
SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION

Chapitre I : CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

I-1 Généralités sur l'or

I-2 Contexte de la zone d'étude

Chapitre II : RAPPELS THEORIQUES

II-1 Télédétection

II-2 Prospection magnétique

II-3 Présentation des logiciels de traitement

Chapitre III : DONNEES, RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III-1 Présentations des données

III-2 Résultats et Interprétations

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte des gites des régions aurifères à Madagascar.....	9
Figure 2 : Localisation de la zone d'étude	11
Figure 3 : Carte de réseau hydrographique	12
Figure 4 : Carte géologique de la zone d'étude.....	14
Figure 5 : Représentation du principe de mesure en télédétection.....	16
Figure 6 : Forces créées par deux pôles magnétiques.....	18
Figure 7 : Représentation dans l'espace de la ligne de champ magnétique dipolaire orientée du pôle sud vers le pôle nord géomagnétique.	21
Figure 8 : Élément du champ géomagnétique	24
Figure 9 : Magnétisme induite et rémanent	26
Figure 10 : Trajectoire de l'aéronef lors d'un levé	29
Figure 11 : Carte d'anomalie magnétique.....	33
Figure 12 : Carte d'anomalie réduite au pôle	34
Figure 13 : Carte du gradient vertical au 1/1000.....	35
Figure 14 : Carte du signal analytique	36
Figure 15 : Organigramme de traitement des données spectrométrique aéroportées	38
Figure 16 : Image de l'étalement	42
Figure 17 : Photo-interprétation de composition RGB(321).....	43
Figure 18 : Diagramme de répartition des linéaments.....	44
Figure 19 : Carte de la réduction au pôle superposée à la carte géologique	46
Figure 20 : Carte de gradient vertical superposée à la carte géologique	47
Figure 21 : Carte du signal analytique superposée à la carte géologique.....	48
Figure 22 : Carte équivalent thorium superposée à la carte géologique	49
Figure 23 : Carte équivalent potassium superposée à la carte géologique.....	50
Figure 24 : Carte équivalent uranium superposée à la carte géologique	51
Figure 25 : Carte ternaire superposée à la carte géologique.....	53
Figure 26 : Carte de synthèse	54

LISTE DES PHOTOS

<i>Photo 1 : Pepite d'or</i>	<i>3</i>
<i>Photo 2 : Filon de quartz aurifère encaissé dans une orthogneiss granodioritique.....</i>	<i>15</i>
<i>Photo 3 : Aéronef Cessna 404-fugro airborne surveys.....</i>	<i>29</i>



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Pourcentage en or pour le carat	4
Tableau 2 : Partage de l'usage de l'or	5
Tableau 3 : Production de l'or à Madagascar depuis 1996 jusqu'à 2008	5
Tableau 4 : Superficie des districts dans la région Betsiboka	10
Tableau 5 : Variation de la température mensuel de la région d'étude	12
Tableau 6 : Variation de la pluviométrie mensuelle de la zone d'étude	13
Tableau 7 : Quelques spécificités des capteurs les plus utilisés	17
Tableau 8 : Caractéristiques spécifiques des images LANDSAT TM :	18
Tableau 9 : Gamme de valeur de susceptibilité magnétique des roches et minéraux	20
Tableau 10 : Résumé de l'origine des champs magnétiques terrestres	22
Tableau 11 : Description des éléments du champ géomagnétique	24
Tableau 12 : Direction majeur des linéaments observés	44

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

CGS	: centimètre gramme seconde
CMT	: Champ Magnétique Total
CMTrb	: Champ Magnétique Total réduite à la base
CMY	: Cyan Magenta Yellow
ENVI	: Envirenement for Visualising Image
GV	: gradient vertical
SA	: signal analytique
FTM	: Foiben'ny Taontsaritany Malagasy
IGRF	: International Geomagnetic Reference Fields
IOGA	: Institut et Observatoire Géophysique d'Antananarivo
IRT	: Infra Red Thermal
K	: susceptibilité magnétique
KRAOMA	: Kraomita Malagasy
LGA	: Laboratoire de Géophysique Appliqué
MIR	: Moyen Infra Rouge
PIR	: Proche Infra Rouge
RN	: route nationale
RVB	: Rouge, Vert, Bleu
SI	: System International
SQD	: Schisto-Quartzo-Dolomitique
TD	: Taux de dérive

INTRODUCTION

Depuis longtemps, Madagascar était l'un des principaux pays producteurs de minéraux très importantes. Presque dans toutes les régions de l'Île, on trouve des minéraux et de matériaux qui sont en cours d'exploitation ou non : au Nord et au Centre, on trouve de l'or, à l'Est de cobalt, de Nickel d'Ilménite, Graphite, et de Fer, au Sud de terres rares et à l'Ouest de Bitume, de Gypse... Beaucoup d'experts prédisent que l'avenir de Madagascar repose sur les industries extractives. Pour cela, il faut que la recherche menée soit intensive et la future exploitation de ces ressources soit rationnelle.

Pour avoir les meilleures informations concernant ces ressources, la prospection magnétique délimiterait les différentes structures magnétiques constituant le sol et le sous-sol, soit qu'elles sont en relation directe ou non avec les prospects aurifères [12]. Le secteur prospecté s'est focalisé généralement sur la zone à gisement secondaire en place.

Cet ouvrage est basé sur l'étude de la distribution de la minéralisation aurifère de la région Betsiboka, plus précisément dans la Commune de Brieville, en analysant les données aéromagnétiques et spectrométriques, et d'autre part, de proposer de nouveaux prospects intéressants et éventuellement exploitables économiquement.

Le principal objectif de l'étude était de faire l'inventaire des indices d'or sur le périmètre minier de la société Kraomita Malagasy (KRAOMA) afin de pouvoir procéder à la délimitation des zones susceptibles de trouver des gisements d'intérêt économique.

C'est pour cette raison que ce travail est intitulé « ***Etude de prospect aurifère du périmètre minier de KRAOMA, zone Brieville par méthode géophysique*** »

Le présent mémoire s'articule sur trois chapitres. Le premier chapitre consiste à décrire le contexte général de l'étude, les généralités sur l'or et la présentation de la zone d'étude. Ensuite le second chapitre se focalise sur la méthodologie appliquée dans notre étude et en particulier, on va faire des rappels théoriques sur la télédétection, le magnétisme, le gamma spectrométrie et la présentation des logiciels utilisés pour les traitements des données. Enfin dans le troisième chapitre se consacre sur le traitement d'image satellite LANDSAT, le traitement des données magnétiques, spectrométrique et ses interprétations y afférents afin de délimiter les prospects aurifères de notre zone d'étude.

Chapitre I : CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

Ce chapitre présente le contexte général de l'étude. Pour mener à bien notre étude, nous allons parler successivement des généralités sur l'or, le contexte général de l'étude, des situations géographique et administrative, des contextes géologique, climatique, et hydrologique de cette zone d'étude.

I-1 Généralités sur l'or

L'or est le deuxième métal connu par l'homme après le cuivre et employé depuis le V^e millénaire avant Jésus-Christ. Il est le 79^{ème} élément du tableau périodique des éléments ; il a pour symbole Au, il vient du mot latin aurum qui a donné l'adjectif *aurifère*. C'est le métal de transition jaune brillant, très ductile, malléable et précieux. En tant que métal rare présentant une grande valeur sur le plan économique, l'or a longtemps été considéré comme le plus précieux des métaux. [5]

L'or est réparti inégalement à la surface de la Terre. Certaines roches ont des taux de concentration en or avoisinant un million de fois la teneur moyenne d'un milligramme par tonne. Plusieurs mécanismes peuvent expliquer cette répartition. Ainsi, l'or orogénétique pourrait se déposer lors de variations de pression provoquées par des séismes, remplissant des failles en formant des filons. Les sulfures, les chlorures et surtout l'anion radicalaire S_3^- présents dans la croûte terrestre sont également capables de solubiliser l'or en formant des complexes, rendant possible sa mobilisation et sa concentration lorsque les complexes se décomposent (suite à un refroidissement ou par réaction avec une autre roche).

A l'état naturel, ce métal se présente sous forme de paillettes ou pépites millimétriques, de grains, ou de filaments de stalactites, et par une érosion mécanique, elle se répartisse sous les formes de dépôt alluvionnaires résultant de l'érosion des roches mères, de filon, de l'inclusion dans les roches ultrabasiques. L'or est parfois combiné avec l'argent, le mercure, le cuivre ou d'autres dont son alliage avec l'argent donne l'électrum qui a une teneur en argent supérieure à 20%. [5]



Photo 1 : Pepite d'or

I-1-1 Propriétés de l'or

L'or est inodore, de couleur jaune brillant, pâle pour les variétés riches en argent et un peu rougeâtre quand il est pur. En feuille très fine, l'or n'est plus jaune, mais d'un vert transparent. C'est le métal le plus malléable de tous les métaux. Par battage à froid, l'épaisseur d'une feuille d'or peut aller jusqu'à 1/12500mm. Il est aussi très ductile : 1g d'or peut fournir un fil de 2km de longueur, de 1/10000 mm de diamètre. Toutefois, sa malléabilité et sa ductilité peuvent diminuer par la présence d'impuretés telles que le plomb ou l'arsenic. Par contre, ni l'argent, ni le cuivre n'influent pas sur ses propriétés. La conductibilité thermique de l'or est moindre que celle de l'argent. Elle est largement influencée par les impuretés qui imprègnent parfois le métal.

L'or est très lourd, il a pour densité de 19,3 à l'état pur, par contre 17,24 à l'état fondu et il est un bon conducteur tel que sa résistivité est de $22 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$. Selon Mohs, la dureté de l'or est comprise entre 2,5 et 3. Sa température de fusion est comprise entre 1035°C et 1064°C à partir de laquelle il émet de vapeurs violets. Poli, son éclat devient très vif et exposé à plusieurs réflexions lumineuses successives, il paraît rouge. Il a une température d'ébullition de 2960°C

L'or ne s'oxyde ni à l'air ni dans l'eau, et n'est pas attaqué par l'action d'un acide fort, même très concentré et à chaud. Seuls le cyanure et le mélange d'acides appelé eau régale peuvent le dissoudre. On peut graver l'or avec une solution de triiodure de potassium.

Le pourcentage d'or dans le métal s'appelle le titre. Depuis très longtemps, il peut faire l'objet d'une garantie (de l'État actuellement) grâce à un poinçon qui indique le titre de l'alliage utilisé. Les carats correspondent à des 1/24^e parties d'or de la masse totale d'un alliage et peuvent être convertis par un calcul simple en pourcentage massique d'or compris dans le métal.

Tableau 1: Pourcentage en or pour le carat

Carats	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0
% en or	99,99	91,67	83,34	75,01	66,68	58,35	50,02	41,69	33,36	25,03	16,7	8,37	0

On définit l'alliage par la quantité d'or qu'il contient, on prend des exemples ci-dessous :

1000 g à 18 carats contient 18 carats d'or fin + 6 carats de métal.

1000 g à 12 carats contient 12 carats d'or fin + 12 carats de métal.

Soit : titre de 18 carats d'or fin par kilo d'alliage. **[4]**

L'or à l'état naturel est jaune, il peut se présenter sous différentes couleurs selon les alliages qu'il contient. L'abondance des autres éléments chimiques dans l'or change peu sa couleur ; par exemple l'or rose présente 75% d'or pur, 9% d'argent et 16% de cuivre.

L'alliage d'or gris : alliage à base d'or pur, de 10% de cuivre, de 12.5% de nickel et de 2.5% de zinc.

L'alliage d'or blanc : alliage à base d'argent ou de platine. Il contient à peu près 75% d'or pur et le reste est composé de palladium et d'argent pur.

L'alliage d'or vert : composé de 75% d'or pur et de 25% d'argent.

L'alliage d'or bleu : alliage à base de 75% d'or pur et de 25% de fer ou de cobalt.

L'alliage d'or **violet** : composé de 75% d'or pur et de 25% d'aluminium.

I-1-2 Usage de l'or dans le monde

L'or est trouvé en une quantité très faible dans l'écorce terrestre, alors il prend de grandes places dans la vie des hommes. Dans la vie quotidienne, il était utilisé dans plusieurs domaines (bijouterie, orfèvrerie, dentisterie, horlogerie, électronique...). On résume dans le tableau suivant l'usage de l'or actuel.

Tableau 2 : Partage de l'usage de l'or

Médaille	Bijouterie	Alliages dentaires	Industries	électronique	Pièces de monnaie
4%	70%	6%	5%	5%	10%

(Source : Bache, 1980).

I-1-3 Prix mondial de l'or

Depuis sa découverte, l'or est très cher, son prix varie selon son alliage et le temps. On mesure l'or en gramme ou l'once la quantité dans le marché tel qu'une once équivaut à 31,1031 g. En 1935 le prix de l'or est 35 Dollars l'once, il ne cesse pas de monter jusqu'à ce jour, mais il subit de certaine variation, d'un abaissement ou augmentation de prix dans un court période. Actuellement, le prix de l'once d'or est augmenté à 1228.98 dollars.

I-1-4 Or à Madagascar

La découverte de l'or à Madagascar était faite par Jean LABORDE en 1945, mais le commencement de l'exploitation est à partir de 1883 au sous autorité de Reine RANAVALONA III.

La production de l'or à Madagascar montre beaucoup de variation, c'était 3kg en 1982 et 200kg en 2000. Nous résumons dans le tableau ci-dessous la production de l'or depuis 1882 jusqu'à 2008.

Tableau 3: Production de l'or à Madagascar depuis 1996 jusqu'à 2008

Année	1996	1997	1998	1999	2000	2003	2004	2006	2007	2008
Quantités										
En kg	50	50	50	8	5	10	200	10	210	210

I-1-5 Métallurgie de l'or

Les gisements d'or sont considérés de nature hydrothermale, on distingue trois types de hydrothermalisme : hyperthermal, mésothermal et épithermal. Il semble que l'or soit en

rapport avec l'émanation de granite et de diorite qui se traduit par des filons hydrothermaux. L'or est souvent associé aux amas pyriteux du magmatisme profond dont les roches mafiques et ultramafique telle que les dolérites. Il est bien établie que le magmatisme des domaines profonds est la source magmatique de l'or et ceci, en raison de son caractère sidérophile. Si l'or n'est pas contenu notablement dans les granites il se trouve régulièrement à faible teneur dans les roches basiques-ultrabasiques. Le gîte magmatique d'or nécessite les trois conditions suivantes :

- Soient des roches basiques-ultrabasiques qui sont la source magmatique de l'or.
- Un évènement de granitisation dans les voisinages pour collecter et remobiliser l'or
- Un piège à la circulation d'un fluide enrichi en or

L'or à Madagascar se concentre dans les roches primaires qui sont des roches magmatiques et métamorphiques, et dans les gisements secondaires qui peuvent être alluvionnaires ou éluvionnaires, en 1996 **Premoli** a caractérisé que :

- Ces gisement sont associés aux filons de quartz ;
- L'or est souvent associé à des sulfures de métaux non précieux, arsénopyrite, galène, tourmaline, pyrrhotite. Il se trouve dans la migmatite schisteuse, gneiss à lit quartzeux interstratifié ou encore des micaschistes, de quartz avec ou sans magnétite, des amphibolites et dans des pegmatites.

La minéralisation d'or se situe dans les zones de cisaillement et associée à des zones de failles.

I-1-6 Types de gîte aurifère connus à Madagascar

L'or se trouve principalement dans toutes les régions du socle cristallin de Madagascar. En général, on distingue deux types de gîtes aurifères qui sont les gîtes primaires et les gîtes secondaires.

I-1-6-1 Les gîtes primaires

On distingue l'encaissante de l'or trois types de gîtes primaires selon l'âge de l'or :

- Gîtes appartenant au domaine archéen
- Gîtes primaires de protérozoïque
- Gîtes liés à la tectonique Permo-triasique

I-1-6-1-1 Gîtes appartenant au domaine archéen

Ce sont le gîte le plus nombreux à Madagascar, la minéralisation se trouve dans le système de veine interstratifiés, concordant dans des formations métamorphiques :

- Des séries de roches amphiboliques : par exemple à Andriamena, Maevatanana, Alaotra et Mananjary ;
- Des quartzites à magnétites : exemple à Andriamena, Maevatanana et Alaotra ;
- Des séries silico-alumineuses : quartzites, gneiss, migmatites, micaschistes alumineux et souvent graphiteux et souvent de type d'ambatolampy-andriba et la région Ouest d'Antananarivo, série de sahintana et de Vavatenina, plus accessoirement les séries Vohilava-Ampasary ;
- Des filons péribatolitique, des stockwerks et une étendue dans les roches métamorphiques

I-1-6-1-2 Gîtes primaires du Protérozoïque

Ces gîtes sont souvent associés aux faciès à micaschistes ou à quartzites de SQD « Schisto-Quartzo-Dolomitique », par transformés soit par un métamorphisme régional, soit par un métamorphisme de contact intrusif.

- La région de Betsiriry à l'Est de Miandrivazo où les indices aurifère se regroupent dans la zone de passage entre les gneiss migmatitiques et la série Schisto-Quartzo-Dolomitiques (SQD).
- La région de l'Itea qui se trouve au Sud-Ouest d'Ambositra. Les indices d'or sont localisés dans les formations métamorphiques de contact et s'alignent dans des formations plus ou moins silicifiées bordant le massif granitique d'Itea..

I-1-6-1-3 Gîtes liées à la tectonique Permo-triasique

Ils se présentent sous forme de filons hydrothermaux à remplissage quartzo-barytiques de fractures avec de l'or natif et des sulfures associées.

Ce type de gîtes ne se rencontre que sur la bordure du socle-sédimentaire de l'extrémité Nord de Madagascar, plus précisément à Andavakoera.

I-1-6-2 Gîtes secondaires

Les gîtes secondaires sont obtenus à partir de l'altération météorique des gîtes primaires conduisant à la transformation en latérites des roches encaissantes. Une partie de l'or libéré migre vers le bas et peut éventuellement former des dépôts à la limite des roches saines.

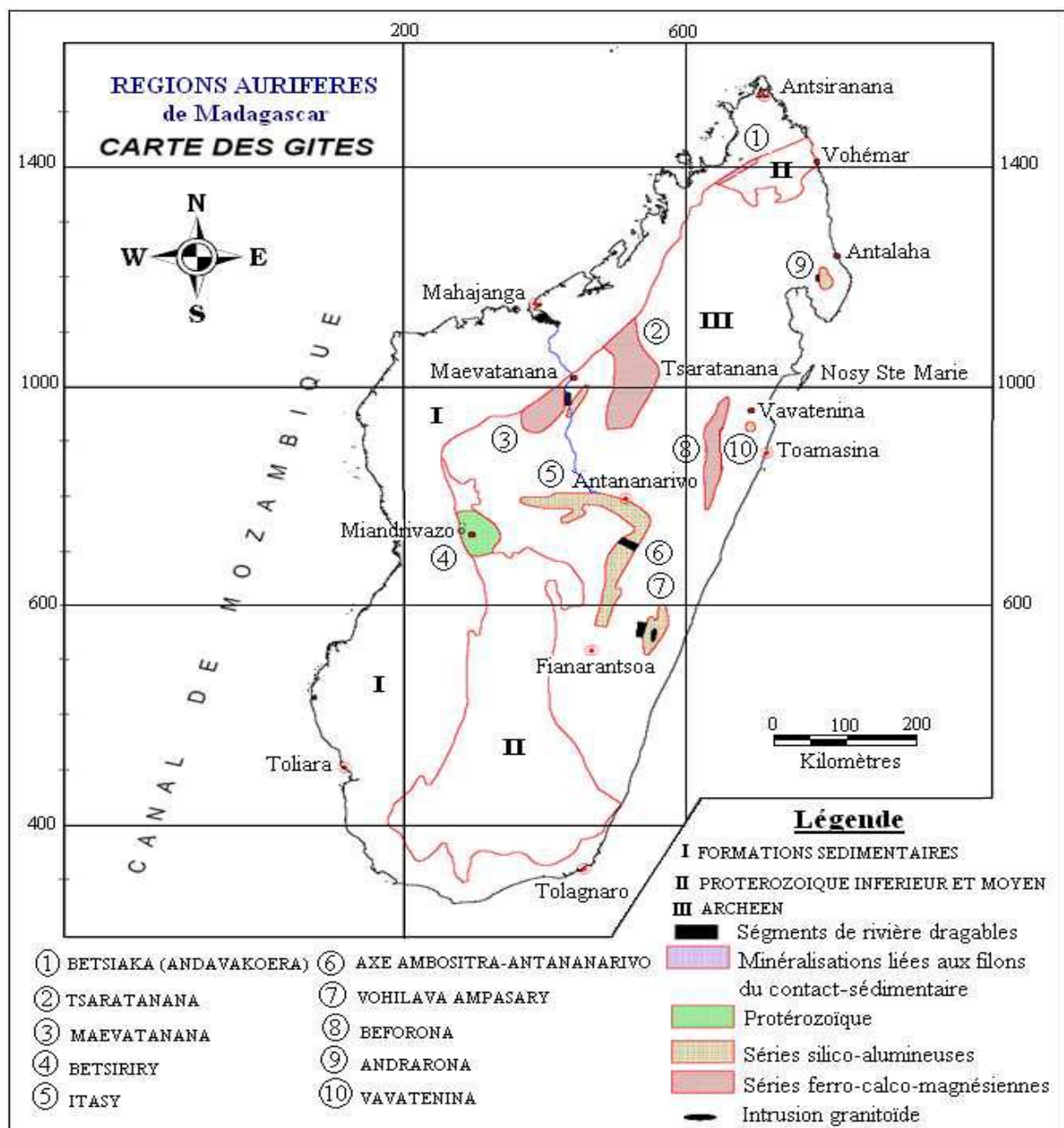
On distingue trois types de gîtes secondaires :

- Les gîtes éluvionnaires où le matériel latéritique concentré en or était transporté le long d'une pente à faible distance. L'effet de gravité peut provoquer localement l'enrichissement en or. La minéralisation se concentre donc près de la zone de démantèlement. En effet, ces gisements sont très intéressants car facile à exploiter.
- Les gîtes alluvionnaires anciens proviennent des formations préexistantes, dont les alluvions aurifères plus ou moins consolidées, forment des terrasses surélevées le long des vallées et entaillées par les cours d'eau actuels.
- Les gîtes alluvionnaires actuels où les sables et graviers aurifères forment le lit actuel des cours d'eau. Ils résultent soit par démantèlement des terrasses anciennes en amont, soit directement par érosion des gîtes primaires ou éluvionnaires. Ces gîtes sont les gîtes les plus actifs exploitées par les orpailleurs.

I-1-7 Les principales zones aurifères de Madagascar :

Madagascar compte plusieurs régions aurifères, à savoir :

Andavakoera (Betsiaka), Tsaratanana- Andriamena, Maevatanàna, Betsiriry, Itasy, Axe Ambositra-Antananarivo, Vohilava-Ampasary, Beforona, Andrarona et Vavatenina. Nous résumons dans la carte ci- dessous ces régions :



(Source : service de la Géologie-SIGM.2008).

Figure 1: Carte des gites des régions aurifères à Madagascar.

I-2 Contexte de la zone d'étude

On parle dans ce chapitre le contexte général de la zone d'étude. En premier lieu sa situation administrative et géographique, puis le contexte climatique et géologique.

I-2-1 Présentation de la zone d'étude

La Région Betsiboka se situe dans l'Ouest de Madagascar, elle constitue la partie Centre-Sud de la province de Mahajanga. La région est délimitée :

- au Nord par la région de Boeny ;
- au Nord-est par la région de Sofia ;
- à l'Est par la région d'Alaotra-Mangoro ;
- au Sud par les régions d'Analamanga et de Bongolava ;
- et à l'Ouest par la région de Melaky.

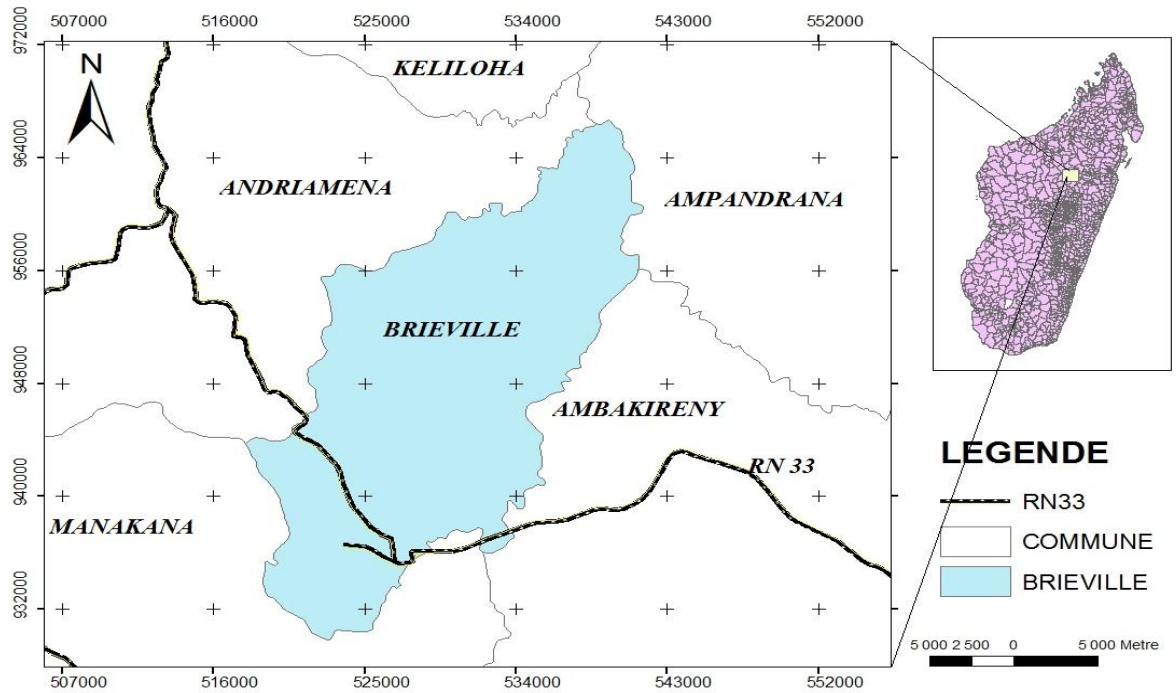
Elle est subdivisée en trois districts : Kandreho, Maevatanana et Tsaratanana. La Capitale de la région est Maevatanana. La Région Betsiboka est limitée par les coordonnées géographiques suivantes : entre 14° de latitude Nord et 19° de latitude Sud ; entre 48° de longitude Est et 46° de longitude Ouest.

La région couvre une superficie de 30 025 km² et représente 5 % de la superficie totale de Madagascar.

Tableau 4: Superficie des districts dans la région Betsiboka

District	Superficie (Unité : km ²)
Kandreho	6 162
Tsaratanana	10 410
Tsaratanana	13 453
Total région	30 025

Source : MEI/CREAM/Monographie 2009



(Source : BD 100 FTM)

Figure 2 : Localisation de la zone d'étude

le secteur d'étude appartient au périmètre minier de KRAOMA dans le district de Tsaratanana, de la Commune de Brieville et ses environs, il se localise à 150 kilomètre à vol d'oiseau au Nord d'Antananarivo, elle est limitée par les coordonnées Laborde de longitude entre 500000m Ouest à 565000m Est et de latitude entre 920000m Sud à 965000m Nord.

I-2-2 Contexte hydrologique

La région dispose d'un réseau hydrographique particulièrement dense qui lui confère un capital en eau inestimable pouvant être exploité pour le transport fluvial, l'alimentation en eau, la pêche, l'agriculture ou encore l'énergie hydroélectrique. Cette hydrographie est cependant, tributaire du relief et du climat qui suivent souvent des régimes capricieux occasionnant une alternance entre des crues et des étiages souvent absolus. Les rivières ont suit des directions NW-SE et N-S.

Cette région est traversée à l'Ouest et au centre par deux fleuves Betsiboka et Mahajamba.



(Source : BD 100 FTM)

Figure 3: Carte de réseau hydrographique

I-2-3 Contexte climatique

Le climat de la région est de type tropical sec avec une alternance entre une saison sèche de 7 mois d'avril à novembre et une saison humide de 5 mois de novembre à avril.

Température

A saisons contrastées où la chaleur est constante, la température moyenne annuelle, relativement élevée par rapport à celle des autres régions est de 28°C avec une amplitude 12°C. Classée parmi la région la plus chaude de Madagascar, la température maximale peut atteindre 40 à 42°C.

Tableau 5: Variation de la température mensuel de la région d'étude

Moyenne mensuelle	Jan	fév.	Mars	Avl	Mai	Juin	Juill	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Maevatanana	27,8	27,9	27,9	28,3	27,1	25,4	25	26	27,4	28,9	29,3	28,5
Tsaratanana	26,1	26,4	26,2	26,5	24,6	23,2	22,5	23,2	24,6	26,2	26,8	25,2

Source : Base de données Ministère de l'eau 2013

Pluviométrie

La précipitation moyenne se situe entre 1 000 mm et 1 800 mm répartie pendant la saison humide de novembre à avril. La pluviométrie annuelle de la commune de Maevatanana est estimée à 1 800 mm se concentrant pendant les mois de novembre à mars. Pendant 4 mois, il fait plus sec et chaud.

Toutefois, la pluviométrie mensuelle, illustrée par le tableau 6, voir annuelle est très variable d'une année à l'autre. Cette variabilité interannuelle des précipitations peut être affectée par le changement climatique de la région.

Tableau 6: Variation de la pluviométrie mensuelle de la zone d'étude

Moyenne mensuelle	Jan	Fev	Mars	Avl	Mai	Juin	Jull	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Maevatanana	457,8	351,2	290	72,8	4,8	0,9	2,1	2,1	2,4	32,2	157,2	317,5
Tsaratanana	544,3	395,3	317,9	57,4	8,8	2	1,1	2,6	3	45,1	146,6	350,4

Source : Base de données Ministère de l'eau 2013

I-2-4 Contexte géologique

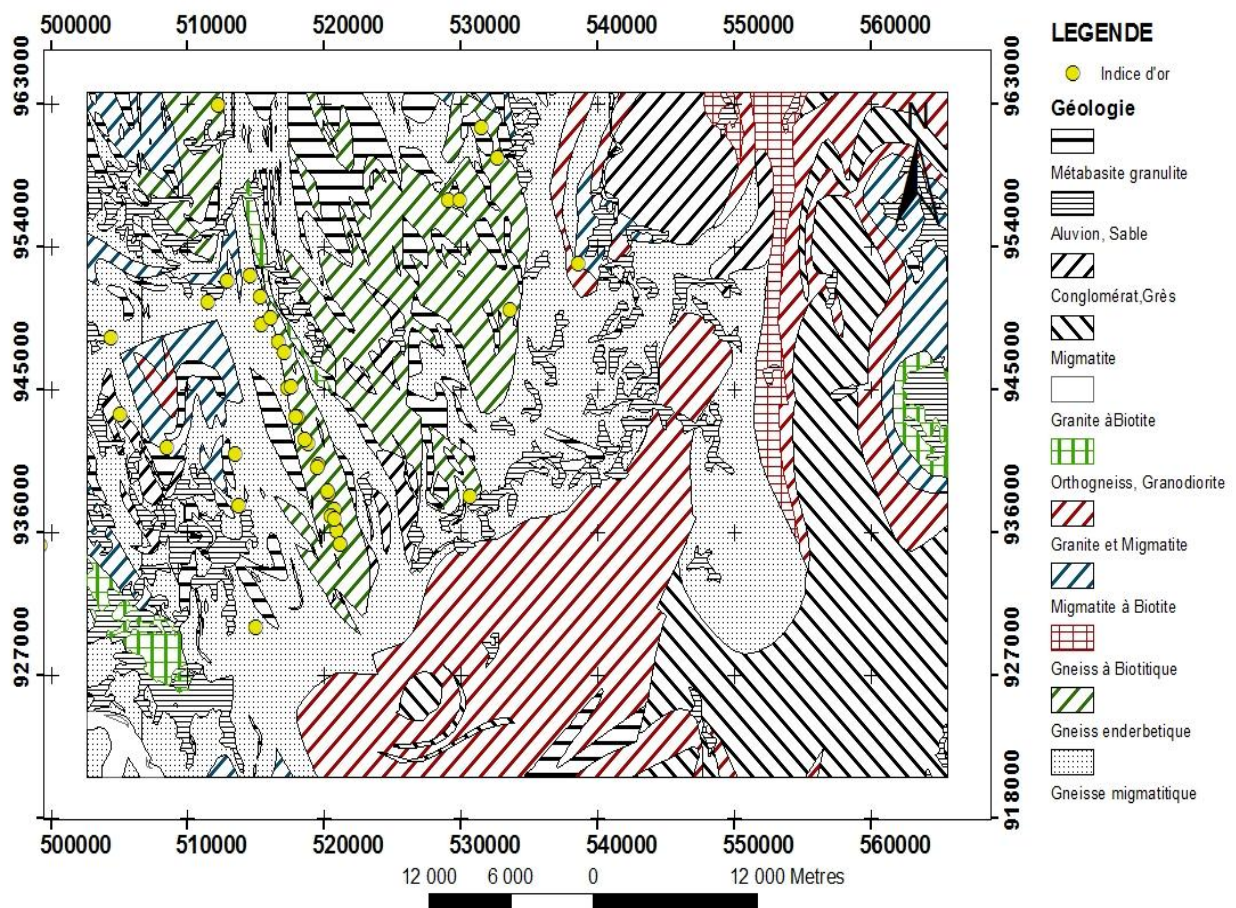
D'après cette révision du socle cristallin malgache, la région Betsiboka appartient au groupe d'Andriamena relié à l'unité de Tsaratanana. Du point de vue structural, l'unité de Tsaratanana est placée en position sub-horizontale au-dessus des métasédiments néoprotérozoïques et de l'autochtone du bloc d'Antananarivo. [11]

Géomorphologiquement, elle est facilement distinguée par le fait de la nature mafique et contient des lentilles ultramafique et relativement moins résistante à l'altération et a ainsi développé un sol latéritique de couleur rouge brique ; en raison de ce précédemment les lavaka se développent facilement. [11]

Les roches d'origine mafique et ultramafique y sont associées à des gneiss à biotite et amphibole qui sont prépondérants et qui contiennent des bancs de quartzites à magnétite. Cette unité est minéralisée en chromite, nickel et or.

L'Unité d'Andriamena est formée par des formations gneissiques et paraderivées, leucocrate à mesocrates. L'ensemble est en position structurale qui sont :

- les corps ultramafiques qui sont systemetiquement en contact faille avec son encaissante orthogneissique et ils ont une forme général de sigmoïde vertical plus ou moins parfait demontrant une dynamique senestre. Leurs affleurement sont generalement mal préservés. Les contacts entre les diverses formations géologiques de cœur de corps ultramafiques sont net et tranchés. Il se sont en général par faille à remplissage de pegmatite. Les contactacts entre les ultramafites sont en général souligné par un developement de soapstone.[11]
- Les gneiss migmatitique de deux types distincts par leurs compositions minéralogiques respectives : une variété quartzo-feldspathique à deux pyroxènes, hornblend, grenat et biotite, et une variété de nature silico- alumineuse à silimanite-grenat avec biotite et chlorite.[11]



(Extrait feuilles P43, Q43, P44, Q44, FTM)

Figure 4: Carte géologique de la zone d'étude

Minéralisation en Or

L'or alluvionnaire est activement exploité depuis le début du XXème siècle sur les feuilles OP44, exclusivement de manière artisanale au cours de chantiers saisonniers. Toutefois, l'or est signalé dans les quartzites à magnétite, et quelques filons de quartz mésothermaux à sulfures (reconcentrations).

Les placers alluvionnaires, avec des concentrations intéressantes en or, sont localisés sur les versants et aux pieds des massifs de gneiss et de migmatites à amphiboles, d'amphibolites et d'amphibolo-pyroxénites situés principalement sur la partie Est de la région.

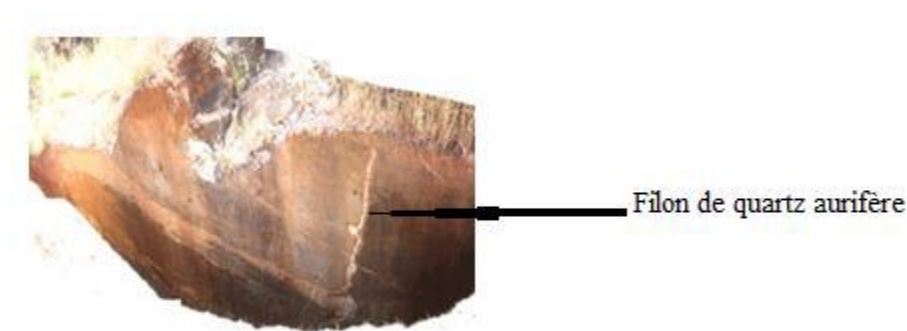


Photo 2: Filon de quartz aurifère encaissé dans une orthogneiss granodioritique

Chapitre II : RAPPELS THEORIQUES

Nous développons dans ce chapitre en premier lieu la télédétection que contient la notion de la télédétection, le caractère des images LANDSAT, ensuite le magnétisme que contient les champs géomagnétique et la prospection magnétique, la spectrométrie et, enfin nous devons aussi parler de quelques notions sur les logiciels de traitement de données qui sont l'Oasis montage, l'envi et l'Arc gis.

II-1 TELEDETECTION

La technique de la télédétection a été mise en œuvre depuis une vingtaine d'années à partir des données de satellite artificiel de la Terre.

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci.

II-1-1 Principe

Le Soleil émet vers la Terre des ondes électromagnétiques. Une partie de ce rayonnement incident est absorbée par l'ensemble des surfaces terrestres, et la partie non absorbée est réfléchie. Ce sont ces dernières radiations qui pourront être captées par les appareils présents dans les satellites: les radiomètres.[5]

La réflexion du rayonnement solaire étant dépendante de la qualité des surfaces terrestres, les radiomètres qui mesurent des réflectances (rapport du rayonnement réfléchi sur le rayonnement incident) permettront de distinguer les surfaces aux propriétés différentes (végétation, milieux aqueux, sol, ...etc.)

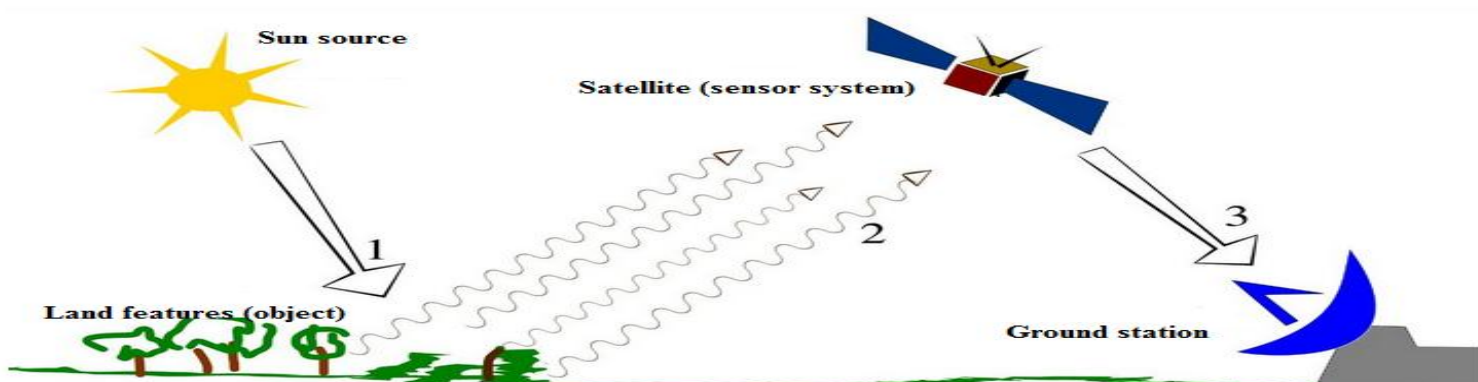


Figure 5: Représentation du principe de mesure en télédétection

II-1-2 Acquisition de données de télédétection

L'image satellite est une image numérique, formée par des agrégats en une matrice des éléments d'image (Picture élément : pixel). En d'autres termes chaque point correspond à un pixel. Cette image est acquise par un capteur embarqué à bord d'un satellite qui enregistre l'énergie provenant de la surface terrestre. Elle couvre une grande surface. Ainsi, une scène présente une portion d'image et elle est spécifique à chaque type de capteur.[5]

Une image de télédétection comprend plusieurs canaux spectraux (bandes) : 7 pour Landsat ; 4 pour Spot 5.

Tableau 7: Quelques spécificités des capteurs les plus utilisés

Capteur	Résolution spatiale (m)	Résolution spectrale	Résolution temporelle (j)	Altitude	Scène
Landsat 7 ETM	15-30-60	8	16	705	185
Spot 5	2.5-5	4	26	832	60
Bird	0.6 -300	-	-	450	-

Nous avons utilisés l'image acquise par le satellite Landsat 7 ETM. « Le Landsat 7 » est le dernier Landsat lancé par le programme LANDSAT. Les instruments embarqués sur les satellites Landsat ont fait l'acquisition de plusieurs millions d'image.

II-1-3 Caractéristiques des bandes spectrales de LANDSAT 7 ETM

Le satellite Landsat est composé par une caméra RVB (Return Beam Vidicon) et radiomètre ETM + (EnhancedThematic Mapper Plus) depuis 1999 sur Landsat 7.

L'image LANDSAT est codée sur huit canaux appelés TM dont les spécifications sont données par le tableau suivant,

Tableau 8: Caractéristiques spécifiques des images LANDSAT TM :

Satellite	Capteur	Bande	Canal	Longueur d'onde (μm)	Résolution spatiale (m)
Landsat 7	TM	TM1	Bleu	0.45 à 0.52	30
		TM2	Vert	0.52 à 0.60	30
		TM3	Rouge	0.63 à 0.69	30
		TM4	PIR	0.76 à 0.90	30
		TM5	MIR 1	1.55 à 1.75	30
		TM6	IR Thermique	10.4 à 12.5	60
		TM7	MIR 2	2.08 à 2.35	30
		TM8	Panchromatique (Vert-rouge-IR)	520-900 nm	15

Source : Centre Canadien de Télédétection

II-2 PROSPECTION MAGNETIQUE

Avant d'aborder l'étude du champ magnétique terrestre, nous allons rappeler quelques notions sur le magnétisme.

II-2-1 Notion sur le magnétisme

II-2-1-1 Force magnétique

Si deux pôles magnétiques P et P₁ sont séparés d'une distance r quelconque et placés dans le vide, ils sont soumis à une force attractive si les deux pôles ont de signe opposé, ou de force répulsive si les deux ont de même signe. On représente cette force sur la figure ci-dessous, dans laquelle on va prendre deux pôles magnétiques de même signe.



Figure 6: Forces créées par deux pôles magnétiques.

La force magnétique est donnée par la loi de Coulomb et peut s'écrire :

$$\vec{F} = P_1 \vec{H} = \frac{P_1 P}{\mu r^2} \vec{u} \quad (1)$$

Où $\vec{F}$: La force magnétique en dynes (1 dyne=1cmg/s²)

P_1 et P ou m_1 et m_2 : les pôles ou masses magnétiques en ému

$\vec{u}$: Le vecteur unitaire entre P_1 et P

μ : La perméabilité magnétique du milieu ($\mu=1$ dans le vide)

$\vec{H}$: Le champ magnétique

Par convention, le pôle magnétique porte de signe positive s'il est attiré par le pôle Sud d'un aimant, et négatif s'il est attiré par celui du pôle Nord.

II-2-1-2 Champ magnétique

Un pôle magnétique P placé au point M dans l'espace est soumis à l'attraction émanant d'un autre pôle magnétique P' situé à une distance r du point M . L'intensité du champ magnétique H est définie comme la force exercée sur un pôle unitaire :

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{P} = \frac{P'}{\mu r^2} \vec{r} \quad (2)$$

On suppose que P n'est pas assez grand pour affecter le champ H au point de mesure, c'est-à-dire $P \ll P'$. Dans le système CGS, l'unité du champ est l'Oersted noté Oe tel que la dimension de l'Oersted est $cm^{\frac{1}{2}}.g^{\frac{1}{2}}.s^{-1}$.

En géophysique, on mesure des variations de l'ordre de 10^{-4} fois l'amplitude du champ magnétique terrestre, qui est environ $0,5\text{ }Oe$.

II-2-1-3 Moment magnétique

Une masse magnétique libre n'a pas de signification physique, mais on considère toujours l'association des pôles notamment le dipôle de signes opposés $-m$ et $+m$, séparé d'une distance r . Le moment magnétique $\vec{M}$ est dirigé suivant la droite joignant les deux pôles et orienté de $-m$ vers $+m$ et son intensité est : $\vec{M} = m\vec{r}$ (3)

II-2-1-4 Intensité magnétique

Un corps magnétique placé dans un champ magnétique externe sera aimanté par induction. L'intensité d'aimantation est proportionnelle à la force du champ et sa direction est dans celle du champ. Elle est définie comme le moment magnétique par unité de volume. I est appelé aussi la polarisation magnétique car l'induction tend à aligner les dipôles du corps magnétique.

$$\vec{I} = \frac{\vec{M}}{v} \quad (4)$$

II-2-1-5 Susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique k est une mesure du degré auquel un matériau peut être magnétisé. Par conséquent, elle est une grandeur variable et on peut classer les matériaux avec ceci. Alors l'intensité de la magnétisation est proportionnelle à la susceptibilité magnétique de matière traversée par un champ magnétique, plus grande que serait la susceptibilité, plus grand serait l'intensité de la magnétisation induite et, par conséquent, plus grande serait l'anomalie produite par rapport au champ terrestre. On a :

$$\vec{I} = k\vec{H} \quad (5)$$

Tableau 9 : Gamme de valeur de susceptibilité magnétique des roches et minéraux

Type	Susceptibility $\times 10^3$ (SI)	
	Range	Average
<i>Sedimentary</i>		
Dolomite	0 – 0.9	0.1
Limestones	0 – 3	0.3
Sandstones	0 – 20	0.4
Shales	0.01 – 15	0.6
Av. 48 sedimentary	0 – 18	0.9
<i>Metamorphic</i>		
Amphibolite		0.7
Schist	0.3 – 3	1.4
Phyllite		1.5
Gneiss	0.1 – 25	
Quartzite		4
Serpentine	3 – 17	
Slate	0 – 35	6
Av. 61 metamorphic	0 – 70	4.2
<i>Igneous</i>		
Granite	0 – 50	2.5
Rhyolite	0.2 – 35	
Diorite	1 – 35	17
Augite-syenite	30 – 40	
Olivine-diabase		25
Diabase	1 – 160	55
Porphyry	0.3 – 200	60
Gabbro	1 – 90	70
Basalts	0.2 – 175	70
Diorite	0.6 – 120	85
Pyroxenite		125
Peridotite	90 – 200	150
Andesite		160
Av. acidic igneous	0 – 80	8
Av. basic igneous	0.5 – 97	25
<i>Minerals</i>		
Graphite		0.1
Quartz		– 0.01
Rock salt		– 0.01
Anhydrite, gypsum		– 0.01
Calcite	– 0.001 – – 0.01	
Coal		0.02
Clays		0.2
Chalcopyrite		0.4
Sphalerite		0.7
Cassiterite		0.9
Siderite	1 – 4	
Pyrite	0.05 – 5	1.5
Limonite		2.5
Arsenopyrite		3
Hematite	0.5 – 35	6.5
Chromite	3 – 110	7
Franklinite		430
Pyrrhotite	1 – 6000	1500
Ilmenite	300 – 3500	1800
Magnetite	1200 – 19200	6000

(source : Tailford., 1990)

II-2-2 Champ géomagnétique

II-2-2-1 Représentation du champ géomagnétique [12]

Nous représentons les lignes des champs magnétiques orientées 'un champ purement dipolaire. Cela permet de rappeler brièvement les propriétés essentielles d'un tel champ. Il est vertical et dirigé vers le centre de la Terre au pôle Nord géomagnétique ($78.5^\circ N$; $111^\circ O$). Il est vertical mais dirigé vers l'extérieur au pôle Sud géomagnétique ($78.5^\circ S$; $111^\circ E$). L'axe géomagnétique, passant par ces deux pôles, fait un angle d'environ $11,5^\circ$ par rapport à l'axe de rotation de la Terre, reliant les deux pôles géographiques. Enfin, il est horizontal à l'équateur magnétique. Nous allons la représentation de champ magnétique terrestre dans la figure ci-après

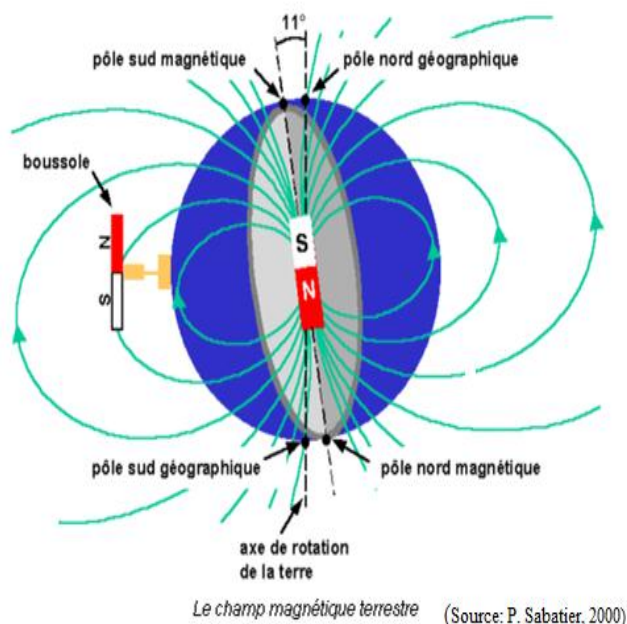


Figure 7: Représentation dans l'espace de la ligne de champ magnétique dipolaire orientée du pôle sud vers le pôle nord géomagnétique.

Remarque : Le nord magnétique et le nord géographique, qui correspond à l'axe de rotation de la Terre, ne coïncident pas. On observe actuellement une inclinaison de 11° entre les deux.

II-2-2-2 Sources des champs magnétique terrestre

L'induction magnétique, mesurée à la surface de la Terre, notée $\vec{B}$, est une grandeur vectorielle dont l'intensité se mesure en Tesla (T), ce qui correspond au Weber.m⁻² ou bien encore au kg.s⁻².A⁻¹ dans le système international (SI). Elle est la résultante de toutes les sources magnétiques environnantes : noyau, croûte, objets géologiques ou anthropiques, ionosphère, magnétosphère, etc. Ces sources se distinguent par un magnétisme de type rémanent ou de type induit, c'est-à-dire engendré par un flux de courant, respectivement, interne ou externe à la source magnétique.

1. Les champs magnétiques terrestres sont la contribution de deux sources différentes :
Le champ interne dont les sources sont à l'intérieur (dans le noyau, la croûte terrestre) de la terre.

2. Et le champ externe dont les sources sont à l'extérieur (l'ionosphère).

Champ magnétique total $\vec{B} = \vec{B}_i + \vec{B}_e$ (6)

Il varie dans le temps et dans l'espace, et son intensité comprise entre 25.000nT et 60.000nT partout sur la surface de la terre. Le tableau ci-après résume l'origine du champ magnétique qui règne à la surface de la terre et son caractéristique :

Tableau 10 : Résumé de l'origine des champs magnétiques terrestres

Le champ magnétique	Caractéristique
Le champ interne : $\vec{B}_i = \vec{B}_p + \vec{B}_a$ Le champ principale et le champ d'anomalie crustale	* <i>Le champ principal</i> a son origine dans le noyau terrestre. En première approximation, sa géométrie est celle d'un dipôle orienté du pôle nord vers le pôle sud placé au centre de la terre et dont le support ferait un angle de 11,5° avec l'axe de rotation de la Terre. La position des pôles magnétiques change avec le temps. La variation temporelle de ce champ est très lente et de quelques dizaines de nT par an sur une période de quelques siècles. Les études paléomagnétiques montrent, en outre, que le champ géomagnétique a la propriété de s'inverser : c'est le phénomène de migration des pôles (en moyenne tous les

	200.000 ans). Ces inversions de polarité s'accompagnent d'une baisse significative de l'intensité du champ principal. <i>* Le champ d'anomalies crustales a ses sources dans la croûte terrestre. Son intensité varie de quelques nT à quelques dizaines de milliers de nT. Il est engendré par les roches aimantées de la croûte terrestre situées au-dessus de la surface isotherme dite de Curie. Sur cette surface, la température est égale à la température de Curie (environ 578°C) des constituants magnétiques des roches, à savoir celle de l'hématite 670°C. A cause des gradients thermiques, toute aimantation cesse au-delà des températures de Curie.</i>
Le champ externe ou champ transitoire $\vec{B}_t = \vec{B}_i + \vec{B}_m$ Le champ ionosphérique Et le champ magnétosphérique	Il résulte de champ d'origine externe c'est-à-dire le champ ionosphérique et le champ magnétosphérique, il représente moins de 1% du champ total, mais il n'est du tout négligeable à l'échelle locale. Il subit deux types de variation : les variations diurnes, ces variations se caractérisent par la faible amplitude avec une période de l'ordre d'une journée et atteignent un maximum aux environs de « midi », heure solaire (l'amplitude de la variation diurne reste plus importante en été qu'en hiver). Le deuxième type, ce sont des variations rapides ou transitoires : ce sont des variations de courtes durées, elles sont engendrées par l'activité solaire, de faible amplitude.

II-2-2-3 Composantes du champ géomagnétique

En chaque point de la surface de la terre, le champ géomagnétique « B » est représenté par son intensité « F » comme grandeur vectorielle, ce vecteur change son orientation d'un point à l'autre. Trois valeurs sont nécessaires à sa description complète en un point. Ce peut être :

- les composantes orthogonales de l'intensité du champ (**X**, **Y**, et **Z**);
- l'intensité totale du champ et deux angles (**F**, **D**, **I**); ou

- deux composantes de l'intensité du champ et un angle (**H**, **Z**, **D**)

La relation entre ces sept éléments est montrée dans le diagramme suivant.

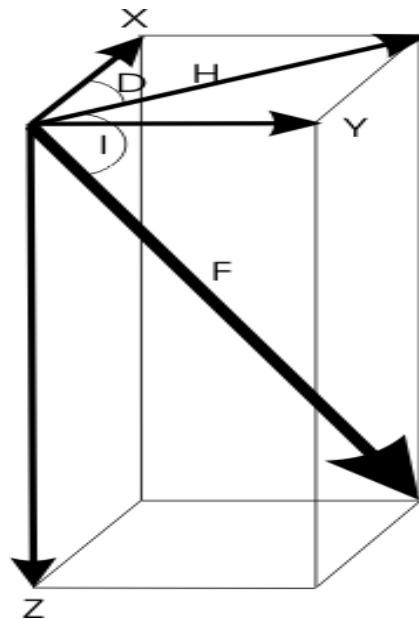


Figure 8: Élément du champ géomagnétique

Tableau 11: Description des éléments du champ géomagnétique

Composant	Description
F	intensité totale du vecteur champ magnétique
H	intensité horizontale du vecteur champ magnétique
Z	composante verticale du vecteur champ magnétique; par convention, Z est positif vers le bas
X	composante nord du vecteur champ magnétique; X est positif vers nord
Y	composante est du vecteur champ magnétique; Y est positif vers l'est
I	inclinaison magnétique, soit l'angle que fait le vecteur champ magnétique par rapport au plan horizontal et dont la valeur est positive vers le bas
D	déclinaison magnétique, définie comme étant l'angle entre le nord vrai (nord géographique) et le nord magnétique (la composante horizontale du champ magnétique), est positif vers le nord vrai

On mesure **D** et **I** en degrés et les autres éléments en nanotesla (nT; 1 nT = 10⁻⁹ Tesla).

Les sept éléments sont reliés entre eux par ces expressions simples :

$$\text{Déclinaison (D)} \quad D = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (7)$$

$$\text{Inclinaison (I)} \quad I = \tan^{-1} \left(\frac{Z}{H} \right) \quad (8)$$

$$\text{Horizontale (H)} \quad H = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (9)$$

$$\text{Nord (X)} \quad X = H \cos (D) \quad (10)$$

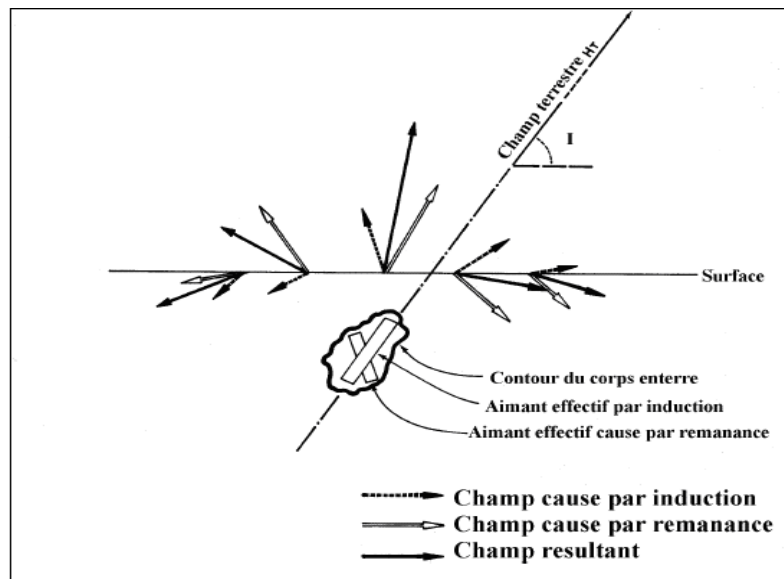
$$\text{Est (Y)} \quad Y = H \sin (D) \quad (11)$$

$$\text{Intensité (F)} \quad F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (12)$$

II-2-3 Types de magnétisme

Les anomalies magnétiques dans la terre sont provoquées par deux types de magnétisme distinct, en savoir le magnétisme induit et le magnétisme rémanent (permanent). Le magnétisme induit d'une masse possède la même direction que le champ terrestre actuel, tandis que le magnétisme rémanent n'est pas forcément orienté dans la même direction et il peut même être s'opposé au champ terrestre. Lors d'une absence du champ de la terre le magnétisme induit disparaîtrait mais le magnétisme rémanent pourrait s'exister. Ainsi, les matériaux constituant la croûte terrestre ont la capacité de porter ces 2 aimantations simultanément, et deviennent à leur tour des sources de champ magnétique se superposant au champ principal tel qu'il a été décrit ci-dessus. Elles génèrent ainsi des anomalies du champ mesuré en surface, ce champ d'anomalie, dit aussi champ crustal.[9]

La figure ci-dessous représente les directions du champ magnétique rémanent et induite.



(Source : Stettler 2004)

Figure 9: Magnétisme induite et rémanent

II-2-4 Caractéristiques des matériaux magnétiques

Les matériels plongés dans un champ magnétique se comportent en trois types de magnétisations différents : le diamagnétisme, le paramagnétisme et le ferromagnétique.

II-2-4-1. Diamagnétisme

Le corps prend une aimantation en sens inverse du champ appliqué. La plupart des corps solides, liquides et gazeux sont diamagnétiques : l'eau, l'air, la silice, la calcite ...

II-2-4-2. Paramagnétisme

Les matériaux prennent une aimantation positive dans le sens du champ magnétique dans lequel ils sont plongés. Cette aimantation est faible et elle est proportionnelle au champ appliqué. Elle diminue avec la température et devient nulle quand le champ est interrompu.

II-2-4-3. Ferromagnétisme

Cette aimantation est beaucoup plus forte que dans les deux cas précédents et elle se poursuit quand on a supprimé le champ ambiant (rémanence). Ces corps enregistrent l'histoire magnétique antérieure. Lorsqu'on chauffe ces corps, ils perdent cette aimantation au-dessus d'une certaine température que l'on appelle température de Curie (ou point de Curie). Les corps ferromagnétiques sont le fer, les aciers, des oxydes de fer, tels la magnétite, l'hématite, la titano-magnétite, ou les sulfures et l'hydroxyde de fer. La température de Curie du fer est 770 °C, celle de la magnétite 585 °C et celle de l'hématite 675 °C. Dans les roches constituant

la croûte terrestre ce sont les minéraux magnétiques naturels qui jouent un grand rôle dans l'aimantation des roches. Il s'agit essentiellement des titano-magnétites $\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$ et des titano-ilménites $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{FeTiO}_3$.

II-2-5 Prospection magnétique

La prospection magnétique est basée sur la mesure du champ magnétique et la susceptibilité magnétique des minéraux. La méthode consiste à chercher et localiser les roches, formations et gisements en se basant sur des anomalies magnétiques. La plupart des minéraux ont une susceptibilité magnétique très faible voir même nulle exceptée la magnétite (Fe_3O_4) et quelques autres minéraux plus rares. Heureusement, la magnétite est présente dans presque toutes les roches en quantité plus ou moins importante, une fraction de 1% étant détectable. L'unité du système international pour mesurer l'intensité du champ magnétique est le Tesla "T" mais l'unité couramment utilisée est le gamma " γ " tel que:

$$1 \text{ "}\gamma\text{"} = 10^{-9}\text{T} = 1\text{nT}$$

En exploration minière, on se sert des levés magnétiques pour localiser et pour délimiter:

- des gisements de minerais de Fer magnétique
- un gisement d'aimante (les fibres sont associées avec la magnétite et se trouvent dans les roches très basiques)
- des dykes magnétiques qui forment souvent une barrière pour l'accumulation de l'eau souterraine.
- des gisements de minerais métalliques qui pourraient avoir soit de la magnétite, soit de la pyrrhotite soit de l'ilménite associée avec le minerai.

Détection indirecte :

- des zones riches en magnétite qui pourraient avoir une association quelconque indirecte avec un gisement métallique
- des restes archéologiques
- du Nickel associé avec des roches basiques
- de la minéralisation généralement associée à des structures (faille, plissements, intrusifs, etc.)

En cartographie que ce soit en géologie structurale ou minière :

- utilisation la plus importante tant au sol qu'aéroportée, tant local que régional
- permet d'interpoler entre les affleurements sans être obligé de forcer ou de creuser.

Exploration pétrolière :

-Etudes des bassins sédimentaires à partir des anomalies causées par des structures du socle ou à sa topographie.

-Détection indirect : piège structuraux (faille, plis).

L'avantage de la méthode aéroportée en est que de grandes superficies (éventuellement à accès difficile) peuvent être levées rapidement et à moindre coût que par levé au sol.

II-2-6 Prospection magnétique aéroportée

La méthode aéromagnétique consiste à mesurer le champ magnétique terrestre à l'aide d'un magnétomètre au bord d'un avion. Pour la première fois, cette méthode est utilisée dans le domaine de la cartographie géologique, l'étude des structures des bassins sédimentaires et l'exploration minière et pétrolière.

II-2-6-1 Matériels utilisés [12]

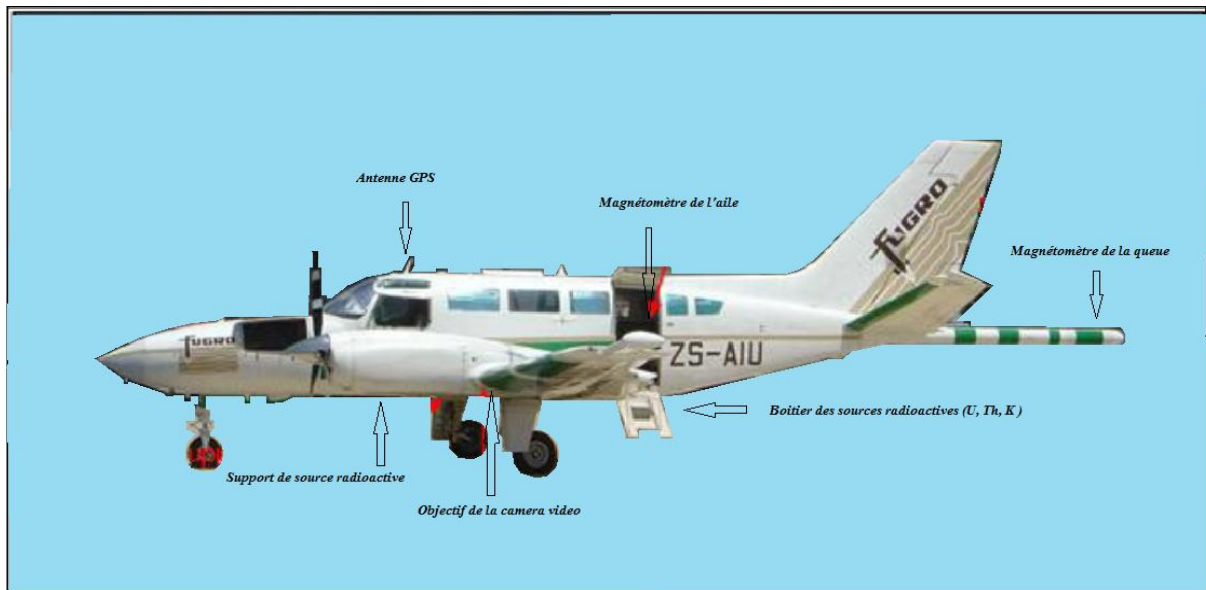
Les matériels principaux utilisés sont ceux du magnétomètre, il est constitué par :

- ❖ A pompe optique de types Scintrex CS-3
- ❖ De type fluxgate : compensateur automatique
- ❖ De la station de base : de type Scintrex H8

L'aéronef effectuant les levés de magnétisme et de spectrométrie gamma aéroportée, ses caractéristiques et les suivantes :

- Capacité de voler à la vitesse inférieure à 250km/h
- Double moteurs pour la sécurité, il utilise le moteur à piston pour les basses altitudes.
- Une autonomie de vol d'au moins 6 heures.

La figure suivante donne la description de l'aéronef Cessna 404 Airborne surveys comportant les accessoires de la prospection magnétique :



(Source : PGRM, 2005)

Photo 3: Aéronef Cessna 404-Fugro airborne surveys

II-2-6-2 Acquisition des données

Les vols suivent des lignes parallèles de direction Est-Ouest à une altitude constante avec des lignes de contrôle de direction Nord-Sud aux intervalles. La géologie de la zone d'étude détermine l'espacement de ces lignes traverses. La hauteur de vol par rapport au sol est fixée, d'altitude moyenne environs de 100m. En général pour le levé aéroporté, l'aéronef vole à une vitesse entre 220 à 280 km/h.

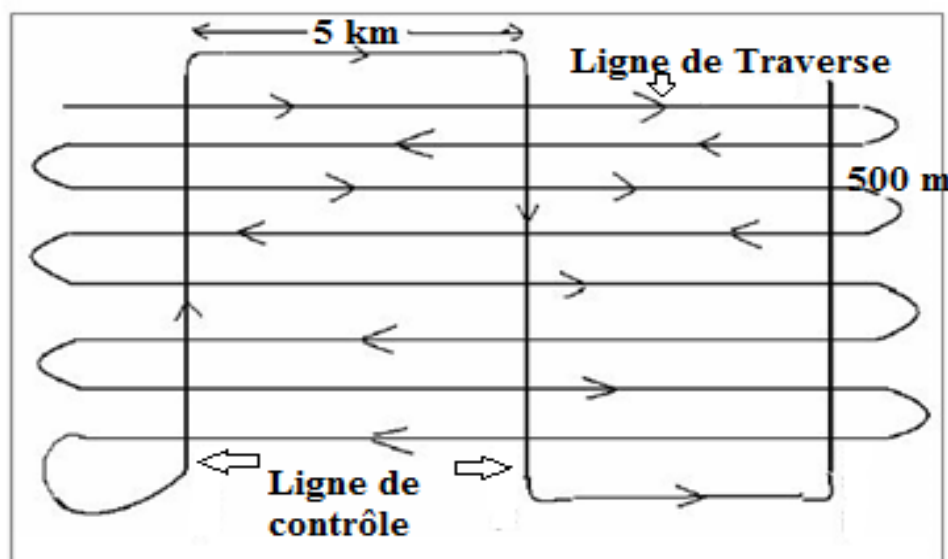


Figure 10: Trajectoire de l'aéronef lors d'un levé

(Source : R.R .Malala 2008)

II-2-6-3 Traitement des données magnétiques

Le champ géomagnétique varie dans le temps et dans l'espace. Les spectres de ses variations dans le temps et dans l'espace sont très larges. C'est du même cas de toute la méthode géophysique, il faut faire des corrections nécessaires.

- **Correction de dérive**

Pour éliminer les variations temporelles des champs magnétique terrestre, il faut passer à la correction de dérive, qui consiste à ramener tous les valeurs prises de ce champ en même instant dite station de base, en supposant que la dérive des champs magnétique terrestre est linéaire dans le temps ; le taux de dérive est données par la formule suivante :

$$TD = \frac{Ff - Fi}{Tf - Ti} \quad (13)$$

Avec Fi : la valeur à la station de base à l'instant initial Ti

Ff : la valeur à la station de base à l'instant final Tf

Les valeurs sont réduit en même instant, et n'est plus en fonction de temps.

Les champs corrigés ce qu'on appelle champs magnétiques totaux réduit à la base, pour chaque instant est donnée par la formule suivante :

$$CMTrb = F - TD * (t - ti) \quad (14)$$

Avec $CMTrb$: le champ magnétique réduit à la base

TD : taux de dérive

F : champ mesuré en instant quelconque, en nanotesla (nT) ;

t et ti : temps initial de mesure à la station de base, et temps de mesure à l'instant quelconque exprimé en minute (mn).

- **Correction IGRF**

L'IGRF (international geomagnetic reference fields) est une modèle mathématique de champ magnétique terrestre enregistré à des observatoires géomagnétiques ou des satellites à tous les points de la surface de la terre. Ce modèle consiste à donner le champ magnétique terrestre en

un point de la surface en fonction de temps, son altitude et sa position géographique (t, x, y et z) et régulièrement mis à jour.

Le potentiel magnétique permet de calculer le champ magnétique principal ou régional ou local ; le modèle est dans la formule ci-dessous :

$$U(r, \theta, \varphi, t) = \quad (15)$$

$$a \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{r}{a}\right)^n [q_n^m(t) \cos m\varphi + s_n^m(t) \sin m\varphi] P_n^m \cos \theta +$$

$$a \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos m\varphi + h_n^m(t) \sin m\varphi] P_n^m \cos \theta$$

Et on a : $\vec{B}_{pc} = \vec{\nabla}U(r, \theta, \varphi)$

D'où $\mathbf{Ba} = \mathbf{CMTrb} - \mathbf{Bpc}$ (16)

Ba : Champ d'anomalie magnétique

CMTrb: Champ magnétique total réduit à la base

Bpc: Champ magnétique principal (ou régional / local) calculé à partir du modèle de référence IGRF.

II-2-6-4 interprétation des anomalies magnétiques [9]

Dans le domaine spectral il est possible de traiter les données selon leurs énergies à chaque fréquence, plutôt que par leur valeur correspondante à la composante choisie ou leur position spatiale. On peut, par exemple, supprimer ou extraire des données de certaines fréquences, voire des ondes orientées dans une direction particulière.

Soulignons que la base des transformations repose sur le champ d'anomalie magnétique c'est-à-dire que la carte réduite au pôle est calculée à partir du champ d'anomalie magnétique. Les autres cartes : dérivée, signal analytique dérivent, par contre du champ réduit au pôle.

➤ Réduction au pôle

La carte de réduction au pôle se caractérise par le fait que les roches, sources des aimantations, se placent exactement à l'aplomb des bandes d'anomalies magnétiques observées. Avant que le filtre soit appliqué, l'influence du champ magnétique du noyau terrestre correspond au lieu du levé. Après que le filtre ait été appliqué, l'influence apparente du champ magnétique terrestre sur les données du levé sera la même qu'elle aurait été au pôle. On va travailler sur l'hypothèse que les données prélevées proviennent des sources directement au-dessous de la station. A cause de l'angle du champ magnétique, les sources des données ne seront pas, en effet situées directement au droit de la station.

L'amplitude de la réduction au pôle est définie par la formule suivante :

$$R_p = \frac{1}{[\sin I - i \cos I \cdot \cos(D + \theta)]^2} \quad (17)$$

- Avec
- R_p : Amplitude de la réduction au pôle ;
 - I : Inclinaison géomagnétique ;
 - D : Déclinaison magnétique ;
 - θ : Défaut d'amplitude d'inclinaison

Exemple de réduction au pôle pour une zone donnée :

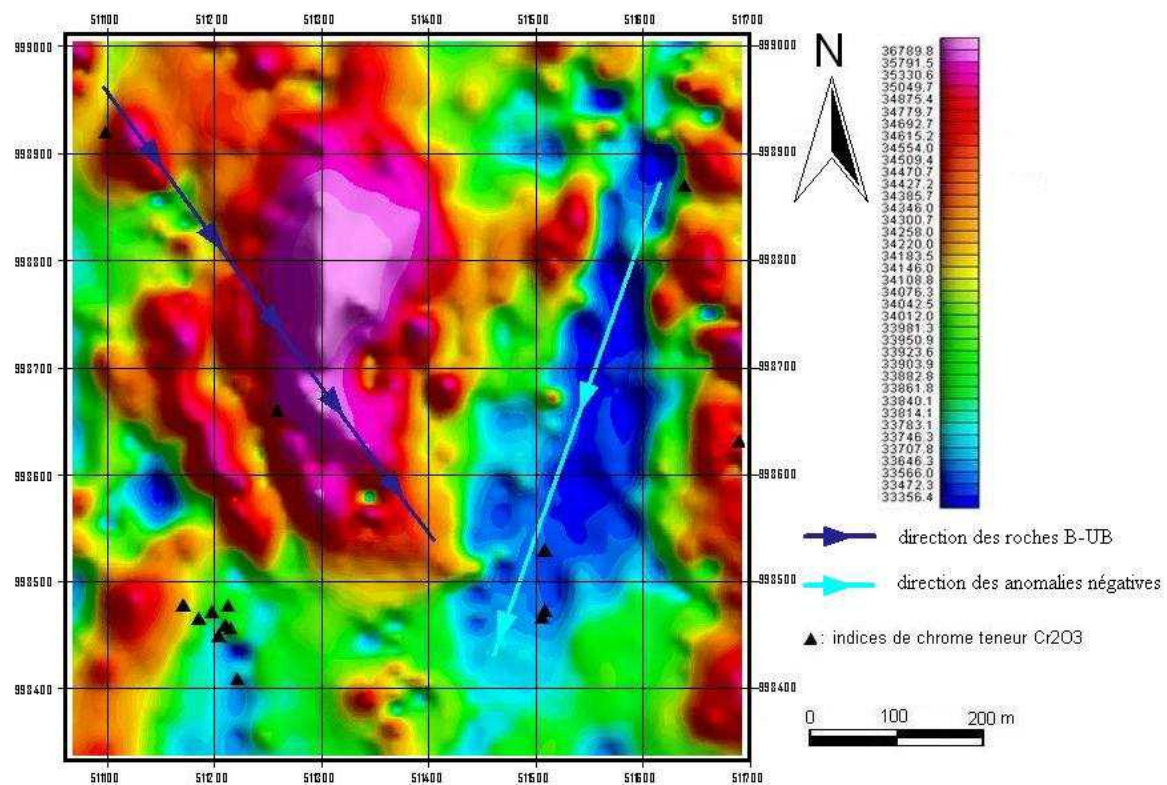


Figure 11: Carte d'anomalie magnétique [9] (R.R.Malala 2008)

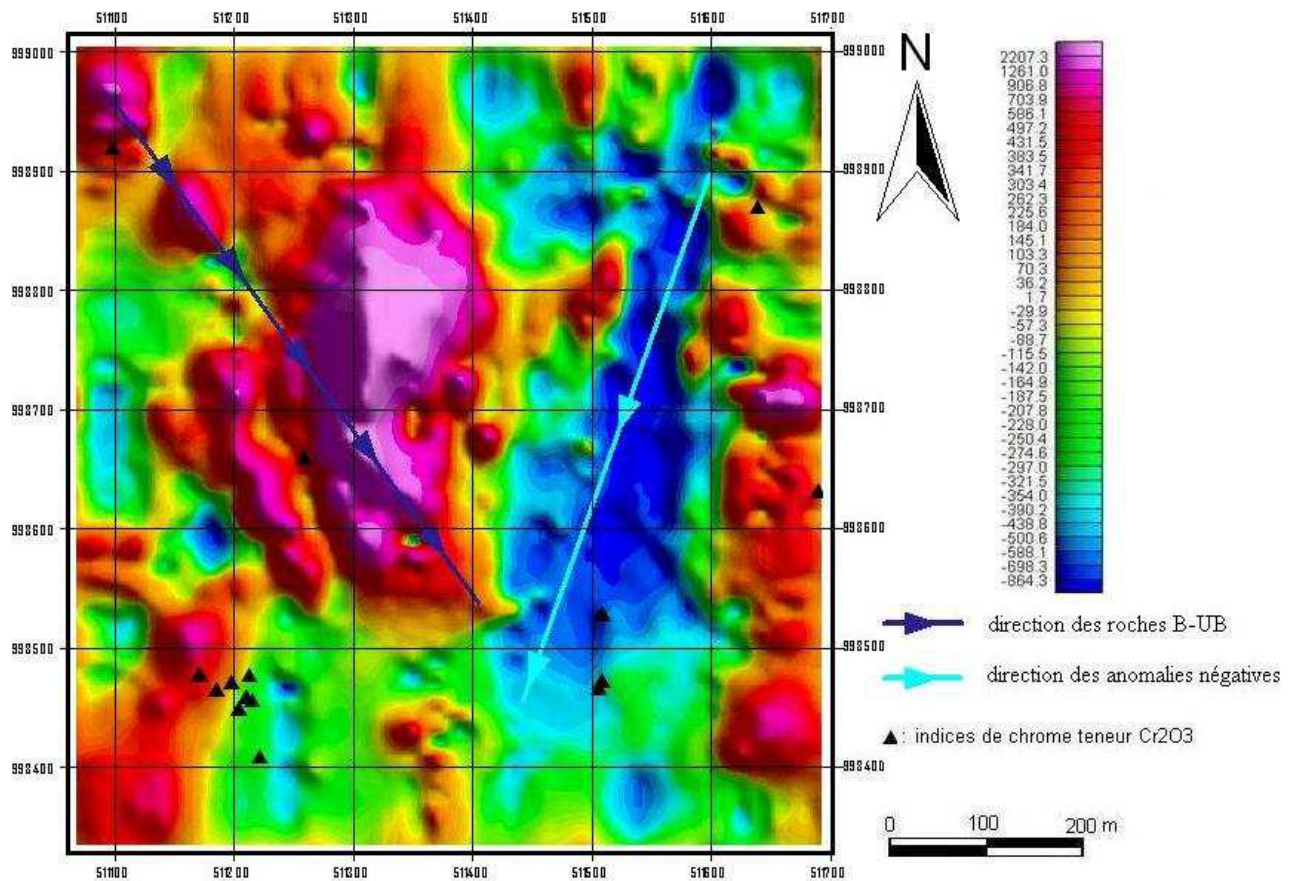


Figure 12: Carte d'anomalie magnétique réduite au pôle [9]

(Source : R.R.Malala 2008)

➤ Cartes des dérivées

Le calcul des dérivées des données d'un levé efface les informations non requises de basse fréquence et présente les bords des anomalies. Les zones levées qui n'ont pas d'anomalies n'affichent aucun changement en champ magnétique et ont, par conséquent, une dérivée (gradient) de zéro. Au bord d'une anomalie, les données changeront et le gradient sera non zéro. Une zone qui a un gradient non zéro délimitera ainsi clairement une anomalie. Les filtres des dérivées rehausseront aussi les structures magnétiques près de la surface, car ils changent plus fréquemment. La dérivée verticale est la dérivée de la transformée en fonction de la profondeur.

Le calcul théorique de la dérivée d'ordre p par rapport à l'altitude Z est donné par la relation suivante :

$$\varphi_h^{(p)} = \frac{\partial^p}{\partial Z^p} \varphi(x, y, z) \quad (18)$$

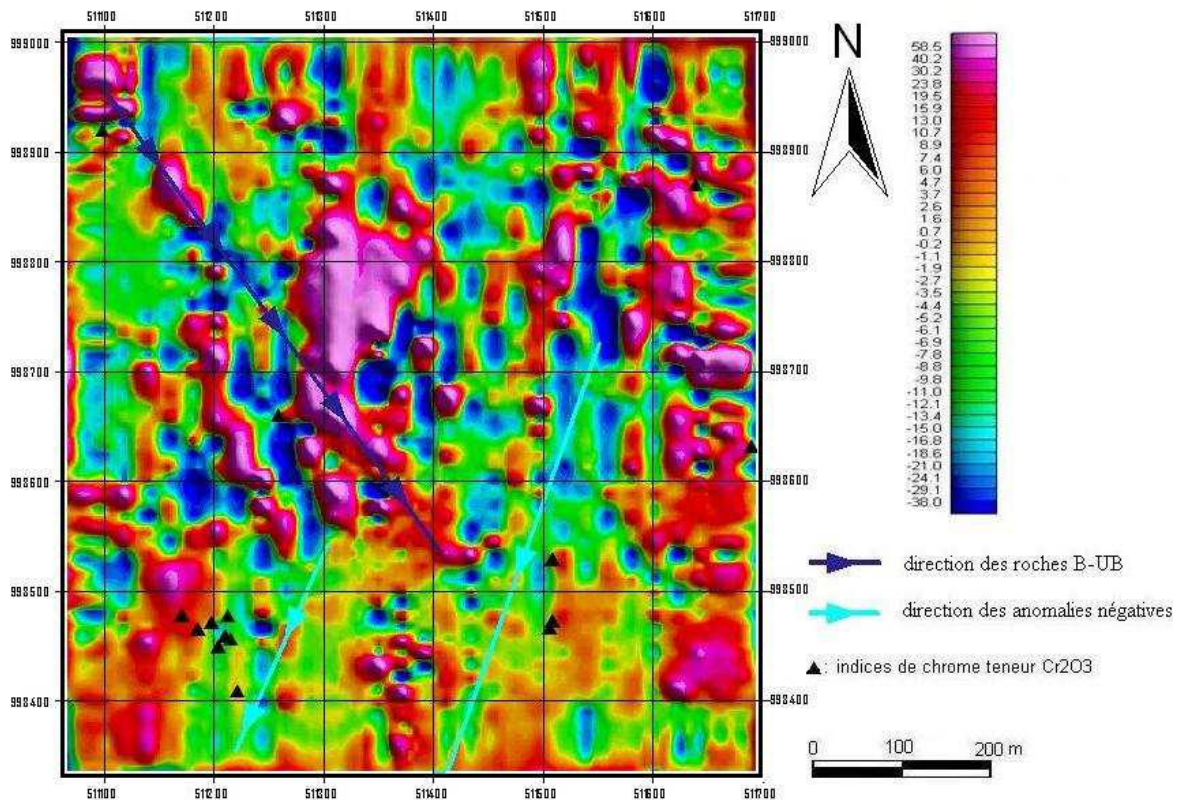


Figure 13: Carte du gradient vertical au 1/1000 [9]

(Source : R.R.Malala 2008)

➤ *Signal analytique*

Nabighian (1972, 1984) a développé la notion de signal analytique, ou l'enveloppe, des anomalies magnétiques. La caractéristique importante du signal analytique est qu'il est indépendant de la direction d'aimantation de la source quand on sait que le champ magnétique est un vecteur dont la direction et l'intensité varient en fonction du temps et du lieu d'observation. L'amplitude du signal analytique est simplement liée à la valeur de l'aimantation.

Le filtre du signal analytique passe par les étapes suivantes :

- le calcul de trois grilles de dérivée séparées dans le domaine spectral, c'est-à-dire les dérivées horizontales pour 'X' ou 'Est', 'Y' ou 'Nord' et la première dérivée verticale (suivant Z)
- la transformation de ces fichiers (*.grd) intermédiaires dans le domaine spatial

Dans le domaine spatial, la combinaison des trois grilles de dérivée pour produire la grille de sortie du signal analytique. Le signal analytique est défini par :

$$f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2} \quad (19)$$

où :

f : valeur de la cellule de la grille

$\frac{\partial f}{\partial x}$: Première dérivée horizontale avec azimuth égal = 0

$\frac{\partial f}{\partial y}$: Première dérivée horizontale avec azimuth égal = 90

$\frac{\partial f}{\partial z}$: Première dérivée verticale

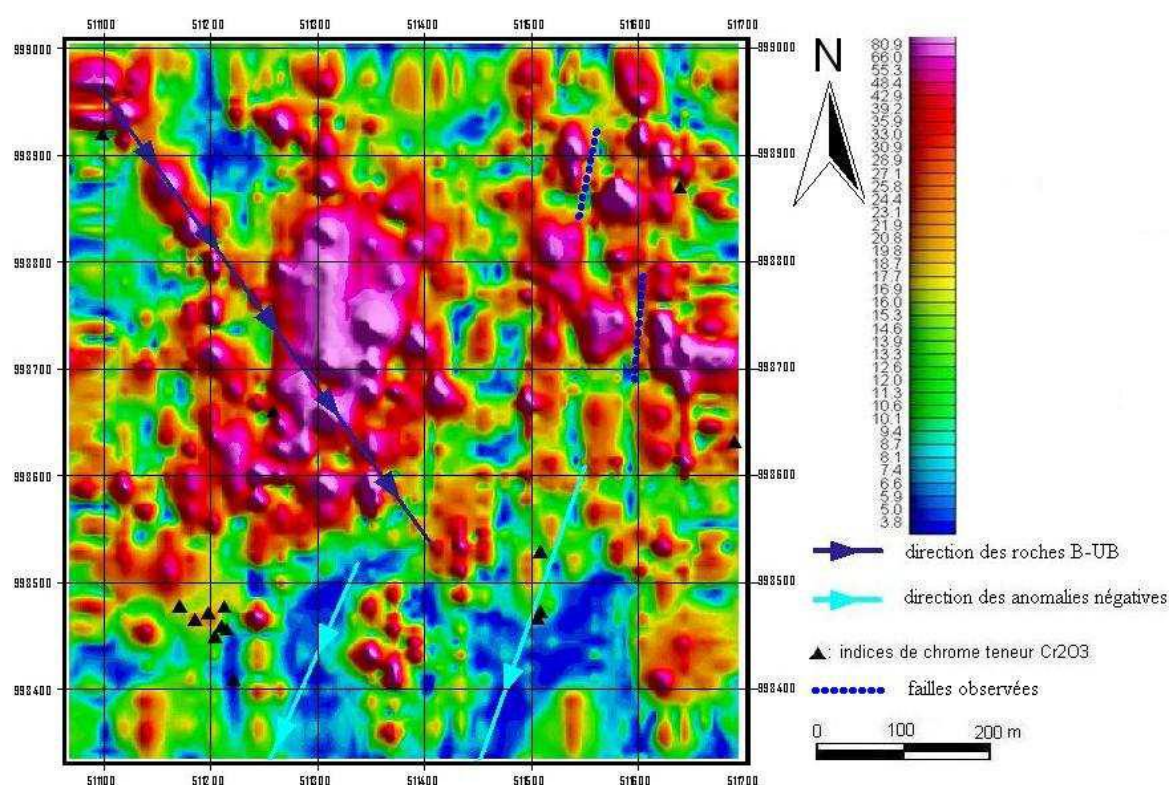


Figure 14: Carte du signal analytique [9] (Source : R.R.Malala 2008)

II-2-6-5 Avantages et inconvénient de la prospection magnétique

La méthode magnétique a ses avantages et ses inconvénients. Comme on utilise le champ magnétique terrestre, la méthode magnétique a l'avantage de cette source naturelle.

Elle est rapide, peu couteuse, légère et permet une grande couverture en surface. La méthode magnétique permet aussi de faire des prospections même à des endroits difficiles accès car on peut faire une prospection magnétique aéroportée.

Il est impossible d'évaluer les possibilités économiques d'un gisement en se basant sur les données magnétique seules, en effet ces données sont à compléter avec d'autre type de technique, comme le gamma spectrométrie.

II 3 GAMA SPECTROMETRIE

Historiquement la spectrométrie est utilisé depuis l'année 1970, en ce moment les données spectrométrie est nécessaire pour la cartographie géologique, les minières. La spectrométrie aéroportée est une technique de prospection qualitative pour la prospection minière.

II 3-1 Principe

Cette méthode consiste à mesurer le taux de concentration absolue et relative de tous les radioéléments naturels par l'analyse des spectres émis des éléments Potassium (K), Uranium (U) et Thorium (Th). Malgré l'existence de nombreux éléments radioactif, seuls le Thorium, Uranium et Potassium ont des radio-isotopes qui génèrent un rayonnement gamma d'une énergie et intensité suffisante et peut être mesuré à une altitude de levé aéroporté. [4]

Moins souvent, mais de façon notable dans certaines circonstances, les anomalies radiométriques permettent le détecter des structures de minéralisation de Au, Ag, Hg, CO, Ni, Bi, Cu, Mo, Pb et Zn, soit parce qu'un ou plusieurs radio éléments y sont présents à l'état de trace, soit parce que le processus de minéralisation a modifié les rapports isotopiques des radioéléments du milieu. L'acquisition de donnée spectrométrie est faite à l'aide de même aéronef que la magnétométrie.

II 3-2 Matériel utilisé

Les équipements utiles pour effectuer les levées spectrométriques aéroportées sont un aéronef équipé d'antenne GPS. Une caméra vidéo, d'un spectromètre de type Exploranium GR-820. Un spectromètre gamma aéroporté moderne est un instrument de précision complexe qui se charge de plusieurs taches dans les conditions exigeantes d'un vol à basse altitude.

Le support des sources radioactives utilisées pour les étalonnages quotidiens et ce, dans le but d'assurer que la sensibilité du système spectrométrique ne change pas de manière exagérée lors des levés, des blocs de cristaux qui se trouvent dans le ventre de l'aéronef (pour capter les rayonnements) et le système spectrométrique qui est constitué de détecteurs et d'un spectromètre.

II 3-3 Traitement de données spectrométriques [4]

Le but de traitement de donnée spectrométrie est de faire disparaître tous les sources qui ne correspondent à la géologie structurale, le rayonnement gamma d'origine géologique qui nous intéressent et puis nous traduisons les spectres observé en concentration des radioéléments (K, U, Th). Ensuite les données corrigées sont converties en valeur de concentration terrestre de potassium, d'uranium et de thorium. Finalement, mettre en grille les données par la méthode d'interpolation en appliquant l'algorithme de grande gamme. L'organigramme ci-dessous résume l'étape de traitement pour les données spectrométries :

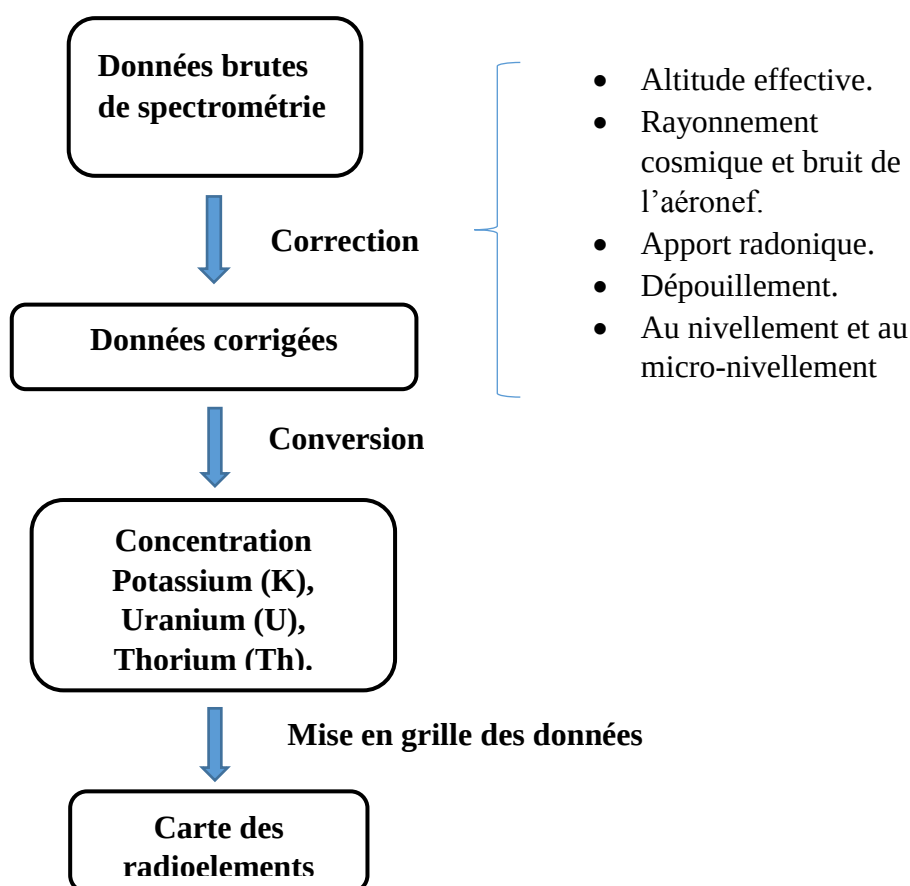


Figure 15: Organigramme de traitement des données spectrométrique aéroportées

- **Carte ternaire**

La carte ternaire est obtenue par les variables mesurés (Th, K, U), elle résume les cartes de trois radioéléments en une seule carte composite, le traitement est fait avec le logiciel ENVI en choisissant une composition colorée RVB (rouge, vert, bleu) ou CMY (cyan, magenta, yellow).

II-4 PRESENTATION DE LOGICIELS DE TRAITEMENT

Durant la réalisation de ce présent mémoire, nous avons besoin des logiciels de traitement pour les données magnétiques, spectrométrique, les images satellites et la superposition d'image. Dans la suivante, on donne quelque définition sur les logiciels Arcgis, ENVI et oasys montage.

II 4 1 Arc GIS 9.3

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques dans tous les domaines : au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque. Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web, d'appareils mobiles tels que des smartphones et d'ordinateurs de bureau.

Il contient 3 interfaces :

- Arc catalog
- Arc Map
- Arc toolbox

II 4 2 Logiciel ENVI

Envi est un logiciel professionnel permettant la visualisation, le traitement, l'analyse, et la présentation de nombreux types d'images numériques dont les images satellites.

L'Envi permet de travailler sur différents types de données (multi spectrale, hyper spectrale, radar), et permet de contraster les images et les corriger géométriquement entre les images.

Envi utilise le langage IDL

- **Les interfaces dans l'ENVI :**

Il est composé de 2 interfaces viewer indépendants : « envi » et « envi zoom »

- **ENVI** : donnant accès à toutes les fonctionnalités
- **ENVI ZOOM** : version simplifier de l'envi spécialement conçue pour manipuler plus facilement les images satellites (outil de zoom, contraste, transparence, brillance,)

- **L'interface d'ENVI Zoom et exploration d'images**

L'interface d'ENVIZoom s'organise de la manière suivante :

- Le **viewer principal** : visualisation des données géographiques qui sont activées dans l'onglet « Layer Manager » du panneau latéral.
- Les **barres de menus et d'outils** : accès aux fonctionnalités d'ENVI Zoom

II 4 3 Oasis Montaj 6.4.2 :

Geosoft Oasis Montaj est une plateforme permettant de travailler avec un grand volume de données localisées dans l'espace et offre les fonctionnalités requises afin de gérer, manipuler, visualiser et cartographier les données géoréférencées dans le domaine des sciences de la terre (magnétométrie, spectrométrie gamma, gravimétrie, géochimie). Geosoft présente les avantages suivants :

- capacité de traiter un grand nombre de lignes.
- capacité de gérer des lignes avec un nombre illimité de champs (ou colonnes).

Pour toute la suite, nous nous référons à la version Geosoft Oasis Montaj 6.4.2.

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATION

Dans le dernier chapitre, nous représentons les données acquises lors de la prospection magnétique et les interprétons en comparant avec la géologie de la zone d'étude et ainsi pour les données spectrométriques. Dans les cartes suivantes, nous ne pouvons pas donner les coordonnées géographiques.

III-1 PRESENTATION DES DONNEES

Les données utilisées sont de caractéristique suivantes :

Les Images satellites sont des images de LANDSAT ETM de scène LC81590722016121LG N00 et en 2016.

Les données magnétiques et gamma spectrométrique sont acquies lors de levé magnétique de Frugo ltd airborne surveys en années 2005 dans le Projet de Gouvernance des Ressources Minière (PGRM), Les données sont corrigées de CRIG avec de prolongement vers le bas de 200 m.

III-2 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III-2-1 Résultat et interprétation des travaux effectués en télédétection

Des images brutes LANDSAT (image multi spectrale) ont été traitées dans cette discipline. Au terme du traitement proprement dit, on a deux traitements possibles: la classification et la composition colorée mais nous traitons uniquement la composition colorée dans notre étude. L'image obtenue est ensuite exportée vers le logiciel Envi en vue de l'élaboration des cartes et pour les différentes superpositions.

Le traitement des images satellites met en évidence les différentes composantes géologiques de la zone notamment les réseaux hydrographiques, les linéaments, les déformations tectoniques (cassantes et souples). Tous les traitements ont été réalisés avec le logiciel Envi.

III-2-1-1 Rehaussement de l'image

Avant la composition colorée, l'image doit passer au rehaussement. Il a pour but d'améliorer la qualité visuelle de l'image afin de faciliter son interprétation. Il est effectué en réalisant l'étalement de l'histogramme des teintes.

L'étalement de l'histogramme vise à redistribuer les spectres en 256 teintes et à les ramener à une distribution normale.

La comparaison de l'image TM3 brute et l'image TM3 corrigée montre que les images corrigées sont nettement claires et présentent moins de bruit.

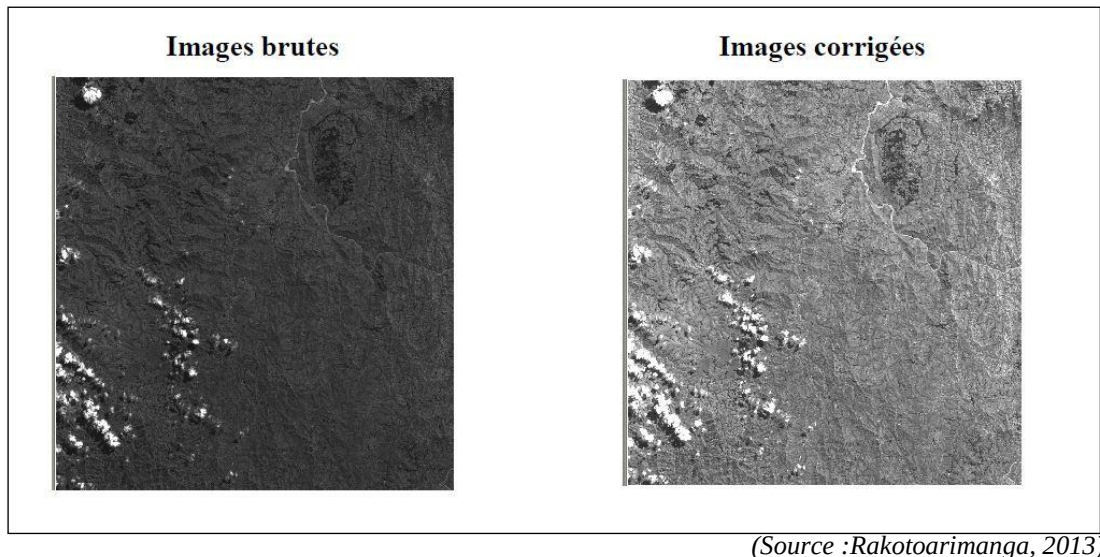


Figure 16: Image de l'étalement

III-2-1-2 Composition colorée

Trois images numériques d'une même scène acquise sous trois bandes spectrales différentes seront attribuées chacune aux couleurs primaires : rouge, vert et bleu. Chacune de ces trois couleurs primaires affecte différemment les trois images préalablement améliorées. La fusion de ces trois images numériques en une seule s'appelle la « composition colorée ». L'image de fusion permet de mieux faire ressortir certains caractères ciblés de la scène.

La sélection des trois canaux spectraux se fait en fonction des objets voulus car le :

- Le canal 1 révèle mieux les teintes naturelles,
- Le canal 2 est sensible aux matériaux métalliques,
- Le canal 3 révèle les déformations et les discontinuités,
- Le canal 4 est sensible aux oxydes de fer,
- Le canal 5 révèle l'eau des sols et la végétation
- Le canal 6 est sensible aux contrastes entre roches silicatées et non silicatées,
- Le canal 7 est un bon discriminant des roches.

Dans notre cas, on va produire une image de "couleur vraie" : les bandes 3, 2et 1 peuvent être attribuées respectivement au couleur rouge, vert et bleu. La figure ci-dessous nous montre les résultats obtenus, dans laquelle on superpose les indices aurifères et les différentes structures majeurs.

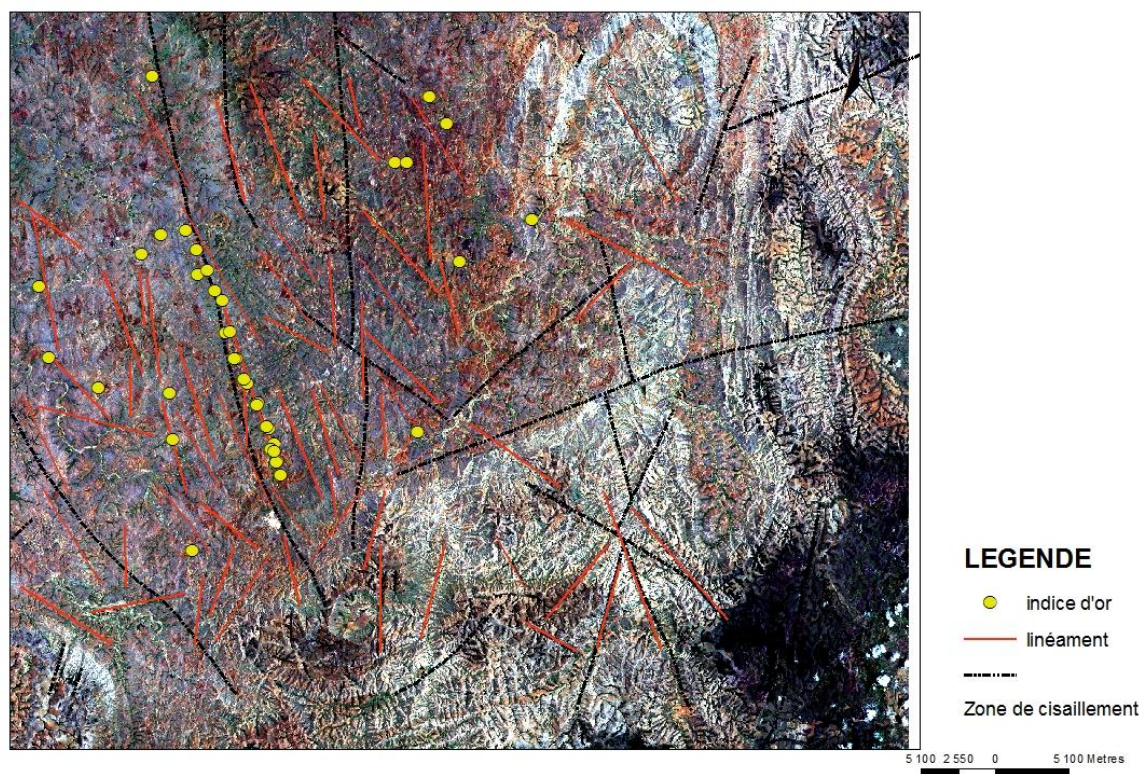


Figure 17 : Photo-interprétation de composition RGB(321)

La photo-interprétation des images est fondée sur deux descripteurs principaux : le spectre, qui détermine la teinte ou la couleur des objets, qu'elles soient visibles directement ou artificiellement et la morphologie accessible en deux dimensions. Il s'agit de la forme des objets et de leur mode dominant, de leur type, de leur taille, de leur orientation. Le but du traitement est ici de tracer les structures observées telles que les linéaments interprétés comme des déformations structurales cassantes et souples.

« Hunting » pour ses travaux structuraux antérieurs, il trouve deux directions majeures qui sont le N150 et le N135, et nous avons découverts des nouveaux linéaments d'après les traitements des images. Nous avons récapitulés dans un tableau sous forme de somme d'envergure pour chaque direction de linéaments ces données.

Tableau 12: Direction majeur des linéaments observés

Direction des linéaments	N30	N45	N60	N90	N120	N135	N150	N180
Envergure (m)	7000	6000	6000	0	10000	12000	15000	4000

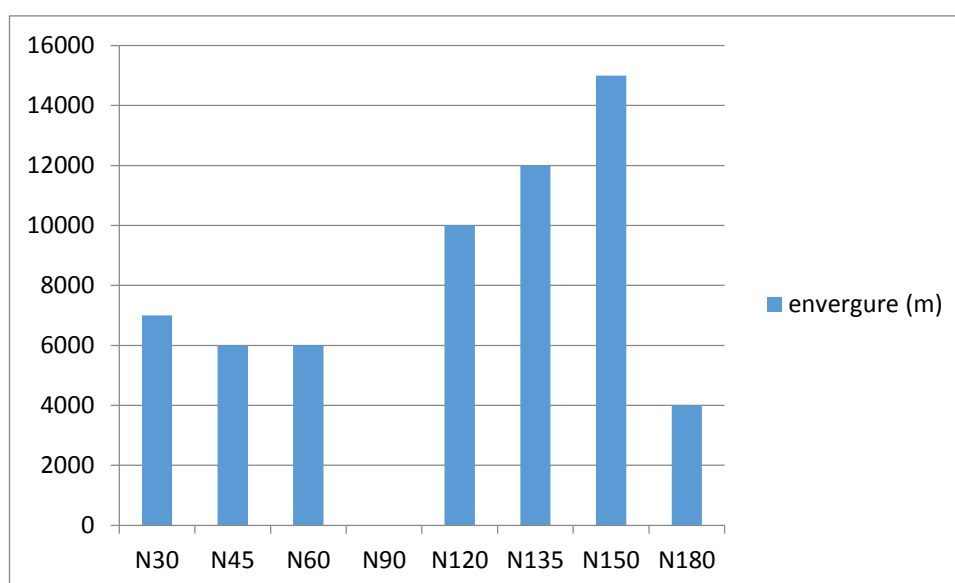


Figure 18: Diagramme de répartition des linéaments

L'image composite présente deux teintes bien nettes et distinctes : la teinte claire et la teinte sombre. Ces teintes peuvent s'interpréter comme indicateur du type de relief et des informations concernant la géologie d'une zone.

La teinte claire peut interpréter comme indicateur des parties de haute altitude, plus de 1200 m d'altitude dans notre zone d'étude, comme dans les deux zones montagneuses aux alentours de Antanambao pour la partie Nord Est et aux alentours d'Anosiboribory dans la partie Sud Est de la zone d'étude. Elle est formée en majeure partie par le gneiss migmatitique et par le granite et migmatite.

Une teinte moyennement claire, reflète un grand linéament des couches géologiques quasi-parallèles à la direction N150, occupait la partie centrale de la zone d'étude. Elle correspond à l'ensemble de couche géologique regroupé dans le groupe de de gneiss enderbetique.

La teinte sombre nous relate la plaine où on rencontre les végétations plus ou moins dense et plus souvent des forêts. Elle domine dans la partie Nord centrale aux environs Est du village d'Andranganala.

Les indices aurifères se concentrent dans les teintes quasiment claire et sombre, autrement dit dans la partie à basse altitude et de nature géologique alluvionnaire. Par conséquent, dans la majorité des cas le prospect aurifère est de nature secondaire, plus précisément, de type alluvionnaire.

III-2-2 Résultat et interprétation de données magnétiques

L'interprétation de données magnétiques se comporte sur deux parties : l'interprétation qualitative et interprétation quantitative.

L'interprétation qualitative consiste à tirer le maximum d'information à partir d'une observation de la carte magnétique, elle est fondée sur l'examinations de l'allure de l'intensité de l'anomalie obtenus. Tandis que l'interprétation quantitative permet de localiser le sommet de la cible ou la profondeur de la cible. Dans cette étude, une interprétation qualitative a été faite afin d'en tirer le maximum d'informations sur les gisements.

Les cartes suivantes sont obtenues à partir de données obtenues lors de levé aéroporté par fugro en 2005 et traite avec le logiciel de Geosoft, Oasis Montaj. Durant l'interprétation, on tient compte la géologie et les formations qui le composent et les traits structuraux observés de la zone.

Les différentes cartes que l'on traite sont : la carte d'anomalie magnétique, la carte réduite au pôle et la carte du gradient vertical, ces cartes ont la propriété de focaliser les anomalies autour des corps perturbateurs et d'atténuer les effets régionaux du champ et la carte du signal analytique.

III-2-2-1 Anomalie magnétique réduit au pôle

Le champ réduit à la base est obtenus à partir de champ magnétique total après avoir enlevé la variation temporelle de champ magnétique. L'intensité de champ magnétique varie de 33493nT à 34136nT.

L'anomalie magnétique réduit au pôle est obtenu à partir de l'anomalie magnétique total, il se caractérise par le fait que les roches, sources des aimantations, se placent exactement à l'aplomb des bandes d'anomalies magnétiques observé.

L'IGRF en année 2005 dans la zone d'étude est de Déclinaison magnétique égal à -13.707 degrés et d'Inclinaison magnétique égal à -51.255 degrés. La carte ci-dessous nous montre la superposition de la carte réduction au pôle et la géologie de la zone.

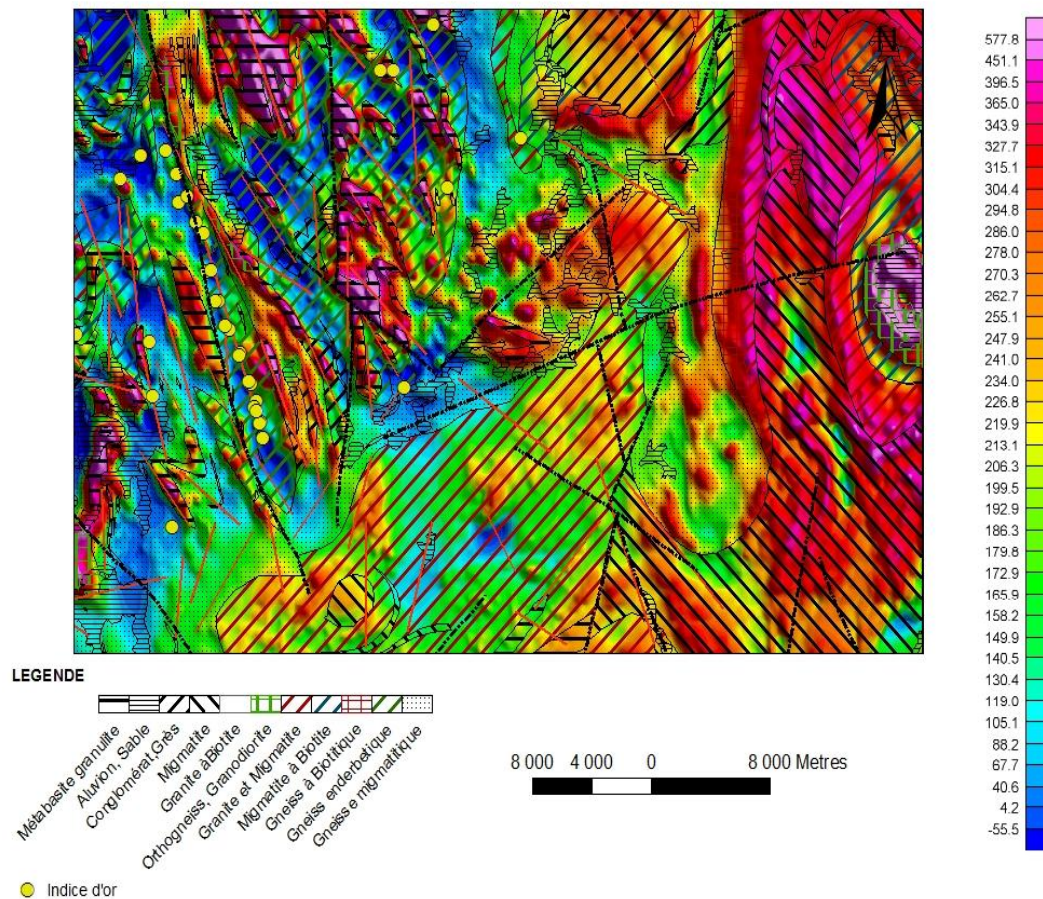


Figure 19: Carte réduite au pôle superposée à la carte géologique

(Source : extrait géologique PQ 44 FTM)

Cette carte montre trois zones d'anomalies magnétiques différentes. Tout d'abord, les zones d'anomalies faiblement magnétique, des couleurs allant du bleu au vert, se trouve au Nord-Ouest de la zone d'étude, caractérisées par la formation géologique de gneiss migmatitique.

Les zones d'anomalies moyennement magnétiques représentées par les couleurs allant du jaune au rose se trouvent au centre et Sud sur le fond géologique par le conglomérat et grès.

Les zones d'anomalies fortement magnétiques indiquées par les couleurs rouge à violet se trouvent à l'Est et à l'Ouest de la zone d'étude dans laquelle les filons décrivent une direction NW-SE, et à l'Est, ce champ est généré par le groupe de formation de migmatite et granite, dont le taux de la magnétite est élevée.

III-2-2-2 Carte du gradient vertical

La carte de gradient est obtenue à partir du champ d'anomalie réduit au pôle. Les filtres des dérivées rehausseront aussi les structures magnétiques près de la surface et élimine les sources en profondeur.

III-2-2-2 Carte du gradient vertical

La carte de gradient est obtenue à partir du champ d'anomalie réduit au pôle. Les filtres des dérivées rehausseront aussi les structures magnétiques près de la surface et élimine les sources en profondeur.

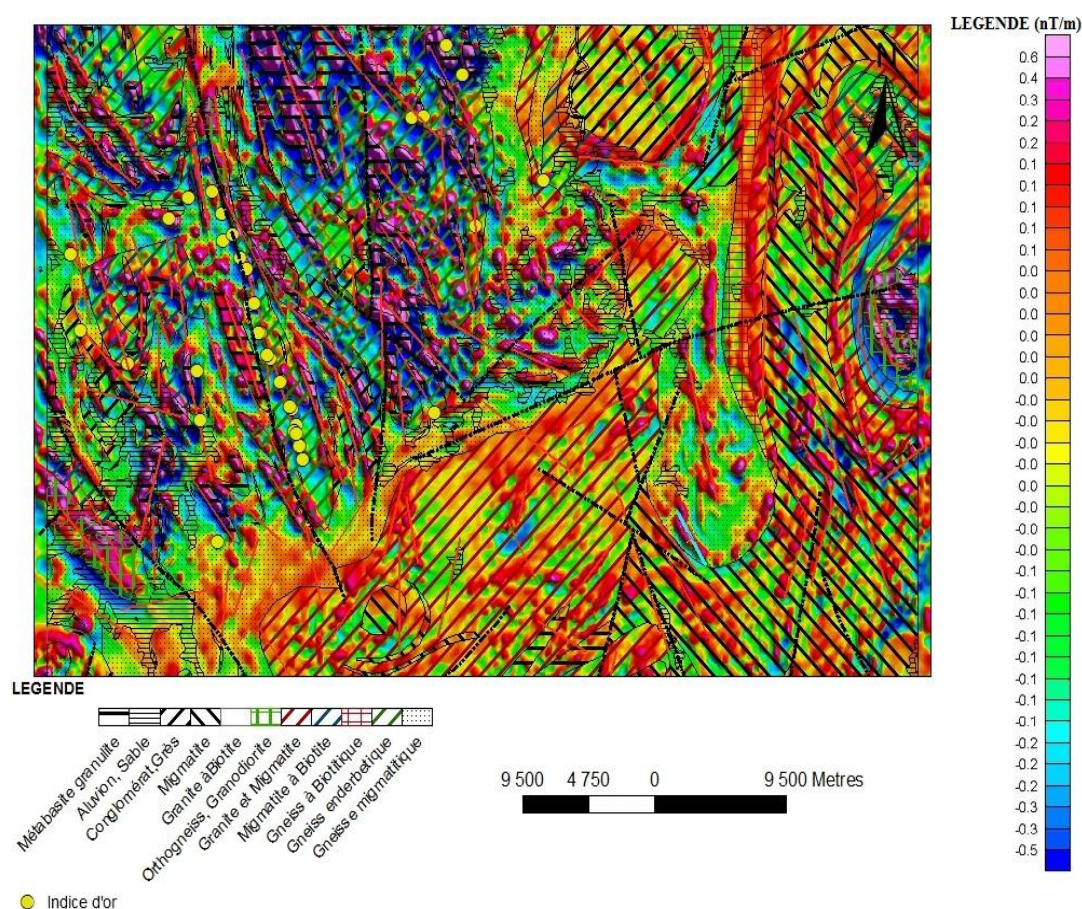


Figure 20: Carte de gradient vertical superposée à la carte géologique

(Source : extrait géologique PQ 44 FTM)

Le gradient vertical de champ magnétique varie de -0.5 nT/m à 0.6 nT/m. La zone à gradient positif de valeur comprise entre 0 nT/m à 0.6 nT/m représentée par la couleur allant du jaune au violet se repartie à l'Est, au Sud et se forme de filon au Nord-Ouest de la zone d'étude, peuvent être caractérisé par le metabasite granulite et l'orthogneiss granodiorite. La zone à gradient négatif de valeur comprise entre -0.5 nT/m à 0 nT/m, représenté par

les couleurs allant du bleu au vert se trouve dans la partie NW et à l'Est de la zone d'étude, peuvent être caractérisé par la formation des alluvions et sable, des conglomérats et grès.

III-2-2-3 Carte du signal analytique

Le signal analytique est obtenu à partir du champ d'anomalie réduit au pôle. La caractéristique importante du signal analytique est qu'il est indépendant de la direction d'aimantation de la source quand on sait que le champ magnétique est un vecteur dont la direction et l'intensité varient en fonction du temps et du lieu d'observation. L'amplitude du signal analytique est simplement liée à la valeur de l'aimantation.

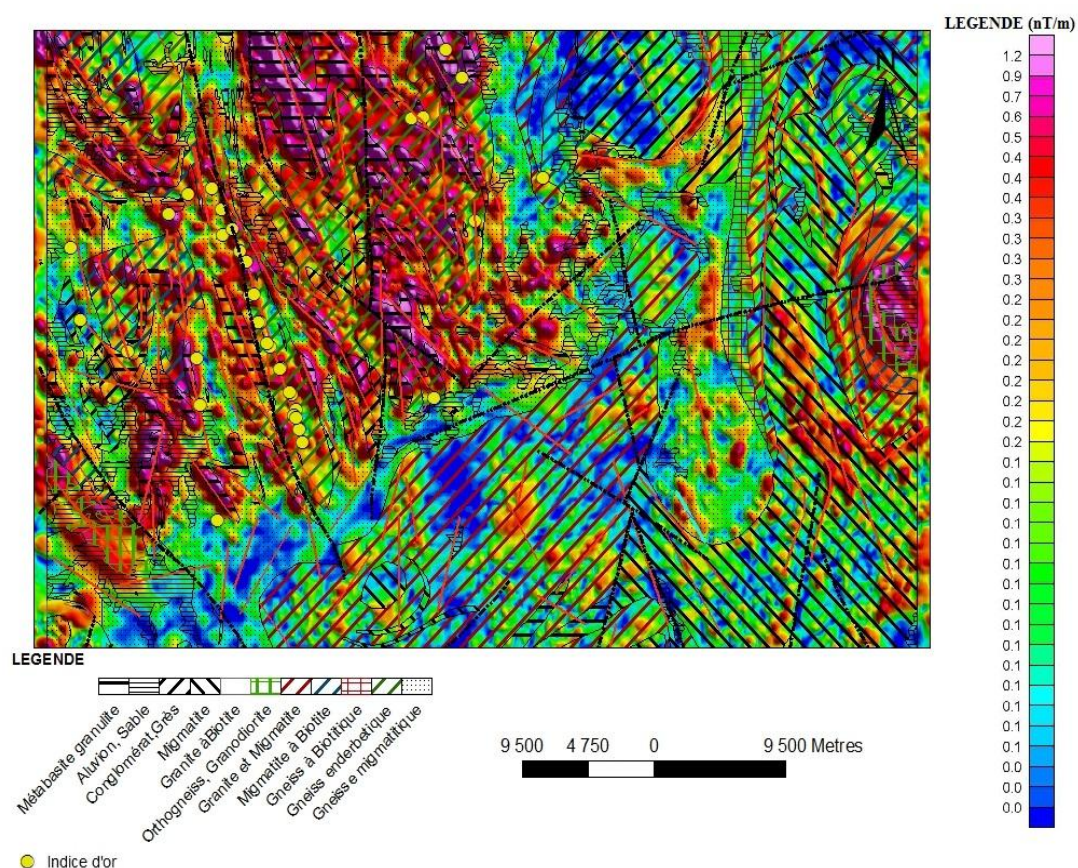


Figure 21: Carte du signal analytique superposée à la carte géologique
(source : extrait géologique PQ 44 FTM)

Le fort gradient représenté par la couleur allant rouge au violet, se trouve dans la partie Nord-Ouest la zone d'étude, il est caractérisé par des formations de metabasite granulite, de orthogneiss granodiorite. Deuxièmement, le faible gradient indiqué par la couleur allant du bleu au rose se trouve dans la partie Est et Sud de la zone d'étude, il est caractérisé par les formations de gneiss migmatitique, de granite. Les indices d'or sont

localisés sur les formations des gneiss enderbétique, migmatite à Biotite et des alluvions et sables. On pourrait en déduire de nouveau indice d'or dans la partie Nord et NW de la zone d'étude en suivant la direction NW-SE.

III-2-3 Résultat et interprétation des données spectrométriques

On prend une à une les cartes spectrométries qu'on a obtenues. Cartes du taux de Thorium, Uranium et de Potassium et on la termine avec la carte ternaire. Notons que l'interprétation géologique des différentes signatures des cartes est basé surtout sur la carte géologique existante et les travaux géologiques suivant des études antérieures.

III-2-3-1 Carte du taux de Thorium

Cette carte montre sept coloration différentes: violette, rouge, orange, jaune, indigo, bleu ciel et bleu marine qui représente les différentes gammes de concentration de Thorium.

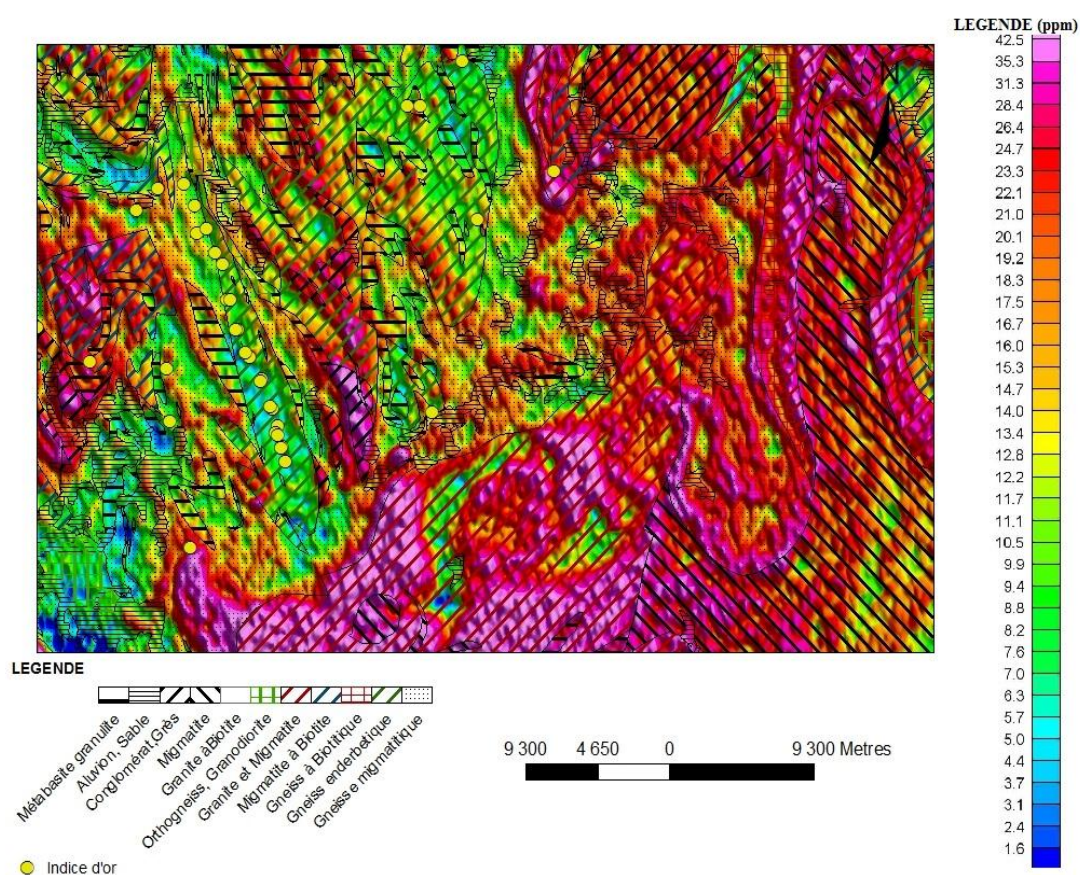


Figure 22: Carte équivalent thorium superposée à la carte géologique

(Source : extrait géologique PQ 44 FTM)

On voit une forte concentration en Thorium (supérieure à 25ppm) sur le long de la partie Est, tandis que, dans la partie Sud cette forte concentration est très discontinue. Cette forte concentration en Thorium fait partie géologiquement de nature granite et de migmatite, elle représente la partie à haute altitude qu'on a identifié en photo-interprétation.

III-2-3-2 Carte du taux de Potassium

Le taux de concentration de potassium est faible par rapport au thorium, il est inférieur à 3.3 ppm dans toute la zone d'étude. La forte concentration marqué par le couleur allant jaune au violet se trouve au centre et dispersée à l'Ouest, due à l'altération de granite et migmatite. La faible concentration se situe dans le SE correspond à de couche de migmatite.

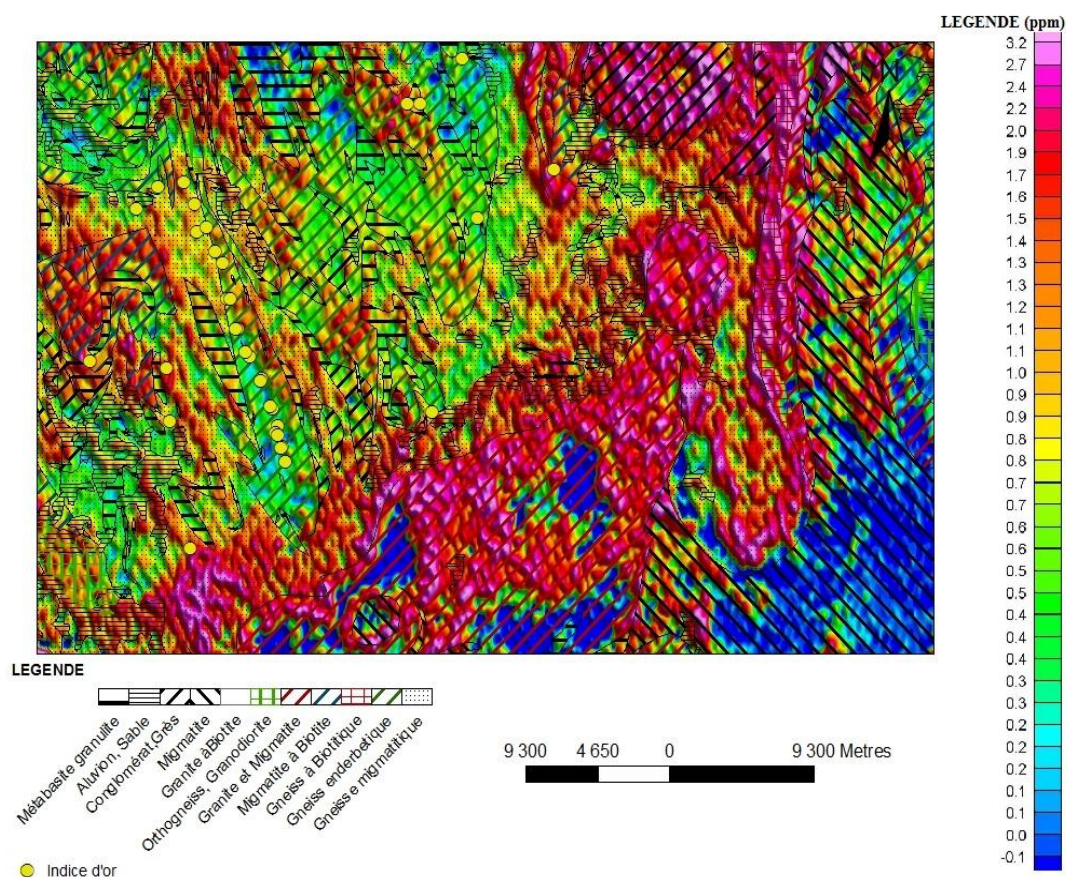


Figure 23: Carte équivalent potassium superposée à la carte géologique

(Source : extrait géologique PQ 44 FTM)

III-2-3-3 Carte du taux de Uranium

On a encore les sept couleurs qui représentent les différentes gammes de concentration. La répartition de couleur dans cette carte est presque la même que celle de Thorium. Mais ce qui différencie la partie Sud qui se diversifie et la couleur bleu laisse des trait suivant de direction Ouest – Est.

On constate également que la gamme de valeur d'Uranium est plus faible par rapport au gamme de valeur de Thorium. Ici des formation de groupe de granite et migmatite qui favorise la forte concentration, et des gneiss pour la concentration faible.

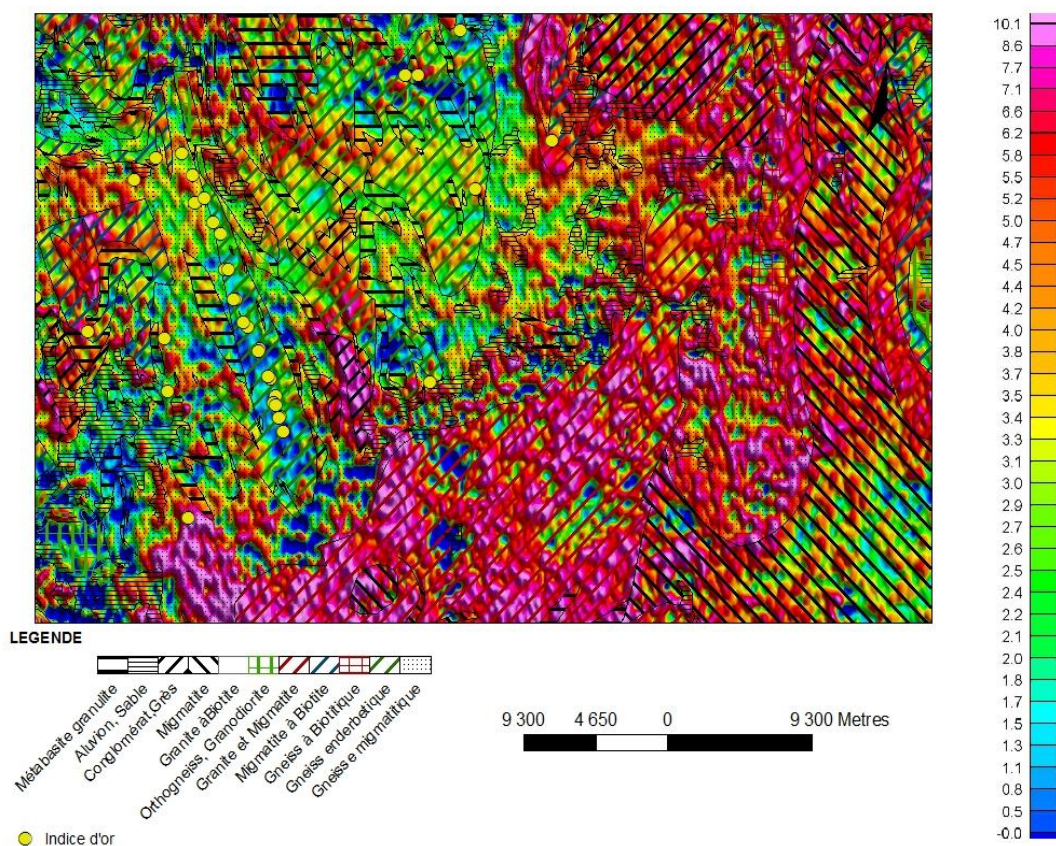


Figure 24: Carte équivalent uranium superposée à la carte géologique

(Source : extrait géologique PQ 44 FTM)

III-2-3-3 Carte ternaire

La carte ternaire résume la présence simultanée des trois radioéléments, c'est-à-dire que si on veut connaître les zones à forte concentration en Uranium ou en potassium ou encore en Thorium, ou considérer les rapports des trois éléments. Principalement, on doit

avoir trois couleur : la couleur rouge représente l'Uranium, le vert celle du Thorium et le bleu celle du potassium. Mais entre le rouge et le vert on a la couleur jaune qui nous dit qu'il y a équilibre de Thorium et de l'Uranium dans cette jaune, la couleur violet celle de l'Uranium avec le Potassium et la couleur bleu ciel du Thorium avec le Potassium.

Donc la couleur blanche traduit qu'il y a équilibre des trois radioéléments dans la zone. La couleur sombre indique que les trois radioéléments sont faibles dans cette zone.

On peut subdiviser la zone d'étude selon sa couleur en quatre secteurs :

- Secteur 1 : le secteur central qui s'allonge du Sud au Nord, on voit en forte équilibre de l'Uranium avec le Potassium qui est représentée par la couleur violet. Géologiquement il correspond à des alluvions sableux et de gneiss migmatitique.
- Secteur 2 : caractérisé par la couleur jaune et localiser aux deux endroits, l'extrême Sud de la zone, cela veut dire l'équilibre de l'Uranium et de Thorium et ce qui correspond aux couches de gneiss migmatitique et de granite migmatitique.
- Secteur 3 : caractérisé par la couleur blanche qui correspond l'équilibre des trois éléments, elle s'allonge également le long de la partie Est et le Sud de la zone correspond au couche de granite et migmatite.
- Secteur 4 : caractérisé par la couleur sombre qui indique que les trois éléments sont à faible teneur et on le voit surtout la partie Est de la zone, ce qui constitue essentiellement le granite.

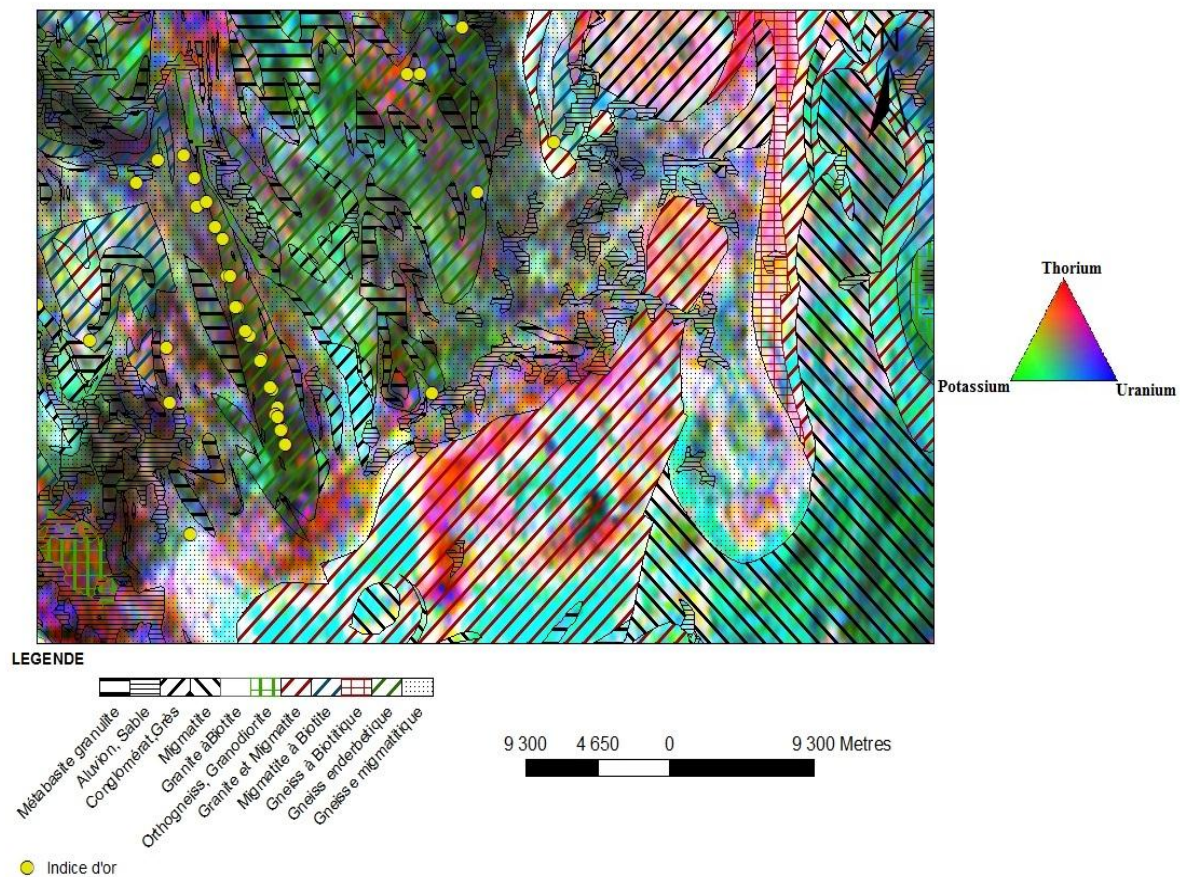


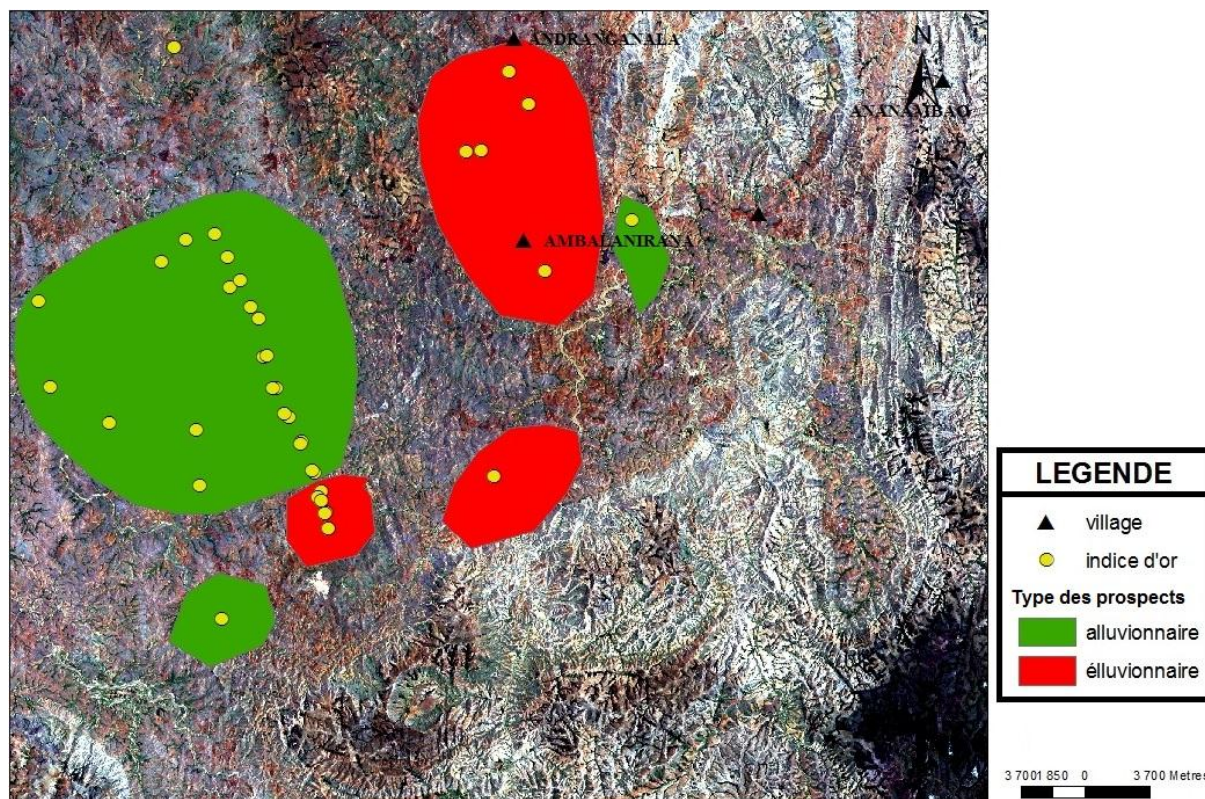
Figure 25: Carte ternaire superposée à la carte géologique

(Source : extrait géologique PQ 44 FTM)

III-3 SYNTHESE DES RESULTATS

Les résultats obtenus durant l'interprétation des différentes cartes : les cartes magnétiques, cartes spectrométriques et la télédétection donne que la plupart des indices d'or sont situés dans les zones faiblement magnétiques et fortement magnétique et de forte concentration d'Uranium, de basse et moyenne altitude, dans les formations de gneiss enderbetique, d'alluvion et sable, de migmatite à biotite. Au Nord centre, les indices d'or se repose sur la zone de formation de forte aimantation représenté par la couleur violet dans les trois cartes de la réduction au pôle, GV et SA, et à forte concentration en Uranium, caractérisé par la formation de gneiss enderbetique, il est intéressant pour le prospect aurifère. On trouve deux types de gisement d'or sur la zone d'étude : le gisement éluvionnaire se situe au Nord centre, et de gisement alluvionnaire dans la partie Nord-Ouest et à l'Est de la zone d'étude, on pourrait en déduire des nouveaux indices d'or de type secondaire suivant les directions de

linéament. Nous résumons sur la figure ci-dessous les différents types de gisement dans la zone d'étude.



(Source : image satellite de composition 321)

Figure 26 : Carte de synthèse

En tout, ce travail nous permet de localiser trois prospects aurifères d'origine alluvionnaire et trois autres prospects aurifères d'origine éluvionnaire. La zone d'Andranganala et ses environs immédiats constitue une zone très intéressante,

CONCLUSION

Cette étude nous permet de voir la délimitation de zones probables potentielles des prospectes aurifères. Ceci est obtenue à partir de la compilation des différentes cartes, comme des cartes géologiques, cartes de distribution des Uranium – Thorium et Potassium (d'après l'interprétation des données spectrométries aériennes), cartes des anomalies magnétiques et des images satellites. La zone la plus favorable se trouve aux environs immédiats d'Andranganala, zone dans laquelle il y a une forte dominance de l'Uranium dans la région d'étude, et ceci constitue des indices probables pour les prospectes aurifères.

Au terme de cette étude, on a pu faire des différents traitements apportés aux cartes du champ magnétique total qui ont amené à la détermination et à la différenciation des sources responsables des anomalies du champ magnétique. L'anomalie magnétique réduite au pôle renseigne sur la variation locale du champ et mis à l'aplomb de l'anomalie du corps responsable, le signal analytique permet de délimiter les différentes entités géologiques se trouvant à l'intérieur de la zone et le gradient vertical confirme à distinguer la différente nature du substratum et à définir le type des sources magnétiques. En bref, les différentes cartes montrent la dominance des corps magnétiques dans la partie Est, qui constitue des zones à haute altitude et elle constitue géologiquement des granites migmatitiques dans laquelle le taux de magnétite est élevée. Par contre, la zone à basse altitude (localisée à l'Ouest) indique la présence des substances faiblement magnétique, elle est constituée principalement par des gneiss enderbetiques liés à des roches basiques et ce qui est une zone plus intéressante pour la minéralisation aurifère.

Compte tenu des résultats obtenus, c'est-à-dire, la combinaison des données de la télédétection, la géophysique aéroportée, les anciennes mines (carte d'indice) et les données géologiques de terrain, permet de voir une nouvelle délimitation sur les prospectes aurifères. Il serait intéressant d'effectuer des travaux de prospections sur terrain, comme levé magnétique détaillé, prospection électrique (polarisation spontanée et provoquée) et/ou de réaliser des sondages et des études géochimiques beaucoup plus approfondies dans les zones indiquées par cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. BEZANAHARY J. O. 2005. Etude du gisement d'or de Dabolava par prospection magnétique. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de Maitrise en Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée.
2. Mines d'or de Madagascar, 1896. Journal Officiel de Madagascar: Dossier Madagascar : mines, pierres précieuses : 190. OR ; localisation ; exploitation minière ; commerce ; Madagascar. Cote 0226.
3. Monographie de la Région Betsiboka, 2013. Unité politique de développement rural (UPDR).
4. RALAIARISOA V. 2006. Acquisition et traitement de données magnétométrie et de spectrométrie gamma aéroportées à Madagascar.
5. RAKOTO H. A. 2003. Caractérisation par géophysique, hydrogéologie classique et hydrochimie des aquifère en zone semi-aride: exemple du bassin sédimentaire de Beloha. extrême sud de Madagascar. Thèse de Doctorat de Troisième Cycle, Faculté des Sciences Antananarivo.
6. RAKOTOARIMANGA T. 2014. Etude du gisement d'uranothorianite par analyse des données multi sources, région de Tranomaro Sud-Est de Madagascar. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'études approfondies. ESPA.
7. RAKOTOMALALA T. O. 2013. Reinterptation de données magnétiques acquises sur indices chromifere de Belobaka, district de Tsiroanomandidy.
8. RAKOTOMANANA D. 2008. Nouvelles perceptions de la géologie du socle cristallin précambrien de Madagascar d'après les récentes révisions de la cartographie géologique et minière par le Ministère de l'Energie et des Mines.
9. RAKOTONIAMONJY A. T. H. 2008. Prospect magnétique du site aurifère d'Analarotra.

-
10. RANDRIAMANJARA L. H. 2010. Réinterprétation de données magnétiques et géochimique acquise sur la colline Ambohimanoa Mahitsy pour la recherche d'or. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur des Mines, ESPA.
 11. RANDRIANARINIRINA E. Z. 2009. Contribution à l'étude des potentialités en minéralisation aurifère du périmètre minier de la Société KRAOMA dans le District de Maevatanàna-Région de Betsiboka. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur des Mines. ESPA.
 12. RANDRIANARIVELO A. F. 2014. Apport magnétisme aéroporté dans l'étude des gisements d'or de la région de Dabolava. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur des Mines. ESPA.
 13. RAZAFINDRAMAKA N. O. 2007. Monographie des gisements aurifères de Madagascar. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'études approfondies. ESPA.
 14. SIMEON Y. et P. de B. 1987. Protocole d'accord pour la mise en valeur des gisements aurifères de Madagascar.
 15. SIMON F. 2011. Méthode Magnétique appliqué à l'exploration multi-échelle du Bassin de Franceville.

REFERENCES WEBOGRAPHIES

1. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/61/Remote_Sensing_Illustration.jpg, consulté le 24 Mai 2016
2. <http://resources.arcgis.com/fr/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>, consulté le 24 Mai 2016
3. <https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/143553/1/TRAVAUX%20PRATIQUES%20de%20TELEDETECTION%20SPATIALE%20ULg.pdf> , consulté le 24 Mai 2016
4. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Or>, consulté le 15 Avril 2016
5. <http://or-et-lingots.fr>, consulté le 16 Avril 2016
6. <http://or-et-lingots.fr> , consulté le 16 Avril 2016
7. <http://www.gold.fr/informations-sur-l-or/guides/quels-sont-les-couleurs-de-lor>, consulté le 26 Mai 2016.
8. <http://www.gold.fr/cours-or-prix-de-l-or/>, consulté le 26 Mai 2016.

ANNEXES

ANNEXE 1 : LES MINERAUX D'OR

Minéral	Composition	Teneur en or (%)	Densité	Dureté
Or natif	Au	>75	16-19	2,5-3
Electrum	Au Ag	45-75	13-16	2-2,5
Calaverite	Au Te	40	9,2	2,5-3
Krennerite	Au ₄ Ag Te ₁₀	31-44	8,6	2,5
Sylvanite	Au Ag Te ₄	24-30	8,2	1,5-2
Petzite	Ag ₃ Au Te ₂	19-25	9,1	2,5
Hessite	Ag ₂ Te	<5	8,4	2,5-3

ANNEXE 2 : LES ALLIAGES DE L'OR

titre (carats)	couleur	Or [%]	Cuivre [%]	argent [%]	zinc [%]
10	Jaune	41,7	48,3	5,5	9
10	Jaune	41,7	48	6,6	3,7
10	Jaune	41,7	40,8	11,7	5,8
10	vert	41,7	9,1	48,9	0,3
14	Jaune	58,3	31,3	4	6,4
14	Jaune	58,3	29,2	8,3	4,2
14	jaune	58,3	29,7	10	2
14	Jaune	58,3	25	16,5	0,2
14	Vert	58,3	16,8	24,8	0,1
14	Jaune	58,3	6,5	35	0,2
18	Jaune	75	10	15	
24	jaune	100			

Alliage de l'or de différente couleur :

- au cuivre pour faire de l'or rouge ;
- au cuivre et à l'argent pour faire de l'or jaune ou de l'or rosé ;
- à l'argent seul pour faire de l'or vert ;
- au fer pour faire de l'or gris ;
- au nickel pour faire de l'or blanc ;
- à l'aluminium pour faire de l'or violet

ANNEXE 3: Spécifications des levés géophysiques aéroportés du PGRM (Source: PGRM, 2007 et Randrianasolo, 2009)

Enregistrement de l'intervalle:	
des données Magnétiques:	0.1s (approximativement 7m)
Altitudes des vols Magnétiques:	100m
Espacement des Lignes de Traverse:	500m
Espacement des Lignes de Controle:	5000m
Direction des Lignes de Traverse:	090 degrés
Direction des Lignes de Controle:	000 degrés

SPECIFICATIONS DE LA NAVIGATION

Relai DGPS:	Omnistar 3000L
Récepteur GPS:	Novatel 3151R
Recouvrement de la Trajectoire de vol:	Numérique
Traitement de la Trajectoire de vol:	GPS Temps Différentiel

SPECIFICATIONS DE L'EQUIPEMENT

Magnétomètre:	3x Scintrex CS3 Vapeur de Césium
Compensateur:	FASDAS
Détecteur Gamma-vers le bas:	33.6 litres NaI (TI)
Détecteur Gamma-vers le haut:	8.4 litres NaI (TI)
Sonde radio Altimétrique:	KING KRA405B/KING KR405
Hypsomètre:	Vaisala HMY 133
Caméra Video:	Panasonic WV-CL 502
Objectif:	Panasonic WV-LA2.8
Magnétoscope:	Panasonic AG AG1070
Correction CRGI:	Modèle CRGI 2000

SPECIFICATIONS DU TRACAGE

Projection:	Laborde(Hotine Mercator Oblique)
Ellipsoïde:	International 1909
Latitude du Point Origine:	18°54' Sud
Longitude du Point Origine:	46°26'14.025" Est
Azimut de la Ligne centrale:	18°54'
Facteur d'Echelle Centrale:	0.9995
Flase Easting:	400 000 Mètres
Flase Northing:	800 000 Mètres
Mise en Grille:	125 Mètres
Aéronef fourni par	Groupe Fugro
Aéronef:	Cessna Titan 404 ZS-AIU& ZS-KRG
Aéronef:	Cessna Caravan II 406 ZS-SSC
Acquisition des données:	Groupe Fugro
Traitement des données:	Groupe Fugro

TABLE DE MATIERE

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DES FIGURES.....	iv
LISTE DES PHOTOS.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vii
INTRODUCTION.....	1
Chapitre I : CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	2
I-1 Généralités sur l'or	2
I-1-1 Propriétés de l'or	3
I-1-2 Usage de l'or dans le monde	4
I-1-3 Prix mondial de l'or.....	5
I-1-4 Or à Madagascar.....	5
I-1-5 Métallogénie de l'or	5
I-1-6 Types de gîte aurifère connus à Madagascar	6
I-1-6-1 Les gîtes primaires	6
I-1-6-1-2 Gîtes primaires du Protérozoïque	7
I-1-6-1-3 Gîtes liées à la tectonique Permo-triasique.....	7
I-1-6-2 Gîtes secondaires	8
I-1-7 Les principales zones aurifères de Madagascar :	8
I-2 Contexte de la zone d'étude	9
I-2-1 Présentation de la zone d'étude	10
I-2-2 Contexte hydrologique	11
I-2-3 Contexte climatique.....	12
Température	12
Pluviométrie	13
I-2-4 Contexte géologique.....	13
Chapitre II : RAPPELS THEORIQUES	16
II-1 TELEDECTION	16
II-1-1 Principe	16
II-1-2 Acquisition de données de télédétection	17
II-1-3 Caractéristiques des bandes spectrales de LANDSAT 7 ETM.....	17
II-2 PROSPECTION MAGNETIQUE	18

II-2-1 Notion sur le magnétisme	18
II-2-1-1 Force magnétique.....	18
II-2-1-2 Champ magnétique	19
II-2-1-3 Moment magnétique	19
II-2-1-4 Intensité magnétique	19
II-2-1-5 Susceptibilité magnétique.....	20
II-2-2 Champ géomagnétique.....	21
II-2-2-1 Représentation du champ géomagnétisme [12].....	21
II-2-2-2 Sources des champs magnétique terrestre	22
II-2-2-3 Composantes du champ géomagnétique.....	23
II-2-3 Types de magnétisme.....	25
II-2-4 Caractéristiques des matériaux magnétiques	26
II-2-4-1. Diamagnétisme	26
II-2-4-2. Paramagnétisme	26
II-2-4-3. Ferromagnétisme	26
II-2-5 Prospection magnétique	27
II-2-6 Prospection magnétique aéroportée	28
II-2-6-1 Matériels utilisés.....	28
II-2-6-2 Acquisition des données	29
II-2-6-3 Traitement des données magnétiques	30
• Correction de dérive.....	30
• Correction IGRF	30
II-2-6-4 Documents d'interprétation des anomalies magnétiques	31
➤ Réduction au pôle	32
➤ Cartes des dérivées	34
➤ Signal analytique	35
II-2-6-5 Avantages et inconvénient de la prospection magnétique.....	36
II 3 GAMA SPECTROMETRIE	37
II 3-1 Principe.....	37
II 3-2 Matériel utilisé.....	37
II 3-3 Traitement de données spectrométriques	38
• Carte ternaire.....	39
II-4 PRESENTATION DE LOGICIELS DE TRAITEMENT	39
II 4 1 Arc GIS 9.3.....	39
II 4 2 Logiciel ENVI	39

II 4 3 Oasis Montaj 6.4.2 :.....	40
CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATION	41
III-1 PRESENTATION DES DONNEES.....	41
III-2 RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	41
III-2-1 Résultat et interprétation des travaux effectués en télédétection.....	41
III-2-1-1 Rehaussement de l'image.....	41
III-2-1-2 Composition colorée	42
III-2-2 Résultat et interprétation de données magnétiques.....	45
III-2-2-1 Anomalie magnétique réduit au pôle.....	45
III-2-2-2 Carte du gradient vertical	47
III-2-2-3 Carte du signal analytique	48
III-2-3 Résultat et interprétation des données spectrométriques.....	49
III-2-3-1 Carte du taux de Thorium.....	49
III-2-3-2 Carte du taux de Potassium	50
III-2-3-3 Carte du taux de Uranium	51
III-2-3-3 Carte ternaire	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	ix

ETUDE DE PROSPECT AURIFERE DU PERIMETRE MINIER DE KRAOMA, ZONE BRIEVILLE PAR METHODE GEOPHYSIQUE

RESUME

Les levés magnétique et spectrométrique aéroportés étaient faits dans le Nord-Est de Madagascar par le Fugro Ltd en 2005. Le magnétomètre de pompage optique de type CintrexCS-3 et le spectromètre de type Exploranium GR-820 étaient utilisés durant l'acquisition des données, et le traitement était fait avec le logiciel de Geosoft Oasis Montaj et représenté graphiquement avec le logiciel ArcGIS.

L'étude est menée dans la commune Brieville et ses environs, district de Tsaratanana, région Betsiboka, au point de vue géologique, le gneiss plus ou moins migmatisé est prépondérant. Les résultats obtenus pour la formation géologiques-gisement d'or sont liés à la signature magnétique et l'abondance des éléments radioactifs de roche.

Il serait intéressant d'effectuer des travaux de prospections sur terrain, comme levé magnétique détaillé, prospection électrique (polarisation spontanée et provoquée) et/ou de réaliser des sondages et des études géochimiques beaucoup plus approfondies dans les zones indiquées par cette étude.

Mots clés : Brieville, magnétique et spectrométrique aéroporté, or, prospect aurifère.

ABSTRACT

Magnetic and spectrometric surveys were carried out in the North-East of Madagascar in 2005 by Fugro Ltd. The instruments CS-3 magnetometer and the GR-820 spectrometer were used in the survey. The software Oasis Montaj of geosoft and the spatial analysis with the ArcGIS software were used for processing the data collected.

The area study is located at Brieville, District of Tsaratanana, Betsiboka region. The gneiss roughly migmatized is leading in the region. The results for the gold-bearing geological formation are related to the magnetic signature and abundance of radioactive elements rock.

It would be interesting to conduct surveys on field work, as detailed magnetic survey, electrical prospecting (and caused spontaneous polarization) and / or to conduct surveys and geochemical studies in depth as indicated by this study.

Key words: Brieville, magnetic and radiometric surveys, gold, auriferous prospect.

Encadreur : RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier.
Tel : 033 80 962 68
E-mail: boniraz2000@yahoo.fr

Impétrant: RAMAROSON I Tojonirina.
Tel : 033 17 989 00
E-mail: tojonirinarene@gmail.com
