

## **Sommaire**

REMERCIEMENTS

LISTE DES SIGLES, DES ABRÉVIATIONS ET DES NOTATIONS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

GLOSSAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE I. LES PEGMATITES DE MADAGASCAR

CHAPITRE II. CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

CHAPITRE IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

WEBOGRAPHIE

TABLE DES MATIÈRES

ANNEXE

## Liste des sigles, abréviations et notations

$\Omega\text{m}$	<i>Ohm-mètre</i>
$\Delta\text{V}$	<i>Gradient de potentiel électrique</i>
2D	<i>Deux dimensions</i>
3D	<i>Trois dimensions</i>
ACP	<i>Analyse en Composantes Principales</i>
CP	<i>Composante principale</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
$\text{M}\Omega$	<i>MegaOhm</i>
MDWI	<i>Mean Difference Water Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
PRE	<i>Permis Réservé aux petits Exploitants</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RN	<i>Route Nationale</i>
RSO	<i>Radar à Synthèse d'Ouverture</i>
RVB	<i>Rouge-Vert-Bleu</i>
SIG	<i>Système d'Information géographique</i>
SQC	<i>Schisto-Quartzzo-Calcaire</i>
SQD	<i>Schisto-Quartzzo-Dolomitique</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>

## **Liste des tableaux**

Tableau 1 : Caractéristiques des pegmatites d'Ambalamahatsara observées.....	6
Tableau 2 : Principe de la sensibilité verticale du dispositif Wenner .....	24
Tableau 3 : Les différentes bandes spectrales caractéristiques du satellite Landsat 8 TM .....	37
Tableau 4 : Emplacement des panneaux électriques réalisés .....	45
Tableau 5 : Emplacement des zones potentielles .....	50

## **Liste des figures**

Figure 1 : Champs pegmatitiques de Madagascar.....	3
Figure 2 : Carte géologique avec levé des pegmatites d'Ambalamahatsara .....	5
Figure 3 : Localisation de la zone d'étude .....	10
Figure 4 : Image Google de la localisation de la zone d'étude .....	11
Figure 5 : Morphologie en 2D de la zone d'étude.....	12
Figure 6 : Morphologie en 3D de la zone d'étude.....	12
Figure 7 : Indice de différence normalisée de végétation .....	13
Figure 8 : Diagramme de fluctuation de la moyenne annuelle de la température et de la pluviométrie du Fokontany Ambalamahatsara.....	14
Figure 9 : Réseau hydrographique de la zone d'étude .....	15
Figure 10 : Extrait de la carte géologique d'Ambatofinandrahana .....	16
Figure 11 : Dispositif de prospection électrique à 4 électrode à la surface.....	20
Figure 12 : Principe du panneau électrique .....	23
Figure 13 : Représentation schématique de l'algorithme d'inversion itératif par moindres carrés .....	30
Figure 14 : Disposition des points de valeurs expérimentales et des blocs rectangulaires .....	31
Figure 15 : Organigramme simplifié du traitement du programme .....	32
Figure 16 : Coupe géoélectrique ou pseudo-section .....	32

Figure 17 : Principe de la télédétection .....	35
Figure 18 : Principe d'acquisition de données .....	36
Figure 19 : Principe du SIG.....	42
Figure 20 : Carte géologique de la zone d'étude.....	43
Figure 21 : Principe de superposition de cartes sur un logiciel SIG .....	44
Figure 22 : Plan de masse des profils électriques .....	47
Figure 23 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°1 .....	47
Figure 24 : Coupes géoélectriques obtenues à partir du panneau électrique n°2 .....	48
Figure 25 : Coupes géoélectriques obtenues à partir du panneau électrique n°3 .....	49
Figure 26 : Carte de délimitation des zones potentielles.....	51
Figure 27 : Extraction des champs pegmatitiques depuis la combinaison en RVB des bandes 5, 6, 7 .....	52
Figure 28 : Extraction des champs granitiques depuis la combinaison en RVB du ratio de bandes de Kaufmann .....	53
Figure 29 : Extraction des champs granitiques depuis la combinaison en RVB des trois premières composantes de l'ACP.....	54
Figure 30 : Aperçu de la densité des linéaments .....	55
Figure 31 : Identification par vectorisation des linéaments .....	56
Figure 32 : Carte de superposition des apports géophysique et géomatique .....	57
Figure 33 : Carte finale des champs de pegmatitiques de la zone d'étude.....	59
Figure 34 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n° 4..... Annexe   page 4	
Figure 35 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n° 5..... Annexe   page 4	
Figure 36 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n° 6..... Annexe   page 5	
Figure 37 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°7 .....	Annexe   page 5
Figure 38 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°8..... Annexe   page 6	
Figure 39 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°9 .....	Annexe   page 6

Figure 40 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°10..... Annexe | page 7

Figure 41 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°11 ..... Annexe | page 7

## **Liste des photos**

Photo n°1 : Matériel de prospection électrique SYSCAL R2 et ses accessoires .....	25
Photo n°2 : Échantillon de roche montrant la concentration de tourmaline noire aux épontes des pegmatites .....	Annexe   page 1
Photo n°3 : Tourmalines roses de taille millimétrique sur les affleurements des pegmatites .....	Annexe   page 1
Photo n°4 : Béryl bleu et tourmaline noire de taille millimétrique .....	Annexe   page 2
Photo n°5 : Concentration des tourmalines verte et noire ainsi que des béryls bleus de tailles millimétriques.....	Annexe   page 2
Photo n°6 : Veine de pegmatite d'environ 20 cm de large contenant des tourmalines roses et vertes de taille millimétrique .....	Annexe   page 3
Photo n°7 : Affleurements de pegmatites.....	Annexe   page 3

# Glossaire

## Filon

Gisement étendu d'une matière, de forme allongée, permettant son identification. Gisement rocheux à structure planaire, recouplant des formations encaissantes.

## Gemme

Minéral considéré comme pierre précieuse. Une gemme est une pierre fine, précieuse ou ornementale ou n'importe quelle matière très dure ou colorée ayant l'aspect de ces pierreries et utilisées comme ornement. Les gemmes possèdent généralement un éclat vif dit adamantin, une grande réfringence et une grande dureté. Pour mériter l'appellation de gemme, cette matière (minéral, roche ou une substance organique telles que les perles, ambres, corail) doit être attrayante, surtout par sa couleur. Elle doit être peu altérable, et assez solide pour survivre à un usage constant ou aux manipulations, sans se rayer ou s'endommager.

## Géoradar

Appareil géophysique utilisant le principe d'in radar que l'on pointe vers le sol pour en étudier la composition et la structure. En général, les bandes des micro-ondes et des ondes radio sont utilisées. Il est également dénommé radar géologique ou radar à pénétration de sol.

## Gîte

Dépôt de minerai, gisement de minéraux, contrée contenant des gisements. Un gîte aquifère, gîte minier ou gîte minéral est un dépôt naturel de minerai.

## Global Positioning System

Géo-positionnement par satellite, aussi connu sous le nom de Navstar. Système de géolocalisation fonctionnant au niveau mondial et reposant sur l'exploitation de signaux radio émis par des satellites dédiés. Ce système est souvent abrégé GPS.

## Orthophotos

Orthophotographies ou orthoimages sont des images aériennes ou satellitaires de la surface terrestre rectifiées géométriquement et égalisées radiométriquement. Ces images se présentant sous forme de dalles couvrant une zone de la Terre peuvent être géoréférencées dans n'importe quel système de coordonnées. Elles servent de fond cartographique dans les systèmes d'information géographique.

## Pixel

Unité de base permettant de mesurer la définition d'une image numérique matricielle. Son nom provient de la locution anglaise « picture element », qui signifie élément d'image. Il est aussi l'unité utilisée pour spécifier les définitions d'affichage (largeur x hauteur). Les pixels sont approximativement rectangulaires, parfois carrés. Leur dimension peut être changée en réglant l'écran ou la figure graphique. Le pixel est souvent abrégé px.

## Introduction

La forte demande actuelle venant des pays émergents tels que la Chine et l'Inde, en matières premières extraites des roches pegmatitiques, implique une considération d'un problème d'approvisionnement au niveau des gisements exploités. Outre sa biodiversité incomparable, Madagascar dispose de richesses minérales considérables reconnues dans le monde entier d'où son appellation d'île verte ou de paradis des indices. Les pegmatites malgaches sont connues depuis les travaux d'Alfred Lacroix qui les a classées en deux principaux groupes : le groupe potassique et le groupe sodolithique. Le groupe potassique est caractérisé par des pegmatites de grande taille, riches en feldspaths potassiques avec beryl bleu, tourmaline noire, muscovite et d'autres minéraux accessoires tels que des minéraux à uranium, phosphore, terres rares et niobium. Le groupe sodolithique est caractérisé par des pegmatites riches en albite et en minéraux contenant du lithium : spodumène, tourmaline lithinifère, beryl rose à césum, ambligonite et lépidolite. Cette classification a été particulièrement utile autrefois pour la prospection de matériaux industriels notamment le beryl industriel.

Toutefois, les gisements de pegmatites restent mal exploités en raison de l'insuffisance des informations géologiques et minières de base. Les exploitations malavisées détériorent effectivement non seulement la surface de la Terre mais également la subsurface. De plus, le coût d'une extraction minière inconsidérée peut excéder le plafond budgétaire.

C'est dans ce concept de considération de la sensibilité de la recherche des cibles que l'étude du cas de la carrière de titre minier PRE 3273 a été effectuée. La carrière sujette est composée de 48 carreaux équivalent à une surface de 1875 Ha. Elle est localisée au sein du Fokontany Ambalamahatsara d'Ambatofinandrahana. Une étude géophysique de prospection électrique y a été effectuée. Cette descente sur terrain a été effectuée du 15 au 19 juin 2016.

Une étude géologique appuyée par une approche géomatique a également été effectuée pour plus de pertinence dans la délimitation des zones potentiellement susceptible à l'extraction. L'apport de cette étude se traduit par des anomalies intéressantes lors de la descente. Le contexte général de l'étude et les différentes phases des deux principales méthodes géophysiques utilisées sont détaillés dans les trois premiers chapitres si l'interprétation et la discussion des résultats qui en découlent sont proposés dans le quatrième chapitre.

## Chapitre I. Les pegmatites de Madagascar

### I. 1. Caractéristiques et utilités

La pegmatite est une roche magmatique à grands cristaux, de taille supérieure à 20 mm. La plupart des migmatites ont une composition granitique. Elle contient habituellement du quartz, des feldspaths et du mica. D'autres minéraux peuvent exister : tourmaline, topaze, beryl, grenat, wolframite, apatite, etc. avec parfois des minéraux rares comme certains phosphates de fer ou des niobo-tantalates. Les pegmatites forment des poches ou des filons, à l'intérieur ou au voisinage immédiat des plutons granitiques auxquels, elles sont génétiquement associées. Elles correspondent au liquide résiduel, riche en eau, de fin de cristallisation d'un magma granitique. L'abondance de l'eau facilite la diffusion des éléments chimiques et permet la croissance des grands cristaux. (Wikipedia, 2017)

L'utilité de la pegmatite se traduit par la nature des minéraux qui la constituent. Les dépôts de pegmatites peuvent effectivement contenir des pierres gemmes, des minéraux industriels ou des minéraux rares. Cela induit une utilité dans le domaine de l'architecture, de la joaillerie, de l'industrie minière mais également dans le domaine de l'informatique. (Geology, 2017)

### I. 2. Les champs pegmatitiques de Madagascar

La réputation de Madagascar à l'extérieur s'est construite sur la production de gemmes de pegmatites, du moins jusqu'à très récemment, où la découverte de gisements de corindons a changé cette image. En parallèle avec le marché du saphir-rubis, les minéraux, roches et gemmes des pegmatites constituent une part prépondérante du marché des pierres malgaches. La genèse des pegmatites malgaches remonte à l'événement panafricain, entre 525 à 480 millions d'années. Elles se sont cristallisées entre 8 à 12 kilomètres de profondeur. Elles sont extrêmement variées dû au fait de la grande variété de magmas parents et aux échanges d'éléments avec la roche encaissante. Elles ont été mises en surface par 500 millions d'années d'érosion. (Yves Bertran Alvarez, 2017)

Les champs pegmatitiques malgaches sont reconnus à travers les trois traits qui suivent :

- Les champs comportent des filons de quartz et des pegmatites le plus souvent concordé
- Les minéralisations pegmatitiques comprennent essentiellement le beryl, la columbite à un degré moindre et la niobontantale uranifère.
- Les pegmatites se présentent sous différents types structuraux rangés dans une série évolutive : pegmatites homogènes ou peu différenciées, pegmatites semi-zonées et pegmagmatites zonées.

Les petits mineurs sont les principaux opérateurs de l'extraction des richesses du sous-sol malgache. Ceci est dû à la répartition étendue des gisements dans des zones très reculées (Cf. Figure 1) entraînant un problème d'accessibilité et la petite taille des veines à exploiter.

L'exploitation intense et désorganisée conduit à l'extraction de la partie uniquement superficielle des gisements. Après abandon de la mine, les travaux nécessaires pour réactiver de tels sites sont trop élevés et contiennent trop de risques pour attirer d'autres exploitants, même si le gisement présente des potentiels intéressants.

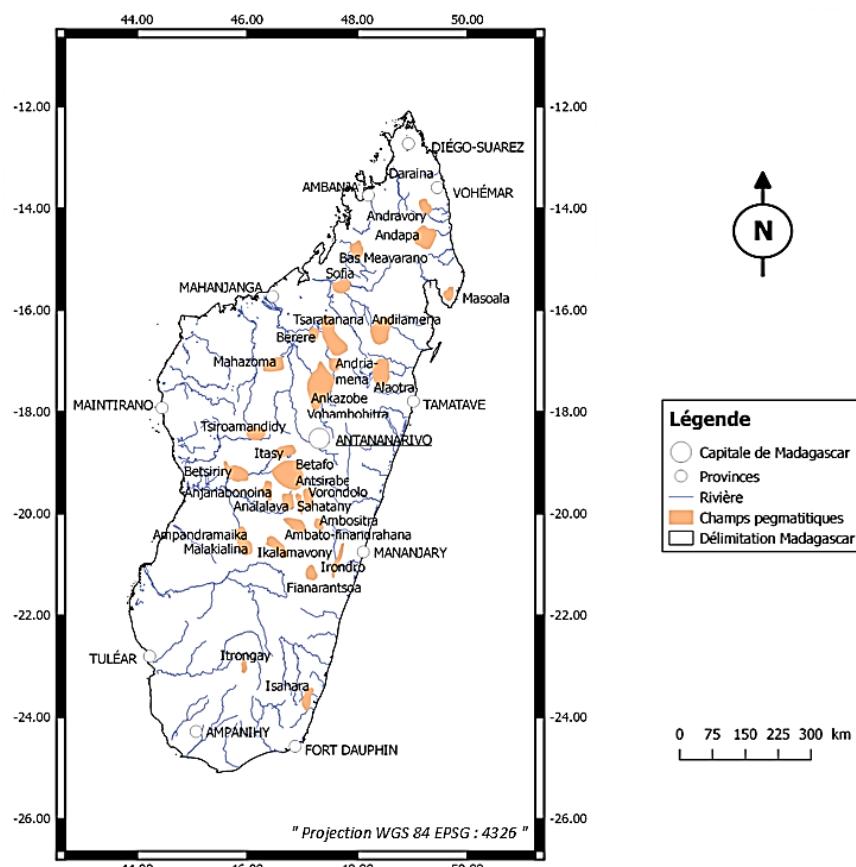


Figure 1 : Champs pegmatitiques de Madagascar (ANDRIANANTENAINA Rado, 2016)

### I. 3. Les pegmatites de la zone d'étude

Les pegmatites distinguées sur terrain sont du type lithique. Elles se présentent sous forme de veine de faible épaisseur de l'ordre de 1 à 2.5 m mais très allongées, pouvant atteindre jusqu'à 500 m. Le pendage est très fort voire subvertical. Elles ne présentent pas des zonations spécifiques sauf que les contacts avec la formation encaissante, cipolin, sont très nets. On remarque aussi une concentration de tourmaline noires, de différentes tailles et surtout millimétrique, aux épontes. La minéralisation des pegmatites est assez typique que les pegmatites soient petites ou grandes dimensions. Elles sont formées de feldspath microcline, quartz, mica, tourmaline et beryl. Le feldspath est en abondance et très blanc avec quelques amazonites très pâle et rarement vert franc. Il y est retrouvé quelquefois des labradorites blanches avec une faible labradoréscence bleue. Le quartz a tendance à devenir peu abondant sauf dans les grandes pegmatites. Il est généralement fumé ou parfois blanc laiteux. Les micas ont de couleur violacé, essentiellement des fuschites, et accompagne les tourmalines verts, roses et rouge. La concentration des tourmalines et beryls au niveau de la pegmatite sont abondants. Les tourmalines noires sont très abondantes aux épontes avec des tailles millimétriques à décimétriques. Il y est également retrouvé des tourmalines de taille millimétriques à centriques colorées verts, roses, bleus et rouges dont certaines sont bien cristallisées et généralement disséminées dans les pegmatites. Les beryls sont de couleurs variés du jaune au bleu. De même pour la cristallisation donnant des qualités de beryllium pierreux au cabochon. Les tourmalines et beryls sont qualifiés comme des minéralisations accidentelles des pegmatites. Ils s'y déposent généralement en forme des poches. Ces poches sont l'unique source des grosses gemmes de bonne qualité et parfois dépourvus de défaut. Elles forment donc les grandes réserves de tourmalines et beryls gemme. Dépendant de sa taille, une poche peut contenir plusieurs centaines de kilogramme de gemme voire même en tonnes. La présence des micas avec les feldspaths et quartz confirme que la pegmatite est favorable à la formation des poches de tourmaline et/ou beryl. La deuxième condition et la taille des pegmatites, surtout leur largeur. De plus les pegmatites présentent des signes comme renflement au niveau des poches. D'une manière générale aussi les poches sont bien emballées par des formations très résistant parfois formé essentiellement des feldspaths ou rarement quartz.

Des photographies illustrant les échantillons de pegmatites observées sur terrain peuvent être retrouvées en fin de cet écrit. (Cf. Annexe 1)

La figure 2 et le tableau 1 décrivent géolocalement les caractéristiques de ces échantillons.



Figure 2 : Carte géologique avec levé des pegmatites d'Ambalamahatsara (LGA, 2016)

Tableau 1 : Caractéristiques des pegmatites d'Ambalamahatsara observées

ID	Dimension	Description	Observations
<b>ALTP01</b>	50m de long	Veine pegmatitique avec des minéraux de dimension moyennement petit de quartz, feldspath et tourmaline noir et très peu de micas à l'Ouest et des plaques de micas à l'Est, indice de tourmaline rose	Il n'y a pas d'affleurement mais quelques puits de carrière peu profond
<b>ALTP02</b>	100m de long, 4m de large	Veine pegmatitique avec intercalation de cipolin comme enclave, elle est formée de quartz, feldspath, micas et tourmaline noir, les petits cristaux de tourmaline rose est bien cristallisée	Quelques affleurements, plusieurs puits peu profonds le long de la pegmatite
<b>ALTP03</b>	500m de long, 25m de large	Le plus grand de pegmatite, elle est formée de quartz un peu fumés en général, feldspath blanc, amazonite, labradorite, micas fuschite et tourmaline noire à l'éponte, et ainsi des indices de tourmaline vert, rose, rouge et polychrome, beryl, favorable pour formation des poches	Plusieurs carrières sur le long de pegmatite, certaines sont déjà assez profond objet de recherche géophysique
<b>ALTP04</b>	160m de long, 1m de large	Veine pegmatitique avec du quartz, feldspath, tourmaline noire de grande taille et friable, tourmaline rose	Petit affleurement à l'extrémité Est, quelques puits peu profonds le long de la pegmatite
<b>ALTP05</b>	150m de long, 0,8m de large	Veine pegmatitique avec du quartz, feldspath, tourmaline noire de grande taille et friable, tourmaline rose	Petit affleurement à l'extrémité Est, quelques puits peu

LES PEGMATITES DE MADAGASCAR

---

			profonds le long de la pegmatite
<b>ALTP06</b>	500m de long, 6m de large	Pegmatite avec du quartz, feldspath, micas, tourmaline noire, à son extrémité Est, elle est assez large, beaucoup de tourmaline rose de taille millimétrique, la pegmatite se divise en deux veines pegmatitiques, il y a aussi de beryllium	Il y a quelques affleurements, plusieurs puits peu profonds dans la partie Est
<b>ALTP07</b>	200m de long, 15m de large	Pegmatite près du contact cipolin-schiste, quartz blanc, feldspath blanc et micas, tourmaline noir et tourmaline rose, la pegmatite à trois branches, la blanche au Sud contient beaucoup de tourmaline noire, la branche au centre est formée essentiellement de quartz blanc, et la branche Nord contient de la tourmaline rose	La majeure partie de la pegmatite est affleurée, quelques sondages peu profonds sur la branche Nord et à l'Est de la jonction des trois branches
<b>ALTP08</b>	10m de long, 0,5m de large	Veine pegmatitique formée de feldspath blanc, peu de quartz et du mica, tourmaline rose de taille millimétrique	Puits peu profond et affleurement au sommet de la crête, et quelques puits peu profond
<b>ALTP09</b>	350m de long, 1,5m de large	Veine pegmatitique, quartz, feldspath, tourmaline noir, rose, vert, et du beryl	Affleurement de l'extrémité Est et Ouest, quelques puits peu profond

LES PEGMATITES DE MADAGASCAR

<b>ALTP10</b>	246m de long, 1,5m de large	Veine pegmatitique, quartz, feldspath, tourmaline noir, rose, vert, et du beryl	Affleurement de l'extrémité Est et Ouest, quelques puits peu profond
<b>ALTP11</b>	240m de long, 2m de large	Veine pegmatitique, quartz et feldspath blanc, feldspath graphique avec tourmaline noir de dimension moyennement grand, tourmaline rose, et beryl bleu en petit cristaux	Quelques carrières assez profondes
<b>ALTP12</b>	100m de long, 13m de large	Veine pegmatitique, quartz fumée, feldspath blanc, amazonite, tourmaline noire à grand taille, tourmaline vert et rose, beryl	Beaucoup de carrière et couche latéritique rejeté
<b>ALTP13</b>	80m de long, 15m de long	Affleurement pegmatite, quartz fumée, feldspath blanc, amazonite, tourmaline noire à grand taille, tourmaline vert et rose, beryl	Beaucoup de carrière et couche latéritique rejeté
<b>ALTP14</b>	80m de long, 8m de long	Affleurement pegmatite, quartz fumée, feldspath blanc, amazonite, tourmaline noire à grand taille, tourmaline vert et rose, beryl	Beaucoup de carrière et couche latéritique rejeté
<b>ALTP15</b>	170m de long, 25cm de long	Trop long veine pegmatitique, quartz, feldspath, tourmaline noir	Affleurement
<b>ALTP16</b>	90m de long, 25cm de large	Trop long veine pegmatitique, quartz, feldspath, tourmaline noir	Affleurement

<b>ALTP17</b>	17m de long	Veine pegmatitique, quartz, feldspath, tourmaline noire et rose	Quelques carrières assez profondes
<b>ALTP18</b>	130m de long, 3m de large	Veine pegmatitique, quartz, feldspath, tourmaline noir, tourmaline rose	Carrière assez profond
<b>ALTP19</b>	30m de long, 1,5m de large	Veine pegmatitique, quartz, feldspath, tourmaline noir, tourmaline rose	Affleurement et puits peu profond
<b>ALTP20</b>	19m de long, 5m de large	Pegmatite lenticulaire, quartz, feldspath, tourmaline noir, rouge et verte en petits cristaux millimétriques bien cristallisés	Epaisse couche latéritique, plusieurs puits peu profond
<b>ALTP21</b>	13m de long, 0,5m de large	Veine pegmatitique, quartz, feldspath, tourmaline noir, rose et verte en petits cristaux millimétriques bien cristallisés	Petit affleurement et sondage
<b>ALTP22</b>	21m de long, 0, 5m de large	Veine pegmatitique, quartz, feldspath, tourmaline noir, rose et verte en petits cristaux millimétriques bien cristallisés	Petit affleurement et sondage
<b>ALTP23</b>	34m de long,	Veine pegmatitique, quartz, feldspath, tourmaline noir, rose et verte en petits cristaux millimétriques bien cristallisés	Epaisse couche latéritique, plusieurs puits peu profond
<b>ALTP24</b>	10m de long, 1,5m de large	Veine pegmatitique de direction ESE-WNW, pendage 60°N, riche en quartz, feldspath, tourmaline noire de dimension moyennement se concentre au toit	Carrière peu profond

## Chapitre II. Contexte général de la zone d'étude

### II. 1. Contexte administratif et géographique

La zone d'étude se trouve au sein du Fokontany Ambalahamatsara appartenant administrativement au District Ambatofinandrahana (Cf. Figure 3). Le Fokontany considéré est délimité au nord par le Fokontany Ambatoharana, au sud par le Fokontany Fenoarivo, à l'est par le Fokontany Tsararano, et à l'ouest par le Fokontany Ianakona.

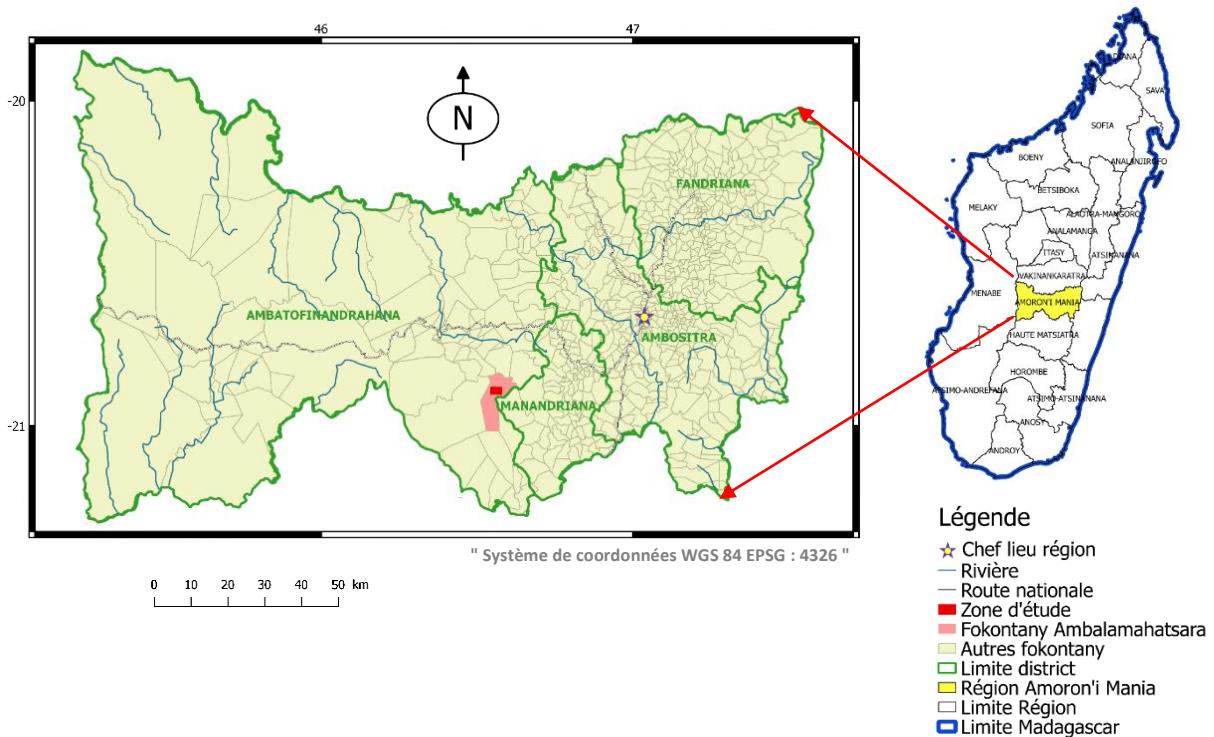


Figure 3 : Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude se trouve à environ 18 km à vol d'oiseau au Sud du Fokontany Ambatofinandrahana, District Ambatofinandrahana, Région Amoron'i Mania. La figure 4 montre la situation géographique de la zone sujette. La figure a été tirée d'une image capturée à partir du logiciel Google Earth Pro.

L'acheminement depuis Antananarivo ville vers la zone sujette s'effectue en poursuivant la RN7 jusqu'à Ivato à 15 km au Sud d'Ambositra, puis en allant d'Ivato à Ambatofinandrahana

## CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

sur la RN35 et finalement, d'Ambatofinandrahana, il faut suivre la piste vers le Sud jusqu'à Ambalamahatsara.

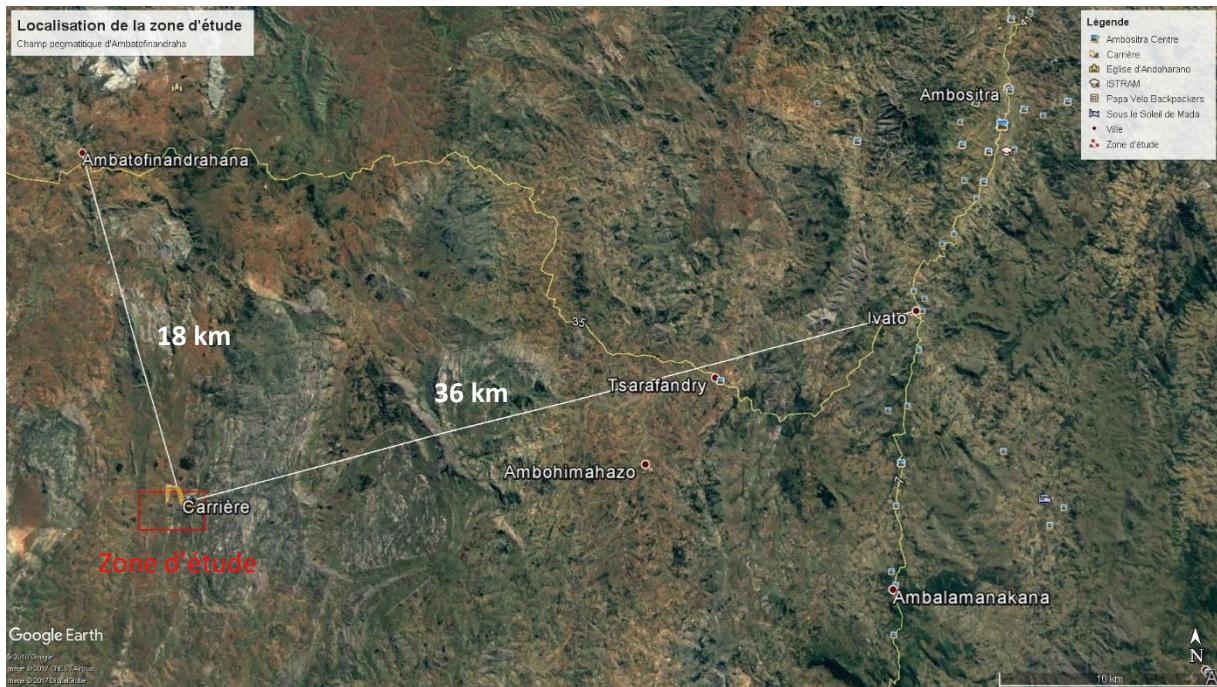


Figure 4 : Image Google de la localisation de la zone d'étude

## II. 2. Contexte topographique et environnemental

L'ensemble du District Ambatofinandrahana présente un relief montagneux, qui se présente comme un assortiment de collines sillonnées par des cuvettes plus ou moins étroites d'où émergent à certains endroits des massifs isolés. La fluctuation de l'altitude au niveau de la zone d'étude est illustrée par les figures 5 et 6.

La zone d'étude se présente avec un aspect verdoyant caractéristique d'une faible urbanisation et d'une dominance de la présence de diverses végétations additionnées des cultures vivrières des habitants. La figure 7 démontre la tendance d'incidence de végétation au niveau de la zone sujette.

## CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

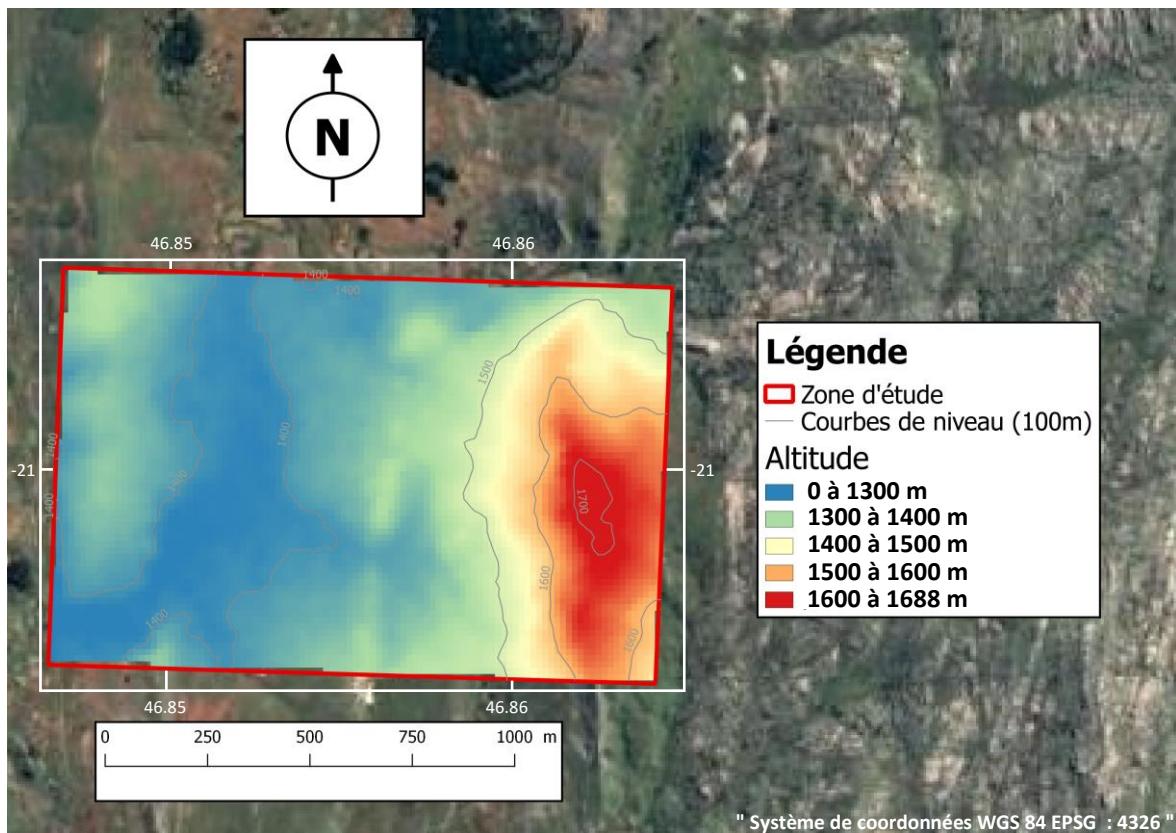


Figure 5 : Morphologie en 2D de la zone d'étude

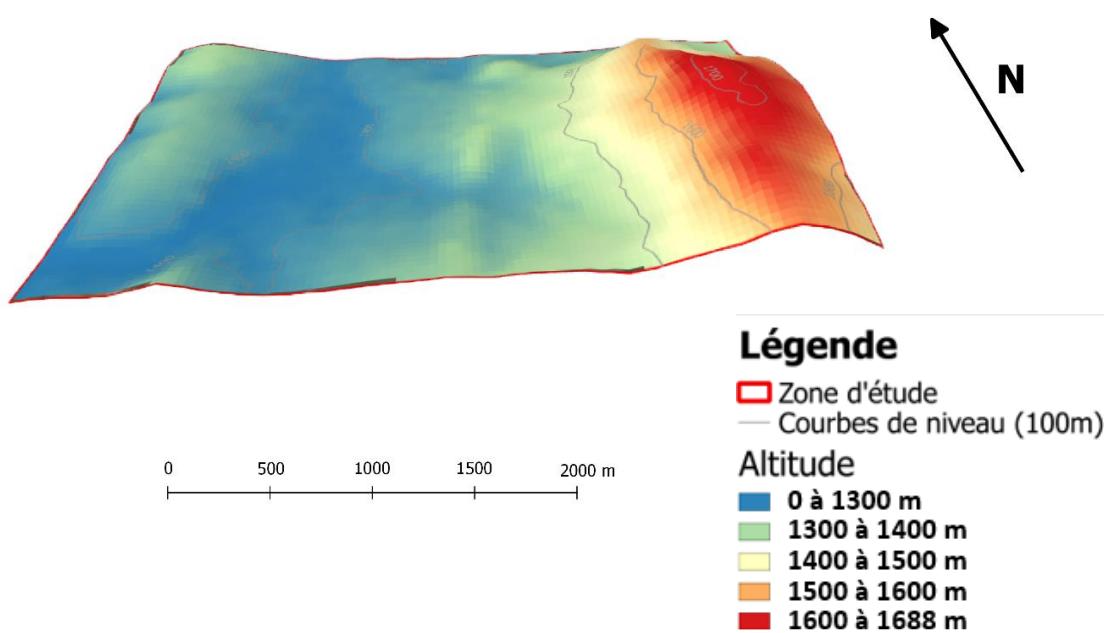


Figure 6 : Morphologie en 3D de la zone d'étude

## CONTEXTE GÉNÉRAL SUR LA ZONE D'ÉTUDE

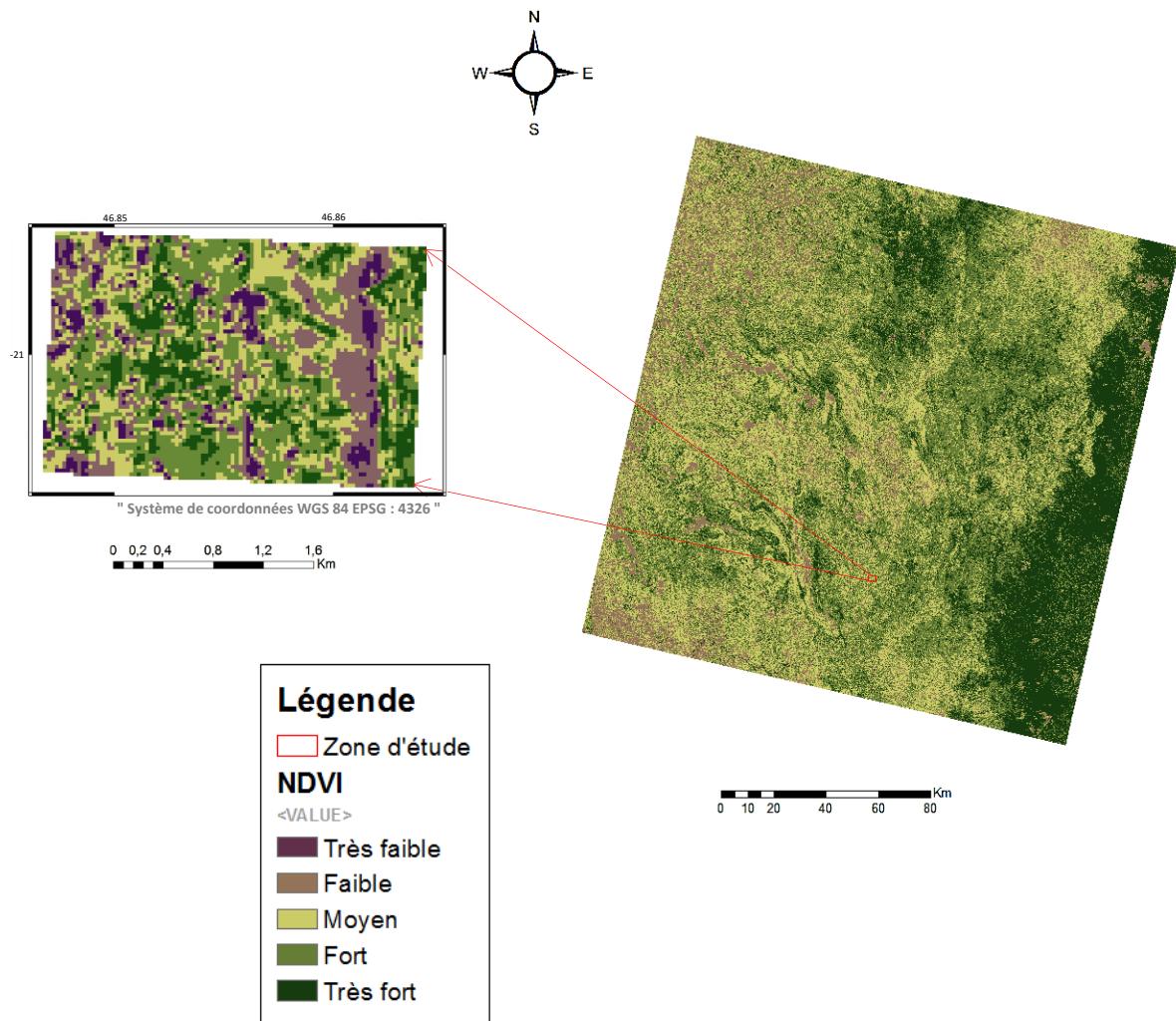


Figure 7 : Indice de différence normalisée de végétation

### II. 3. Contexte climatique

La température de la zone sujette se caractérise par un climat de type tropical d'altitude à deux saisons bien marquées : saison chaude et humide, d'Octobre à Avril et saison hivernale et sèche, de Mai à Septembre.

La pluviométrie annuelle varie de 5.4 à 120 mm. La figure 8 démontre la fluctuation annuelle moyenne de ces deux paramètres climatiques.

## CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

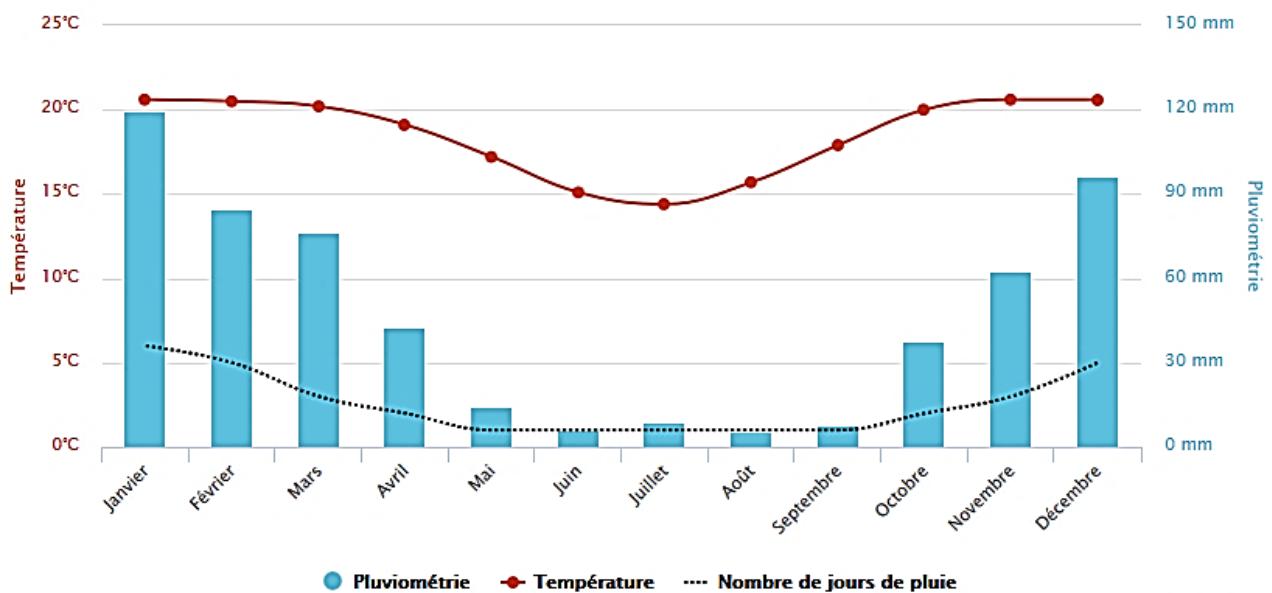


Figure 8 : Diagramme de fluctuation de la moyenne annuelle de la température et de la pluviométrie du Fokontany Ambalamahatsara (A-CONTRESENS, 2017)

Des précipitations moyennes de 5.4 mm sont du mois d'Août le mois le plus sec. En janvier, les précipitations sont les plus importantes de l'année avec une moyenne de 119.6 mm et la température moyenne est de 20.6°C. Janvier est de ce fait le mois le plus chaud de l'année. Juillet est le mois le plus froid de l'année. La température moyenne est de 14.4°C à cette période.

### II. 4. Contexte hydrologique

La région Amoron'i Mania présente 19 rivières spécifiques qui sont : Anarabe, Manamboto, Manantsahala, Mitody, Ingolo, Manambaroa, Imantadika, Sahanofa, Maintinandry, Mananjary, Fisakana, Mania, Ivato, Imorona, Ikoly, Maharivo, Izanaka, Ilovoko, et Menala.

## CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

Les principales rivières environnant la zone d'étude sont : la rivière Imorona à 6 km en direction du nord, la rivière Imatandika à 36 km en direction de l'ouest et la rivière Sahanofa à 43 km en direction de l'est (UGIR, 2015).

La figure 9 représente le réseau hydrographique de la région Amoron'i Mania avec la localisation géographique.

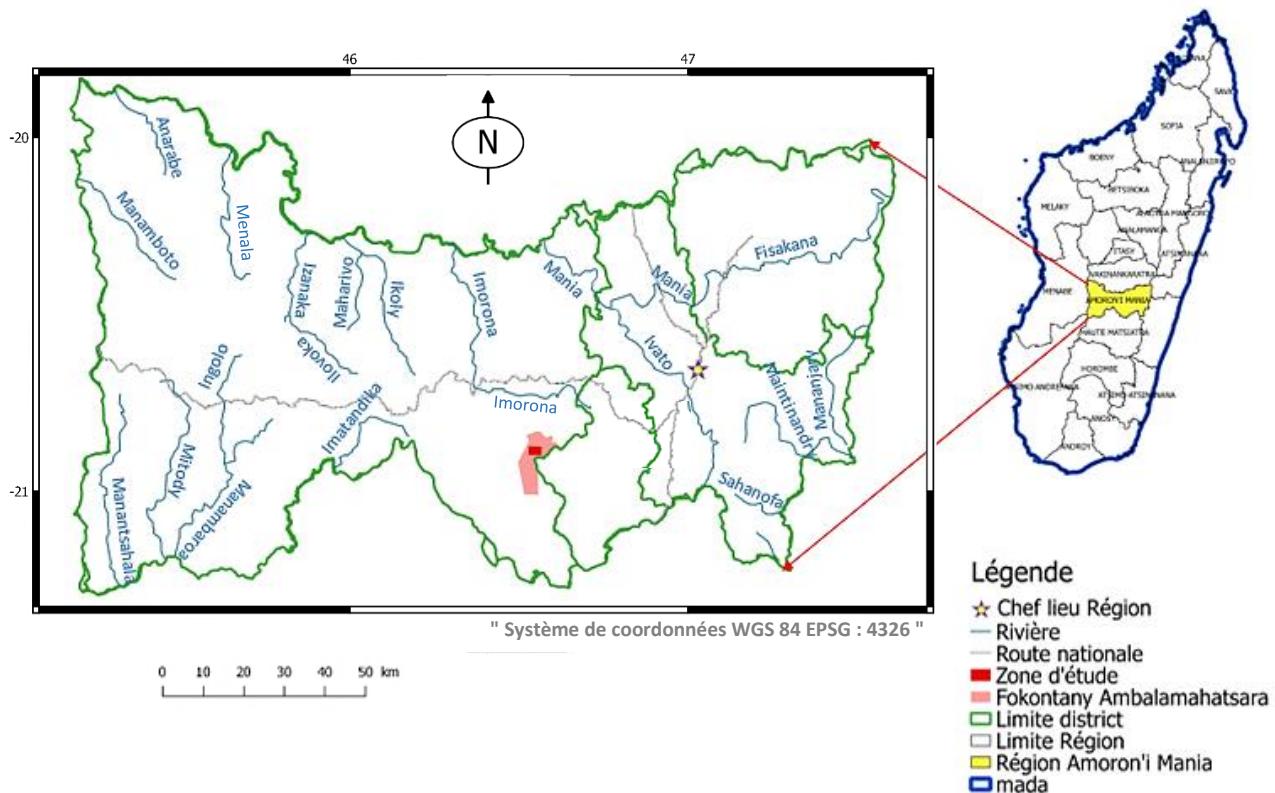


Figure 9 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

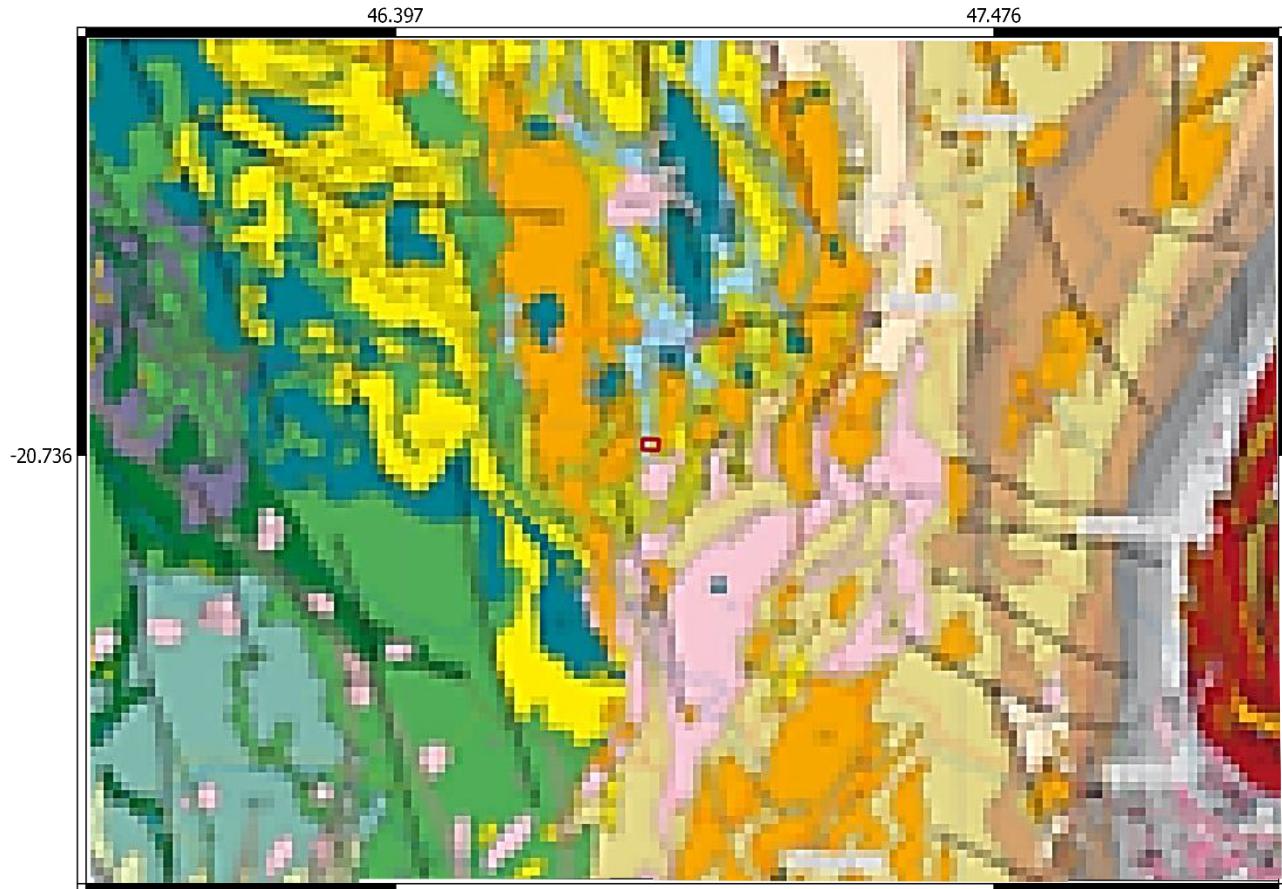
## II. 5. Contexte géologique

Du point de vue géologique, le District d'Ambatofinandrahana est formé par l'ensemble de deux groupes dont le groupe d'Itremo et celui d'Amboropotsy. Ces deux groupes sont assez riche en pegmatites de sous-types Béryl-Columbite, Lépidolite, Tourmaline et Danburite.

Le groupe d'Itremo est constitué par des quartzites, micaschistes et marbres dolomitiques comme plateforme sédimentaire. Ces sédiments ont été déposés pendant période mésoproterozoïque. Ils sont recoupés par des roches plutoniques datées entre 1000 mA et 720 mA et par des roches de granitoïdes (granite et syénite) mis en place entre 570 mA et 520 mA. Les quartzites, les micaschistes et des marbres dolomitiques qui ont intersecté par la roche syénitique et granitique sont à l'origine de l'appellation SQD ou SQC de ce groupe.

## CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le secteur d'Ambalamahatsara appartient au groupe d'Itremo. Quand on traverse la zone d'étude d'Ouest à l'Est, on rencontre les formations suivantes : schistes, marbres dolomitiques et schistes. (Cf. Figure 10).



### Légende

- Linéaments
- Zone d'étude
- Paragneiss migmatitique à pyroxène
- Paragneiss à silicates calciques magnétite et olivopyroxène
- Paragneiss quartzofeldspathique
- Granite et orthogneiss felsique de type Imorona
- Granite et orthogneiss mafique de type Itsindro
- Orthogneiss de Brickaville
- Harzburgite, pyroxénite et péridotite de type Ambodilafa
- Marbre dolomitique
- Schiste et gneiss pasamitique
- Quartzite
- Paragneiss et schiste
- Granite, monzonite et syénite indifférenciés
- Granite et syénite stratoïdes
- Gneiss basique
- Paragneiss graphitique
- Orthogneiss migmatitique dioritique
- Orthogneiss migmatitique granitique
- Quartzite et paragneiss d'Ampasary
- Paragneiss et schiste d'Andasibe
- Paragneiss et Ranomafana Est
- Orthogneiss migmatitique de Befody

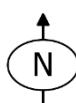


Figure 10 : Extrait de la carte géologique d'Ambatofinandrahana (Cf. Annexe 3)

## CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

---

La ligne de schistosité de ces formations est quasi-Nord-Sud. Tout cela confirme qu'elles présentent une structure synclinale. De nombreuses pegmatites se trouvent dans la formation marbre dolomitique. Elles recoupent celle-ci d'Est en Ouest en générale sur la partie centrale, axe synclinale. À l'Est de cet axe, les pegmatites s'orientent du Sud Est vers le Nord-Ouest tandis que celles à l'Ouest s'orientent dans le sens opposé.

## Chapitre III. Matériels et méthodes

### III. 1. Approche Géophysique

De nombreuses méthodes géophysiques sont actuellement opérationnelles et occupent une place importante dans la prospection et la reconnaissance de minéraux rares. Les principales méthodes utilisées sur terrain sont : la gravimétrie, le magnétisme, l'électromagnétisme, les méthodes sismique et électrique. La dernière méthode est particulièrement mise en œuvre dans cette étude pour la détermination de la lithologie et la structure des champs pegmatitiques sujets.

#### III. 1. 1. Choix de la prospection électrique

Compte tenu du contraste de résistivité entre la cible qu'est la pegmatite, l'encaissant et les contextes généraux des sites d'études, ainsi que la géologie de la zone d'étude, la méthode de prospection électrique a été opté en fonction de son adéquation.

Lorsque les roches sont dans leur emplacement dans le sol, le paramètre à considérer est la résistivité apparente. Cette dernière dépend de la nature du sous-sol, de ses diverses composantes, et également de leur degré de porosité. Cela veut dire que les roches saines ont des valeurs de résistivités apparentes élevées par rapport aux roches fracturées et poreuses.

Il existe aussi plusieurs techniques utilisées en méthode de prospection électrique pour déterminer la résistivité électriques d'un terrain (Dr. RAKOTO Heritiana Andriamananjara, 2016) en vue de la caractérisation de la structure du sous-sol telles que :

- Le sondage électrique : qui est une investigation horizontale du sous-sol en résistivité apparente.
- Le panneau électrique : qui est une combinaison simultanément d'une exploration verticale et latérale du sous-sol.

Le panneau électrique a été opté pour ce travail d'étude. Il consiste à planter simultanément toutes les électrodes de mesure au début d'une série. Il se caractérise par son système multi-électrodes de 32 ou 64 électrodes. Ces électrodes restent fixes pendant la série

de mesure, évitant le déplacement d'électrodes et permettant un gain de temps important. Le panneau électrique est alors plus rapide pour obtenir une coupe géoélectrique.

Le choix du meilleur dispositif dépend de la structure à imager, du bruit de fond et de la sensibilité de l'appareil de mesure. Il dépend fortement des paramètres du terrain et des caractéristiques de la substance cible :

- Le dispositif Wenner se base dans la représentation des structures géologiques horizontales dans une zone fortement perturbée par le bruit de fond.
- Le Dipôle-Dipôle se focalise dans la détection des structures verticales dans une zone faiblement perturbée avec une bonne couverture horizontale.
- Le dispositif de Schlumberger est particulièrement adéquat pour la détection des structures horizontales et verticales. De plus, ce dernier confère un signal relativement plus fort.

En dispositif Wenner, les contours des valeurs de la sensibilité quasiment horizontaux à l'aplomb du centre du dispositif. Suite à l'évidence démontrée par ces propriétés, une acquisition en Wenner sera bien plus sensible aux changements verticaux qu'horizontaux de la résistivité. Ce dernier présente également l'avantage d'avoir une longueur de ligne plus étendue en MN, ce qui facilite la mesure de  $\Delta V$ . Cela implique que le dispositif Wenner est le plus envisagé pour détecter des structures horizontales avec une bonne résolution verticale.

### III. 1. 2. Principe de la prospection électrique

Le principe usuel de la méthode électrique est d'utiliser un quadripôle formé de deux électrodes d'injection A et B pour injecter le courant et deux autres électrodes M et N pour mesurer la différence de potentiel électrique entre deux autres électrodes appelées électrodes de potentiel, expliquée par la figure 11.

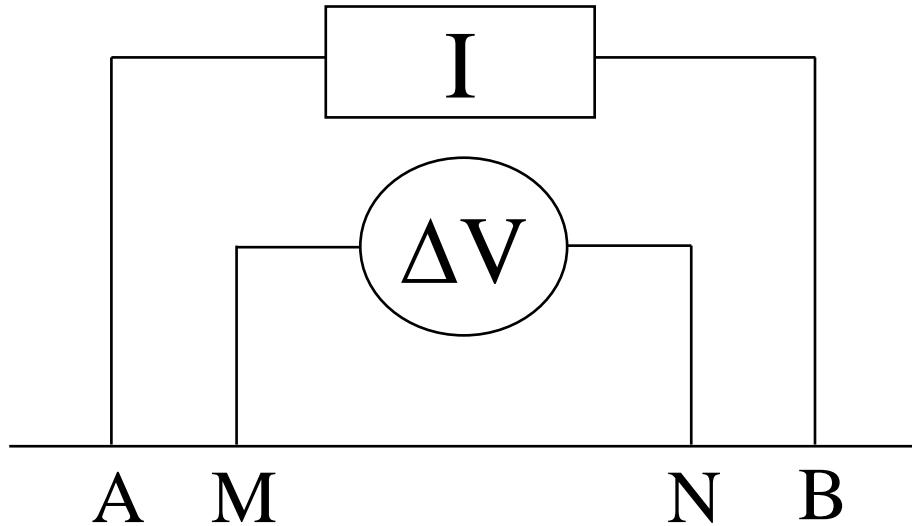


Figure 11 : Dispositif de prospection électrique à 4 électrode à la surface

Les équations modulant le courant électrique sont présentées par la suite.

Dans un courant électrique, la valeur de la résistance  $R$  est donnée par la mesure d'un courant  $I$  fixé et par la chute de courant  $U$  à travers celui-ci. Il s'agit de la loi d'Ohm en une dimension.

$$U = RI(t) \quad (1)$$

Dans un milieu à trois dimension, l'intensité est donnée par :

$$I = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} = \|\vec{j}\| \iint_S d\vec{s} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{j} : \text{densité du courant} \\ S : \text{section du conducteur} \end{array} \right.$$

Pour une sphère de rayon  $r$ , la formule devient :

$$I = \|\vec{j}\| 4\pi r^2 \quad (3)$$

Pour une demi-sphère,

$$I = \|\vec{j}\| 2\pi r^2 \quad (4)$$

En trois dimensions, la loi d'Ohm classique est davantage utilisable pour faire intervenir la résistivité :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho : \text{résistivité} \\ L : \text{longueur d'onde} \end{array} \right.$$

La loi d'Ohm peut être réécrit suivant les équations (1), (4) et (5) :

$$U = RI = \rho \frac{L}{S} \times \|\vec{j}\| 2\pi r^2 = \rho \frac{I}{2\pi^2} \times \|\vec{j}\| 2\pi^2 = \rho L \|\vec{j}\| \quad (6)$$

Par ailleurs, les postulants suivants sont émis :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V \quad (7) \quad \text{et} \quad \vec{E} = \rho \vec{j} \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E} : \text{champ électrique} \\ V : \text{potentiel électrique} \end{array} \right.$$

En concaténant les équations (7) et (8), la formule suivante est obtenue :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}(\rho \|\vec{j}\| I) \quad (9)$$

En concaténant également (5) et (9), l'équation qui suit est établie :

$$\vec{E} = \rho \vec{j} = \vec{E} \frac{\rho I}{2\pi r} = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (10)$$

L'équation suivante est acquise puisque le gradient dérive d'un potentiel :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} + cte \quad (11)$$

Le potentiel étant nul à l'infini, la formule ci-dessous est obtenue :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (12)$$

La différence de potentiel mesurée est donnée par :

$$\Delta V = V_M - V_N \quad (13)$$

Les potentiels  $V_M$  et  $V_N$  valent chacun d'eux :

$$V_M = V_{A(M)} - V_{B(M)} \quad (14)$$

$$V_N = V_{A(N)} - V_{B(N)} \quad (15)$$

$$\Delta V = V_{A(M)} - V_{B(M)} - V_{A(N)} + V_{B(N)} \quad (16)$$

L'acheminement du raisonnement amène à l'obtention d'une forme de l'équation de la différence de potentiel représentée par la formule qui suit :

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (16)$$

Ainsi, la résistivité électrique est donnée par :

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \times \frac{\Delta V}{I} \quad (17)$$

L'aboutissement de la démonstration amène à une forme d'équation reflétant la résistivité qui est le paramètre principalement considéré par le dispositif. Cette forme est représentée par la formule ci-après :

$$\rho = K \times \frac{\Delta V}{I} \quad (18)$$

K est appelé facteur géométrique qui dépend de la disposition géométrique des électrodes.

Le panneau électrique permet d'obtenir une image électrique du sous-sol, c'est-à-dire une coupe de la distribution des résistivités vraies en fonction de la profondeur. Cette méthode est non intrusive (contrairement aux sondages) et l'impact environnemental est nul.

Le panneau électrique exige l'utilisation du dispositif multi électrode comme dispositif de base (Cf. Figure 12). Soit  $a$  la distance entre les deux électrodes consécutives. Chaque électrode est utilisée comme électrode d'injection du courant puis électrode de potentiel.

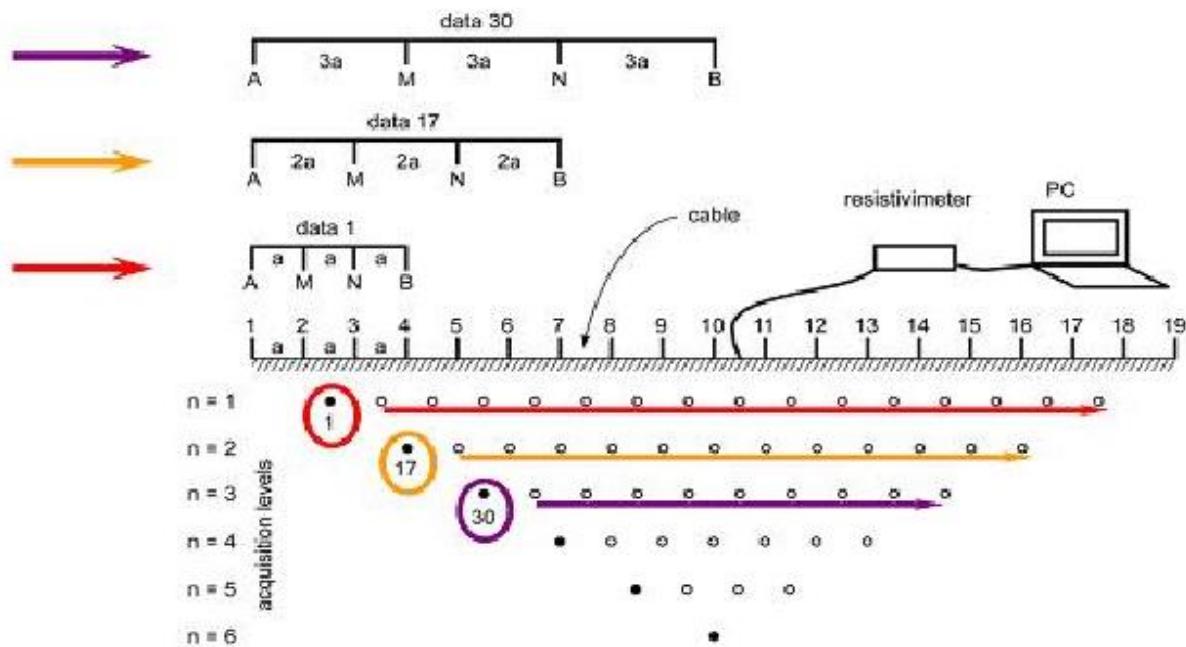


Figure 12 : Principe du panneau électrique (Loke, 2004).

Si l'espacement entre les électrodes augmente, la profondeur d'investigation augmente également. La représentation des résistivités apparentes mesurées sous forme de pseudo-sections qui reflètent qualitativement la variation spatiale de la résistivité apparente devient possible.

### III. 1. 3. Acquisition des données

L'acquisition des données se fait par déplacement de tout le dispositif d'un point de mesure à l'autre. Les électrodes A et B, permettant l'injection du courant et les électrodes M et N pour la mesure de potentiel sont alignées et toutes les électrodes sont équidistantes, c'est-à-dire :  $AB = MN = NB = \frac{AB}{3} = a$ . (Tableau 2)

Tableau 2 : Principe de la sensibilité verticale du dispositif Wenner

Géométrie	Wenner																												
	$k = 2 \times a$																												
Pseudo-section	Numéro d'électrode																												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
	-1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	-2		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	-3			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	-4				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	-5					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	-6						+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	-7							+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	-8								+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	-9									+																			
Profondeur d'investigation	0.173 x L																												
Sensibilité	Verticale																												

Dans ce cas, le facteur géométrique K devient  $K=2\pi a$ . D'où l'obtention d'une autre forme représentative de la résistivité ;

$$\rho = 2\pi \times a \times \frac{\Delta V}{I} \quad (19)$$

Soient a la distance inter-électrodes et N le nombre d'électrodes. La première série débute de prime abord avec les électrodes 1, 2, 3 et 4. Les électrodes 1 et 4 sont utilisées comme électrodes de courant et les deux autres électrodes, 2 et 3, comme des électrodes de potentiel. La seconde série de mesure utilise ensuite les électrodes 2, 3, 4, et 5 et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les séries de mesure soient terminées.

La seconde séquence de mesure est effectuée juste après la première. La distance est incrémentée à 2a. Les autres séries de mesure sont effectuées. L'opération continue jusqu'à ce que toutes les mesures possibles soient effectuées.

Dans le cas général utilisant N électrodes, le nombre total de mesure m, pour un profil dont la distance entre deux électrodes = na, a pour expression :

$$m = \sum(N - 3n) \quad (20) \quad \text{où} \quad n=1, 2, 3, 4, \dots$$

Le nombre d'électrodes N est choisi suivant la profondeur d'investigation sollicitée. Au total, 155 mesures sont à effectuer pour un nombre d'électrodes égal à 32. La profondeur d'investigation estimée pour le dispositif Wenner, selon EDWARDS en 1977, est de 0.173xL dans une profondeur d'investigation en imagerie de résistivité électrique par R. Guerin, 2007.

### III. 1. 4. Matériels utilisés

Pour l'acquisition des données, l'appareil de mesure dénommé résistivimètre Syscal R2, conçu par Iris Instrument a été opté. Il se présente sous la forme d'un boîtier qui comporte un écran et un tableau à commandes numériques. Il est doté d'une mémoire interne permettant l'installation de protocoles de mesure et le stockage des données.

Le SYSCAL R2 utilise une série RS232 pour le transfert des données du SYSCAL R2 vers un micro-ordinateur. La séquence utilisée est introduite à l'aide du logiciel ELECTR II et le transfert des données vers le micro-ordinateur est effectué par le logiciel PROSYS. Le SYSCAL R2 génère par un microprocesseur la compensation automatique de la polarisation spontanée. La photo n°1 montre le résistivimètre SYSCAL R2 avec ses accessoires de branchement.



Photo n°1 : Matériel de prospection électrique SYSCAL R2 et ses accessoires

Cet appareil est caractérisé par :

- Une tension de sortie de 800 Volts (1600 Volts crête à crête)
- Un courant de sortie maximum jusqu'à 2.5 Ampères
- Une puissance de sortie maximum de 1600 Watts
- Une impédance d'entrée de 10 MΩ
- Une gamme de tension d'entrée de - 5 à + 5 Volts
- Une compensation automatique de la PS (- 5 à + 5 Volts) avec une correction de la dérive (jusqu'à 1 mV/s)

### III. 1. 5. Traitement des données

Le logiciel Res2dinv, qui est un logiciel développé par LOKE12H, a été utilisé pour inverser automatiquement les données expérimentales en modèle 2D appelé pseudo-section.

À travers la pseudo-section, le logiciel de modélisation permet d'obtenir une coupe en vraie profondeur de la variation de résistivité calculée. Pour se faire, l'étape la plus importante du travail d'interprétation consiste à inverser le modèle, c'est-à-dire à trouver la coupe de terrain réelle, en vraie profondeur, qui donnerait les résultats de mesure.

Cette inversion est réalisée par itération successives au départ d'un modèle théorique, en comparant les résistivités calculées sur base de ce modèle aux résistivités mesurées sur le terrain.

La méthode décrite ci-dessous est une adaptation de la méthode de Marquard-Levenberg (LINES and TREITEL, 1964) qui consiste à déterminer une solution qui minimise simultanément la norme L2 du vecteur d'écart entre données mesurées et calculées et la norme L2 du vecteur de modélisation à apporter au modèle. Par cette mesure, le but est alors d'éviter des oscillations de la solution.

Le problème électrique linéaire est rompu en effectuant un développement selon une série de Taylor autour d'une solution estimée  $m_{est}$  (modèle de départ) représenté par l'équation qui suit :

$$g(m) \cong g(m_{est}) + \nabla g(m - m_{est}) = g(m_{est}) + G(m - m_{est}) \quad (21)$$

Cette équation peut encore s'écrire :

$$G\Delta(m) = d - g(m_{est}) \quad (22) \quad \text{ou} \quad \Delta d = G\Delta(m) \quad (23)$$

Dans l'équation 24, ils seront notés et la modification à apporter au modèle. Les éléments de la matrice G valent :

$$G_I = \frac{\partial g(m)_I}{\partial m_I} \quad (24)$$

G est une matrice qui joue le même rôle que l'opérateur A dans une relation de type  $d=Am$ . La fonction G est la matrice de sensibilité (ou matrice des dérivées partielles ou matrice des dérivées de Fréchet ou encore le jacobien. Elle n'est pas carrée puisqu'elle est de taille  $N \times M$  et ne peut donc pas être inversée directement. Les coefficients de cette matrice représentent la sensibilité de la mesure en un point à une variation des paramètres du modèle. En utilisant l'approximation par faible nombre d'induction, il est possible de calculer analytiquement les composants de la matrice de sensibilité ce qui a été fait dans ce travail. Pour d'autres problèmes cas méthode géophysique par courant continu, une élévation numérique des dérivées partielles pourrait être nécessaire.

L'utilisation de prime abord de la norme est nécessaire afin d'évaluer l'écart entre les valeurs de conductivités apparentes mesurées et les conductivités apparentes calculées.

Il peut être intéressant de pondérer le vecteur d'écart entre données mesurées et calculées en fonction de la précision des données mesurées. De cette manière, une donnée plus précise qu'une autre peut avoir un plus grand poids dans le calcul de l'erreur globale. Par exemple, le fait que les mesures effectuées par dipôles verticaux sont moins précises que les mesures effectuées par dipôles horizontaux, de par la difficulté d'obtenir des bobines coplanaires sur le terrain. Cette pondération effectuée par le biais d'une matrice  $N \times N$  diagonale  $W_d$  qui définit la contribution relative de chaque individu à l'erreur globale.

$$diag(W_d) = [a_{11}, a_{22}, \dots, a_{ii}, \dots, a_{NN}]^T \quad (25) \quad \text{avec} \quad i = 1, \dots, N$$

L'expression utilisée lors de la minimisation de la forme L2 sur la modification à apporter à la solution devient alors, sous forme matricielle :

$$S_M = m^I W_m m \quad (26)$$

La formulation inverse par moindres carrés peut alors être trouvée par la méthode des multiplicateurs de Lagrange. On minimise alors  $S_D$  sous la contrainte que  $S_M$  est minimum. Cela revient à minimiser  $S$ .

$$S = S_D + \lambda S_M = \Delta d^I W_d \Delta d + \lambda m^I W_m m \quad (27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S : \text{Fonction de coût} \\ \lambda : \text{Multiplicateur de Lagrange} \end{array} \right.$$

La minimisation de l'expression de  $S$  est nécessaire pour résoudre le problème inverse en cherchant le zéro de son gradient. L'équation que nous obtenons après minimisation est une forme modifiée de l'équation de Gauss-Newton :

$$\Delta m = [G^I W_d G + \lambda W_m]^{-1} G^I W_d \Delta d \quad (28)$$

$\Delta m$  est le vecteur de modification à appliquer au modèle. Le facteur  $\lambda$  est également appelé facteur d'amortissement car il limite la longueur de  $\Delta m$  et amortit ainsi la modification apportée au modèle.

Du point de vue de la théorie du problème inverse, le facteur d'amortissement  $\lambda$  détermine l'importance relative donnée au vecteur sur les paramètres du modèle par rapport à la distance entre les données calculées et mesurées. Ce facteur applique une contrainte sur les valeurs du vecteur de modification des paramètres du modèle  $\Delta m$ . Il est alors possible de trouver un compromis entre la partie surdéterminée et la partie sous-déterminée du problème considéré en faisant varier la valeur de  $\lambda$ . Le facteur  $\lambda$  peut également être utilisé pour trouver un compromis entre résolution et précision du résultat. Si  $\lambda$  est trop fort, le résultat perd rapidement en résolution (SASAKI, 1992). La précision du résultat a par contre tendance à s'améliorer (INMAN, 1973).

D'un point de vue mathématique, le facteur  $\lambda$  est un moyen d'ajouter une valeur scalaire aux valeurs propres de la matrice  $G^I W_d G$ , évitant ainsi que cette dernière, dans le cas d'où le conditionnement est médiocre, devienne singulière au cours du processus itératif. Cela peut par exemple se passer lorsque le modèle de départ est trop éloigné de la solution. Le fait

d'augmenter la taille des faibles valeurs propres de GTWdG, diminue la longueur du vecteur de modification  $\Delta m$  à appliquer au modèle, ce qui a pour conséquence de donner des solutions plus proches de la réalité. De plus, si ce vecteur de modification est trop grand, de par l'effet des valeurs propres faibles, l'approximation linéaire perd en précision. Si le modèle de départ est médiocre et que l'inversion avec des faibles valeurs propre est effectuée, le processus aura tendance à imager de petits détails et à diverger de la solution. Ces faibles valeurs propres ne doivent être tolérées qu'à proximité de la solution.

L'algorithme du processus d'inversion est schématisé dans la figure 8.

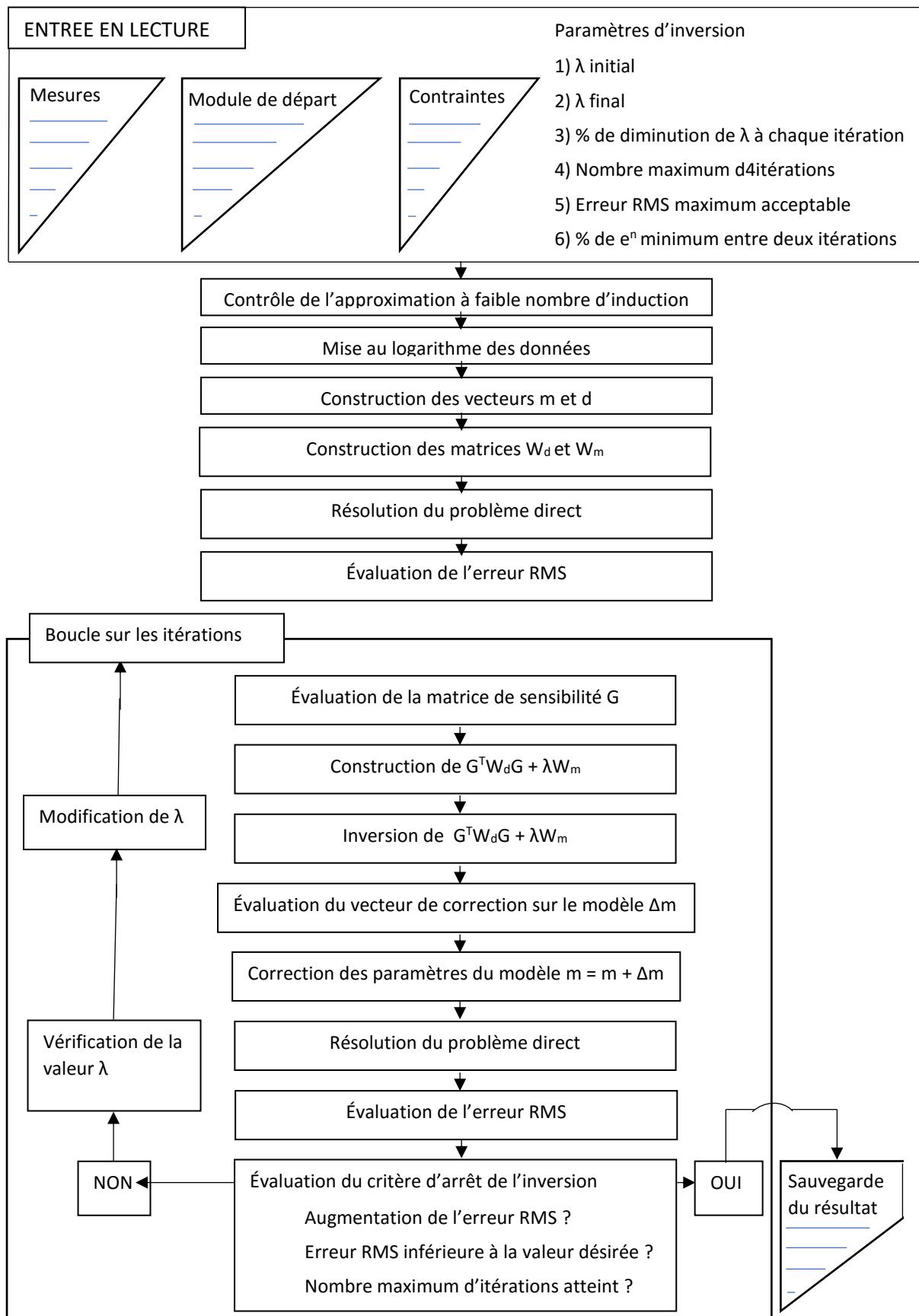


Figure 13 : Représentation schématique de l'algorithme d'inversion itératif par moindres carrés

En tenant compte des points expérimentaux, ce programme subdivise le modèle géoélectrique en des blocs rectangulaires (Cf. Figure 14). Il fournit la résistivité vraie de chaque bloc par la méthode des moindres carrés, utilisant la méthode des différences finies.

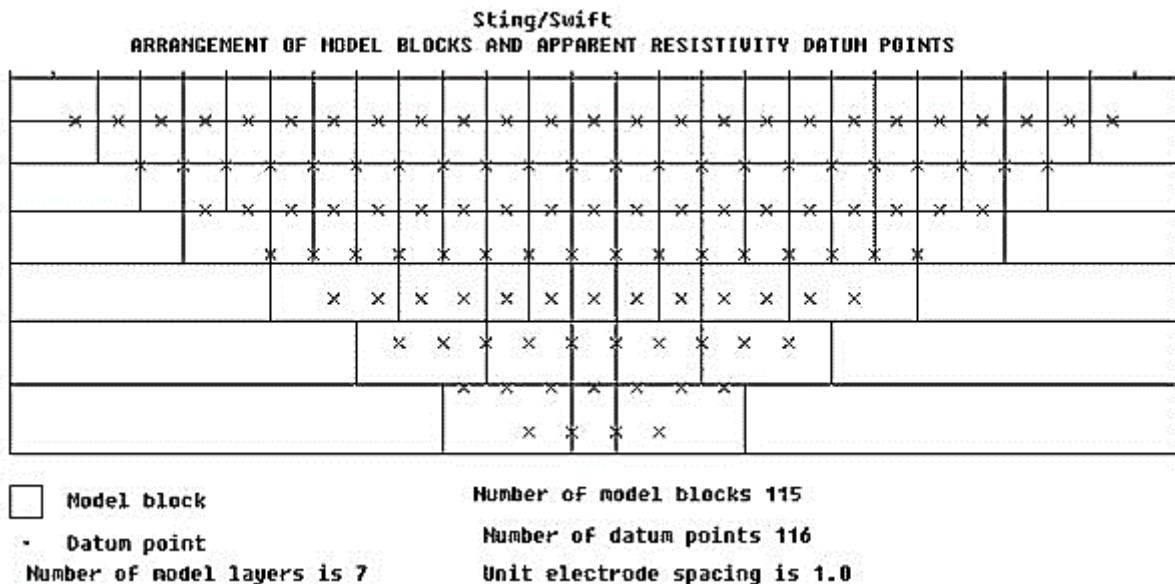


Figure 14 : Disposition des points de valeurs expérimentales et des blocs rectangulaires

La méthode d'inversion utilisée par le programme est basée sur le principe du « Smoothness constrained method » ou méthode de lissage par contrainte. Dans cette étape d'inversion, le traitement s'effectue en trois étapes :

- La lecture du fichier des données
- L'inversion itérative par moindres carrés jusqu'à ce que l'écart quadratique moyen ou RMS soit le plus petit possible
- La détermination du modèle 2D du sous-sol

Quand l'itération s'arrête, le modèle final est déterminé. L'organigramme simplifié de traitement du programme est représenté par la figure 15 qui suit :

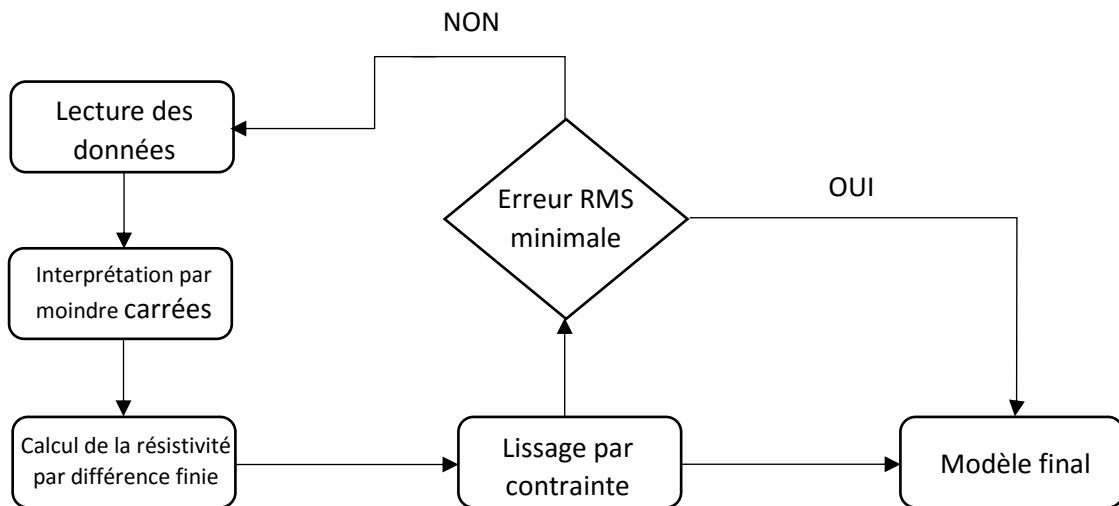


Figure 15 : Organigramme simplifié du traitement du programme

Après le traitement, le modèle final retenu est présenté sous forme de coupe géoélectrique ou plus favorablement de pseudo-section.

### III. 1. 6. Coupe géoélectrique ou pseudo-section

La coupe géoélectrique ou pseudo-section est obtenue après le traitement des données. La figure 16 montre un exemple de coupe géoélectrique qui représente la pseudo-section de la résistivité obtenue après le traitement avec le logiciel Res2dinv.

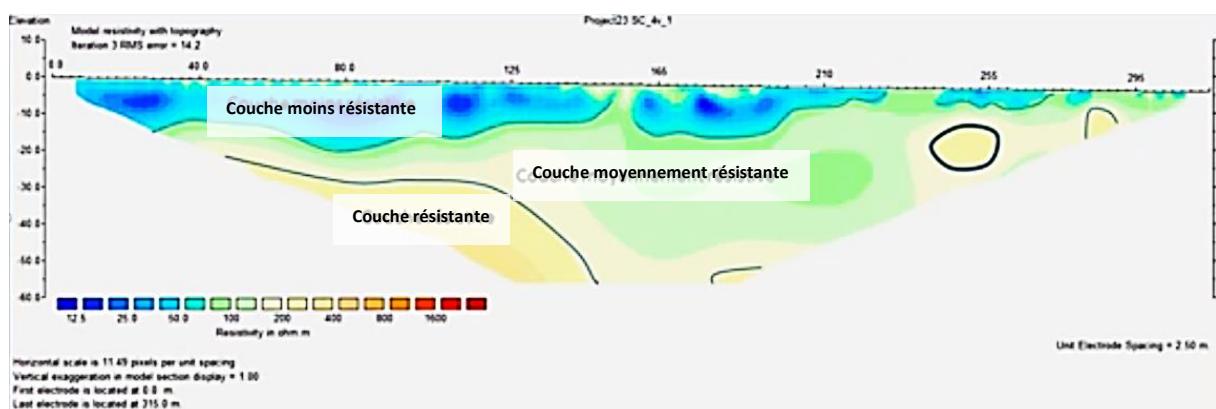


Figure 16 : Coupe géo électrique ou pseudo-section

### III. 1. 7. Qualité du modèle RMS

Chaque pseudo-section de résistivités calculées est associée avec une valeur RMS. Le processus d'inversion du programme essaie de réduire la différence entre les valeurs des résistivités apparentes mesurées et les résistivités apparentes calculées par le programme en ajustant les valeurs de résistivités associées à chaque bloc du modèle de résistivité vraie. La mesure de cette différence est donnée par le facteur appelé RMS ‘Root-Mean-Squared). Un modèle ayant un RMS inférieur à trois est acceptable.

Certaines fois, le modèle ayant l'erreur RMS la plus basse peut montrer des variations de résistivités dans le modèle qui soient irréalistes et n'est pas géologiquement interprétable. La meilleure approche est de choisir le modèle à partir duquel la RMS ne change plus significativement. En général, il se situe entre les troisièmes et sixièmes itérations.

### III. 1. 8. Fonction de vraisemblance ou d'incertitude

La fiabilité des tomographies de la résistivité a été calculée par le logiciel Res2dinv. L'erreur  $\varepsilon$  faite sur les valeurs de la résistivité issues de l'inversion, a été utilisée pour déduire la fonction de vraisemblance  $L_p$  à partir de la théorie de l'erreur proposée par Gauss. Cette théorie exprime la loi de densité de probabilité  $\varphi$  par une fonction de la dérivation standard de la distribution  $\sigma$  de l'erreur.

$$L_p = \sigma \sqrt{2\pi} \varphi \quad (29) \quad \text{avec} \quad \varphi(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right) \quad (30)$$

### III. 1. 9. Fonction de sensibilité

La fonction de sensibilité permet de se faire une idée dans quelle mesure les variations de résistivité du terrain influence la mesure du potentiel. Plus la valeur de cette fonction est élevée à proximité des électrodes, plus elle influence la mesure de la différence de potentiel.

La contribution d'un élément de volume de terrain homogène à la différence de potentiel est donnée par Roy & Apparao (1971). Ils définissent la différence de potentiel due à un élément de volume placé en (x, y, z). La différence de potentiel est mesurée entre deux électrodes de potentiel à la surface d'un demi-espace homogène en termes de résistivité selon la fonction.

$$\begin{aligned}
 \Delta V = & \frac{\rho I}{4\pi^2} dz \left[ \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}} \{(x-a)^2 + y^2 + z^2\}^{\frac{3}{2}}} \right. \\
 & - \frac{(x-a) + (x-a-b-c) + y^2 + z^2}{\{(x-a)^2 + y^2 + z^2\}^{\frac{3}{2}} \{(x-a-b-c)^2 + y^2 + z^2\}^{\frac{3}{2}}} \\
 & - \frac{x(x-a-b) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}} \{(x-a-b)^2 + y^2 + z^2\}^{\frac{3}{2}}} \\
 & \left. + \frac{(x-a-b)(x-a-b-c) + y^2 + z^2}{\{(x-a-b)^2 + y^2 + z^2\}^{\frac{3}{2}} \{(x-a-b-c)^2 + y^2 + z^2\}^{\frac{3}{2}}} \right] dx dy \quad (31)
 \end{aligned}$$

Cette fonction permet de mettre en relief l'influence d'un volume unitaire sur la mesure de la différence de potentiel. En l'intégrant en fonction de la profondeur, le calcul des coefficients (EDWARDS, 1977) qui permettent d'inverser les pseudo-sections et d'obtenir des coupes 2D du sous-sol en résistivité et en profondeur.

### III. 2. Approche Géomatique

La géomatique est un terme qui peut paraître complexe au premier abord, mais c'est un outil aux nombreux atouts, devenu incontournable. En terme simple, la géomatique est une combinaison entre les sciences ; les technologies de mesure de la terre ainsi que les technologies de l'information qui vise à faciliter l'acquisition, le traitement et la diffusion des données sur le territoire. La géomatique fait appel aux disciplines suivantes : la cartographie, la topométrie, la géodésie, la télédétection, les systèmes d'information géographique et le système de positionnement global.

#### III. 2. 1. Choix de la télédétection

Grâce aux images satellitaires à très haute résolution (similaire aux images aériennes), il est maintenant possible de réaliser des inventaires de la surface ou même de la subsurface de la Terre à l'échelle de l'individu. L'objectif de ce travail d'étude étant de l'ordre de l'exploitation de la géologie, l'inventaire de la température à la surface de la Terre et l'extraction des linéaments se sont avérés essentiels pour un apport sur la délimitation de champs pegmatitiques. En effet, les données satellitaires ont grandement évolué lors des dernières années tant au niveau de la résolution spatiale (< 1m) qu'au niveau de la résolution spectrale (plus de canaux dans le visible, l'infrarouge, l'hyperspectral et le RADAR). De plus, leurs coûts, disponibilités et

facilités d'acquisition en font une solution de haute qualité pour assurer un monitoring environnemental et ainsi qu'un apport favorable dans le secteur minier. Dès lors, l'identification, le comptage et la localisation de pierres précieuses en affleurement ou en subsurface sont des processus devenus abordables. Cette approche permet dans ce cas d'améliorer la pertinence des zones potentiellement délimitée par l'approche géophysique.

### III. 2. 1. 1. Principe de la télédétection

À l'intérieur du champ de vision, les champs émis ou réfléchis par des objets situés dans l'élément de surface défini par l'angle solide du capteur et son altitude sont recueillis et enregistrés. Ainsi le système est basé sur la trilogie suivante :

- L'émission du signal par l'objet ;
- Le transport de signal à l'observateur ou capteur ;
- La détection de signal et sa transcription en forme aisément lisible par l'homme.

Le processus de la télédétection comporte sept étapes :

- Étape n°1 : Une source d'énergie ou d'illumination (A) est nécessaire puisqu'elle est à l'origine de tout processus de télédétection en illuminant la cible. Ainsi, si le soleil constitue la principale source d'énergie, la télédétection est dite passive. Par contre, si la source est artificielle, la télédétection est dite active.
- Étape n°2 : Il s'agit de l'interaction entre le rayonnement et l'atmosphère (B). Le rayonnement interagit avec l'atmosphère tout au long du trajet source-cible et cible-capteur. C'est le phénomène de filtrage. (Cf. Figure 17)

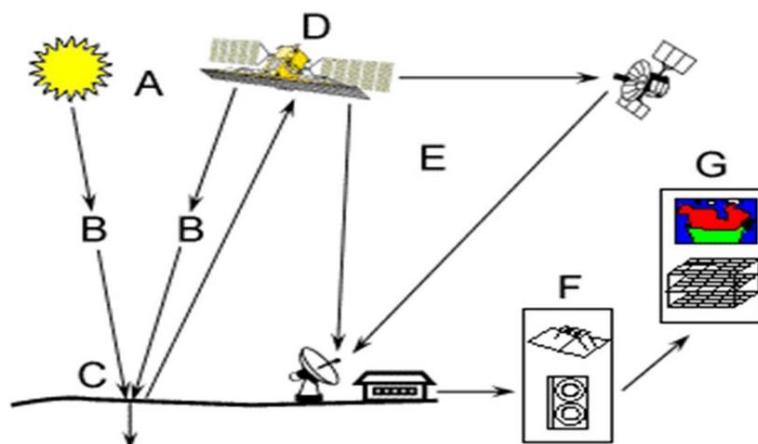


Figure 17 : Principe de la télédétection

- ⊕ Étape n°3 : Interaction avec la cible (C) c'est à dire une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend de la caractéristique du rayonnement et la propriété de la surface de la cible.
- ⊕ Étape n°4 : Enregistrement du signal par le récepteur (D) puisque, après avoir été émise par la cible, l'énergie doit être captée par un capteur embarqué au niveau de satellite pour être enregistrée.
- ⊕ Étape n°5 : Transmission, réception et traitement (E) dans lesquels l'énergie enregistrée est transmise vers des stations de réception. Au niveau de ces stations, les informations sont décodées et enregistrées sous forme d'images numériques ou de photographies. (Cf. Figure 18)
- ⊕ Étape n°6 : Interprétation et analyses (F) car une interprétation visuelle et numérique est nécessaire pour extraire toute information concernant la cible.
- ⊕ Étape n°7 : Applications (G) qui est la dernière étape consistant à utiliser l'information obtenue pour caractériser la cible étudiée afin d'obtenir de nouvel aspect et de résoudre certains problèmes.

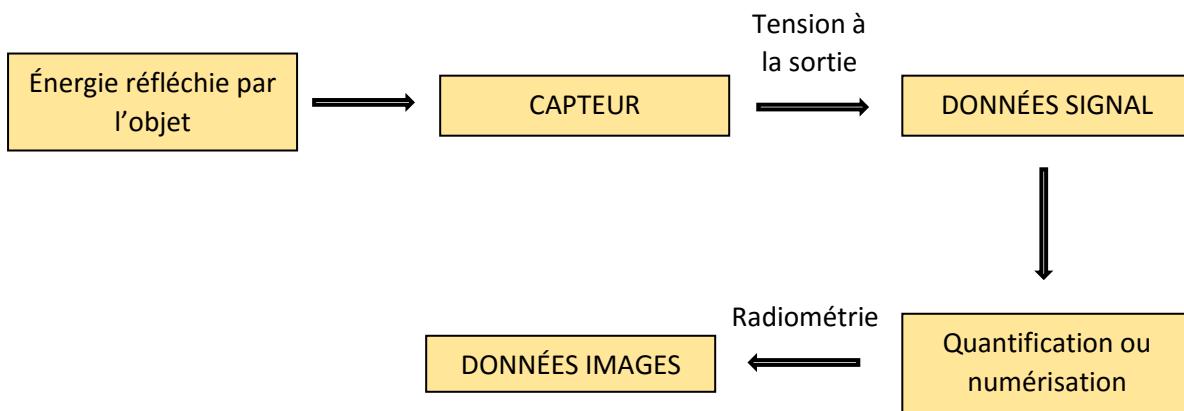


Figure 18 : Principe d'acquisition de données

### III. 2. 1. 2. Principe de la composition colorée

Les compositions colorées permettent de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets. Elles sont fréquemment utilisées pour faire ressortir les différents types de surface sur les images multispectrales ou mettre en évidence certains phénomènes environnementaux, comme les feux de forêts, les vents de sable, les glaces de mer, etc. En traitement de l'imagerie numérique, la couleur sert avant tout à distinguer les différents objets présents dans les images et ainsi faciliter l'interprétation des images. On peut utiliser un

nombre restreint de couleurs si l'on veut seulement mettre en avant quelques objets dans une image. Mais la plupart du temps, et notamment lorsqu'on travaille avec des compositions colorées, on manipule un très grand nombre de couleurs. Lorsqu'on réalise une composition colorée en combinant deux ou trois bandes spectrales, l'objectif est bien de tirer le maximum d'information de l'image et de rendre l'analyse et l'interprétation plus aisées. (UVED, 2008)

Selon les applications, on peut être amené à effectuer différentes compositions colorées :

- ✚ Soit des compositions que l'on appelle "vraies couleurs" si l'on veut rendre les images réalistes. C'est ce que nous observerions si nos yeux étaient à la place du capteur satellitaire.
- ✚ Soit des compositions "fausses couleurs" qui ne représente pas les couleurs réelles, mais qui ont pour but de mettre en avant certains objets dans une image, à l'instar des images infrarouges fausses couleurs très utilisées pour l'étude de la végétation

Les bandes 5, 6 et 7 du satellite landsat 8 TM (Cf. Tableau 3) ont été combinées en composante rouge-vert-bleu (RVB) pour avoir une composante en fausse couleur qui va être utilisée en tant que base de l'interprétation d'image, puisque celle-ci permet la meilleure combinaison pour une interprétation géologique (NKEMBA, 2001)

Tableau 3 : Les différentes bandes spectrales caractéristiques du satellite Landsat 8 TM

Bandes spectrales	Longueur d'onde	Résolution
Bandes 1 - Aérosols	0.433 – 0.453 µm	30 m
Bandes 2 - Bleu	0.450 – 0.515 µm	30 m
Bandes 3 - Vert	0.525 – 0.600 µm	30 m
Bandes 4 - Rouge	0.630 – 0.680 µm	30 m
Bandes 5 - Infrarouge proche	0.845 – 0.885 µm	30 m
Bandes 6 - Infrarouge moyen 1	1.560 – 1.660 µm	30 m
Bandes 7 - Infrarouge moyen 2	2.100 – 2.300 µm	30 m
Bandes 8 - Panchromatique	0.500 – 0.680 µm	15 m
Bandes 9 - Cirrus	1.360 – 1390 µm	30 m
Bandes 10 - Infrarouge moyen	10.30 – 11.30 µm	30 m
Bandes 11 - Infrarouge moyen	11.50 – 12.50 µm	30 m

La classification a été effectuée sur l'image multi-bande au niveau de la zone d'étude pour définir une série de classes correspondant aux matériaux à surface spectrale incluant l'aspect des pegmatites. La série de classe seront superposée aux affleurements de pegmatites (ALTP) constatés lors de la descente sur terrain en tant que vérification et validation.

### III. 2. 1. 3. Principe du ratio de bandes

Le ratio de bande est une technique dans laquelle les valeurs numériques en luminosité d'une bande sont divisées par celles d'une autre bande. Cette technique améliore le contraste et le rehaussement d'information composante pour une suppression des informations inutiles telles que la fluctuation de la surface terrestre et l'ombrage causé par les ombres topographiques de surface. Cela permet ainsi de faire ressortir des aspects caractéristiques du sol qui ne pourraient pas être distinguées au niveau de données brutes. (Van der Meer, 2004 ; Ali et Pour, 2014).

La sélection des bandes découle de la réflectance spectrale et de la position des bandes d'absorption de minéral ou d'assemblage de minéraux à cartographier. Dans le cas du satellite landsat 8 TM, plusieurs auteurs se réfèrent sur les ratios de bandes suivants à des fins géologiques, usuellement utilisés pour la caractérisation lithologique (Sabins, 1999 ; Han T. et Nelson, 2015 ; Mwaniki, M. W., Moeller, M. S., & Schellmann, G., 2015) :

- 4/2 : Oxyde de fer
- 6/7 : Roches riche en hydroxyle
- 7/5 : Minéraux riches en argile
- 6/5 : Minéraux ferreux

Le ratio de bande de Kaufmann a été opté pour cette étude afin de rehausser la distinction lithologique puisqu'il confère une représentation plus pertinente de la lithologie granitique caractéristique des pegmatites. Pour se faire, l'image en RVB (7/5, 5/4, 6/7) a été créée (Ali et Pour, 2014).

### III. 2. 1. 4. Principe de l'ACP

L'Analyse en composantes principales (ACP) est une technique utilisée pour rehausser et séparer certaines signatures spectrales depuis l'arrière-plan d'une image satellitaire (Moradi, M., Basiri, S., Kananian, A. & Kabiri, K., 2015). L'ACP consiste à la transformation linéaire appliquée sur des données multidimensionnelles fortement en corrélation telle que l'imagerie multispectrale qui présente une apparence pour différentes bandes, causant la redondance (haute corrélation de bandes spectrales). Ainsi, l'ACP se base sur une technique statistique multivariée qui sélectionne les combinaisons linéaires de variables qui ne sont pas en corrélation et, en ce sens, chacun des combinaisons linéaires successivement extraites, ou composante principale, présente une moindre variance. Le nombre de composantes principales produites est égale au nombre de bandes spectrales en entrée.

La première composante principale contient la plupart de la variabilité des données et met en relief les caractéristiques que toutes les bandes d'entrée ont en commun. Ce dernier présente ainsi la majorité des informations structurelles. La première composante correspond à un vecteur en direction des pixels conférant une variance maximale. La seconde composante est celle qui contient le plus de données variables après la première. La troisième est la troisième à avoir le plus de variabilité et est orthogonal aux deux premières. Les autres composantes ont une variabilité moindre (Moradi, M., Basiri, S., Kananian, A. & Kabiri, K., 2015).

Les trois premières composantes contenant le plus de variance de données ont été combinées en une composante en RVB (CP 1, CP 2, CP 3) et cela est très utile au rehaussement de la caractérisation lithologique.

### III. 2. 1. 5. Principe de l'identification des linéaments

Les linéaments sont des alignements structuraux de dimension variée correspondant à un accident de l'écorce terrestre dont l'influence se fait sentir sur des millions d'années au cours des phases tectoniques. Ils s'identifient typiquement en présence de vallée, de ligne de côte droite ou une colline formée à partir d'un alignement de failles ou de plis, voire une combinaison de tous ces éléments. Des zones de fractures, des zones de cisaillement et, particulièrement dans le cadre de cette étude, des intrusions ignées, en l'occurrences représentatives de gîte de pegmatite, peuvent également donner lieu à des linéaments.

L'extraction de ces derniers s'est effectuée suivant deux étapes :

⊕ Étape n°1 : « Aperçu de la densité des linéaments »

L'aperçu s'est obtenu à travers l'application d'une composition colorée c'est-à-dire l'impression de couleurs selon le principe des couleurs additives. Par analogie avec les émulsions satellites, pour obtenir une composition colorée correspondant à la cible qui est le linéament, la composition Rouge Infrarouge moyen 2, Vert Infrarouge moyen 1 et Bleu Vert (ou  $RVB=7, 6, 3$ ) est effectuée pour le cas d'une image Landsat 8 TM. Il en résultera une image caractéristique identifiant la densité des linéaments à travers la couleur bleue violacée qui vire au noir. (GIRARD M. C. & GIRARD C. M, 2010)

⊕ Étape n°2 : « Identification par vectorisation des linéaments »

Pour identifier minutieusement les linéaments, une analyse en composantes principales a été effectuée pour avoir le plus d'informations possibles. L'analyse en composantes principales est une technique efficace pour accentuer une image multispectrale pour des fins d'interprétation géologique (Biémi et al., 1991). Elle permet de réduire l'information contenue dans plusieurs bandes, parfois hautement corrélées d'où redondance de l'information en un nombre plus restreint de composantes. Celles-ci représentent généralement jusqu'à 97% de la variance totale de l'ensemble des données originales (Deslandes, 1989)

Dans ce travail d'étude, les composantes principales ont été calculées à partir de 7 bandes spectrales de Landsat 8 TM. La première composante a été optée pour l'extraction des linéaments puisqu'elle contient le plus d'informations possibles.

L'exploitation de cette première a permis l'identification précise de des linéaments un rehaussement par filtrage de l'image. Le filtrage est une technique visant à éliminer le bruit contenu dans les données, le bruit étant défini comme toute donnée non utile, qui masque l'information. Plus précisément, le filtrage spatial permet de modifier la valeur numérique d'un pixel selon sa relation avec les valeurs des pixels voisins. Le niveau de gris de chaque pixel à l'intérieur de la fenêtre mobile sur l'image est multiplié par la valeur correspondante de la matrice spécifique. La valeur finale attribuée au pixel central représente la somme de ces produits divisé par le nombre d'éléments spécifiques. (Moore, 1986)

### III. 2. 1. 6. Matériels utilisés

Pour l'acquisition des données requises pour le traitement d'image, le site web USGS.gov a été d'une grande utilité notamment pour le téléchargement de l'image brute recueillie dans 11 bandes spécifiques. Le satellite de capture est le Landsat 8 TM.

Pour le prétraitement et le traitement des données de la télédétection par composition colorée, ratio de bandes et analyse en composantes principales, les logiciels ENVI 5.1 et ArcGIS 10 ont été optés. Pour ceux des données de l'identification des linéaments, les deux premiers logiciels ont été couplées avec les logiciels PCI Geomatica 2017 et Rockwork 16 pour assurer une extraction automatique des linéaments et de leurs caractéristiques.

### III. 2. 2. Choix du SIG

Une grande partie de cette étude a été faite par le biais de Système d'Information Géographique ou SIG, permettant de produire de l'information, de l'organiser, de la représenter et de l'interpréter. Il permet l'exploitation des données existantes et la création d'un inventaire des éléments cibles. D'abord utilisés en photo-interprétation, il permet de géolocaliser les zones favorables au gîte de pegmatites à partir de l'observation des orthophotos. De plus, ils rendent possible l'uniformité d'un traitement spatial pour toutes informations considérées. Puis, une fois toutes les variables créées, organisées et géoréférencées, elles peuvent être représentées. Enfin, la superposition de ces informations peut être exploitée.

### III. 2. 2. 1. Principe du SIG

Le système d'information géographique est assimilé à un matériel informatisé servant à l'acquisition, à la gestion, à l'analyse et à la représentation des données à référence spatiale. Dans un sens plus large, il s'agit de l'ensemble de processus nécessaires pour gérer des informations géoréférencées. (Cf. Figure 19)

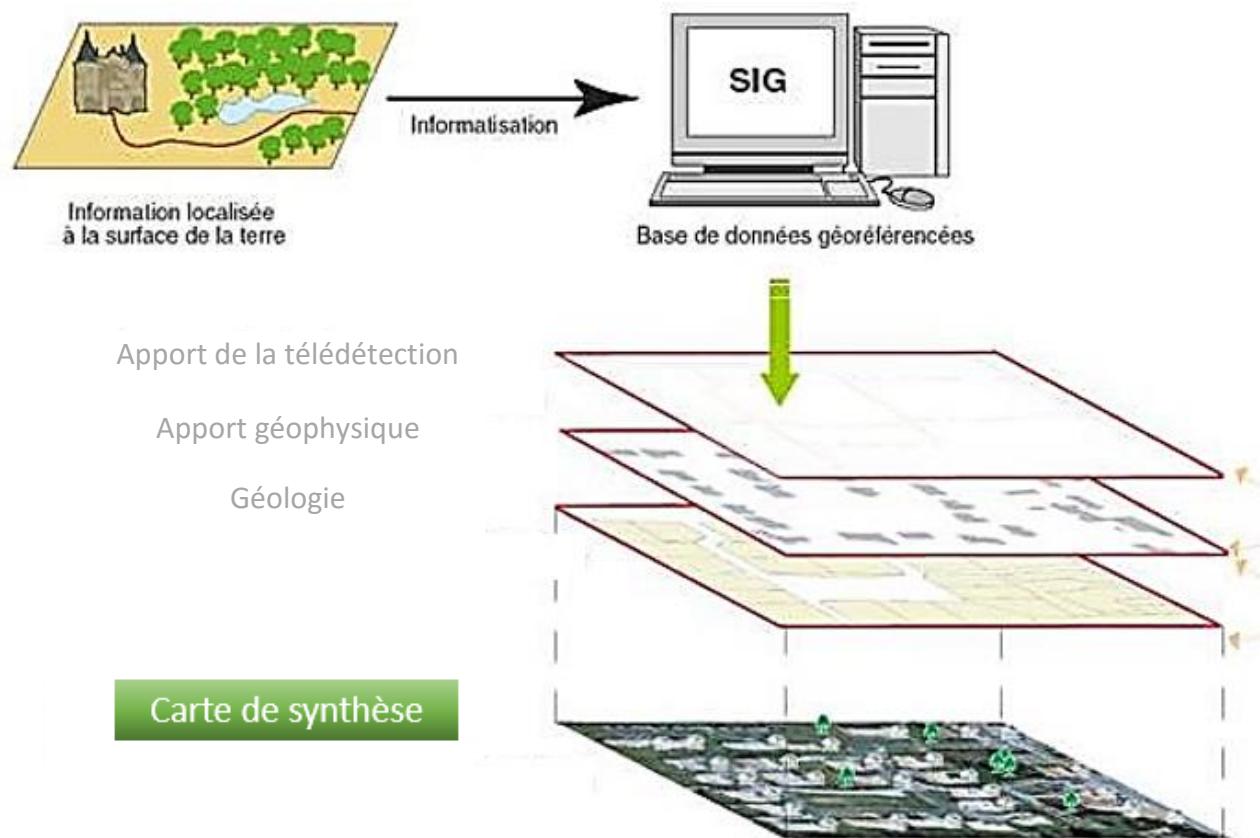
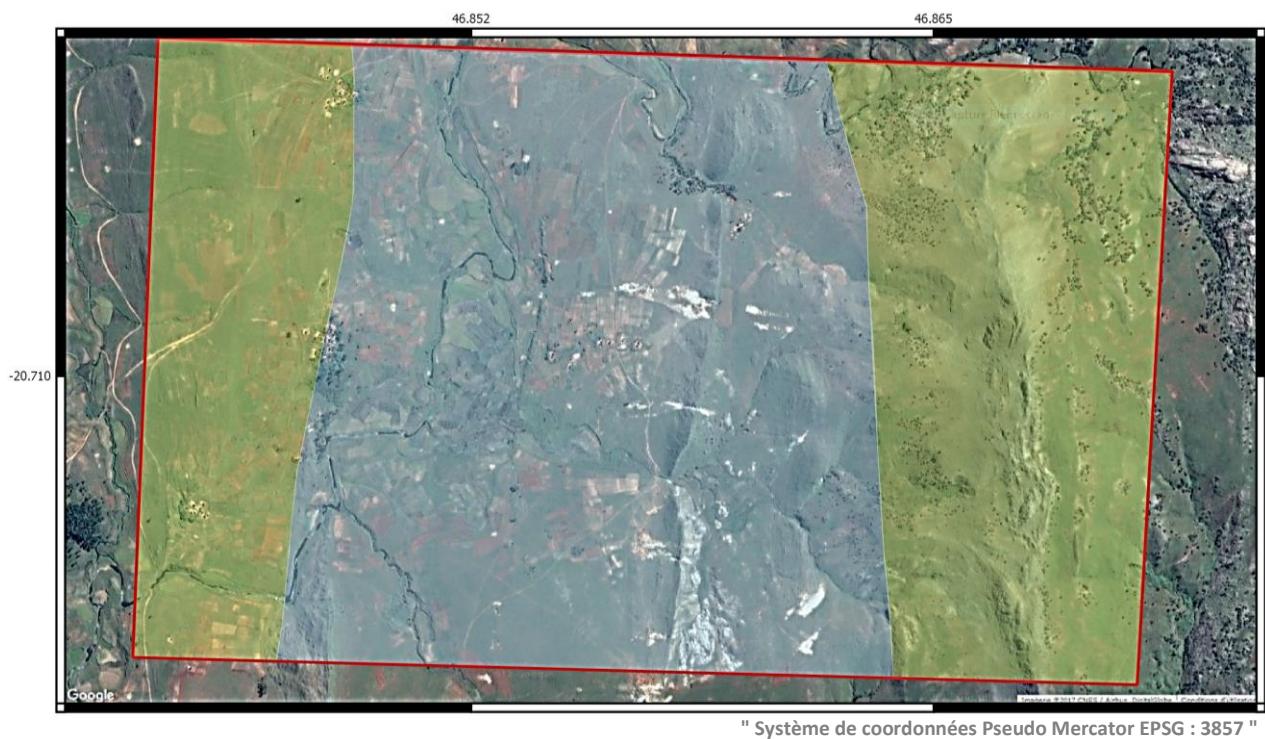


Figure 19 : Principe du SIG

La fiabilité et les possibilités du SIG sont complètement dépendantes du succès de cette première étape qui consiste à rechercher, acquérir et valider les données avant de les introduire dans la base de données. Les données sont acquises et intégrés dans un logiciel SIG soit par digitalisation ou soit par scannage. Dans ce cas d'étude de pegmatites, la méthode d'acquisition par digitalisation a consisté à dessiner en mode vecteur les entités sollicitées notamment la digitalisation des figures qui ont résulté de la partie télédétection en se calant sur le fond de ces derniers. Par contre, le scannage ou vectorisation s'est basé sur le scan des données non géoréférencées qui s'est effectué à travers le scannage de la figure géologique de la zone d'étude. (Cf. Figure 20)



## Légende

■ Délimitation de la zone d'étude

0 250 500 750 1000 m



### Géologie

■ Marbre dolomitique

■ Schiste et Gneiss pasamitique

Figure 20 : Carte géologique de la zone d'étude

### III. 2. 2. 2. Matériels utilisés

La digitalisation tout comme le géoréférencement ont été effectués par le biais du logiciel Quantum GIS 2.18. Ce dernier a pu intégrer non seulement le processus d'acquisition des données mais aussi leur traitement et leur représentation.

### III. 2. 2. 3. Traitement des données

La simplicité et l'unicité de ce format permettent une continuité dans les traitements et la susceptibilité d'être automatisés. Ainsi, le principe de la superposition des figures sujettes, qui sont notamment la figure de champs pegmatitiques extraits des produits de la télédétection, la figure d'identification des linéaments, la figure géologique et la figures de la délimitation géophysiques des zones potentielles, est que chaque cellule de chacune des couches de variables

contient la valeur informative de la variable en un point de l'espace ; puis la somme des valeurs informatives de chaque variable est calculée pour chaque cellule. (Figure 21)

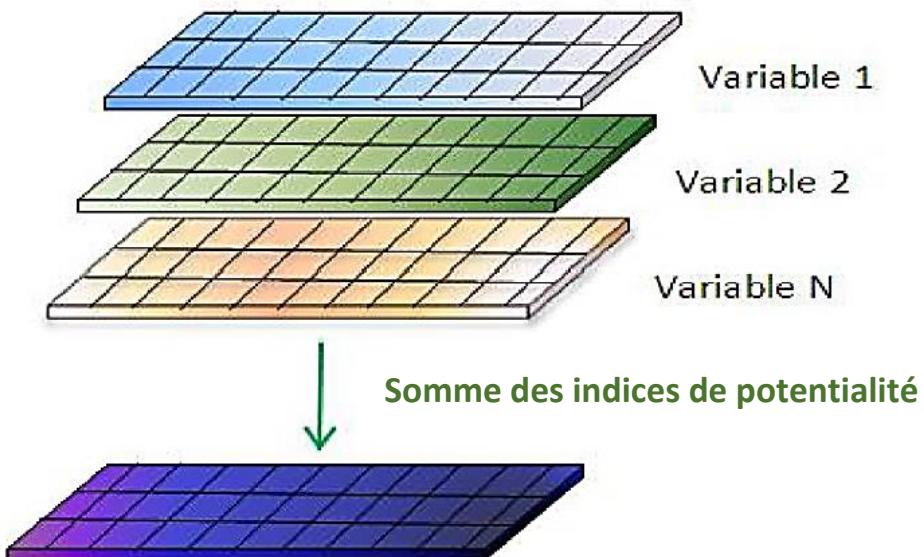


Figure finale de champs pegmatitiques

Figure 21 : Principe de superposition de cartes sur un logiciel SIG

Il faut malgré tout être attentif aux choix que le logiciel fait par défaut. Par exemple, lors de la création d'un raster, il attribue une taille de pixel qui peut ne pas être appropriée ; il faut alors choisir en fonction de la précision souhaitée.

## Chapitre IV. Résultats et discussions

Le quatrième chapitre est consacré aux résultats et interprétations. La synthèse sera tirée des résultats de l'interprétation géoélectrique, de l'interprétation de l'apport de la prospection géophysique, de celui de la méthode géomatique, de la géomorphologie et de la géologie.

### IV. 1. Apport de la prospection géophysique

Cette partie comporte trois volets que sont la présentation des travaux, l'interprétation des résultats ainsi que la localisation de panneaux au niveau du site étudié.

#### IV. 1. 1. Présentation des travaux

Au total, 11 panneaux électriques ont été disposés. Ces panneaux sont nécessaires à l'étude des caractéristiques hydrogéologiques et géomorphologiques de la zone d'étude afin de déterminer les comportements hydrogéologiques et de définir les points probables pour l'extraction minière.

Les panneaux électriques permettent d'obtenir une image en 2D de l'encaissant et de proposer des points d'extraction de la cible.

L'emplacement du centre du dispositif a été localisé à l'aide d'un récepteur GPS. La liste des panneaux électriques réalisés est figurée dans le tableau 4.

Tableau 4 : Emplacement des panneaux électriques réalisés

Panneaux électriques	Localisation du centre du panneau suivant le système de coordonnées WGS 84/UTM Zone 38S
P1	X = 693312 m Y = 7708990 m
P 2	X = 693302 m Y = 7708977 m
P 3	X = 693283 m Y = 7708983 m
P4	X = 693276 m Y = 7708979 m

## RÉSULTATS & DISCUSSIONS

P5	X = 693284 m Y = 7708983 m
P6	X = 693044 m Y = 7708964 m
P7	X = 693041 m Y = 7708961 m
P8	X = 693063 m Y = 7708949 m
P9	X = 693438 m Y = 7708961 m
P10	X = 693502 m Y = 7708958 m
P11	X = 693179 m Y = 7708976 m

,j

### IV. 1. 2. Interprétation des résultats

La coupe géoélectrique représente les pseudo-sections de la résistivité obtenues après le traitement au logiciel Res2dinv. Pour l’interprétation des coupes géoélectriques, onze panneaux électriques ont été réalisés dans cette étude, mais dans cet ouvrage, nous allons prendre les trois premiers profils et les autres sont mis en annexe. Il y a les formations à forte, à moyenne et faible résistivité. Notre cible se situe juste au-dessus de la formation à forte valeur de résistivité et de chargeabilité.

### IV. 1. 3. Localisation des panneaux

La zone du levé géophysique est morphologiquement plane. Le plan de masse suivant montre l’emplacement des travaux de prospection électrique dans le Fokontany Ambalamahatsara. (Figure 22)

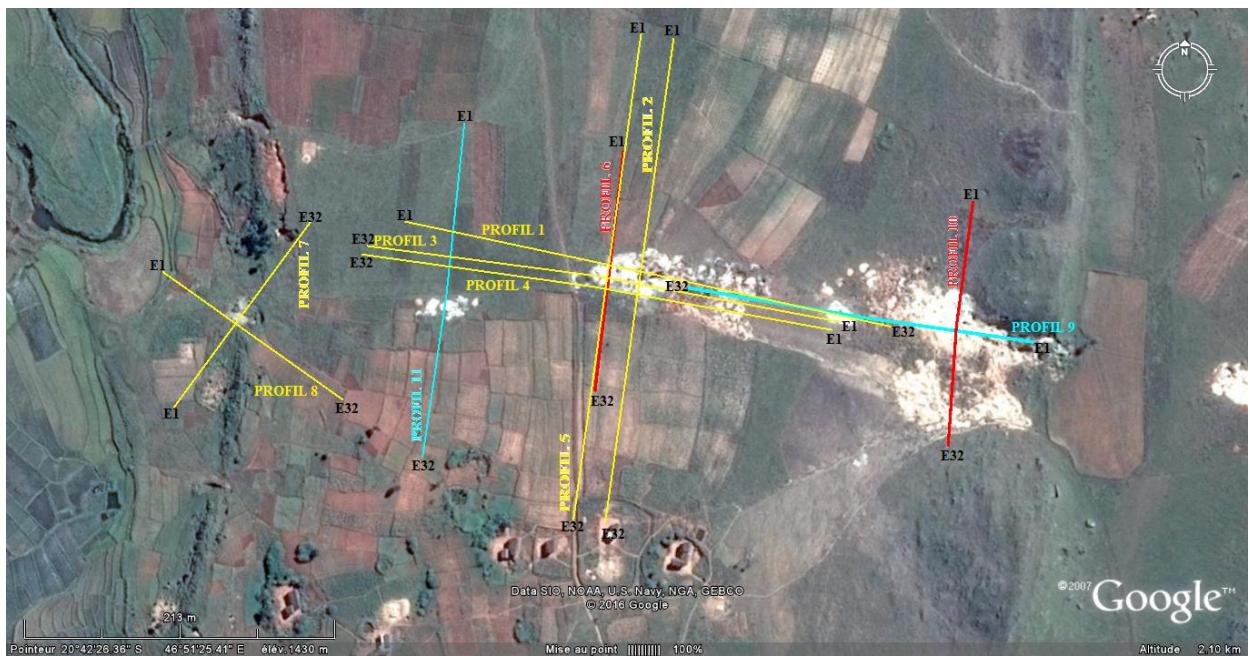


Figure 22 : Plan de masse des profils électriques

#### IV. 1. 4. Profil géoélectrique n°1

Pour caractériser les structures du sous-sol au niveau de la carrière, le premier panneau électrique utilise le dispositif Wenner. La direction du panneau est Ouest-Est. La distance inter-electrodes est de 10 m pour avoir une longueur de 310 m et de profondeur d'investigation est à peu près de 50 m. (Cf. Figure 23)

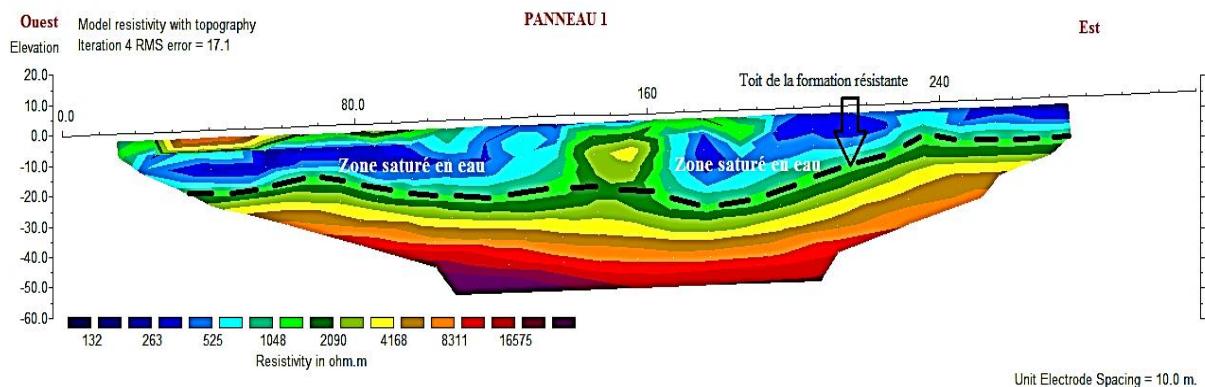


Figure 23 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°1

Les observations qui suivent ont été tirées de la coupe géoélectrique sujette, à savoir :

## RÉSULTATS & DISCUSSIONS

- ⊕ Une couche latéritique superficielle constitue la première couche, elle est représentée par la couleur bleu verte à la couleur jaune verte dans la coupe de résistivité, la valeur de résistivité est comprise entre 500 et 2500  $\Omega\text{m}$ .
- ⊕ Ensuite, une formation conductrice de résistivité comprise entre 50  $\Omega\text{m}$  et 200  $\Omega\text{m}$  est identifiée. Elle doit avoir une épaisseur de l'ordre de 10m et elle constitue la nappe libre rencontrée dans notre zone d'étude.
- ⊕ En dernier, la formation résistante de résistivité supérieure à 3000  $\Omega\text{m}$  (jaune – violet), qui apparaît quasiment horizontale dans la partie NO du profil, est de forme allongée et se trouve à une profondeur d'environ 20 m. En tenant compte de la géologie et des affleurements superficiels dans la zone environnante, elle correspondrait à des granites et à des migmatites qui sont probablement le socle cristallin.

Succinctement, la formation au niveau de ce premier panneau est caractérisée par des roches granitiques et des migmatites qui se trouvent à 20 m de profondeur.

### IV. 1. 5. Profil géoélectrique n°2

Comme le premier panneau électrique, le dispositif Wenner est utilisé. La direction du panneau est Nord-Sud mais le terrain est pratiquement plat. La distance inter électrodes est de 10 m pour avoir une profondeur d'investigation de 50 m. (Cf. Figure 24)

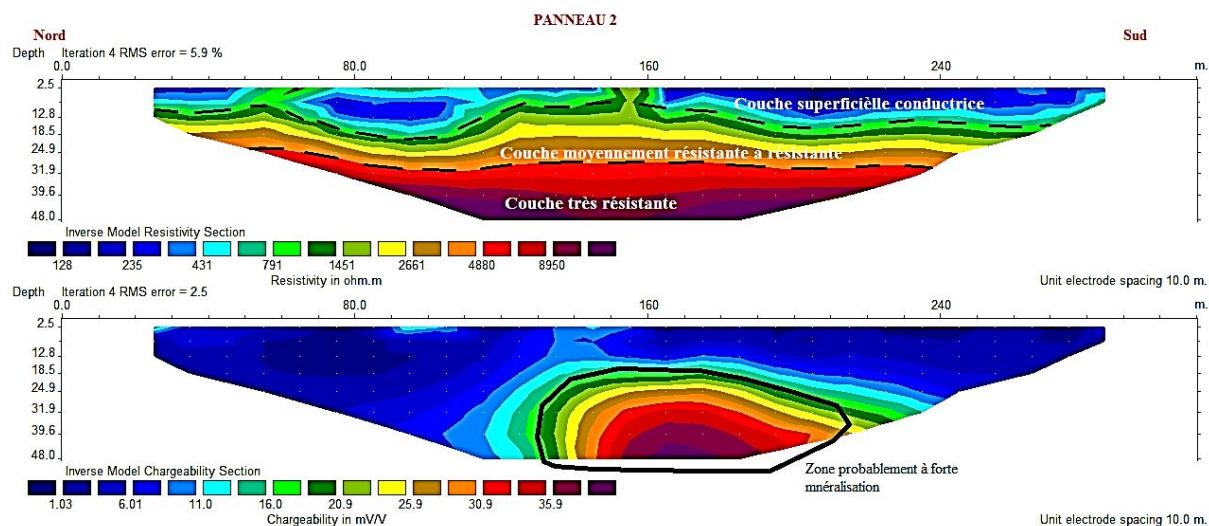


Figure 24 : Coupes géoélectriques obtenues à partir du panneau électrique n°2

## RÉSULTATS & DISCUSSIONS

Trois successions de couches ont été remarquées tout au long du profil, à savoir :

- ⊕ Une couche conductrice superficielle, représentée par la couleur bleue verte à la couleur jaune verte dans la coupe de résistivité. Elle est caractérisée par des valeurs de résistivité comprises entre 100 et 400  $\Omega\text{m}$ .
- ⊕ Ensuite, une formation moyennement conductrice, de résistivité comprise entre 400  $\Omega\text{m}$  et 2500  $\Omega\text{m}$  et de 10 m d'épaisseur.
- ⊕ La dernière formation résistante de résistivité supérieure à 3000  $\Omega\text{m}$  (jaune – violet) termine la séquence. Elle se trouve en moyenne à 18 m de profondeur. Une forte valeur de chargeabilité se trouve entre les points d'abscisses  $X = 130$  m et  $X = 210$  m du début de profil. Elle correspondrait à la zone de minéralisation.

### IV. 1. 6. Profil géoélectrique n°3

Le troisième panneau électrique utilise toujours le dispositif Wenner. La direction du panneau est Est-Ouest. La distance inter-électrodes est de 10 m pour avoir une profondeur d'investigation de l'ordre de 50 m. (Cf. Figure 25)

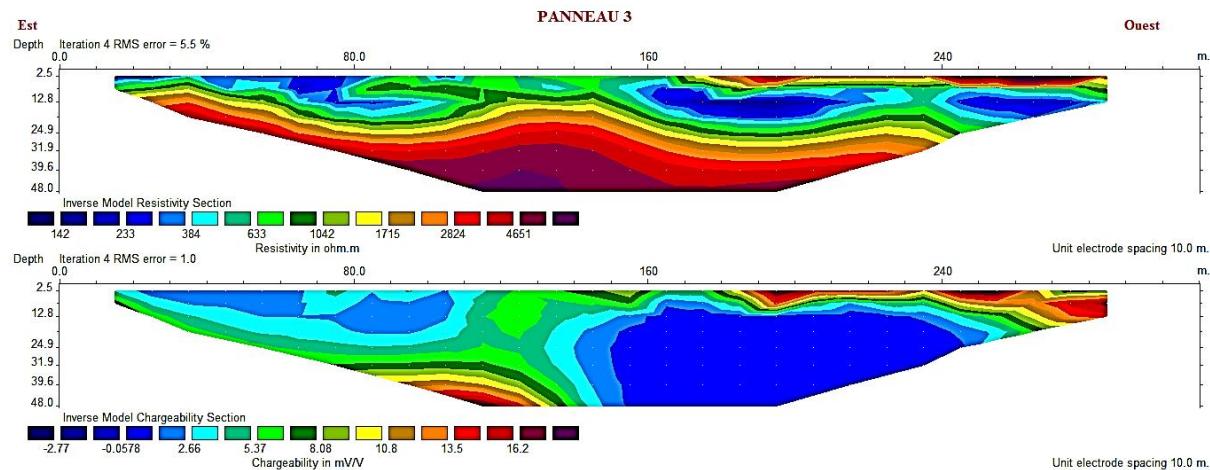


Figure 25 : Coupes géoélectriques obtenues à partir du panneau électrique n°3

Les coupes géoélectriques obtenues montrent globalement des successions de trois couches, à savoir :

- ⊕ La première couche latéritique superficielle, d'une profondeur de l'ordre de 5 m dans la partie Ouest du profil est représentée par la couleur rouge dans la coupe de résistivité. Ses valeurs de résistivité sont comprises entre 1700 et 3000  $\Omega\text{m}$ .

## RÉSULTATS & DISCUSSIONS

---

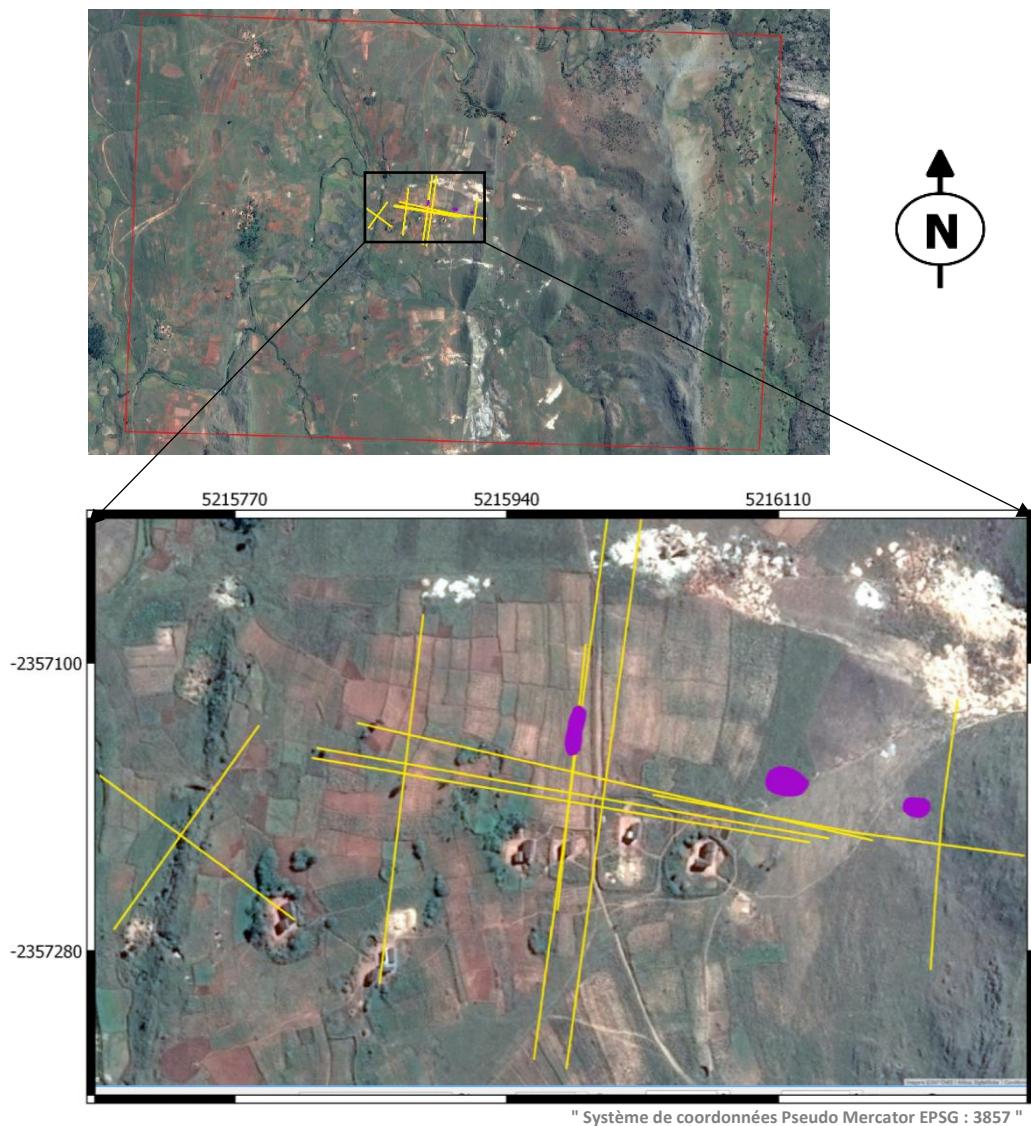
- ⊕ Ensuite, une formation conductrice de résistivité comprise entre 90 et 250  $\Omega\text{m}$ , s'étale tout au long du profil. Elle constitue la nappe libre de la zone d'étude et elle doit avoir une profondeur de l'ordre de 15 m.
- ⊕ La troisième et dernière formation est très résistante. Elle est caractérisée par une valeur de résistivité supérieure à 3000  $\Omega\text{m}$  (jaune – violet). Son toit est d'une forme ondulée et vue la valeur de chargeabilité, la zone autour de l'abscisse  $X = 90\text{m}$  est probable à l'accumulation de pegmatites.

Succinctement, Les profils électriques réalisés ont pu montrer les zones intéressantes susceptibles de contenir les poches de pegmatites mais n'ont pas pu confirmer leur existence.

Ils s'agissent de trois zones potentielles qui sont représentées par le tableau 5 et la figure 26. Elles sont indiquées sur la figure X et sont centrées géographiquement, selon le système de coordonnées UTM Zone 38S, aux coordonnées

Tableau 5 : Emplacement des zones potentielles

Zone	X	Y	Profondeur Estimée
Zone 1	693323 m	7709117 m	~ 40 m
Zone 2	693445 m	7709091 m	~ 30 m
Zone 3	693526 m	7709073 m	~ 25 m



### Légende

- Zones potentielles
- Profils électriques
- Zone d'étude

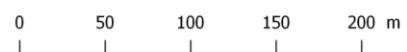


Figure 26 : Carte de délimitation des zones potentielles

La perspective de confirmation de ces trois zones a poussé l'acheminement de ce travail d'étude à faire appel à une autre méthode qui est l'approche géomatique pour plus de pertinence dans la localisation de ces poches. Néanmoins, ces profils électriques nous ont montrés les caractéristiques de la formation aquifère saturée d'eau qui pourrait être un problème lors de l'exploitation de ces poches de pegmatites puisqu'il se pourrait que ces eaux s'infiltrent dans les tranchées à réaliser pendant l'exploitation.

## IV. 2. Apport de la télédétection

Cette partie comporte deux principaux volets que sont l'explicitation des résultats obtenus de la télédétection par composition colorée, la télédétection par ratio de bandes, l'analyse en compositions principales et l'explicitation des apports de l'identification des linéaments.

### IV. 2. 1. Apport de la télédétection par composition colorée

La figure 27 démontre le processus d'extraction des champs pegmatitiques depuis la composition colorée en fausse couleur (bandes 5, 6 et 7) de l'image satellitaire (Landsat 8 TM).

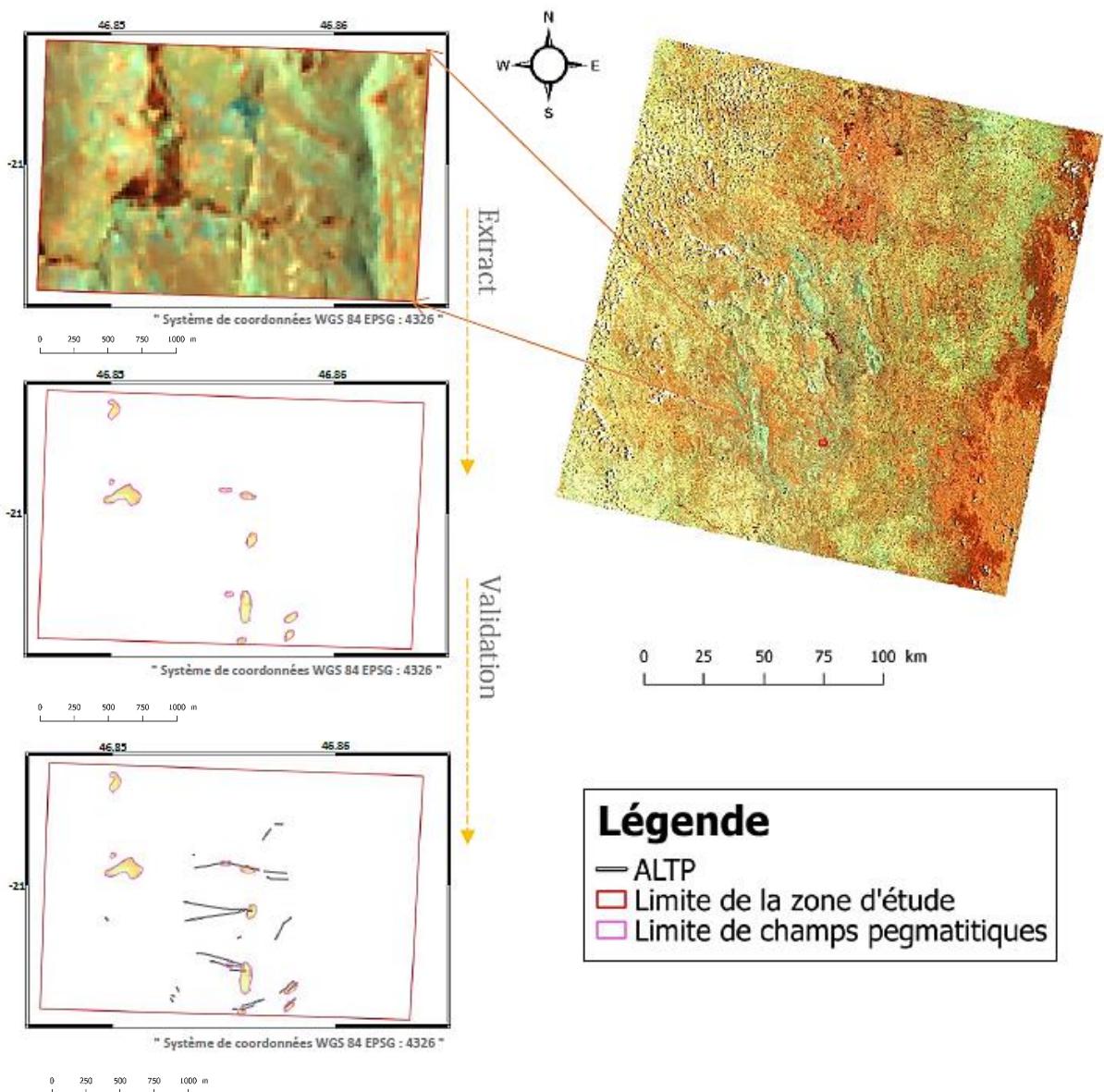


Figure 27 : Extraction des champs pegmatitiques depuis la combinaison en RVB des bandes 5, 6, 7

Cette combinaison de bandes, comprenant la bande d'infrarouge proche (bande 5) et deux bandes d'infrarouges moyens (bande 6 et bande 7), permet une détection à l'échelle régionale des aspects caractéristiques du sol telle que la différenciation d'affleurements de roches par rapport aux végétations. Dans cette figure, les affleurements rocheux présentent une couleur bleu ciel, les zones pourvues de végétation sont en orange et les excavations du sol en noirs. La couleur bleue peut être identifiée comme des affleurements de roches hydrothermiquement altérées. Les pegmatites se présentent quant à elles en couleur orangée qui vire au blanc. Celles-ci ont été extraites par vectorisation et ont été ensuite superposées aux affleurements recueillis lors de la descente pour une validation.

### IV. 2. 2. Apport de la télédétection par ratio de bandes

La figure 28 démontre le processus d'extraction des champs granitiques depuis la composition en RVB du ratio de bandes de Kaufmann (7/5, 5/4, 6/7).

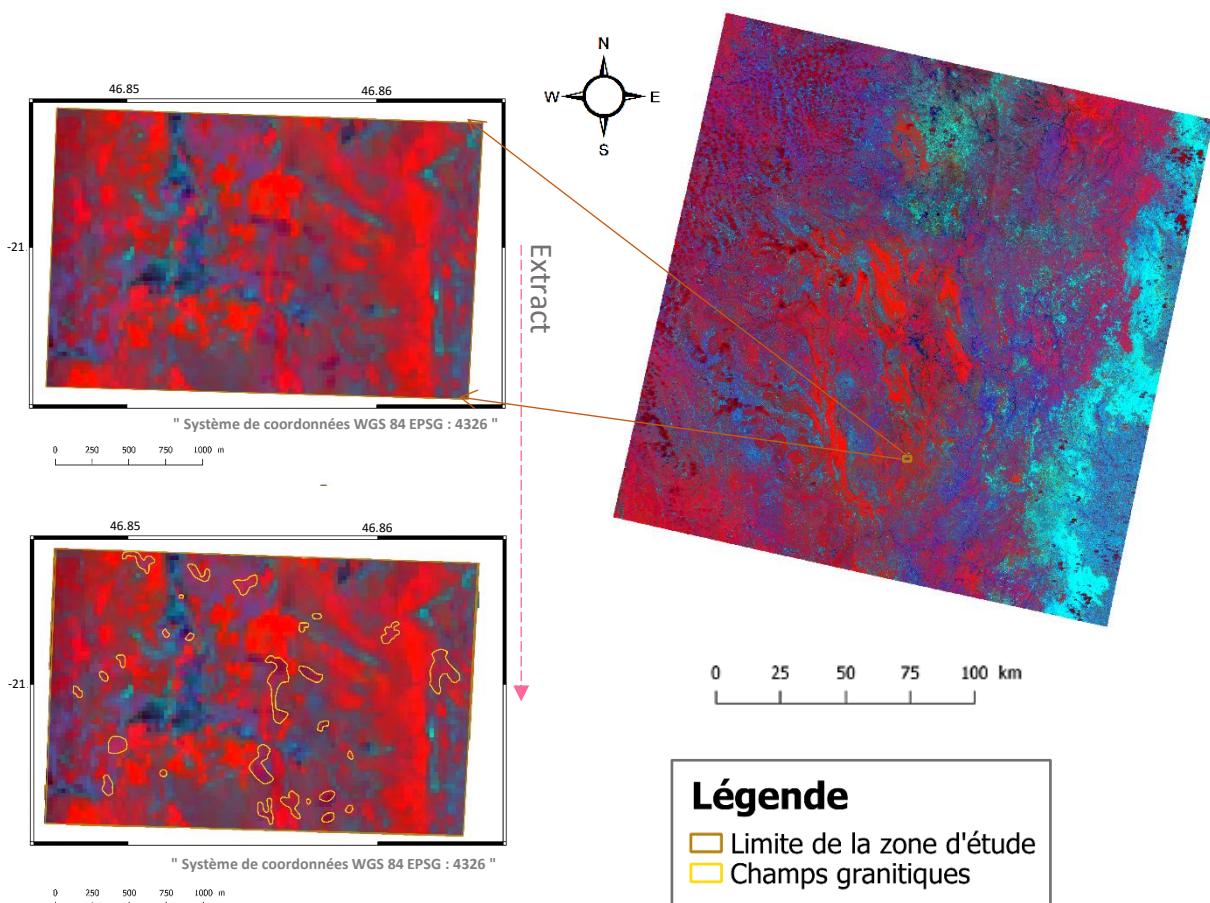


Figure 28 : Extraction des champs granitiques depuis la combinaison en RVB du ratio de bandes de Kaufmann

## RÉSULTATS & DISCUSSIONS

Cette combinaison a été effectuée puisqu'elle s'est avérée être une bonne combinaison à des fins géologiques. Les zones représentées en couleur rose représentent les affleurements granitiques. Les pixels représentatifs de ces derniers seront extraits puisqu'ils favorisent l'incidence de pegmatites. Les métasédiments sont ressortis en vert foncé. La végétation se présente à travers la couleur bleu clair. La couleur rouge est représentative de roches hydrothermiquement altérées et de l'eau dans le cas de la combinaison sujette.

### IV. 2. 3. Apport de l'analyse en composantes principales

La densité de la végétation est un facteur qui limite la détection des champs granitiques prometteurs de pegmatite par ratio de bande. Pour minimiser ce facteur, une technique de minimisation spectrale, telle l'analyse en composantes principales, a été appliquée. La figure 29 représente la combinaison en RVB des trois premières composantes de l'analyse en composantes principales (CP 1, CP 2, CP 3).

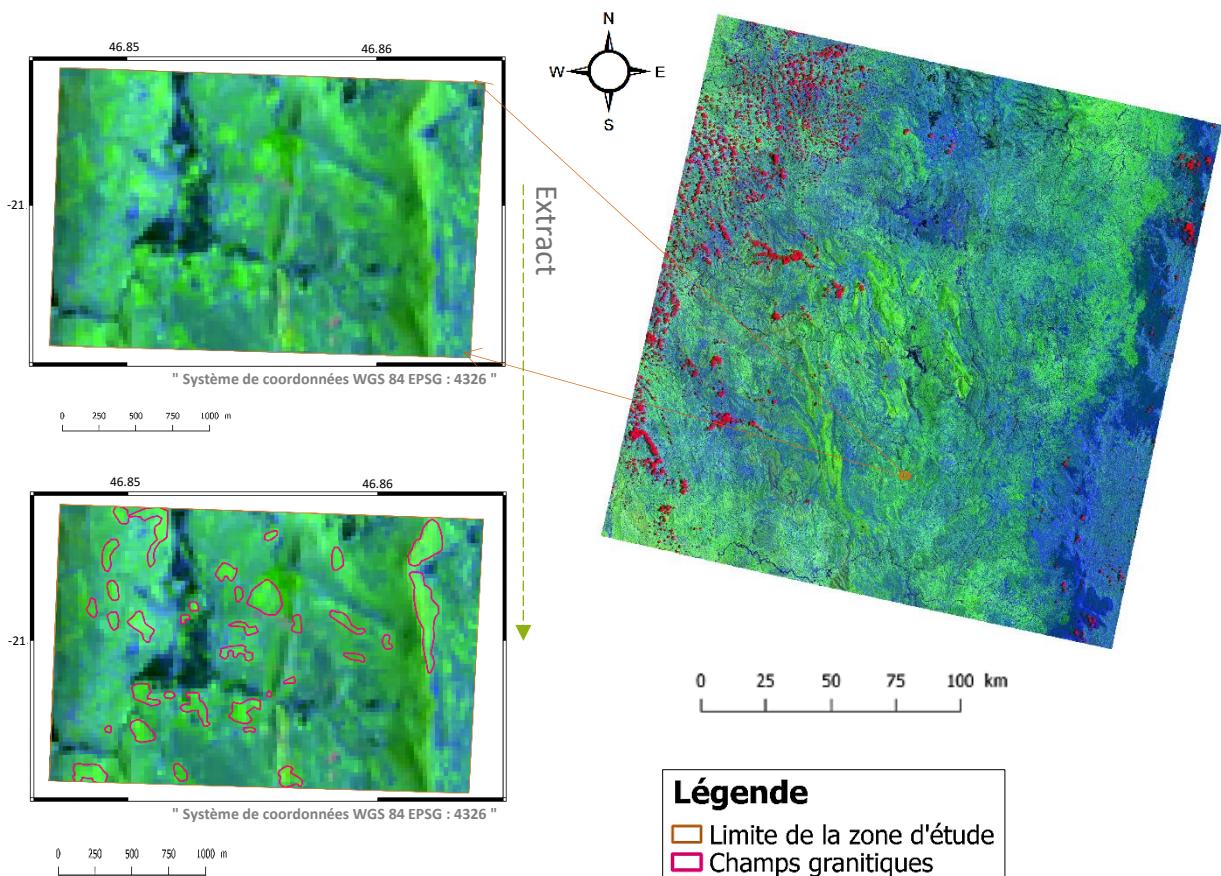


Figure 29 : Extraction des champs granitiques depuis la combinaison en RVB des trois premières composantes de l'ACP

## RÉSULTATS & DISCUSSIONS

La couleur vert jaunâtre a été mise en relief dans cette combinaison puisqu'elle représente les affleurements granitiques s'associant à la susceptibilité d'intrusion pegmatitiques. La végétation, quant à elle, se présente à travers la couleur bleu. Le violet est représentatif des métasédiments.

### IV. 2. 4. Apport de l'identification des linéaments

Les linéaments constituent également un indice révélateur de la cible qui est la gîte de pegmatite. Pour se faire, l'étude de la localisation et des caractéristiques de ces derniers ont été effectuée puis les résultats qui s'en sont découlés ont été interprétés.

#### IV. 2. 4. 1. Aperçu de la densité des linéaments

La figure 30 montre la densité des linéaments à travers l'élaboration d'une image à composition colorée 7, 6 et 3 suivant les canaux rouge, vert, bleu de la chaîne d'image du satellite Landsat 8 TM.

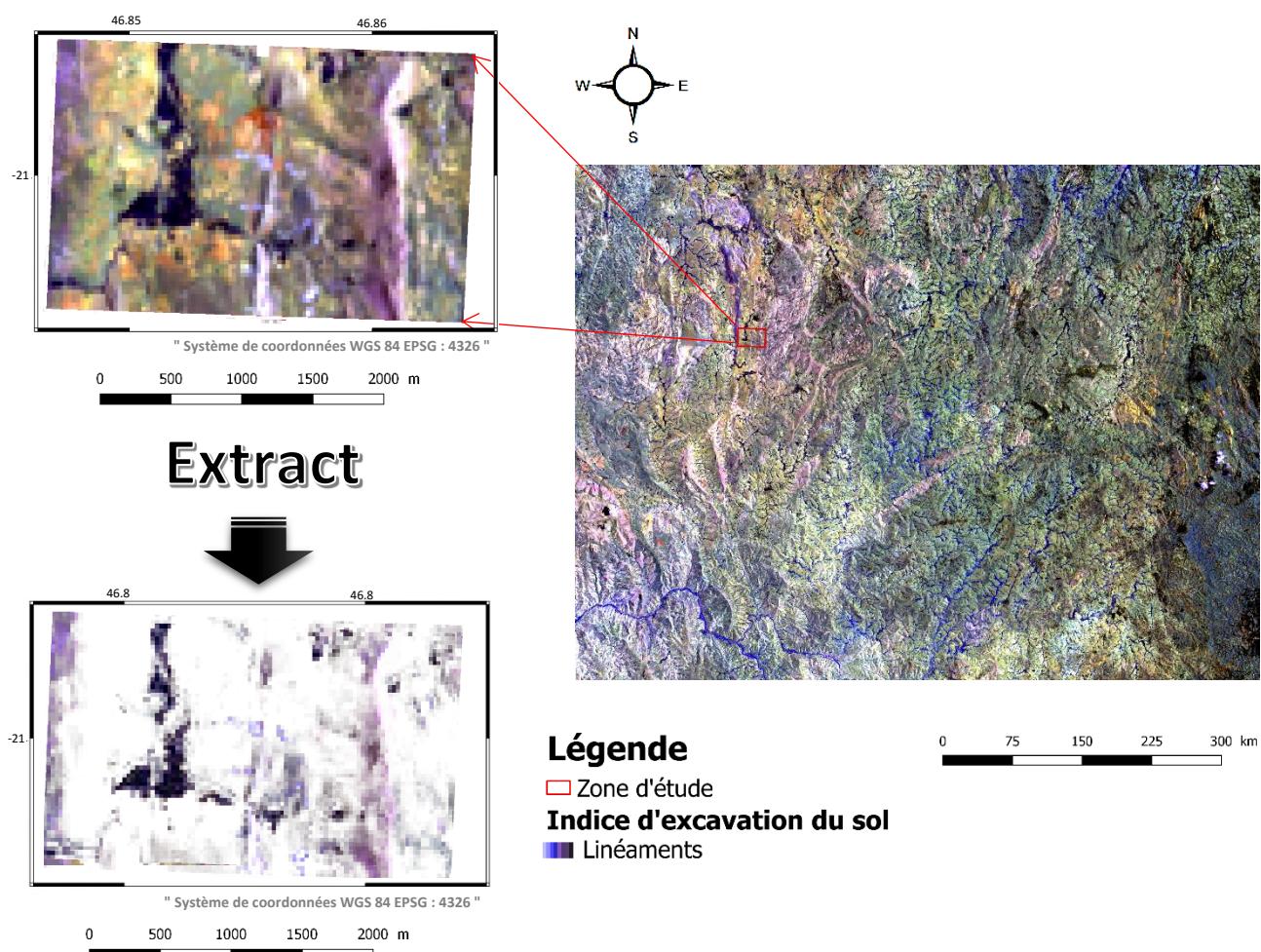


Figure 30 : Aperçu de la densité des linéaments

## RÉSULTATS & DISCUSSIONS

Les linéaments s'identifient à travers la couleur bleu violacé qui tend à être noire. La couleur claire c'est-à-dire le bleu violacé représente de petites excavations du terrain ou bien de faibles accidents de terrains. La couleur sombre, par contre, c'est-à-dire la couleur qui vire au noir représente des accidents de terrains plus amples. La figure sujette permet alors une orientation complémentaire dans l'investigation de gite de pegmatite. La zone d'intérêt se veut être identifiée suivant l'allure de la variation de ces couleurs c'est-à-dire prépondérer la potentialité des pixels assombris par rapport au pixel plus clairs.

### IV. 2. 4. 2. Identification par vectorisation des linéaments

La figure 31 est une figure de vectorisation des linéaments. Elle découle du traitement de la première composante principale de l'analyse en composantes principales de l'image satellitaire sujette.

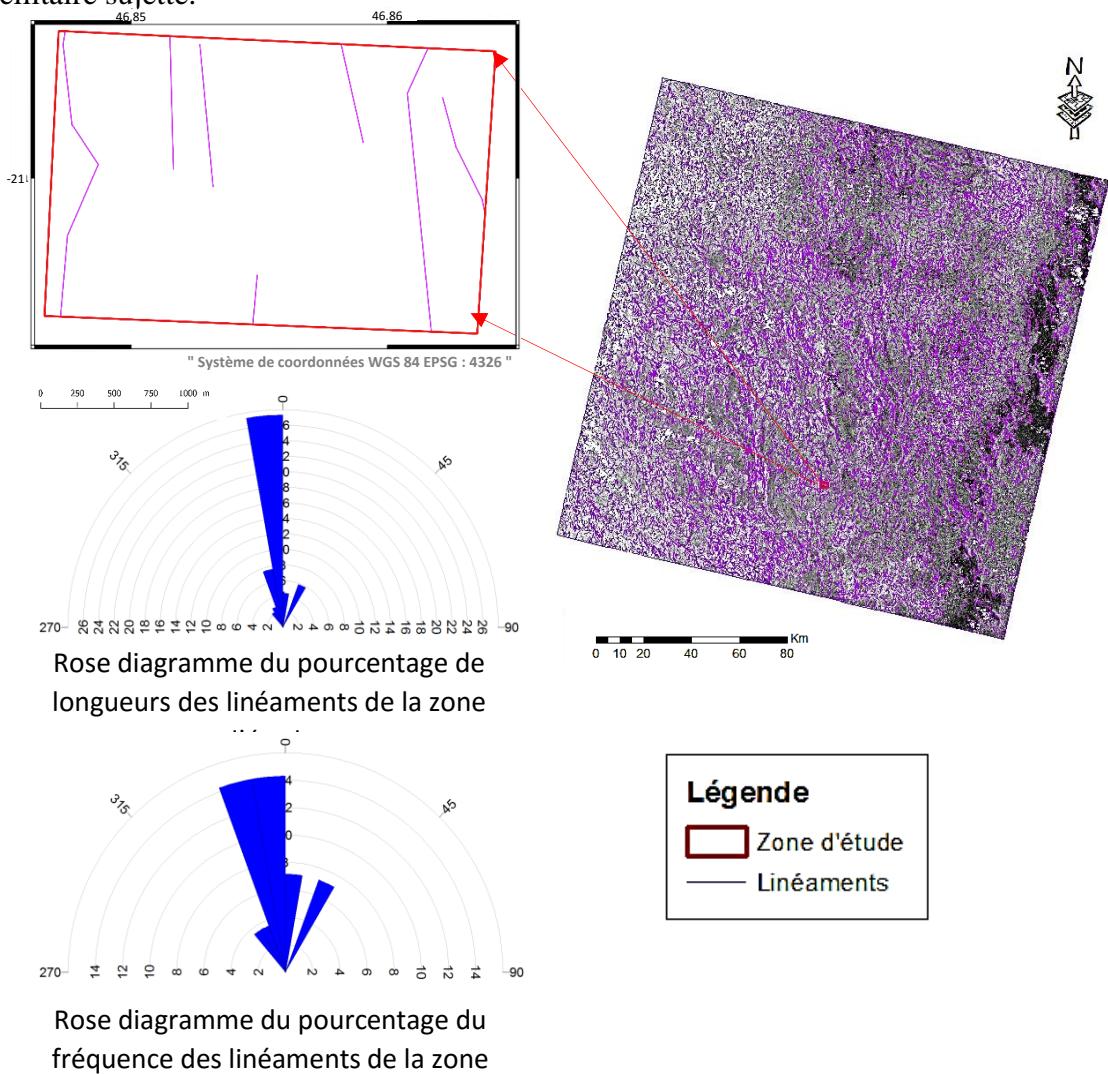


Figure 31 : Identification par vectorisation des linéaments

## RÉSULTATS & DISCUSSIONS

Les linéaments s'identifient à travers la couleur violette. Il est remarqué que ces derniers ont une tendance à s'orienter vers le Nord-Nord-Ouest au niveau de la zone d'étude. La majorité des linéaments de la zone d'étude se retrouve également dans la région N-N-O. De plus, les linéaments qui sont caractérisés par des longueurs importantes se retrouvent dans la partie N-N-O. C'est dans cette optique qu'on oriente les profils géoelectrique dans la direction presque Ouest -Est. Tout porte à dire que la zone d'intérêt se veut être orientée dans la partie sujette.

### IV. 3. Apport du SIG

Le système d'information géographique a joué un rôle fondamental dans ce travail d'étude. Il permet la superposition des résultats des travaux effectués. Tel est le fruit de la superposition des résultats de l'étude géophysique et de celle de la géomatique ; représenté ci-dessous par la figure 32.

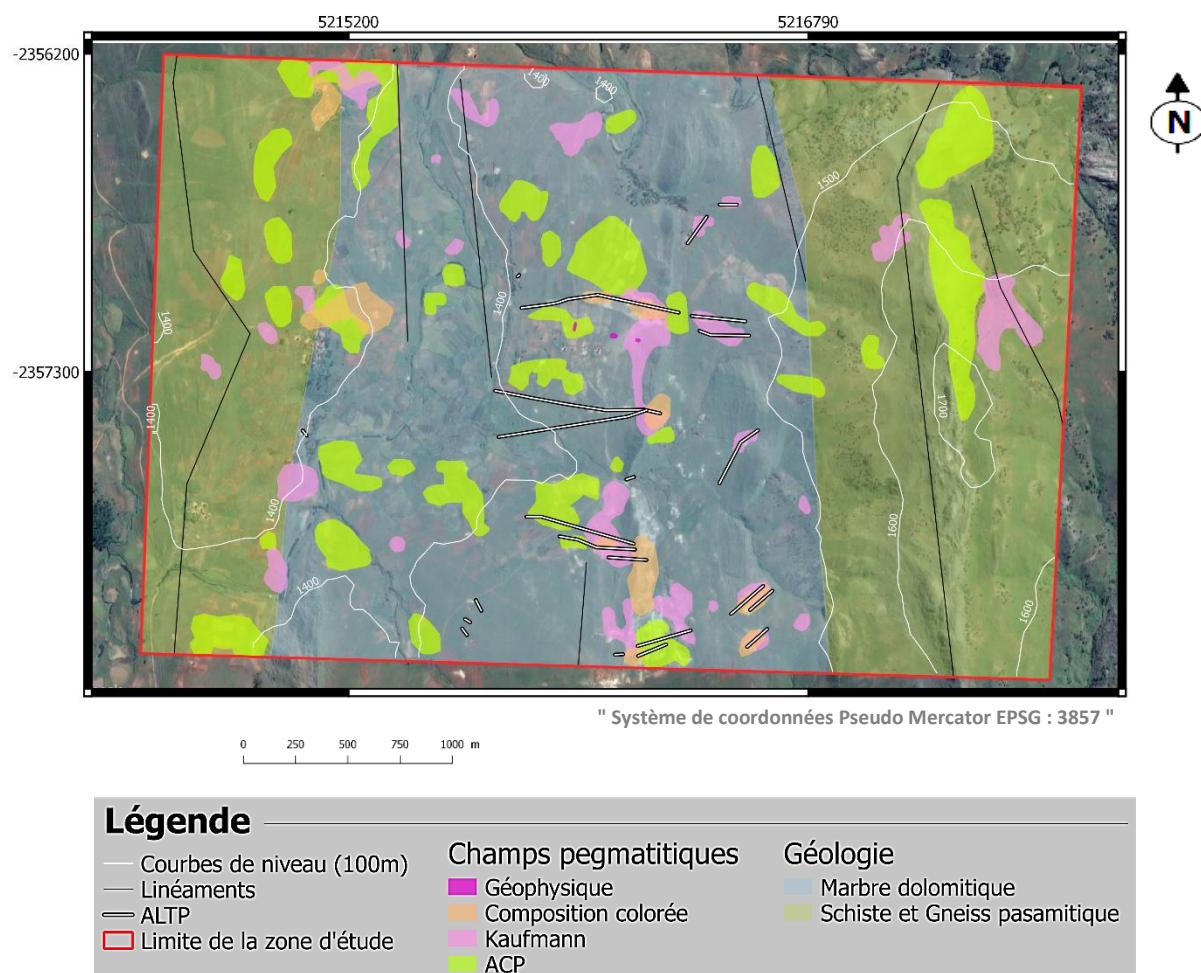


Figure 32 : Carte de superposition des apports géophysique et géomatique

Il est constaté que de prime abord que les trois zones de potentialité qui ont découlé de la prospection électrique se retrouvent en plein centre de l'agglomération de champs pegmatitiques établie par la télédétection de la lithologie propice à l'incidence de pegmatite ainsi que des relevés d'affleurements pegmatitiques lors de la descente sur terrain. Cela affirme la pertinence du procédé électrique. Les poches de pegmatite se veut être ainsi localisées au centre même de la zone d'étude.

Il est remarqué également que la même agglomération se retrouve dans la partie sud de la zone d'étude sauf que l'établissement de profil électrique n'a pas pu être effectué pour affirmer l'incidence de poches pegmatitiques au sein même du sous-sol. Les affleurements relevés sur terrain se superposent rationnellement sur champs pegmatitiques déterminés par les procédés de télédétection, il est constaté l'incidence de linéaments et la partie sujette se caractérise par la géologie en marbre dolomitique qui est plus favorable à la susceptibilité d'incidence de pierres précieuse par rapport à la couche de schiste et de gneiss pasamitique.

En prenant compte des champs pegmatitiques des autres parties de la zone d'étude, la potentialité en gîte de pierres précieuses décroît au fur et à mesure que l'on se déplace vers les extrémités est ou ouest. Cela s'explique par la caractérisation de la géologie marbreuse devenant de plus en plus schisteuse. Cependant, la partie nord-nord-ouest de la zone sujette se veut être investiguée puisqu'il y a également agglomération de champs et les linéaments sont plus fréquents, plus dense et plus long.

### IV. 4. Synthèse

Les travaux de prospection électrique ont permis de délimiter trois zones potentielles pour une extraction minière. Cette approche géophysique a également permis de constater des nappes aquifères susceptibles d'entraver l'exploitation minérale en submergeant les poches de pegmatites.

L'approche géomatique a permis d'affirmer la pertinence du procédé géophysique ainsi que les relevés sur terrain mais également la mise en relief de nouveaux paramètres attrayants qui poussent à investir plus notamment au niveau du fait que presque des paramètres géomorphologiques et géologiques favorables se convergent vers la parties nord-nord-ouest de la zone d'étude.

## RÉSULTATS & DISCUSSIONS

Une figure finale a été établie pour expliciter la potentialité des champs déterminés. (Cf. Figure 33)

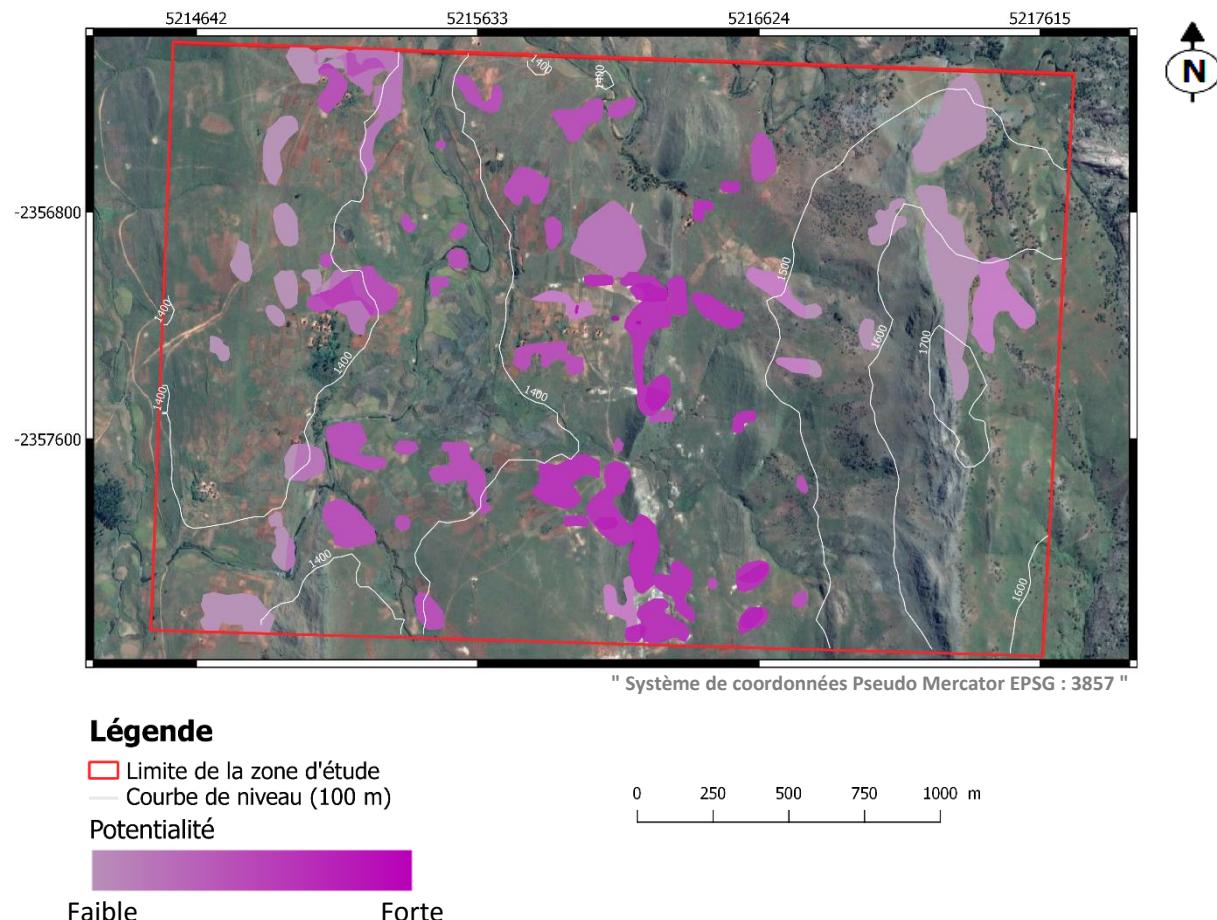


Figure 33 : Carte finale des champs de pegmatitiques de la zone d'étude

### IV. 5. Perspectives

Cette partie aborde les recommandations et les discussions qui découlent de ce travail d'étude.

#### IV. 5. 1. Assurer une exploitation efficace

Une exploitation efficace implique la prise en compte de tous les paramètres relatifs à un respect de l'environnement, à un respect du budget et un respect du délai d'exploitation.

Il est remarqué que la zone d'étude est environnée d'une multitude de rizières et d'autres cultures. La suivie du bon fonctionnement de leur irrigation est alors primordial pour assurer

qu'il n'y est pas détournement de l'écoulement d'eau face à une excavation du sol pendant l'exploitation minière.

Le respect du budget est de l'ordre de la gestion des différentes phases de l'exploitation. Une exploitation minutieuse demande certes plusieurs phases d'exploration prospective, cependant, la prospection électrique reflète relativement la réalité pour éviter des dépenses exhaustives avant la phase d'exploitation même.

Pour une exploitation efficace, le délai d'extraction doit être le moindre possible. Cela implique une opération mécanisée et ne pas s'en rester à l'alternative de mains d'œuvre essentiellement. Le coût en reviendrait au même.

### IV. 5. 2. Amélioration de l'étude

Ce travail d'étude est, par nature, prospective. Il représente partiellement la réalité. L'amélioration de ce dernier vise alors à des alternatives d'approches plus approfondies que ça soit au niveau de la méthode géophysique ou au niveau de la méthode géomatique.

La manipulation de la prospection du sous-sol par le biais de géoradar ou l'usage des images radar en termes de traitement d'image constituent chacun une investigation plus poussée et mettent en amont le summum de la précision dans les 2 matières.

L'efficacité de la méthode géoradar réside dans sa capacité à caractériser la structure du sous-sol sur de grandes surfaces avec un bon rendement. Plusieurs kilomètres par jour sont recensés en fonction des conditions d'accès sur terrain. Un GPS peut être également couplé au géoradar afin de localiser précisément les mesures.

Les avantages de l'image radar résident dans la capacité du capteur RSO. Ce capteur permet d'obtenir des images quelle que soient les conditions météorologiques. Il n'y a donc pas d'aberration d'information selon le contexte atmosphérique. Les données de la surface de la Terre se présenteront aussi de manières différentes selon leur appréhension et une investigation de l'ordre de la subsurface est possible notamment au niveau d'une évaluation de l'hydrothermie du sous-sol.

## Conclusion

L'objectif de cette étude a été de déterminer les zones potentielles où l'on peut rencontrer des poches de pegmatites. Pour se faire, une approche géophysique a été mise en oeuvre intégrant une campagne de prospection électrique. Les résultats obtenus sont assez satisfaisants puisque, après traitement de données, nous avons pu déterminer trois zones potentielles (Cf. Tableau 5). Les résultats ont indiqué aussi l'existence d'une formation aquifère qui pourrait représenter un obstacle pour l'exploitation de ces gisements si la quantité et la disposition de l'eau qui s'y trouve ne sont pas évaluées. En addition, l'approche géomatique qui a été effectuée par la suite, intégrant la télédétection et le système d'information géographique, a permis de rehausser la pertinence de la délimitation de ces champs pegmatitiques et d'induire une certaine orientation dans les manœuvres à l'égard de l'attrait des paramètres géomorphologiques et géologiques de la zone d'étude.

Les méthodes géophysique et géomatiques ont été donc bien efficient pour la délimitation de champs pegmatitiques d'Ambalamahatsara. Cependant, cette étude reste prospective et représente partiellement la réalité du terrain. Une recherche plus approfondie serait avantageuse dans laquelle la détermination de la cible ne serait plus de l'ordre de l'ordre des pegmatites mais serait à l'échelle de la pierre gemme convoitisée. Cela est réalisable à travers une étude intégrant la manipulation des équipements radar notamment les géoradar et les imageries radars.

## Bibliographie

**ALI, A., & POUR, A., 2014.** *Lithological mapping and hydrothermal alteration using Landsat 8 data : a case study in ariab mining District, red sea hills, Sudan.* *International Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(3), 199–208

**ANDRIANANTENAINA Rado, 2016.** *Caractérisation des béryls des champs pegmatitiques de la Sahatany (Ibity Antsirabe).* Mémoire de fin d'études. MSTGG. Option Géophysique de mines et environnement. Université d'Antananarivo. 76 pages

**BIÉMI ET AL., 1991.** *Géologie et réseaux de linéaments, région du bassin versant de la Marahoué, Côte d'Ivoire : cartographie à l'aide des données Landsat-TM et du champ magnétique total. Télédétection et gestion des ressources.* vol. vii, Paul Gagnon (éd), Association québécoise de télédétection 1991, pp. 134- 145

**DESLANDES., 1986.** *Évaluation des images Spot et Seasat pour la cartographie des linéaments du secteur des Monts Stoke, au Québec une comparaison basée sur l'analyse du spectre de Foumer.* Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Sherbrooke, 62 pages

**Dr. RAKOTO Heritiana Andriamananjara, 2016.** *La prospection électrique.* Cours théorique, MSTGG, M1, Semestre 8. Université d'Antananarivo, 2015-2016

**DUBOIS J., DIAMENT M., 2005.** *Géophysique-Cours et exercices corrigés,* Paris : DUNOD. 256 pages

**EDWARDS, 1977.** *A modified pseudosection for resistivity an IP:* *Geophysics*, v. 42, no. 5, p. 1020-1036

**HAN, T. & NELSON, J., 2015.** *Mapping hydrothermally altered rocks with Landsat 8 imagery: A case study in the KSM and Snow field zones, northwestern*

*British Columbia. In: Geological Fieldwork 2014, British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper, 2015-1, pp.103-112*

**GIRARD M. C. & GIRARD C. M., 2010.** *Traitemet des données de télédétection. Technique et ingénierie – Environnement et sécurité. Deuxième édition. 553 pages*

**INMAN, 1973.** *Resistivity inversion. Geophysics, 38 (6), 1088-1108*

**JEANININ M., 2005.** *Étude des processus d'instabilité des versants rocheux par prospection géophysique. Thèse géophysique, Université Joseph Fourier-Grenoble 1. 248 pages*

**LINES AND TREITEL, 1964.** *Past, Present and Future of Geophysical Inversion. A Y2K Analysis. 4 pages*

**LOKE, 2004.** *Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 136 pages*

**MOORE., 1983.** *Objective procedure for lineament enhancement and extraction. Photogrammetrique Enginneng and Remote Sensing, vol. 49, p. 461-647*

**MORADI, M., BASIRI, S., KANANIAN, A. & KABIRI, K., 2015.** *Fuzzy logic modeling for hydrothermal gold mineralization mapping using geochemical, geological, ASTER imageries and other geo-data, a case study in Central Alborz, Iran. Earth Sci Inform, 8, pp. 197-205*

**MWANIKI, M. W., MOELLER, M. S., & SCHELLMANN, G., 2015.** *A comparison of Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) in mapping geology and visualizing lineaments: A case study of central region Kenya. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-7/W3, 897–903*

**NKEMBA Simon, 2001.** *Lineament and pegmatite mapping using landsat TM imagery and aerial photograph data, Kaseba-Katota Area, Serenje District, Central Zambia. Dissertation. Master of Mineral Sciences (Geology) of the School of Mines. 77 pages*

**PARASNIS D., 1997.** *Principles of applied geophysics, fifth edition, Londres : Edition CHAPMAN & Hall, London, 5th edn, 429 pp.*

**PONTON J., 2008.** *Caractérisation hydrogéophysique par tomographie électrique d'un glissement de terrain argileux de type « coulée » à l'échelle de la parcelle et du versant. Rapport de stage Master 2 Géosciences, Environnement et risques, Université Louis Pasteur, Strasbourg I. 80 pages*

**ROY & APPARAO, 1971.** *Depth of investigation in direct current methods. Geophysics, v. 36, i. 5, p. 943-959*

**SABINS, F.F., 1999.** *Remote sensing for mineral exploration. Ore Geology Reviews 14, 157–183*

**SASAKI, 1992.** *Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. Volume 40, Issue 4. Pages 453-463*

**UGIR, 2015.** *Monographie de la région Amoron'i Mania. Unité de Gestion des Informations Régionales. Ministère de l'Économie et de la Planification. 116 pages*

**VAN DER MEER, D. F. 2004.** *Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 5, 55 – 68*

**YVES BERTRAN ALVAREZ, 2017.** *Les pegmatites à gemmes de Madagascar. Document au format PowerPoint. 18 pages*

## Webographie

**A-CONTRESENS, 2017.** *Météo et climat à Madagascar. Le planificateur de voyages, road-trips et tour du monde. Date et heure de consultation du site web : 13 Mai 2017*

[https://planificateur.a-contresens.net/afrique/madagascar/amoron\\_i\\_mania\\_region/](https://planificateur.a-contresens.net/afrique/madagascar/amoron_i_mania_region/)

**GEOLOGY, 2017.** *What is pegmatite. Features and uses. Date et heure de consultation du site web : 18 Mai 2017*

<https://geology.com/rocks/pegmatite.shtml>

**USGS, 2013.** *What are the band designations for the Landsat satellites? Date et heure de consultation du site web : 13 Mai 2017*

<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>

**UVED, 2008.** *Les compositions colorées. Date et heure de consultation du site web : 13 Mai 2017*

<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/compositions-colorees>

**WIKIPEDIA, 2017.** *Pegmatite. Définition et caractéristiques. Date et heure de consultation du site web : 18 Mai 2017*

<https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Pegmatite>

## Table des matières

<b>Remerciements .....</b>	<b>I</b>
<b>Sommaire .....</b>	<b>III</b>
<b>Liste des sigles, abréviations et notations.....</b>	<b>IV</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>V</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>V</b>
<b>Liste des photos.....</b>	<b>VII</b>
<b>Glossaire .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I. LES PEGMATITES DE MADAGASCAR .....</b>	<b>2</b>
I. 1. Caractéristiques et utilités .....	2
I. 2. Les champs pegmatitiques de Madagascar.....	2
I. 3. Les pegmatites de la zone d'étude.....	4
<b>CHAPITRE II. CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ETUDE .....</b>	<b>10</b>
II. 1. Contexte administratif et géographique .....	10
II. 2. Contexte topographique et environnemental.....	11
II. 3. Contexte climatique.....	13
II. 4. Contexte hydrologique .....	14
II. 5. Contexte géologique.....	15
<b>CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....</b>	<b>18</b>
III. 1. Approche Géophysique.....	18
III. 1. 1. Choix de la prospection électrique .....	18
III. 1. 2. Principe de la prospection électrique .....	19
III. 1. 3. Acquisition des données .....	24
III. 1. 4. Matériels utilisés .....	25
III. 1. 5. Traitement des données.....	26
III. 1. 6. Coupe géoélectrique ou pseudo-section.....	32
III. 1. 7. Qualité du modèle RMS.....	33
III. 1. 8. Fonction de vraisemblance ou d'incertitude .....	33
III. 1. 9. Fonction de sensibilité .....	33

<b>III. 2. Approche Géomatique.....</b>	<b>34</b>
III. 2. 1. Choix de la télédétection.....	34
III. 2. 1. 1. <i>Principe de la télédétection</i> .....	35
III. 2. 1. 2. <i>Principe de la composition colorée</i> .....	36
III. 2. 1. 3. <i>Principe du ratio de bandes</i> .....	38
III. 2. 1. 4. <i>Principe de l'ACP</i> .....	39
III. 2. 1. 5. <i>Principe de l'identification des linéaments</i> .....	39
III. 2. 1. 6. <i>Matériels utilisés</i> .....	41
III. 2. 2. Choix du SIG.....	41
III. 2. 2. 1. <i>Principe du SIG</i> .....	41
III. 2. 2. 2. <i>Matériels utilisés</i> .....	43
III. 2. 2. 3. <i>Traitement des données</i> .....	43
<b>CHAPITRE IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....</b>	<b>45</b>
<b>    IV. 1. Apport de la prospection géophysique .....</b>	<b>45</b>
IV. 1. 1. Présentation des travaux .....	45
IV. 1. 2. Interprétation des résultats .....	46
IV. 1. 3. Localisation des panneaux .....	46
IV. 1. 4. Profil géoélectrique n°1 .....	47
IV. 1. 5. Profil géoélectrique n°2 .....	48
IV. 1. 6. Profil géoélectrique n°3 .....	49
<b>    IV. 2. Apport de la télédétection .....</b>	<b>52</b>
IV. 2. 1. Apport de la télédétection par composition colorée .....	52
IV. 2. 2. Apport de la télédétection par ratio de bandes.....	53
IV. 2. 3. Apport de l'analyse en composantes principales .....	54
IV. 2. 4. Apport de l'identification des linéaments .....	55
IV. 2. 4. 1. <i>Aperçu de la densité des linéaments</i> .....	55
IV. 2. 4. 2. <i>Identification par vectorisation des linéaments</i> .....	56
<b>    IV. 3. Apport du SIG .....</b>	<b>57</b>
<b>    IV. 4. Synthèse .....</b>	<b>58</b>
<b>    IV. 5. Perspectives .....</b>	<b>59</b>

IV. 5. 1. Assurer une exploitation efficace .....	59
IV. 5. 2. Amélioration de l'étude.....	60
<b>Conclusion.....</b>	<b>61</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>62</b>
<b>Webographie.....</b>	<b>65</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>66</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>Annexe   page 1</b>
Annexe 1 : Photographies des échantillons de pegmatites d'Ambalamahatsara .	Annexe   page 1
Annexe 2 : Liste des coupes géoélectriques réalisées mais non explicitées .....	Annexe   page 4

## Annexes

### Annexe 1 : Photographies des échantillons de pegmatites d'Ambalamahatsara



Photo n°2 : Échantillon de roches montrant la concentration de tourmalines noires aux épontes des pegmatites, elles y sont de taille microscopique à centimétrique.



Photo n°3 : Tourmalines roses de taille millimétrique sur les affleurements des pegmatites.



Photo n°3 : Béryls bleus et tourmalines noires de taille millimétrique



Photo n°4 : Concentrations de tourmalines vertes et noires ainsi que de béryls bleus de taille millimétrique



Photo n°5 : Veine de pegmatite d'environ 20 cm de large  
contenant des tourmalines roses et vertes de taille  
millimétrique



Photo n°6 : Affleurement de pegmatites

## Annexe 2 : Liste des coupes géoélectriques réalisées mais non explicitées

### Profil n°4

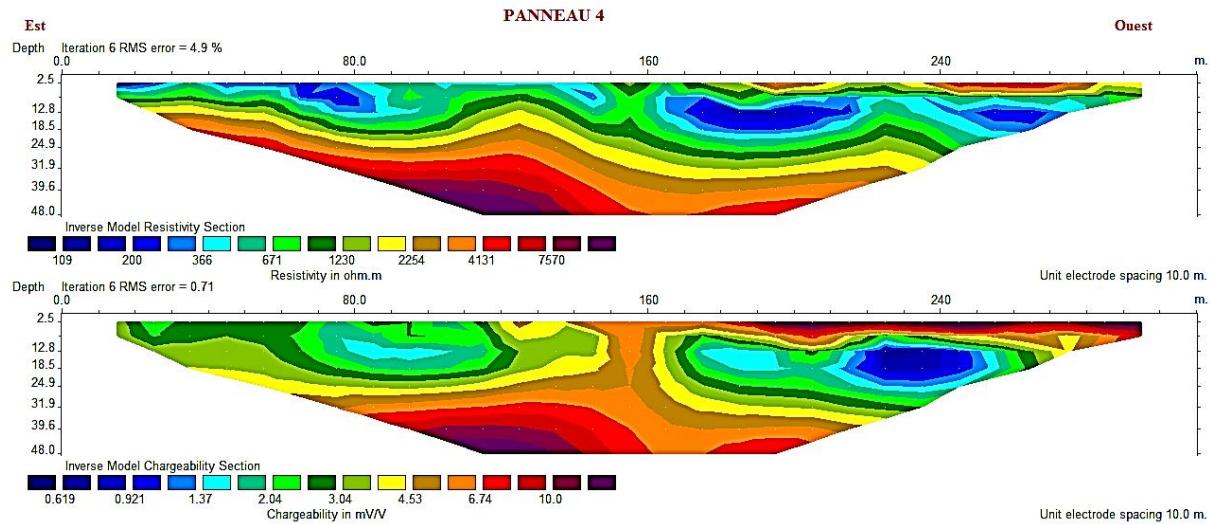


Figure 34 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°4

### Profil n°5

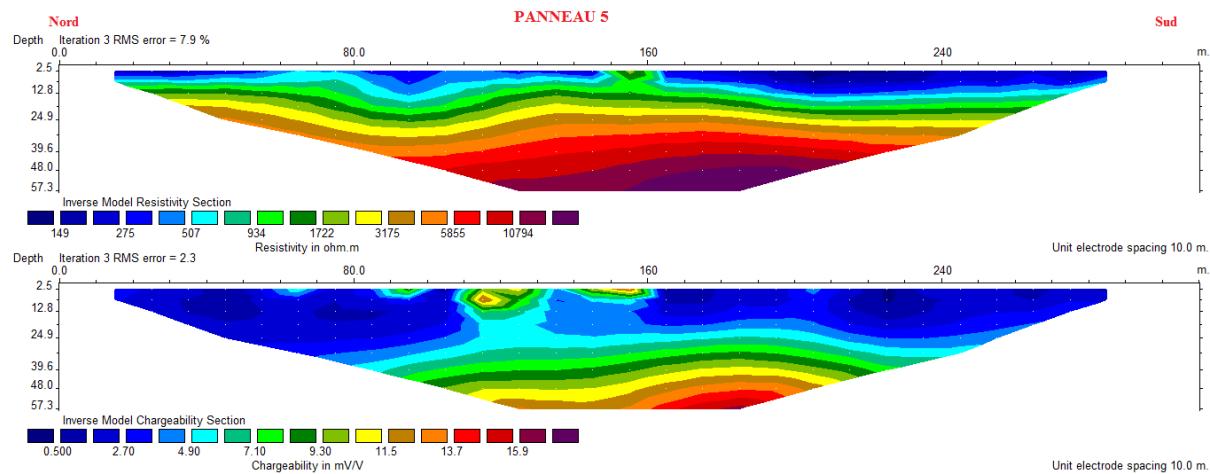


Figure 35 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°5

## Profil n°6

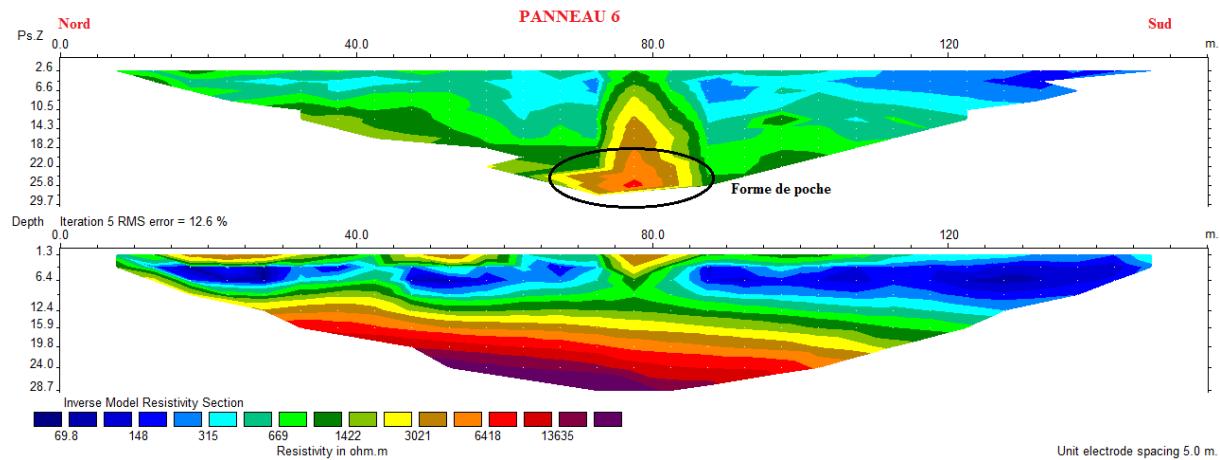


Figure 36 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°6

## Profil n°7

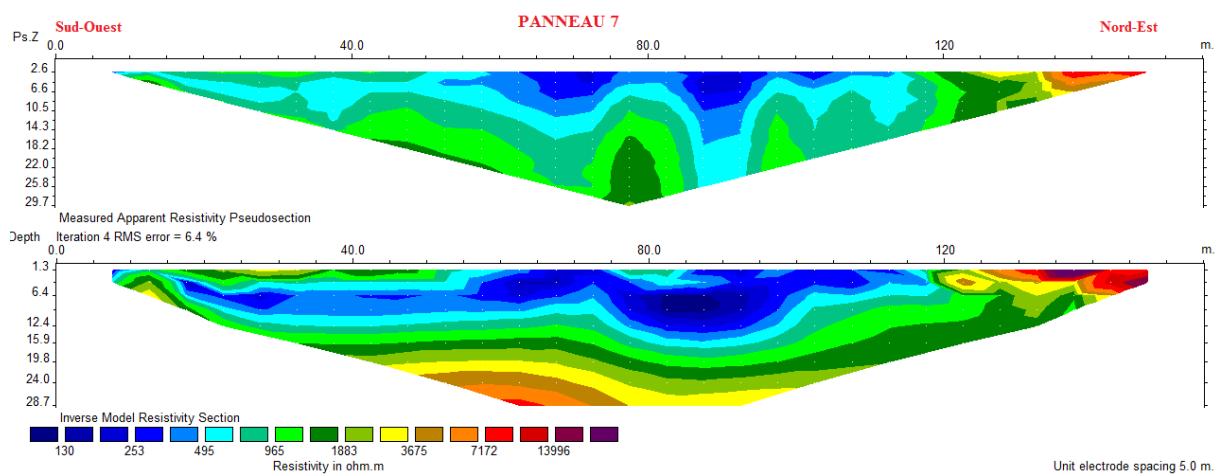


Figure 37 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°7

## Profil n°8

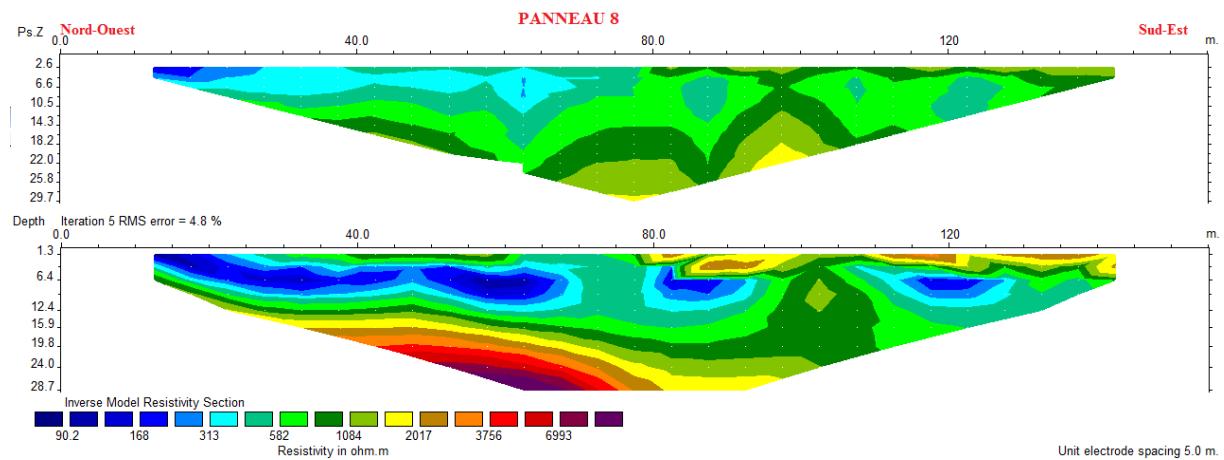


Figure 38 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°8

## Profil n°9

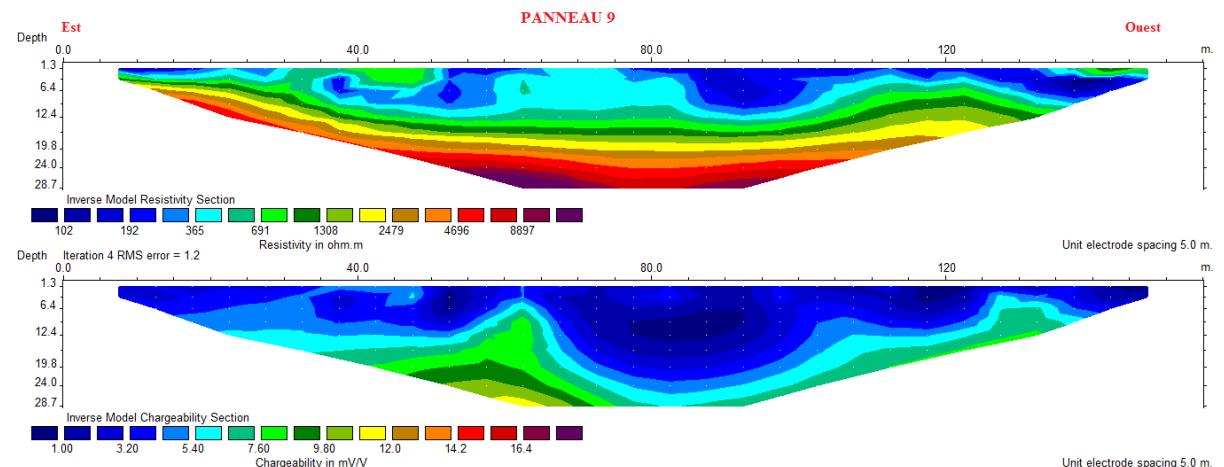


Figure 39 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°9

## Profil n° 10

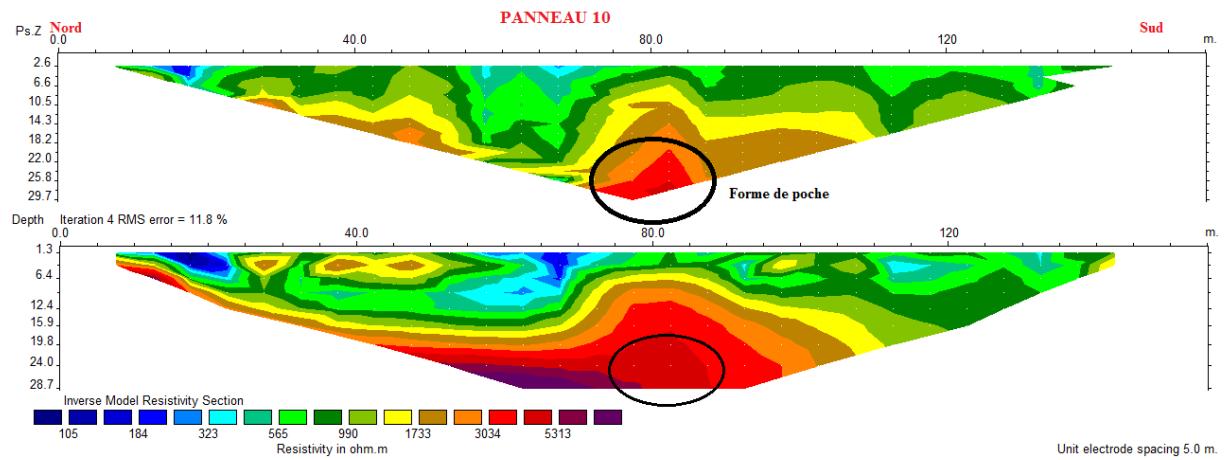


Figure 40 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°10

## Profil n°11

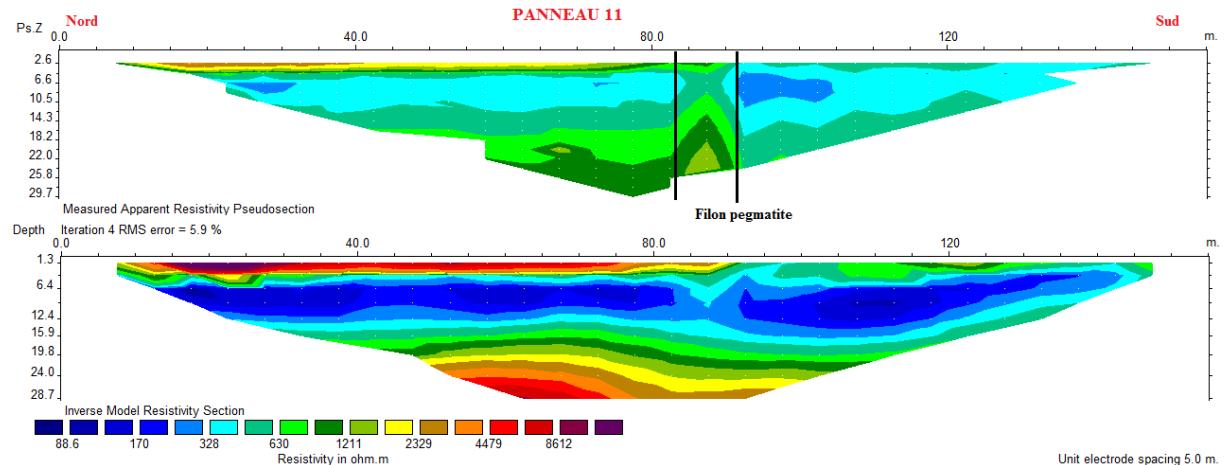


Figure 41 : Coupe géoélectrique obtenue à partir du panneau électrique n°11

# **Apport de la géophysique et de la géomatique à la délimitation des champs pegmatitiques d'Ambalamahatsara (District Ambatofinandrahana)**

## **Résumé**

La pegmatite est une roche contribuant à la croissance économique de Madagascar. Sa localisation relève une haute précision pour une exploitation non destructive. Ce travail d'étude vise à cerner les champs pegmatitiques au niveau d'une carrière du Fokontany Ambalamahatsara du District d'Ambatofinandrahana. Pour se faire, deux méthodes ont été utilisées. La première, qui a constituée en une approche géophysique intégrant une campagne de prospection électrique, a permis de délimiter trois zones potentielles et la mise en évidence de l'existence de nappe aquifère qui pourrait entraver une extraction minière en submergeant la poche de pegmatites. La seconde, qui est une méthode géomatique utilisant la télédétection et le SIG, a induit la cartographie des champs pegmatitiques finaux et une certaine orientation dans l'espace en cas de nouvelles investigations au niveau de la zone sujette. Ce travail d'étude contribue à l'appui aux interventions des prospecteurs miniers en tant que guide tout au long de l'exploitation.

**Mots clés :** Pegmatite, prospection géophysique, télédétection, SIG, Ambatofinandrahana

## **Geophysics and Geomatics contribution to delimitation of Ambalamahatsara pegmatites fields (Ambatofinandrahana District)**

## **Abstract**

Pegmatite is a rock contributing to the economic growth of Madagascar. Its location needs a high precision for a nondestructive operation. This study aims to identify pegmatites fields at a career in Ambalamahatsara Fokontany of Ambatofinandrahana District. Thus, two methods have been used. The first one, which has incorporated geophysics approach integrating a electric prospecting campaign, helped defining three potential areas and highlighted the existence of aquifer layer which could interfere with a mining in submerging pegmatites pocket. The second one, which is a geomatics method using remote sensing and GIS, induced final pegmatites fields mapping and some guidance in space in case of a future investigation in the study area. This work study contributes to mining prospectors interventions support as a guide throughout the operation.

**Keywords :** Pegmatite, prospection géophysique, télédétection, SIG, Ambatofinandrahana

## **Impétrant**

MICHEL Christ Erick Matthieu

Contacts : 0340850021/thierrycem@gmail.com

## **Encadreur**

RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier