

SOMMAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE I : GENERALITES

- I - ETUDE DESCRIPTIVE DU GRAPHITE
- II - LA FILIERE GRAPHITE A MADAGASCAR
- III - CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE
- IV - CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE II : METHODOLOGIE ET MATERIEL UTILISEES

- I - RAPPEL METHODOLOGIQUE
- II - MATERIEL UTILISE

CHAPITRE III : ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES

- I - ACQUISITION DES DONNEES
- II - TRAITEMENT DES DONNEES

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATION

- I - DESCRIPTION DES RESULTATS
- II - PRESENTATION DES RESULTATS
- III - INTERPRETATION DES RESULTATS

DISCUSSION

CONCLUSION

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Les différents types de graphites naturels.....	4
Figure 2	: Structure cristalline du graphite	6
Figure 3	: Potentialité en graphite à Madagascar	8
Figure 4	: Localisation de la zone d'étude.....	10
Figure 5	: Groupes du Néoproterozoïque du Domaine d'Antananarivo	12
Figure 6	: Carte géologique de la zone d'étude	13
Figure 7	: Induction électromagnétique.....	16
Figure 8	: Le Beep Mat BM8 ainsi que l'élément de son module de lecture	19
Figure 9	: Principe de fonctionnement	20
Figure 10	: Facteurs influençant la valeur HFR	23
Figure 11	: Lecture typique sans anomalie	24
Figure 12	: Exemple de lectures.	25
Figure 13	: Exemples d'anomalies	26
Figure 14	: Direction des levées	30
Figure 15	: Aperçu de la donnée brute.....	31
Figure 16	: Localisation des points de mesures de la donnée prétraitée.....	32
Figure 17	: Organigramme du traitement	34
Figure 18	: Carte d'anomalie HFR	37
Figure 19	: Carte d'anomalie LFR.....	38
Figure 20	: Carte de Ratio.....	39
Figure 21	: Correspondance de la carte d'anomalie HFR avec la conductivité apparente .	40
Figure 22	: Affleurement de schiste remarqué sur la zone	41
Figure 23	: Correspondance de la carte d'anomalie LFR avec la géologie de la zone	43
Figure 24	: Identification de cible volumineuse	44
Figure 25	: Identification de cible superficielle	44
Figure 26	: Correspondance de la carte de RATIO avec la géologie de la zone	46

LISTE DES ABREVIATIONS

Q_{int}	: Charge contenu dans un volume
\vec{B}	: Champ d'induction magnétique
\vec{E}	: Champ électrique
\vec{J}	: Vecteur densité de courant
σ_a	: Conductivité apparente
μ	: Perméabilité magnétique du milieu
BD 100	: Base de Données au cent millième
BM8	: Beep Mat modèle numéro 8
CO ₂	: Dioxyde de carbone
EM	: Electromagnétique
f	: Fréquence
GPS	: Global Positioning System
HFR	: High Frequency Response
H _p	: Champ magnétique primaire
H _s	: Champ magnétique secondaire
K	: Facteur d'atténuation
LFR	: Low Frequency Response
Ma	: Milliard d'années
Mag	: Magnétique
N	: Nombre d'induction
N-S	: Nord – Sud
P	: profondeur de pénétration
PGRM	: Programme de Gouvernance des Ressources Minières

r	: distance émetteur – récepteur
R_t	: Ratio
S	: Sud
t	: temps
UTM	: Universal Transverse Mercator
XAMPP	: X (cross) A pache M ariaDB P erl P HP
σ	: conductivité électrique
a	: Nombre d’onde
ϵ	: Permittivité électrique du milieu
ω	: Pulsation

INTRODUCTION

D'une manière générale, la composition minérale du sous-sol est liée à son histoire géologique (tectonique, volcanisme, érosion, etc....). Madagascar compte parmi les légendaires pays du monde disposant d'une grande diversité de richesses minières, incluant les pierres précieuses et les minerais industriels.

Le graphite figure parmi les principaux minerais exploités à Madagascar depuis le début du 20ème siècle jusqu'à présent. En 1925, le pays était même qualifié de premier exportateur mondial de graphite [1]. Le graphite malgache est réputé pour sa qualité, la production a atteint les 100 000 tonnes par an en moyenne pendant ces cinq dernières années selon la statistique, dont la majorité est exportée en Chine, aux Etats-Unis et en Inde [2].

L'exploitation minière constitue l'ensemble des procédés d'obtention des minéraux utiles provenant de l'écorce terrestre. Elle résume tous les travaux exécutés avant d'obtenir le minerai, de le séparer de la masse inutile et de l'amener à la surface ou à l'usine de traitement.

Le choix de la méthode à utiliser, ainsi que la stratégie à adopter constitue donc une étape primordiale pour la mise en œuvre de l'exploitation. Le présent mémoire, intitulé « Etude d'un gisement de graphite par méthode électromagnétique à Brickaville, région Atsinanana » a pour but de rapporter le développement de la technique d'exploration utilisant l'outil électromagnétique pour délimiter les zones conductrices en subsurface susceptible d'encaisser les minerais de graphite, avec un appareil nommé Beep Mat modèle BM8 de GDD instrument.

Le présent mémoire comporte quatre grandes chapitres : tout d'abord, les généralités développant le cadre général de la zone d'étude, ensuite rappel méthodologique, puis les acquisitions de données et traitement et enfin, les résultats et interprétation.

CHAPITRE I

GENERALITES

CHAPITRE I

GENERALITES

Dans ce premier chapitre, on va tout d'abord s'intéresser sur une étude descriptive du graphite, et aussi la filière graphite à Madagascar, avant d'entamer le cadre géographique et géologique de la zone d'étude.

I - 1 - ETUDE DESCRIPTIVE DU GRAPHITE

Le carbone, à l'état natif, se présente sous deux formes cristallines, aux aspects et aux propriétés radicalement différentes et presque opposés : le diamant et le graphite.

Si le diamant est transparent, dur et rare, le graphite est répandu, opaque et tendre. Néanmoins, de par ses propriétés physiques, le graphite présente un large éventail d'utilisations dans diverses branches industrielles telles la métallurgie, les réfractaires, l'industrie électrique et électrochimique, le nucléaire, etc.

Le graphite industriel provient de deux sources principales :

- sous forme de graphite naturel, associé aux roches affectées par le métamorphisme,
- sous forme de graphite synthétique, par graphitisation de coke de pétrole.

Dans ce qui suit, on va s'intéresser seulement au graphite naturel.

I - 1 - 1. GITOLOGIE ET TERMINOLOGIE

Le graphite naturel est celui obtenu à partir de l'exploitation minière de roches contenant cette substance. La terminologie appliquée aux différentes formes naturelles du graphite est fortement marquée par les aspects commerciaux liés à cette substance. On distingue deux grands types de graphite naturel commercialisable : le graphite cristallin et le graphite amorphe [3] [4].

▪ Le graphite cristallin

Le graphite cristallin se présente sous deux différentes formes :

- Le graphite en moucheture ou en paillette :

Localisé dans des roches métamorphiques d'origine sédimentaire, il est à l'état disséminé, en quantité variable, (jusqu'à 90% de la roche en place), dans des gneiss et des micaschistes encaissants. La dimension moyenne des mouchetures est de l'ordre de 0,25 cm. L'épaisseur des horizons productifs, de forme lenticulaire ou lités peut atteindre jusqu'à 30 m pour des extensions de plusieurs milliers de mètres.

- Le graphite en filon ou en veine :

Il se présente en veines de 75% à 100% de carbone graphitique. Les épaisseurs varient d'un film carboné (millimétrique) à des corps minéralisés de 3 m d'épaisseur, s'étendant sur plusieurs centaines de mètres. Le graphite se présente en cristaux de forme variée dont la croissance s'est faite depuis les épontes vers l'intérieur. Il occupe, de façon secondaire, des fissures de la roche encaissante en contexte métamorphique.

Ces deux sous-types se rencontrent essentiellement dans des roches métamorphiques d'âge précambrien. Leur origine reste encore mal élucidée ; elle peut être d'origine organique, le graphite résultant alors du métamorphisme d'anciens dépôts carbonés (pétrole).

▪ **Le graphite amorphe**

Il désigne toute masse graphitique microcristalline. Le graphite se présente alors sous un aspect terreux noir, contrastant avec l'aspect brillant métallique des variétés cristallines.

Le graphite amorphe résulte du métamorphisme soit régional, soit par contact des sédiments carbonés (roche-magasin de pétrole, schistes bitumineux ou ampéliteux) et des couches de charbon. La teneur minimum économique est de 80% de graphite. Ce type de gisement est généralement plus jeune que les gisements de variété cristalline.

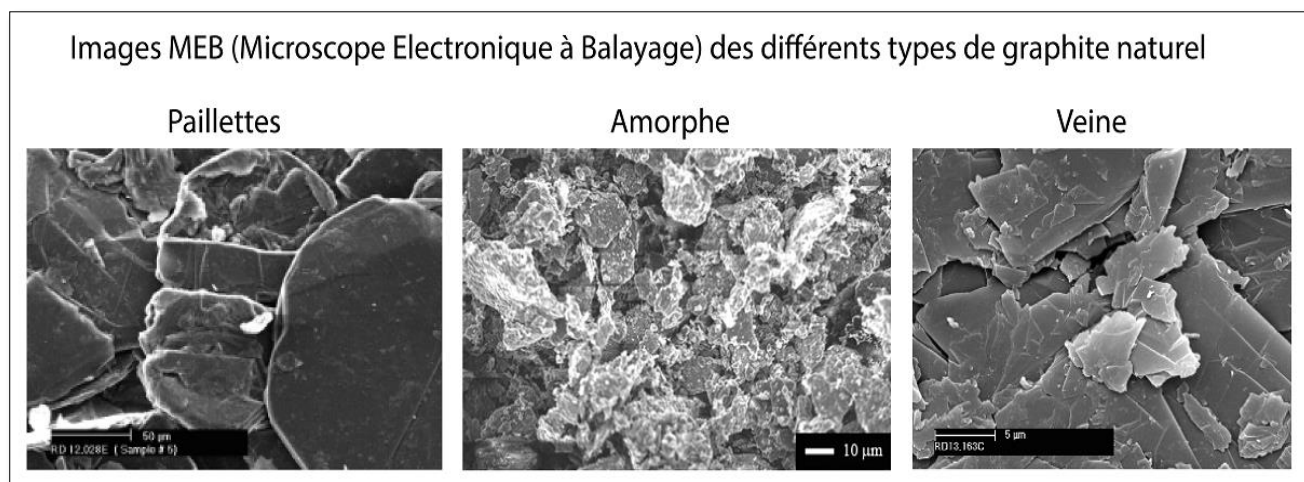


Figure 1 : Les différents types de graphites naturels (Asbury carbon)

I - 1 - 2. TYPES DE GISEMENT

Le gisement de graphite se présente sous quatre différents types [5] [6] :

- les gisements metasomatiques de contact
- les gisements de veines hydrothermales

- les gisements métamorphiques
- les gisements métamorphisés

*** Les gisements métasomatiques de contact**

Ce premier type de gisement se développe au contact des roches carbonatées et des roches plutoniques. Les minerais de graphite se forment par cristallisation du carbone organique ou par réduction du CO₂ initial. On trouve parfois dans la littérature un type de gisement de graphite appelé « gisement magmatique précoce ». Ces gisements seraient l'équivalent des gisements métasomatiques de contact.

*** Les gisements de veines hydrothermales**

Ils se forment à partir de solutions post-magmatiques riches en volatil, particulièrement en CO₂. Les dépôts de veines hydrothermales de graphite sont généralement associés avec du graphite en paillettes stratoïdes ce qui produit un enrichissement local des gisements de graphite en veine.

*** Les gisements métamorphiques**

La concentration et cristallisation de carbone durant le métamorphisme régional permet l'obtention de ce type de gisement. Les roches encaissantes sont des schistes à quartz et mica, des paragneiss, des quartzites feldspathiques à mica et des marbres.

*** Les gisements métamorphisés**

Ces gisements sont générés par métamorphisme de contact ou par métamorphisme régional de sédiments renfermant des résidus de matières organiques (bitume, charbon) carbonés. Les roches encaissantes renfermant notamment ces dépôts sont des quartzites, des phyllites, des schistes et des métagrauwackes.

I - 1 - 3. STRUCTURE ET PROPRIETES PHYSIQUES

Les multiples utilisations du graphite, quelque soit son origine, découlent directement des propriétés physiques de ce minéral Aussi est-il important d'en décrire la structure cristalline et les principales propriétés physiques qui en résulte et qui conditionnent les usages de ce matériau dans l'industrie.

*** Structure cristalline [3]**

La maille élémentaire est constituée par un hexagone plan où chaque atome de carbone a ses quatre valences saturées par des liaisons avec les atomes voisins. Le cristal de graphite se compose donc idéalement d'un empilement de feuillets élémentaires monoatomiques, de faible cohérence car ils ne sont reliés entre eux que par les forces de Van der Waals, très faibles.

Le graphite se cristallise selon deux systèmes :

- le **système hexagonal**, forme la plus répandue (90% de tous les cristaux) où les feuillets élémentaires se disposent selon un ordre A – B – A – B,
- le **système rhomboédrique**, beaucoup plus rare et moins stable aux conditions de température et pressions ordinaires, où les feuillets élémentaires se répètent selon un ordre A – B – C – A – B – C

Les différents paramètres de la maille élémentaire sont donnés dans la figure 2 :

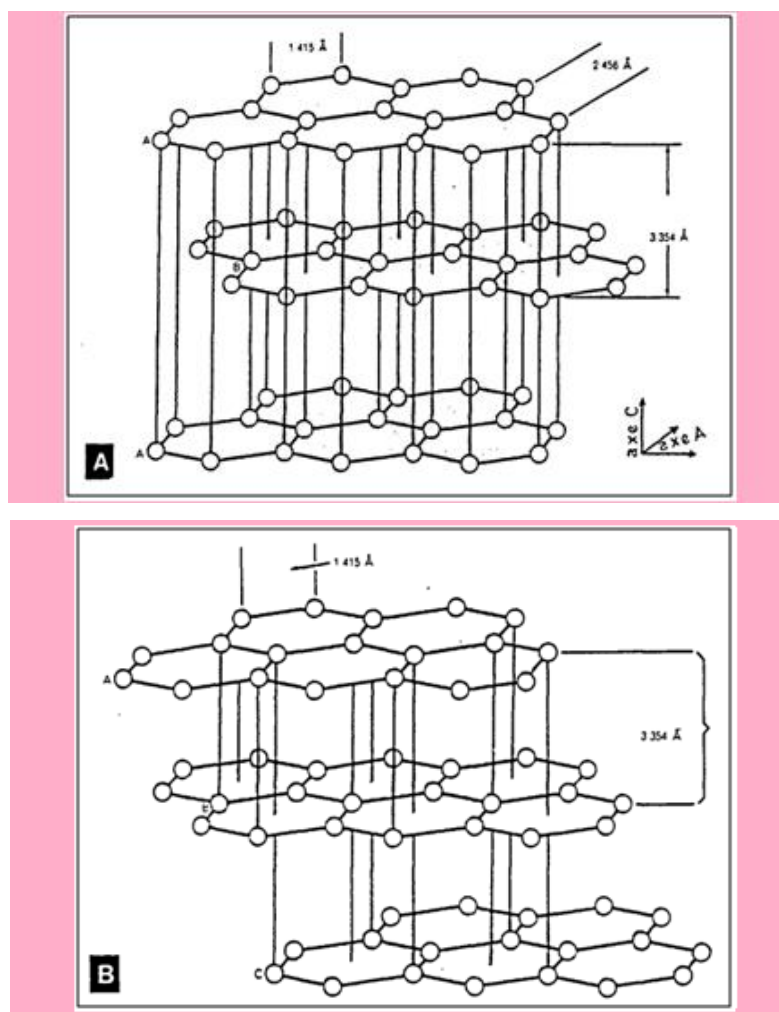


Figure 2 : Structure cristalline du graphite : A - forme hexagonale, B - forme rhomboédrique

* **Propriétés physiques [3] [4]**

Quelques propriétés physiques du graphite sont présentées ci-dessous :

- **Dureté** : le graphite est un corps tendre, de dureté 1 à 2 dans l'échelle de dureté de Mohs,
- **Densité** : varie entre 2,1 et 2,3 selon le degré de cristallinité et de graphitisation,
- **Conductivité électrique** : considéré comme un bon conducteur électrique, la conductivité du graphite croît avec la température jusqu'à une valeur entre 1 500 à 2 000 °C,
- **Propriété lubrifiante** : le graphite est un excellent lubrifiant ; cette propriété est liée à deux facteurs : la faible cohérence entre les feuillets, lesquels glissent très facilement les uns par rapport aux autres, et la présence de gaz absorbé sur les surfaces des feuillets (les qualités lubrifiantes disparaissent lorsque ces gaz sont enlevés sous vide.
- **Résistance à l'oxydation** : le taux d'oxydation (à l'air ou dans l'oxygène) varie en fonction de la dimension des particules et de la température. Certaines impuretés augmentent ce taux par effet de catalyse :
 - la diminution de taille des particules augmente le taux d'oxydation par l'augmentation des surfaces disponibles pour l'attaque par l'oxygène.
 - l'oxydation est imperceptible à 400°C et très rapide à 850°C. C'est une réaction exothermique qui s'auto-entretient et peut devenir rapidement incontrôlable.

I - 2 - LA FILIERE GRAPHITE A MADAGASCAR

La plupart des environnements géologiques dans lesquels le graphite se forme existe à Madagascar et il s'agit d'une ressource commune dans les roches métamorphiques de Madagascar [8]. Il existe, en particulier, des secteurs importants qui contiennent des ressources majeures de graphite, en paillettes cristallines de haute qualité, estimé pour sa conductivité, son inertie et son faible poids parmi d'autres propriétés utiles de cette ressource.

A Madagascar, la source en graphite provient du métamorphisme des roches sédimentaires riches en carbone telles que des carbonates ou des schistes argileux présents dans les ensembles archéens et protérozoïques. Beaucoup de roches sont donc susceptibles d'héberger des gisements graphiteux [8].

Ci-dessous est une carte représentant la potentialité de graphite dans le pays :

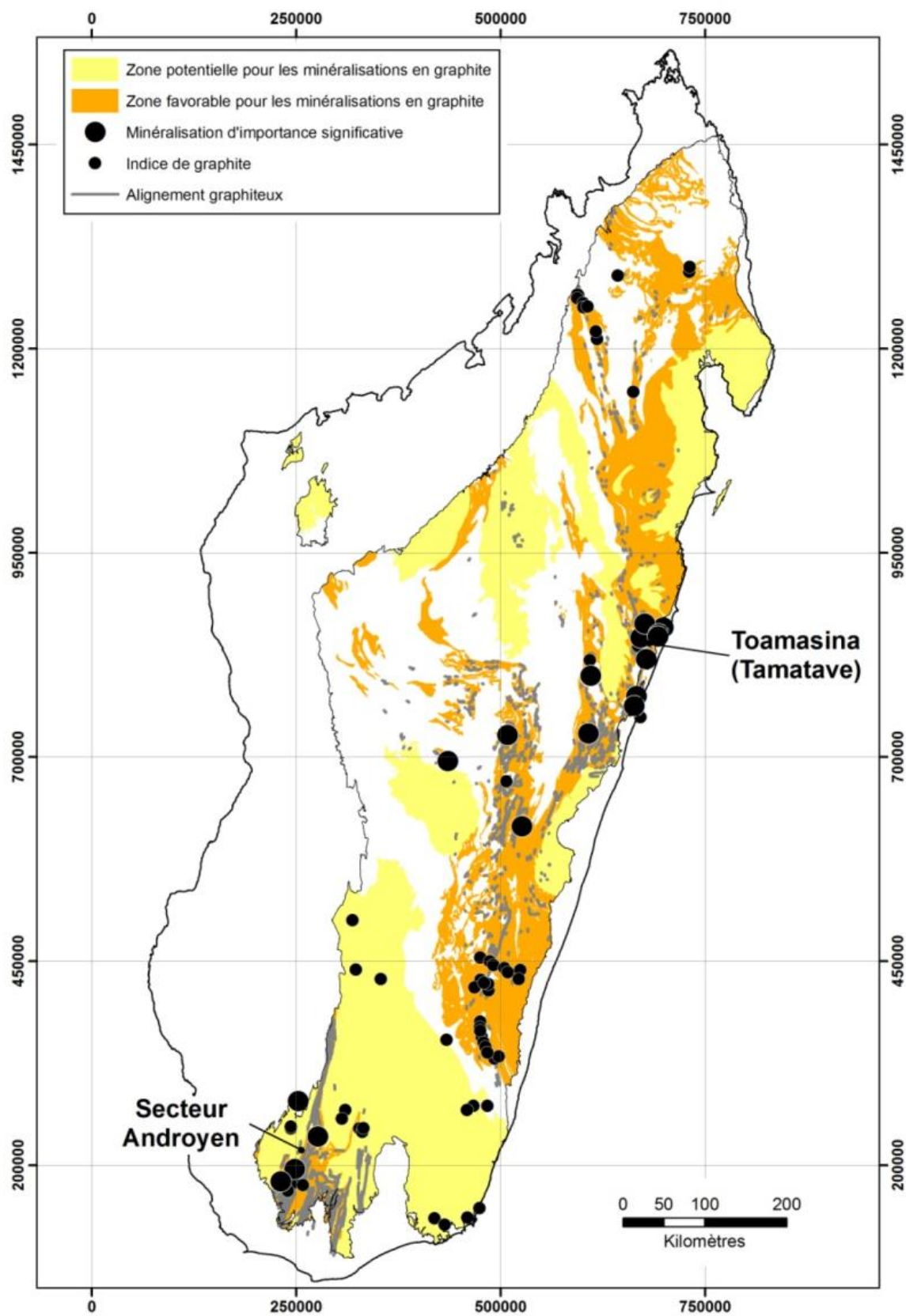


Figure 3 : Potentialité en graphite à Madagascar (PGRM 2012)

Deux zones principales contiennent alors des ressources en graphite selon la carte : dans les secteurs de Toamasina et dans le sud du pays.

Le secteur de Toamasina, renferme la mine historique d'Andasibe-Perinet. A l'Est, se situe la mine d'Antsirakambo, et plus au sud, à proximité de Vatomandry, la mine de Marovintsy. Tous ces gisements sont localisés dans le Groupe de Manampotsy, qui contient les lithologies les plus favorables pour les occurrences en graphite. Les autres ensembles paradérivés des Groupes d'Ambatolampy et de Sofia sont également des secteurs favorables. Enfin, on connaît des indices substantiels de graphite en paillette au sud de Madagascar dans le sud du Domaine Androyen.

D'une manière générale, ces gisements et indices seraient estimés contenir plus de 1000 tonnes de minerai graphitique et plus de 250 000 tonnes de concentré à 80 - 95 % vol. de graphite [8].

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

Des levés électromagnétiques ont été réalisés dans une zone située à Vohitsara, dans la commune Ambinaninony, district de Vohibinany (Brickaville), région Atsinanana et à environ 254 km depuis Antananarivo via la route nationale numéro 2.

Cette zone est avoisinée par les communes suivantes :

- à l'Ouest la commune d'Ambalarondra,
- au Sud la commune de Vohitranivona,
- au Nord la commune d'Ampasimadinika,
- et à l'Est l'océan Indien.

Géographiquement, le centre de la zone est localisé approximativement, selon le système de coordonnées UTM 39 L zone Sud, à la position :

- X = 305 500 mètres
- Y = 7 951 000 mètres

Un aperçu de la zone ainsi que la description des environs sont présentés dans la figure 4 suivante :

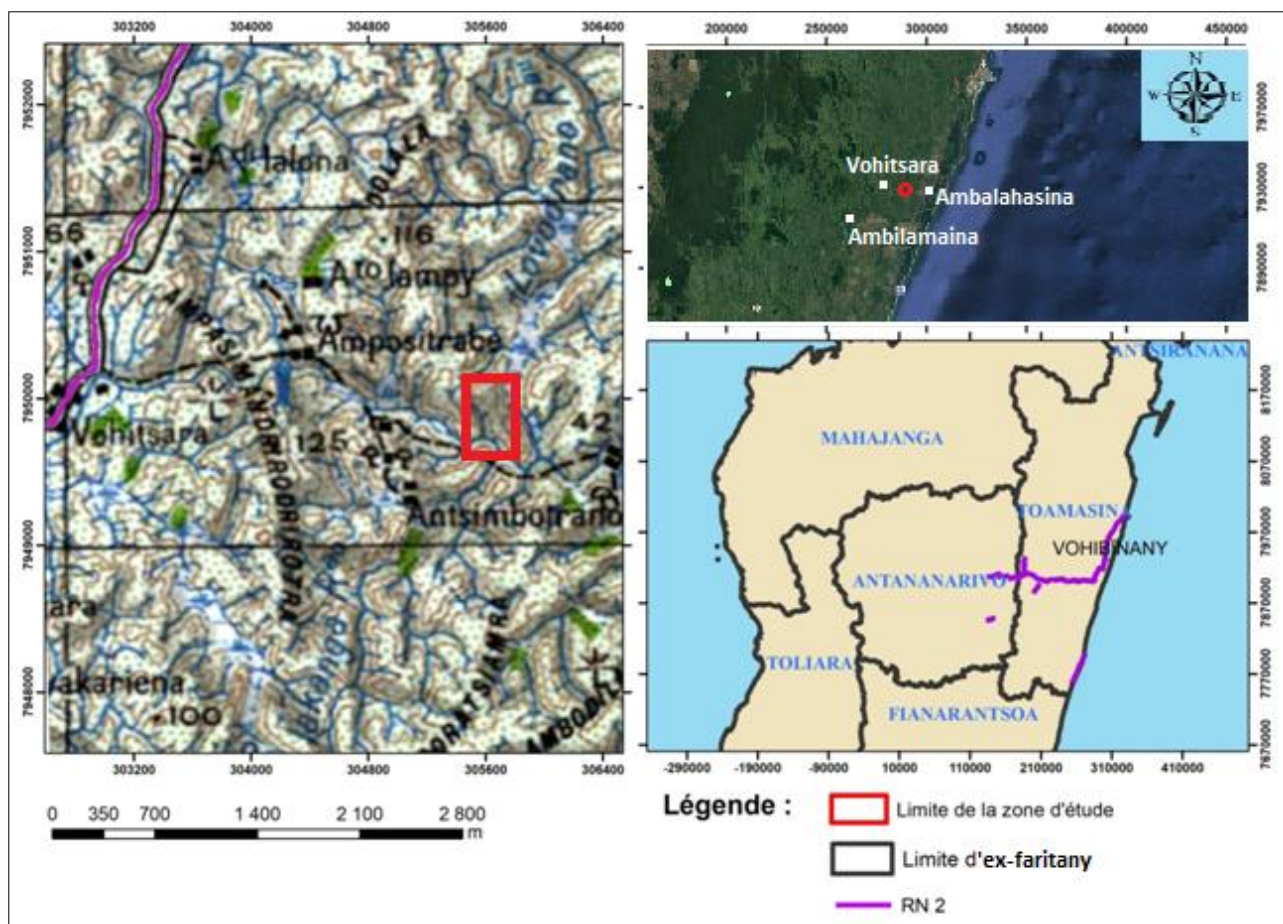


Figure 4 : Localisation de la zone d'étude (BD 100, FTM)

I - 4 - CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE [8] [9] [10]

La zone d'étude appartient au groupe de Manampotsy du domaine d'Antananarivo. En effet, le Domaine d'Antananarivo, qui correspond aux hauts plateaux du centre de Madagascar, est une vaste étendue composée d'orthogneiss et de paragneiss d'âge Néoarchéen en faciès schiste vert à granulitique. Il est aussi le substratum de deux séquences de roches métasédimentaires majeures qui affleurent dans d'étroites ceintures orientées N-S, suivant ainsi la fabrique structurale présente dans le bouclier archéen. L'âge de dépôt de ces deux groupes est du Néoproterozoïque :

- la ceinture la plus occidentale, le Groupe d'Ambatolampy, forme une ceinture discontinue autour de l'épine centrale de l'île, depuis Fianarantsoa au sud, jusqu'à Maevatanana au nord.
- la plus orientale, le Groupe de Manampotsy, forme une zone de roches riches en graphite au travers de la forêt tropicale de l'est de Madagascar. Depuis le village de Manakara au sud, jusqu'à celui de Manampotsy au nord. A partir du village de Manampotsy cette ceinture de roches graphiteuses se divise vers le nord, en deux zones de part et d'autre du

synforme de Beforona. La partie Ouest peut être suivie au nord sur 200 km depuis Manampotsy jusqu'au lac Alaotra. La partie Est de cette ceinture peut être suivie sur près de 500 km de Tamatave à Bealanana. Les deux « branches » du Groupe de Manampotsy sont fortement cisailées, localement riches en graphite et elles contiennent des masses disloquées de roches basiques et parfois ultrabasiques, d'âge Cryogénien

Le Groupe de Manampotsy repose sur une ceinture orientée N-S, de roches métasédimentaires à fort pendage. En plus des schistes et des gneiss quartzo-feldspathiques stratifiés, dont certains sont très riches en graphite, le Groupe de Manampotsy comprend des amas et des lentilles de roches basiques et ultrabasiques qui peuvent varier en taille jusqu'à plusieurs centaines de mètres d'extension. Ces amas sont isolés et ont été enregistré dans la même histoire tectonique et métamorphique que les paragneiss encaissant.

Il est constitué des sept unités suivantes :

- roche ultrabasique
- quartzite
- paragneiss à silicates calciques et marbre
- schiste graphiteux indifférencié : il s'agit ici des schistes et gneiss quartzo-feldspathiques indifférenciés, riches en graphite, associé à des paragneiss quartzo-feldspathiques migmatitiques à biotite, avec ou sans sillimanite, et aussi des bandes cartographiables d'amphibolites.
- paragneiss de Ranomafana Est,
- paragneiss et schiste d'Andasibe,
- quartzite et paragneiss d'Ampasary à reliques de roches ultrabasiques.

Les groupes de Manampotsy et d'Ambatolampy sont interprétés comme des bassins intracratoniques issus d'une distension intracontinentale sub-contemporaine du magmatisme Imorona-Itsindro (840-760 Ma).

Ces domaines sont illustrés dans la carte de la figure 5 suivante :

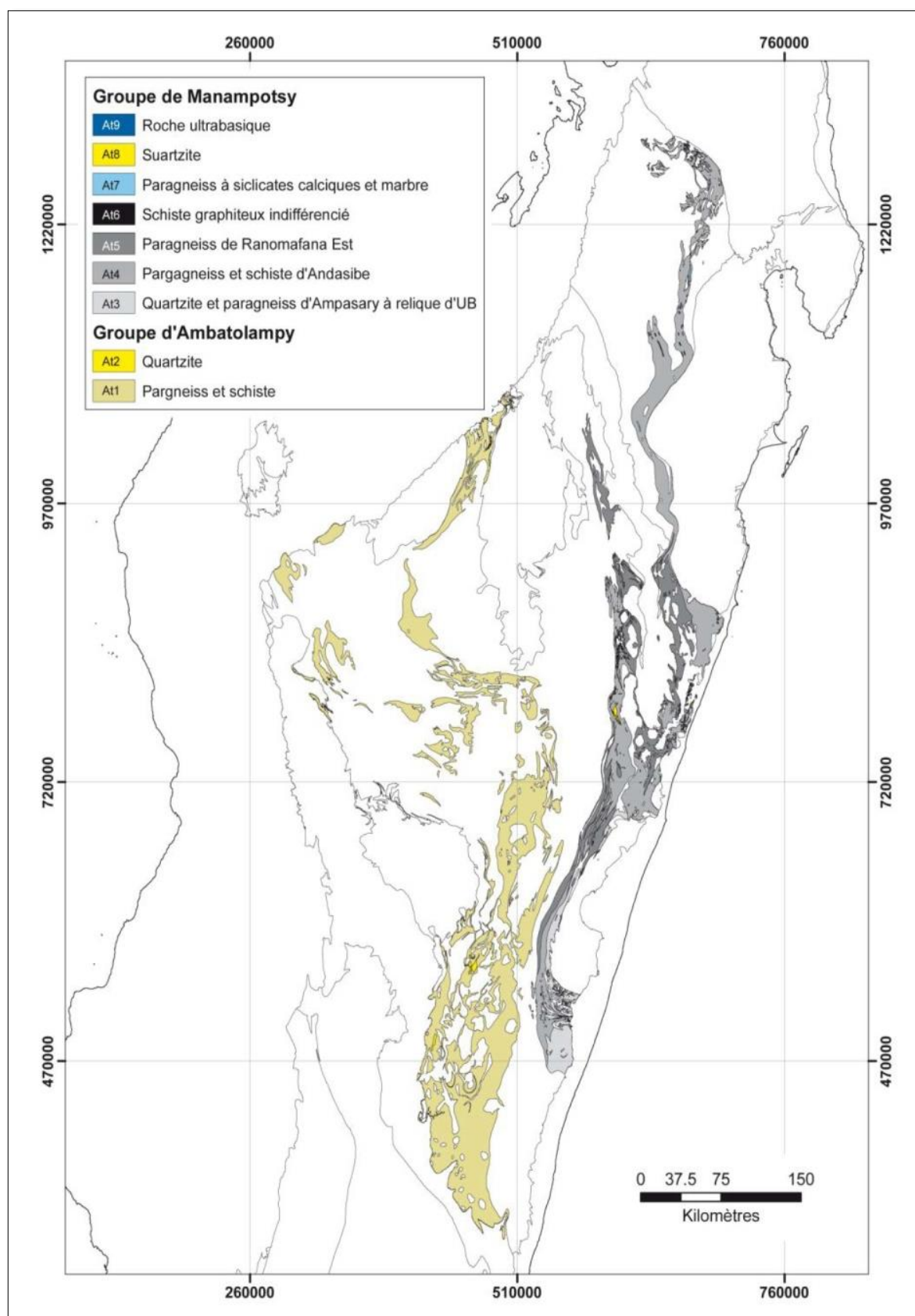


Figure 5 : Groupes du Néoproterozoïque du Domaine d'Antananarivo (PGRM 2012)

Les formations géologiques environnant la zone d'étude sont présentées dans la carte de la figure 6 suivante :

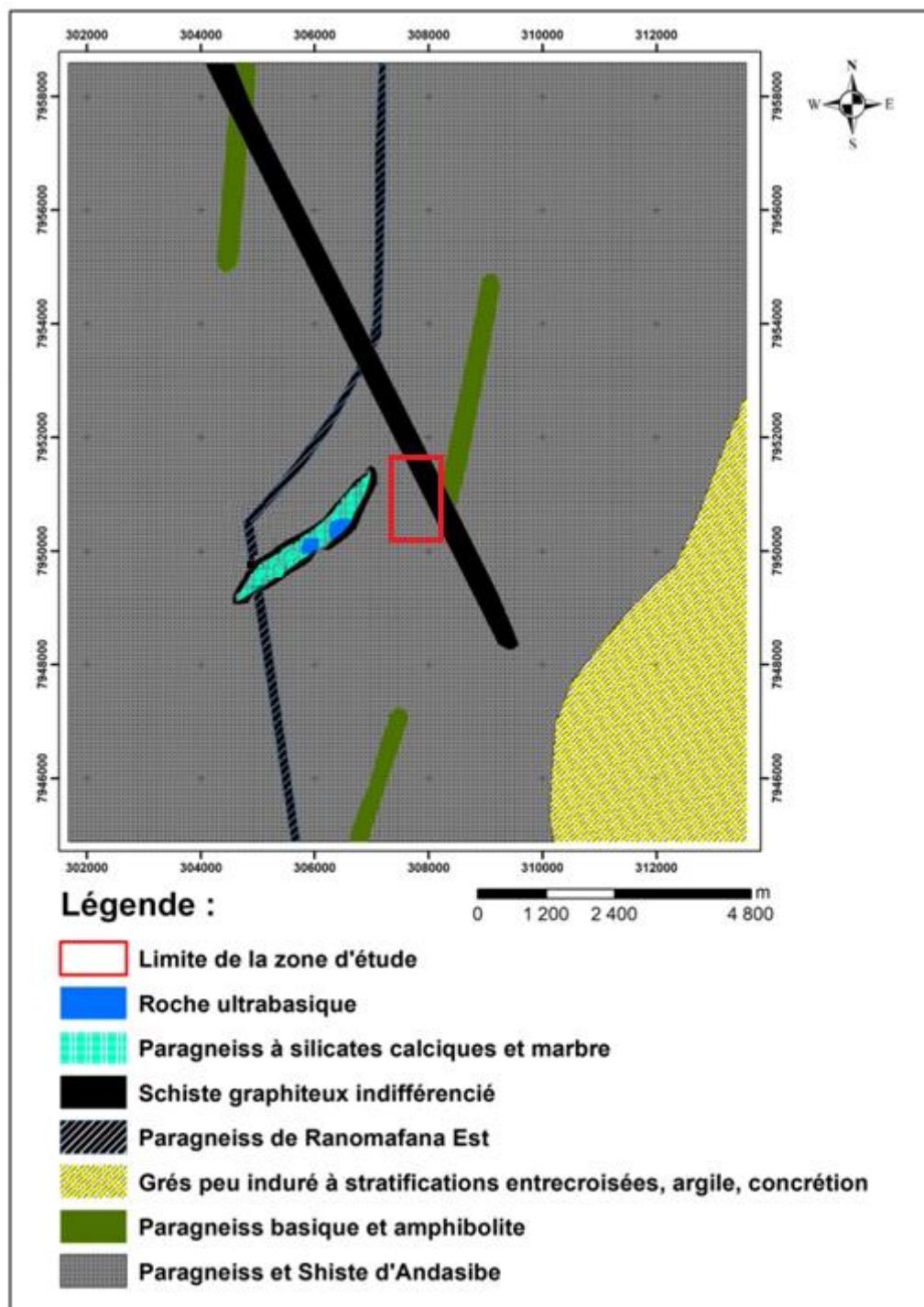


Figure 6 : Carte géologique de la zone d'étude (PGRM 2012)

CHAPITRE II

METHODOLOGIE

ET MATERIEL UTILISEES

CHAPITRE II

METHODOLOGIE ET MATERIEL UTILISEES

II - 1 - RAPPEL METHODOLOGIQUE

La prospection électromagnétique (EM) utilisant la source artificielle ou naturelle, variable dans le temps, repose sur l'interdépendance entre deux champs : magnétique et électrique. Selon la fréquence et la source utilisée, la distance entre émetteur et récepteur, les paramètres mesurés et le domaine de mesure, la technique et la théorie changent [11] [12].

II - 1 - 1. PROSPECTION ELECTROMAGNETIQUE

Selon la source utilisée, les méthodes de prospection électromagnétique sont dites actives si le champ primaire H_p est généré artificiellement à l'aide de générateur de courant ou d'antenne. On pourrait aussi utiliser un champ électromagnétique naturel (généré par des courants dans l'ionosphère) on dit dans ce cas que la méthode est passive. H_p interagit avec les matériaux conducteurs dans le sol, pour ainsi générer un champ électromagnétique secondaire H_s . C'est la conductivité électrique du sol (σ , en Siemens/mètre) qui est la propriété physique responsable de la formation de H_s . Les méthodes de prospection électromagnétique servent donc à imager la conductivité du sous-sol, et permettent, par exemple, la détection de gisements plus conducteurs que la roche encaissante [13].

La méthode de prospection électromagnétique fait donc intervenir simultanément les trois processus physiques distincts suivants [14] :

- i. production d'un champ magnétique primaire qui varie avec le temps**
- ii. naissance de courants induits (courants de Foucault) dans tous les conducteurs sur lesquels agit ce champ primaire**
- iii. détection de ces conducteurs par la mesure des champs magnétiques secondaires créés par les courants de Foucault**

Cette discussion est résumée à la figure 7 où les éléments clés y sont présentés de façon schématique.

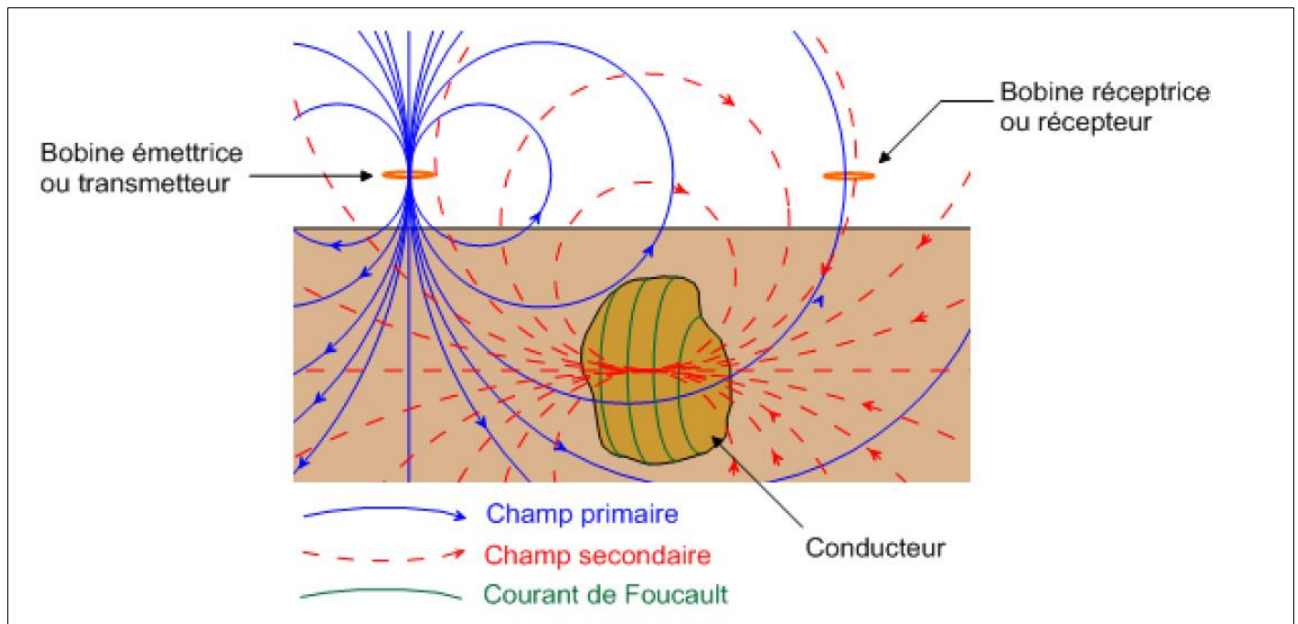


Figure 7 : Induction électromagnétique

Tous les phénomènes électromagnétiques sont gouvernés par les équations empiriques de Maxwell, ainsi doit-on les aborder tout d'abord.

II - 1 - 2. LES EQUATIONS DE MAXWELL

Les équations de Maxwell sont des équations locales qui expriment des relations entre le champ électromagnétique et ses sources :

- loi de Faraday :

Un champ électrique est induit le long de boucles qui entourent la surface traversée par un champ magnétique variable dans le temps.

$$\vec{\nabla}_A \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

- loi d'Ampère :

Un courant qui perce une surface génère un champ magnétique qui tourne autour de celle-ci.

$$\vec{\nabla}_A \vec{B} = \mu \left(\vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (2)$$

- loi de Gauss :

Le champ électrique qui sort d'une surface fermée est proportionnel à la charge contenue dans le volume :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon}$$

Comme le total des charges à l'intérieur est nul, on aura alors : $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ (3)

- loi de Gauss pour le magnétisme :

Le champ magnétique qui sort d'une surface fermée est toujours nul. Il n'y a pas de "charges" magnétique dans le volume ainsi formé (les monopôles magnétiques n'existent pas).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Dans ces 4 équations,

\vec{E} : est le champ électrique

\vec{B} : est le champ d'induction magnétique

\vec{J} : vecteur densité de courant

μ : la perméabilité magnétique du milieu

ϵ : permittivité électrique du milieu

II - 1 - 3. EQUATION DE DIFFUSION ET DE PROPAGATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

A partir de ces équations de Maxwell, on peut construire l'équation de diffusion et propagation d'un champ électromagnétique.

En combinant les équations (1) et (2), et en sachant que :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} ; \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{E} = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \Delta \vec{E} = -\Delta \vec{E}$$

On obtiendra [16] :

$$\Delta \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0}$$

Ceci est l'équation de diffusion-propagation pour le champ électrique. On procède de la même façon et on obtiendra la même forme d'équation pour le champ magnétique :

$$\Delta \vec{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \vec{0}$$

Ces équations sont aussi connues sous le nom d'équation d'Helmholtz.

Le laplacien traduit le comportement spatial du champ. Le second terme, c'est-à-dire la dérivée temporelle d'ordre 2, rend compte de l'aspect ondulatoire du champ, c'est le terme de diffusion. La dérivée temporelle d'ordre 1 traduit quant à elle l'aspect induction.

Cette équation aura pour solution harmonique :

$$\vec{E} = E_0 e^{-kz} e^{i(\omega t - az)} \quad (5)$$

Où a est le nombre d'onde et k le facteur d'atténuation.

Pour les matériaux du sous-sol, à une fréquence inférieure à 10^5 le terme d'induction domine le terme de diffusion [15], on a alors :

$$\Delta \vec{E} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0} \quad (6)$$

II - 1 - 4. EFFET DE PEAU

Dans un milieu homogène semi-infini dont la surface est plane, un champ magnétique alternatif peut se distribuer uniformément. L'équation de Helmholtz nous indique que le champ électrique doit varier le long d'au moins une direction spatiale, car $\partial H / \partial t$ est différent de zéro. Si on admet l'uniformité le long des axes x et y (sol stratiforme) [14], on aura alors :

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0} \quad (7)$$

Et en portant (5) dans (7) on obtient l'expression de k et a :

$$k = a = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}$$

Le facteur $P = 1/k$ présente les dimensions physiques d'une longueur. On peut l'appeler profondeur de pénétration. Sa signification est la suivante : quand la profondeur s'accroît de P , l'amplitude du champ électrique, du champ magnétique et de la densité de courant se trouvent divisées par le nombre exponentiel ($e \approx 2,718$).

$$P = \frac{1}{k} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (8)$$

II - 2 - MATERIEL UTILISE

L'appareil utilisé lors de cette campagne de prospection était le Beep Mat, modèle BM8 de GDD instrumentation Canada. Il s'agit brièvement d'un instrument de prospection électromagnétique version miniaturisé, généralement conçu pour la recherche minière, la détection des affleurements et/ou des erratiques contenant des minéraux conducteurs et/ou magnétiques [17]. Le Beep Mat est complémentaire aux levés électromagnétiques aéroportés et indique immédiatement les anomalies près de la surface.

II - 2 - 1. DESCRIPTION DU BEEP MAT

Le Beep Mat est un dispositif constitué d'une sonde ayant la forme d'un court traîneau et un module de lecture. Pour prospecter, il suffit de mettre la sonde sur le sol, puis la tirer afin de couvrir le terrain à explorer [18].

En plus de la détection des conducteurs, le Beep Mat permet de mesurer la conductivité intrinsèque et la susceptibilité magnétique (contenu en magnétite) des corps, ainsi que des matières qu'il traverse.

En mode initialisation, il y a trois cas possibles. Les voici : la sonde Beep Mat seul, le senseur Mag seul, la sonde Beep Mat et le senseur Mag branché simultanément [18].

La figure 8 ci-dessous renseigne sur la forme de l'appareil ainsi que ses éléments :

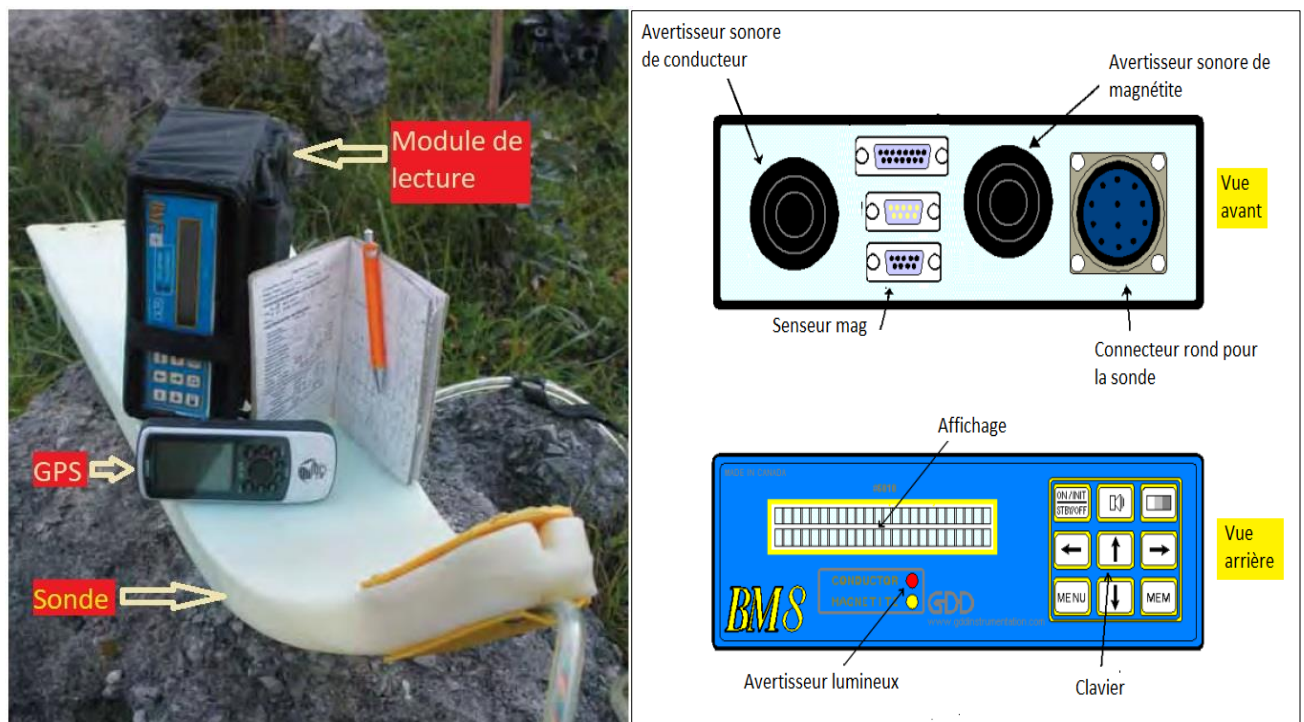


Figure 8 : Le Beep Mat BM8 ainsi que l'élément de son module de lecture [18]

II - 2 - 2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La sonde contient une bobine inductrice dans sa coque [18] [19]. Lorsque la sonde est en position horizontale sur le sol, comme illustré à la figure 9, l'axe d'induction transmis par la bobine est à la position verticale.

La zone d'influence de son champ inducteur a un rayon moyen (appelé « portée ») d'environ 3 mètres. Tout objet conducteur ou magnétique se trouvant dans la zone réagit en réémettant un champ secondaire (ou “champ induit”).

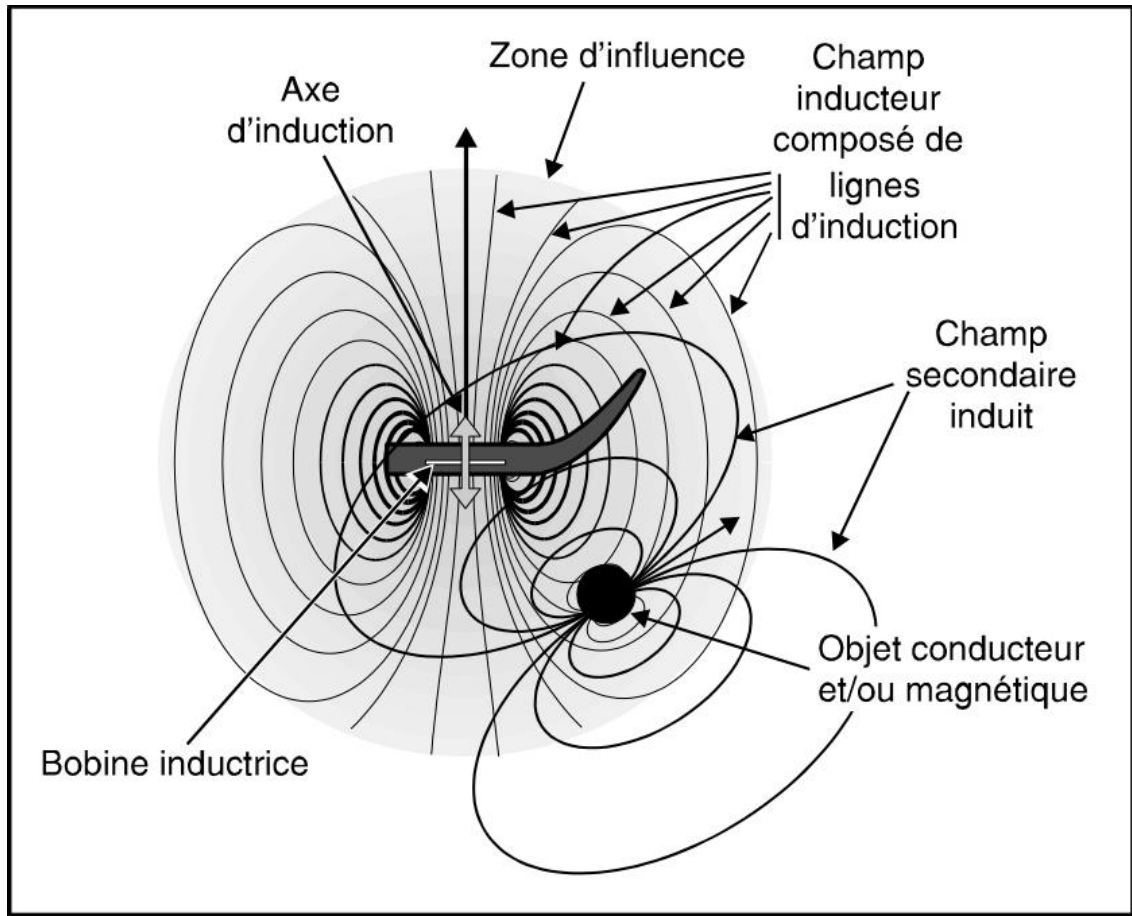


Figure 9 : Principe de fonctionnement [18]

Le Beep Mat utilise une méthode du type Slingram. En effet, ce dispositif s'opère dans le domaine de basse fréquence en champ proche, utilisant comme émetteur et récepteur des boucles de courants verticaux par rapport au sol, et dont les nombres d'induction sont faibles.

Le nombre d'induction N est exprimé par [20] [21] : $N = k \times r$

Où, k est le nombre d'onde et r la distance émetteur-récepteur.

Dans le cas général, $k = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma - \omega^2\mu_0\epsilon_0}$; mais comme dans notre cas, on a affaire à un milieu exclusivement diffusif, $\sigma \gg \omega\epsilon_0$.

Il s'en suit, $k = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$ d'où, $N = r \cdot \sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$

A faible induction, $N \ll 1$: dans ce cas, l'amplitude du champ secondaire est alors proportionnelle à la conductivité du matériau, le champ magnétique secondaire en quadrature avec le champ magnétique primaire.

La profondeur d'investigation est fonction de la distance entre émetteur et récepteur, de la nature du terrain, de la fréquence utilisée, ainsi que de la disposition des boucles.

Compte tenu du nombre d'induction N , on aura :

$$P = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{\sqrt{2i}}{k}$$

La grandeur mesurée est le rapport de la composante du champ secondaire en quadrature au champ primaire qui permettra alors de décrire l'hétérogénéité du sous-sol en termes de conductivité apparente, donné par la formule :

$$\sigma_a = \frac{2}{\pi f \mu_0 r^2} \frac{|H_s|}{|H_p|} q$$

Où, f la fréquence, r la distance émetteur-récepteur, μ_0 la perméabilité magnétique du vide, q pour dire composante en quadrature

Une des spécificités du Beep Mat est aussi le fait qu'il émet simultanément des champs inducteurs à plusieurs gammes de fréquence.

La sonde réagit sur la partie de ce champ qui traverse sa bobine inductrice. Cette réaction est ensuite affichée sur le module de lecture en tant que valeurs LFR, HFR, MAG et RT.

Voici la signification des valeurs LFR, HFR, MAG et RT :

- la valeur LFR (Low Frequency Response – Réponse basse fréquence) représente une réaction spécifique de la basse fréquence, en hertz, à la présence d'un conducteur près de la sonde.
- la valeur HFR (High Frequency Response – Réponse haute fréquence) représente une réaction spécifique de la haute fréquence, en hertz, à la présence d'un conducteur près de la sonde.
- la valeur MAG (magnétite) représente une réaction spécifique de la sonde à la présence d'un corps magnétique, en particulier un corps contenant de la magnétite (susceptibilité relative).

- la valeur RT (ratio) indique la qualité du conducteur (conductivité intrinsèque) et est indépendante de la quantité de matériel présent.

II - 2 - 3. INTERPRÉTATION DES VALEURS

Le Beep Mat donne une mesure quantitative de la conductivité apparente et/ou du contenu moyen en magnétite de la roche sous-jacente. Il donne aussi un estimé de la conductivité intrinsèque grâce au ratio RT [18] [19].

*** Contenu en magnétite**

Le contenu en magnétite est mesuré sur un volume de 1 mètre³ sous la sonde. Les calibrations indiquent qu'une valeur MAG de -1 000 correspond à 1 % de magnétite sous la sonde. Cette équivalence existe jusqu'à une valeur MAG de -20 000, soit 20 % de magnétite.

*** Conductivité apparente**

La conductivité apparente a jusqu'à maintenant été calibrée seulement en l'absence de magnétite. Le graphique présenté à la figure 10 (courbe 1) indique la conductivité apparente en fonction de la valeur HFR et en l'absence de magnétite. Notons qu'une veinule ou une pièce de monnaie suggéreront une mauvaise conductivité, car l'appareil mesure la conductivité moyenne de tout l'espace entourant la sonde. Par contre, l'appareil donne une mesure réelle de la conductivité d'une couche d'argile. La proximité de l'eau crée des signaux négatifs. L'estimation de la conductivité d'une couche d'argile pleine d'eau est un peu plus réelle si on lève la sonde de 10 centimètres au-dessus du sol, car l'influence de l'eau, tout comme celle de la magnétite, diminue plus rapidement que l'effet du conducteur (voir les courbes 2 et 3).

*** Conductivité intrinsèque**

En l'absence de magnétite, le ratio (Rt) donne une mesure de la conductivité intrinsèque du conducteur, et ce rapport n'est pas influencé par la dimension du conducteur. Ainsi, une pièce de monnaie placée sur le point de vérification (le 1er "D" de GDD) donnera des valeurs HFR +70 et +80 et un ratio près de 84 %, alors qu'une couche d'argile d'Abitibi donnera aussi une valeur HFR de +80, mais cette fois, un Rt près de 0 % dû aux sols argileux peu conducteurs. Notons que Rt sera calculée si le HFR est d'au moins 10 et s'il n'y a pas de magnétite (MAG = 0).

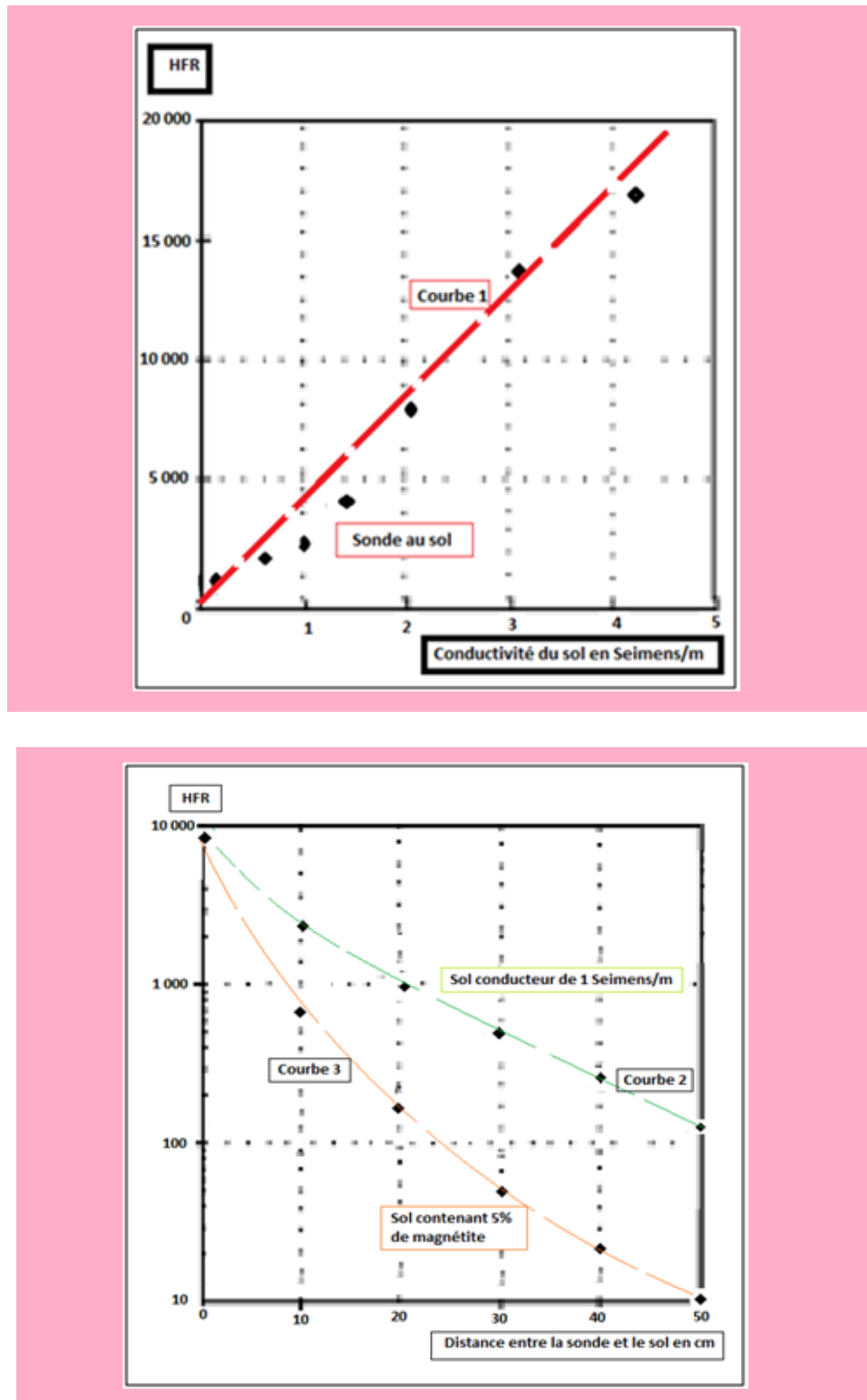


Figure 10 : Facteurs influençant la valeur HFR [18]

II - 2 - 4. INTERPRÉTATION DES LECTURES

Cette partie explique comment interpréter les valeurs sur une cible ainsi que les courbes de ces valeurs.

*** Données sur une cible**

Les valeurs HFR, LFR et MAG sont influencées par la conductivité d'un objet et son contenu en magnétite. Une valeur LFR indique que cet objet est plus conducteur que magnétique, alors qu'une valeur MAG indique l'inverse. Un bloc conducteur et magnétique pourrait donner une valeur LFR ou MAG selon la proportion de ces éléments. Plus l'objet est gros ou près de la sonde, plus la valeur est élevée. La présence d'humidité dans le sol a pour effet d'ajouter une composante de 0 à -100 à la valeur MAG (comme illustre la figure 11), ce qui fait qu'en l'absence de conducteur, les lectures sont généralement MAG.

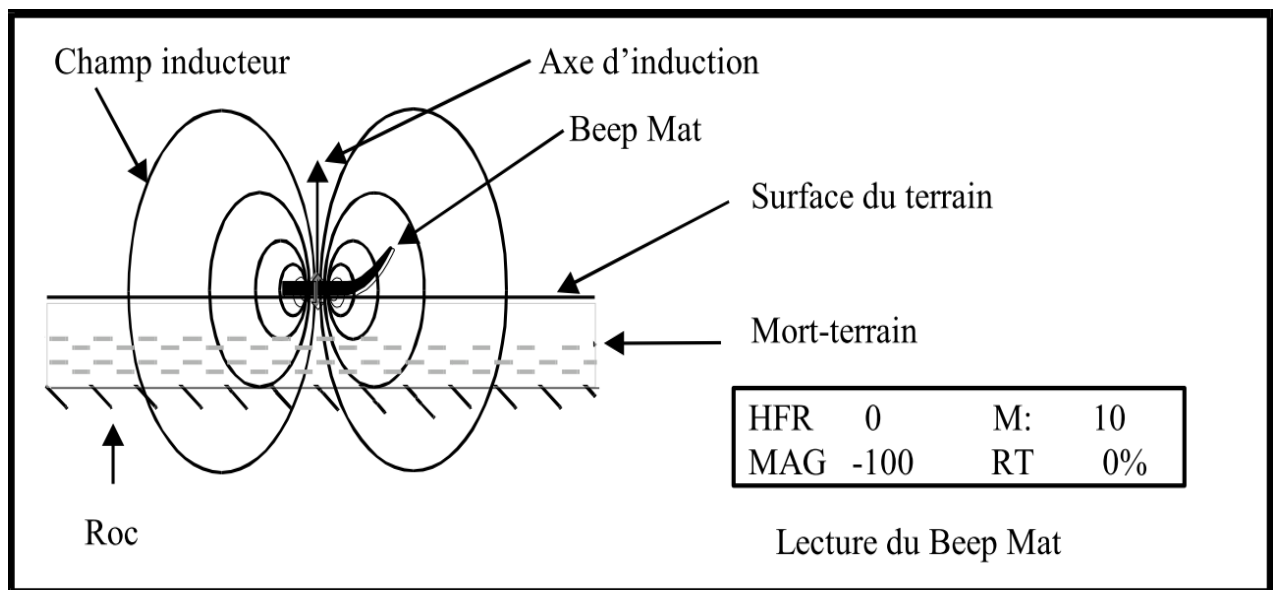


Figure 11 : Lecture typique sans anomalie [18]

Le HFR correspond à la variation de la haute fréquence et le LFR ou MAG correspond à la réaction de la basse fréquence. Quand on approche d'un échantillon riche en magnétite (par exemple, une veine), la basse fréquence réagit plus que la haute fréquence, alors la valeur MAG devrait apparaître et être légèrement plus négative que le HFR. La valeur MAG (magnétite) augmente en valeur négative (voir figure 12, cas "b").

Quand on approche d'un échantillon de sulfures conducteur, le HFR réagit plus que le LFR. Ainsi, la valeur HFR devrait augmenter alors que la valeur LFR devrait apparaître et demeurer plus basse (voir figure 12, cas « a »). Si le HFR est élevé et que le LFR est presque équivalent, cela signifie que la conductivité de l'échantillon est élevée et que le corps pourrait s'avérer être du métal.

Plus la conductivité du bloc n'est faible, plus la valeur HFR est basse. En approchant un bloc conducteur qui contient aussi de la magnétite, le HFR augmentera et le MAG diminuera en valeur négative (voir figure 12, cas "c").

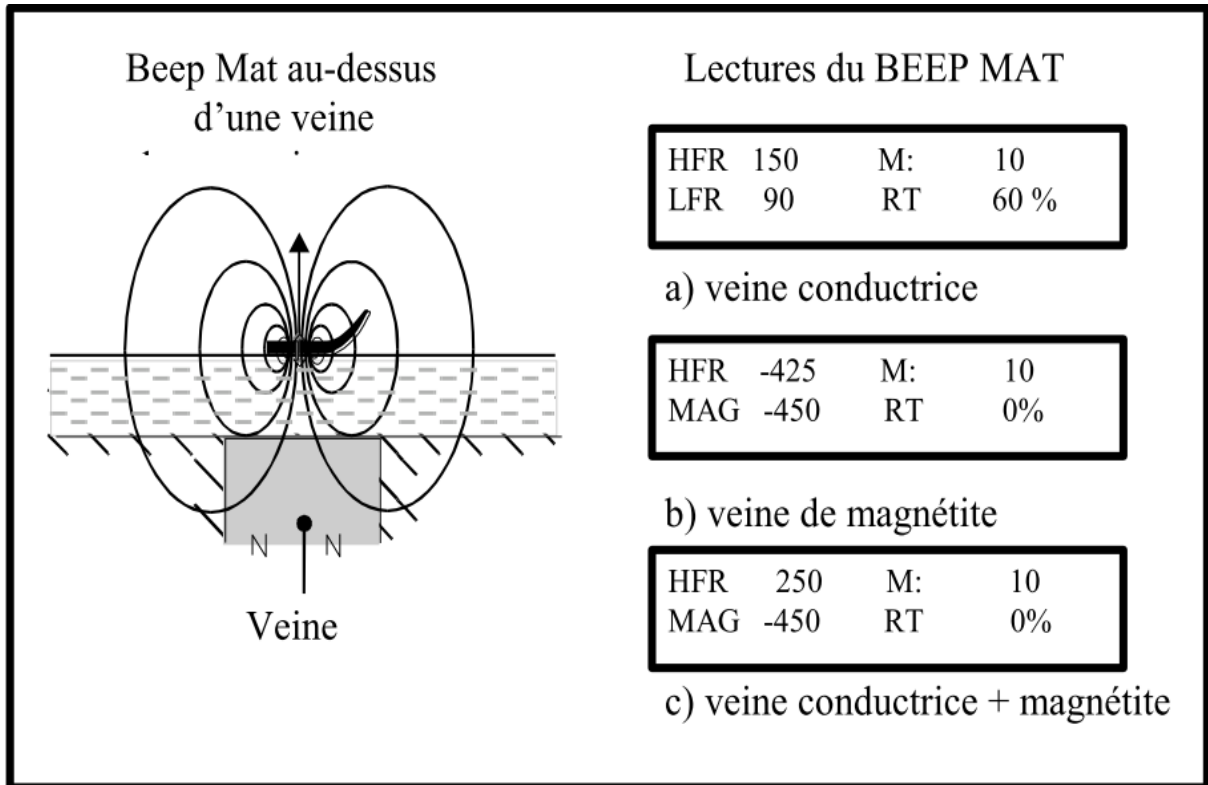


Figure 12 : Exemple de lectures en présence : a) d'un conducteur, b) de magnétite, c) d'un conducteur contenant de la magnétite [18].

*** Profils sur des cibles**

On peut dessiner un profil des valeurs affichées le long d'une traverse, mais il est plutôt suggéré de s'en faire seulement une image mentale. Les deux figures suivantes illustrent deux exemples simplifiés, mais typiques :

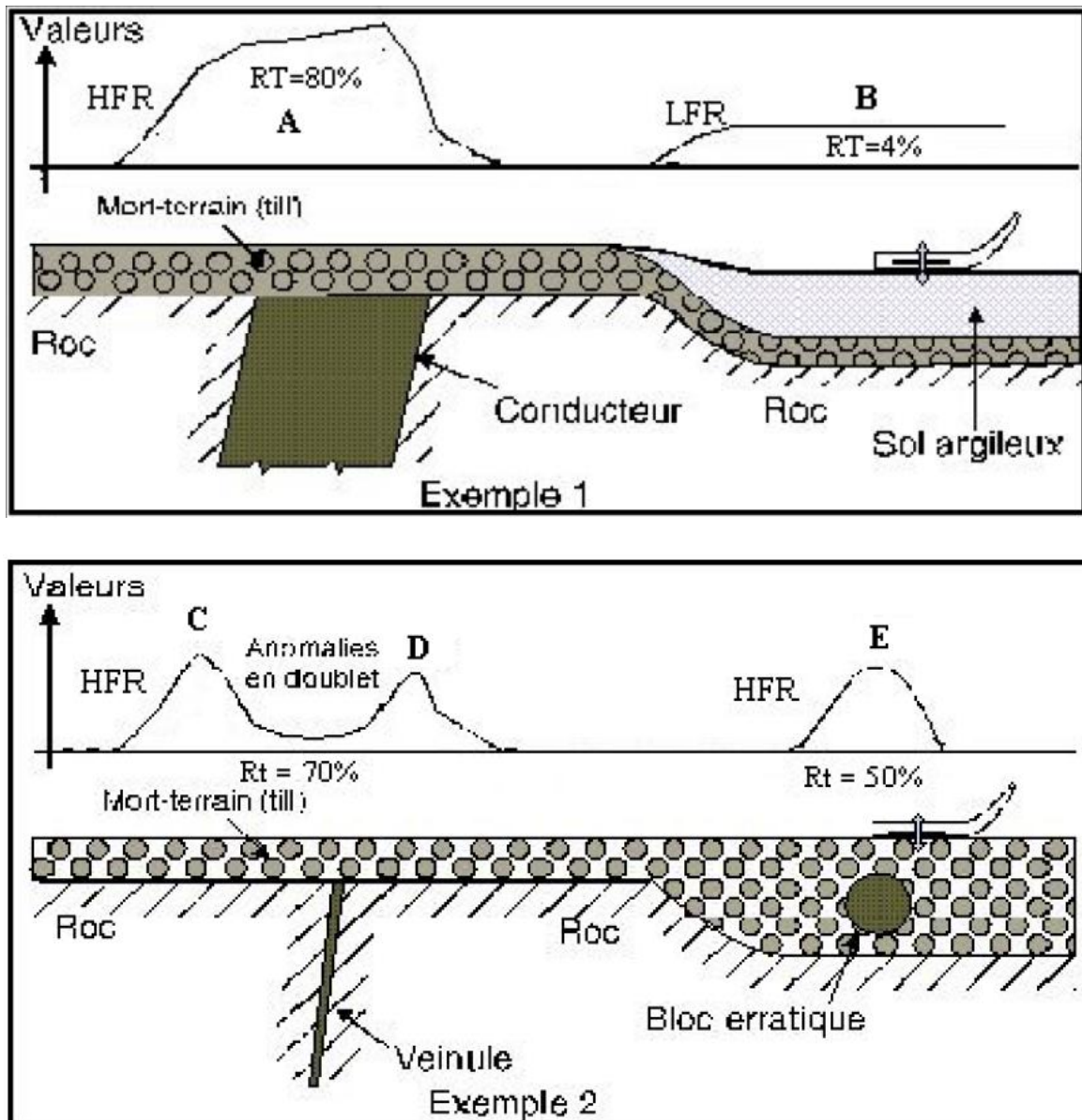


Figure 13 : Exemples d'anomalies [18]

Voici l'interprétation des deux exemples ci-dessus :

- l'anomalie A est forte et large, et le ratio RT est élevé. Cela indique la présence d'un conducteur large et dense avec une bonne conductivité
- l'anomalie B, par contre, est faible et uniforme, et le ratio RT est faible. Il s'agit d'un signe typique de l'effet d'un sol argileux
- les anomalies C et D de l'exemple 2 ci-haut formant un doublet sont toutes deux causées par l'effet d'une veinule quasi verticale. Il n'y a pas d'anomalie au-dessus de la veinule, car les lignes d'induction ne la traversent pas



- l'anomalie E est relativement étroite et réagit surtout en HFR. Dans cet exemple, elle est due à la présence d'un bloc erratique dans du till (mort terrain).

CHAPITRE III

**ACQUISITION ET
TRAITEMENT DES DONNEES**

CHAPITRE III

ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES

Dans ce qui va suivre, on va développer les démarches à adopter depuis les acquisitions des données sur le terrain jusqu'à la phase d'obtention des résultats finaux.

III - 1 - ACQUISITION DES DONNEES

L'acquisition de données sur le terrain constitue une étape importante en exploration géophysique car elle met généralement en valeur la fiabilité des données brutes qui seront ensuite traitées dans les logiciels associés, et donc l'efficacité de la détection des cibles selon les résultats qu'on voudrait attendre et les interprétations qu'on en pourrait déduire.

Ainsi, deux points importants ont été pris en compte comme études préliminaires :

- d'une part, le choix de la direction des levés de mesure : cette étape est généralement basée : sur des analyses à partir de la carte géologique du terrain en vue d'identifier les zones potentielles, et ensuite, sur la descente sur terrain en vue d'effectuer des échantillonnages, d'étudier la morphologie des affleurements, et la localisation des indices [21], il s'agit ici donc d'élaborer une carte stratégique indiquant le trajet approprié.
- d'autre part, la préparation des appareils et équipement nécessaire au levé, incluant le paramétrage du seuil de détection de l'appareil, la vérification de la charge de la batterie et le GPS qui y sera utilisé.

Après cette étape, l'appareil est alors tiré suivant une direction bien défini afin de bien couvrir la totalité de la zone.

Les mesures ont été effectuées sur un périmètre rectangulaire de 3 800 m, avec 870 m² de surface.

Du fait que l'accès est relativement difficile, dû à la variation géomorphologique, de la végétation et de la forêt occupant la surface de la zone, les directions ont été choisies en fonction de ces problèmes afin de faciliter l'acquisition des mesures.

Le BM8 prend des lectures continues, et envoie un signal sonore distinctif lors de la détection d'un conducteur ou d'un objet magnétique. Le BM8 permet l'utilisation d'un capteur magnétique et la connexion d'un GPS afin de permettre la localisation réelle de la sonde en chaque point de l'espace.

La figure 14 ci-dessous montre la direction du levé :

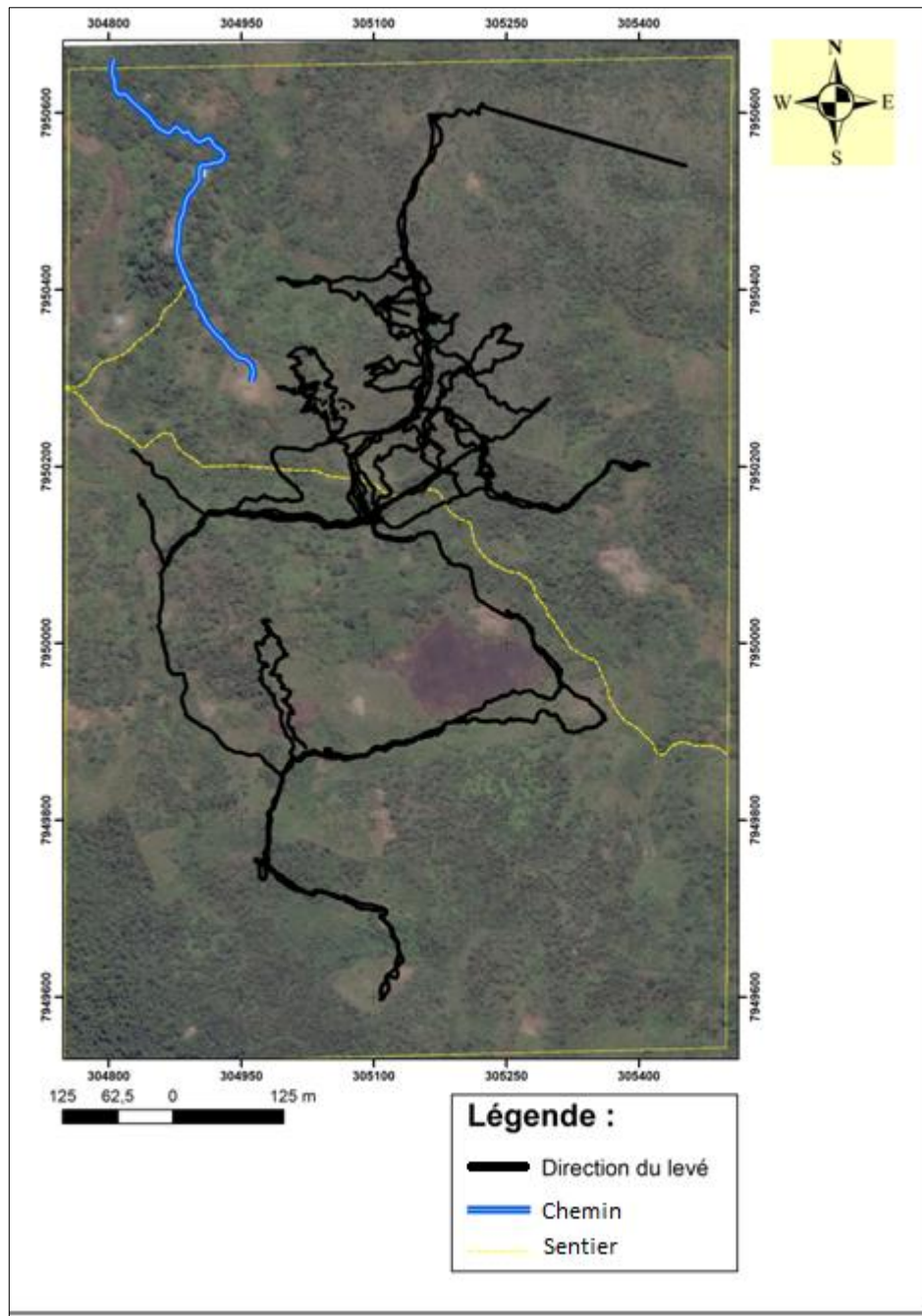


Figure 14 : Direction des levés

III - 2 - TRAITEMENT DES DONNEES

Les données obtenues après la mesure par Beep Mat ont été transférées directement du BM8 à un ordinateur pour traitement.

Il s'agit généralement d'un fichier de données groupé dans un tableau dans lequel, chaque ligne est associée aux coordonnées géographiques d'un point de mesure, à ses valeurs HFR, LFR, et RATIO affichées en temps réel.

La figure 3.2 ci-dessous donne un aperçu des données :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	X utm	Y utm	DateRTC	TimeRTC	Time	HFR	LFR/MAG	Ratio	Zone	Memory
2	305117	7949609	24/07/15	06:10:10	93914	-49	-18	0	39K	89
3	305117	7949612	24/07/15	06:09:47	93852	-51	-17	0	39K	66
4	305116	7949617	25/07/15	05:40:23	90927	-37	-5	0	39K	89
5	305115	7949621	24/07/15	06:10:37	93942	-45	-24	0	39K	116
6	305125	7949622	24/07/15	06:10:07	93912	-42	-14	0	39K	86
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
13	305296	7949988	24/07/15	06:08:56	93800	89	55	18	39K	16
14	305295	7949989	24/07/15	06:09:29	93834	66	64	17	39K	49
15	305287	7949990	24/07/15	06:09:05	93810	89	112	5	39K	25
16	305294	7949990	25/07/15	05:37:38	90642	116	84	24	39K	10
17	304863	7950091	24/07/15	06:09:00	93804	86	26	14	39K	20
18	304861	7950093	25/07/15	05:39:46	90849	55	19	6	39K	16
19	304860	7950094	25/07/15	05:40:27	90931	64	16	14	39K	97
20	304869	7950101	25/07/15	05:39:48	90851	112	49	29	39K	20
21	305145	7950118	25/07/15	05:40:05	90909	84	25	14	39K	54
22	304850	7950126	25/07/15	05:39:47	90851	26	10	4	39K	19

Figure 15 : Aperçu des données brutes

Il est à noter que lorsque l'appareil est mis en marche, le module de lecture s'opère avec une fréquence d'enregistrement de levées atteignant jusqu'à 10 fois par seconde, le premier problème lors du traitement de données par Beep Mat est alors la présence de redondance de données due à la variation de la vitesse de déplacement appliqué à l'appareil sur le terrain. En d'autre termes, on rencontre presque pour chaque ligne : à un point de coordonnées (X_utm ; Y_utm) donné est associé à 3 à 8 valeurs de HFR, LFR, et Ratio différentes. Les études et observations de ces valeurs ont montré qu'elles ne sont pas très différenciées l'un de l'autre. Ces redondances n'influent pas généralement la fiabilité des données collectées par l'opérateur, c'est pourquoi, on a pris la moyenne arithmétique de ces valeurs comme valeur de HFR, LFR, et RATIO du point concerné.

Ensuite, puisque la cible en question ici est le graphite connu comme étant un matériau conducteur, on a alors exclu toutes les lignes reflétant la présence de matériaux non conducteurs et de matériau magnétique de la donnée brute : ces lignes de valeurs sont généralement les lignes correspondant aux Ratio nulles.

La donnée finale ainsi obtenue après ces deux phases de prétraitement sera alors utilisée pour sortir les résultats finaux.

La figure 16 ci-dessous montre la localisation des corps conducteurs selon les données prétraitées :

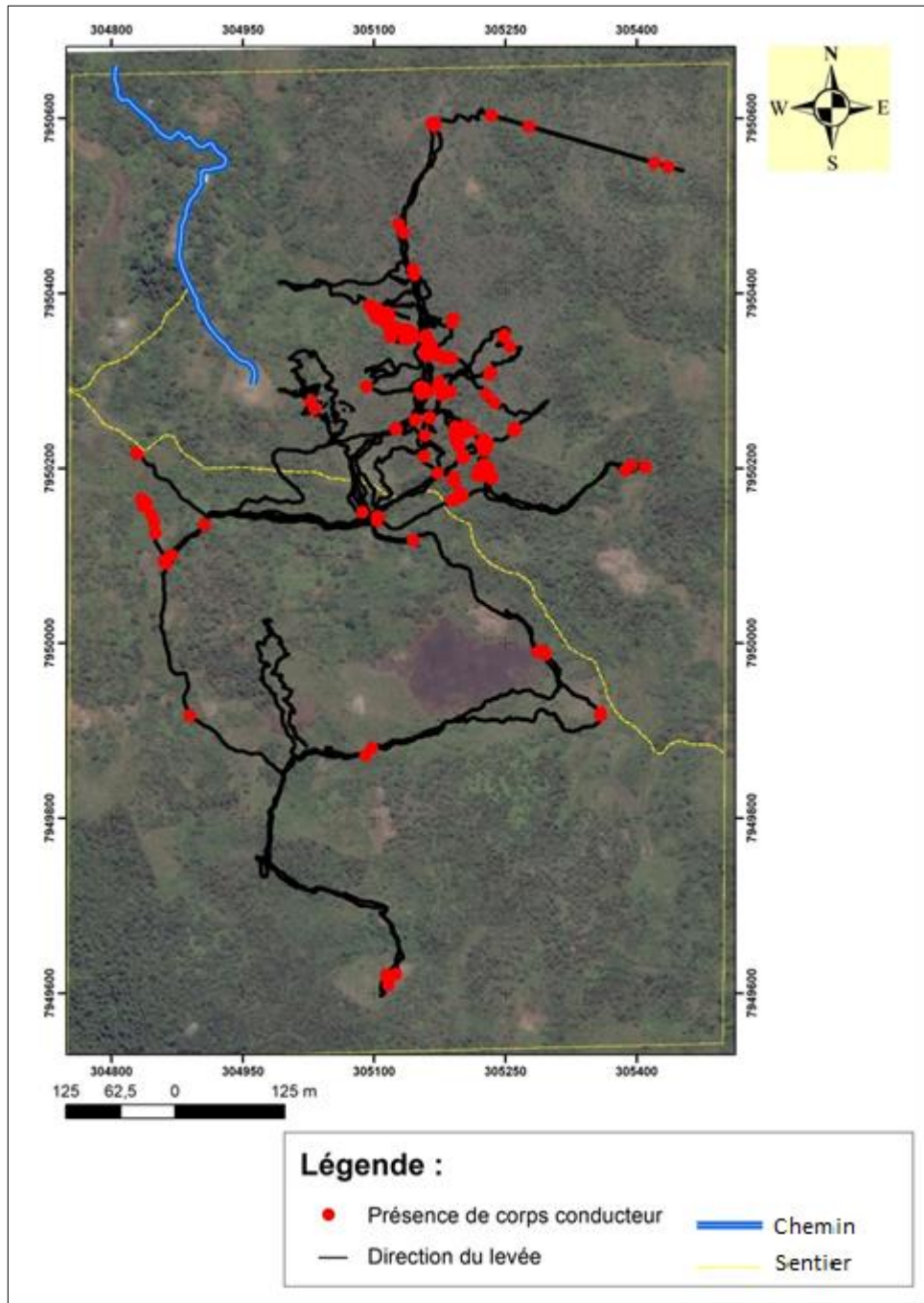


Figure 16 : Localisation des points de mesures de la donnée prétraitée

Les points rouges sur cette figure indiquent la présence de matériau conducteur dans ces zones. L'objectif est maintenant de produire les trois cartes suivant à partir des données représentées par ces points :

- la carte d'anomalie HFR reflétant les zones conductrices superficielles
- la carte d'anomalie LFR reflétant les zones conductrices un peu profondes
- la carte de ratio représentant la conductivité intrinsèque de la zone.

Pour ce faire, divers logiciels étaient alors mis en jeu :

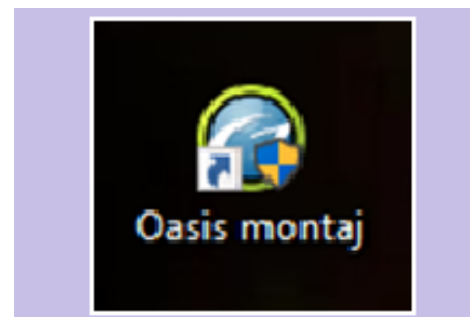
- le XAMPP : une distribution de logiciel libre (X (cross) Apache MariaDB Perl PHP) incluant MySQL, PHP et Perl. Cette distribution a été utilisé dans le but de convertir le tableau en base de données de pouvoir manipuler facilement ce dernier selon les besoins telles que la suppression des redondances, le calcul des valeurs moyennes associées et l'exclusion des ratios nulles.



- SURFER de Golden Software pour l'exportation du fichier Excel, facilitant son lecture dans Geosoft Oasis Montaj.



- le Geosoft Oasis Montaj pour l'élaboration des trois cartes d'anomalies HFR, LFR, et RATIO, on a adopté le maillage de 25 mètres pour le mode d'interpolation par krigeage.



- le Google Earth et l'ArcGis, permettant la superposition de la carte sur le terrain.



Ces diverses étapes sont illustrées dans l'organigramme ci-dessous

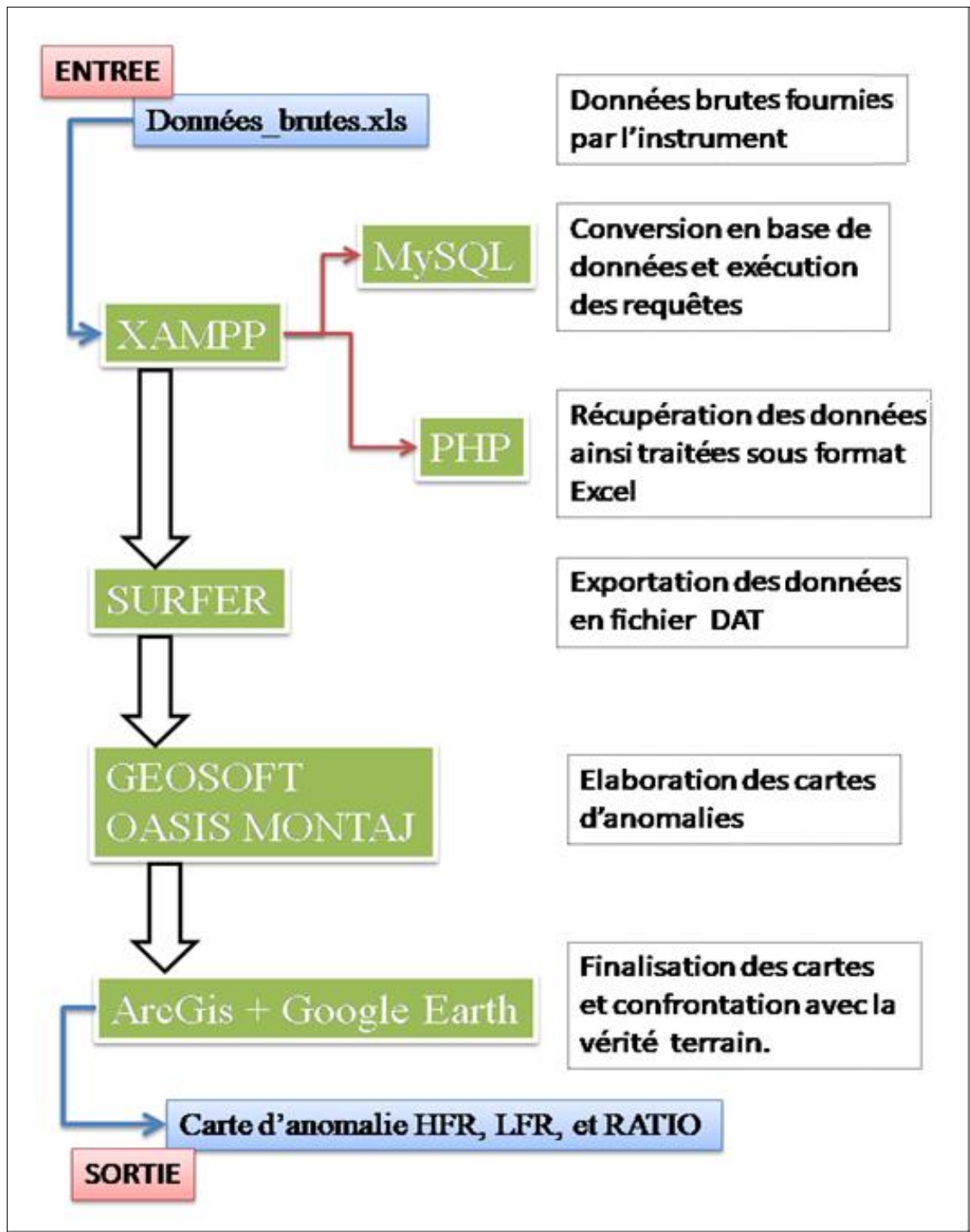


Figure 17 : Organigramme du traitement

CHAPITRE IV

**RESULTATS ET
INTERPRETATION**

CHAPITRE IV

RESULTATS ET INTERPRETATION

IV - 1 - DESCRIPTION DES RESULTATS

Le traitement des données suivant les étapes décrites dans le chapitre précédent nous a permis d'avoir les trois cartes suivantes :

- **la carte d'anomalie HFR**

La carte d'anomalie HFR (figure 18) donne des informations sur la localisation des matériaux conducteurs situés dans la couche superficielle directement traversé par la sonde, il s'agit brièvement de la réponse de la haute fréquence émise par la sonde à la présence de matériaux conducteurs au-dessous de l'appareil (cf. Chapitre II). Les valeurs affichées à la barre de légende de couleur permettent d'avoir la valeur de la conductivité apparente, d'un volume de 1 m³ au-dessous de la sonde, de la zone selon une courbe de correspondance qui sera présentée ultérieurement.

- **La carte d'anomalie LFR**

La carte d'anomalie LFR (figure 19) donne aussi des informations sur les zones encaissant des minéraux conducteurs, mais cette fois ci, un peu profonde au-dessous de la sonde, mais dont le toit de la cible ne dépasse pas la profondeur de 3 mètres. Les valeurs affichées à la barre de légende de couleur n'a rien à voir avec la valeur de la conductivité de la formation mais exprime seulement un degré de distance, qui existe entre la sonde et le matériau conducteur responsable de l'anomalie.

- **La carte de Ratio :**

La carte de Ratio ou la carte de conductivité intrinsèque : cette carte renseigne sur la qualité du conducteur au-dessous de la sonde, les valeurs mentionnées ne sont pas influencées par la dimension du matériau (cf. Chapitre II).

Des forages de reconnaissance ont été aussi réalisés dans la zone. Les coupes ont permis de vérifier l'efficacité de la méthode adoptée. Mais pour le problème de confidentialité, le résultat de ces forages ne sera pas présenté dans le présent mémoire.

Pour la présentation des résultats trois figures seront alors avancé pour chaque carte d'anomalie : la carte géologique de la zone, la superposition de la carte d'anomalie avec la géologie, ainsi que la superposition de la carte d'anomalie avec l'image Google Earth.

IV - 2 - PRESENTATION DES RESULTATS

Voici les trois cartes d'anomalies HFR, LFR, et RATIO selon des présentations schématiques :

IV - 2 - 1 - CARTE D'ANOMALIE HFR

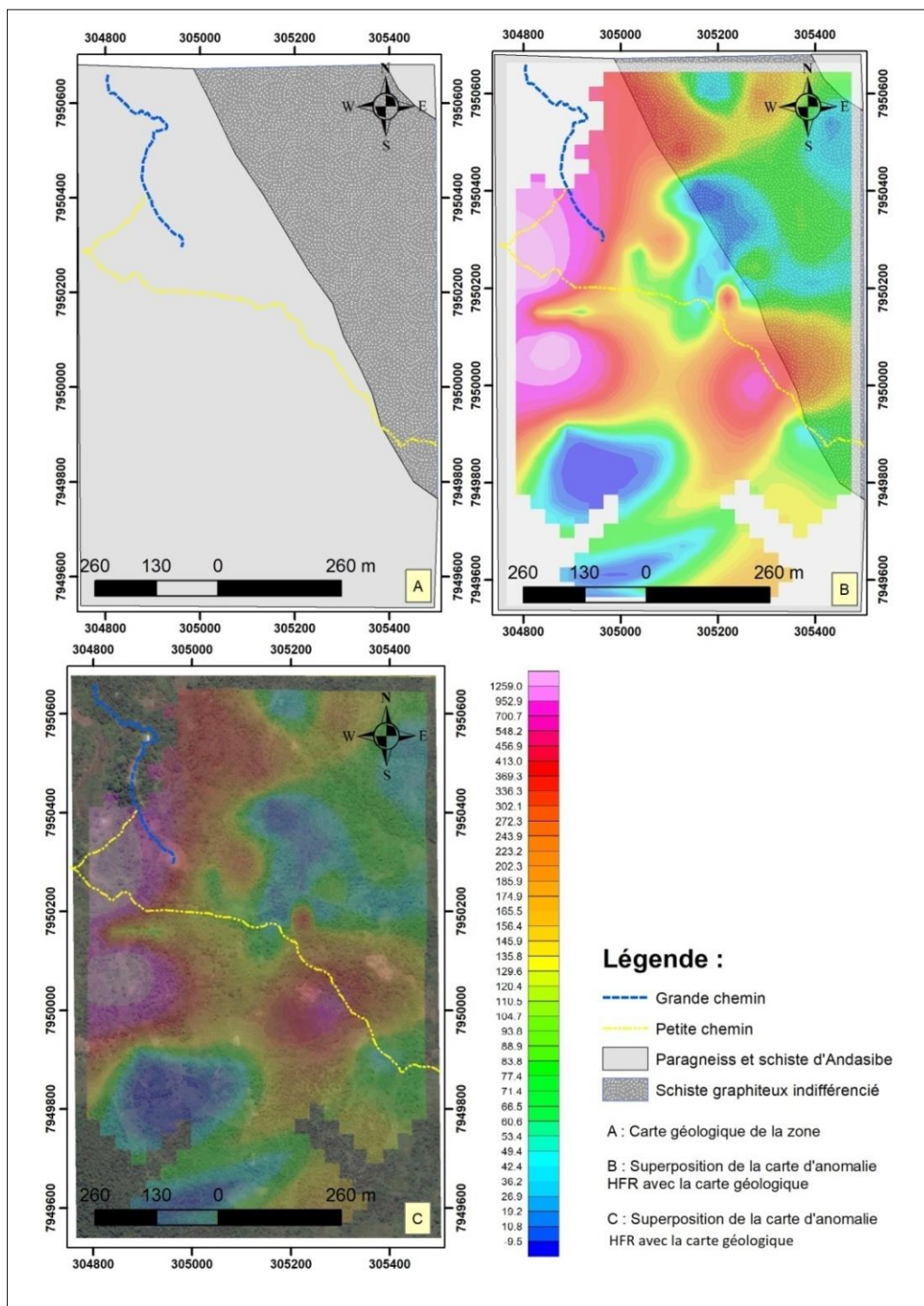


Figure 18 : Carte d'anomalie HFR

IV - 2 - 2 - CARTE D'ANOMALIE LFR

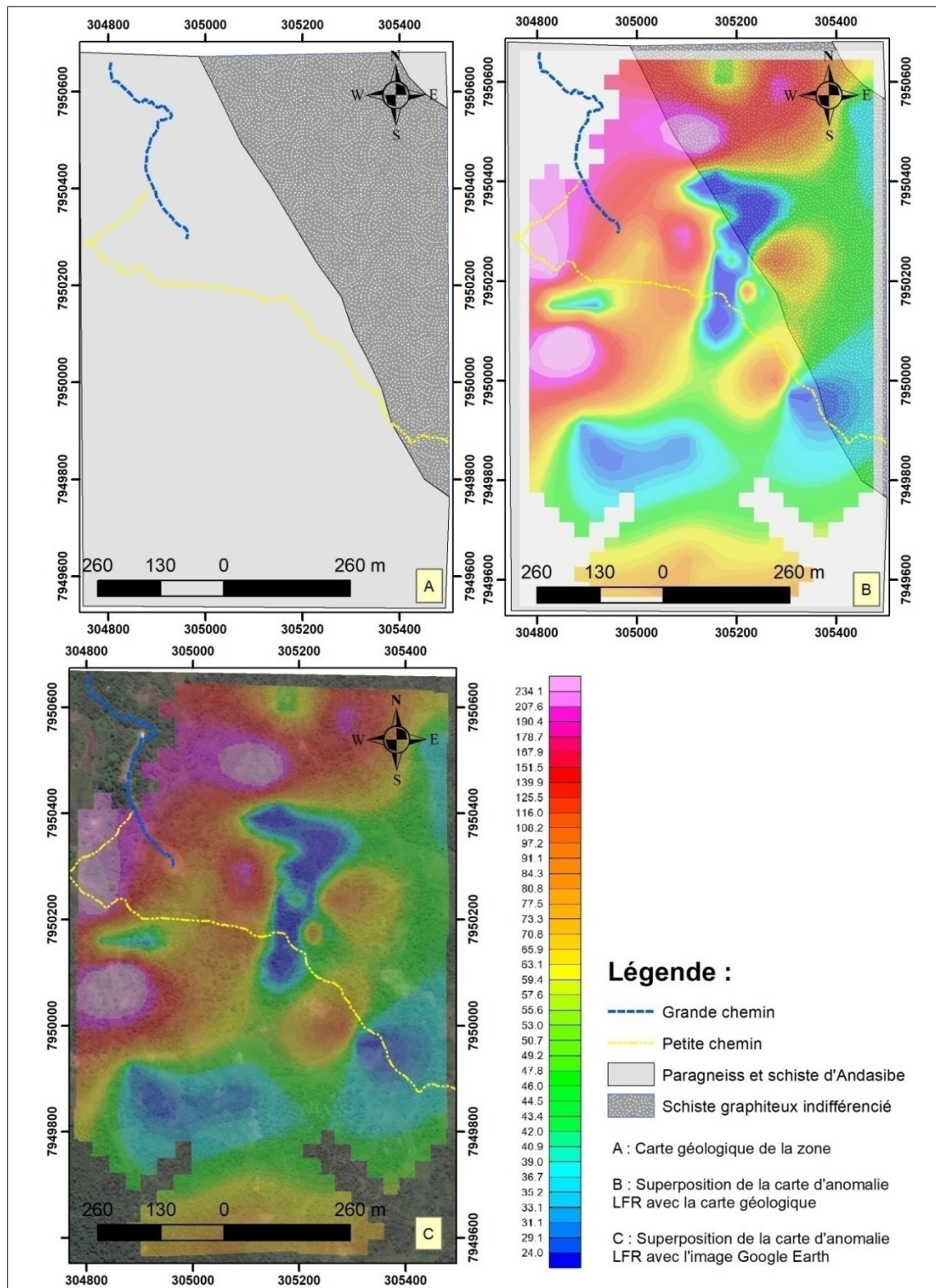


Figure 19 : Carte d'anomalie LFR

IV - 2 - 3 - CARTE DE RATIO

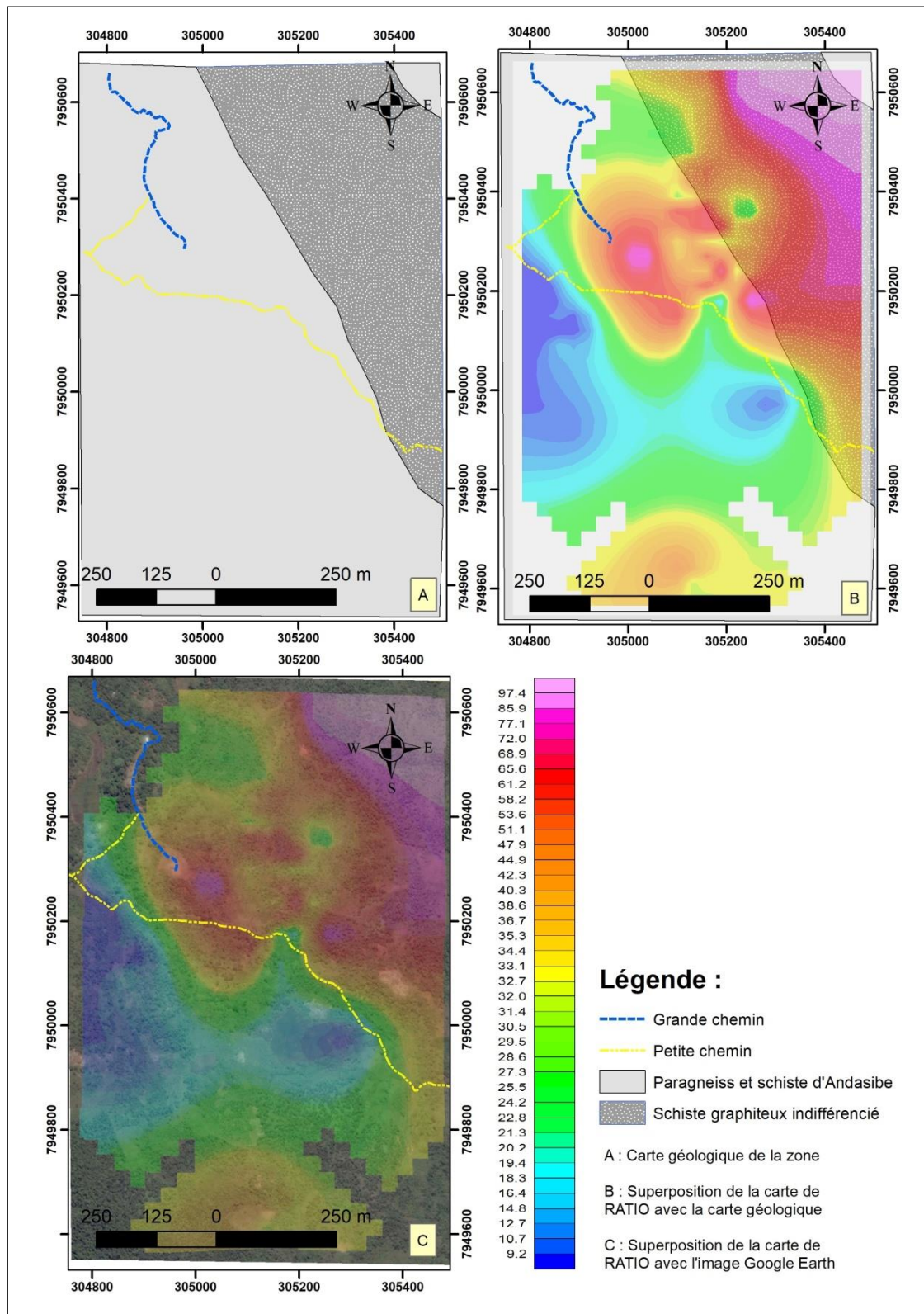


Figure 20 : Carte de Ratio

IV - 3 - INTERPRETATION DES RESULTATS

Les trois cartes avancées dans le paragraphe précédent permettent d'avoir les informations nécessaires sur la délimitation des zones susceptible d'héberger des minerais conducteurs.

Pour bien mener l'interprétation, on va voir ces cartes de façon indépendante

IV - 3 - 1. CARTE D'ANOMALIE HFR

Dans cette première figure, on a superposé la carte géologique de la zone d'exploration avec la carte d'anomalie HFR afin d'établir un lien avec la formation géologique présente.

Il est à noter que les valeurs HFR présentées dans la barre de légende de couleur associée à la présente carte ne reflètent pas directement la valeur de la conductivité apparente de la zone définie. Il existe, en effet, une correspondance entre ces deux entités. Cette correspondance est présentée dans la figure de droite.

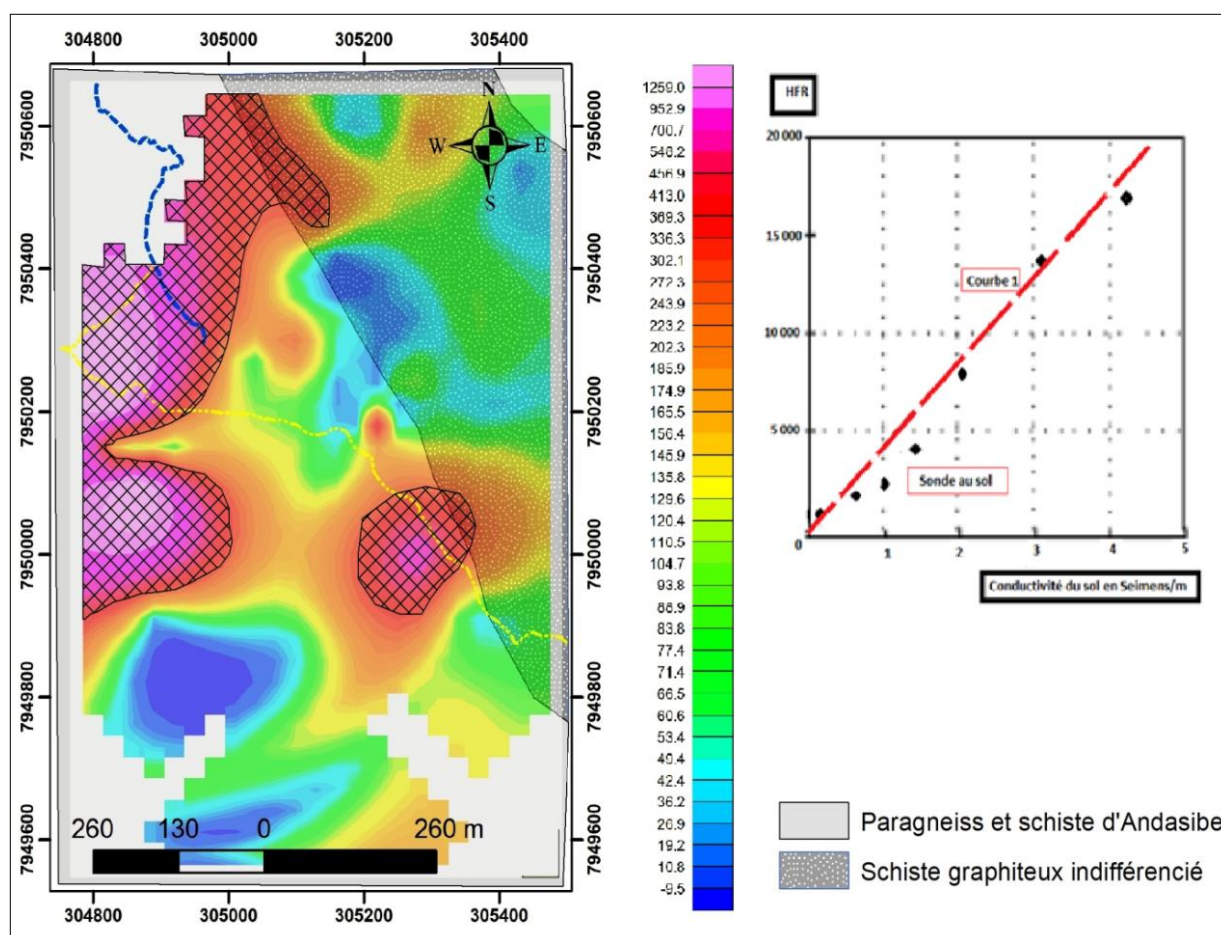


Figure 21 : Correspondance de la carte d'anomalie HFR avec la conductivité apparente

La valeur HFR observée varie entre 0 à 1250 correspondants à une valeur de conductivité apparente d'environ 0 à 0,40 siemens/m.

On peut déduire à partir de l'observation de la carte la délimitation de trois zones distinctes :

- une zone de forte anomalie associée aux parties hachurées dans la carte, dont les valeurs HFR varient entre 400 à 1250, soit en termes de conductivité, entre 0,28 à 0,40 siemens/m ;comme on peut le voir les minéraux conducteurs responsables de ces anomalies proviennent fort probablement des mines de graphite encaissé dans la formation « paragneiss et schistes d'Andasibe ».Puisque ces anomalies sont provoquées par les réponses des ondes électromagnétiques haute fréquences émis par la sonde, les corps responsables de ces anomalies sont plus ou moins condensés et se trouvent à proximité de la sonde, c'est-à-dire, en subsurface si on se réfère à la théorie de l'électromagnétisme, plus particulièrement selon le caractéristique du Beep Mat. Ils sont localisés à moins de 3 mètres de profondeur. D'ailleurs, la présence de l'affleurement de schiste, selon la géologie de la zone, justifie l'interprétation effectuée.

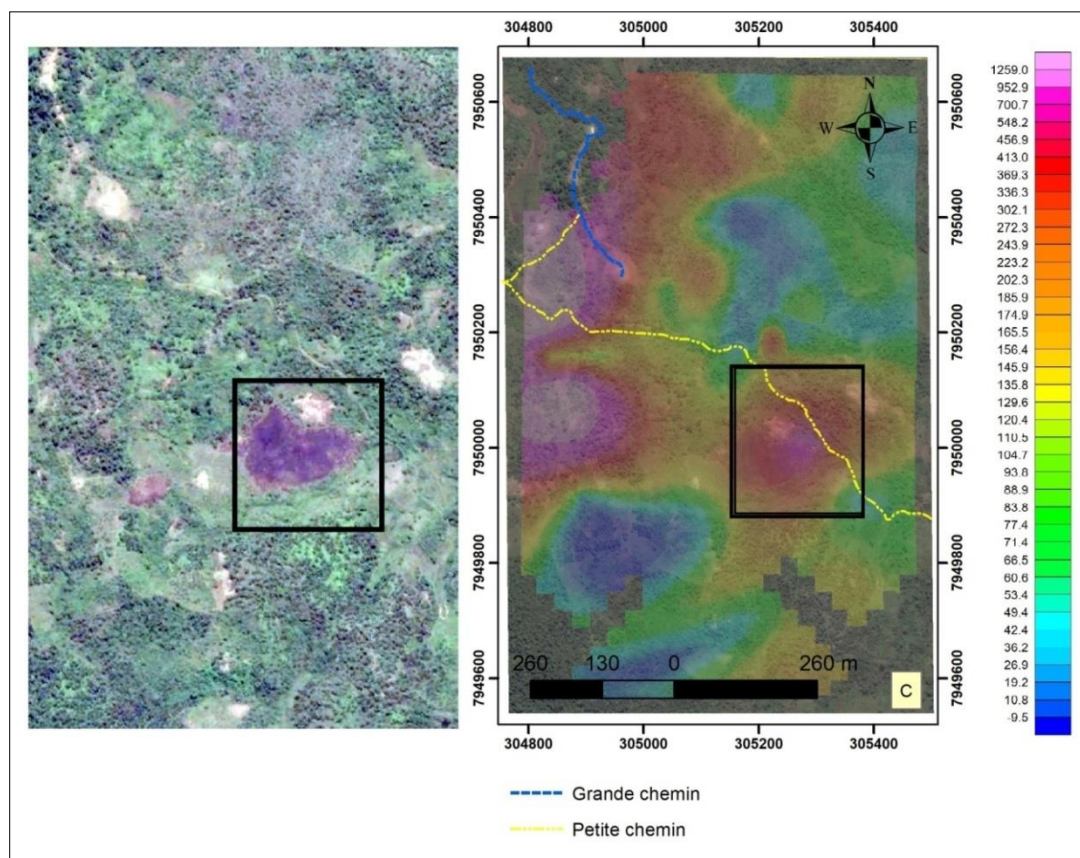


Figure 22 : Affleurement de schiste remarqué sur la zone

- une zone dont les gammes de valeurs HFR sont moyennes variant entre 120 à 400, soit entre 0,16 à 0,28 siemens/m en termes de conductivité c'est-à-dire les zones délimitées par les couleurs orange et jaune sur la carte. La quasi-totalité de cette zone se situe dans la formation « paragneiss et schistes d'Andasibe » : comme la zone d'étude en question est seulement constituée de deux formations distinctes selon la géologie signalée précédemment, et que la valeur de la conductivité dépend généralement de la composition minéralogique de la formation rencontrée, on peut dire alors que la teneur des minéraux conducteurs dans cette zone est relativement moyenne.
- enfin, une zone dont les gammes de valeurs HFR sont faibles variant entre 0 à 120 correspondant à une valeur de conductivité électrique faible entre 0 à 0,16 siemens/m, définie par les couleurs bleu et vert sur la figure n°21. Ces zones se situent en grande partie dans la formation « schistes graphiteux indifférencié » : comme précédemment, la teneur des matériaux conducteurs dans ces zones sont alors relativement faibles, voire très faibles, on peut donc classer cette dernière zone, selon sa composition minéralogique, comme étant du mort terrain.

En résumé, les zones favorables aux minéraux de graphite, selon la modélisation 2D des données obtenues à partir des réponses en hautes fréquences émises par les corps conducteurs dans le sous-sol sont généralement les parties hachurée sur la figure, citons : la partie Ouest, s'étendant vers la partie Nord – Ouest, et aussi dans la partie centrale de la zone. On rappelle toujours que les cibles responsables de ces anomalies se trouvent justement en surface et ne dépassent pas les profondeurs de 3 mètres. Selon la superposition de la carte avec la géologie, ces minéraux sont encaissés dans le paragneiss et schistes d'Andasibe.

IV - 3 - 2. CARTE D'ANOMALIE LFR

La carte d'anomalie LFR est une réponse de l'onde électromagnétique basse fréquence émise par la sonde à la formation qu'elle rencontre.

Contrairement à la carte d'anomalie HFR, la valeur exposée dans la barre de légende de couleur ne reflète rien sur la valeur de la conductivité apparente de la cible. Cette carte est généralement conçue pour identifier les cibles conductrices se trouvant cette fois ci en profondeur, c'est-à-dire que le toit se trouve aux environs de 3 mètres, mais aussi d'avoir des idées sur l'extension de la cible d'autant plus en largeur qu'en profondeur en confrontant les deux cartes HFR et LFR.

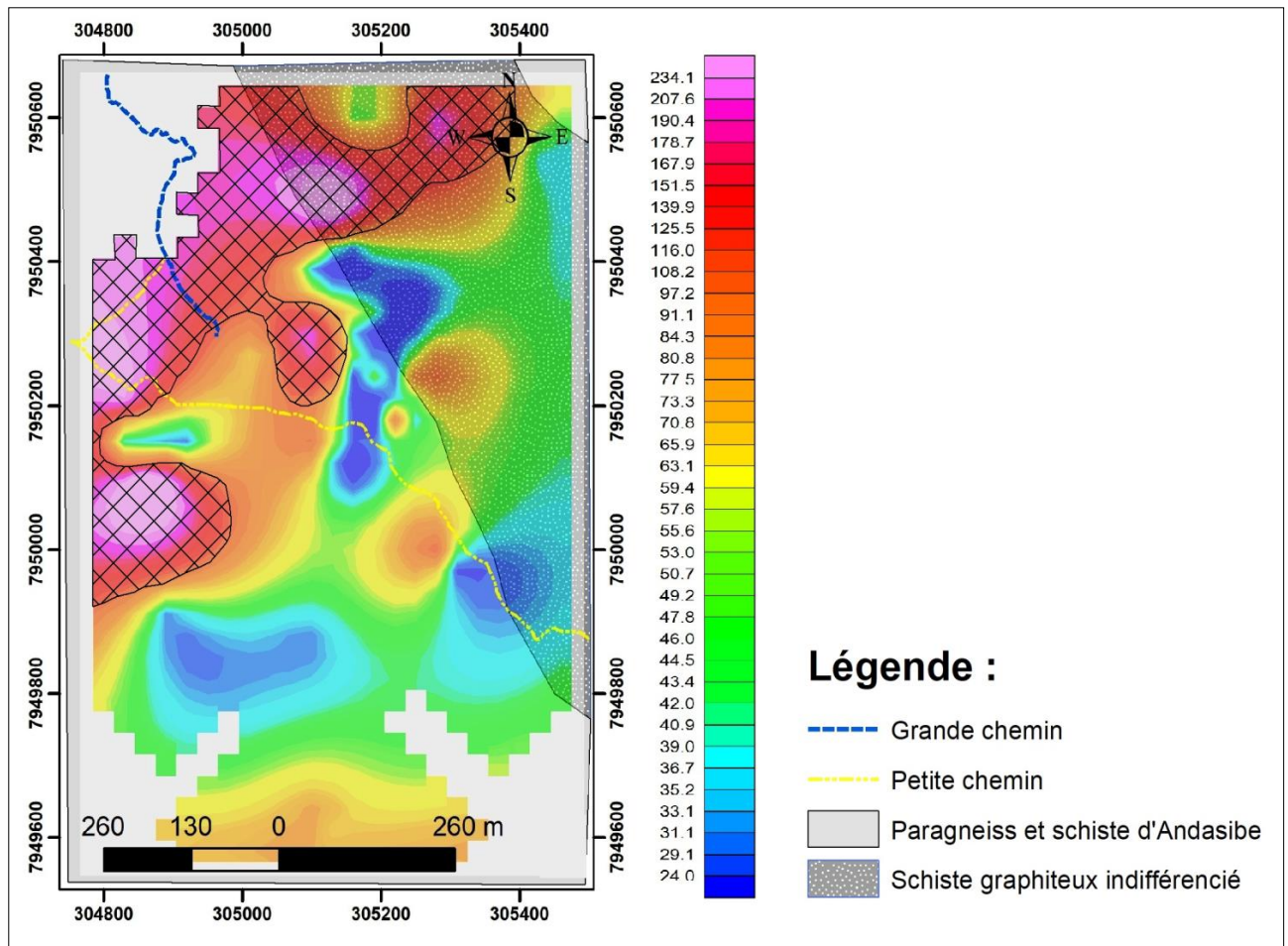


Figure 23 : Correspondance de la carte d'anomalie LFR avec la géologie de la zone

La valeur LFR observé varie entre 0 à 235.

D'après cette carte, on peut observer trois zones distinctes :

- une zone de forte anomalie associée aux parties hachurées sur la carte, dont les valeurs LFR varient entre 100 à 235. Comme on peut le voir, la zone d'anomalie s'étend dans la partie Nord-Ouest dans les deux formations géologiques présentes et se situe donc, bien entendu, en profondeur.

Si on se réfère à la zone anormale de la partie Ouest, cette anomalie est aussi rencontrée dans la carte d'anomalie HFR, ce qui est alors fort probable que la cible contenue dans cette zone s'étend à un volume dont l'épaisseur peut atteindre plus de 3 mètres depuis la surface. La figure 24 montre cette cohérence : la carte d'anomalie HFR sur la figure de gauche et LFR celle de la droite. De même, l'anomalie HFR dans la partie centre de la zone n'est plus réellement accentuée dans la carte d'anomalie LFR : cette anomalie est donc probablement causée par des corps conducteurs contenus dans une formation superficielle (figure 25).

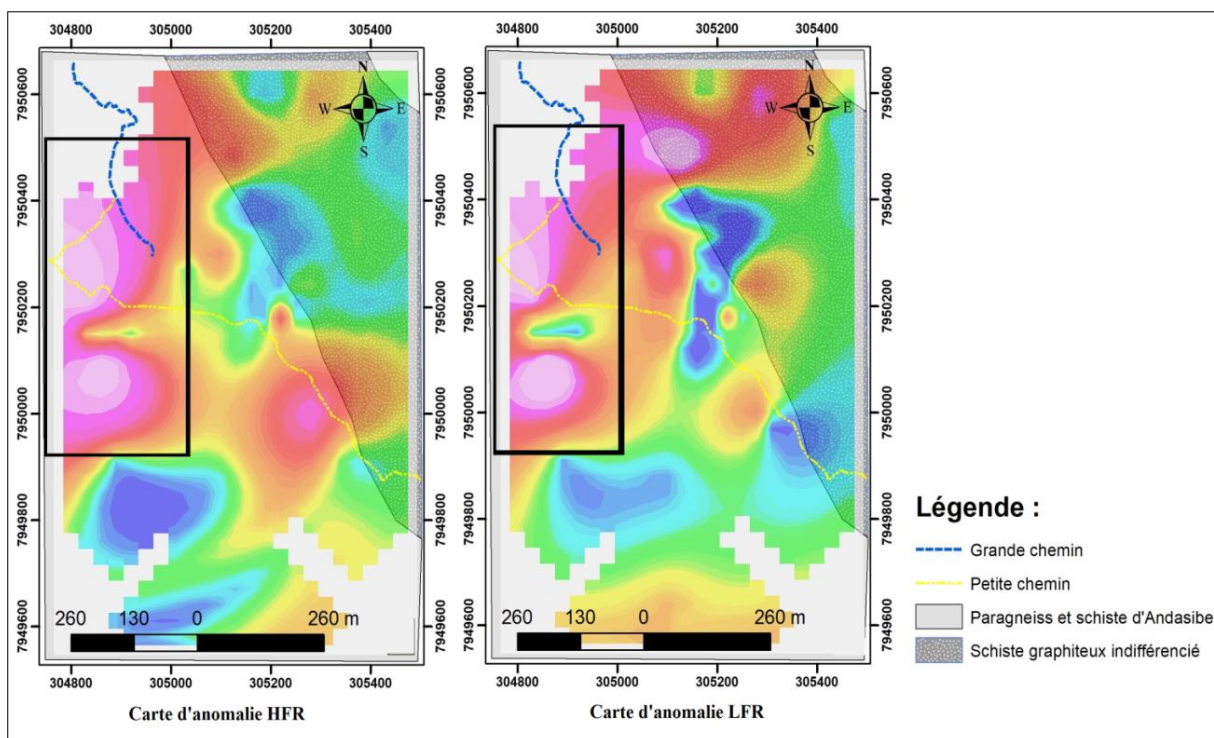


Figure 24 : Identification de cible volumineuse

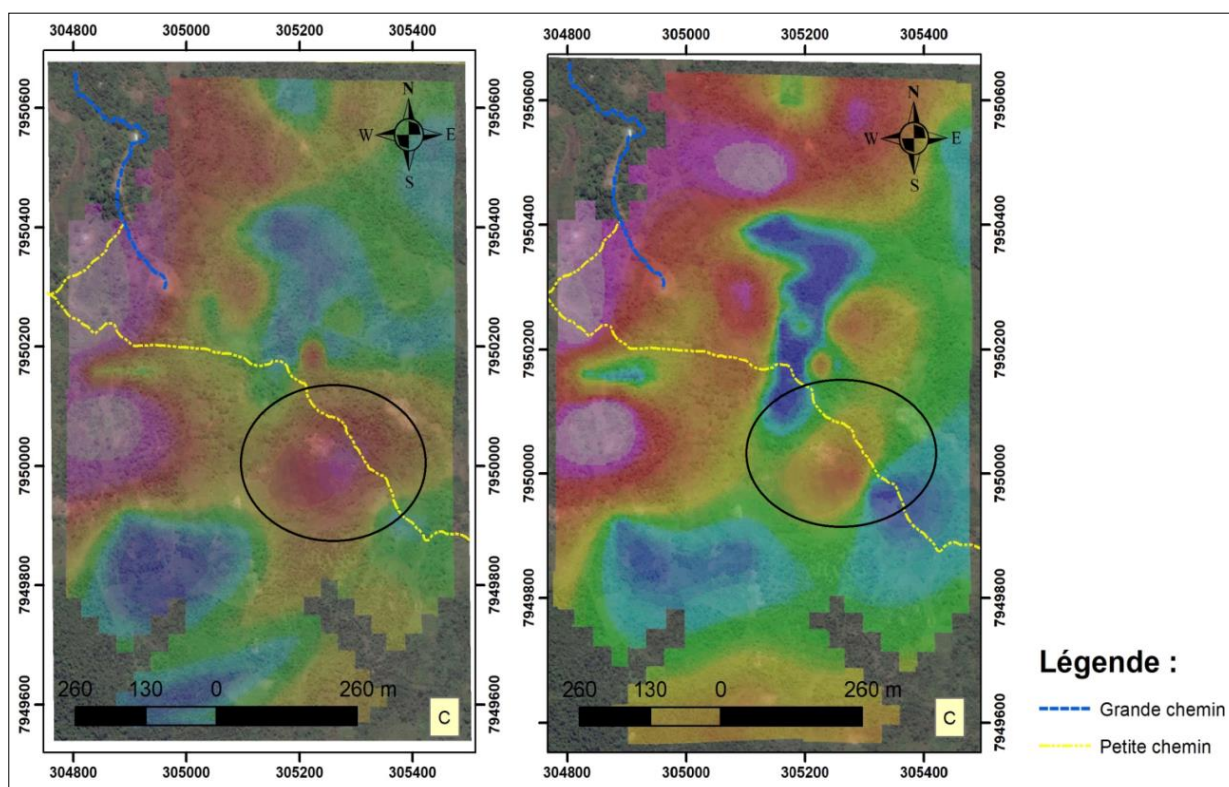


Figure 25 : Identification de cible superficielle

- une zone dont les valeurs LFR sont moyennes variant entre 58 et 100, présentées par les couleurs orange et jaune. La plupart de ces zones se trouvent collées aux zones de fortes

anomalies. La présence des minerais de graphite dans ces dernières est encore fort probable car la diminution de l'intensité des anomalies peut être expliquée par les dispositions des minéraux constituant la cible conductrice dans ces zones. Ces zones correspondent donc à des zones moyennement conductrices selon les gammes de valeurs données précédemment.

- enfin, une zone dont les valeurs LFR sont relativement faibles variant entre 0 à 58, présentées par les couleurs bleu et vert. Comme précédemment, la teneur des matériaux conducteurs dans ces zones sont alors relativement faibles, voire très faibles.

En bref, les zones susceptibles d'encaisser des minéraux de graphite, selon la modélisation 2D des données obtenues à partir des réponses en basses fréquences émises par les corps conducteurs dans le sous-sol sont généralement les parties hachurées sur la figure n°24 c'est-à-dire dans la partie Ouest, s'étendant jusqu'à la partie Sud – Est de la zone. Les corps responsables de ces anomalies étant localisés un peu plus en profondeur mais dont les toits ne dépassent pas la distance de 3 mètres compté depuis la surface.

IV - 3 - 3. CARTE DE RATIO

La carte de RATIO présente la conductivité intrinsèque du conducteur dans une gamme de valeur comprise entre 0% et 100%, ainsi, une valeur de 0% correspond à un corps n'ayant tout à fait pas de pouvoir conducteur, et une valeur de 100% correspond donc à la présence d'un bon conducteur au-dessous de la sonde. Ce rapport n'est pas influencé par la dimension du conducteur ni de sa profondeur.

Cette carte informe donc sur les caractéristiques, la qualité et la disposition des minéraux qui constituent la cible. En bref, la valeur affichée est fonction du mode d'assemblage des minéraux conducteurs que la sonde traverse.

Ainsi, des formations encaissant des minéraux conducteurs plus dispersé réagissent à la sonde suivant une valeur de ratio faible et les formations encaissant des cibles plus ou moins assemblé réagissent avec une valeur de ratio élevée.

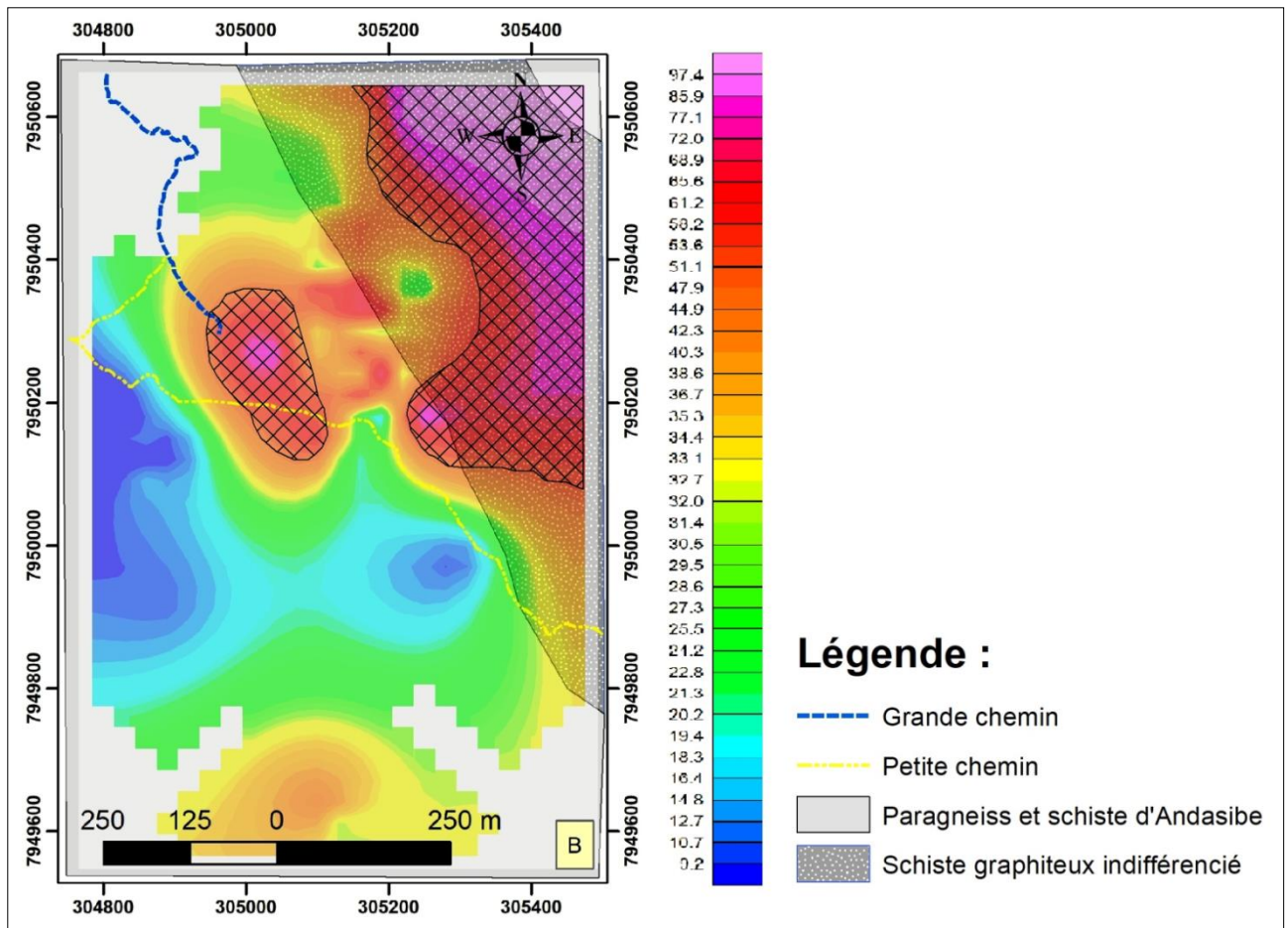


Figure 26 : Correspondance de la carte de RATIO avec la géologie de la zone

Comme on peut le voir, la carte peut être classifiée en trois zones bien distinctes :

- une zone, présentée par les parties hachurées de la carte, correspondant à une forte valeur de ratio variant de 65 à 100%.

Comme on a dit précédemment, les minéraux conducteurs formant les cibles présentes dans ces zones sont compactes et massives.

On remarque que, d'après la carte, ces zones se situent quasiment dans la formation géologique « schiste graphiteux indifférencié », ainsi, on peut dire que les minéraux de graphite encaissés dans cette formation sont presque groupés entre eux.

- une zone, décrite par les couleurs orange, jaunes et vert, correspondant à une moyenne valeur de ratio comprise entre 20 et 65%.

On remarque que, comparé au deux cartes d'anomalies HFR et LFR, la zone en question est située dans la zone ne présentant pas de cible conductrice potentielle.

- une zone, montrée par les couleurs bleu et bleu ciel, correspondant à une faible valeur de ratio comprise entre 0 et 20%.

On perçoit que ces zones se superposent avec les cibles situant dans la formation géologique « paragneiss et schistes d'Andasibe ». On peut en déduire que les minéraux conducteurs encaissés dans cette zone sont dispersés.

DISCUSSION

La zone explorée est constituée géologiquement de deux formations bien distinctes : d'une part, le paragneiss et schiste d'Andasibe et d'autre part les schistes graphiteux indifférenciés. Ces deux entités sont tous des encaissantes de graphite.

Les données obtenues et les confrontations des résultats issus du traitement des données lors de la prospection ont permis de mettre en évidence l'anisotropie du terrain selon la mesure de la conductivité apparente, en partant tout d'abord de l'élimination des bruits de mesure, qui sont les valeurs HFR et LFR négatives indiquant la présence de corps magnétique avant de passer à la modélisation 2D des données, et donc de localiser approximativement les zones potentielles susceptibles d'encaisser la réserve du minerai conducteur qu'est le graphite. Des caractéristiques de ce minerai peuvent être aussi déduites de l'interprétation approfondie des cartes d'anomalies HFR, LFR, et Ratio telles que son comportement, sa profondeur, son volume et sa dimension.

La superposition de la carte géologique avec la carte d'anomalie a permis de mettre en évidence les zones conductrices encaissantes du graphite principalement présent dans le paragneiss et le schiste d'Andasibe. Les réponses émises par les formations traversées par la sonde aux ondes électromagnétiques de basse fréquence ont été signalées et définies par les anomalies observées de part et d'autre des deux formations géologiques. On a pu alors déduire de à partir de ces deux cartes le volume ainsi que le comportement des minerais de graphite dans ces zones.

Malgré ces avantages, l'utilisation de l'appareil Beep Mat BM8 n'est pas réellement suffisante si on veut estimer rigoureusement les réserves de graphite existant dans la zone entière, ceci est principalement dû aux faits que :

- tout d'abord, le Beep Mat ne s'intéresse qu'au minéraux superficiels appartenant à son zone d'influence limité à un rayon moyen de 3 mètres, c'est-à-dire, il n'agit pas à des cibles se situant en dehors de cette zone, ou ceux enfuis en profondeur de plus de cette portée.
- ensuite, la mise en œuvre de l'appareil n'est pas vraiment bien adaptée au terrain dont la géomorphologie est accidentée.
- et enfin, si on revient à la propriété physique du graphite, il est parmi les matériaux non métalliques conducteurs d'électricité : le graphite se présente sous la forme d'un empilement de plans d'atomes de carbone constituant des feuilletts, chaque atome de carbone utilise trois de ses électrons pour former des liaisons simples covalentes avec ses trois voisins proches, ce qui laisse libre un quatrième électron. Ces électrons libres dans chaque atome de carbone se délocalisent sur toute la feuille d'atomes dans une couche. Ainsi, un morceau de graphite

conduit l'électricité dans un sens du fait que les électrons se déplacent dans les feuilles, non pas d'une feuille à ses voisines. En pratique, un morceau réel de graphite n'est pas un cristal parfait, mais un ensemble de petits cristaux collés à toutes sortes d'angles. Les électrons pourront trouver un parcours par le grand morceau de graphite dans toutes les directions en se déplaçant d'un petit cristal au suivant.

Autrement dit, la conductivité électrique du graphite dépend de sa disposition dans le sous-sol : le pouvoir conducteur est élevé dans la direction parallèle à son plan hexagonal, dans le cas contraire, ceci est faible dans la direction perpendiculaire.

CONCLUSION

Madagascar possède des réserves abondantes de roches et minéraux industriels. Ces ressources sont disponibles en quantité et teneur suffisantes pour subvenir aux besoins de l'industrie locale dans de nombreuses régions du pays. En terme de graphite, deux zones principales sont connues pour leurs potentialités : la région Atsinanana, et la partie Sud du pays.

Des études géophysiques d'un gisement de minerai de graphite ont été effectuées dans une zone située à Vohitsara, District de Brickaville, région Atsinanana. Cette zone trouvant, selon l'étude géologique, dans le groupe de Manampotsy du domaine d'Antananarivo, est constitué de deux formations géologiques bien distinctes : le paragneiss et schistes d'Andasibe et le schiste graphiteux indifférencié. Ces deux formations sont tous des encaissantes de graphite.

La méthode utilisée lors de cette prospection géophysique était la méthode électromagnétique, avec laquelle on pourrait alors mettre en évidence l'hétérogénéité du sous-sol en termes de conductivité apparente. L'appareil mis en œuvre était le Beep Mat modèle BM8 de GDD instrument.

Les efforts déployés lors de l'acquisition et le traitement des données sur la zone ont mené à l'obtention de trois cartes d'anomalies HFR, LFR et de conductivité intrinsèque et a permis d'en déduire la délimitation des zones fortement conductrices susceptibles d'encaisser les minéraux de graphite.

Les avantages et les inconvénients de cette technique pour l'étude des problèmes liés à la prospection minière sont assez bien connus : l'avantage repose généralement sur la simplicité de l'utilisation de l'appareil, la fiabilité des données et le coût de la prospection comparé à d'autre méthode géophysique ; l'inconvénient est lié au fait que l'appareil ne peut réagir qu'au corps localisé dans un rayon de 3 mètres maximum. Les points importants sont développés dans la section discussion précédente. Ainsi peut-on dire que l'efficacité de la méthode de prospection électromagnétique par Beep Mat ne peut être mise en valeur que lorsqu'elle est appuyée par une autre méthode géophysique, et ceci en fonction de l'objectif à atteindre et de la cible à viser.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

- ✦ [1] : Monographie du secteur minier à Madagascar (2014). Cabinet Harison. 62 pages
- ✦ [2] : Le graphite de Madagascar, consulté le 20/04/2018
<http://www.newsmada.com/2017/08/07/le-graphite-de-madagascar/>
- ✦ [3] : GIRAUDON J., (1989). Mémento roches et minéraux industriels : Le graphite, Bureau de recherche géologiques et minières. 23 pages
- ✦ [4] : GRAFFIN D. J., (1975). Graphite, Industrial Minerals and rocks 4th edition, MUDD series, 705 pages
- ✦ [5] : GRAPHITE : propriétés, usages et types de gisement, consulté le 15/04/2018
<https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/mineraux/mineraux-proprietes-graphite.jsp>
- ✦ [6] : HARBEN, P. W., KUZVART, M., (1996). *A global Geology. Industrial Minerals*, Industrials Information Ltd., Metal Bulletin, PLC London
- ✦ [7] : Structure cristalline et propriétés physiques : Graphite, consulté le 11/04/2018
<http://dan.faudemer.free.fr/tpe/graphite.php>
- ✦ [8] : TUCKER et al. (2012). Notice explicative des cartes géologique et métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, Antananarivo, République de Madagascar. 263 pages
- ✦ [9] : BESAIRIE H., (1946). La géologie de Madagascar, Paris, Annales géologiques du service des mines, pp 12-21
- ✦ [10] : BESAIRIE, H., (1970). Description du massif ancien de Madagascar. Vol. III : Le Système du Graphite : groupe d'Ambatolampy. Document du bureau géologique de Madagascar, 177c, Antananarivo, Service géologique, pp. 73.
- ✦ [11] : MAILLARD, J et VALENTIN, J., (1983), Possibilité des méthodes électromagnétiques dans le domaine de l'hydrologie, Département géophysiques Orléans Cedex, Rapport du BRGM, 81 pages
- ✦ [12] : REYNOLDS, M.,(1997).An introduction to applied and environmental geophysics, , 801 p
- ✦ [13] : MICHEL, C. et al (2017). Méthodes électromagnétiques en géophysique. Géophysique appliquée II, 23 p
- ✦ [14] : MICHEL, C. et al (2008). Méthodes électromagnétiques. Géophysique appliquée II 7.449, 33 p

- ✦ [15] : NABIGHIAN, M. (1987). Electromagnetic Methods in Applied Geophysics – Theory. Society of Exploration Geophysicist. Oklahoma, 531p
- ✦ [16] : GUILLEMOTEAU, J. (2012). Méthodologie d’interprétation en électromagnétisme aéroporté. Institut de Physique de Globe de Strasbourg
- ✦ [17] : BEEP MAT
<http://www.gddinstrumentation.com/fr/beep-mat>
- ✦ [18] : GDD Instrumentation Inc., Manuel d’instruction BEEP MAT Modèle BM8, Canada, 67p
- ✦ [19] : RANSOM, P., (1997).Geology beep-mat em surveying and soil geochemical survey on the sure bet property, Nelson Mining division, Cominco LTD, 35 p.
- ✦ [20] : Mc NEIL, J. D. (1980b). Electrical terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Notes TN-6. Geonics Limited, 13 p
- ✦ [21] : ALAIN B., (2002). Méthodologie de la prospection minière en milieu latéritique et diversification des ressources - programme 1998 – 2002, ORSTUM (IRD) - Université de Ouagadougou - BUMIGEB. 100 p

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES	3
I - 1 - ETUDE DESCRIPTIVE DU GRAPHITE.....	3
I - 1 - 1. <i>GITOLOGIE ET TERMINOLOGIE</i>	3
I - 1 - 2. <i>TYPES DE GISEMENT</i>	4
I - 1 - 3. <i>STRUCTURE ET PROPRIETES PHYSIQUES</i>	5
I - 2 - LA FILIERE GRAPHITE A MADAGASCAR.....	7
I - 3 - CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D’ETUDE	9
I - 4 - CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D’ETUDE [8] [9] [10]	10
CHAPITRE II : METHODOLOGIE ET MATERIEL UTILISEES.....	15
II - 1 - RAPPEL METHODOLOGIQUE.....	15
II - 1 - 1. <i>PROSPECTION ELECTROMAGNETIQUE</i>	15
II - 1 - 2. <i>LES EQUATIONS DE MAXWELL</i>	16
II - 1 - 3. <i>EQUATION DE DIFFUSION ET DE PROPAGATION</i>	17
II - 1 - 4. <i>EFFET DE PEAU</i>	18
II - 2 - MATERIEL UTILISE	18
CHAPITRE III : ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES.....	29
III - 1 - ACQUISITION DES DONNEES.....	29
III - 2 - TRAITEMENT DES DONNEES.....	30
CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATION.....	36
IV - 1 - DESCRIPTION DES RESULTATS	36
IV - 2 - PRESENTATION DES RESULTATS	37
IV - 3 - INTERPRETATION DES RESULTATS	40
DISCUSSION	48
CONCLUSION.....	50
REFERENCESBIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES	51

Encadreur

Dr RAKOTO Heritiana A.

E-mail : rakotoheritina@moov.mg

Tel : 034 14 286 89

Impétrant

ANDRIANASOLONAVALONA Stenny Nhanja

Lot II B 127 bis Mahalavolona – Tanà 102

E-mail : stennynhanja@gmail.com

Tel : 034 91 019 34

TITRE : ETUDE DE GISEMENT DE GRAPHITE PAR METHODE ELECTROMAGNETIQUE A BRICKAVILLE, REGION ATSINANANA

RESUME :

Dans le cadre de l'étude de gisement de graphite dans une zone localisée à Brickaville région Atsinanana, on a mené une campagne géophysique s'intéressant aux contrastes de conductivité caractérisant le sous-sol de la zone.

La méthode utilisée lors de cette prospection géophysique est la méthode électromagnétique, avec laquelle on a pu mettre en évidence l'hétérogénéité du sous-sol en termes de conductivité apparente. L'appareil mis en œuvre était le Beep Mat modèle BM8 de GDD instrument.

Les résultats issus du traitement des données obtenues après levées sont des cartes montrant les zones anormales, selon le degré de conductivité, en fonction des indicateurs HFR, LFR, et RATIO. Les corps responsables des anomalies étant situés en subsurface ne dépassant pas les 3 mètres d'épaisseurs.

On a superposé ces cartes d'anomalies à la géologie de la zone. Ainsi, on a pu localiser géographiquement les zones favorables à des formations graphiteuses, et aussi estimer le volume ainsi que le comportement des minerais de graphite dans la zone.

Mots clés : anomalie, graphite, électromagnétique, Brickaville.

ABSTRACT:

As part of a study of graphite deposits in an area located in Brickaville region of Atsinanana, a geophysical campaign was conducted focusing on the conductivity contrasts characterizing the subsoil of the area.

The method used during this geophysical survey was the electromagnetic method, with which we could then highlight the heterogeneity of the subsoil in terms of apparent conductivity. The device implemented was the Beep Mat model BM8 of GDD instrument.

The results obtained from the processing of the data obtained after the survey are maps showing the anomalous zones, according to the degree of conductivity, according to the indicators HFR, LFR, and RATIO. The bodies responsible for the anomalies being located in subsurface not exceeding 3 meters of depth.

These anomaly maps have been superimposed on the geology of the area. Thus, we have been able to locate geographically favorable areas for graphitic formations, and also to estimate the volume as well as the behavior of graphite ores in the area.

Keywords: anomalie, graphite, electromagnetic, Brickaville.