique Géosoft Oasis Montaj 8.4.1 et de l'image Landsat 7 ETM+ par ENVI 4.0, appuyé par une brève description des éléments structuraux identifiés sur le terrain sont réalisés. Les résultats obtenus montrent la mise en évidence de trois phases de déformations tectoniques D1, D2 et D3 qui affectent le secteur aurifère d'Antalaha. La déformation D1 a généré un métamorphisme au faciès amphibolite qui dénature les roches environnantes. La D2 replisse les roches déformées par D1. La D3 succède D1 et D2, a produit des déformations tectoniques cassantes tels que les fractures et les failles de décrochement orientées vers Nord-Est, et des foliations associées à une zone de cisaillement ductile de direction Nord-Est et Nord-Nord-Est. Des filons de quartz aurifères sont intrus dans ces déformations cassantes. Due aux déformations tectoniques D1, D2 et D3, les gîtes d'or primaire dans le secteur d'Antalaha se manifestent dans les filons de quartz au sein de la zone de cisaillement.

Mots-clés : *gîte aurifère, tectonique, gîtes primaires, dépôts placers, Antalaha.*

Abstract

Tectonic factors responsible for the establishment of gold deposits in Antalaha North-East of Madagascar

In the interest of the pre-exploration of the primary deposits that feed the placer deposits in the Antalaha region, the present work studies the tectonic factors responsible for the establishment of the gold deposits in this place. The goal is to know the tectonic deformations that affect the gold zone, by identifying the

brittle tectonic structures and the foliation trajectory, as well as the magnetic anomalies present in the study area. The aeromagnetic map is processed by Geosoft Oasis Montaj 8.4.1 geophysical software and the Landsat 7 ETM+ image by ENVI 4.0, supported by a brief description of the structural elements identified in the field. The results obtained show the identification of three phases of tectonic deformations D1, D2 and D3 which affect the gold-bearing sector of Antalaha. The D1 deformation generated an amphibolite facies metamorphism which denatures the surrounding rocks. The D2 folds the rocks deformed by D1. D3 succeeds D1 and D2, has produced brittle tectonic deformations such as fractures and strike-slip faults trending northeast, and foliations associated with a ductile shear zone trending northeast and north-northeast. Gold-bearing quartz veins are intruded into these brittle deformations. Due to tectonic deformations D1, D2 and D3, primary gold deposits in the Antalaha sector appears in the quartz veins within the shear zone.

Keywords : *gold-bearing deposits, tectonic, primary deposits, placer deposits, Antalaha.*

1. Introduction

L'or est très recherché dans divers secteurs d'activités, comme dans le domaine de l'industrie, de la technologie, de la médecine, de la joaillerie et également dans les transactions monétaires internationales [1 - 3]. Cela nécessite plusieurs tonnes d'or à produire. Certains pays ont augmenté leurs productions notamment la Chine depuis 2006 [4]. Cette hausse de la production, annonce une pénurie mondiale, due à la raréfaction de l'or et de la baisse de la teneur moyenne dans le sous-sol. Sur 580 gisements d'or connus sur la planète, l'Afrique possède 30 % de la réserve mondiale, dont la teneur moyenne est de 2,87 g/t sur 109 dépôts [4]. En effet, le sous-sol de Madagascar est très riche en cette matière [5]. Dans la région d'Antalaha, au Nord-Est de la grande île, la teneur est très prometteuse dans les zones placers (gîte secondaire) [6, 7]. Sa valeur moyenne dans la région d'Andrarona est de 15g/tonne. Environ 7 à 10 grammes au plus/tonne dans la région de Verembina. Fréquemment, dans la vallée d'Antsahamanara, l'or fourni des pépites de 15 à 25 grammes, et de 3 à 10 grammes de pépité dans le gîte alluvionnaire de la haute Marambo à Andongozabe, Ambodihintsina [8, 9]. Les concentrations d'or dans ces secteurs, sont issues des gîtes placers ou gîtes secondaires (alluvionnaires ou éluvionnaires). Le présent travail qui étudie les facteurs tectoniques responsables de la mise en place des gîtes aurifères dans le périmètre d'Antalaha, constitue une étape de pré-exploration des gîtes primaires d'or qui alimentent les placers dans ce lieu. Par prospection sur le terrain, neuf indices aurifères sont reconnus alignés vers Nord-Nord-Est sur une distance de 16 à 18 km [10, 11]. Ils sont reliés à une même structure ou zone de cisaillement, et leur alignement semble contrôlé par les tectoniques locales [12]. La méthode utilisée, qui est basée sur le terrain, est restreinte pour déterminer ces tectoniques. Par ailleurs, l'utilisation de la télédétection et de la géophysique par appuis d'une brève description des éléments structuraux identifiés sur le terrain est une démarche nécessaire. Cette approche va dans le but de définir les déformations tectoniques affectant le secteur aurifère, à partir de l'identification des structures tectoniques cassantes et de la trajectoire de foliation, ainsi que des anomalies magnétiques présentes dans le périmètre d'Antalaha.

2. Méthodologie d'étude

2-1. Contextes géographique et géologique

Le district aurifère d'Antalaha appartient à la Région SAVA qui se localise entre X(m) : 1400 000 et 1500 000, et Y(m) : 710 000 et 770 000, du coordonné Laborde [13]. Il se trouve dans la commune rurale Ampohibe où se situent les minéralisations d'Andrarona, et celle d'Antananambo Ankavanana se présente les

minéralisations de Verembina (**Figure 1**). Géologiquement, la zone d'étude traverse la limite marquant la frontière entre le domaine archéen et paléoprotérozoïque d'Antongil Nord et celui paléo-néoprotérozoïque de Bemarivo Sud. Au Sud de la limite, se localise le domaine d'Antongil-Masora, qui est constitué par deux sous-domaines, le sous-domaine d'Antongil et de Masora [14, 15]. L'Antongil est dominé par la présence d'orthoigneiss et des roches para-dérivé d'âge Paleo et Mésoarchéen et des roches plutonique basique d'âge Paléoprotérozoïque [16]. Le Domaine de Bemarivo est au Nord de la limite, qui est un bloc distinct d'un point de vu lithostratigraphique et géochimique [17]. Il est dérivé du Craton « Greater Dharwar » (Inde + Madagascar) à la fin de l'Édiacarien au début du Cambrien et est charrié en direction vers le sud, sur les Domaine d'Antongil-Masora et d'Antananarivo, qui sont des Domaine déjà combinés au cours d'un évènement collisionnel daté vers 0,540 - 0,530 Ga [18, 19]. Bemarivo, serait subdivisé en deux sous-domaines, au Nord et au Sud [20]. La partie Sud, a été déformée lors de charriage à vergence Sud, associé à un métamorphisme de faciès amphibolite à granulite [21]. Elle est dominée par des roches métasédimentaire de faciès schiste vert à Amphibolite [22].

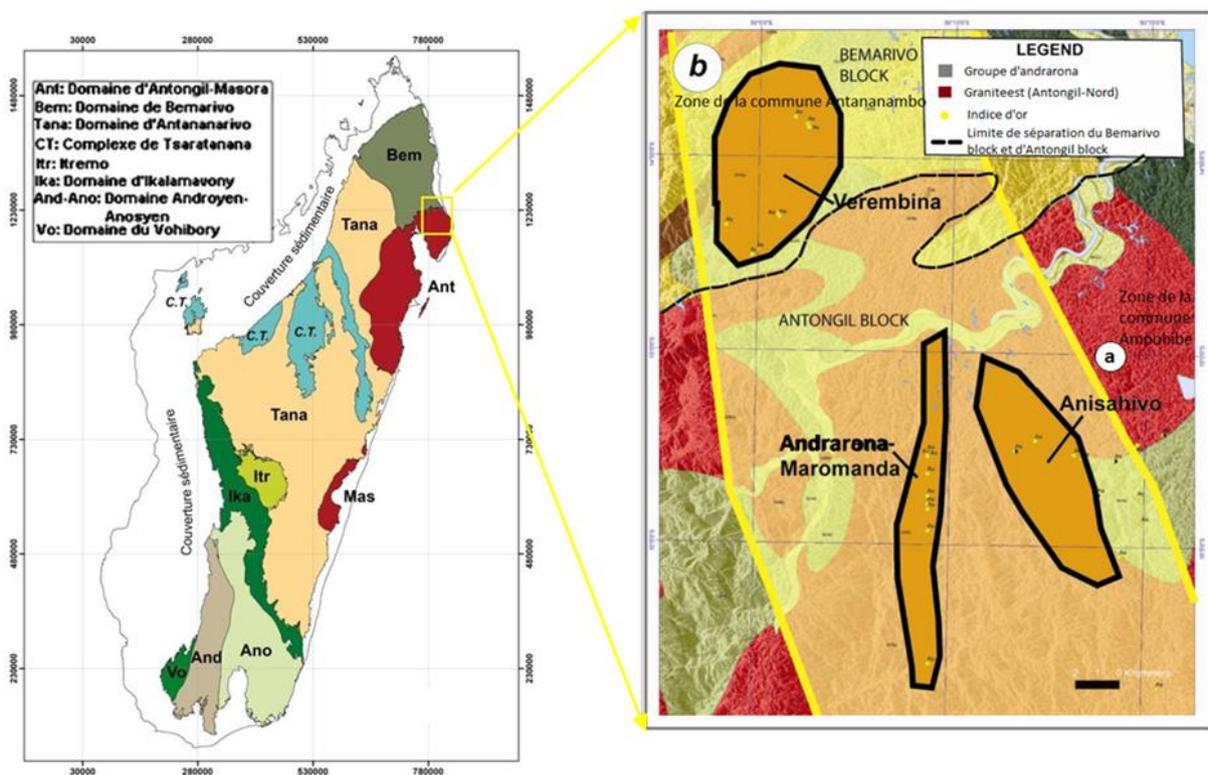


Figure 1 : Carte montrant Les Domaines géologiques de Madagascar [23, 24]

2-2. Techniques d'études adoptées

Un traitement d'image aéromagnétique et satellitale a été réalisé, appuyé par une brève description d'éléments structuraux identifiés sur le terrain pour comprendre la principale déformation en relation avec la zone aurifère et de ses roches environnantes. Le traitement d'image aéromagnétique a été réalisé à l'aide d'un logiciel géophysique Géosoft Oasis Montaj 8.4.1, dans le but d'apporter des éléments géophysiques pouvant être utiles à l'interprétation cartographique de la géologie du secteur d'étude, notamment les lithologies et structures aux propriétés magnétiques remarquables. Il s'agit d'une étude de variations locales ou anomalies du champ magnétique terrestre. Ces anomalies sont dues aux perturbations affectant le champ magnétique terrestre lorsque celui-ci traverse les roches de la croûte supérieure. L'image satellitale a été traitée pour compléter les informations issues de l'étude aéromagnétique

précédente. La technique de télédétection et le système d'information géographique ou SIG à l'aide du logiciel Arc GIS 10.2.2 étaient indispensables. Pour ce faire, nous avons choisi les données suivantes, provenant du satellite Landsat-7 ETM+ (*Tableau 1*).

Tableau 1 : Données caractéristiques de l'image Landsat-7 ETM+

Landsat-7 ETM+ Bands (μm)		
Pixels carrés de résolution spatiale	Longueur d'onde (μm)	Bandes spectrales
30 m Bleu (B)	0,441 - 0,514	Bande 1
30 m Verte (V)	0,519 - 0,601	Bande 2
30 m Rouge (R)	0,631 - 0,692	Bande 3
30 m NIR	0,772 - 0,898	Bande 4
30 m SWIR-1	1,547 - 1,749	Bande 5
60 m TIR	10,31 - 12,36	Bande 6
30 m SWIR-2	2,064 - 2,345	Bande 7
15 m Pan	0,515 - 0,896	Bande 8

L'image utilisée a été prise le 07 Mai 2021 à 11 heures sur le site d'USGS earthexplorer.gov. Ces données sont ensuite transportées dans le logiciel ENVI 4.5. Sous l'ENVI, le travail a été subdivisé en deux phases : le prétraitement et le traitement. En prétraitement, nous avons effectué une visualisation monoclinale pour avoir les combinaisons des bandes 731, qui sont des types de bandes très utilisées en géologie. Ensuite, une correction atmosphérique a été faite pour bien corriger les anomalies atmosphériques. Pendant le traitement, le travail a été procédé comme suit :

- combinaison des bandes spectrales pour avoir les compositions colorées ;
- analyse en Composantes Principales (ACP), pour élever le contraste entre les divers objets au sol afin d'avoir un excellent produit d'interprétation visuelle ;
- rehaussement des linéaments par filtrage : c'est une technique visant à éliminer le bruit (le bruit étant défini comme toute donnée non utile qui masque l'information) inclus dans les données, pour bien avoir une image à découverte c'est-à-dire une bonne visibilité des discontinuités dans les textures comme par exemples les contours des zones relativement homogènes et failles ou des fractures. Alors, le filtre est appliqué aux différentes bandes spectrales et aux néo-canaux en vue de l'obtention des cartes des traits structuraux majeurs.

Nous avons introduit l'image issue des traitements par filtrage dans le logiciel Geomatica 2017 pour le traçage automatique des linéaments, puis transporté dans Arc GIS pour dresser une carte linéamentaire de la zone d'étude. Ensuite, les valeurs numériques des linéaments sous Geomatica sont insérées dans le logiciel RockWorks16 afin d'obtenir une rosace directionnelle qui est nécessaire au repérage de la direction des linéaments.

3. Résultats et discussion

3-1. Première phase de déformation D1

Des linéaments notamment de dyke, de faille et de l'anomalie magnétique, sont identifiés sur la carte de champ magnétique terrestre réduit au pôle et sur la carte des linéaments déduit des données magnétiques de la région d'Antalaha (*Figure 2 et 3*). Les dykes ont pris une direction majeure vers Nord-Nord-Ouest, à

laquelle ils présentent parfois une intensité magnétique assez forte. Cette orientation des réseaux de dyke correspond bien à l'allure de la roche basique telle que l'amphibolite à structure pénétrative observée sur le terrain (*Photo 1*). Les dykes sont donc interprétés comme dus à la phase de déformation D1 ductile pénétrative, qui a généré un métamorphisme au faciès amphibolite de direction de foliation vers Nord-Nord-Ouest, associé à des plis isoclinaux (*Photo 2*).

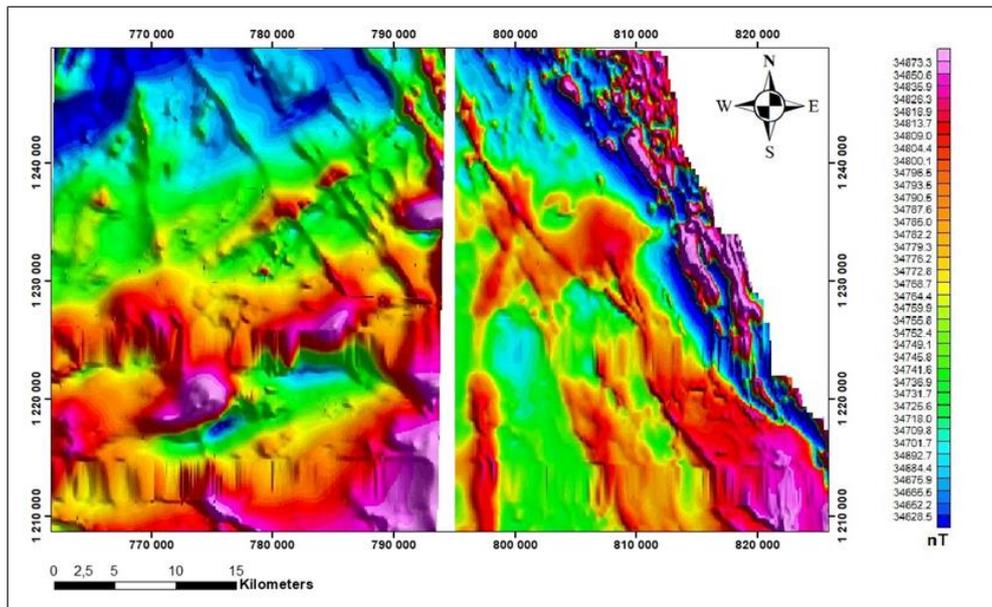


Figure 2 : Carte de champ magnétique terrestre réduit au pôle de la région d'Antalaha

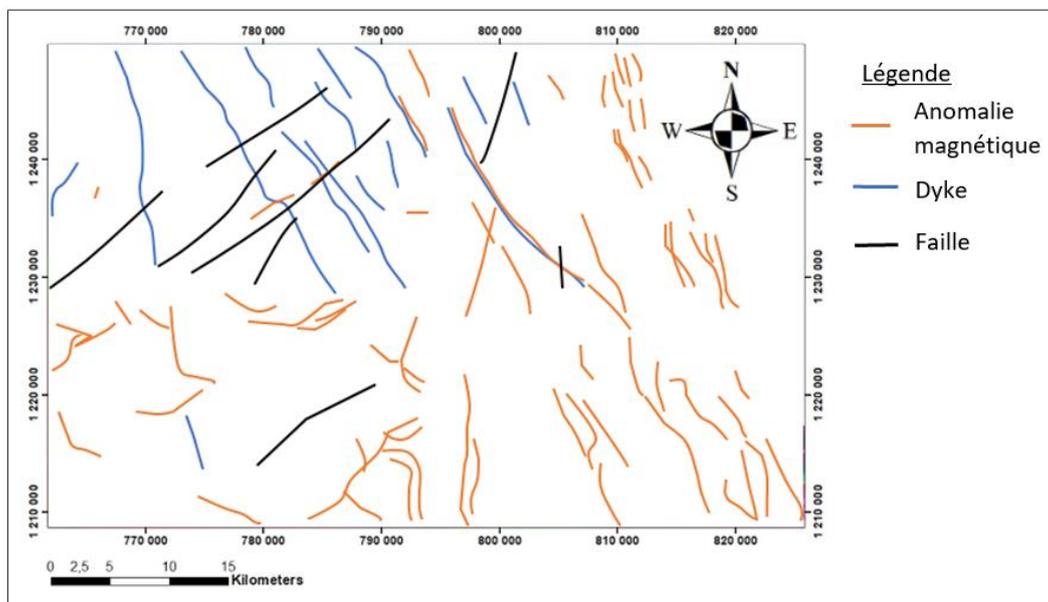


Figure 3 : Carte des linéaments déduit des données magnétiques



Photo 1 : *Amphibolite à structure pénétrative de Verembina*

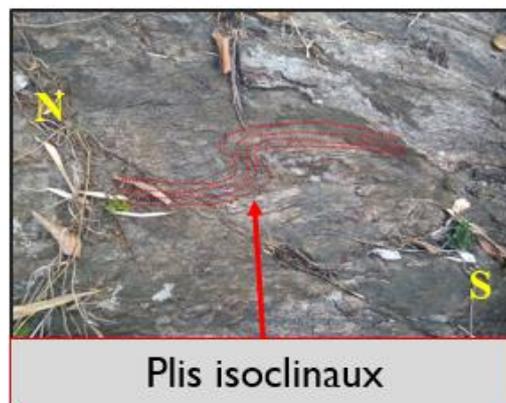


Photo 2 : *Plis isoclinaux dans l'amphibolite*

3-2. Deuxième phase de déformation D2

Une autre phase de déformation attribuée comme phase de déformation D2 replisse le pli de D1, en donnant un second pli, avec un plan axial vers Nord et Nord-Nord-Ouest. Cette D2 engendre un collapse tectonique en extension, marqué par des petits cisaillements en crénelation [25], pendant lequel, les granites et les pegmatites sont en intrusions dans l'ensemble des roches dénaturées (**Photo 3**).

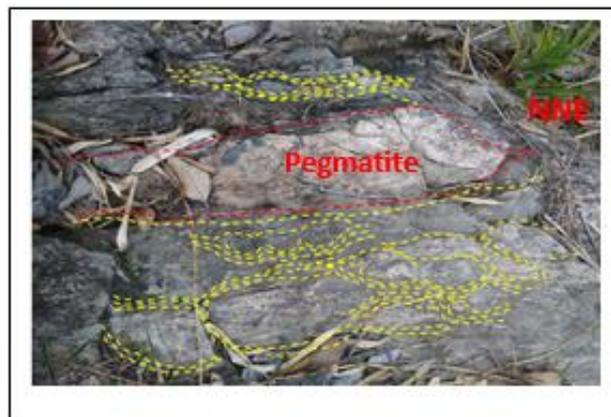


Photo 3 : *Intrusion des pegmatites dans les roches dénaturées*

3-3. Troisième phase de déformation D3

La carte linéamentaire (**Figure 4**) présente des linéaments qui se répartissent dans la direction Nord-Ouest, Nord-Est. La majeure partie est axée vers Nord-Nord-Est du secteur d'étude. La carte de trajectoire de foliation (**Figure 5**) montre la présence des trajectoires de foliation qui caractérisent l'orientation de la zone de cisaillement dans deux directions dans la région d'Antalaha : une vers Nord-Est et l'autre vers Nord-Nord-Est. Ces structures tectoniques orientées presque vers la même direction, révèlent la présence de déformation D3 qui succède D1 et D2. Cette phase de déformation D3 est caractérisée par la présence d'une force de compression (F) de Nord vers le Sud et de Sud-Sud-Est vers Nord-Nord-Ouest (**Figure 6**), qui redéforme et réoriente l'ensemble des roches déformées par D1 et D2 vers Nord-Nord-Est et Nord-Est. Cette force est traduite par des mouvements de transcurrence sénestre orientés vers Nord-Est au Sud-Ouest, qui a produit les failles de décrochement et les linéaments, et les zones de cisaillement dans le secteur d'étude. Ces cisaillements sont caractérisés par des larges couloirs à fort gradient de déformation. Ils sont bien identifiés sur la carte de trajectoire de foliation. A l'échelle de la carte et de l'affleurement au Sud-Ouest et au Sud-Est du village de Verembina, ces structures présentent un axe de boudinage asymétrique Nord-Nord-Est au Sud-Sud-Ouest et Nord-Est au Sud-Ouest, dans l'orthogneiss. Cela indique qu'il y a un étirement qui se dirige vers ces orientations. La direction de cet étirement, et le pli vers Nord-Nord-Est et Nord-Est, confirment bien la réorientation et le déplacement vers ces directions. On peut dire que c'est pendant cette mobilisation que se produisent le cisaillement ductile et la déformation cassante (fractures, failles), qui s'orientent vers Nord-Nord-Est et Nord-Est. Sur le terrain, des filons de quartz aurifères sont en intrusions dans ces fractures et ces failles en recoupant la structure foliée et les microcisaillements encaissés dans l'orthogneiss et le schiste (**Photo 4**). Cela suggère que ces systèmes de filon sont apparus juste après le cisaillement ductile c'est-à-dire poste tectonique. On peut dire que la minéralisation d'or dans la région d'Antalaha se manifeste dans les filons de quartz en intrusion postérieurement à la phase de déformation D3, au sien de la zone de cisaillement qui travers l'orthogneiss granodioritique et schiste à séricite.

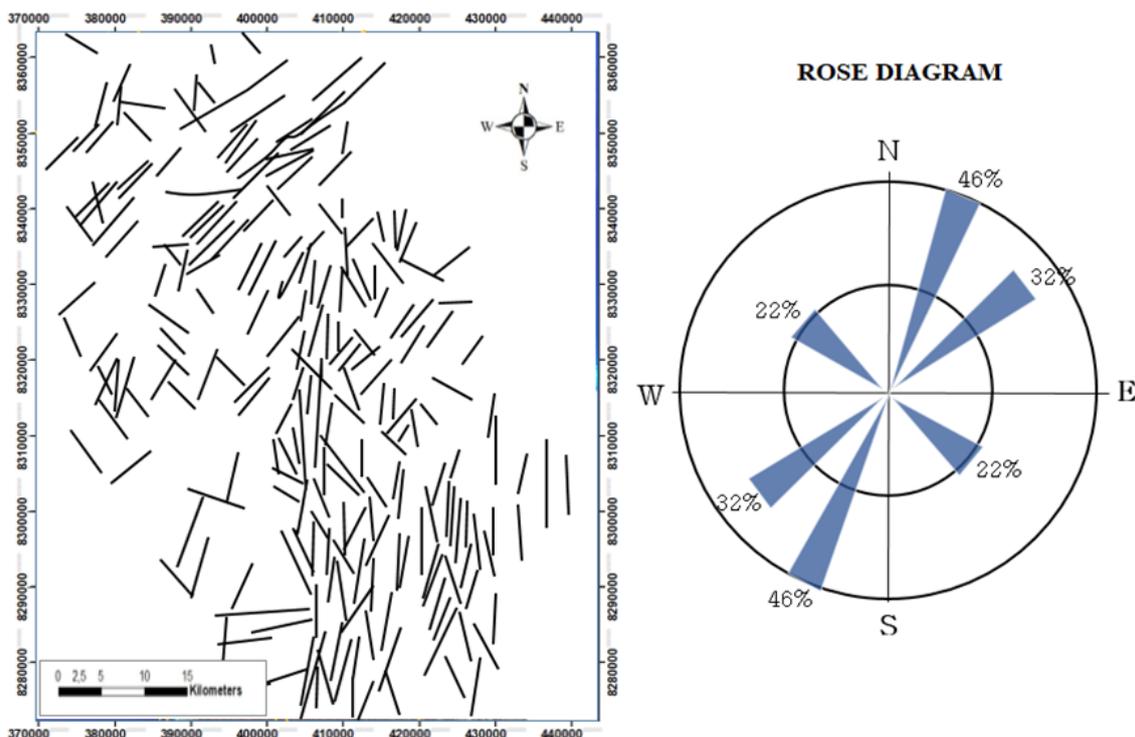


Figure 4 : Carte des linéaments et rosace des directions linéamentaires de la zone d'étude

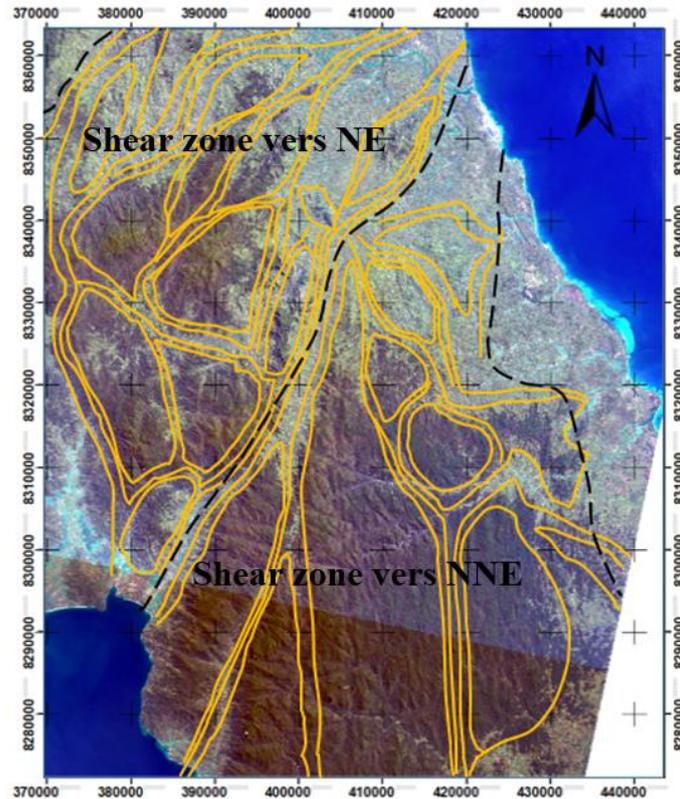


Figure 5 : Carte de trajectoire de foliation du shear zone (zone de cisaillement) vers NE et NNE

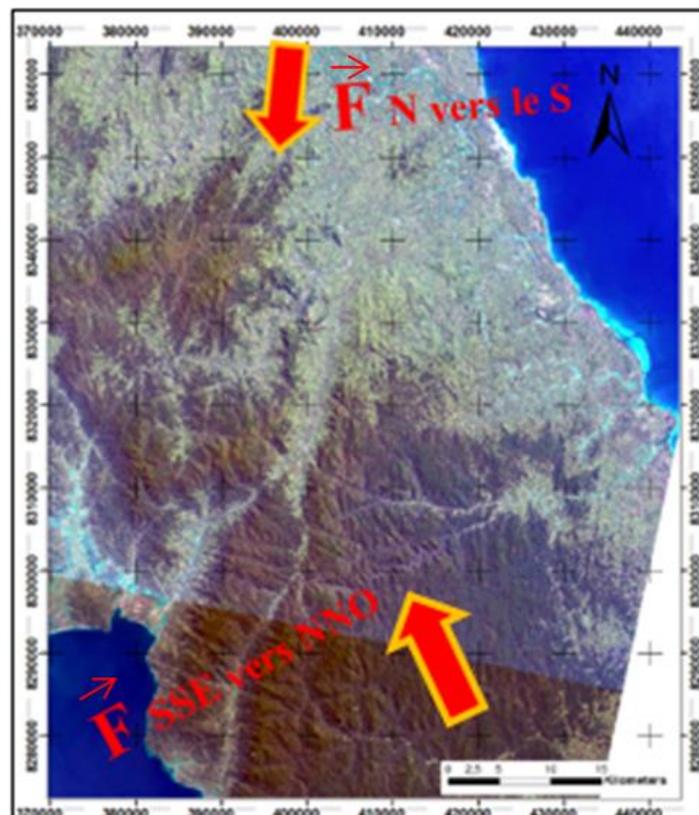


Figure 6 : Carte à force de compression Nord vers le Sud et Sud-Sud-Est vers Nord-Nord-Ouest

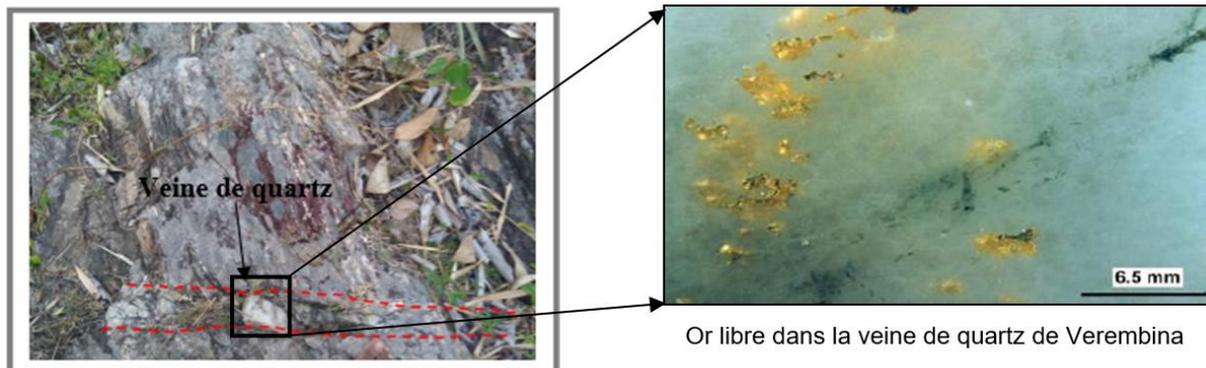


Photo 4 : *Intrusion de filon de quartz aurifère dans l'orthogneiss*

4. Conclusion

L'étude géophysique et télédétection réalisée, a permis de localiser et identifier les anomalies magnétiques, les structures tectoniques cassantes et la trajectoire de foliation, qui révèlent les déformations tectoniques affectant la région d'Antalaha. Les données recueillies, indiquent que la zone aurifère a subi une déformation polyphasée. La première phase D1 a produit un métamorphisme à facies amphibolite et des dykes basiques dirigés vers Nord-Nord-Ouest. La seconde phase de déformation D2 replisse les roches déformées par D1. Cet épisode a engendré un microcisaillement en crénulation. Quant à la déformation D3, elle a généré une zone de cisaillement orientée vers Nord-Est et Nord-Nord-Est, et des déformations cassantes, dans lesquelles les filons de quartz aurifères post-D3 sont en intrusions. Les phases de déformation D1, D2 et D3 affectant le périmètre d'Antalaha favorisent la mise en place de l'or dans les filons de quartz recoupant l'orthogneiss granodioritique et le schiste à séricite, au sein de la zone de cisaillement orientée vers Nord-Nord-Est et Nord-Est.

Références

- [1] - A. FOUCAULT, J. F. RAOULT, F. CECCA, B. PLATEVOET, Dictionnaire de Géologie - 8^e édition, Français/Anglais, Ed. Dunod, (2014) 416 p.
- [2] - B. DIDIER, Les secrets de l'or. La recherche Midi, (2012) 206 p.
- [3] - P. BIHOUIX, Valeur de l'or. Première édition. Tome IV, (2013) 243 - 265 p.
- [4] - P. BIHOUIX, B. GUILLEBON, Quel avenir pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société, EDP Sciences, (2010) 267 p.
- [5] - N. L. RAMIANDRISOA, 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, Université d'Antananarivo, (2010a)
- [6] - J. RAHARISOA, La mutation socio-économique face à l'exploitation aurifère dans le sous espace d'Ambohimiarina II, Région Vatovavy Fitovinany. *Mada-Revue*, 08 (2014) 2044 - 4607
- [7] - M. J. RANDRIATIAMANARIVOMALALA et E. H. RASOLOMANANA, Etude de la potentialité en minéralisation aurifère des terrasses alluvionnaires d'Ambohimiarina II (Vatovavy Fitovinany) par méthodes électrique et géochimique. *Mada-Géo*, 18 (2015) 2074 - 4587
- [8] - TUCKER, PETERS, ROIG, THÉVENIAUT, DELOR, Notice explicative des cartes géologique et métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar, (2012a)

- [9] - GOLDFARB, Gold Ores in Metamorphic terranes : a compilation : Society of Economic Geologists, 1 CD, (2010)
- [10] - TUCKER, PETERS, ROIG, THÉVENIAUT, DELOR, Notice explicative des cartes géologique et métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar, (2012b)
- [11] - PETERS, ROIG, TUCKER, THEVENIAUT, DELOR, Carte des substances métalliques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar, (2012a)
- [12] - PETERS, ROIG, TUCKER, THEVENIAUT, DELOR, Carte des roches et minéraux industriels de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar, (2012)
- [13] - CREAM, Monographie de la Région SAVA. [En ligne] (2014). Disponible sur «<http://www.monographiemada.com/>». (vu le 1er juin 2019)
- [14] - SCHOFIELD, THOMAS, GOODENOUGH, D. E. WAELE, PITFIELD, KEY, BAUER, WALSH, LIDKE, RALISON, RABARIMANANA, RAFAHATELO, RANDRIAMANANJARA, Geological evolution of the Antongil Craton, NE Madagascar. *Precambrian Research*, 182 (2010) 187 - 203
- [15] - CHEIB, LAPWORTH, PITFIELD, RALISON, RANDRIAMANANJARA, RABARIMANANA, RAFAHATELO, BEJOMA, Geochemical signatures of stream sediments within the main geological domains and terranes of North and Central Madagascar, Applied Earth Science. *Trans. Inst. Min. Metall. B*, 120 (2) (2011) 97 - 110
- [16] - RAMIANDRISOA, ANDRE-MAYER, VANDERHAEGHE, RABENANDRASANA, RASOLOMANANA, Gisements aurifères de Dabolava : Extraction juvénile paléoprotérozoïque suivi d'une remobilisation au panafricain [Abs] : Géologie et Métallogénie de Madagascar Société Géologique de France, Paris, 6 (2011)
- [17] - T. RAHARIMAHEFA, TIMOTHY, M. KUSKY, E. TORAMAN, C. RASOZANAMPARANY, I. RASAONA. Geometry and Kinematics of the late Proterozoic Angavo Shear Zone, Central Madagascar : Implications for Gondwana Assembly, (2013)
- [18] - FRENCH et HEAMAN, Precise U-Pb dating of Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Dharwar craton, India : Implications for the existence of the Neoproterozoic supercraton Scavia, *Precambrian Research*, 183 (2010) 416 - 441
- [19] - T. RAHARIMAHEFA, TIMOTHY, M. KUSKY, Temporal evolution of the Angavo and related shear zones in Gondwana : Constraints from LA-MC-ICP-MS U—Pb zircon ages of granitoids and gneiss from central Madagascar, (2010)
- [20] - D. WAELE, THOMAS, MACEY, PITFIELD, SCHOFIELD, GOODENOUGH, HORSTWOOD, BAUER, KEY, POTTER, ARMSTRONG, MILLER, RANDRIAMANANJARY, RALISON, RAFAHATELO, RABARIMANANA, BEJOMA, TUCKER. Provenance and tectonic significance of the Paleoproterozoic metasedimentary successions of Madagascar. *Precambrian Research*, 189 (2011) 18 - 42
- [21] - GOODNEOUGH, THOMAS, D. WAELE, PITFIELD, KEY, SCHOFIELD, BAUER, W. Post-collisional magmatism in the central East African Orogen : the Maevarano Suite of north Madagascar. *Lithos*, Vol. 116, (1 - 2) (2010) 18 - 34
- [22] - BAUER, WALSH, D. WAELE, THOMAS, HORSTWOOD, BRACCIALI, SCHOFIELD, WOLLENBERG, LIDKE, RASAONA, RABARIMANA. Cover sequences at the northern margin of the Antongil Craton, NE Madagascar. *Precambrian Research*, Vol. 189, (2011) 292 - 312
- [23] - ROIG, TUCKER, DELOR, PETERS, THEVENIAUT. Carte géologique de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar, (2012)
- [24] - PETERS, ROIG, TUCKER, THEVENIAUT, DELOR, Carte des substances métalliques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar, (2012)
- [25] - N. L. RAMIANDRISOA, 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, Université d'Antananarivo, (2010b)