



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO**

MENTION : INGENIERIE MINIERE

PARCOURS : SCIENCES ET TECHNIQUES MINIERES



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME D'INGENIEUR**

Grade : Master

Mention : Ingénierie minière

**ESTIMATION DES RESERVES DE GISEMENT DE GRAPHITE
D'UN SITE MINIER DANS LE DISTRICT DE BRICKAVILLE
PAR APPROCHE GEOSTATISTIQUE**

LAUQITISITATSOA GEOSTATISTIQUE

Présenté par



RANDRIAMIASAMANANA Nirina Toky Jacobio

Promotion 2018



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO

MENTION : INGENIERIE MINIERE

PARCOURS : SCIENCES ET TECHNIQUES MINIERES



Premier Partenaire des Professionnels

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME D'INGENIEUR

Grade : Master

Mention : Ingénierie minière

ESTIMATION DES RESERVES DE GISEMENT DE GRAPHITE
D'UN SITE MINIER DANS LE DISTRICT DE BRICKAVILLE
PAR APPROCHE GEOSTATISTIQUE

BAKALYBOCHE GEOSTATISTIQUE

Présenté par : RANDRIAMIASAMANANA Nirina Toky Jacobio

Date de soutenance : 28 Janvier 2020

Président du jury : Monsieur RANAIVOSON Léon Félix

Rapporteur : Monsieur RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier

Examinateurs : Monsieur RASOLOMANANA Eddy

Monsieur FABIEN Rémi Roger

« Anaka, mihainoa ny ana-drainao, ary aza mahafoy ny lalàndreninao ; Fa fefiloha tsara tarehy amin'ny lohanao izany » Ohabolana 1 : 8-9

TENY FISAORANA

Ety am-piandohana dia atolotra ho anao ry Andriamanitra ilay avo indrindra ny saotra sy dera satria noho ny fitiavanao sy ny fahazavan-tsaina ary ny fahendrena avy aminao no nahatontosa izao asa fanadihadiana izao.

Tsy hay ihany koa ny tsy hisaotra anareo rehetra izay nanampy tamin'ny fanatontosana izao asa izao.

Manaraka izany, tolorana fisaorana manokana :

- Andriamatoa RAKOTOSAONA Rijalalaina, Talen'ny Sekoly Ambony ny Hitaomaron'Antananarivo, Mpandraikitra voalohany ny Sampana Siansan'ny Injeniera eto amin'ny Oniversiten'Antananarivo tamin'ny ezaka fampandehanana antsakany sy andavany ny fampianarana teto amin'ny sekoly ;
- Andriamatoa RANAIVOSON Léon Félix, Mpampianatra Mpikaroka, nanaiky ho Filohan'ny Mpitsara ;
- Andriamatoa RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier, Mpandraikitra ny lalam-piofanana Injienera momban'ny Harena an-kibon'ny tany eto amin'ny ESPA, tamin'ny nanekeny handrindra ny asa ary fahafoizany andro sy fotoana tamin'ny fanampiana ara-kevitra sy fanoroana ary fanitsina mba ahatomombana izao asa izao na dia teo aza ny adidy sy andraikitra be sahaninao ;
- Andriamatoa RASOLOMANANA Eddy, Profesora eto amin'ny ESPA, noho ny fahafoizan-tenany ho anisan'ny mpitsara ity asa ity ;
- Andriamatoa FABIEN Rémi Roger, Mpampianatra Mpikaroka, nanaiky ihany koa ho anisan'ny mpitsara ity asa fanadihadiana ity ;

Tsy adino ihany koa ireo mpampianatra sy tompon'andraikitra ato amin'ny ny lalam-piofanana Injienera momban'ny Harena an-kibon'ny tany ary ireo mpampianatra sy mpandrahahara ao amin'ny ESPA.

Farany, isaorana amin'ny fo feno fitiavana sy fankasitrahana ireo Ray aman-dReny sy ny fianakaviana tamin'ny fanampiana sy fanohanana tamin'ny lafiny rehetra. Fisaorana eram-po eran-tsaina ihany koa ho ireo namana rehetra izay nanampy, nitoto nahafotsy, nahandro nahamasaka ka nahatontosa an-tsakany sy an-davany an'ity boky ity.

MISAOTRA TOMPOKO !

SOMMAIRE

TENY FISAORANA

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

LISTE DES CARTES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

GLOSSAIRE

INTRODUCTION

Partie I : GENERALITES ET RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Généralités sur le graphite

Chapitre II : Graphite au niveau mondial

Chapitre III : Graphite à Madagascar

PARTIE II : EXPLORATION DU SITE D'ETUDE

Chapitre IV : Contexte général de la zone d'étude

Chapitre V : Travaux de prospection

PARTIE III : METHODOLOGIE ET APPLICATION

Chapitre VI : Géostatistique

Chapitre VII : Evaluation de graphite exploitable

Conclusion générale

Références bibliographiques

Références webographiques

Annexes

Table des matières

Résumé et abstract

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

ESPA : Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

GPS: Global Positionning System

PBNR: Pebble Bed Nuclear Reactor

PK: Point Kilométrique

RN : Route Nationale

\$/t : dollars par tonne

t/an : tonne par an

USGS: United States Geological Survey

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Carte des gîtes de graphite à Madagascar	15
Carte 2 : Axe graphiteux de la zone orientale	16
Carte 3 : Localisation de la zone d'étude	24
Carte 4 : Pédologie de la région	26
Carte 5 : Carte géologique de la zone d'étude	29
Carte 6 : Hydrographie de la région.....	30
Carte 7 : Occupation du sol de la région	34
Carte 8 : Localisation de la zone à prospector.....	36
Carte 9 : Localisation des stations géophysiques.....	45
Carte 10 : Carte de polarisation spontanée	46
Carte 11 : Carte de localisation des profils électriques.....	48
Carte 12 : Répartition des points d'échantillonages	66
Carte 13 : Carte d'estimation après krigeage de la variable teneur.....	75
Carte 14 : Carte d'erreur après krigeage de la variable teneur	76
Carte 15 : Carte d'estimation après krigeage de la variable accumulation.....	76
Carte 16 : Carte d'erreur après krigeage de la variable accumulation	77

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Comparaison entre la morphologie du graphite et du diamant	4
Figure 2 : Formation du graphite amorphe	5
Figure 3 : Formation du graphite lamellaire	6
Figure 4 : Formation du graphite filonien	7
Figure 5 : Principaux pays producteurs de graphite	9
Figure 6 : Evolution du prix de graphite	11
Figure 7 : Perspective d'évolution de la demande en graphite pour les batteries des véhicules électriques	12
Figure 8 : Résultat du sondage en un point	43
Figure 9 : Section géo-électrique du profil L2	47
Figure 10 : Comportements du variogramme	52
Figure 11 : Interface du logiciel Isatis	64
Figure 12 : Histogrammes des teneurs et accumulations	68
Figure 13 : Variogrammes expérimentaux	69
Figure 14 : Ajustements des variogrammes	70
Figure 15 : Résultats de la validation des variables teneur et accumulation	72
Figure 16 : Bloc d'estimation	74
Figure 17 : Création des polygones	74

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Aperçu de la localité de Sahamamy	25
Photo 2 : Multimètre et électrode non polarisable	37
Photo 3 : Résistivimètre Syscal R1 et ses accessoires	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Production mondiale de graphite (t/an)	10
Tableau 2 : Températures moyennes et pluviométries annuelles	32
Tableau 3 : Liste des cyclones touchant le District de Brickaville entre 2014 et 2018.....	33
Tableau 4 : Coordonnées des points du polygone formant la zone d'étude	35
Tableau 5 : Carnet de terrain.....	43
Tableau 6 : Description des variogrammes expérimentaux	69
Tableau 7 : Paramètres des variogrammes.....	70
Tableau 8 : Paramètres de validation croisée	73
Tableau 9 : Résultat des paramètres après krigeage	77
Tableau 10 : Récapitulation des résultats	81

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Rapport de sondage de la colline Sahamamy	V
Annexe 2 : Aperçu sur la géologie de Madagascar.....	VII
Annexe 3 : Krigeage	X
Annexe 4 : Le Précambrien malgache et les différents événements géologiques (Razafinimparany, 1978)	XIII

GLOSSAIRE

Allotropie : fait, pour un corps simple ou composé, de pouvoir se présenter sous diverses formes cristallines ou non, ayant des propriétés différentes.

Dispersion : décrit dans quelle mesure, les observations divergentes autour de la tendance centrale.

Géostatistique : branche des statistiques qui s'intéresse à l'étude des variables régionalisées, à la frontière entre les mathématiques et les sciences de la terre. Son principal domaine d'utilisation a historiquement été l'estimation des gisements miniers. Mais actuellement, elle est appliquée dans plusieurs domaines et peut étudiée tout phénomène spatialisé.

Gisement : accumulation naturelle, locale, de matière minérale, solide, liquide ou gazeuse susceptible d'être exploitée.

Histogramme : diagramme formé d'une suite de colonnes avec un intervalle de classe en abscisse et une courbe de fréquences en ordonnée.

Indépendance : notion probabiliste qualifiant de manière intuitive des événements aléatoires n'ayant aucune influence l'un sur l'autre. Il s'agit d'une notion très importante en statistique et en théorie des probabilités.

Indice (pour une substance) : traces observées en un point permettant d'envisager que cette substance existe non loin en plus grande abondance.

Interpolation spatiale : en géostatistique, elle consiste à reconstituer les valeurs d'une variable régionalisée sur un domaine à partir d'échantillons connus en un nombre limité des points.

Isotropie : caractérise l'invariance des propriétés physiques d'un milieu en fonction de la direction.

Krigage : terme provenant du nom de famille de l'ingénieur sud-africain « Dani G. Krige ». Il a été formalisé pour la prospection minière par Georges Matheron.

En géostatistique, c'est la méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance. Il réalise aussi l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul d'espérance

mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interpolation et la modélisation du variogramme expérimental.

Krigeage universel : krigeage des résidus d'une variable après avoir modélisé les variations systématiques de cette variable par une tendance générale.

Latérite : sol de couleur rouge qui résulte de la décomposition des roches.

Masse volumique : propriété propre à chaque substance qui désigne le quotient de la masse d'un corps par son volume (le terme « densité » peut être considérée comme synonyme).

Minerai : élément de terrain contenant des minéraux utiles en proportion appréciable, et qui demandent un traitement pour être utilisés par l'industrie.

Minéralogie : branche de la géologie qui traite des minéraux, de leurs propriétés chimiques et physiques ainsi que de leur identification.

Minéraux : solides naturels homogènes, habituellement formés par des procédés inorganiques, dont la composition est définie et qui présentent un arrangement atomique ordonné.

Moyenne : mesure la plus courante de la tendance centrale, la moyenne est la moyenne arithmétique d'un ensemble de nombres.

Opaque : non traversé par la lumière naturelle.

Palier : en géostatistique, représente la valeur de la semi-variance à partir de laquelle un variogramme ne croît plus.

Pépite : en géostatistique, correspond à la valeur de la semi-variance vers laquelle on tend quand la distance entre les observations tend vers 0. Elle représente les variations spatiales liées aux erreurs de mesure ou à des variations à des distances inférieures au pas d'échantillonnage.

Portée : en géostatistique, distance à partir de laquelle un variogramme ne croît plus ; elle est interprétée comme la distance à partir de laquelle des observations ne sont plus corrélées entre elles.

Réfractaire : qui résiste à de hautes températures.

Sondage : action de creuser pour prélever un échantillon dans le sous-sol, pour effectuer des mesures.

Tarière : grande vrille de charpentier, de charron, manuelle ou mécanique, pour faire des trous dans le bois.

Variable aléatoire : en théorie des probabilités, c'est une application définie sur l'ensemble des éventualités, c'est-à-dire l'ensemble des résultats possibles d'une expérience aléatoire.

Variable régionalisée (VR) : dans le domaine de géostatistique, c'est toute fonction mathématique déterministe qui est destinée à modéliser un phénomène présentant une structure plus ou moins prononcée dans l'espace et/ou temps : phénomène physique ou abstrait.

Variance : en statistique et en théorie des probabilités, c'est une mesure servant à caractériser la dispersion d'un échantillon ou d'une distribution. Elle indique de quelle manière la série statistique ou la variable aléatoire se disperse autour de sa moyenne ou son espérance. Une variance de zéro signale que toutes les valeurs sont identiques. Une petite variance est signe que les valeurs sont proches les unes des autres alors qu'une variance élevée est signe que celle-ci sont très écartées. Le terme variance est aussi lié à la variation d'échantillonnage.

Variation d'échantillonnage : variation qu'accusent des échantillons d'une même population qui sont différents, mais d'une même taille.

Variogramme : une fonction mathématique utilisée en géostatistique, en particulier par le krigage. On parle également de semi-variogramme, de par le facteur $\frac{1}{2}$ de sa définition. Il s'agit aussi d'un graphe représentant la semi-variance en fonction de la distance.

INTRODUCTION

La composition du sous-sol malgache est liée à son histoire géologique (tectonique, volcanisme, érosion). Vu de la diversité minière, Madagascar a fasciné les chercheurs par la richesse et l'originalité des espèces minérales de son sous-sol. Ces substances minérales jouent un rôle majeur en tant que fournisseurs de matières premières dont diverses activités humaines en dépendent dans sa vie quotidienne. Alors des grandes compagnies minières de recherches et d'exploitation s'intéressent sur les réserves de la grande île engendrant le développement de la grande mine du pays. L'exploitation rationnelle de ces ressources peut constituer une base de développement économique et de réduction de la pauvreté dans le pays. Parmi ces ressources, on peut citer le graphite, exploité depuis la période coloniale (1900) à Madagascar et devient de plus en plus recherché. Ses nombreuses propriétés lui assurent une large gamme d'utilisations dans diverses branches industrielles, technologiques et lui laissent prédire un avenir prometteur sur le marché.

La minéralisation de graphite se répartit dans plusieurs zones dans la grande île. Mais pour juger l'exploitabilité d'un gisement donné, l'évaluation des réserves est l'une des préoccupations principales des compagnies minières. Cela vise à déterminer le potentiel en ressource d'un gisement minier. Par ailleurs des nombreuses techniques permettent d'estimer et de quantifier le volume disponible d'un gisement ; parmi elles la géostatistique. La géostatistique fait partie des techniques d'estimation permettant d'estimer avec plus de fiabilité les réserves d'un site minier à partir de mesures ponctuelles des teneurs réalisées sur des sondages du sous-sol.

Le mémoire ci-contre intitulé : « Estimation des réserves de gisement de graphite d'un site minier dans le District de Brickaville par approche géostatistique » est abordé afin d'avancer une étude qui développe les différentes étapes à suivre dans l'établissement des cartes de teneurs ainsi qu'à l'évaluation de la zone de minéralisation dans cette zone. Pour cela, cet ouvrage comporte trois grandes parties.

La première partie parle les généralités sur le graphite, la situation de graphite à Madagascar et mondiale. La seconde partie informe sur le contexte général de la zone d'étude et les travaux de prospection réalisés sur le terrain. Enfin, la dernière partie présente la méthodologie adoptée dans l'estimation des réserves de gisement de graphite dans la zone étudiée et bien évidemment les résultats obtenus.

PARTIE I : GENERALITES ET RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE GRAPHITE

Le graphite est une espèce minérale rencontrée à l'état natif dans la nature. Etant formé par le carbone aux propriétés uniques, le graphite fait l'objet de multiples utilisations industrielles, commerciales et de haute technologie.

I.1. Historiques [W1] [W2]

A la fin du XVII^{ème} siècle, un minerai noir confondu à un plomb appelé « plombagine » a été découvert sous forme cristalline de carbone par le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele. C'est en 1789 que le minéralogiste allemand Abraham Gottlieb Werner a inventé le nom « graphite » en s'inspirant du mot grec « graphein » qui signifie « écrire ».

I.2. Propriétés

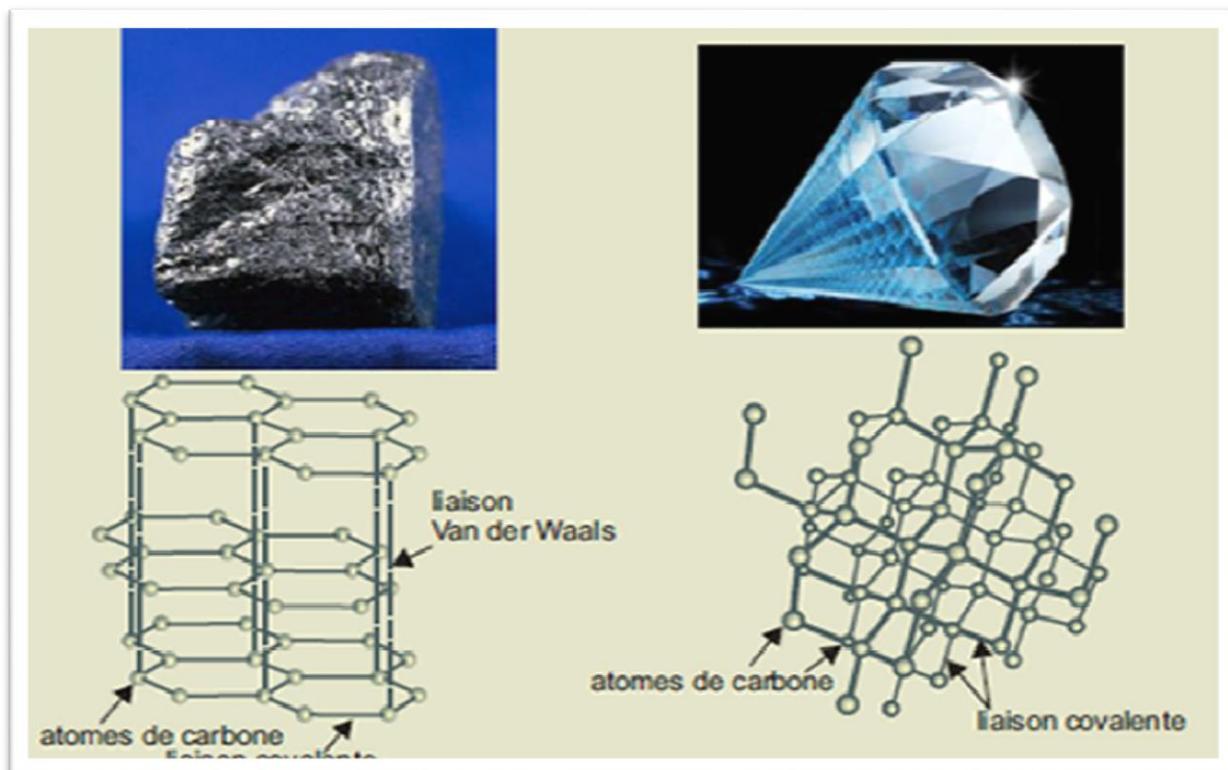
I.2.1. Minéralogie descriptive [W1] [W2] [4]

Le globe terrestre est constitué par des nombreux éléments chimiques classés dans un tableau appelé « tableau périodique des éléments ». Le carbone, non métal, classé sixième dans ce tableau, constitue environ 0.02% de la lithosphère. Sous sa forme pure, il se présente sous forme de quatre allotropes telles que le carbone amorphe, fullerène, diamant et graphite. Ce dernier est la forme cristalline la plus stable du carbone à température et à pression ordinaire. Il est formé de feuillets où chaque atome de carbone est fortement lié à trois autres sur un même plan et faiblement sur les feuillets adjacents et formant ainsi un réseau infini d'hexagones. Ces feuillets, qui se superposent avec un léger décalage, forment des couches appelées graphènes, sont reliés entre eux par des faibles liaisons de type Van Der Walls, ce qui explique le clivage et la faible dureté. Par ailleurs, chez le diamant, chaque atome de carbone est relié à quatre autres formant un tétraèdre, ce qui en fait l'une des substances les plus dures sur terre.

Le graphite est un minéral natif qui se cristallise dans le système hexagonal sous forme de feuillets. La structure en feuillets faiblement liés se traduit par l'existence d'un clivage basal parfait, assurant une fracturation facile suivant ces feuillets. Il est relativement léger, sa densité cristallographique varie entre 2,1 et 2,3 qui pourrait être supérieure à cet intervalle s'il contient des impuretés et inférieur dans le cas où il comporte des porosités.

Le graphite se distingue par un aspect graisseux, une couleur variant de gris au noir et un éclat submétallique. Il est opaque même en fines sections et tâche les doigts ou le papier. Sa dureté est faible de 1 à 2 selon l'échelle de Mohs.

Le graphite est la seule substance métallique pouvant conduire efficacement de l'électricité. Il a une conductivité thermique et électrique élevée. C'est un minéral hautement réfractaire puisqu'il ne fond pas au chalumeau et il est également chimiquement inerte.



(Source : New Brunswick)

Figure 1 : Comparaison entre la morphologie du graphite et du diamant

I.2.2. Métallogénie du graphite [W3] [W4] [W5]

La formation de graphite se fait à haute température et à haute pression. Ces conditions sont fondamentales pour transformer le carbone amorphe en graphite cristallin. En effet, le graphite se forme soit dans les roches métamorphiques soit dans les roches ignées. Par ailleurs, sa formation ne peut se faire dans des couches sédimentaires à l'exception en tant que produit d'érosion.

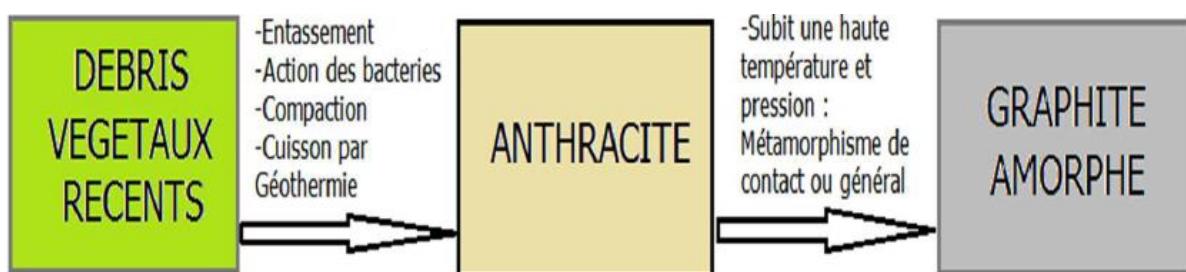
En outre, le graphite se forme dans un milieu pauvre en oxygène. Par conséquent, le milieu dans lequel il s'est formé doit être favorable à la réaction de réduction puisqu'à haute température, la combinaison du carbone avec de l'oxygène conduit à la formation de monoxyde de carbone ou du dioxyde de carbone.

I.3. Classification du graphite [W1] [W3] [4] [9]

Le graphite naturel se rencontre dans la nature sous trois formes différentes : le graphite amorphe, le graphite en paillettes et le graphite en filon.

I.3.1. Graphite amorphe

Ce type de graphite ne présente pas de cristallinité visible, c'est-à-dire le minéral qui le constitue est très petit. D'où son appellation graphite microcristallin ou cryptocristallin. Il possède une morphologie massive, non stratifiée et homogène. Il est issu d'un métamorphisme par contact des gisements d'anthracite existants, il est donc d'origine organique. Comparés aux autres types de graphite, le graphite amorphe présente une teneur en graphite faible de l'ordre de 20 à 40 % alors que les autres en contiennent 90 % ou plus. Il présente donc le plus d'impuretés de tous les types de graphites. Des gisements de graphite amorphe ont été extraits en Mexique, Corée et Autriche.



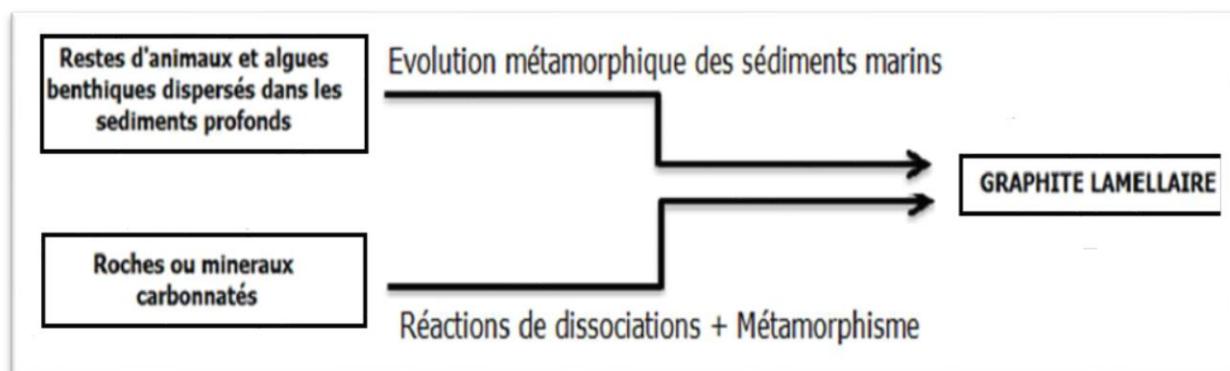
(Source : www.asbury.com)

Figure 2 : Formation du graphite amorphe

I.3.2. Graphite en paillette

Le graphite en paillette est le graphite qu'on utilise dans notre vie quotidienne comme les mines de crayons. Sa morphologie est feuilletée ou lamellaire.

Ce graphite est le plus répandu sur le plan géologique mondial. Des nombreux gisements ont été localisés et exploités aux États-Unis, en Amérique du Sud, au Canada, en Allemagne, en Ukraine, en Russie, en Chine ainsi qu'à Madagascar. Le graphite en paillette se forme fréquemment dans les roches métamorphiques et rarement dans les roches ignées. D'après les pétrologues, la formation des graphites en paillettes s'est faite sous faciès granulite c'est-à-dire à haute pression d'environ 10 bars et à une température élevée avoisinant de 750 °C. Le graphite en paillette est considéré comme graphite de haute qualité. Alors il présente un intérêt économique sur le marché car sa teneur en carbone est supérieure ou égale à 90 %. Le carbone contenu dans ce graphite peut être d'origine organique ou inorganique, il proviendrait donc soit par des micro-organismes ou algues benthiques morts et déposés au fond de la mer soit par un carbone dérivé de minéraux carbonatés précédemment formés.

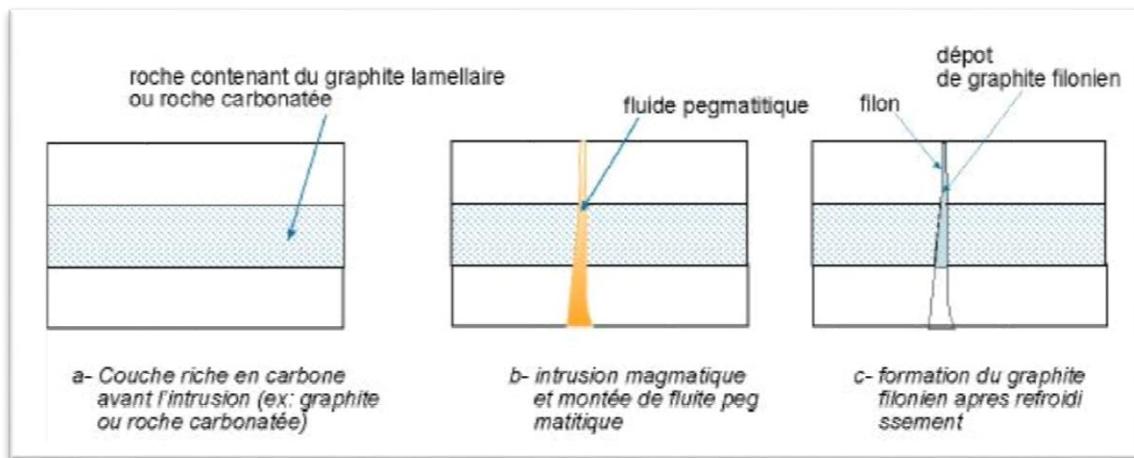


(Source : www.asbury.com)

Figure 3 : Formation du graphite lamellaire

I.3.3. Graphite filonien

Le graphite filonien, connu aussi sous divers autres noms, est un minéral de veine contenu dans des fissures dans les roches rocailleuses de l'écorce terrestre. Il est souvent appelé graphite de Ceylan du fait que c'est la seule région qui le commercialise. Les fissures peuvent être remplies par d'autres minéraux particulièrement ceux d'origine hydrothermale. La teneur en carbone du graphite filonien est comprise entre 90 et 95%. Le carbone provient de l'envahissement (intrusion) de fluides pegmatitiques chauds et sous hautes pressions dans un gisement de graphite en paillette ou autre roche carbonatée existante. Il est ensuite entraîné dans des fissures et se précipite si les conditions d'équilibre sont favorables.



(Source : www.asbury.com)

Figure 4 : Formation du graphite filonien

I.4. Utilisations du graphite [W4] [W5] [4]

Le graphite s'applique dans des nombreux domaines à cause de ses diverses propriétés.

❖ **Fonderie**

Le graphite constitue l'un des composants d'enduits destinés à recouvrir la surface des moules de fonderie pour éviter le phénomène de dilatation provoqué par le métal en fusion en raison de sa grande résistance thermique et sa bonne conductibilité thermique.

❖ **Réfractaire**

Le graphite possède un pouvoir réfractaire élevé. Alors il est utile dans la fabrication des revêtements d'engins aérospatiaux et aux revêtements des orifices de coulée de fours.

❖ **Balais pour moteurs électrique, pile sèche, électrode**

L'onctuosité et la haute conductivité électrique du graphite constituent un matériel de choix pour fabriquer du balai pour moteurs électriques. Il participe aussi dans la composition du mélange dépolarisant remplissant la majeure partie de l'intérieur d'une pile sèche.

❖ **Lubrifiants**

L'onctuosité du graphite, son bas coefficient de friction ainsi que sa grande résistance à la chaleur en font le matériau idéal comme adjutants dans certains lubrifiants.

❖ **Crayons**

Le mélange de graphite avec un peu d'argile ainsi que d'autres adjuvants puis leur chauffage à une température de 1000 à 1800°C donne la mine de crayon.

❖ **Matériaux de friction : garnitures de freins et embrayages**

L'utilisation du graphite concerne aussi la fabrication des matériaux de friction des garnitures de freins ou d'embrayages employées dans les industries automobile, aérienne, ferroviaire ou les engins de chantier. Le graphite permet de limiter le bruit et les vibrations dans les garnitures de frein et les embrayages.

❖ **Autres applications**

✓ **Peinture**

Le graphite entre dans la fabrication de peintures destinées à la protection des surfaces métalliques exposées à des agents corrosifs.

✓ **Forage**

Le graphite est aussi employé comme additif dans les boues de forage afin de renforcer les parois de forage.

✓ **Nucléaire**

Du fait de sa faible absorption des rayons X et des neutrons, sa forte conductivité thermique et ainsi son aptitude à conserver ces propriétés à haute température, le graphite est utilisé dans les réacteurs nucléaires comme modérateur de neutrons (barres de contrôle de la puissance des réacteurs) et dans des pièces réflectrices de neutrons.

✓ **Industrie de verre**

Les graphites amorphes de granulométrie très fine (<1µm) sont employés dans les équipements de fabrication de verre.

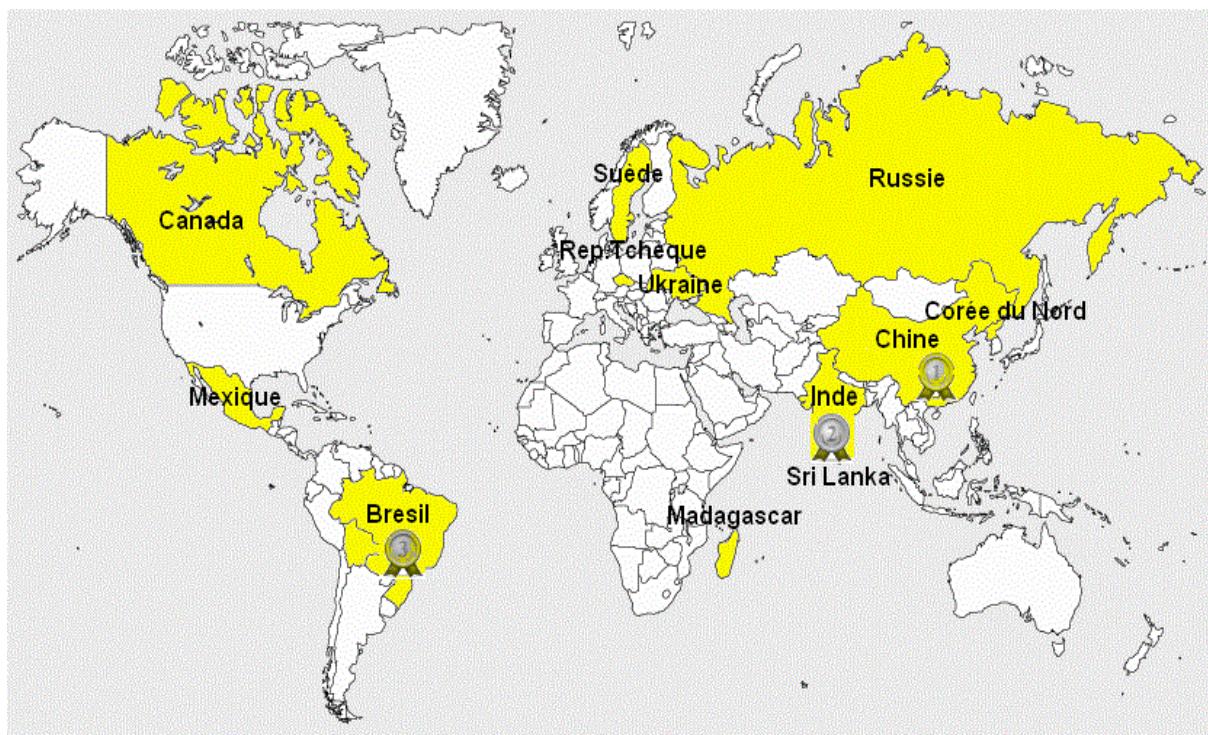
CHAPITRE II : GRAPHITE AU NIVEAU MONDIAL

Le graphite se répartit dans divers pays dans le monde. Une utilisation accrue de graphite engendre une croissance de demande et de production de ce minerai. En effet, dans le marché, le prix de graphite demeure instable et dépend de sa nature et sa teneur en carbone.

II.1. Production [6] [W5] [W8]

Le graphite naturel devient de plus en plus recherché et sa production ne cesse pas de croître dans le monde. Des gisements de graphite sont alors exploités dans différents pays. Parmi eux, certains pays sont connus comme producteurs de graphite naturel.

- **Graphite amorphe** : Mexique, Chine, Italie et Autriche...
- **Graphite cristallin** : Sri Lanka...
- **Graphite en paillettes** : Chine, Brésil, Madagascar et Russie...



(source : www.planetoscope.com)

Figure 5 : Principaux pays producteurs de graphite

Sur le marché, la production mondiale de graphite naturel est largement dominée à 73% par la Chine. L'Inde est classée deuxième avec environ 11% et suivie du Brésil, seul pays producteur de graphite naturel d'Amérique du Sud qui a considérablement augmenté sa production, avec 7% de production. Le reste se répartit entre une quinzaine de pays producteurs (Canada, Corée du Nord, Sri Lanka, Autriche, Norvège, Madagascar...).

Tableau 1 : Production mondiale de graphite (t/an)

Année Pays	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chine	720 000	720 000	800 000	810 000	800 000	800 000
Inde	130000	120 000	130 000	140 000	130 000	130 000
Brésil	77 494	76 194	77 163	76 200	76 200	76 000
Corée du Nord	32 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000
Canada	28 000	28 000	28 000	27 000	25 000	25 000
Sri Lanka	3 000	5 756	9 593	10 000	11 000	11 000
Ukraine	10 400	5 800	5 800	5 800	5 800	6 000
Madagascar	6 400	4 857	5 000	5 000	5 000	5 000
Mexique	12 357	12 500	12 500	7 229	5 011	5 000
Norvège	2 300	2 300	2 000	2 000	2 000	2 000

(Source: www.usgs.com)

II.2. Répartition de la consommation [W4] [W5]

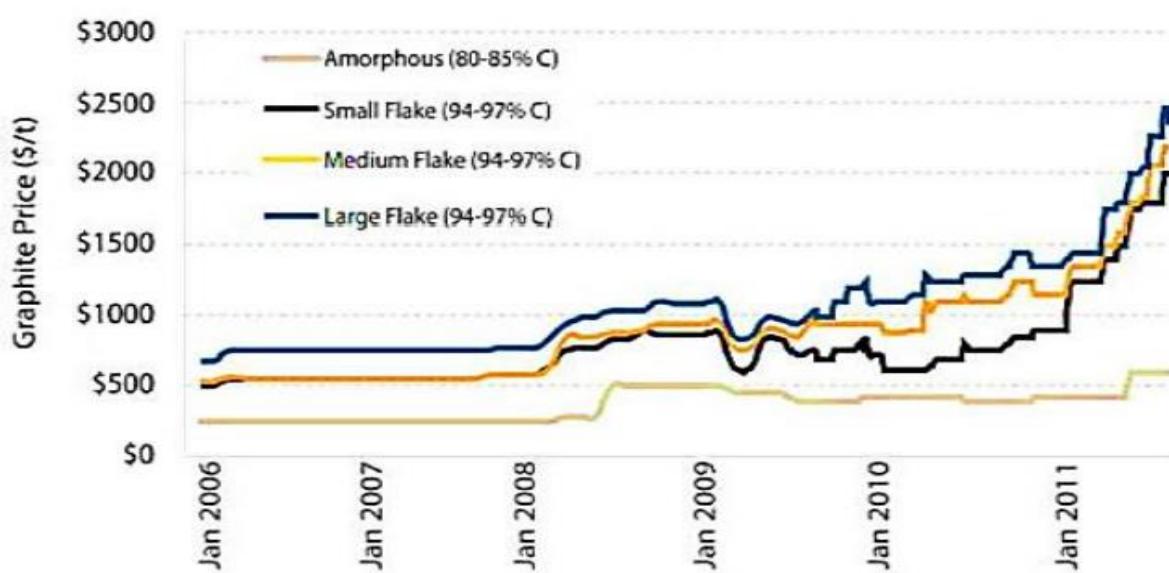
La consommation mondiale de graphite représente 2,45 millions de tonnes de graphite par an, dont 950 000 tonnes de graphite naturel et 1,5 million de tonnes de graphite synthétique.

Les principaux pays importateurs de graphite naturel en 2005 sont : la France (34,4 %), la Chine (23,3 %), l'Allemagne (19,1%) et les États Unis (10 %). En 2009, les États-Unis ont importé 33 100 t.

De nos jours, c'est le graphite en paillette qui très prisée. Malgré ses applications à forte valeur ajouté, il est encore très limité à la Chine, au Brésil et au Canada. En effet, la production mondiale du graphite en paillette ne fait juste que 40%. En fait, l'offre n'arrive pas à suivre la demande car la production annuelle n'est que 400000 t alors que la demande mondiale en graphite lamellaire y afférente devrait croître de 30% par an de 2011 à 2016 et même au-delà de 2016. Cette forte demande ainsi que sa croissante est surtout due à celle des fabricants de batteries au lithium-ion.

II.3. Prix sur le marché [W3] [W4] [W6]

La nature de graphite (paillette ou amorphe) ainsi que sa teneur en carbone fixent ses prix sur le marché mondial. En fait, ces prix ne sont pas stables, ils fluctuent en fonction des situations mondiales. Entre 2007 et 2008, ils ont augmenté à cause de l'augmentation de la demande et du relèvement par la Chine de ses taxes à l'export. Ensuite dès le début de l'année 2009, ils ont chuté en raison de la crise financière ; puis ont augmenté jusqu'à la fin de 2011, où les prix s'échelonnaient entre 850 US\$/t pour le graphite microcristallin à faible teneur en carbone et 2 500 US\$/t pour la meilleure qualité de paillettes à forte teneur en carbone. La poudre de graphite microcristallin de très haute pureté (99,9 % de carbone) atteignait 35000 US\$/t en 2010.



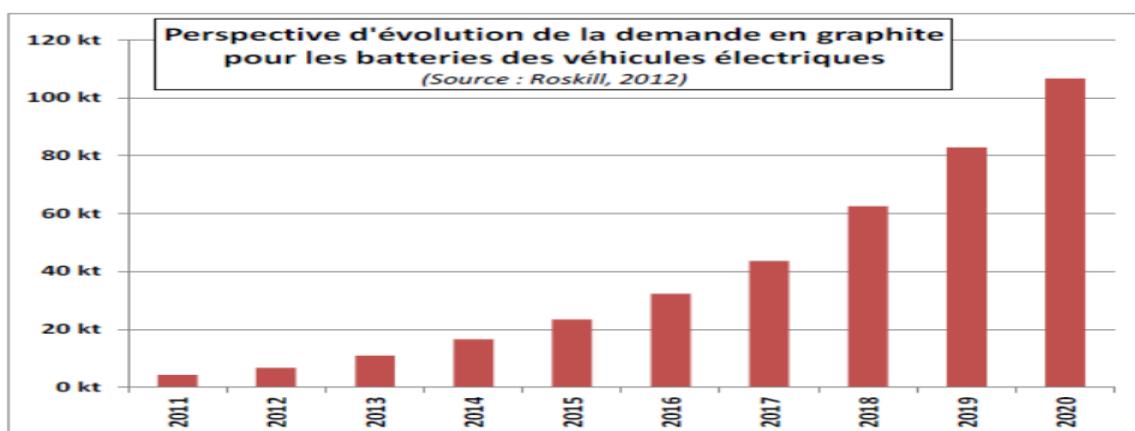
(Source : *Industrial Minerals*)

Figure 6 : Evolution du prix de graphite

II.4. Demande sur le marché mondial [21]

La demande industrielle pour le graphite pour le graphite est forte et connaît une croissance d'environ 5% par an depuis 10 ans. Sa consommation est soutenue par la croissance de la demande des économies émergentes de Chine, d'Inde notamment. En outre, les États-Unis ont l'intention de mettre sur route 250 000 voitures électriques par an à partir de 2015 et la Chine 1.300.000. Avec 50 kg de graphites nécessaires pour la batterie de chaque voiture électrique, le marché du graphite aura besoin de trouver 250 000 tonnes supplémentaires de graphite lamellaire pour répondre à cette seule demande.

Par ailleurs, la batterie des téléphones mobiles en contient aussi. Bien que plus petite que celle d'une voiture électrique, cette batterie devrait être produite en de très grande quantité puisque selon l'Union internationale des télécommunications, 5,9 milliards de personnes sur une population mondiale de 7 milliards utilisent un téléphone mobile. C'est ainsi que d'ici 2015, il est estimé qu'il y aura plus de téléphones mobiles que d'habitants sur terre. Enfin, un dernier facteur à ne pas négliger et qui pèse également sur l'accroissement de la demande en graphite lamellaire est l'émergence des « petits réacteurs nucléaires, les Pebble Bed Nuclear Reactor (PBNR) ». Le PNBR, une technologie du futur liée au développement du nucléaire, consomme 300 tonnes de graphite lamellaire au démarrage et 60 à 100 tonnes par an par réacteur. Le premier prototype de PNBR est en Chine et ce pays prévoit d'en construire 30 d'ici 2020 alors que les États-Unis en prévoient la construction de 500 d'ici 2020. Cela consommerait 400 000 tonnes de graphite lamellaire, juste ce que l'on produit actuellement



(Source : Industrial Minerals)

Figure 7 : Perspective d'évolution de la demande en graphite pour les batteries des véhicules électriques

CHAPITRE III : GRAPHITE A MADAGASCAR

Le graphite de Madagascar est connu pour sa qualité exceptionnelle. De plus, Madagascar possède des ressources importantes de ce minerai. Ce chapitre est abordé afin de donner des amples connaissances sur le graphite de la grande île ainsi que les réserves exploitables.

III.1. Situation de graphite à Madagascar [4]

Le graphite de Madagascar se répartit dans plusieurs zones de la Grande île. En fait, il se rencontre surtout dans les couches de gneiss et de micaschistes silico-alumineux du groupe du Manampotsy et de ses équivalents dans deux autres formations, c'est-à-dire le groupe d'Ambatolampy et de Tolongoina. Les réserves en graphite de Madagascar sont abondantes. Ainsi, les travaux de prospections de plusieurs auteurs tels que ceux de H.Besairie, J.A. Rasoamahenina ou encore Noizet ont été synthétisés ainsi que des informations concernant le volet exploitation et commercialisation recueillis auprès des exploitants de l'époque dans le but d'établir les critères pour choisir un gisement. Le choix d'un gisement se fait donc selon les différents critères ci-après :

◆ La puissance du banc graphiteux

L'implantation d'une installation de préconcentration est faisable si les réserves en minerai de tout venant atteint les 100000t. Pour cela, le banc graphiteux doit avoir au moins une puissance de 5m. en effet, de telles réserves qui représentent une production de 5000t de graphite à une teneur relativement de 5%, d'où cinq à dix années de durées de vie pour une cadence minimum de 500 à 1000t/an.

◆ La qualité de graphite

L'objectif dans ce critère est de donner à un banc une forte proportion de grandes paillettes, d'une part plus facile à enrichir, d'autre part pouvant atteindre des teneurs très élevées : 95%C. Elle est donc très primordiale. Le prix de vente d'un produit ainsi que la facilité de sa commercialisation vont augmenter si la dimension ses paillettes et sa teneur en carbone est de bonne qualité.

◆ **L'accessibilité et la proximité d'un port**

Le produit doit être évacué et distribué aux clients. En effet, l'évacuation et l'accessibilité est importante. Les gisements placés près d'une voie ferrée, d'une route bitumée ou d'un port ont plus d'avantage.

◆ **Le pendage de l'horizon graphite**

Le pendage d'un horizon a un impact majeur sur le coût d'extraction ou de production. Ce coût peut être réduit au maximum en extractant le minimum de stérile. L'extraction sur une couche horizontale sur le plateau ou faiblement pente, parallèle au versant présente davantage de profit que sur un pendage vertical (à éviter).

◆ **La profondeur de l'altération**

L'altération d'un horizon de gneiss graphiteux feldspathique se fait beaucoup plus en profondeur qu'un horizon quartzitique. Par ailleurs, l'abattage à l'explosif et le broyage du minerai sont onéreux, de plus les paillettes vont être endommagées.

◆ **La présence d'eau**

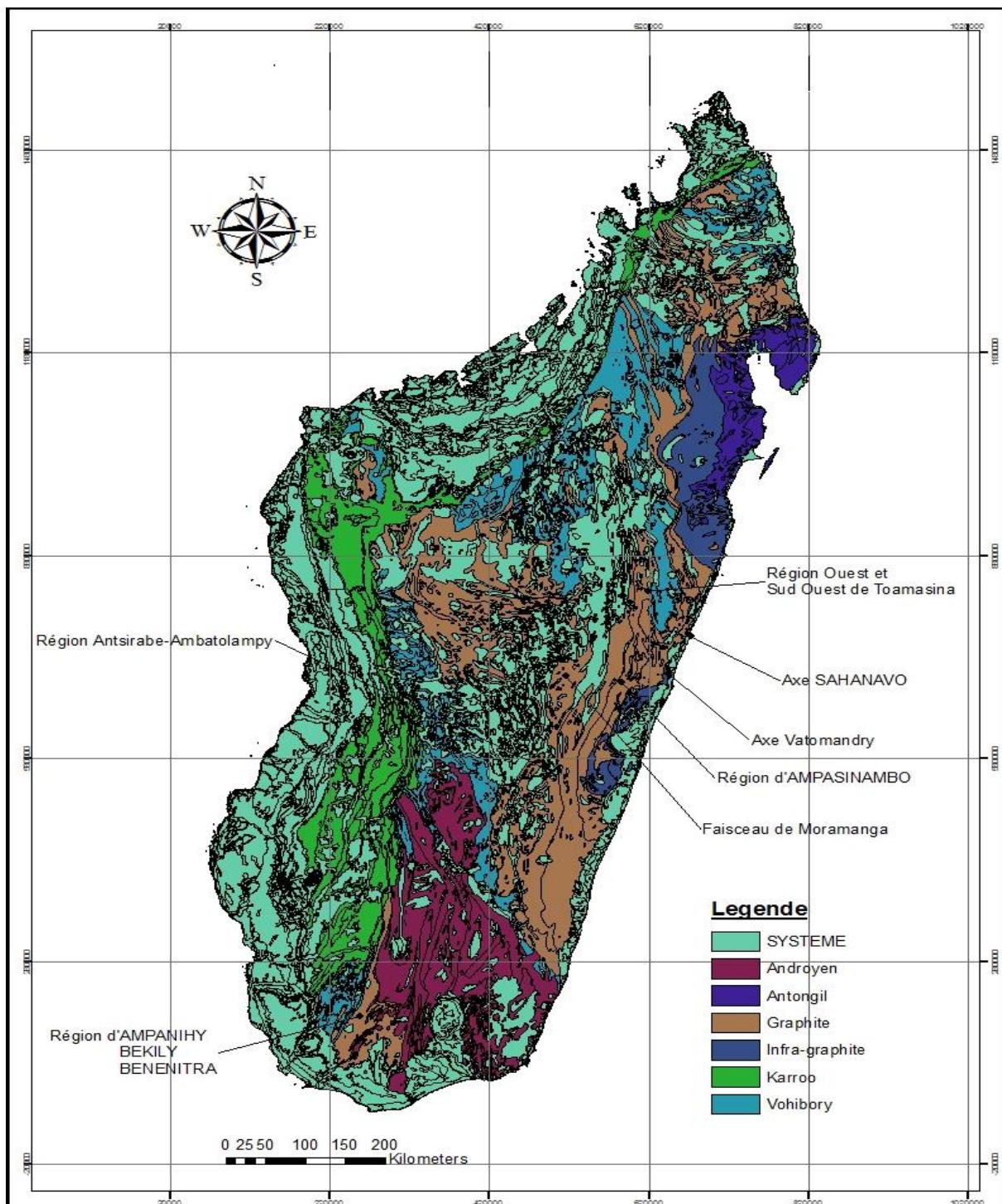
La présence d'eau à proximité du site présente beaucoup d'avantages du fait que l'exploitation et l'enrichissement de graphite nécessitent une quantité d'eau considérable. Cette consommation d'eau est de 80 m³ par heure pour la carrière et l'unité de déboubage pour produire l'équivalent de 1,5 t de graphite raffiné par poste. Généralement, les exploitants travaillent en eau perdue mais il est certain qu'en cas de pénurie, cette eau peut être décantée et recyclé.

◆ **La présence d'une source d'énergie**

Toute exploitation minière nécessite une source d'énergie assez importante comme une ligne électrique appartenant au réseau national ou bien un torrent offrant la possibilité d'un équipement de microcentrale électrique. Par ailleurs, la facilité d'approvisionnement en bois ou charbon est aussi utile à ne serait-ce que pour le séchage des concentrés.

III.2. Indices graphiteux de Madagascar [4] [18]

Les gisements de graphite à Madagascar se trouvent principalement dans les régions telles que : la région orientale, la région Ambatolampy-Antsirabe et la région d'Ampanihy (Carte 1).

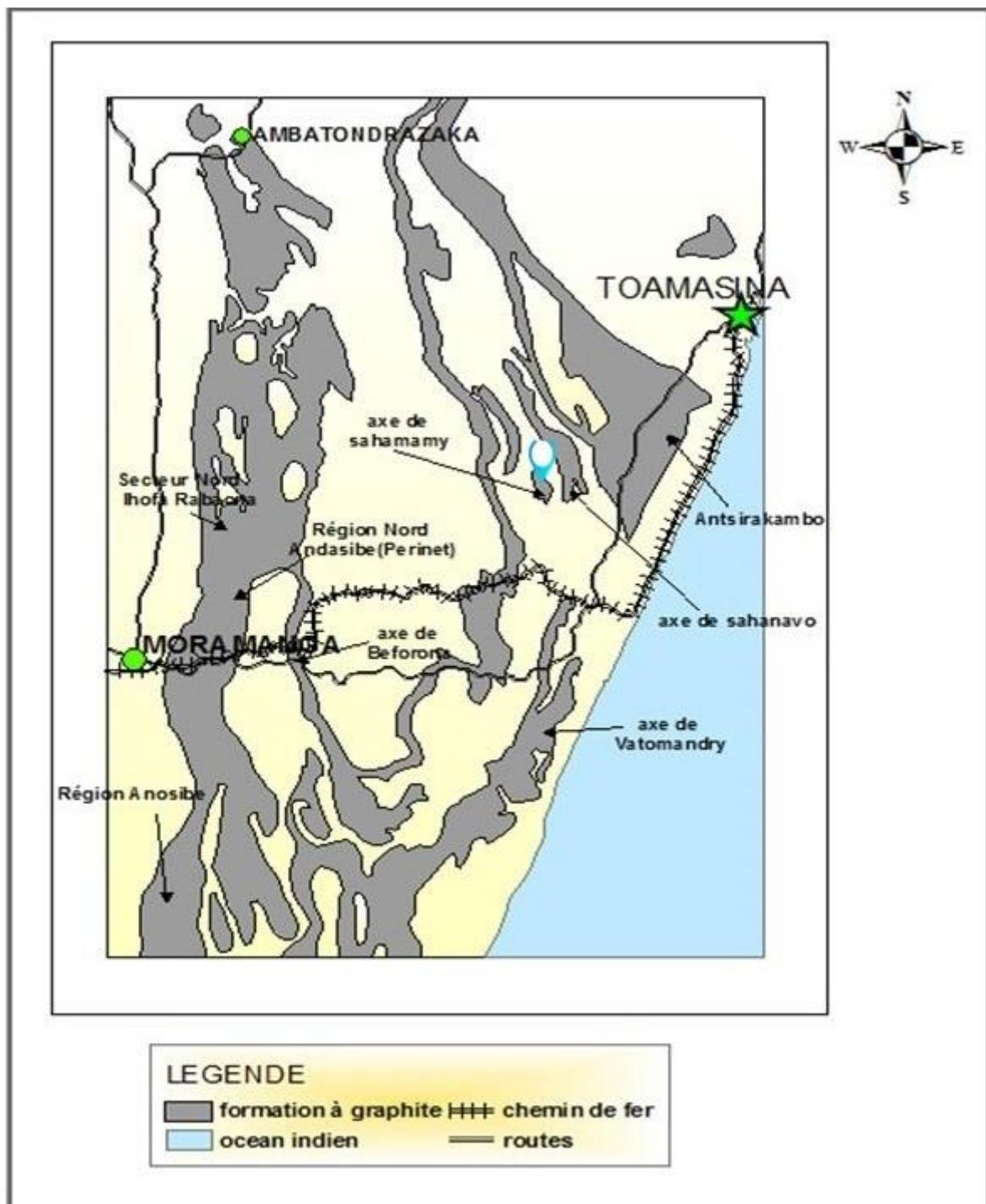


(Source : BD 500)

Carte 1 : Carte des gîtes de graphite à Madagascar

III.2.1. Région orientale

Les indices de graphite se répartissent dans nombreuses régions comme la région d'Ampasina, la région ouest et sud-ouest de Toamasina, l'axe Vatomandry, l'axe Sahanavo-Sahamamy et le faisceau Moramanga.



(Source : plan directeur pour la mise en œuvre du sol et du sous-sol de Madagascar)

Carte 2 : Axe graphiteux de la zone orientale

III.2.1.1. Faisceau Moramanga

Localisation

Un ensemble de faisceau de direction sensiblement Nord Sud constitue le faisceau de Moramanga partant d'Ambatondrazaka et prend fin à Anosibe.

Ce faisceau est subdivisé en secteurs :

- Secteur Nord Fieferana,
- Secteur Nord Ihofa Rabaona,
- Secteur Nord Andasibe (Perinet),
- Secteur Sud Andasibe (Perinet) et
- Secteur Anosibe

Cette partie de la grande île présente des caractéristiques d'être humide et boisée, et ayant donc à la fois des avantages et des inconvénients pour une éventuelle exploitation.

Géologie et topographie

La formation géologique de cette région est constituée de migmatites appelée migmatite granitoïde de Brickaville à la base. Ensuite suivie de gneiss graphiteux latérisés qui reposent en concordance sur le socle. La plupart des gisements en exploitations et exploitables présentent un pendage favorable (subhorizontal).

Types de graphite

Dans cette région, les gisements sont généralement formés d'une part des graphites de grosses paillettes comme dans la partie d'Andasifahatelo et d'autres part des graphites de petites et de moyennes paillettes étant importantes.

III.2.1.2. Axe Vatomandry

Localisation

Les exploitations se situent à l'environ de 23 km au nord de Vatomandry. De plus les réserves de graphite se trouvent dans un rayon de 2,5 km du mont AMBOHITRANALA. Ce mont, se trouvant à 20 km au nord, peut être accédé à partir de Vatomandry en prenant le chemin menant vers Ambilalemaitso jusqu'à Vohitrampasina ; puis en coupant par le canal des pangalanes et le lac d'Ankaraina d'est en ouest d'une distance de 2km.

Géologie et topographie

Cette formation est de direction générale presque semblable à celle de la côte Est malgache. Elle est constituée d'une succession de couche de gneiss stérile et d'une autre couche de gneiss migmatisé à graphite. Dans cet axe, la puissance de la couche minéralisée est assez importante car elle peut atteindre jusqu'à 50 m. De plus, la couche graphiteuse est très plissée et dessinant une boutonnière anticlinale complexe. Son exploitation se trouve plus au nord c'est-à-dire à Marivolanitra. En effet des migmatites à graphite abondant apparaissent au cœur des plis anticlinaux

Type de graphite

Dans cette région, le graphite se présente sous forme de paillettes avec une teneur de carbone élevée car la concentration moyenne est de 85 %.

III.2.1.3. Région Ampasinaambo

Du fait de la difficulté d'accès menant vers cette zone, les informations et les données sur cette zone semblent mal connues. De plus, la région est parfois submergée et les couches ont des pendages sub-vertical.

Mais malgré tout, cette région possède une assez forte potentialité en graphite car des petites exploitations y ont vu le jour et y ont gratté des grands gisements qui pouvaient s'étendre jusqu'à des centaines de mètres mais qui s'est malheureusement éteint à partir de 1952.

III.2.1.4. Axe Sahanavo-Sahamamy

Localisation

Les gisements de Sahanavo se trouvent au nord de Brickaville et celle de Sahamamy se situent à 20 km au nord d'Anivorano et peuvent être accédés par voie routière en empruntant le chemin d'Ambohimaninony sur la route de Brickaville. Pour ces deux axes, leurs dimensions sont généralement petites.

Géologie et topographie

Les deux gisements c'est-à-dire celle de Sahanavo et de Sahamamy présentent une même formation qui est les migmatites granitoïdes de Brickaville. Dans la vallée de Sahanavo,

la topographie est relativement plate. De plus, le plongement des couches graphiteuses est de sens inverse à la pente de la topographie, ce qui engendre une difficulté lors de l'exploitation mais par contre la couche de graphite a une puissance atteignant souvent 100 m.

La structure de la région de Sahamamy est relativement détaillée et complexe avec plis assez serré et de plongement généralement faible de 20 à 40 °.

Cette zone a aussi une charnière renfermant un banc graphiteux d'une puissance d'environ 20 m. Mais par contre la plupart des autres indices recensés renferment des bancs de puissances inférieures à 10 m.

Type de graphite

Le graphite dans cet axe se présente sous forme de moyennes et grosses paillettes avec forte teneur en carbone entre 88 à 95%. Mais le filon de graphite est contenu dans un minéral de gneiss à sillimanite, parfois à passage quartzeux.

III.2.1.5. Région ouest et sud-ouest de Toamasina

Localisation

La région se trouve sur une assez vaste superficie car elle s'étend de l'ouest et au sud-ouest de la ville de Toamasina.

Dans cette zone, des nombreux points d'indices ont été recensés mais parmi eux deux principales gîtes d'exploitations sont à citer : l'exploitation d'Ampangadiantany au nord, à quelques kilomètres à l'est de la route bitumée et l'exploitation d'Antsirakambo se trouvant cinquante de kilomètres au sud sud-ouest de la ville de Toamasina

Géologie et topographie

La région d'ANTSIRAKAMBO se trouve sur un fond géologique de type gneissique avec des bancs de graphites de plus de 50 m de puissance. Le tout repose au-dessous des gneiss stériles.

Les formations de cette région sont très plissées suivant des structures N.NE-S.SE, en général déversées vers l'Est et groupées à l'intérieur de trois ensembles parallèles : l'anticlinorium d'Ampangadiantany, le synclinorium d'Andranomangatsiaka et l'anticlinorium de Sahafazy- Sandramaha.

Dans les deux anticlinoriums sur environ 5 km apparaissent les gneiss à graphite abondant. Le cas du gisement d'Ampangadiantany est très identique à celui d'Antsirakambo puisqu'ils se trouvent sur les mêmes formations géologiques.

Type de graphite

Les types de graphite trouvés dans ces régions sont en fines paillettes au niveau d'Antetezampaly et Ambinanisahantsandra. Les grosses paillettes s'observent à Ambodimanga et Iharato.

En 1963, des travaux de recherches ont été réalisés à Ampangadiantany, par une étroite collaboration entre les Ets GALLOIS et la BRGM, qui avait permis de découvrir des gîtes de graphite à haute teneur en carbone de 81 à 93 % avec une réserve totale estimée à 48000 t de graphite.

III.2.2. Région d'Ampanihy-Bekily-Benenitra

Localisation

Cette partie de gîte du graphite est assez vaste car elle s'étend sur près de 200km de long et de 20 à 75km de large, dans l'extrême Sud-ouest de Madagascar. Son climat aride ainsi que sa très faible pluviométrie la rendent particulière. Par conséquent, il y a peu de couverture végétale.

Gîtologie et topographie

Dans cette région, les affleurements de graphite sont parfaitement visibles du fait qu'elle n'est pas latérisée. Le groupe d'Ampanihy est essentiellement formée par de roches dures telles que les gneiss et leucogneiss comme les leptynites. La formation de ces roches provient du métamorphisme intense appelé faciès granulite à une température de plus de 700°C et une pression de 15 bars.

A Tranoroa, la puissance des couches graphiteuses peut atteindre jusqu'à 150 m avec une teneur en carbone environ 75%.

Type de graphite

Le graphite rencontré dans cette région est de type Ceylan. Il est facilement observable et est contenu dans des filons quartzueux, fait office de remplissage des filons quartzueux et se

présente en masse et en aiguilles. Les teneurs sont souvent fortes mais la roche reste dure et exige un broyage pour séparer le graphite.

Dans ce groupe d'Ampanihy, le graphite est souvent contenu dans des bancs de leuco gneiss à faisceaux continus. Cette formation, peu observable dans les autres régions de la grande île est extrêmement riche.

III.2.3. Région d'Antsirabe-Ambatolampy

D'après les conclusions de H.Besairie, l'exploitation dans cette région a connu un apogée depuis 1910 jusqu'en 1953. Mais à partir de 1953, toutes les activités d'exploitations ont pris fin dont les causes sont multiples :

D'une part, l'épuisement de la plupart des gros gisements à cause de la puissance métrique de l'amas de stérile élevée rendant l'exploitation à ciel ouvert non rentable économiquement du fait du taux de décapage important. En effet, il fallait chercher en profondeur pour trouver d'autres gisements. De plus les exploitants n'avaient plus de gisements en vue.

D'autre part, les frais de transports de l'époque étaient beaucoup plus onéreux que pour les gisements côtiers.

Type de graphite

L'examen des indices trouvées montre du graphite à une supérieure teneur en roche que ceux de la côte est. Le Graphite de cette zone est pulvérulent, donc difficile à enrichir et de moindre valeur marchande.

CONCLUSION PARTIELLE

Le graphite est une forme stable du carbone connue sous trois types dans la nature tels que le graphite amorphe, le graphite en paillette et le graphite filonien. Parmi eux, le graphite en paillette est le plus répandu et le plus demandé dans le marché en raison de ses nombreuses possibilités applications. A Madagascar, trois grandes régions présentent des indices graphitiques importants selon les divers travaux de recherches effectués. Mais la partie orientale, y compris la région de Sahamamy, se distingue par la bonne qualité de ses gisements.

PARTIE III : EXPLORATION DU SITE D'ETUDE

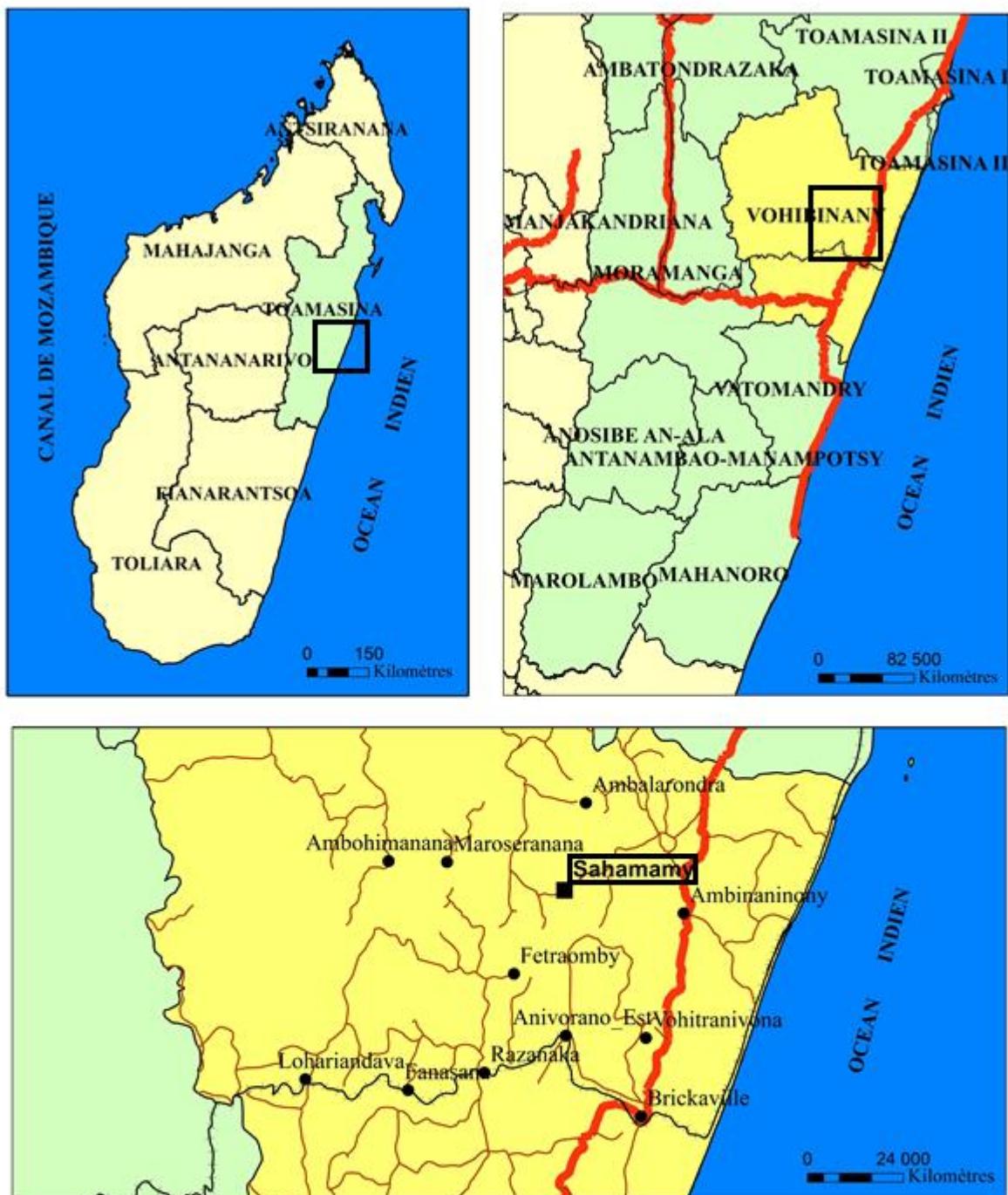
CHAPITRE IV : CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

La côte Est de Madagascar est connue pour sa biodiversité, son climat tropical humide et surtout ses richesses du sous-sol à savoir le nickel, le cobalt, la chromite, le graphite ainsi que les diverses pierres précieuses tels que le saphir, le rubis, etc...

Notre étude a été réalisée dans cette partie de l'île, plus exactement dans la région de Brickaville. Dans ce chapitre, on va présenter les caractéristiques physiques et la structure de la population de cette zone.

IV.1. Localisation géographique

La zone d'étude se localise à l'Est de Madagascar dans la Région Atsinanana, District de Brickaville, Commune Rurale de Fетraomby, Fokontany de Sahamamy. Le site en question se trouve dans le périmètre minier de l'Etablissement Rostaing situé à 20 Km d'Anivorano, repéré par les coordonnées géographiques X = 837 100 m et Y = 667 800 m. On peut y accéder par la RN2 ou par le chemin de fer reliant Antananarivo-Toamasina.



Légende :

- RN2
- Chemin de fer
- Piste
- Chef lieu Commune
- Limite de la zone d'étude
- [Light green box] Districts dans le province de Toamasina
- [Yellow box] District de Brickaville
- [Light yellow box] Limite des autres districts



(Source : BD 500)

Carte 3 : Localisation de la zone d'étude

IV.2. Contexte physique et biologique [5] [3] [21]

IV.2.1. Relief [6]

La Région Atsinanana se reconnaît par son altitude qui varie selon les zones :

- Dans le littoral, l'altitude est de 0 à 300 m ;
- Dans la partie Est et falaise ombrophile, 300 à 800 m ;
- La partie orientale avec une altitude de 900 à 1200 m.

La zone d'étude se trouve dans la zone littorale constituée par une série de petites plaines étroites, discontinues. Cette zone est caractérisée par deux complexes :

- L'un, ancien, zone de basses collines sablonneuses couvertes de steppes, de bozaka parsemées de kininina et gréviliyas avec des altitudes moyennes de 50 m.
- L'autre plus récent constitué de vallées peu profondes parfois marécageuses.



Photo 1 : Aperçu de la localité de Sahamamy

IV.2.2. Pédologie [13] [17]

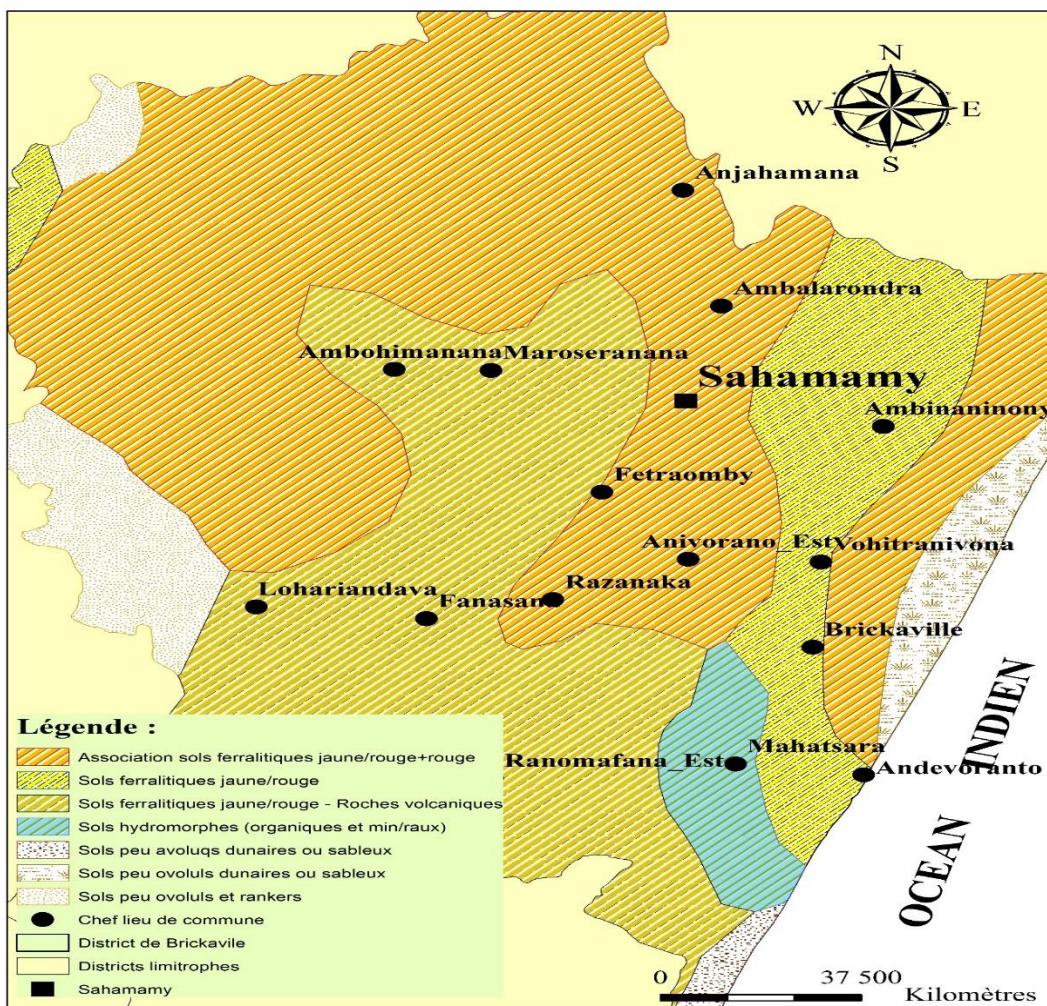
La Région Atsinanana se distingue par trois catégories de sols tels que :

Les sols hydromorphes qui se trouvent dans les bas-fonds. Connus localement sous le nom « Horaka », ces sols sont caractérisés par la présence en permanence d'eau et par l'odeur de soufre qu'ils dégagent. Ils sont de couleurs noirs et montrent des dépôts ferrugineux de couleur rouille à la surface de l'eau. Les matières organiques y sont mal décomposées. De plus, ce type de sol exige beaucoup de drainage pour être favorable à la riziculture.

Chapitre IV : Contexte général de la zone d'étude

Les sols alluvionnaires d'apport fluvial sont des sols plus riches en alluvions argileuses ou sableuses localisées dans les vallées. Appelés « Baiboho », ces sols se trouvent surtout en bordure des cours d'eau. Ces sols conviennent aux cultures pérennes pour autant qu'ils ne soient pas inondables et peuvent être aménagés en rizière.

Les sols ferralitiques constituant les 2/3 de la région sont localisés sur les pentes de colline. Ils sont parfois des sols riches en concrétion et de couleur jaune sur rouge. Ils sont plus ou moins dégradés suivant l'état d'évolution des formations végétales. Leur horizon organique est de faible épaisseur. Les sols ferralitiques sont peu profonds et sensibles à l'érosion au moment de la mise en culture. Ils possèdent des bonnes propriétés physiques mais de faible richesse chimique. Les pentes restent les facteurs limitant de leur exploitation rationnelle. La pratique du « tavy » accélère la dégradation du sol.



(Source : BD 500)

Carte 4 : Pédologie de la région

IV.2.3. Contexte géologique et stratigraphique [4] [5] [22]

La géologie de la partie Est de Madagascar est caractérisée par la juxtaposition de deux étalons de terrains :

- ⊕ Les terrains sédimentaires qui se rencontrent dans la partie Nord Est et Sud-Ouest, distingués par du volcanisme néogène à quaternaire et crétacé. Il s'agit d'alluvions, de sables, de dunes vives, de grès peu solidifiés, bordant la côte de Mahanoro jusqu'à Toamasina ;
- ⊕ Les terrains cristallins avec prédominance de type graphite dans la partie de Toamasina, Brickaville et de Vatomandry, Mahanoro, Marolambo et Antanambao-Manampontsy.

D'après Henri Besairie, le socle malgache est divisé en trois grands systèmes : le système Androyen, le système du graphite et le système Vohibory. La zone étudiée appartient au système du graphite qui se subdivise à son tour en trois groupes : le groupe d'Ampanihy, le groupe du Manampotsy et le groupe d'Ambatolampy et le groupe d'Andriba.

La zone d'étude se localise dans l'axe Sahamamy. Elle est située de part et d'autre de la rivière de Rianila de la région d'Anibvorano-Est dont la géologie est marquée par trois ensembles lithostratigraphiques rattachés au groupe du Manampotsy (c'est-à-dire du graphite) constituant le substratum. De bas en haut, on distingue : les migmatites d'Ivondro qui se rencontrent surtout dans la région Nord-Ouest ; la série gneissique silico-alumineuse à graphite ; et les migmatites granitoïdes de Brickaville largement développées vers l'Est correspondant à des noyaux puissants plus ou moins instratifiés dans la série gneissique. Par ailleurs, seules les deux dernières formations s'observent dans la zone d'étude. Les migmatites granitoïdes de Brickaville constituées de biotite, d'amphibole et de grenat couvrent presque toute la région. De plus, la série gneissique à graphite se rapporte à des enclaves dans ces migmatites d'où la dénomination de « faisceaux intra-Brickaville ».

Le secteur de Sahamamy est composé de six unités d'Est en Ouest telles que : le faisceau de la zone de Sahamamy correspondant à la zone étudiée, le faisceau de la zone de Ranofotsy, le faisceau de la zone de Gisimay, le faisceau de la zone d'Androrangabe, le faisceau de la zone d'Ampasimazava et le faisceau de la zone de Fетraomby-Ambodirina.

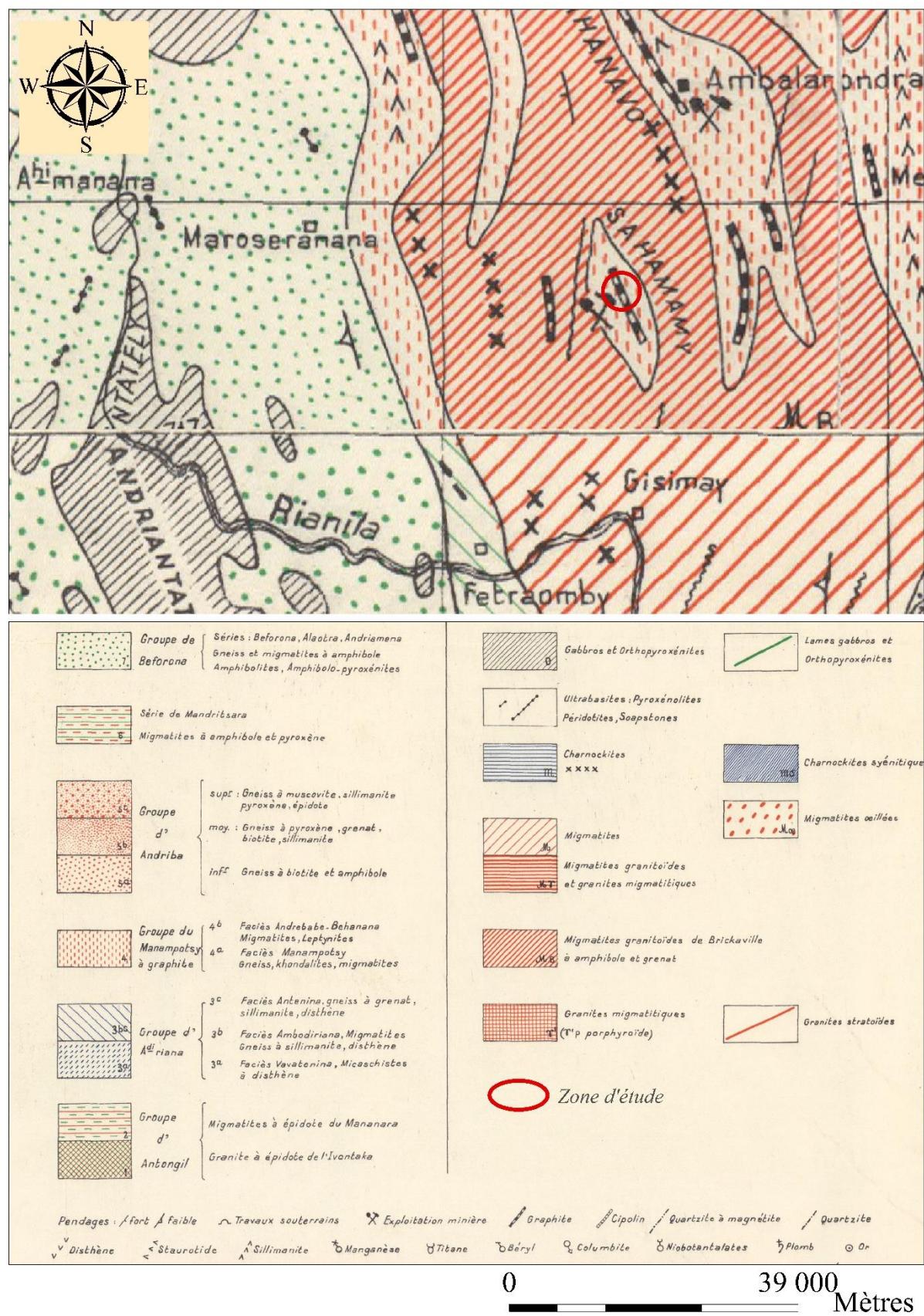
Le faisceau de la zone de Sahamamy est constitué de gneiss à biotite, graphite, parfois sillimanite et grenat formant dans les migmatites de Brickaville une série de quatre enclaves de dimensions 300 à 600 m × 100 à 200 m qui se relaye en direction et orientée Nord-Sud. De

Chapitre IV : Contexte général de la zone d'étude

plus, cette série s'incurve à hauteur de Sahamamy-Toby vers l'Est et de Nord-Est en raison de deux failles orientées W-SW-E-NE et SW-NE. De plus, c'est un faisceau unique érodé se digitant du fait de l'architecture structurale (terminaison périclinale Sud très aplatie à noyau anticlinal de migmatites granitoïdes).

En général, les couches sont dirigées de N10 à 20°W avec pendage régulièrement Ouest 20 à 80° sur la ligne occidentale et de N30°E à pendage Sud-Est faible sur la ligne orientale. La minéralisation graphiteuse correspond à des petits bancs de 0,50 à 1,50 m. Et la puissance moyenne minéralisée est de 2,50 à 2,70 m dans la série gneissique ayant une épaisseur de 30 m environ.

Chapitre IV : Contexte général de la zone d'étude



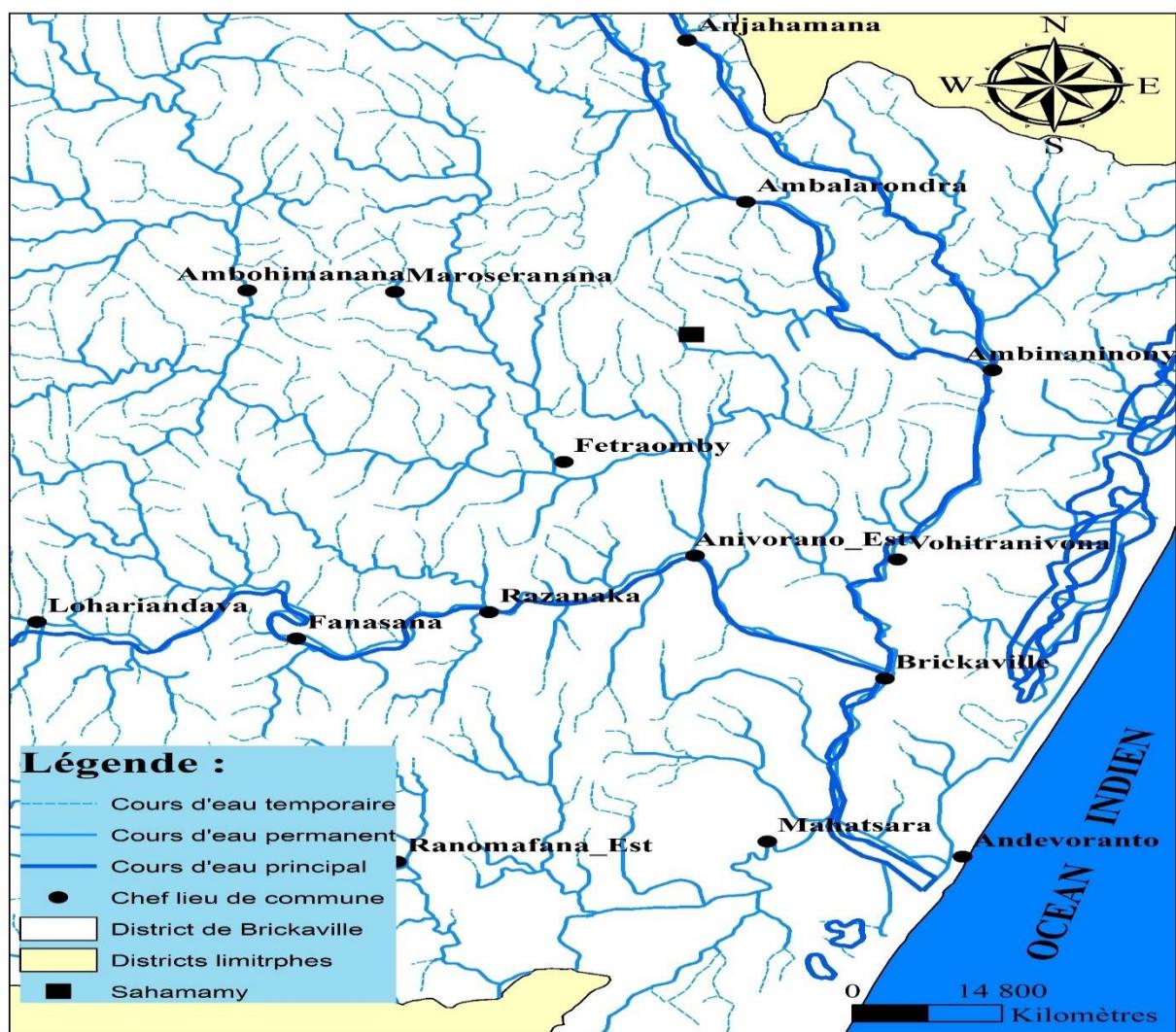
(Source : BD 500)

Carte 5 : Carte géologique de la zone d'étude

IV.2.4. Hydrologie

La région dispose des ressources en eau importantes qui sont presque dominées par des lacs et des cours d'eau. On y rencontre trois types de cours d'eau tels que : le cours d'eau temporaire, le cours d'eau permanent et le cours d'eau principal.

La plupart de ces cours d'eau est à courant rapide sur la partie moyenne de leurs cours. Le débit des eaux et la pluviométrie sont fortement liés et les rivières réagissent vite à celle-ci. Les crues sont soudaines et violentes pendant la saison des pluies. Les rivières les plus importantes dans cette zone sont : Rianila, Iaroka, le canal des Pangalanes, Rongaronga, Sahamavo et Manambaro.



(Source : BD 500)

Carte 6 : Hydrographie de la région

IV.2.5. Climatologie

Les données utilisées concernant le climat dans ce présent ouvrage ont été fournies par le Service Météorologique d'Ampandrianomby.

De par sa position géographique délimitée par l'océan indien à l'Est, le climat de la zone d'étude (District de Brickaville ou Vohibinany) fait partie du type tropical humide avec une forte pluviométrie annuelle. L'influence de l'Alizé tout au long de l'année entretient des températures modérées se moyennant entre 18 à 28 °C.

La région est soumise aux autres différents types de climat tropical correspondant aux quatre zones de reboisements :

- le microclimat de la zone littorale, chaud, humide à perhumide : à Toamasina I ;
- le microclimat de la zone Est et falaise ombrophile, chaud, humide à perhumide ;
- le microclimat de la zone orientale, climat tropical tempéré ;
- le microclimat de la zone occidentale, climat tropical tempéré subhumide.

❖ Température et pluviométrie

La température moyenne varie selon l'altitude et la proximité par rapport à la mer. Sa valeur maximale est de 29°C tout au long du mois de Décembre et de Janvier tandis que sa valeur minimale varie entre 14°C et 15°C, surtout pendant le mois de Juillet.

La précipitation moyenne annuelle varie entre 200 mm et 600 mm d'eau. En fait, les précipitations de la zone d'étude varient de 292,5 mm entre le plus sec et le plus humide du mois. Le nombre de jours de pluies est de 290 jours à 310 jours par an. Pendant la saison cyclonique, les précipitations mensuelles peuvent atteindre 750 mm d'eau. Les mois de Janvier, Février, Mars, Décembre sont les plus pluvieux. Les saisons les plus sèches correspondent aux mois d'Août et d'Octobre.

Tableau 2 : Températures moyennes et pluviométries annuelles

Mois	Température minimale moyenne [°C]	Température maximale moyenne [°C]	Pluviométrie [mm]
Janvier	20,5	28,7	282,1
Février	20,8	28,4	354,9
Mars	20,6	27,9	334,8
Avril	19	27,4	137,2
Mai	17,1	25,2	152,5
Juin	15,9	23,1	187,6
Juillet	14,2	21,2	188,1
Août	14,6	23,2	90,2
Septembre	15,1	24,5	110,8
Octobre	17,8	27,1	62,4
Novembre	19	27,8	124,8
Décembre	20,4	29,1	213,2

(Source : Météo Ampandrianomby)

♦ Vents et cyclones

La région est exposée à des différents types de vents. Le vent de l'Est ou « Varatrazza » prédomine partout en toutes saisons avec des composantes Nord ou Sud selon la latitude. Le vent de l'Est, l'Alizé, apporte une humidité constante et abondante pendant la période de Juin à Septembre. Parfois le vent d'Ouest ou « Talio » peut apparaître au sol.

Ces vents véhiculent des masses d'air humide qui, lorsqu'elles rencontrent un relief suffisamment élevé, se refroidissent et engendrent des précipitations sur le versant. Durant la période chaude, du mois de Novembre au mois d'Avril, l'Alizé est moins fort et plus irrégulier de direction Nord-Est.

Le district de Brickaville se situe dans une zone très cyclonique. Il est souvent victime des cyclones et des dépressions tropicales. Ces phénomènes ont frappé ce district quatre fois durant les cinq dernières années (2014-2018) et arrivent surtout entre le mois de Janvier et Mars.

Tableau 3 : Liste des cyclones touchant le District de Brickaville entre 2014 et 2018

Saison	Nom	Période de passage	Intensité maximale atteinte lors de passage au plus près de la Région	Force du vent moyen correspondant (km/h)
2014	-	-	-	-
2015	CHEDZA	16/01/2015	Dépression Tropicale	Inf. à 61
2016	-	-	-	-
2017	ENAWO	08/03/2017	Tempête Tropicale	62 à 117
2018	AVA	05/01/2018	Tempête Tropicale	62 à 117
2018	ELIAKIM	16/03/2018	Tempête Tropicale	62 à 117

(Source : Météo Ampandrianomby)

IV.2.6. Formation végétale [6]

La partie Est de Madagascar est réputée par l'importance en tant qualité qu'en quantité de ses forêts naturelles et la biodiversité de ses formations végétales. Les formations végétales présentent une grande diversité en fonction des conditions climatiques et pédologiques.

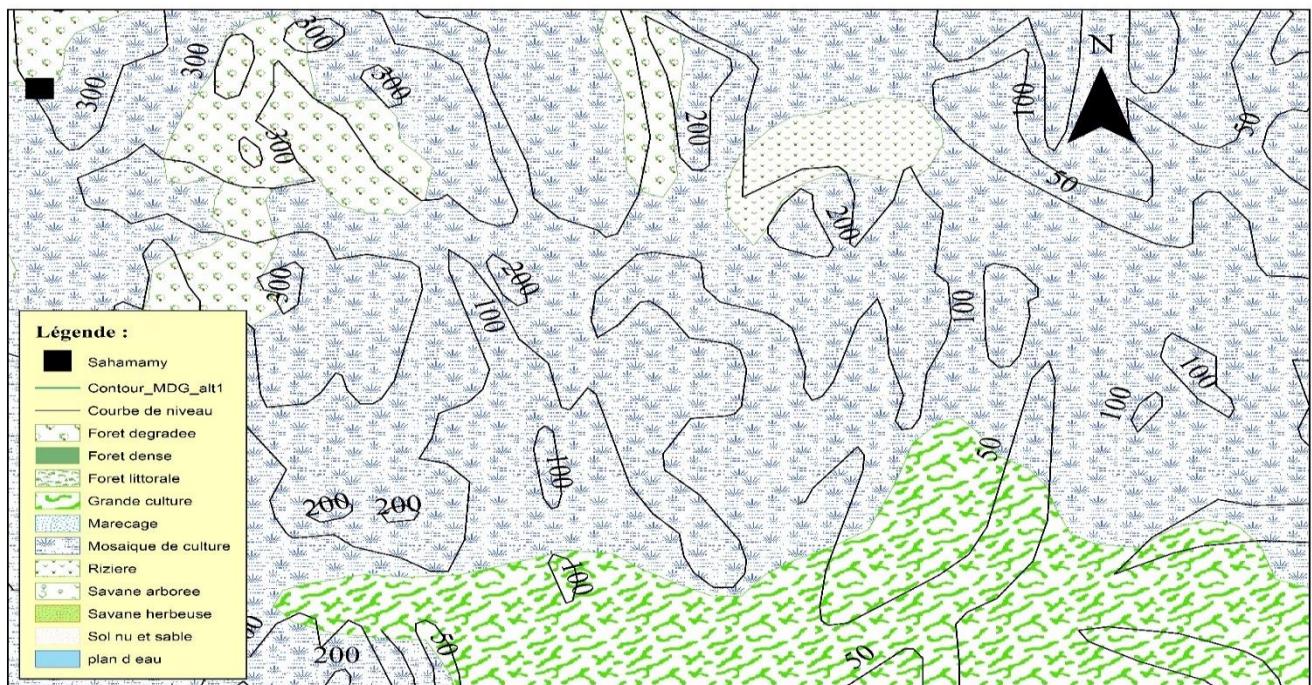
Les formations végétales dans la zone d'étude peuvent être classées en trois catégories :

- **Les formations forestières** : ce sont des forêts naturelles primaires denses de type ombrophile rencontrées sur les hauts massifs de l'Ouest. Elles sont localisées dans les zones difficilement accessibles (les zones rocheuses à pente raide et la falaise). Le climat de la région rend propice le développement d'une forêt dense et toujours verte ;
- **Les formations secondaires dégradées** : ce sont des forêts qui succèdent à la formation primaire. Il s'agit des forêts sclérophylles avec des végétations de « savoka » et des pseudo-steppes dans les zones de collines à savoir les fouillis d'arbustes, de fougères, de plantes herbacées géantes que domine l'éventail caractéristique du ravinala ou la gerbe des bouquets de bambous ;
- **La végétation du littoral** : c'est une végétation adaptée au sable des cordons et des dunes. La végétation se trouvant dans les zones marécageuses sur les sols hydromorphes est adaptée à l'excès d'eau comme les « Viha » et les « Tatamo ». On rencontre les

mangroves près des embouchures. Des reboisements de quelques végétations ont été réalisés le long du littoral comme grevillea, pins, eucalyptus, plantations de cocotiers.

On y rencontre aussi des fruits comestibles tels que : Les bananes, les avocats, les mangues, les sakoa manga, les litchis, l'Ampalibe.

Actuellement, la région Atsinanana ne dispose que de quelques bandes de forêts naturelles. Ce sont les formations secondaires et les cultures qui occupent la plus importante partie de la superficie.



(Source : BD 500)

Carte 7 : Occupation du sol de la région

IV.3. Structure de la population [6]

La région d'Antsinanana est la plus peuplée des trois régions de la Province de Toamasina. L'essentiel du peuplement de la Région est dû d'une part à l'installation des Betsimisaraka (population majoritaire) et d'autre part à l'arrivée successive des migrants d'autres tribus ou groupes ethniques (Bezanozano, Sihanaka, Betsileo, Merina, Antandroy, Antaisaka) et d'importantes communautés chinoises et indiennes (collecteurs, grossistes, détaillants dans le commerce).

Du point de vue des infrastructures, Sahamamy est rattaché avec la commune de Fetraomby.

CHAPITRE V : TRAVAUX DE PROSPECTION

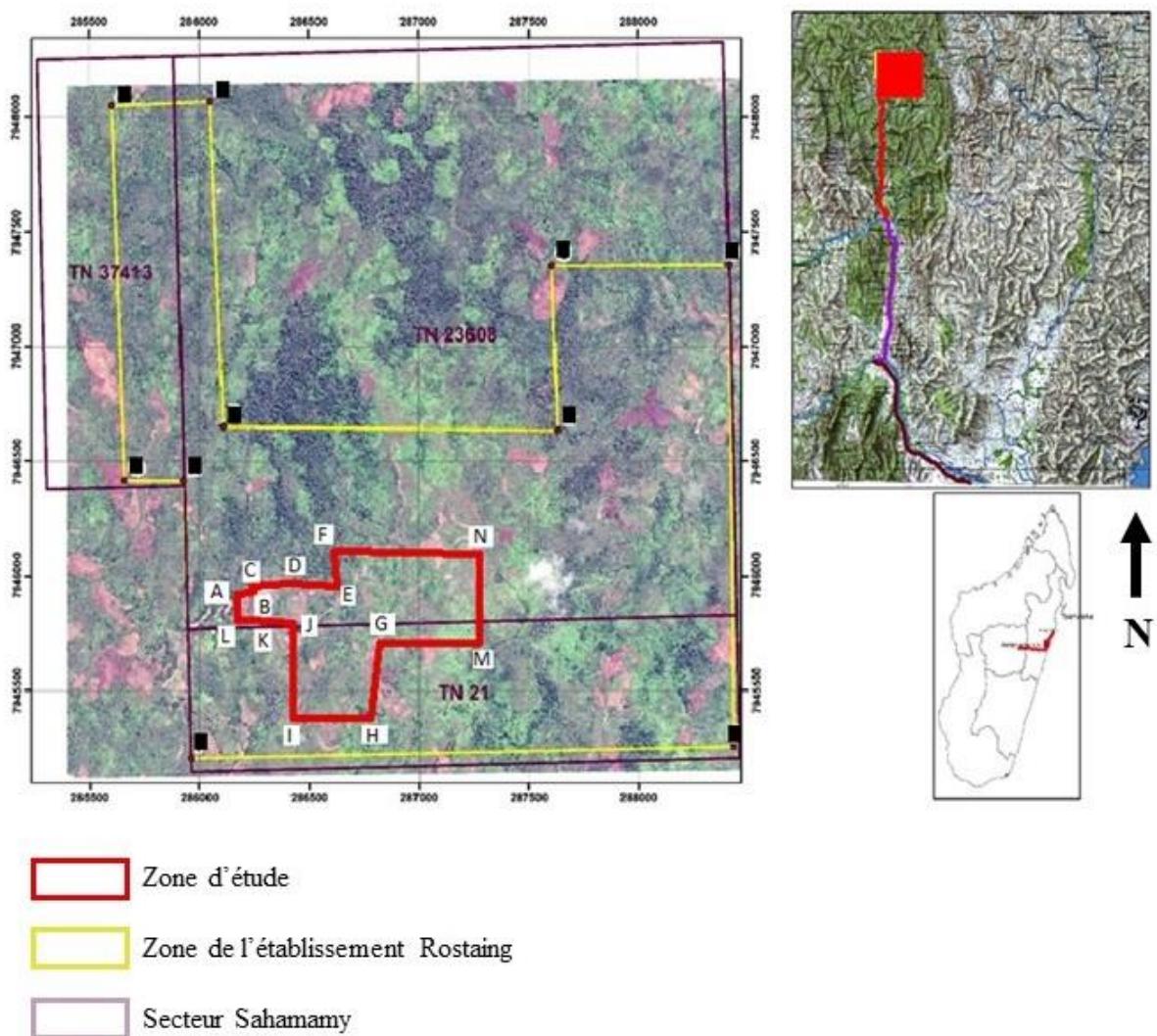
La prospection représente l'ensemble des opérations d'investigations superficielles des substances utiles dans le but de découvrir des formations ayant un intérêt économique (gisements). Elle correspond à une étude et une sélection des indices et aussi à une étape qui précède l'étude de faisabilité et de rentabilité avant de faire toutes activités d'exploitation.

Pendant la reconnaissance géophysique de la zone Sahamamy (district de Brickaville), la prospection par polarisation spontanée (PS) a été combinée avec la tomographie de résistivité électrique (TRE) ainsi que la polarisation provoquée (TPP) et surtout le sondage pour la recherche de la minéralisation de graphite dont la durée était de 31 jours.

La zone à prospector se trouve dans l'établissement Rostaing TN23608 et TN21. Elle est située au Nord du village de Sahamamy. La prospection est portée sur une aire de 0.48 km². Cette zone est délimitée par le polygone (Carte 8). Les coordonnées des points formant le polygone de la zone d'étude sont indiquées par le tableau ci-contre.

Tableau 4 : Coordonnées des points du polygone formant la zone d'étude

Point	X(m)	Y(m)
A	286170	7945930
B	286242	7945940
C	286242	7945960
D	286414	7945970
E	286624	7945960
F	286612	7946120
G	286818	7945710
H	286779	7945380
I	286422	7945380
J	286424	7945800
K	286235	7945810
L	286167	7945810
M	287267	7945710
N	287272	7946100



Carte 8 : Localisation de la zone à prospection

V.1. Méthodologie [11] [20] [25]

V.1.1. Prospection par polarisation spontanée [11] [25]

La prospection par polarisation spontanée est une méthode de reconnaissance du sous-sol basée sur la mesure des champs électriques (différence de potentiel) naturels générés dans le sol. La polarisation spontanée est engendrée par deux phénomènes : soit par phénomène électrocinétique associé au mouvement de la nappe phréatique à travers un sol perméable ; soit par phénomène électrochimique ou par réaction d'oxydo-réduction due à l'altération des sulfures métalliques du type pyrite, chalcopyrite, galène, graphite, etc.

Cette technique consiste à rechercher et à collecter des indices de minéralisation d'une zone par la mesure de la différence de potentiel à la surface du sol. La prise de mesure se fait à

l'aide des équipements simples tels qu'un voltmètre, des câbles de connexions et des électrodes non polarisables (12). De plus, la recherche d'indices ou d'anomalies a pour but de délimiter la zone de minéralisation où la teneur du graphite en paillette est élevée, conduisant à la sélection des zones qui seront étudiées plus en détail dans une phase ultérieure ou à la décision d'abandon de toute recherche dans la région prospectée.

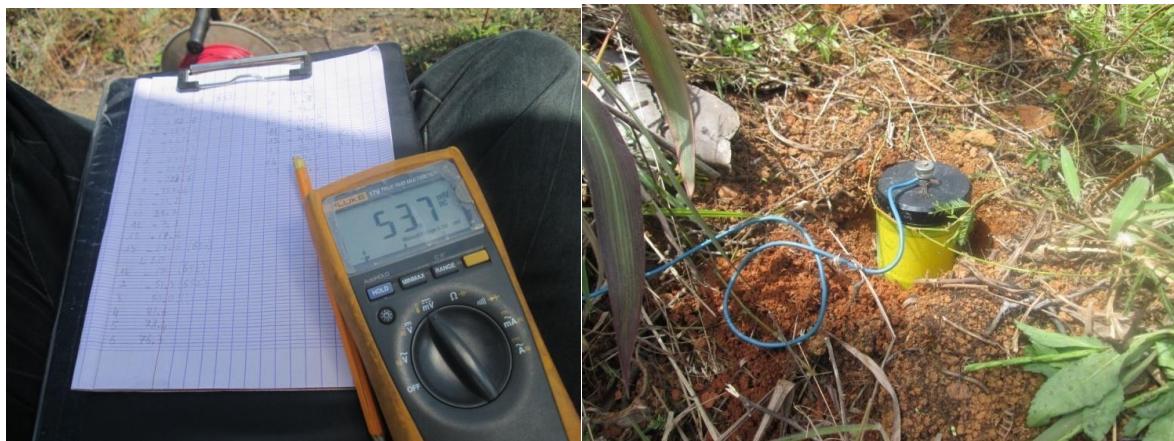


Photo 2 : Multimètre et électrode non polarisable

Quelques auteurs montrent que les gradients potentiels d'oxydo-réduction entraînent des anomalies négatives indiquant la présence de la minéralisation de la zone. D'après Sato et Mooney, en 1960, deux réactions chimiques de signes opposés se font de part et d'autre de la nappe phréatique. Au-dessus, la tête du gisement agit comme une cathode, il y a une réaction de réduction (gain d'électrons). Au-dessous, la base du gisement agit comme une anode où il y a réaction d'oxydation (perte d'électrons). La zone minéralisée ne sert qu'à transporter les électrons de l'anode vers la cathode.

Deux façons sont à savoir afin de prendre les mesures avec la méthode de prospection par polarisation spontanée telles que : la configuration du gradient et la configuration à base fixe. Mais dans notre étude, la configuration à base fixe a été employé. Le principe consiste à enfoncer dans le sol les paires d'électrodes et à ne déplacer qu'une seule électrode tout en gardant l'autre fixe : électrode de référence (électrode branchée à la borne N du voltmètre). Tandis que l'électrode mobile (électrode branchée à la borne M du voltmètre) est déplacée de manière à couvrir la surface d'investigation. La différence des tensions entre les bornes M et N ($V_M - V_N$) donne la différence de potentiel recherchée. Un retour à la station de départ est requis afin de corriger les effets de dérive dus aux changements thermiques.

Cette configuration a comme avantages la lecture directe des mesures et la non accumulation des erreurs zéro mais elle nécessite la manipulation des fils pouvant être très long.

V.1.2. Tomographie de résistivité électrique (TRE) et polarisation provoquée (TPP)

V.1.2.1. Tomographie de résistivité électrique (TRE) [25]

C'est une méthode d'exploration qui se repose sur la mesure de la résistivité électrique, notée « ρ », caractérisant la capacité du courant électrique à circuler dans le milieu naturel. Sa connaissance permet d'appréhender la structure et la lithologie du sous-sol.

Elle consiste à une injection de courant continu ou de courant alternatif à faible fréquence dans le sol à l'aide de deux électrodes métalliques (C1 et C2). La distribution de potentiel résultante est évaluée par la moyenne de deux électrodes de mesures (P1 et P2). La différence de potentiel est ensuite mesurée et sa résultante constitue la résistivité apparente à travers la section. Cette résistivité électrique peut s'exprimer par la formule suivante :

$$R = \frac{\Delta V}{I} \rho = 2\pi n a R$$

Avec : R : résistance [Ω]

ΔV : différence de potentiel entre P1 et P2 [V]

I : intensité de courant injecté en C1 et récupéré en C2 [mA]

ρ : résistivité électrique [$\Omega \cdot m$]

n : niveau d'acquisition de données

a : distance entre deux électrodes successives [m]

La tomographie de résistivité électrique est une méthode non destructive qui sert à réaliser une investigation horizontale et verticale simultanément, c'est-à-dire elle permet de faire une investigation à deux dimensions (2D) du sous-sol de la zone d'étude en employant de nombreuses longueurs de ligne. Elle est basée sur l'emploi de plusieurs électrodes de façon à être alignées (le plus possible). Chaque électrode peut être tour à tour une électrode d'émission de courant et de réception. Les résistivités apparentes mesurées sont représentées sous forme de pseudo-sections qui reflètent qualitativement la variation spatiale de la résistivité apparente.

Pour la prise de mesure, les équipements utilisés sont :

- ✚ Un résistivimètre Syscal R1 et ses accessoires : pour la mesure de la résistivité apparente du milieu ;
- ✚ 32 électrodes en aciers oxydable ;
- ✚ GPS (Global Position System) : pour la localisation de zone d'emplacement des électrodes

La disposition des électrodes choisie est celle de Wenner dont la distance entre ces électrodes est de 5m.



Photo 3 : Résistivimètre Syscal R1 et ses accessoires

V.1.2.2. Tomographie de polarisation provoquée

Dans la pratique, le potentiel mesuré en surface ne tombe pas instantanément à zéro quand le courant est coupé. Cette chute de tension engendre le phénomène de la polarisation induite. En fait, il existe un délai entre le temps où la tension atteint son maximum et aussi pour qu'elle tombe à zéro. Ce délai peut être soit d'origine instrumental, soit par l'effet du sol ; mais ce dernier est souvent significatif.

La mesure de cette chute de tension constitue un paramètre nécessaire pour l'investigation du sous-sol ; d'où la technique de polarisation provoquée.

Au moment de la coupure de courant dans le sol, la différence de potentiel mesurée commence à chuter de zéro. Cette chute est liée à la présence de minéraux d'argile dans la zone (polarisation de membrane, connu comme effet de Maxwell Wegner) ou à la présence des substances conductrices dans les roches (polarisation d'électrodes) si le flux de courant est

d'une part électrolytique (par l'eau souterraine) et d'autre part électronique (par le minéral conductif). Cet effet a un intérêt particulier dans l'étude des minéraux métalliques tels que les minéraux disséminés comme le graphite. En effet, le minerai de graphite est toujours détecté avec la technique de la polarisation induite même la concentration de ce minerai est faible.

La mesure de la polarisation induite peut s'effectuer dans un domaine de fréquence ou de temps. En ce dernier, on mesure la chute de tension entre les deux électrodes éventuelles après la coupure de courant. Elle est caractérisée par la chargeabilité apparente (M) dont l'expression est :

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt$$

Où M : chargeabilité apparente [mV/V]

V_p : tension primaire [V]

$V(t)$: potentiel au temps t et qui est intégré dans l'intervalle de temps $[t_1, t_2]$, [V]

Le phénomène de polarisation induite apparaît dans le milieu hétérogène où les particules conductrices sont encastrées dans un revêtement très résistant. Il est très répandu et est particulièrement importante dans des matériaux contenant des minéralisations disséminées telles que le sulfure semi-conducteur ou les particules de graphite.

Pour la prise de mesure et l'acquisition de données, les équipements employés dans la tomographie de résistivité électrique ainsi que la configuration d'électrode sont aussi utilisés dans la polarisation provoquée afin d'obtenir la résistivité apparente et la polarisation induite simultanément.

V.1.3. Sondage

Le sondage correspond à l'ensemble des travaux comprenant le creusement d'un trou dans le sol et encore d'autres opérations d'investigation, en vue de reconnaître la nature et la composition des différentes roches qui les constituent (substances minérales utiles).

Le sondage requiert au minimum 6 hommes dont l'un est le chef de poste pour effectuer un sondage ; ce nombre varie en fonction de la formation in situ. On préleve des échantillons sur chaque sondage.

Le sondage s'avère une méthode avantageuse en prospection du fait qu'il fournit des renseignements plus précis sur l'objectif visé. La raison est qu'il touche directement le sol, tandis que les autres méthodes procèdent par déduction. Il est donc destiné à la vérification des hypothèses émises lors des phases antérieures.

Sondage à maille carrée

C'est une tactique de prospection de dizaines de mètres de côté suivant une ligne de base. C'est donc un plan de prospection simple et efficace selon l'état du site. Donc ce plan de prospection est recommandé pour la recherche d'un filon de gisement.

Pour une extension à taille moyenne, comme dans notre cas, en effet on a choisi ici un espacement de 10 m pour la distance entre deux points de sondages de même que celle de deux lignes de sondages.

Exécution des travaux de sondages

Après avoir terminé le choix de la ligne de base et le côté à entreprendre pour la carrière, l'exécution du sondage s'entreprend.

Méthodes :

Il consiste à sonder le terrain verticalement pour avoir des cuttings (échantillons) pour le test au laboratoire ; une profondeur de 12 m est suffisante, pour ce faire il faut :

- ➔ Prendre pour chaque terrain minéralisé un échantillon ;
- ➔ Prendre les coordonnées géographiques de chaque trou de sondage ;
- ➔ Faire le piquetage pour indiquer les lignes de trou ;

Matériels utilisés :

➔ Tourne à gauche ou « T »

Il sert à tourner la tarière manuellement. On l'appelle « tourne à gauche » car le sens de sa rotation est toujours vers la gauche et on le dénomme « T » car l'outil a cette forme. La T porte aussi la colonne de tige et la tarière.

♦ **Colonne de tige**

Elle est constituée d'une tige filetée de 1 à 2 m de long. Elles sont assemblées les unes aux autres pour atteindre la profondeur voulue.

♦ **Tarière**

Par forage destructif, elle prélève les échantillons en terrain meuble. Cet outil mesure 40 cm de long et comporte une cavité et un bout fileté qui s'enfonce au fur et à mesure que la T tourne.

♦ **Clé de fourche et clé de retenue**

Ces deux types de clés servent à dévisser. En effet, la première sert à dévisser pour enlever ou à rajouter une tige tandis que la clé de retenue sert à bloquer la tige pour enlever la T.

♦ **Angady**

On l'utilise pour faire une plateforme à l'endroit où va s'effectuer le sondage.

♦ **Brise roche**

Brise roche, appelée également casse pierre, s'utilise à la place de la tarière quand la formation devient rocheuse.

- ♦ **GPS** : pour les coordonnées de chaque trou
- ♦ **Sachets d'échantillonnage** : pour le collecte des échantillons

Résultats du sondage à un point :

Voici un exemple de résultat de sondage fait à un point :

- ♦ Formation stérile : non minéralisée
- ♦ Minerai du graphite : minéralisé dont la profondeur est de sept (7) mètres.
- ♦ Sable ou roche dure : non minéralisée

Lorsque le train de sonde rencontre des roches ou des formations dures, on arrête le sondage et on estime la formation rencontrée comme stérile.

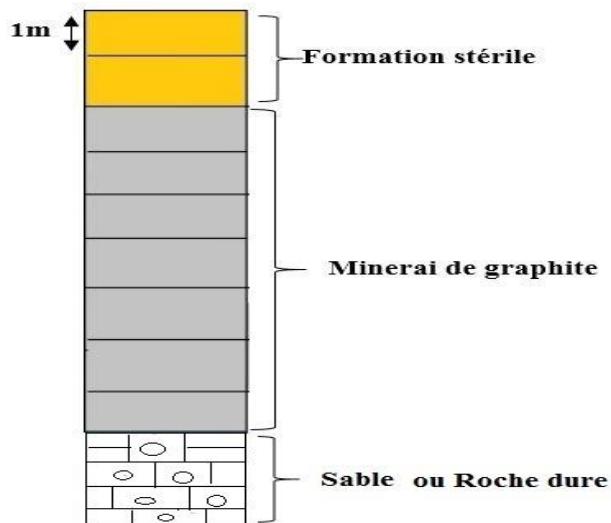


Figure 8 : Résultat du sondage en un point

❖ **Tenue du carnet de terrain**

Le carnet de terrain sert à enregistrer toutes les données obtenues lors des travaux de sondages. Un carnet de terrain doit contenir la date du prélèvement, le numéro du sondage, les coordonnées X, Y et Z prises par le GPS, le numéro d'enregistrement, les caractéristiques de la zone de prélèvement, le nom du lieu de prélèvement, le résultat du sondage et l'observation. Le nombre total des points de sondage exécutés est 63. Le tableau montre un exemple de carnet de sondage fait à Sahamamy.

Tableau 5 : Carnet de terrain

Date	N°	X	Y	Z	Lieu	Résultat	Observation
31/07/18	C-01	286323	7945940	302.5	Colline	1 m 2 m	STERILE Latérite
						3 m 4 m 5 m 6 m 7 m 8 m 9 m	GRAPHITE Graphite de couleur noire, gris, brun
						10 m 11 m 12 m	STERILE Roches dures

Emballage et étiquetage des échantillons

Après l'obtention des minérais lors d'un sondage d'un point, une prise d'échantillon pour chaque mètre minéralisé est effectuée afin de réaliser des analyses au laboratoire.

Les échantillons sont placés dans des sacs en plastique. Le numéro de l'échantillon, les coordonnées du G.P.S, ainsi que le nom de la localité sont inscrits directement à l'aide d'un marqueur sur les sacs et également sur une étiquette en papier glissée dans le sac.

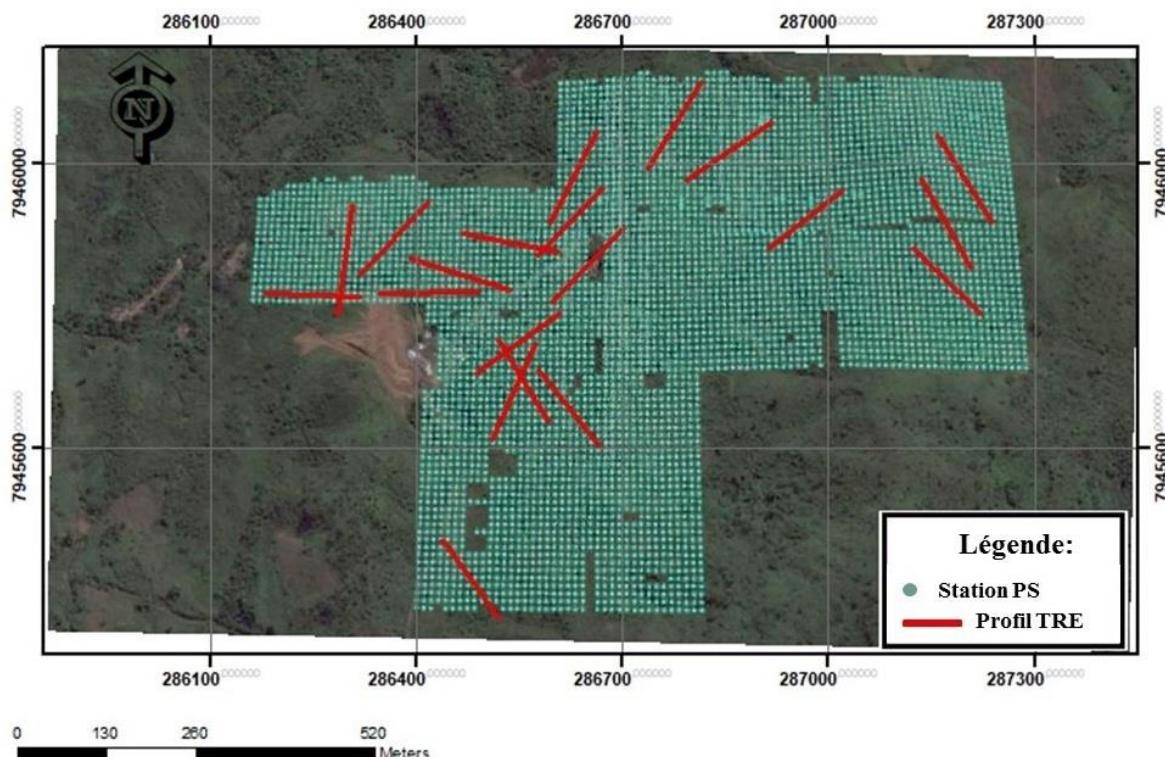
Préparation des échantillons

- ♦ A chaque mètre minéralisé, les échantillons obtenus sont mis sur un plateau ;
- ♦ Quartage : afin réduire le poids de l'échantillon, le quartage est le mode le plus efficace pour le partage des échantillons en vue d'avoir un échantillon représentatif ;
- ♦ Emballage : mise en sachet des échantillons ;
- ♦ Étiquetage : pour l'identification de l'échantillon (numéro, coordonnées, localité)

Après le sondage de la zone d'étude, on a obtenu les données concernant le graphite (teneur moyenne, accumulation, puissance, teneur en carbone) qu'on va traiter avec un logiciel approprié un peu plus tard.

V.2. Interprétation des résultats

Pour la reconnaissance géophysique de la zone d'étude, la prospection par polarisation spontanée, la tomographie de résistivité électrique (TRE) ainsi que la polarisation provoquée sont complémentaires. En effet, cent vingt profils de polarisation spontanée sont formés à partir de quatre mille cinq cent huit stations, et vingt profils de TRE sont installées afin de couvrir la zone d'étude. La distance entre deux stations successives est de dix mètres. A noter que ce pas peut être serré quand la mesure montre une large variation.



(Source : Google Earth, modifié)

Carte 9 : Localisation des stations géophysiques

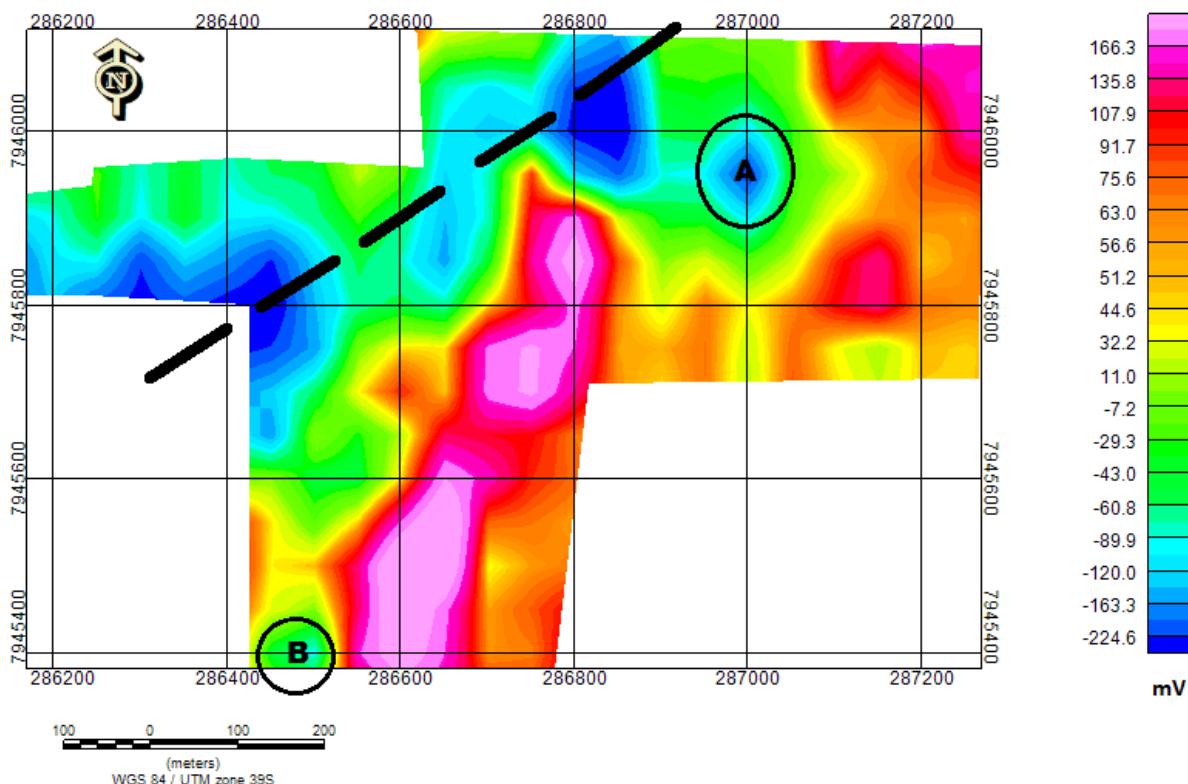
On a utilisé des logiciels tels que : le logiciel Oasis Montaj (Geosoft) pour la cartographie de la polarisation spontanée et le logiciel Geotomo, Res2DInv dans le cas le traitement des données de TRE et TPP.

V.2.1. Interprétation de la carte de polarisation spontanée [20]

Sur la carte de potentiel naturel, montrée par la figure ci-dessous, on remarque que la valeur de la polarisation spontanée obtenue dans la zone d'étude varie de -230mV à 130mV. On a rencontré deux grandes anomalies négative et positive. Mais en suivant le principe fondamental de la méthode par polarisation spontanée, on prend seulement en considération l'anomalie négative car elle indique la zone minéralisée. L'anomalie négative domine la partie nord-est de la zone d'étude et s'étend du sud-ouest à nord-est suivant la direction du graphite en filon qui est montrée par la carte géologique de la région. La carte montre que l'anomalie négative n'est pas continue. Cette discontinuité peut être interprétée comme la disparition de

part et d'autre du graphite filonien autour de la zone où la zone minéralisée est très profonde dans cette région.

La carte met en valeur aussi deux petites anomalies négatives notées A et B. L'anomalie positive couvre les autres zones, sud, nord, est, exceptée la brèche de corridor où le graphite en filon a traversé.



Carte 10 : Carte de polarisation spontanée

V.2.2. Interprétation de la section électrique (TRE et TPP)

La zone minéralisée est caractérisée par une valeur de résistivité faible et une valeur de chargeabilité élevée. On va considérer alors la zone ayant ce critère comme une zone intéressée.

Pour l'interprétation, on va prendre comme exemple le profil montrant l'affleurement de graphite.

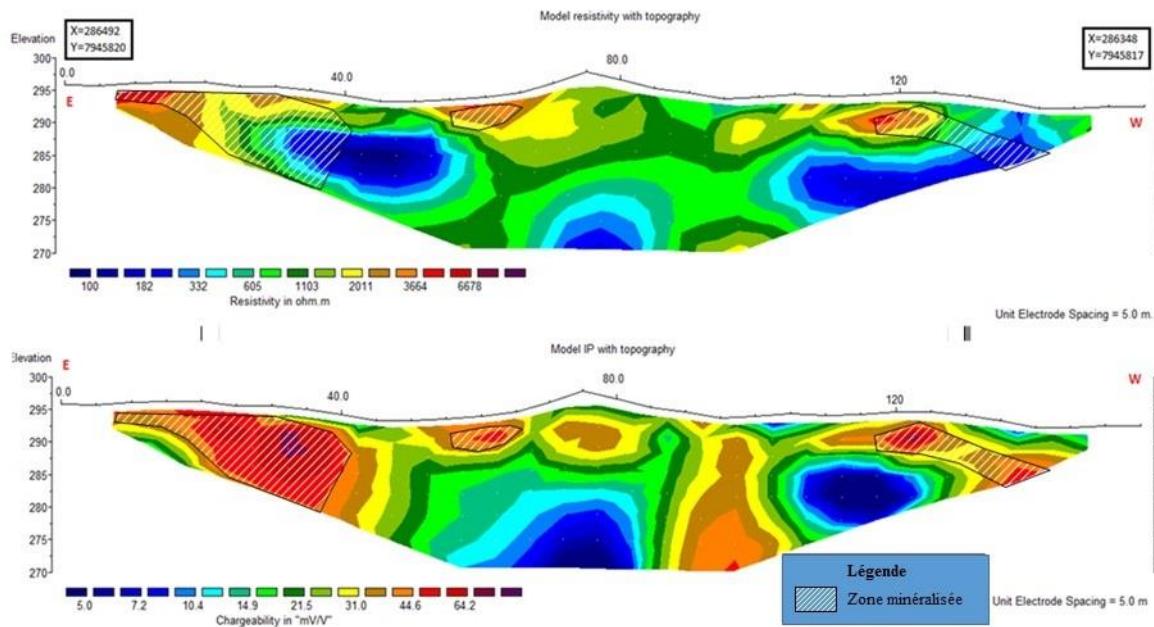
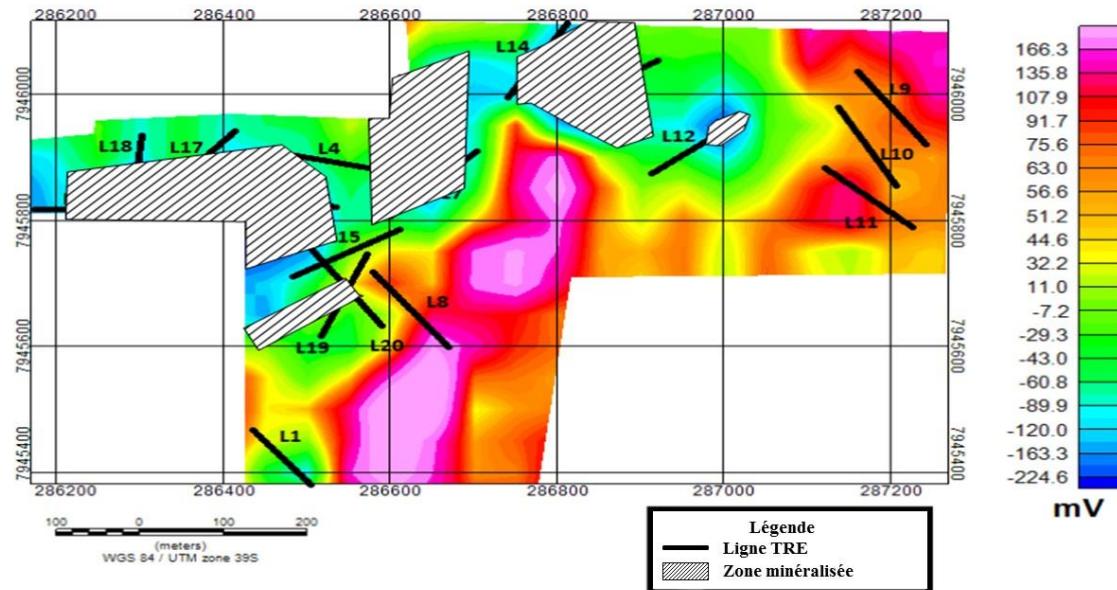


Figure 9 : Section géo-électrique du profil L2

La section géo-électrique, compris la résistivité électrique et le modèle de la section de la polarisation provoquée, montre trois zones (zone hachurée sur la section de la polarisation provoquée) où la valeur de chargeabilité est plus de 45 mV/V. En effet, en comparant la section de la polarisation spontanée avec celle de la résistivité électrique, la forte chargeabilité ainsi que la faible résistivité ne se superposent exactement pas dues à la résistivité propre. Cela est plus sensible dans la roche aquifère ; par conséquent la section montre des zones conductrices en dessous de la zone saturée.

L’interprétation de la section géo-électrique sera bien faite en considérant successivement le modèle de la polarisation induite et celui de la résistivité électrique.

Après le traitement de vingt profils géo-électriques, la carte ci-contre a montré deux veines discontinues. La vérification avec les profils géo-électriques n’est pas probable sur les anomalies de la polarisation spontanée notée B. Donc la source de ces anomalies ne provient pas probablement de la minéralisation de graphite.



CONCLUSION PARTIELLE

La zone d'étude présentée dans cet ouvrage se limite à la partie Est de la grande île, plus précisément à la région de Brickaville, puisque nous portons un intérêt particulier au gisement de graphite qui s'y trouve. Cette région se caractérise par un climat tropical humide et une ressource importante en eau et le socle cristallin de cette partie de Madagascar se trouve dans le système graphite du groupe de Manampotsy. La prospection par polarisation spontanée, la tomographie de résistivité électrique et de polarisation provoquée ont été les moyens employés dans la phase d'investigation de cette minéralisation de graphite.

PARTIE III : METHODOLOGIE ET APPLICATION

CHAPITRE VI : GEOSTATISTIQUE

La géostatistique consiste en une étude statistique des phénomènes naturels corrélés dans l'espace ou dans le temps manipulant des variables régionalisées (V.R). Dans les années soixante, Georges Matheron eut créé le terme géostatistique afin de résoudre des problèmes d'estimation minière en utilisant de la méthode statistique. En fait, c'est la science servant à déterminer la précision sur l'évaluation d'un gisement. Au cours d'une prospection, une reconnaissance systématique est employée afin d'estimer le tonnage T du minerai contenu dans le gisement, les tonnages du métal Q et les teneurs Z liées par la relation :

$$Q = T \times Z \quad [16]$$

VI.1. Objectifs de la géostatistique [16]

La géostatistique a pour but d'étudier tout phénomène qui peut être quantifié et qui se développe de façon structurée dans l'espace (et/ou le temps). Elle est principalement basée sur la théorie des Probabilités et des Processus Stochastiques.

Les objectifs de la géostatistique sont les suivants :

- Analyse structurale et interprétation du phénomène considéré ;
- Cartographie ;
- Evaluation et prédition ;
- Simulation utilisant des modèles numériques

VI.2. Application de la géostatistique [16]

La géostatistique est appliquée à la recherche minière en employant des nombreuses informations concernant le gisement. Ces informations sont primordiales et doivent être de quantité et de qualité suffisantes. Parmi elles, les informations sur les structures géologiques, sur les valeurs des teneurs obtenues lors des campagnes de sondage.

Voici quelques situations nécessitant l'utilisation de l'approche géostatistique :

- **Estimation globale d'un gisement**

Une fois que la campagne systématique est achevée, la détermination des réserves in situ constitue une étape très importante dans une étude de faisabilité. La géostatistique peut fournir, à partir des informations disponibles, de bonnes estimations du tonnage global in situ et de la

teneur moyenne. Elle permet aussi de juger si un projet mérite des investissements plus importants ou non.

- **Estimation des erreurs**

A cause d'une inévitable erreur associée à la méthode d'estimation, l'obtention d'une valeur exacte s'avère difficile ; il est donc important de connaître sa grandeur. La géostatistique permet d'obtenir non seulement la valeur estimée, mais aussi, avec la variance de krigeage, une mesure de la précision de l'estimation. C'est l'un des atouts majeurs de la géostatistique sur les méthodes traditionnelles d'estimation des réserves.

- **Estimation locale**

Dès que le gisement est jugé exploitable, la phase suivante est l'estimation bloc par bloc. Cette estimation locale offre non seulement des renseignements sur la distribution spatiale in situ des ressources, mais aussi le tonnage et la teneur moyenne des blocs à exploiter. Elle peut aussi donner des valeurs estimées à l'aide des variables de qualité comme la teneur en cendre, en sulfure, la capacité calorifique, etc. ...

- **Espacement des trous de sondage**

La géostatistique rend possible le calcul de la variance d'estimation pour plusieurs variétés de schéma de sondage. Ainsi, sans avoir exécuter de sondage, la variance d'estimation peut être calculée et qui dépend à la fois du modèle de variogramme et de localisation de trou de sondage. Alors, la géostatistique est utilisée généralement pour le cas de l'estimation des valeurs dans les mailles régulières et une économie sur le budget alloué au sondage ou à l'échantillonnage peut être réalisée.

- **Analyse structurale**

C'est une étude qui consiste à concevoir un modèle optionnel de variogramme caractéristique de la région dans le but de parvenir à estimer les caractéristiques du gisement. Cette modélisation demande une bonne connaissance physique du phénomène étudié.

Un variogramme représente l'espérance mathématique du carré de l'écart, les accroissements de la valeur de la variable étudiée lorsqu'on passe d'un point x à un autre point x' distant de h du premier.

Soit $2\gamma(h) = E[Z(x + h) - Z(x)]^2$

$Z(x)$ étant la variable étudiée (teneur), $\gamma(h)$ ainsi définie s'appelle le variogramme

VI.3. Comportements du variogramme [16] [24]

❖ Effet de pépite (C_0)

L'effet de pépite connu aussi sous le nom erreur de localisation est une variation à très courte échelle qui est obtenue par l'intersection de l'axe des $\gamma(h)$ avec la droite (D), passant par les deux premiers points du variogramme expérimental. Ainsi, le variogramme a un comportement linéaire.

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \gamma(\varepsilon) = C_0$$

❖ Palier (C)

Le palier est la valeur du variogramme correspondant à la variance de la variable aléatoire à partir d'une certaine distance du vecteur h . ($\sigma^2 = C_0 + C = \text{Var}(Z(x))$; $C_0 \neq \gamma(0)$). Elle constitue le début de la stabilité de la valeur du variogramme.

❖ Portée (a)

La portée est la distance où la moyenne de deux observations ne se ressemble plus et elles ne sont pas liées linéairement. C'est la valeur correspondante au palier sur l'axe des abscisses.

L'existence d'une portée a permis de limiter l'étude du gisement à un champ égale au panneau a. Elle renseigne aussi sur les caractéristiques géologiques de la formation.

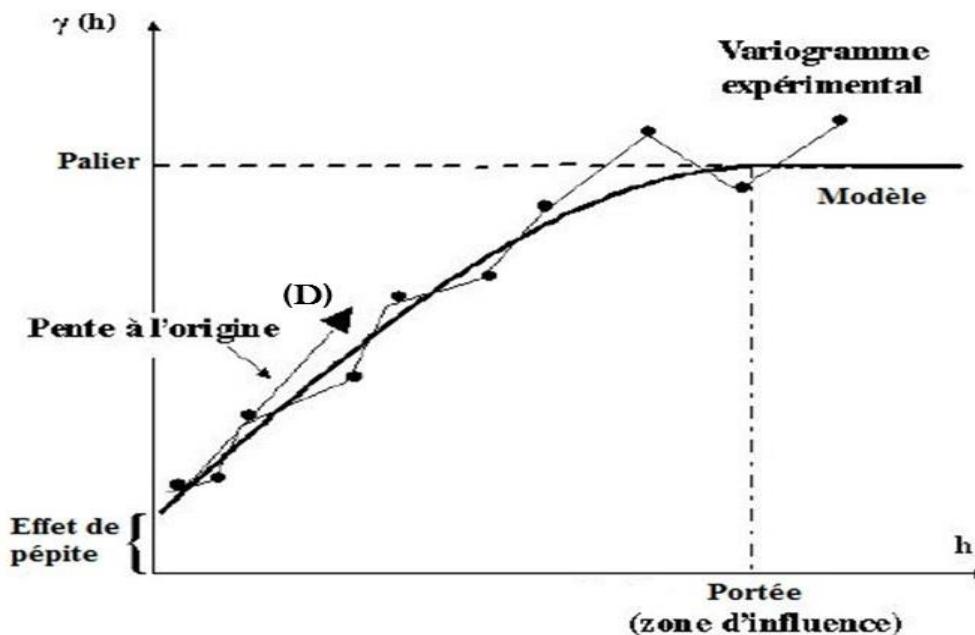


Figure 10 : Comportements du variogramme

La droite (D) passe par les deux premiers points du variogramme expérimentale et coupe le palier au point d'abscisse $\frac{2}{3}a$.

VI.3.1. Types de modèles courants

- **Modèle sphérique**

Ce modèle s'écrit :

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{si } 0 < h < a \\ C & \text{si } h \geq a \end{cases}$$

$$\frac{d}{dh}(\gamma(h)) = C \left[\frac{3}{2a} - \frac{3h^2}{2a^3} \right]_{h=0} \Rightarrow (D) \quad y = \frac{3C}{2a}h$$

Pour l'intersection de (D) avec y, on a $y=C$. D'où $h = \frac{2}{3}a$ correspondant à son abscisse.

Ce variogramme est linéaire à l'origine, de pente $3C/2a$. La portée pratique, distance à laquelle on atteint 95 % du palier est égale à $0.81a$.

- **Modèle cubique**

Ce modèle a pour équation :

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left(7 \frac{h^2}{a^2} - \frac{35}{4} \frac{h^3}{a^3} + \frac{7}{2} \frac{h^5}{a^5} - \frac{3}{4} \cdot \frac{h^5}{a^5} \right) & \text{si } h \leq a \\ C & \text{si } h \geq a \end{cases}$$

Dans le cas de ce variogramme, il présente un comportement parabolique à l'origine, et atteint sa portée à la distance a . La portée pratique, distance à laquelle on atteint 95 % du palier est égale à $0.69a$.

- **Modèle exponentiel**

$$\gamma(h) = C \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right)$$

Ce modèle a un comportement linéaire à l'origine, de pente C/a . Il atteint son palier asymptotiquement. La portée pratique, distance à laquelle on atteint 95 % du palier, est égale à $3a$.

- **Modèle gaussien**

$$\gamma(h) = C \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right)$$

Ce modèle a un comportement parabolique à l'origine. Il atteint son palier asymptotiquement. La portée pratique, distance à laquelle on atteint 95 % du palier, est égale à $1.73 a$.

- **Modèle puissance**

$$\gamma(h) = \omega h^\alpha \quad 0 < \alpha < 2$$

α est un paramètre de forme, compris entre 0 et 2. ω est un coefficient multiplicatif positif. Pour $\alpha = 1$, on obtient le modèle linéaire, pour lequel ω est la pente :

$$\gamma(h) = \omega h$$

- **Modèle sinus cardinal**

$$\gamma(h) = C \cdot \left(1 - \frac{\sin\left(\frac{h}{a}\right)}{\frac{h}{a}} \right)$$

Ce modèle passe par un maximum supérieur à son palier avant de tendre vers celui-ci. Sur la covariance, cela correspond à des valeurs négatives et à ce qu'on appelle un "effet de trou". Ce type de variogramme se présente quand il y a des phénomènes de compétition : la présence d'une forte valeur en un point donné implique de faibles valeurs au voisinage de ce point.

VI.3.2. La teneur moyenne [16]

La teneur moyenne (Tm) représente la moyenne pondérée des teneurs car les teneurs trouvées correspondent aux différentes épaisseurs de couches.

$$Tm = Z^*(V) = Z(V) = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n Z(V_i) \cdot V_i$$

Où Tm : teneur moyenne

Z^* : moyenne pondérée

Z : teneur

V : épaisseur de la couche totale

V_i : épaisseur de chaque couche

VI.4. Variance de dispersion [16]

VI.4.1. Définition

La variance de dispersion permet d'évaluer la variance théorique de la teneur des blocs dans un domaine d'extension finie correspondant au gisement ou à une partie de gisement. Elle compare entre elle des caractéristiques vraies mais inconnues d'un panneau V comme l'abattage journalier par rapport à un panneau ou panneau par rapport à un gisement.

En considérant un panneau V qui se subdivise en n blocs v_i de même forme et de même longueur (à 1D), surface (à 2D) ou volume (à 3D) v . La valeur moyenne dans v_i de la variable à laquelle on s'intéresse, par exemple une teneur en un élément radioactif, est notée $Z(v_i)$.

La teneur moyenne expérimentale correspond à la valeur moyenne de la teneur dans V notée $z(V)$. Son équation s'écrit alors comme suit

$$\bar{z} = z(V) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(v_i)$$

Avec : \bar{z} : teneur expérimentale

$z(V)$: teneur moyenne du panneau

$z(v_i)$: teneur des blocs v_i

La variance expérimentale notée s^2 est :

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z(v_i) - \bar{z})^2$$

En tenant compte les teneurs ponctuelles comme une réalisation d'une fonction aléatoire, les $z(v_i)$, $z(V)$ et s^2 sont des réalisations de variables aléatoires $Z(v_i)$, $Z(V)$ et S^2 , et en particulier

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(v_i) - Z(V)]^2$$

Par définition, la variance de dispersion de v dans V notée $\sigma^2(v|V)$ est l'espérance de cette variance expérimentale.

$$\sigma^2(v/V) = E[S^2] = \sigma_v^2 - \sigma_V^2$$

Elle caractérise alors la dispersion des teneurs des blocs v_i autour de la teneur du panneau V . Elle est d'autant plus grande que V est grand et que v est petit.

VI.4.2. Expression de la variance de dispersion

En prenant cette dernière expression $\sigma^2(v/V) = \sigma_v^2 - \sigma_V^2$, avec :

$$\sigma_v^2 = E\{[Z(v_i) - E(Z(v_i))]^2\}$$

$$\text{Où : } Z(v_i) = \frac{1}{v} \int Z(x) dx$$

$$E(Z(v_i)) = m$$

On a alors :

$$\sigma_v^2 = E \left\{ \left[\frac{1}{v} \int Z(x) dx - m \right]^2 \right\}$$

Le développement de cette écriture donne une nouvelle expression de σ_v^2 telle que :

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{v} \iint cov(Z(x_1), Z(x_2)) dx_1 dx_2 = \bar{C}(v, v)$$

En passant au variogramme, on obtient :

$$\sigma_v^2 = \sigma^2 - \bar{\gamma}(v, v)$$

Pareil pour la variance σ_V^2 , elle peut s'écrire :

$$\sigma_V^2 = \bar{C}(V, V) = \sigma^2 - \bar{\gamma}(V, V)$$

L'expression de la variance de dispersion sera :

$$\sigma^2(v/V) = \bar{C}(v, v) - \bar{C}(V, V)$$

$$\sigma^2(v/V) = \bar{\gamma}(V, V) - \bar{\gamma}(v, v)$$

Avec : $Z(v_i)$: teneur moyenne dans le bloc v

$\bar{C}(v, v)$: covariance moyenne entre toutes les paires de points que l'on peut former à l'intérieur du bloc v (respectivement du panneau V)

$\bar{\gamma}(V, V)$: la valeur moyenne du variogramme entre deux points qui décrivent indépendamment l'un de l'autre le panneau V (respectivement le bloc v) dont :

$$\bar{\gamma}(V, V) = \frac{1}{V^2} \iint \gamma(x_2 - x_1) dx_1 dx_2 \text{ et } \bar{\gamma}(v, v) = \frac{1}{v^2} \iint \gamma(x_2 - x_1) dx_1 dx_2$$

La variance de dispersion est définie même si le variogramme ne montre pas de palier.

Formule d'additivité

Si W est un domaine constitué de plusieurs panneaux de taille V, les relations précédentes se généralisent et permettent de définir la formule d'additivité suivante :

$$\sigma^2(v/W) = \sigma^2(v/V) + \sigma^2(V/W) \text{ avec } v < V < W$$

Où : $\sigma^2(v/W)$ représente la variance du bloc v se rapportant au domaine W

$\sigma^2(v/V)$ représente la variance du bloc v se rapportant au panneau V

$\sigma^2(V/W)$ représente la variance du panneau V se rapportant au domaine W

Cette formule appelée aussi relation de Krige est obtenue à l'issu de l'expérience de D.G.Krige lors de son étude des gisements d'or d'Afrique du Sud avant d'être confirmée théoriquement par la théorie des variables régionalisées de G. Matheron.

VI.4.3. Variance des teneurs ponctuelles

Les teneurs ponctuelles représentent un support de volume nul noté « 0 ». Puisque $\bar{\gamma}(0,0) = \gamma(0) = 0$, la variance de dispersion des teneurs ponctuelles dans V s'écrit tout simplement :

$$\sigma^2(0/V) = \gamma(V, V)$$

La variance expérimentale des données situées dans V est une approximation de cette variance de dispersion (si du moins les données sont suffisamment nombreuses et bien réparties).

Elle s'applique dans la vérification de l'ajustement du variogramme. Le principe consiste à calculer pour le modèle de variogramme proposé la valeur de $\bar{\gamma}(V, V)$ et de la comparer à la variance expérimentale s^2 . En cas de grande différence il faudra changer de modèle.

VI.5. Variance d'estimation [16]

VI.5.1. Définition

Soit un volume V constitué de n points de mesure de x_i . Les mesures de $z(x_i)$ sont connues tandis que celle de la valeur moyenne de $z(x)$ dans V est à calculer.

$$z(V) = \frac{1}{V} \int z(x) dx$$

La valeur de $Z(V)$ est aussi inconnue, alors elle peut être substituée par son estimateur

$$z^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_i)$$

L'estimation de $z(V)$ par z^* engendre une erreur, appelée erreur d'estimation, qui est la différence $z^* - z(V)$. Cette erreur peut être caractérisée en considérant z comme une réalisation d'une fonction aléatoire stationnaire ou intrinsèque Z de variogramme $\gamma(h)$.

Il est aisément de voir que l'espérance de l'erreur de l'estimation est nulle :

$$E[Z^* - Z(V)] = 0$$

L'estimateur Z^* est donc sans biais : il ne provoque pas ni sous-estimation ni surestimation systématique. La variance d'estimation correspond à l'ordre de grandeur de l'erreur ou plus exactement de son carré :

$$\sigma_E^2(n, V) = E[Z^* - Z(V)]^2$$

Où n représente en fait les points expérimentaux (leur nombre, mais aussi leurs positions par rapport au volume V).

La connaissance de la valeur de cette variance après calcul, moyennant une hypothèse sur la loi de l'erreur, conduit à la déduction d'un intervalle de confiance. Si par exemple l'erreur peut être considérée comme gaussienne, l'intervalle de confiance à 95% sera

$$Z^* - 2\sigma_E(n, V) < Z(V) < Z^* + 2\sigma_E(n, V)$$

VI.5.2. Calcul de la variance d'estimation

Comme la variance de dispersion, la variance d'estimation peut s'exprimer aussi à l'aide du variogramme :

$$\sigma_E^2(n, V) = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \bar{\gamma}(x_i, V) - \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{\gamma}(x_i, x_j) - \bar{\gamma}(V, V)$$

Dans cette expression, $\bar{\gamma}(x_i, x_j)$ est simplement $\gamma(x_i - x_j)$, et $\bar{\gamma}(x_i, V)$ est la valeur moyenne du variogramme entre le point x_i et un point x qui décrit V :

$$\bar{\gamma}(x_i, V) = \frac{1}{V} \int \gamma(x - x_i) dx$$

VI.6. Krigeage [1] [16] [21] [22] [24]

VI.6.1. Définition

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qui consiste à trouver la meilleure estimation possible de la teneur d'un panneau ou d'un bloc, en tenant compte les informations disponibles à proximité, c'est-à-dire les teneurs des échantillons qui ont été prélevés soit à l'intérieur, soit à l'extérieur du panneau à estimer.

VI.6.2. Principe du krigeage

Le krigeage consiste à réaliser une pondération en donnant un poids à la teneur de chaque échantillon. Ces poids correspondent aux caractéristiques géométriques du gisement comme les dimensions et l'implantation relative du panneau et des échantillons. Ils sont ensuite calculés de manière à rendre minimale la variance d'estimation résultante.

En général, le krigeage des échantillons éloignés correspond à des poids faibles et inversement. Afin de pouvoir résoudre au problème de krigeage, certaines hypothèses sur les caractéristiques géostatistiques du gisement étudié sont importantes.

D'une part, l'hypothèse d'homogénéité c'est-à-dire en supposant que le gisement est géostatistiquement homogène. En fait les teneurs à l'intérieur de ce gisement, considérées comme une variable régionalisée $Z(x)$, peuvent être interprétées comme une réalisation d'un schéma intrinsèque. Cette hypothèse est primordiale car aucun krigage rigoureux n'est possible entre des portions hétérogènes d'un même gisement.

D'autre part, l'hypothèse concernant l'isotropie qui n'est pas très fondamentale. Elle est considérée ainsi car certains types d'anisotropie, comme l'anisotropie zonale et l'anisotropie géométrique, qui sont fréquent dans la pratique, peuvent être ramenées à un modèle isotrope.

VI.6.3. Krigage simple en covariance

Supposons que l'on veuille estimer un bloc ω centré en un point x_0 .

Puisque l'espérance mathématique ne dépend pas du point x et en supposant à priori que la fonction aléatoire est stationnaire d'ordre 2, on peut écrire :

$$\begin{aligned} E(\vec{x}) &= m(\vec{x}) = m \\ \sigma^2(\vec{x}) &= \sigma^2 \\ C(\vec{x}_i, \vec{x}_j) &= C(\vec{x}, \vec{x} + \vec{h}) = C(\vec{h}) \end{aligned}$$

L'expression de la vraie valeur en teneur de ce bloc $R(\vec{x}, \omega)$ est définie par la fonction linéaire suivante :

$$R^*(\vec{x}_0, \omega) = \sum_{i=1}^n \lambda_i R(\vec{x}_i, \omega)$$

En fixant à priori que a_0 est nul, la condition de non-biais :

$$a_0 = m(\vec{x}_0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i m(\vec{x}_i)$$

devient aisément (puisque $m(\vec{x}) = m$ et $a_0 = 0$) en $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

La minimisation de la variance d'estimation sous cette contrainte aboutit à ce que l'on appelle communément "système de krigage" qui peut s'écrire en fonction du variogramme ou en fonction du covariogramme. Ceci tient au fait que $C(\vec{h}) = \sigma^2 - \gamma(\vec{h})$ et que $\sum \lambda_i = 1$.

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(\vec{x}_i, \vec{x}_j) - \mu = \bar{\gamma}(\vec{v}, \vec{x}_i) \text{ avec } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j C(\vec{x}_j, \vec{x}_i) - \mu = C(\vec{x}_0, \vec{x}_i) \text{ avec } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Ce système de krigeage peut s'exprimer aussi sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline C_0 \lambda_0 & = & c_0 \\ \hline \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline C(\vec{x}_1, \vec{x}_1) & C(\vec{x}_1, \vec{x}_2) & \dots & C(\vec{x}_1, \vec{x}_j) & \dots & C(\vec{x}_1, \vec{x}_n) & 1 & \left| \begin{array}{c} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_i \\ \dots \\ \lambda_n \\ \mu \end{array} \right| & \begin{array}{c} C(\vec{x}_1, \vec{x}_0) \\ C(\vec{x}_2, \vec{x}_0) \\ \dots \\ C(\vec{x}_i, \vec{x}_0) \\ \dots \\ C(\vec{x}_n, \vec{x}_0) \\ 1 \end{array} \\ \hline C(\vec{x}_2, \vec{x}_1) & C(\vec{x}_2, \vec{x}_2) & \dots & C(\vec{x}_2, \vec{x}_j) & \dots & C(\vec{x}_2, \vec{x}_n) & 1 & \lambda_1 & C(\vec{x}_2, \vec{x}_0) \\ \dots & \dots \\ C(\vec{x}_i, \vec{x}_1) & C(\vec{x}_i, \vec{x}_2) & \dots & C(\vec{x}_i, \vec{x}_j) & \dots & C(\vec{x}_i, \vec{x}_n) & 1 & \lambda_i & C(\vec{x}_i, \vec{x}_0) \\ \dots & \dots \\ C(\vec{x}_n, \vec{x}_1) & C(\vec{x}_n, \vec{x}_2) & \dots & C(\vec{x}_n, \vec{x}_j) & \dots & C(\vec{x}_n, \vec{x}_n) & 1 & \lambda_n & C(\vec{x}_n, \vec{x}_0) \\ 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 & \mu & 1 \end{array} \end{array} \end{array}$$

Il est nécessaire alors de faire appel à une seconde hypothèse, connue sur le nom : hypothèse d'ergodicité. Cette hypothèse évoque que valeurs de m , σ^2 , $C(\vec{h})$ qui sont normalement définies à partir de plusieurs événements ω_k (estimations climatologiques), peuvent se définir à partir d'une seule distribution spatiale sur le domaine D.

On suppose donc :

$$m = E_{\Omega}\{R(\vec{x}_i, \omega)\} = \int R(\vec{x}_i, \omega)P(d\omega) = E_D\{R(\vec{x}_i, \omega_k)\}$$

$$E_{\Omega}\{R(\vec{x}_i, \omega)R(\vec{x}_j, \omega)\} - m^2 = E_D\{R(\vec{x}_i, \omega)R(\vec{x}_j, \omega)\} - m^2 = \sigma^2(1 - \rho(\vec{h})) = C(\vec{h})$$

Donc la moyenne du champ est définie par :

$$m \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R(\vec{x}_i, \omega_k))$$

L'évaluation de la fonction de covariance $C(\vec{h})$ s'effectue par pas de distance Δh (de distance (dans le cas anisotrope on travaillera de plus, sur des tranches d'azimut). Les couples tels que :

$$\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\| = h \pm \frac{\Delta h}{2}$$

étant au nombre de t on obtient un des points de la fonction de covariance en reportant :

$$C(h') \approx \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (R(\vec{x}_i, \omega_k)R(\vec{x}_j, \omega_k) - m^2)$$

$$\text{avec : } h' = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|$$

Il suffit alors d'ajuster aux $C(h')$ un modèle théorique $C^*(h')$ et enfin de remplir les matrices $[C_{i,j}]$ et $[C_{0,i}]$ avec les $C^*(h)$ correspondant.

Voici ainsi présenter le krigage simple qui permet des reconstitutions telles que l'écart $R(x_0, \omega) - R^*(x_0, \omega)$ soit nul en moyenne et que la variance de cet écart soit minimale. On montre d'ailleurs que ce minimum est :

$$\delta^2 = C(\vec{x}_0, \vec{x}_0) + \mu - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(\vec{x}_i, \vec{x}_0)$$

Ce cas est très rarement traité tel quel, en effet l'estimation spatiale de m peut être parfois biaisée, d'autre part, il n'est pas forcément que la variance σ^2 soit finie.

CHAPITRE VII : EVALUATION DE GRAPHITE EXPLOITABLE

Ce chapitre est consacré au cas pratique de l'utilisation de géostatistique pour l'évaluation d'une partie de gisement de Sahamamy. Pour cela, on va présenter en premier lieu le logiciel de traitement de données, suivie des résultats et interprétations.

VII.1. Logiciel ISATIS [W9]

ISATIS est un logiciel de géostatistique développé par l'entreprise Géovariance en collaboration avec l'École des Mines de Paris.

En effet, l'entreprise est fondée en 1986 par un trio des ingénieurs chercheurs à l'Ecole de Mines de Paris. Une recapitalisation marque le recentrage de l'entreprise vers la géostatistique pure en 1991. Puis le nouveau logiciel Isatis est apparu deux ans plus tard et va devenir le principal fonds de commerce de l'entreprise. Ce logiciel a continué de se développer jusqu'en 1998 grâce à une forte activité récurrente dans le domaine minier et pétrolier. L'arrivée du fondateur du logiciel Isatis, Yves Touffait, en 1998 a renforcé l'acquisition du savoir-faire de ce logiciel.

Isatis en lui-même représente un programme de calcul écrit en langage C dont sa taille est au voisinage de 248 Mo. Le logiciel en revanche, n'a aucune limitation, et propose aux utilisateurs la quasi-intégralité des algorithmes reconnus disponibles.

Il présente un inconvénient qui découle directement de son statut de logiciel référence dans son domaine d'application. La mise en œuvre d'Isatis requiert un minimum de connaissance en géostatistique.

En outre, Isatis possède un multi fenêtrage qui peut mettre l'utilisateur débutant en difficulté.

Mais néanmoins Isatis et SIG d'Esri sont complémentaires et pourraient fonctionner en symbiose dont Esri pour la visualisation et/ou la génération des paramètres de calcul, Isatis pour les algorithmes. Le logiciel est donc capable d'interpréter des fichiers au format Shape. A part cela, le logiciel Isatis même intégrer avec la SIG dispose d'une interface graphique autonome performante. Puisqu'il est issu du monde Unix, celle-ci consiste essentiellement en des widgets (Motif) ; cependant, l'ensemble de l'environnement a également été porté sous Windows. En ce qui concerne l'affichage des résultats, Isatis possède pléthore de possibilités.

L'interface d'accueil du logiciel Isatis se présente comme suit :

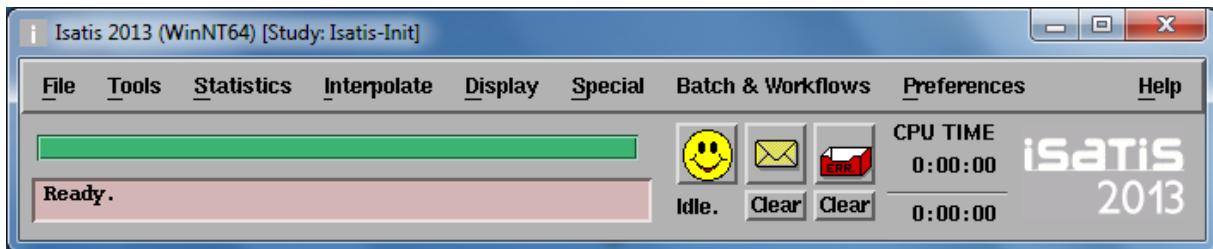


Figure 11 : Interface du logiciel Isatis

VII.1.1. Les fonctionnalités dans ISATIS

Toutes les fonctionnalités disponibles dans Isatis sont groupées en sept menus principaux dans la barre de menu :

- File. : Pour la gestion de système de fichiers d'Isatis et les opérations de base.
- Tools. : Pour des opérations plus avancées sur des dossiers.
- Statistics. : Pour le géostatistique, l'analyse et modèle classiques de variogramme.
- Interpolate. : Pour des évaluations et des simulations.
- Display. : Pour les représentations graphiques.
- Preferences. : Pour l'environnement d'étude.
- Batch. Pour les procédures de gestion et en lots de dossiers de journal.
- Help. : Pour l'aide en ligne sur des matières générales

VII.1.2. Justification et raison du choix de ce logiciel

En résumé, les descriptions sommaires précédentes nous permettent d'affirmer qu'ISATIS est performant pour faire une étude géostatistique dans notre domaine, de plus faire une modélisation 2D et 3D est assez aisée avec ce logiciel. C'est aussi un logiciel académique. Il est accessible et destiné aux étudiants, chercheurs et au grand public en général.

Pour le cas du graphite, on peut dire que le logiciel Isatis est adéquat pour réaliser les différentes étapes géostatistiques afin de réaliser l'estimation globale de ce gisement. Ce logiciel permet d'étudier les variabilités des caractéristiques d'un gisement et de quantifier les valeurs des paramètres qui décrivent ce qu'on appelle estimation globale. En effet, il permet de réaliser les études statistiques, les études variographiques et le krigeage.

Geovariance de l'école des mines de Paris a aussi conçu ISATIS pour étudier et montrer la prolifération des éléments polluants dans une zone bien déterminée. Dans ce cas, par analogie avec le problème d'une minéralisation, les variables étudiées ont été les valeurs mesurées des éléments polluants (teneur, concentration, ...). La surface concernée était la zone contaminée qui pouvait être un terrain ou même un lac.

VII.2. Traitement des données de sondages

VII.2.1. Analyse exploratoire des données

L'analyse exploratoire des données est une étape préalable utile, voire nécessaire, à une démarche de modélisation. Elle permet une première détermination des plages de variations des données, des liens éventuels entre les caractéristiques étudiées, d'une éventuelle structuration des données qui orientent donc naturellement le choix du modèle formalisant l'ensemble des caractéristiques. Ainsi, elle a pour but de caractériser la variabilité spatiale ou temporelle des concentrations avec le milieu.

VIII.2.1.1. Choix des variables régionalisés

Les données c'est-à-dire les teneurs utilisées dans cette étude proviennent d'une reconnaissance faite durant un temps précis. Leur représentativité demeure donc constante dans le temps. De plus, elles ont été acquises par le même procédé de sondage à la tarière pour le gisement tout entier. Donc la représentativité des données est aussi constante dans l'espace.

♦ Variable régionalisée « teneur »

Une variable régionalisée est définie comme une fonction d'espace dont la valeur varie d'un lieu à un autre avec une certaine apparence de continuité sans qu'il soit en général possible d'en représenter la variation par une loi mathématique extrapolable.

Dans notre cas, la première variable a les caractéristiques suivantes :

- Nature : teneur moyenne pondérée
- Support : échantillons pris tous les 1 m
- Champ géométrique : colline

Les conditions pour qu'une variable soient régionalisée sont donc satisfaites.

♦ **Variable régionalisée « accumulation »**

Puisque l'objectif de l'étude est la détermination du cubage total du minerai et de la quantité totale du graphite, la variable accumulation doit être considérée dans l'étude afin d'étudier l'estimation globale d'un gisement.

Par définition, l'accumulation notée $A(x)$ est donnée par la relation :

$$A(x) = Z(x) \times p(x)$$

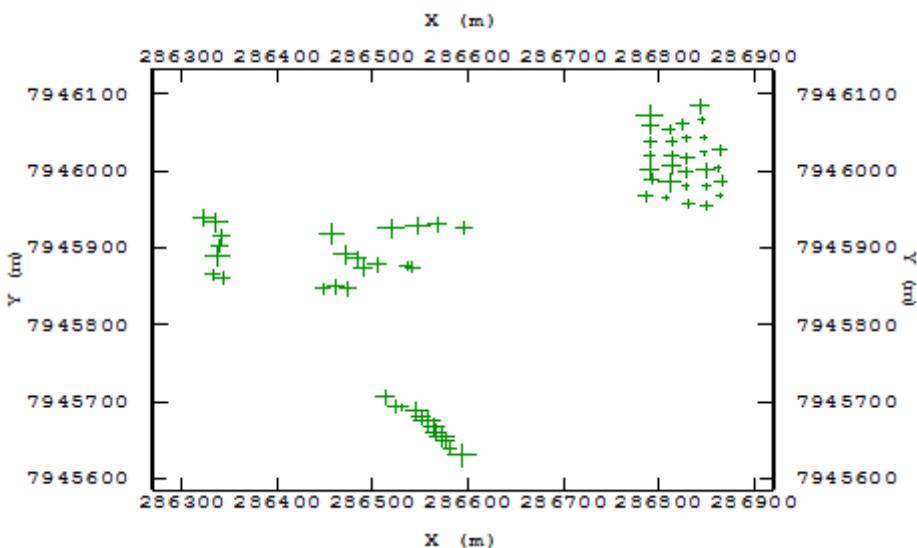
Avec $Z(x)$ étant la teneur moyenne pondérée et $p(x)$ la puissance moyenne des teneurs supérieures à 1 %.

De même que le cas précédent (teneur), la variable accumulation a comme la nature l'accumulation. Dans notre cas, le support sera considéré comme ponctuel car on a ramené à la surface libre les valeurs obtenues sur chaque point de sondage. Le champ géométrique demeure toujours la colline. En effet, les conditions nécessaires pour que l'accumulation soit une variable régionalisée sont toutes vérifiées.

D'après les données recueillies, la zone est limitée par :

$$286323 \text{ m} < X < 286866 \text{ m} ; 7945631 \text{ m} < Y < 7946086 \text{ m}$$

La répartition des points d'échantillonages est représentée par la carte ci-dessous :



Carte 12 : Répartition des points d'échantillonages

VII.2.1.2. Vérification des règles correspondantes aux choix des variables régionalisées

♦ Additivité des variables

Comme les teneurs correspondantes aux valeurs obtenues en faisant la moyenne pondérée des teneurs par passe métrique (longueur 1m) tout le long d'un trou de sondage. De plus l'accumulation est une variable issue de la variable teneur. Donc la règle de l'additivité est vérifiée pour les deux variables.

♦ Homogénéité des variables

Les observations géologiques faites au préalable montrent que la nature du minerai sur ce gisement reste la même. En outre la nature et le support de la variable teneur varie peu les tronçons sont toutes de même taille (1 m). Notre donnée est donc ici homogène.

VII.2.2. Analyses statistiques et construction des histogrammes des variables

En géostatistique, l'analyse statistique s'avère nécessaire car elle permet de mieux comprendre le comportement des données comme le minimum, le maximum, la moyenne et la variance.

VII.2.2.1. Histogramme des teneurs et des accumulations

La connaissance des limites de données pour une analyse ultérieure est nécessaire afin d'obtenir un histogramme de la teneur en graphite. Pour cela, les échantillons ont été ici regroupés en fonction de leur teneur en graphite.

Selon les résultats, le nombre total des échantillons est 63 et on a retrouvé une teneur moyenne de 4.74 % et d'écart-type 0.83 %.

Pour l'histogramme d'accumulation, le nombre des échantillons demeure toujours 63, la moyenne est de 15.96 et d'écart-type 7.17.

En général, ces histogrammes sont unimodaux, c'est-à-dire qu'ils présentent un maximum de fréquence unique. Les échantillons Cr ont été regroupés par classe d'intervalle de 15 %. On constate que l'ensemble de la population a une valeur modale de 0,17 pour la variable teneur et 0.19 celle de variable accumulation.

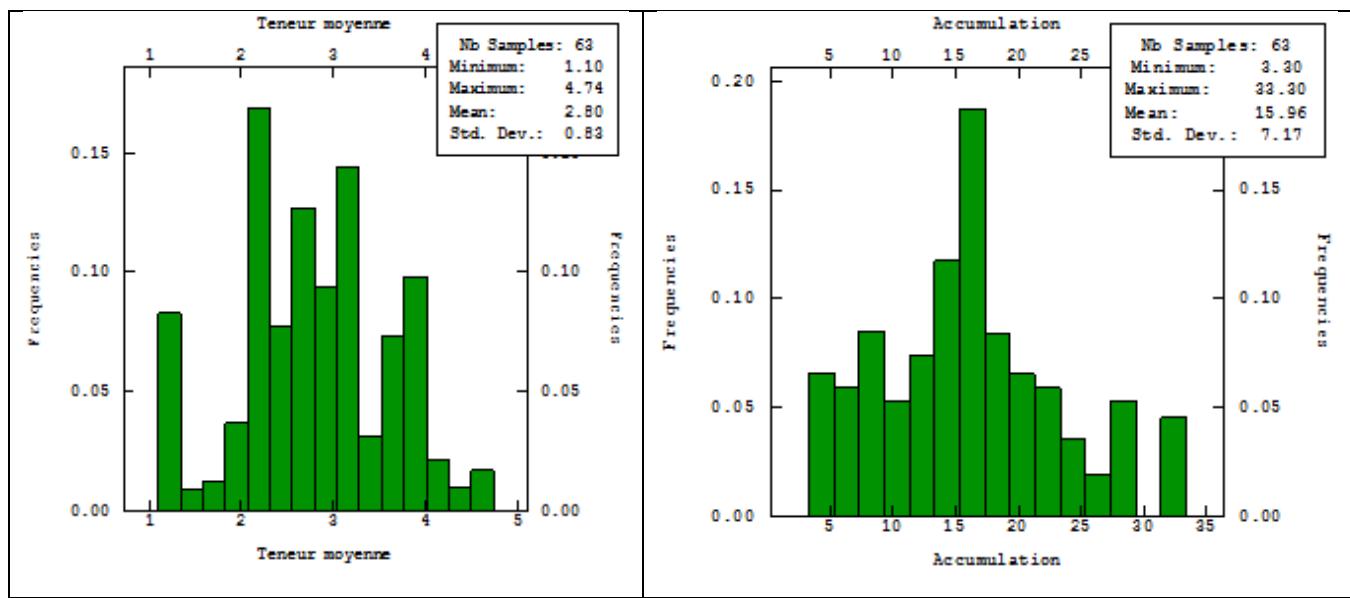


Figure 12 : Histogrammes des teneurs et accumulations

VII.2.3. Analyse variographique de la variable teneur et accumulation

VII.2.3.1. Analyse variographique

Le variogramme permet d'étudier et d'analyser les caractéristiques structurales du phénomène étudié et sa variabilité spatiale. Il aboutit à un modèle de la structure spatiale du phénomène qui est ensuite utilisé pour optimiser l'interpolation. Il constitue un outil précieux pour l'étude et l'analyse des structures.

Le variogramme expérimental est défini comme la moyenne des écarts quadratiques entre les valeurs définies par la formule :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \frac{\sum_i^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2}{N(h)}$$

Avec h : distance pour laquelle on calcule le variogramme

$Z(x_i)$: valeur mesurée au point x_i (épaisseur, concentration, ...)

$Z(x_i + h)$: valeur mesurée au point $x_i + h$ (ou en un point proche)

$N(h)$: nombre de couples (paires) de points distants de h

VII.2.3.2. Calcul variographique

Les calculs ainsi que les tracés des diagrammes expérimentaux déduits des expressions précédentes ont été faits par le programme après le regroupement par classe d'angle et de distance.

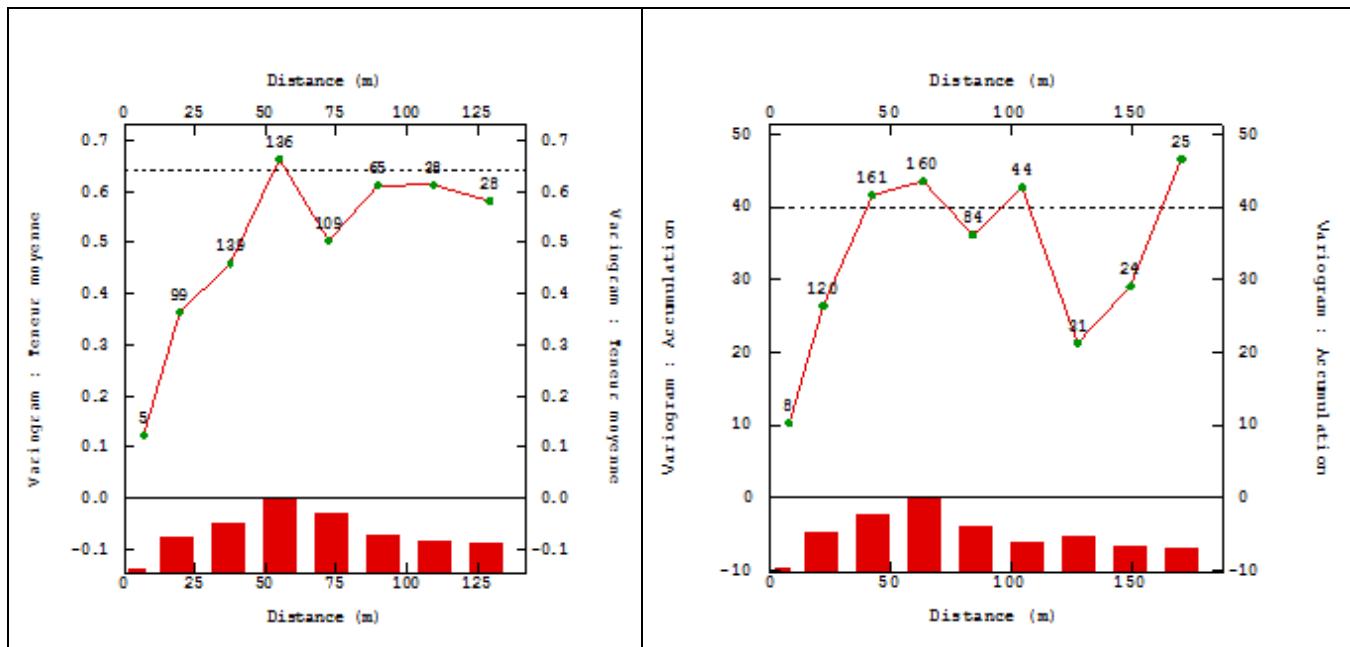


Figure 13 : Variogrammes expérimentaux

Tableau 6 : Description des variogrammes expérimentaux

Variables	Pas d'échantillonnage	Nombre de pas	Tolérance	Tolérance angulaire
Teneur	18.3 m	8	50 %	90°
Accumulation	21 m	9	50 %	90°

Le tableau ci-dessus montre les paramètres choisis pour les deux variogrammes expérimentaux considérés (teneur et accumulation).

VII.2.4. Modélisation du variogramme

VII.2.4.1. Modélisation des variogrammes de teneur et d'accumulation

Les modèles sont des expressions analytiques que l'on essaye d'ajuster le mieux possible aux points des variogrammes expérimentaux.

La modélisation choisie est un compromis entre le calage au plus près du variogramme expérimental et la stabilisation de son comportement dans les grandes distances.

Pour optimiser le calage du modèle théorique sur le variogramme expérimental, on joue sur les paramètres portée palier et effet de pépite.

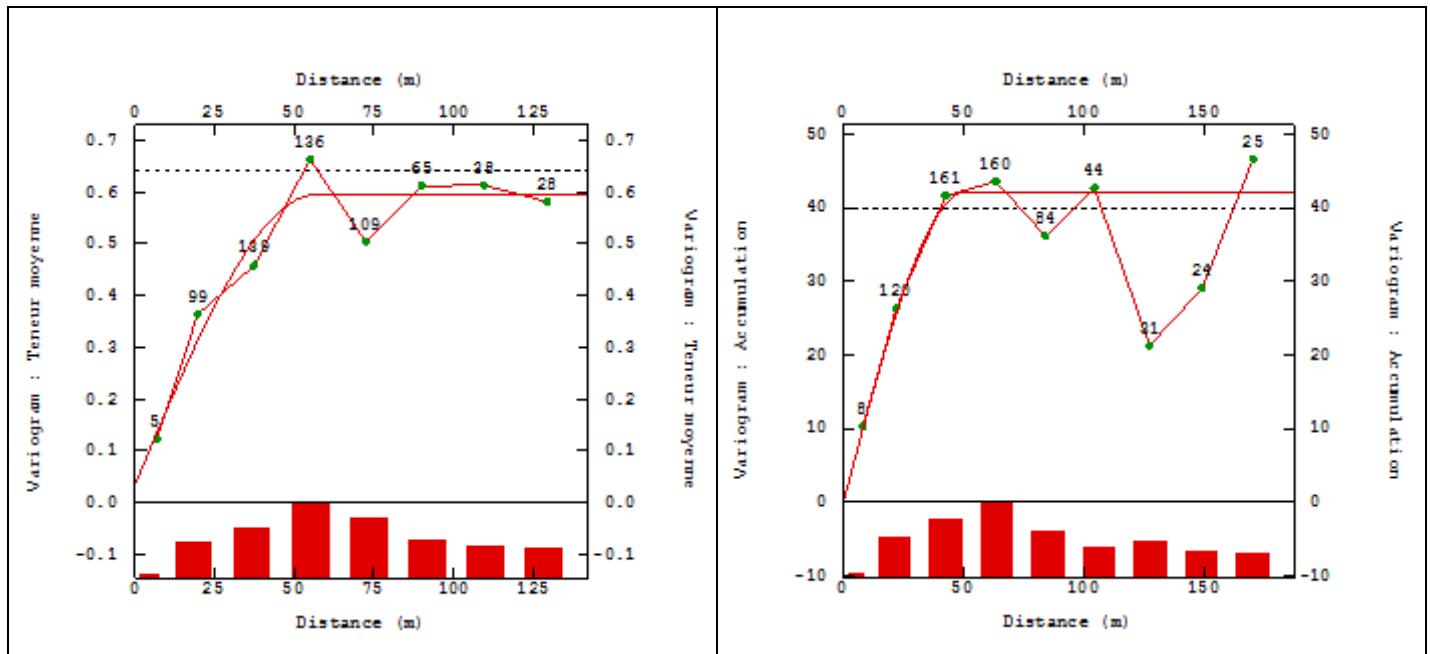


Figure 14 : Ajustements des variogrammes

Le tableau 7 représente les paramètres des deux variogrammes expérimentaux ajustés.

Tableau 7 : Paramètres des variogrammes

Variables	Effet de pépite	Palier	Portée [m]
Teneur	0.036	0.06	57
Accumulation	0	51	42

VII.2.4.2. Choix du modèle utilisé

Les modèles des bases en géologie et mine les plus courants sont : effet de pépite, puissance (cas particulier : linéaire), sphérique, gaussien, exponentiel. Par ailleurs, le modèle sphérique s'est avéré être le plus approprié dans l'ajustement de nos deux variogrammes expérimentaux après l'essai de ces différents modèles. Dans notre cas, il est donc plus

avantageux de le choisir. En outre, ce modèle est fréquemment utilisé dans les recherches minières car il est qualifié comme étant le plus adéquat dans ce domaine.

VII.2.5. Validation du variogramme

Une méthode intéressante dans le but de valider le modèle et le voisinage utilisé pour le krigage est d'effectuer une validation croisée. Le principe consiste à éliminer à tour de rôle chaque observation et de l'estimer à partir du nouveau modèle obtenu à l'aide de ses voisins. Donc deux valeurs comparables s'obtiennent en chaque point dont l'une correspond à une valeur vraie et l'autre une valeur estimée afin de déterminer si le modèle fournit des estimations se comportant comme prévu ou si le voisinage utilisé est adéquat, etc.

En fait, l'itération de toutes les observations dont on dispose entraîne l'obtention d'une série de valeurs prédites qui peuvent être comparées aux valeurs observées en calculant le résidu du modèle. Plus précisément, ce résidu noté « e_i » est ainsi défini par la différence entre la valeur observée Z_i en un point i et son estimée Z_i^* obtenue par krigage en un point i (en enlevant Z_i) ; c'est-à-dire $e_i = Z_i - Z_i^*$. Tandis que le résidu normalisé n_i est le rapport entre ce résidu et la variance de krigage σ_{kr}^2 ($n_i = \frac{e_i}{\sigma_{kr}^2}$).

Un modèle et un voisinage adéquat devraient fournir :

- a) $\sum_i e_i \approx 0$ et $\sum_i n_i \approx 0$;
- b) $\sum_i |e_i| \min$ et $\sum_i |e_i^2| \min$;
- c) $\frac{1}{n} (\sum_i (n_i^2)^{0.5}) \approx 1$

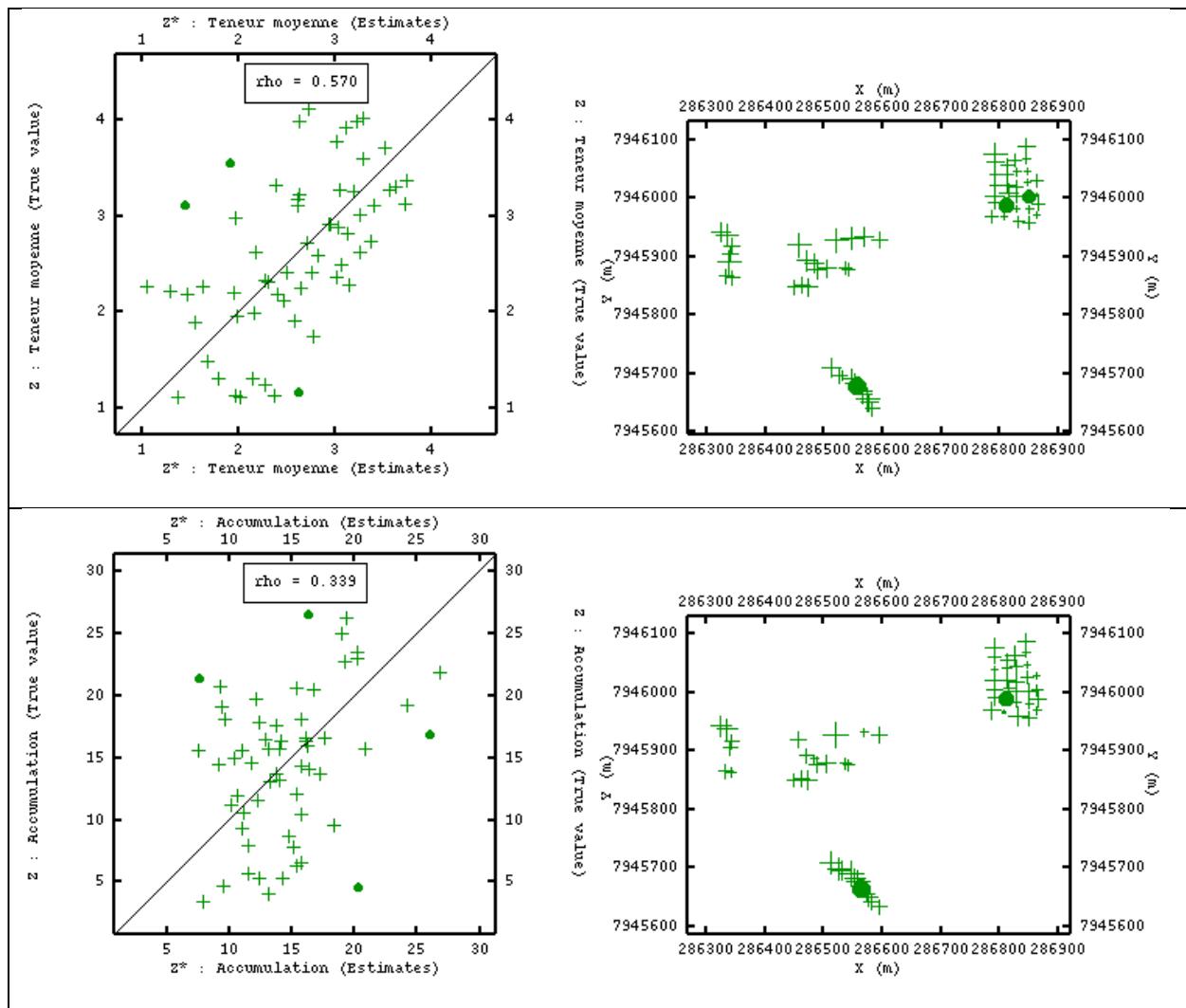


Figure 15 : Résultats de la validation des variables teneur et accumulation

La figure 16 donne un aperçu du résultat de la validation croisée du modèle sphérique des variables teneur et accumulation. Les couleurs vertes grasses représentent les points mal estimés qui sont des données à fortes teneurs et qui ne sont pas corrélés avec les autres valeurs. Cela est dû au fait, qu'il y ait des contrastes de valeurs entre les points qui sont proches. Les valeurs des paramètres issus de la validation croisée pour chaque variable considérée sont récapitulées dans le tableau 8.

Tableau 8 : Paramètres de validation croisée

Variables	Résidu (e_i)		Voisinage	résidu normalisé (n_i)		Données robustes sur 63	Coefficient de corrélation
	Moyen	Variance		Moyen	Variance		
Teneur	0.02	0.40	Glissant	0.08	1.2	60	0.570
Accumulation	0.26	30.9	Unique	0.02	1.4	59	0.339

Le résultat de la validation croisée montre un résidu moyen et un résidu normalisé moyen proches de zéro et une variance du résidu normalisé avoisinant l'unité (1.2 et 1.4) pour les deux variables. Pour la variable teneur, le modèle sphérique testé au voisinage glissant présente des statistiques légèrement meilleures alors que pour la variable accumulation, le modèle sphérique donnant un meilleur résultat est celui testé au voisinage unique.

VII.3. Modélisation par krigeage

En un point de donnée, la meilleure estimation linéaire est égale à la valeur elle-même. Le krigeage est donc considéré comme un interpolateur exact. En effet, il sert à éviter le risque d'erreur assez élevé dû à l'estimation des valeurs inconnues des blocs par leur échantillonnage dans une exploitation minière.

VII.3.1. Choix du bloc d'estimation

Le logiciel crée ici des mailles régulières de dimension 10 m \times 10 m chacune pour effectuer le calcul par krigeage. Les différents paramètres de ces mailles comme la longueur suivant X ou sa largeur suivant Y peuvent être modifiés au fur et à mesure selon les besoins.

Le gisement à estimer possède les caractéristiques suivantes :

- Coordonnées à l'origine : $X_0=286299$ m et $Y_0=7945618$ m
- Nombre de nœuds : 59 le long de l'axe des abscisses et 50 le long de l'axe des ordonnées
- Surface = $59 \times 10 \text{ m} \times 50 \times 10 \text{ m} = 295 \text{ 000 m}^2$

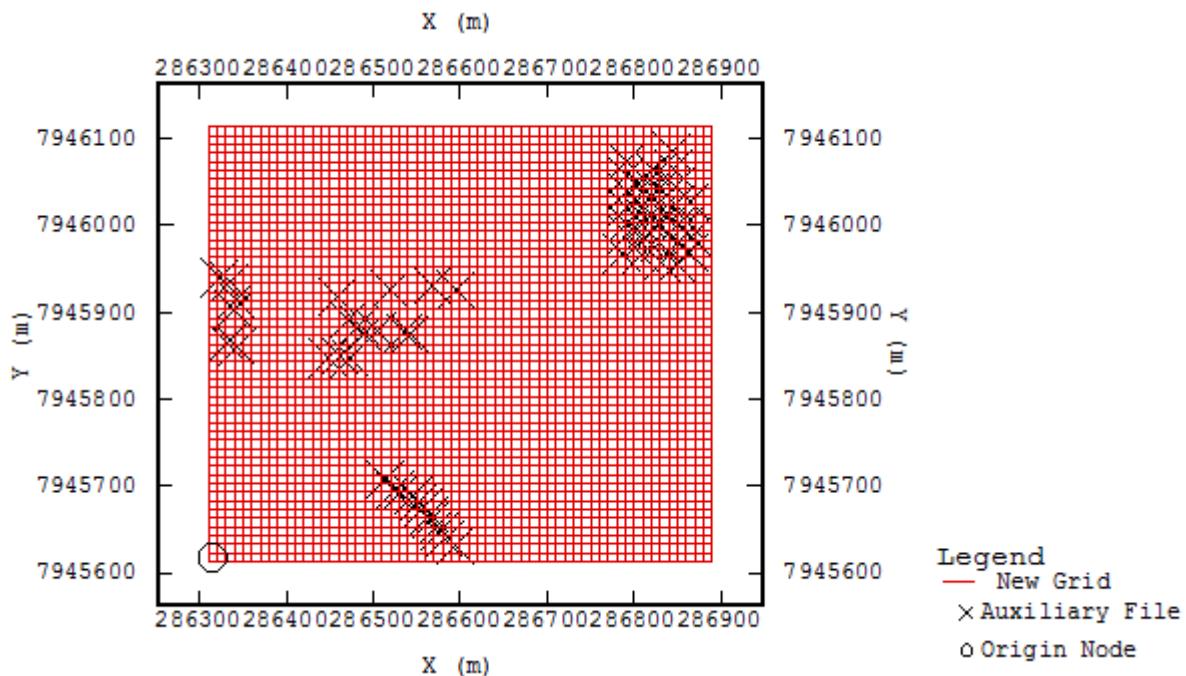


Figure 16 : Bloc d'estimation

VII.3.2. Crédation des polygones

On remarque que les données ne sont pas bien réparties d'une façon homogène dans le rectangle qui délimite notre gisement, d'où l'intérêt de le diviser en trois secteurs pour un meilleur résultat d'estimation. Pour ce faire, il a suffi d'utiliser trois polygones définissant ainsi les trois zones prospectées : polygone 1 ou zone A, polygone 2 ou zone B et polygone 3 ou zone C.

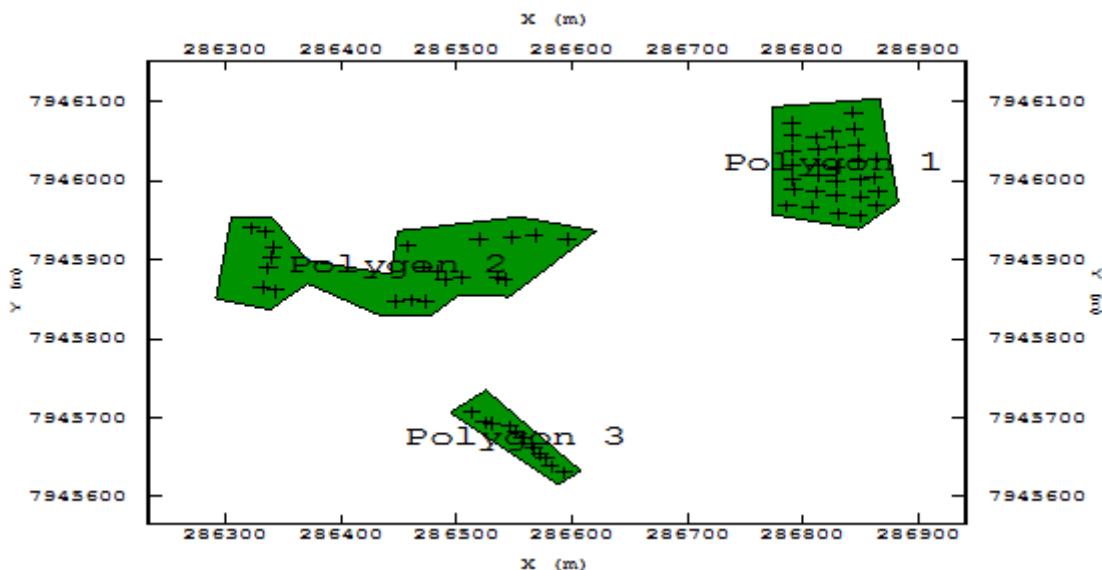
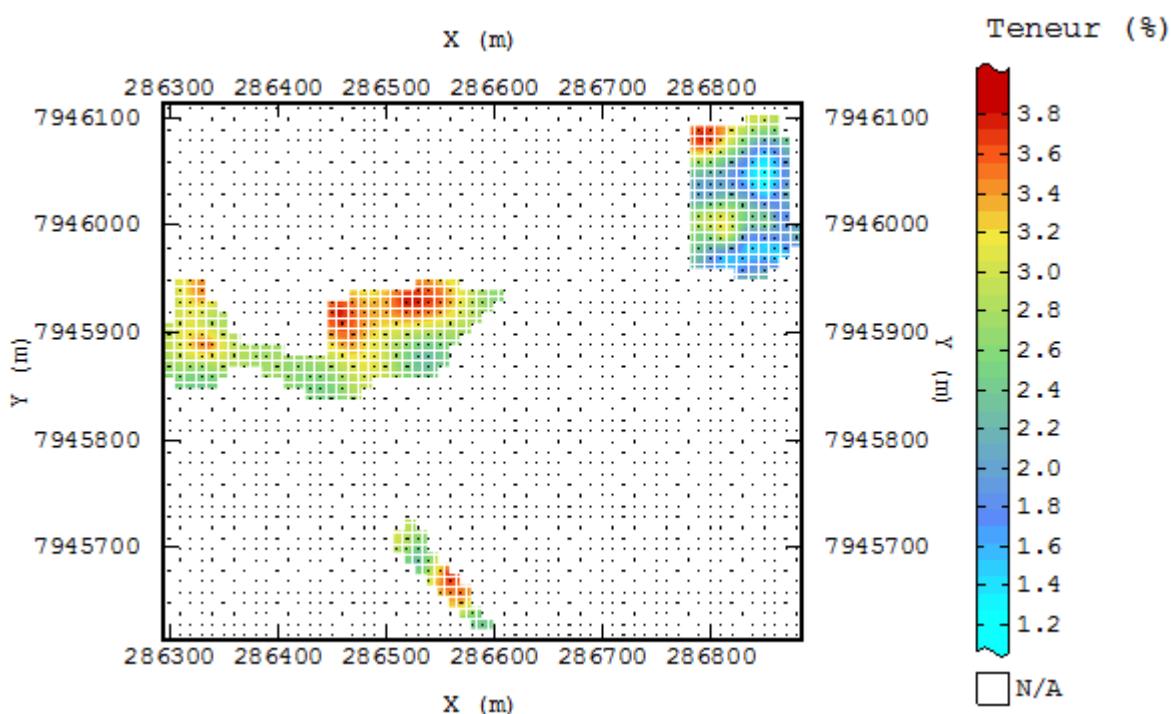


Figure 17 : Crédation des polygones

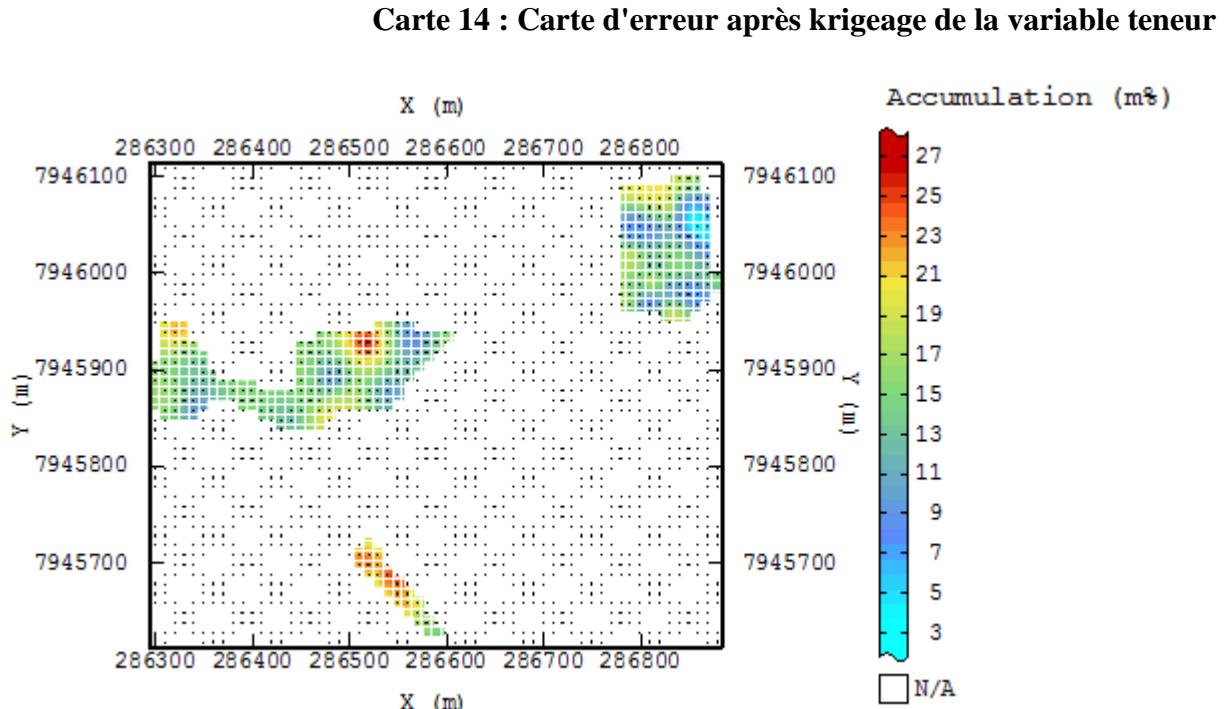
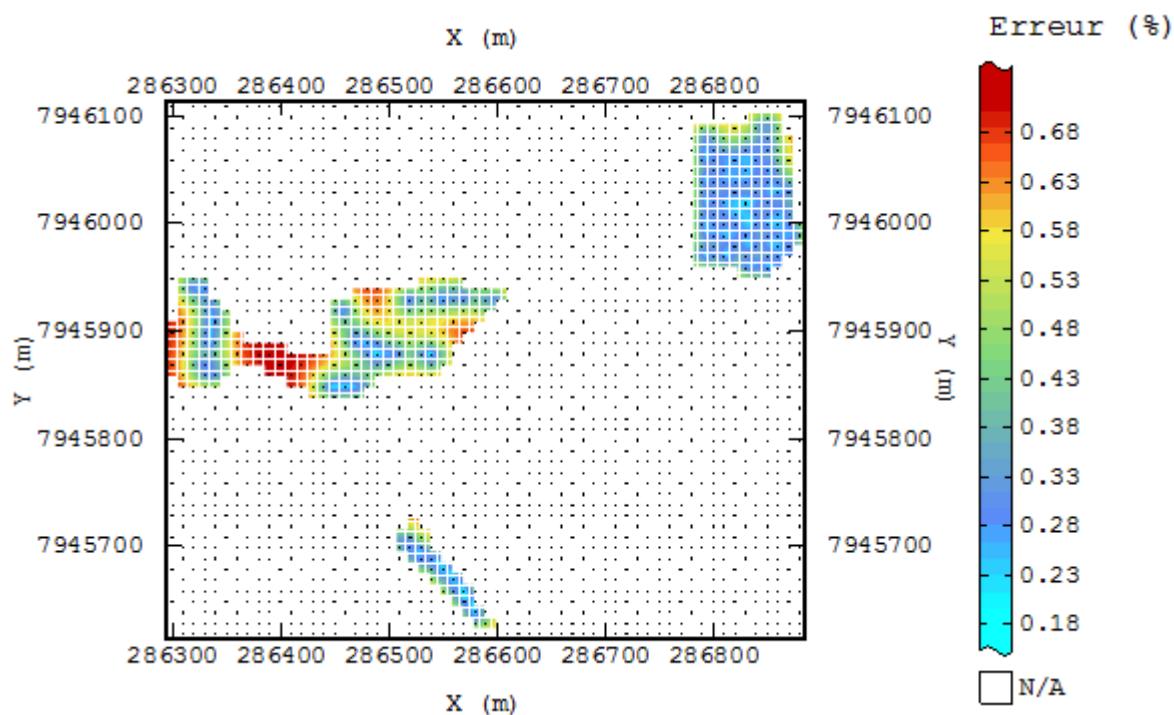
VII.3.3. Résultats et interprétations

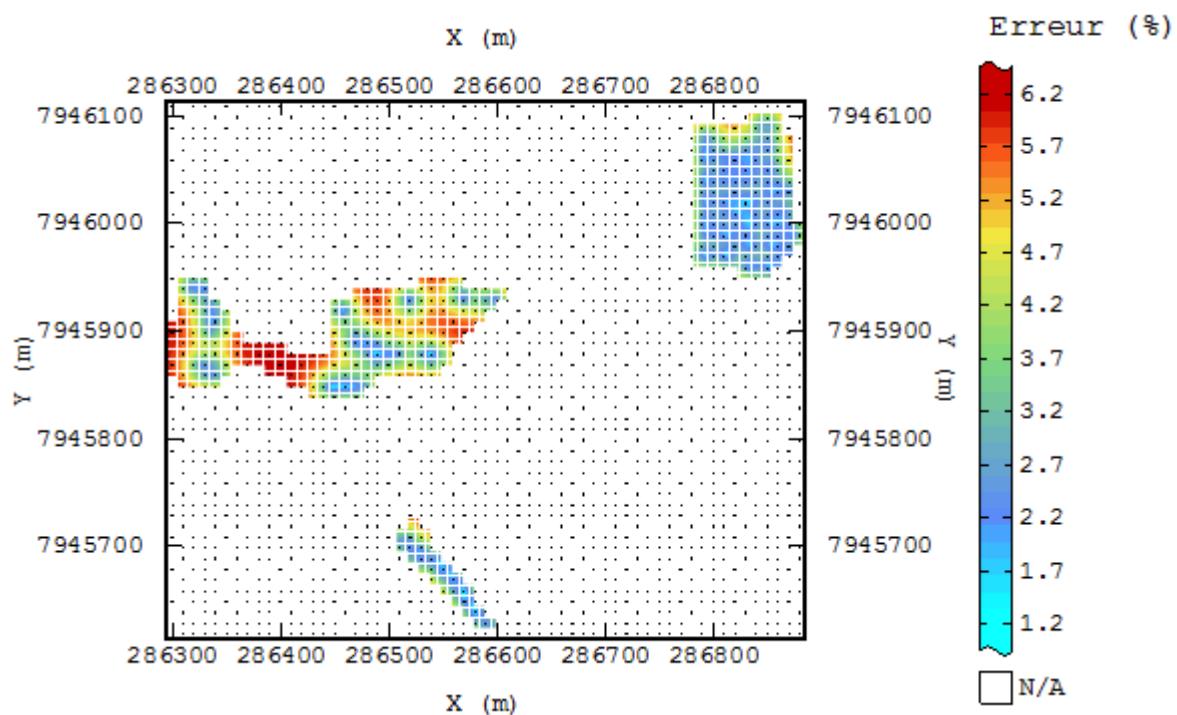
La représentation cartographique par la méthode de cokrigage nous renseigne sur la répartition visuelle et spatiale des teneurs des éléments existants. Combinée avec la carte d'écart-type de cokrigage, elle permet de quantifier à postériori l'incertitude associée à chaque carte en plus de l'analyse de validation croisée. Ces cartes sont construites à la base à l'aide de la variance de l'erreur calculée à partir de la méthode probabiliste d'interpolation du cokrigage. Ainsi, un écart-type de cokrigage faible indiquera une valeur interpolée en moyenne proche des observations et une bonne précision de la cartographie.

La répartition spatiale des teneurs dans la zone d'étude indique une forte concentration en graphite localisée à l'Ouest et au Nord-est (représentée de jaune au rouge) c'est-à-dire dans la zone B et zone A avec une teneur d'environ 3 %. Les teneurs moyennes sont localisées presque dans les trois zones ; c'est-à-dire au Nord-est, à l'Ouest et au Sud représentées par la couleur bleue au vert clair avec une teneur allant de 1.8 % à 2.8 %.



Carte 13 : Carte d'estimation après krigeage de la variable teneur





Carte 16 : Carte d'erreur après krigeage de la variable accumulation

En considérant toujours les blocs d'estimation qu'on a choisis précédemment, le tableau 9 ci-dessous récapitule les caractéristiques statistiques des résultats de l'estimation par krigeage des deux variables.

Tableau 9 : Résultat des paramètres après krigeage

Variable	Zone	Nombre de blocs	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Variance
Teneur	Zone A	149	1.25	3.84	2.27	0.60	0.36
	Zone B	240	2.25	3.81	2.98	0.35	0.12
	Zone C	47	2.26	3.80	2.92	0.40	0.16
Accumulation	Zone A	149	3.50	21.24	13.18	4.22	17.84
	Zone B	240	7.88	26.43	15.26	3.12	9.71
	Zone C	47	14.08	25.88	20.07	2.94	8.65
Teneur	Zone A-B-C	436	1.25	3.84	2.73	0.56	0.32
Erreur		436	0.18	0.72	0.45	0.14	0.02
Accumulation		436	3.50	26.43	16.17	4.04	16.31
Erreur		436	1.3	6.14	3.93	1.34	1.79

En tenant compte des données initiales, le calcul par krigage estime que les moyennes entre les vraies valeurs et les valeurs estimées sont proches. Pour la variable teneur, la moyenne après krigage est de 2.73 % alors que la moyenne initiale était de 2.80 %. Dans le cas de la variable d'accumulation, la moyenne est de 15.09 % alors qu'initialement elle était de 15.96 m%. On constate que les variances après krigage sont faibles par rapport aux variances initiales, des résultats dus à l'effet de lissage réalisé pendant l'interpolation.

La carte d'écart type de la variable teneur indique une erreur faible allant de 0.18 % à 0.68% et dans le cas de la variable accumulation l'erreur est de l'ordre de 3% en raison d'une part du fait qu'il n'y a pas des points échantillonnés dans cette zone d'autre part due à l'effet de bord. On a donc réalisé une bonne estimation pour les deux variables.

VII.4. Estimation des réserves

Après une reconnaissance systématique où des sondages ont été implantés suivant une maille plus ou moins régulier, on va procéder ensuite à l'estimation globale des ressources disponibles.

L'estimation du minerai de graphite est donnée par la relation :

$$Q = S \times p \times Z_m^* \text{ où } S \times p \text{ est le cubage du minerai}$$

Avec S : surface minéralisée

p : puissance moyenne avec $p = \frac{A_m^*}{Z_m^*}$

A_m^* : accumulation moyenne krigée

Z_m^* : teneur moyenne krigée

Estimation de teneur

D'après le résultat obtenu par l'utilisation du logiciel Isatis, la teneur moyenne du graphite estimée de chaque zone est :

$$Z_m^*(\text{Zone A}) = 2.27 \% = 2.27 \text{ [g/hg]} = 22.7 \text{ [kg/t]}$$

$$Z_m^*(\text{Zone B}) = 2.98 \% = 2.98 \text{ [g/hg]} = 29.8 \text{ [kg/t]}$$

$$Z_m^*(\text{Zone C}) = 2.92 \% = 2.92 \text{ [g/hg]} = 29.2 \text{ [kg/t]}$$

$$Z_m^*(\text{Zone A-B-C}) = 2.73 \% = 27.3 \text{ [kg/t]}$$

La masse volumique ρ du graphite est comprise entre 2,09 et 2,23 [g/cm³] ou [t/m³], dans la suite du calcul, on prendra une valeur moyenne de masse volumique $\rho = 2.1 \text{ [t/m}^3\text{]}$.

Pour un bloc de masse $m=1 \text{ t}$, son volume est de $v = \frac{1}{2.1}$ (en convertissant l'unité de masse en unité de volume).

Alors la teneur moyenne du graphite estimée pour chaque zone devient :

$$Z_m^*(\text{Zone A}) = 47.67 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$Z_m^*(\text{Zone B}) = 62.75 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$Z_m^*(\text{Zone C}) = 61.32 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$Z_m^*(\text{Zone A-B-C}) = 57.33 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Estimation de l'accumulation

Par définition $A(x) = p(x) \times Z(x)$.

La valeur de l'accumulation moyenne estimée après le krigeage est de :

$$A_m^*(\text{Zone A}) = 13.18 \%$$

$$A_m^*(\text{Zone B}) = 15.26 \%$$

$$A_m^*(\text{Zone C}) = 20.07 \%$$

$$A_m^*(\text{Zone A-B-C}) = 16.17 \%$$

Erreur et variance d'estimation

▪ **Teneur**

En estimant $Z(v)$ par l'estimateur Z^* , c'est-à-dire, en tenant encore compte de l'influence de chaque teneur. Calculons alors cette erreur $e = Z^* - Z$

La variance de cette erreur est de $\text{Var}(Z^* - Z) = \text{Var}(e) = 0.02 \%$.

▪ Accumulation

De même pour l'accumulation, en estimant $A(v)$ par son estimateur A^* , on commet une erreur $e = A^* - A$.

La variance de cette erreur est $\text{Var}(A^* - A) = \text{Var}(e) = 1.79\%$.

✚ Estimation de la surface minéralisée

Après interpolation par krigage, le nombre total des blocs du gisement est de 436 dont 149 pour la zone A, 240 pour la zone B et 47 pour la zone C.

Donc l'estimation de la surface minéralisée sera :

$$S_A = 10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 149 = 14\,900 \text{ m}^2$$

$$S_B = 10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 240 = 24\,000 \text{ m}^2$$

$$S_C = 10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 47 = 4\,700 \text{ m}^2$$

$$S_t = 10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 436 = 43\,600 \text{ m}^2$$

✚ Variance de l'erreur géométrique

L'erreur géométrique est due à l'ignorance exacte des limites de minéralisation ou des gisements. En fait, en estimant S par S^* , on commet cette erreur géométrique $e = S^* - S$.

On démontre que cette estimation est sans biais et la variance de l'erreur géométrique vaut :

$$\frac{\sigma^2(S)}{S^2} = \frac{1}{n^2} \left(\frac{1}{6} n_2 + 0.06 \frac{n_1^2}{n_2} \right)$$

Avec n : nombre de sondages positifs

$2 \times n_1$: nombre de segment parallèle à la direction 1 dans le tracé du contour du gisement

$2 \times n_2$: nombre de segment parallèle à la direction 2 dans le tracé du contour du gisement

Les directions 1 et 2 sont choisis telles que $n_1 \geq n_2$

Dans notre cas, cette erreur géométrique est négligeable c'est-à-dire $\frac{\sigma^2(S)}{S^2} \cong 0$

Donc on a $S = S_t = 43\,600 \text{ m}^2 = 43.6 \text{ ha}$.

 **Estimation de la puissance moyenne**

La valeur de la puissance moyenne estimée peut être déduite par la relation $A(x)=p(x) \times Z(x)$.

Alors la puissance moyenne estimée est :

$$p = \frac{A_m^*(Zone\ A - B - C)}{Z_m^*(Zone\ A - B - C)} = \frac{16.17}{2.73} = 5.92 \approx 6\ m$$

 **Estimation de la quantité du graphite**

La quantité du graphite estimée est définie par la formule ci-dessus. Sa valeur s'obtient par une simple application numérique.

On a :

$$Q = 43\ 600\ m^2 \times 6\ m \times 57.33\ kg/m^2 = 14\ 997\ 528\ [kg] \text{ ou } 14\ 997.528\ [t]$$

En tenant compte les erreurs, la quantité du graphite estimée est donc :

$Q^* = 15\ 000 \pm 300\ [t]$

Soit donc la récapitulation des résultats par le tableau suivant :

Tableau 10 : Récapitulation des résultats

	Teneur moyenne [%]	Surface [m ²]	Cubage minéral [m ³]	Quantité graphite [t]
Zone A	2.27	14 900	89 400	4 000
Zone B	2.98	24 000	144 000	9 000
Zone C	2.92	4 700	28 200	2 000
Total	2.73	43 600	261 600	15 000

CONCLUSION PARTIELLE

Le principal objectif de l'étude est d'estimer globalement la réserve de minéral de graphite sur le site de Sahamamy. Le logiciel Isatis étant utilisé a permis de réaliser des études statistiques, variographiques et krigeage. Pour des résultats optimaux, deux variables ont été choisies, celle de la teneur et celle de l'accumulation. Finalement, le cubage total de minéral estimé est de 261 600 m³ pour un tonnage de graphite de 15 000 t.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire s'est basé sur l'estimation des réserves de gisement de graphite d'un site minier dans le District de Brickaville. D'après des recherches faites antérieurement ainsi que la géologie, cette zone est doté d'une grande potentialité minière surtout le graphite. De plus, les travaux de prospection dans le site de Sahamamy ont permis d'affirmer la présence d'un gisement de graphite de type paillette. Afin de juger l'exploitabilité d'un gisement, l'estimation des réserves est une étape qui s'impose. Ainsi dans cet ouvrage, la géostatistique est utilisée en raison de l'évaluation du gisement plutôt qualitative que quantitative.

La géostatistique une méthode moderne apportant plus de précisions dans l'évaluation des réserves par le fait qu'elle puisse représenter la minéralisation du gisement par un modèle mathématique. Ici, Isatis est le logiciel géostatistique choisi et utilisé parmi ces nombreux équivalents. Il permet de réaliser des études statistiques, variographiques et krigeage conduisant à une estimation des réserves (teneur moyenne, épaisseur de la couche minéralisée, tonnage du graphite, erreur des estimations...).

Au terme de cette étude, le tonnage de graphite est estimé à 15 000 tonnes pour le gisement de Sahamamy avec une teneur moyenne en carbone de 86 % dont le tout est reparti sur une superficie de 43 600 m². Ce résultat démontre que cette région possède une forte potentialité en réserve de graphite exploitable et de forte concentration en carbone. L'exploitation de ce gisement de graphite engendrerait des intérêts non négligeables pour la population riveraine par la création d'emplois et infrastructures de développement. L'état en tirerait également profit par le biais de taxes et impôts.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ANDRIAMAMPIANINA J. D., 2008, « Estimation par la géostatistique des tonnages des roches calcaires exploitables à Soalara », Maitrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo ;
- [2] ANDRIANARIMANANA Jaobelison, Cours de pétrographie et recherche minière, Mention Ingénierie Minière, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ;
- [3] Arisoa Rivah Kathy, Cours de minéralogie, Mention Ingénierie Minière, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ;
- [4] BESAIRIE H., 1946, « La géologie de Madagascar », Fascicules XII, Annales géologiques du service des mines ;
- [5] BRGM, 2012, « Panorama 2011 du marché du graphite naturel », Rapport public ;
- [6] Centre de Recherches d'Etudes et d'Appui à l'analyse économique à Madagascar (CREAM), 2013, Monographie Région Atsinanana, 162p ;
- [7] Chauvet P., 2008, « Aide-mémoire de géostatistique linéaire » ;
- [8] DEVERLY F., 1984, « Echantillonnage et géostatistique », Thèse ;
- [9] Eliane BASSE., 1949, « Histoire géologique de Madagascar », Fascicules II ;
- [10] Gaston GIULIANI, Michel RAKOTONDRAZAFY, 2010, « Géologie et minéralogie » ;
- [11] Gilles BRESSON, « La prospection géophysique », p7-11 ;
- [12] J.-F.Becq.Giraudon, 1989, « Mémento roches et minéraux industriels : le graphite » ;
- [13] J. HERVIEU, « Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance au 1/200000è », Feuille numéro 33 Brickaville-Moramanga, Publication de l'institut de recherche scientifique de Madagascar ;
- [14] Marie Hennequi, 2010, « Spatialisation des données de modélisation par krigeage », p8-17 ;
- [15] Marius RAKOTONDRAVAO ANDRIANAVAH, 2015, « Carte paléontologique de Madagascar, Inventaire et mise en valeur du patrimoine paléontologique », Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse ;

[16] MATHERON, G., 1970, « La théorie des variables régionalisées et ses applications », Fasc. 5, Les cahiers du centre de morphologie mathématique, Centre de géostatistique de Fontainebleau ;

[17] M.RAUNET, 1997, « Les ensembles morphopédologiques de Madagascar » ;

[18] MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DES MINES, 1966, « Le graphite », p127

[19] RABARISON Fanomezantsoa A. V., 2010, « Application de la géostatistique multivariable dans l'estimation du gisement de nickel d'Analamay-Moramanga », Etudes Approfondies en Physique, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo ;

[20] RABENIHAINGO Tanjona Nomenjanahary Georges, 2019, « Exploitation et modélisation de gisement de graphite par méthode électrique, cas d'un site dans le District de Brickaville », Master en Physique et Applications, Domaine Sciences et Technologies, Université d'Antananarivo ;

[21] RAGOSINERA Andriamparany, 2015, « Estimation des réserves de gisement de graphite dans le site de Marovintsy par approche géostatistique », Master en Ingénierie Minière, Département Mines, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo ;

[22] RAJAONARISON Lanja Maminirina, 2014, « Application de la géostatistique dans l'estimation des réserves du gisement de graphite d'Antsirakambo », Master en Ingénierie Minière, Département Mines, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo ;

[23] RAKOTOMANANA Dominique, Cours de Géologie de Madagascar, Mention Géologie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ;

[24] RASOLOMANANA Eddy, Cours de géostatistique, Mention Ingénierie minière, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ;

[25] RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier, Cours de géophysique, Mention Ingénierie minière, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ;

[26] RAVELOARIJAONA Marcel Théophile, « Monographie de la région de l'Est » ;

[27] Robert GIRAUDON, 1959 , « Géologie et prospection de la feuille Maroseranana », Travaux du bureau géologique numéro 95, Service géologique d'Antananarivo, p6 ;

Références bibliographiques

[28] RAZAFIMAHATRATRA Heritiana, 2010, « Modélisation des structures géoélectriques du bassin sédimentaire Ambovombe Androy par méthode géostatistique », Etudes Approfondies en Physique, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo ;

[29] RAZAFIMAMPANDRY Ravo M., 2009, « Etude géostatistique du gisement de calcaire de Soalara, Sud-Ouest de Madagascar », Etudes Approfondies en Physique, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo ;

[30] SHEK S. D., 2010, « Application de la géostatistique pour estimer le gisement de calcaire de Soalara, Sud-Ouest de Madagascar », Maîtrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo ;

[31] Y.BRIERE, « Les ressources minérales de Madagascar », p14 ;

REFERENCES WEBOGRAPHIQUES

- [W1] <http://www.usgs.com>, consulté en Août 2019 ;
- [W2] www.wikipedia.org/wiki, consulté en Août 2019 ;
- [W3] <http://www.asbury.com>, consulté en Septembre 2019 ;
- [W4] www.planetoscope.com/.../1490-consommation-mondiale-de-graphite.html, consulté en Septembre 2019 ;
- [W5] www.mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/.../mineraux-proprietes-graphite.js, consulté en Septembre 2019 ;
- [W6] www.mcgroup.co.uk/researches/G/04/Graphite%20Market%20Research.html, consulté en Septembre 2019 ;
- [W7] [http://dnre_mrne.gnb.ca/mineral occurrence](http://dnre_mrne.gnb.ca/mineral_occurrence), consulté en Octobre 2019 ;
- [W8] www-aosabook.org/en/graphite.htm, consulté en Octobre 2019 ;
- [W9] <http://www.geovariances.com>, consulté en Octobre 2019

ANNEXES

Annexe 1 : Rapport de sondage de la colline Sahamamy

Nom	X [m]	Y[m]	Z[m]	Teneur carbone [%]	Teneur moyenne [%]	Epaisseur [m]	Accumulation [%]
C-01	286323	7945940	302,5	79,87	3,26	7	22,82
C-02	286335	7945935	302,5	79,95	3,76	6	22,56
C-03	286342	7945915	304,3	88,25	2,8	5	14
C-03.5	286340	7945903	307,7	78,6	2,72	5	13,6
C-04	286337	7945889	308,6	85,16	3,97	8	31,76
C-04.5	286343	7945861	313,4	84,09	2,58	3	7,74
C-05	286332	7945865	313,5	88,5	2,48	6	14,88
D-01	286490	7945875	306	82,01	3,26	5	16,3
D-02	286505	7945878	312	87,66	2,9	6	17,4
D-03	286536	7945877	312	77,68	2,1	5	10,5
D-04	286542	7945875	312	84,78	2,3	4	9,2
D-05	286568	7945931	319	87,54	3,24	2	6,48
D-06	286548	7945929	322	83,08	3,7	9	33,3
D-07	286520	7945926	322,4	84,97	4	7	28
D-08	286596	7945926	320,8	85,78	2,6	6	15,6
D-09	286458	7945918	320	84,67	3,96	4	15,84
B-01	286594	7945631	285,8	85,95	4,74	3	14,22
B-02	286582	7945639	295,1	83,6	2,35	7	16,45
B-03	286577	7945649	295,7	80,99	2,99	6	17,94
B-04	286573	7945654	297,8	79,32	3,91	4	15,64
B-05	286567	7945661		80,04	3,29	8	26,32
B-06	286565	7945667		86,57	3,35	5	16,75
B-07	286558	7945675		80,72	4,35	6	26,1
B-08	286552	7945681		84,5	3,11	7	21,77
B-09	286546	7945689	305,9	90,52	3,2	9	28,8
B-10	286531	7945693		90,25	1,73	6	19,03
B-11	286525	7945695		78,5	2,6	6,2	23,4
B-12	286514	7945707		92,22	3,1	8	24,8
X-01	286448	7945847	295	91,72	2,4	5	12
X-02	286461	7945850	296	91,94	2,7	6	16,2
X-03	286474	7945847	298	90,61	2,9	7	20,3
X-04	286471	7945891	298,7	94,3	3,58	4	14,32
X-05	286484	7945886	301	92,5	3,1	2	6,2
E-01	286791	7946073		96,3	4,1	5	20,5
E-02	286792	7946058	298	78,63	2,86	4	11,44
E-03	286792	7946038		87,12	1,98	2	3,96
E-04	286792	7946020	297,6	80,11	1,9	8	19
E-05	286792	7946002	301,3	85,05	3,3	5	16,5
E-06	286792	7945989		86,7	2,27	6	13,62
E-07	286812	7945985		86,14	3,53	6	21,18
E-08	286814	7946007		84,67	3,15	3	9,45
E-09	286813	7946019		88,01	2,4	6	14,4
E-10	286813	7946039		81,64	1,94	4	7,76
E-11	286812	7946054		87,65	2,17	6	13,02
E-12	286826	7946061		88,75	2,18	7,4	19,62

E-13	286830	7946043		85,81	1,47	8	11,76
E-14	286830	7946016		82,68	2,31	7	16,17
E-15	286829	7946000		80,12	2,23	7	15,61
E-16	286829	7945981	302,4	83,6	1,22	7	8,54
E-17	286832	7945958		88,5	1,87	6	20,57
E-18	286850	7945956		81,2	2,16	7	12,96
E-19	286851	7945980		80,5	1,3	4	5,2
E-20	286850	7946001	299,6	88,9	3,1	5	15,5
E-21	286848	7946025		92,7	1,11	4,5	11,1
E-22	286848	7946045		90,5	1,1	3	3,3
E-23	286845	7946066	294,3	94,3	1,3	4	5,2
E-24	286844	7946086		92	2,96	6	17,76
E-25	286864	7946028		89,7	2,25	2	4,5
E-26	286862	7946004		80,11	1,14	9	10,26
E-27	286866	7945986		85,6	2,2	7	15,4
E-28	286864	7945968	296,3	83,2	1,1	5	5,5
E-29	286808	7945966		80,1	1,12	4	4,48
E-30	286787	7945967		84,7	2,25	8	18

Annexe 2 : Aperçu sur la géologie de Madagascar

Géologiquement, Madagascar est subdivisé en deux grandes entités dont, le socle cristallin précambrien qui occupe les deux tiers orientaux de l'Île, et les formations sédimentaires du phanérozoïque qui affleurent sur le tiers occidental et sur une bande mince le long du littoral Est.

Antérieurement, Bésairie en 1973, a proposé une lithostratigraphie reposant sur l'hypothèse que le socle cristallin aurait été un empilement de séries sédimentaires que l'orogenèse majeure de 2,6Ga appelée Shamwaienne aurait métamorphisé.

En 1976, Hottin a présenté des études plus récentes sur le Précambrien de l'ensemble de Madagascar. Cette synthèse fait suite à une étude géochronologique générale par Hottin, et Vachette (1979). Le schéma de la géologie du Précambrien Malgache d'après la combinaison des propositions de Bésairie (1973) et de Hottin (1976), est alors le suivant :

La ligne de dislocation majeure orientée NW-SE dite structure de Bongolava-Ranotsara (linéament B-R) sépare deux domaines bien distincts :

Un âge Catarchéen et Archéen est attribué à la majorité des terrains constituant les deux tiers Nord de l'île, à l'exclusion des formations du Protérozoïque Inférieur au Sud de la structure de Bongolava-Ranotsara, du Protérozoïque Moyen de Daraina et d'Amborompotsy/Ikalamavony et l'Itremo. Ce vieux Précambrien est reparti en deux systèmes qui se superposent :

- La série Infragraphite essentiellement de nature granitique et migmatitique d'âge Catarchéen ;
- Un système archéen, plissé et métamorphisé lors de l'orogenèse shamwaienne majeure de 2 600 Ma, comprenant à la base : une série silico-alumineuse Souvent à graphite (série de Manampotsy) avec des migmatites et granites stratoïdes dans la zone centrale (Ambatolampy) ; au sommet : faciès à dominante calcique renfermant de vastes complexes basiques et ultrabasiques : sillon Beforona Alaotra, Maevantanàna, Andriamena.

Un âge Protérozoïque Inférieur est attribué aux terrains au SW de ce linéament B-R et qui sont les formations du système Androyen. C'est un ensemble ultra-métamorphique à leptynites granulites et formations pyroxéno-wernéritiques, et le système de Vohibory regroupant Ampanihy. La ligne de dislocation majeure orientée NW-SE dite structure de Bongolava-Ranotsara (Linéament B-R) sépare deux domaines bien distincts :

Un âge Catarchéen et Archéen est attribué à la majorité des terrains constituant les deux tiers Nord de l'île, à l'exclusion des formations du Protérozoïque Inférieur au Sud de la structure de Bongolava-Ranotsara, du Protérozoïque Moyen de Daraina et d'AmborompotsyIkalamavony et l'Itremo. Ce vieux Précambrien est reparti en deux systèmes qui se superposent :

_ La série Infragraphite essentiellement de nature granitique et migmatitique d'âge Catarchéen ;

_ Un système archéen, plissé et métamorphisé lors de l'orogenèse shamwaienne majeure de 2600 Ma, comprenant à la base : une série silico-alumineuse souvent à graphite (série de Manampotsy) avec des migmatites et granites stratoïdes dans la zone centrale (Ambatolampy) ; au sommet : faciès à dominante calcique renfermant de vastes complexes basiques et ultrabasiques : sillon Beforona Alaotra, Maevantanàna, Andriamena.

Un âge Protérozoïque Inférieur est attribué aux terrains au SW de ce linéament B-R et qui sont les formations du système Androyen. C'est un ensemble ultra-métamorphique à leptynites granulites et formations pyroxéno-wernéritiques, et le système de Vohibory regroupant Ampanihy-Vohibory-Vohimena

Plus tard, le socle précambrien est perçu comme étant un ensemble façonné par des événements tectono-métamorphiques successifs (Collins et al., (11)) et serait constitué par cinq blocs tectoniques stables, trois nappes de charriage et une zone de suture.Collins et Windley (11), subdivisent alors le socle en 9 unités tectono-métamorphiques suivantes :

- Le bloc d'Antongil :

Le bloc de l'Antongil se trouve dans la partie Nord-est et extrême Nord du socle et est constitué de méta sédiments à noyaux granitiques et gneissiques stabilisés dans le faciès schiste vert au faciès amphibolite inférieur.

- Le bloc d'Antananarivo :

Le bloc d'Antananarivo est la plus grande unité tectonique pré-paléozoïque de Madagascar et constitue son ossature centrale. Il est formé par des schistes, migmatites, gneiss et des granitoïdes, stabilisée antérieurement dans le faciès amphibolite, et intensément réactivée par les événements du Néoprotérozoïque responsables d'un métamorphisme prograde dans le facies granulite, et qui s'accompagne d'un rajeunissement généralisé des biotites.

- La nappe de charriage Bemarivo (510-520Ma) :

Son soubassement est formé par des migmatites, gneiss et amphibolites archéens d'origine sédimentaire et volcano-sédimentaire d'Ambohipato qui ont été métamorphisés par l'événement de 730 Ma et intrudé par les formations magmatiques calco-alcalines de Daraina et Milanoa.

- La nappe de charriage de Tsaratanana :

Elle est constituée de gneiss, de diorite quartzique (tonalite) avec des gisements de chromite et de métapélites et formée par trois ceintures : ceintures de Maevantanana, d'Andriamena, et Befandriana-Alaotra-Beforona et qui sont lithologiquement, géochronologiquement, et structuralement similaires.

- La nappe d'Itremo :

La nappe d'Itremo est formée par des roches métasédimentaires à néoprotérozoïques charriées sur le Bloc d'Antananarivo. Des imbrications locales ont été décrites. Les épisodes gabbroïques du 790 et 810 Ma, syénitiques et granitiques du 570-539 Ma marquent des intrusions des formations de l'Itremo qui sont considérées comme étant d'une plateforme continentale.

- Le bloc d'Ikalamavony-Amborompotsy :

Les gneiss et les migmatites du groupe d'Ikalamavony Amborompotsy seraient les équivalents abyssaux des formations de la nappe d'Itremo.

- La suture Betsimisaraka :

Elle limite à l'Est le craton de l'Archéen Inférieur de Darwhar formé d'un socle gneissicomigmatitique emballant les formations ultramafiques, et mafiques. La suture Betsimisaraka est le vestige de la fermeture d'un océan entre l'Inde et Madagascar à l'époque de la coalescence du Gondwana Est et du Gondwana Ouest.

- Le Sud de Madagascar :

Le Sud de Madagascar, au Sud de la structure de Bongolava-Ranotsara, est formé de deux blocs qui sont le Bloc de Taolagnaro-Ampanihy (ensemble de terrains du Protérozoïque Inférieur) qui est essentiellement constitué de para et orthogneiss, et le Bloc de Vohibory avec du gneiss amphibolique rétromorphosé dans le faciès schiste vert. Six ceintures magmatiques

matérialisés par de la phlogopite qui, localement, peut constituer des concentrations d'intérêt minier et économique, subdivisent le secteur Sud.

Annexe 3 : Krigeage

- **Krigeage dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque**

Dans le cas de l'hypothèse intrinsèque, nouvelle et moins forte, ce sont les accroissements $R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)$ pour une distance \vec{h} qui sont stationnaires d'ordre 2.

En effet, l'expression de la moyenne de ces accroissements est :

$$E_D\{R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)\} = m(\vec{x}) - m(\vec{x} + \vec{h}) = C^{te} = 0$$

Les accroissements sont alors nuls en moyenne tandis que $R(\vec{x}, \omega_k)$ est stationnaire.

Et la variance a pour expression pour une même distance \vec{h} :

$$V_D\{R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)\} = 2\gamma(\vec{h})$$

Ainsi l'hypothèse intrinsèque peut se résumé en disant qu'en moyenne les accroissements spatiaux sont nuls et la variance de ces accroissements spatiaux ne dépend que du vecteur \vec{h} ou de son module h .

$2\gamma(\vec{h})$ est appelé variogramme. Dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque, ce variogramme est lié aux covariances, en effet :

$$2\gamma(\vec{h}) = V_D\{R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)\}$$

$$2\gamma(\vec{h}) = E_D\{[R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)]^2\} - [E_D\{R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)\}]^2$$

$$2\gamma(\vec{h}) = E_D\{[R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)]^2\} - 0$$

$$2\gamma(\vec{h}) = E_D\{[R(\vec{x}, \omega_k)]^2\} - 2E_D\{R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)R(\vec{x}, \omega_k)\} + E_D\{[R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)]^2\}$$

Or :

$$E_D\{[R(\vec{x}, \omega_k)]^2\} - m^2 = E_D\{[R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)]^2\} - m^2 = C(0)$$

$$2E_D\{R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)R(\vec{x}, \omega_k)\} - 2m^2 = 2C(\vec{x}, \vec{x} + \vec{h}) = 2C(\vec{h})$$

Donc :

$$2\gamma(\vec{h}) = E_D\{[R(\vec{x}, \omega_k)]^2\} - m^2 - 2E_D\{R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)R(\vec{x}, \omega_k)\} + 2m^2 \\ + E_D\{[R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)]^2\} - m^2$$

$$\gamma(\vec{h}) = C(0) - C(\vec{h})$$

Le système initial se transforme alors en : $R^*(\vec{x}_0, \omega) = \sum_{i=1}^n \lambda_i R(\vec{x}_i, \omega)$

avec $\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(\vec{x}_j, \vec{x}_i) - \mu = \gamma(\vec{x}_0, \vec{x}_i)$ et $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

et sous forme matricielle :

$$\begin{vmatrix} \gamma(\vec{x}_1, \vec{x}_1) & \gamma(\vec{x}_1, \vec{x}_2) & \cdots & \gamma(\vec{x}_1, \vec{x}_j) & \cdots & \gamma(\vec{x}_1, \vec{x}_n) & 1 \\ \gamma(\vec{x}_2, \vec{x}_1) & \gamma(\vec{x}_2, \vec{x}_2) & \cdots & \gamma(\vec{x}_2, \vec{x}_j) & \cdots & \gamma(\vec{x}_2, \vec{x}_n) & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \gamma(\vec{x}_i, \vec{x}_1) & \gamma(\vec{x}_i, \vec{x}_2) & \cdots & \gamma(\vec{x}_i, \vec{x}_j) & \cdots & \gamma(\vec{x}_i, \vec{x}_n) & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \gamma(\vec{x}_n, \vec{x}_1) & \gamma(\vec{x}_n, \vec{x}_2) & \cdots & \gamma(\vec{x}_n, \vec{x}_j) & \cdots & \gamma(\vec{x}_n, \vec{x}_n) & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 & \mu \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdots \\ \lambda_i \\ \cdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \gamma(\vec{x}_1, \vec{x}_0) \\ \gamma(\vec{x}_2, \vec{x}_0) \\ \cdots \\ \gamma(\vec{x}_i, \vec{x}_0) \\ \cdots \\ \gamma(\vec{x}_n, \vec{x}_0) \\ 1 \end{vmatrix}$$

Pour une mise en œuvre pratique, il suffit de construire le variogramme expérimental

$$2\gamma(\vec{h}) = E_D\{[R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)]^2\}$$

Cette construction se fait en travaillant par pas de distance Δh (dans le cas anisotrope, on travaillera de plus sur des tranches d'azimut) les couples (\vec{x}_i, \vec{x}_j) tels que :

$$\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\| = h \pm \frac{\Delta h}{2}$$

Etant au nombre t , on obtient un des points du variogramme en reportant :

$$2\gamma(h') \approx \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)R(\vec{x}, \omega_k)$$

$$\text{avec: } h' = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|$$

Elle se termine par l'ajustement aux modèles $\gamma(h')$ un modèle théorique $\gamma^*(h')$ et par le remplissage des matrices $[\Gamma_{i,j}]$ et $[\Gamma_{i,j}]$ avec les $\gamma^*(h)$ correspondant.

- **Krigeage universel**

Dans le cadre de ce krigeage, la moyenne n'est plus constante. Il existe alors une dérive et $m(\vec{x}_i) \neq m(\vec{x}_j)$. La difficulté principale avec le krigeage universel résulte de l'étude du variogramme. En effet, on a posé :

$$2\gamma(\vec{h}) = V_D \{R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)\}$$

$$2\gamma(\vec{h}) = E_D \{[R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)]^2\} - [E_D \{R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)\}]^2$$

Mais contrairement au cas précédent $m(\vec{x}_i) \neq m(\vec{x}_j)$ et $[E_D \{R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)\}]^2 \neq 0$

En appelant variogramme brut $\gamma(\vec{h})_{brut}$ le seul terme accessible directement :

$$\gamma(\vec{h})_{brut} = \frac{1}{2} E_D \{[R(\vec{x}, \omega_k) - R(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k)]^2\}$$

L'expression du variogramme réel $\gamma(\vec{h})$ est donc :

$$\gamma(\vec{h}) = \gamma(\vec{h})_{brut} - \frac{1}{2} [E_D \{m(x) - m(x + h)\}]^2$$

En fait, dans le cas du krigeage universel, il faut retenir que le variogramme brut n'est qu'une image déformée du variogramme réel sous-jacent. La dérive est le responsable de cette déformation. Il faut donc simultanément étudier la dérive que l'on suppose généralement être une fonction simple variant relativement lentement et le variogramme réel.

Annexe 4 : Le Précambrien malgache et les différents évènements géologiques (Razafinimparany, 1978)

Chronologie absolue	Echelle stratigraphique	Formations mises en place	Évènements géologiques principaux
550MA-100	CAMBRIEN		Orogenèse Mozambique panafricaine : réactivation locale des migmatites, mises en place des granites, pegmatites (U, Th, Nb, Ta) ; rajeunissement des biotites
550MA			
550MA+100	PROTEROZOIQUE SUPERIEUR	Pas de dépôts connus	
1200MA+100			
1200MA			Orogenèse kibarienne : métamorphisme des série précédentes et réactivation des plus anciennes, mises en place des migmatites, granites, charnokites
1200MA+200			Formation des lepnytes
	PROTEROZOIQUE MOYEN (S.Q.C : Schistes –Quartites- Cipolins)	Dépôts des séries Amborompotsy, Ikalamavony, Ihosy, Horombe, Bevinda, S.Q.C, Daraina-Milanoa, Vohibory, Ambohibato-Vohémar	
2000MA			Episode thermique
2300MA	PROTEROZOIQUE INFERIEUR	Volcanisme et sédimentation dans le Sud ; formations des séries de Fort-Dauphin, Tranomaro, Ranotsara, Tsitondroina	éburnéene
2600MA			
2600MA+600	ARCHEEN	Dépôts des séries silico-alumineuses et calco-ferromagnésiennes et leurs équivalents migmatites	Orogenèse Shamwaïne : plissement et métamorphisme des séries : Beforona, Alaotra, Maevatanàna-Manampotsy-Ambatolamp
3000MA-200			
3000 MA	KATARCHEEN	Massif ou dôme de granite et de migmatites, leptynites(Antongil, Angavo, Behara) et des métabasites	Orogenèse de 300+ ou -200 : élaboration des formations qui vont constituer les ossatures et les noyaux sur lesquels vont se mouler les formations plus récentes

TABLE DES MATIERES

« Anaka, mihainoa ny ana-drainao, ary aza mahafoy ny lalàn-dreninao ; Fa fefiloha tsara tarehy amin’ny lohanao izany » Ohabolana 1 : 8-9.....	3
TENY FISAORANA	i
SOMMAIRE	ii
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES	iii
LISTE DES CARTES	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES PHOTOS.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ANNEXES	vii
GLOSSAIRE.....	ix
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : GENERALITES ET RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE	2
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE GRAPHITE	3
I.1. Historiques [W1] [W2].....	3
I.2. Propriétés	3
 I.2.1. Minéralogie descriptive [W1] [W2] [4].....	3
 I.2.2. Métallogénie du graphite [W3] [W4] [W5]	4
 I.3. Classification du graphite [W1] [W3] [4] [9]	5
 I.3.1. Graphite amorphe	5
 I.3.2. Graphite en paillette.....	5
 I.3.3. Graphite filonien.....	6
 I.4. Utilisations du graphite [W4] [W5] [4]	7
CHAPITRE II : GRAPHITE AU NIVEAU MONDIAL.....	9
 II.1. Production [6] [W5] [W8]	9

II.2. Répartition de la consommation [W4] [W5]	10
II.3. Prix sur le marché [W3] [W4] [W6]	11
II.4. Demande sur le marché mondial [21]	12
CHAPITRE III : GRAPHITE A MADAGASCAR	13
III.1. Situation de graphite à Madagascar [4]	13
III.2. Indices graphiteux de Madagascar [4] [18]	15
 III.2.1. Région orientale	16
 III.2.2. Région d'Ampanihy-Bekily-Benenitra	20
 III.2.3. Région d'Antsirabe-Ambatolampy	21
CONCLUSION PARTIELLE	21
PARTIE II : EXPLORATION DU SITE D'ETUDE	22
CHAPITRE IV : CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE	23
IV.1. Localisation géographique	23
IV.2. Contexte physique et biologique [5] [3] [21]	25
 IV.2.1. Relief [6]	25
 IV.2.2. Pédologie [13] [17]	25
 IV.2.3. Contexte géologique et stratigraphique [4] [5] [22]	27
 IV.2.4. Hydrologie	30
 IV.2.5. Climatologie	31
 IV.2.6. Formation végétale [6]	33
IV.3. Structure de la population [6]	34
CHAPITRE V : TRAVAUX DE PROSPECTION	35
V.1. Méthodologie [11] [20] [25]	36
 V.1.1. Prospection par polarisation spontanée [11] [25]	36
 V.1.2. Tomographie de résistivité électrique (TRE) et polarisation provoquée (TPP)	38
 V.1.3. Sondage	40

V.2. Interprétation des résultats.....	44
V.2.1. Interprétation de la carte de polarisation spontanée [20]	45
V.2.2. Interprétation de la section électrique (TRE et TPP)	46
CONCLUSION PARTIELLE.....	48
PARTIE III : METHODOLOGIE ET APPLICATION.....	49
CHAPITRE VI : GEOSTATISTIQUE	50
VI.1. Objectifs de la géostatistique [16]	50
VI.2. Application de la géostatistique [16].....	50
VI.3. Comportements du variogramme [16] [24]	52
VI.3.1. Types de modèles courants	53
VI.3.2. La teneur moyenne [16]	55
VI.4. Variance de dispersion [16]	55
VI.4.1. Définition	55
VI.4.2. Expression de la variance de dispersion	56
VI.4.3. Variance des teneurs ponctuelles	58
VI.5. Variance d'estimation [16]	58
VI.5.1. Définition	58
VI.5.2. Calcul de la variance d'estimation	59
VI.6. Krigeage [1] [16] [21] [22] [24]	59
VI.6.1. Définition	59
VI.6.2. Principe du krigeage.....	59
VI.6.3. Krigeage simple en covariance	60
CHAPITRE VII : EVALUATION DE GRAPHITE EXPLOITABLE.....	63
VII.1. Logiciel ISATIS [W9]	63
VII.1.1. Les fonctionnalités dans ISATIS	64
VII.1.2. Justification et raison du choix de ce logiciel.....	64
VII.2. Traitement des données de sondages	65

VII.2.1. Analyse exploratoire des données	65
VII.2.2. Analyses statistiques et construction des histogrammes des variables	67
VII.2.3. Analyse variographique de la variable teneur et accumulation	68
VII.2.4. Modélisation du variogramme	69
VII.2.5. Validation du variogramme	71
VII.3. Modélisation par krigage	73
VII.3.1. Choix du bloc d'estimation	73
VII.3.2. Création des polygones	74
VII.3.3. Résultats et interprétations	75
VII.4. Estimation des réserves	78
CONCLUSION PARTIELLE	81
CONCLUSION GENERALE	82
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	I
REFERENCES WEBOGRAPHIQUES	III
ANNEXES	IV
TABLE DES MATIERES	XIV

RENSEIGNEMENTS

Auteur : RANDRIAMIASAMANANA Nirina Toky Jacobio

Contact : 034 61 480 30

Email : nathanwendy95@gmail.com

Niveau Master-Mention Ingénierie Minière-ESPA-Université d'Antananarivo



*****♦♦♦*****

Titre : « ESTIMATION DES RESERVES DE GISEMENT DE GRAPHITE D'UN SITE MINIER
DANS LE DISTRICT DE BRICKAVILLE PAR APPROCHE GEOSTATISTIQUE »

Résumé

Depuis les découvertes géologiques d'Henri BESAIRIE, Madagascar a toujours été jusqu'à aujourd'hui un pays avec un grand potentiel minier. La zone de Sahamamy se trouve sur la côte Est de Madagascar, plus précisément dans le district de Brickaville, dans la région Atsinanana. Elle fait partie du socle cristallin de Madagascar appartenant dans le système de graphite.

Les apports des travaux de prospection effectuée ont contribué à la présence de minéralisation et de réserve de graphite dans cette zone. Pour une meilleure évaluation du gisement de graphite, on a utilisé la géostatistique. Le modèle sphérique, un modèle classique utilisé fréquemment dans tout problème minier, a été choisi afin de représenter la variation des variables régionalisées. De plus on a utilisé la méthode de krigeage pour obtenir une évaluation beaucoup plus précise du gisement. C'est la méthode plus simple à utiliser et optimale en ce qui concerne l'estimation des réserves disponibles.

De ce fait la géostatistique est un outil efficace pour l'évaluation d'un gisement minier.

Mots clés : Sahamamy, graphite, géostatistique, variable régionalisée, krigeage

Abstract

Since the geological discoveries of Henri BESAIRIE, Madagascar has always been until today a country with great mining potential. The Sahamamy area is on the est coast of Madagascar, specifically in Brickaville District, in the Atsinanana region. It is part of crystalline base of Madagascar belonging in the graphite system.

The contributions of prospecting work carried out contributed to the presence of mineralization and graphite reserves in this area. For a better evaluation of the graphite deposit, geostatistics was used. The spherical model, a classic model frequently used in any mining problem, was chosen to represent the variation of regionalized variables. In addition, the kriging method was used to obtain a much more accurate assessment of the deposit. This is the simplest and best method of estimating available reserves.

As a result, geostatistics is an effective tool for the evaluation of a minera deposit.

Key words: Sahamamy, graphite, geostatistics, regionalised variable, kriging

*****♦♦♦*****

Nombre de pages : 83

Nombre de photos : 03

Nombre de cartes : 16

Nombre de figures : 17

Nombre de tableaux : 10

Nombre d'annexes : 04

Rapporteur : RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier