

## SOMMAIRE

**REMERCIEMENTS**

**LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES**

**LISTE DES CARTES**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**GLOSSAIRE**

**INTRODUCTION**

**PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GENERAL**

Chapitre 1 : Etablissement Gallois

Chapitre 2 : Généralités sur le graphite

**DEUXIEME PARTIE : EXPLORATION DU SITE D'ETUDE**

Chapitre 3 : Contexte général de la zone d'étude

Chapitre 4 : Travaux de prospection

**TROISIEME PARTIE : METHODOLOGIE ET APPLICATION**

Chapitre 5 : Géostatistique

Chapitre 6 : Evaluation du gisement de graphite

Conclusion générale

Références bibliographiques

Références webographiques

Annexes

Tables des matières

Résumé

## LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

**BRGM** : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

**C** : carbone

**°C**: degré Celsius

**ESPA** : Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

**Ets** : Etablissement

**g** : gramme

**GPS**: Global Positioning System

**H**: Hydrogène

**kg** : kilogramme

**mm** : millimètre

**m** : mètre

**PBNR**: Pebble Bed Nuclear Reactor

**PK**: Point Kilométrique

**RN** : Route Nationale

**Si** : Silicium

**S/té** : Société

**t** : tonne

**\$/t** : dollars par tonne

**t/an** : tonne par an

**USGS**: United States Geological Survey

LISTE DES ANNEXES

**Annexe 1 : Rapport de sondage de la colline 44 Ambodimangabe Marovintsy .....IV**  
**Annexe 2 : Quelques résultats sur Isatis ..... X**  
**Annexe 3 : Aperçu sur la géologie de Madagascar .....XI**  
**Annexe 4 : Le Précambrien malgache et les différents évènements géologiques**  
**(Razafinimparany, 1978) ..... XIV**  
**Annexe 5 : Photographies ..... XV**



## LISTE DES CARTES

<b>Carte 1: Carte des gîtes de graphite à Madagascar .....</b>	<b>20</b>
<b>Carte 2 : Axe graphiteux de la région orientale .....</b>	<b>21</b>
<b>Carte 3 : Axe graphiteux de la région Vatomandry.....</b>	<b>23</b>
<b>Carte 4 : Localisation de la zone d'étude .....</b>	<b>29</b>
<b>Carte 5 : Géologie de la zone d'étude .....</b>	<b>33</b>
<b>Carte 6 : Hydrographie de la région.....</b>	<b>34</b>
<b>Carte 7 : Occupation du sol.....</b>	<b>37</b>
<b>Carte 8 : Répartition des points d'échantillonnages .....</b>	<b>68</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1 : Organigramme de l'Ets Gallois Marovintsy .....</b>	<b>4</b>
<b>Figure 2 : Plan de masse de la mine.....</b>	<b>6</b>
<b>Figure 3 : Flowsheet de débouillage .....</b>	<b>8</b>
<b>Figure 4 : Production de graphite en 2014 par l'Etablissement Gallois Marovintsy.....</b>	<b>9</b>
<b>Figure 5 : Comparaison entre la morphologie du graphite et du diamant.....</b>	<b>11</b>
<b>Figure 6 : Formation du graphite amorphe.....</b>	<b>12</b>
<b>Figure 7: Formation de graphite lamellaire .....</b>	<b>13</b>
<b>Figure 8 : Formation de graphite filonien.....</b>	<b>14</b>
<b>Figure 9 : Evolution du prix de graphite.....</b>	<b>17</b>
<b>Figure 10 : Méthodes pour le choix de la ligne de base .....</b>	<b>44</b>
<b>Figure 11 : Résultat du sondage.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure 12 : Comportements du variogramme .....</b>	<b>55</b>
<b>Figure 13 : Interface du logiciel Isatis .....</b>	<b>65</b>
<b>Figure 14 : Histogrammes des teneurs et accumulations .....</b>	<b>69</b>
<b>Figure 15 : Variogrammes expérimentaux .....</b>	<b>70</b>
<b>Figure 16 : Ajustement des variogrammes .....</b>	<b>71</b>
<b>Figure 17 : Résultat de la validation croisée de la variable teneur .....</b>	<b>73</b>
<b>Figure 18 : Résultat de la validation croisée de la variable accumulation.....</b>	<b>74</b>
<b>Figure 19 : Bloc d'estimation .....</b>	<b>76</b>
<b>Figure 20 : Estimation par polygones.....</b>	<b>77</b>
<b>Figure 21 : Carte d'estimation après krigeage de la variable teneur .....</b>	<b>78</b>
<b>Figure 22 : Carte d'erreur après krigeage de la variable teneur.....</b>	<b>79</b>
<b>Figure 23 : Carte d'estimation après krigeage de la variable accumulation.....</b>	<b>79</b>
<b>Figure 24 : Carte d'erreur après krigeage de la variable accumulation.....</b>	<b>80</b>

LISTE DES PHOTOS

<b>Photo 1 : Exploitation de graphite de la mine IX de Marovintsy .....</b>	<b>5</b>
<b>Photo 2 : Laverie .....</b>	<b>6</b>
<b>Photo 3 : Aperçu de la région de Marovintsy .....</b>	<b>30</b>
<b>Photo 4: Sols de la région de Marovintsy .....</b>	<b>31</b>
<b>Photo 5 : Boussole.....</b>	<b>41</b>
<b>Photo 6 : GPS Garmin 72 .....</b>	<b>41</b>
<b>Photo 7 : Affleurement de graphite .....</b>	<b>43</b>
<b>Photo 8 : Sondage .....</b>	<b>45</b>
<b>Photo 9 : Tarière.....</b>	<b>46</b>
<b>Photo 10 : Concentré du graphite .....</b>	<b>49</b>
<b>Photo 11 : ROTAP.....</b>	<b>50</b>

LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1 : Production mondiale de graphite .....</b>	<b>16</b>
<b>Tableau 2 : Répartition de la population de Marovintsy .....</b>	<b>38</b>
<b>Tableau 3 : Carnet de terrain.....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau 4 : Description des variogrammes expérimentaux.....</b>	<b>70</b>
<b>Tableau 5 : Paramètres des variogrammes.....</b>	<b>71</b>
<b>Tableau 6 : Paramètres de validation croisée.....</b>	<b>75</b>
<b>Tableau 7 : Résultat de calcul par krigeage.....</b>	<b>77</b>
<b>Tableau 8 : Récapitulation des résultats .....</b>	<b>83</b>
<b>Tableau 9 : Répartition de cubage de minerai suivant les teneurs.....</b>	<b>83</b>

## GLOSSAIRE

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

**Concentré** : Produit obtenu à la sortie d'un procédé minéralurgique comportant la portion enrichie (minéraux de valeur)

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

**Flottation** : Procédé minéralurgique qui exploite l'affinité des surfaces hydrophobes (naturelles ou stimulées) des particules pour les bulles d'air afin d'effectuer une séparation.

**Géostatistique** : branche des statistiques qui s'intéresse à l'étude de processus qui se déploient de façon continue dans l'espace géographique.

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

**Granulométrie** : mesure des dimensions des grains d'un mélange dont le résultat est présenté sous forme de répartition statistique (distribution)

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

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

**Krigeage** : nom donné (d'après D.G. Krige, statisticien sud-africain ayant développé des méthodes empiriques d'évaluation des stocks d'or dans les années 1950) à un ensemble de méthodes d'interpolation permettant d'estimer la valeur d'une propriété en un point de l'espace géographique à partir des observations voisines, en utilisant la théorie des variables régionalisées.

**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, représente 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.

**Variance** : mesure de l'étalement équivalant au carré moyen de l'écart de chaque nombre par rapport à la moyenne d'un ensemble de données. 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.

**Variable régionalisée** : en géostatistique, fonction qui prend à chaque point de l'espace une valeur qui constitue une réalisation d'un processus aléatoire.

**Variogramme** : graphe représentant la semi-variance en fonction de la distance

## INTRODUCTION

Madagascar possède une grande potentialité et diversité en ressources minières. L'existence de ces réserves attire des grandes compagnies et depuis quelques années on y remarque le développement de la grande mine, un grand souffle pour l'économie du pays. On a ainsi la certitude que ces substances minérales peuvent constituer une richesse et une force qui pourront jouer un rôle prépondérant dans la réduction de la pauvreté et la croissance économique si elles sont exploitées rationnellement. Parmi ces ressources on peut citer le graphite, son exploitation dans le pays existe depuis les années 1900. Ses nombreuses propriétés le rendent utile dans divers applications industrielles et récemment, son utilisation accrue dans le secteur de la haute technologie, lui laisse présager un avenir prometteur sur le marché.

Plusieurs zones de minéralisation de graphite se rencontrent dans la grande île. Mais pour juger de l'exploitabilité d'un gisement donné, il s'avère primordial de réaliser une estimation des réserves et c'est dans ce cadre qu'intervient la géostatistique. La géostatistique est née de la prospection minière, et de la nécessité d'estimer avec le moins d'erreur possible un potentiel minier à partir de mesures ponctuelles des teneurs réalisées sur des sondages du sous-sol.

Ce mémoire intitulé « Estimation des réserves de gisement de graphite dans le site de Marovintsy par approche géostatistique » avance 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 région. Pour cela, cet ouvrage comporte trois grandes parties.

La première partie parle les généralités sur la société Gallois, celle qui exploite le graphite à Marovintsy, et le graphite proprement dit. 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.

**PREMIERE PARTIE**  
**CONTEXTE GENERAL**

## **CHAPITRE I : ETABLISSEMENT GALLOIS**

Le graphite de Madagascar est connu pour sa qualité exceptionnelle. En 1925, le pays était le premier exportateur mondial. La société Gallois est l'un des principaux producteurs de graphite de la grande île, de ce fait elle constitue une référence dans ce domaine.

### **I.1 Historique**

L'Etablissement Gallois (Ets) est une société anonyme (S.A) dont l'histoire se résume comme suit :

1900 : Fondation de la société Gallois par Augustin GALLOIS

1945 : Début de l'exploitation de graphite à Antsirakambo et de la production de fibres de sisal à Amboasary Sud

1957 : Début de l'exploitation de graphite à Marovintsy

### **I.2 Présentation de l'Etablissement Gallois**

Les Etablissements Gallois, société familiale, produisent et exportent du graphite, du sisal et du jojoba de Madagascar. Sa présence dans le pays remonte aux années 1900. Actuellement, son effectif général est de 1800 personnes, les bureaux de transit vers l'extérieur sont installés à Tamatave et à Fort-Dauphin.

Ci-après sont les renseignements généraux sur les Ets Gallois :

Direction générale à Antananarivo

Adresse : SIEGE SOCIAL 15 RUE BENYOWSKI ANTANANARIVO 101

BP.159 Isoraka – Antananarivo – Madagascar

Téléphone: (261) (20) 22 229 51

Fax: (261) (20) 22 344 52

Service de transit à Tamatave:

Lieu : Cité Canada - Tamatave

Téléphone: (261) (20) 53 322 66

Télécopie: (261) (20) 53 316 24

E-mail: galloismg@ets-gallois.com

Activités: Exploitation, traitement/raffinage et exportation de produit minier et agricole

Les clients de vente : Allemagne, Angleterre, USA, Mexique, Italie, France

### **I.3 Activités de la Société**

La production et l'exportation du graphite constituent l'une des principales activités de l'Ets Gallois. La société possède deux mines en activité, celle d'Antsirakambo et de Marovintsy, situées sur la côte Est de Madagascar dans la province de Toamasina. Les graphites obtenus dans les deux sites sont mélangés et préparés pour l'exportation dans une usine installée dans la ville de Tamatave. Les produits finaux sont ensuite acheminés vers le port. La production annuelle moyenne se chiffre à peu près à 5000t.

Pour les exploitations sisalières, elles se situent à Amboasary Sud dans la partie méridionale de Madagascar à environ 80 km à l'ouest du port de Taolagnaro sur une étendue de 6000ha.

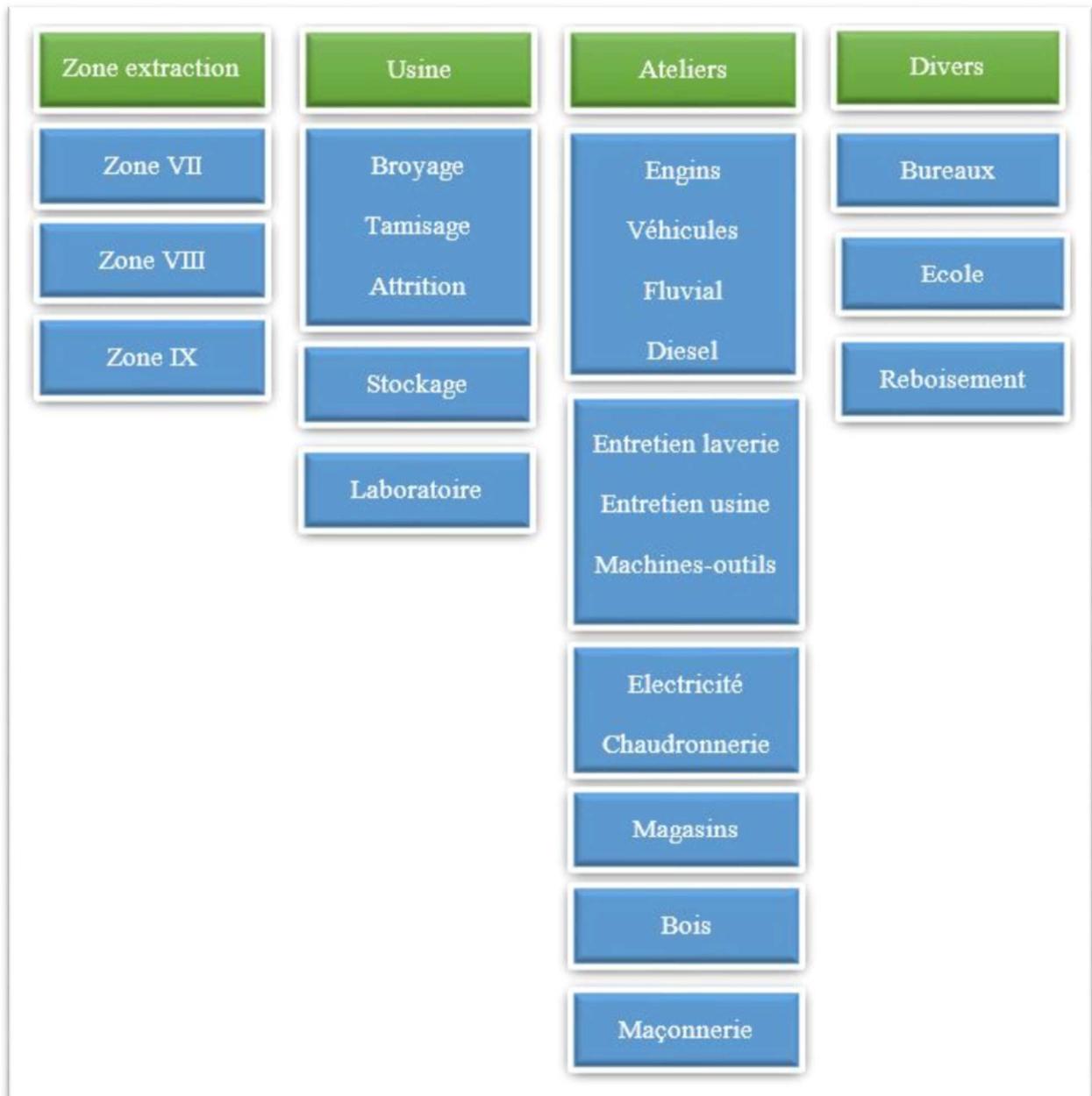
Etant donné le fait que l'étude dans cet ouvrage porte sur le gisement de graphite de Marovintsy, il s'avère nécessaire de faire une brève description des activités de la société qui l'exploite.

#### **I.3.1 Organigramme de l'Ets Gallois Marovintsy**

Pour être compétitif sur le marché et pour répondre à la demande des clients, une bonne administration et un bon partage des tâches doivent être instaurés au sein d'une société.

Pour l'Ets de Marovintsy, les branches d'activités qui y existent sont montrées par la figure 1 indiquant la présence de quatre grands départements interdépendants dont les fonctions sont bien distinctes et bien définies.

Concernant les personnels, il emploie 194 personnes, dont le Chef d'exploitation est le premier responsable du site. Parmi ces 194 personnes, on trouve 3 cadres, 5 Agents de maîtrise, 16 Chefs sections, 124 Permanents, 44 Journaliers et 2 Consultants.



(Source : Ets Gallois)

Figure 1 : Organigramme de l'Ets Gallois Marovintsy

#### I.4 Exploitation du graphite à Marovintsy

La société possède actuellement trois mines en exercice dont :

- Mine VII (à 1km au Nord du village)
- Mine VIII (à 2.5km au Nord du village)
- Mine IX (à 3km au Nord-Ouest du village)

Elle adopte les méthodes d'exploitation par slipping, par gradins simples. La pente moyenne des gradins est comprise entre 30 à 60° et la hauteur de front est comprise entre 5 à 10 m.



**Photo 1 : Exploitation de graphite de la mine IX de Marovintsy**

#### **I.4.1 Déroulement de l'exploitation**

##### **I.4.1.1 Mines**

- a) Préparation de l'extraction : cette phase consiste surtout à l'élaboration des plans d'extraction : emplacement des gradins, la largeur, le front d'attaque,...
- b) Décapage : le but de l'opération est d'enlever la couverture végétale et la couche de manteau latéritique.
- c) Extraction : une opération qui consiste à l'extraction directe du minerai par bulldozer.
- d) Transfert du minerai vers le lieu de mise à boue : le bulldozer pousse lui-même le minerai entre la zone d'extraction et le lieu de la mise à boue
- e) La mise à boue : le matériau arrosé par l'eau circule par gravité jusqu'à l'unité de laverie. La formation de tas se fait par pelletage manuel du matériau.

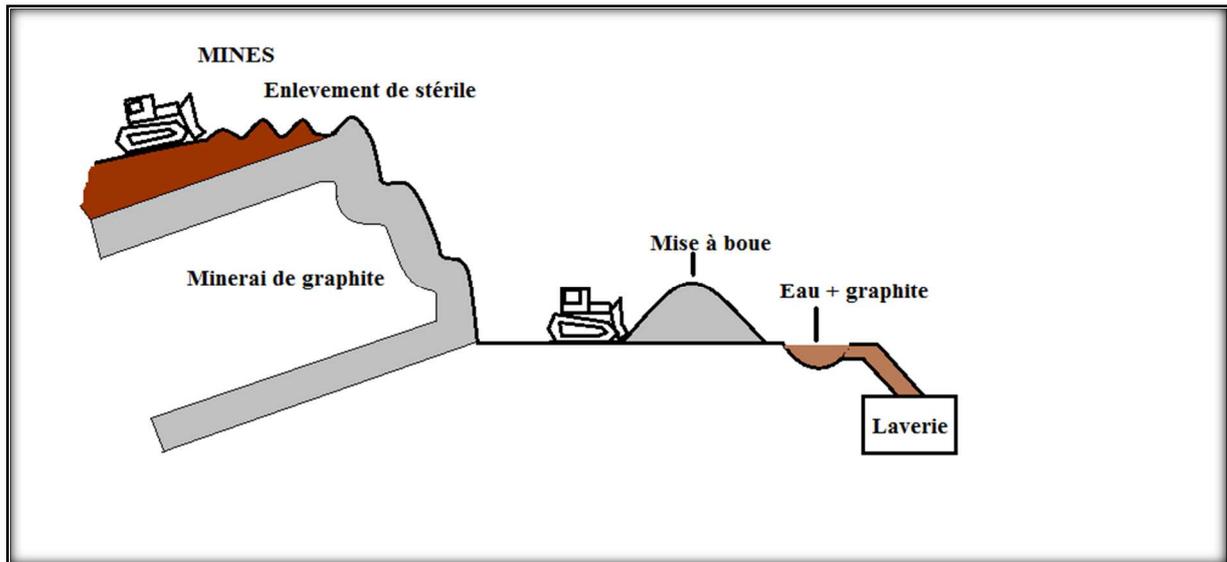


Figure 2 : Plan de masse de la mine

#### I.4.1.2 Flowsheet de débouillage

Par définition, le débouillage est une opération au niveau d'une laverie pour se débarrasser des particules argileuses par ajout des réactifs. La laverie est généralement installée à proximité de la mine. On la place le plus bas possible pour tirer le maximum de la « tanety » et diminuer le problème d'évacuation des sables.



Photo 2 : Laverie

Elle fonctionne en continu. Les boues vont subir principalement trois types de traitement:

- ✦ le concassage dont le rôle est de réduire les dimensions des minerais issus de l'extraction afin de pouvoir séparer les graphites des stériles ;
- ✦ le mélange est assuré par le mélangeur à pales ;

- ✦ la séparation des solides (graphite) par des opérations de criblage et de flottation.

Le principe de fonctionnement de la laverie peut être décomposé en plusieurs opérations élémentaires :

- Approvisionnement de la trémie d'alimentation en boue de l'unité ;
- Concassage : première opération de fragmentation ;
- Broyage et triage des produits concassés : cette opération se fait sur le trommel. Les refus de ce trommel sont stockés sur la place de triage et sont utilisés à d'autres fins (revêtement de piste).
- Opérations de fragmentation et de mélange : les minerais broyés passent dans un mélangeur à pales afin de mettre en suspension les particules du graphite. L'ajout des réactifs se fait en continue. On utilise le pétrole comme collecteur et le Montanol 800 comme moussant.
- Conditionnement de la pulpe et flottation ;
- Récupération des écumes et transfert vers les cases de décantation ;
- Egouttage : à l'entrée des cases de décantation, une partie notable des eaux des écumes y est éliminée ;
- Stockage des débourbés : les débourbés égouttés sont stockés dans des bassins de stockage en dur à ciel ouvert ;
- Chargement et transport des débourbés : le chargement dans les camions se fait par pelletage manuel. Le déchargement se fait par basculement en arrière de la benne du camion.

La figure suivante récapitule les trajets des minerais de graphite dans la laverie.

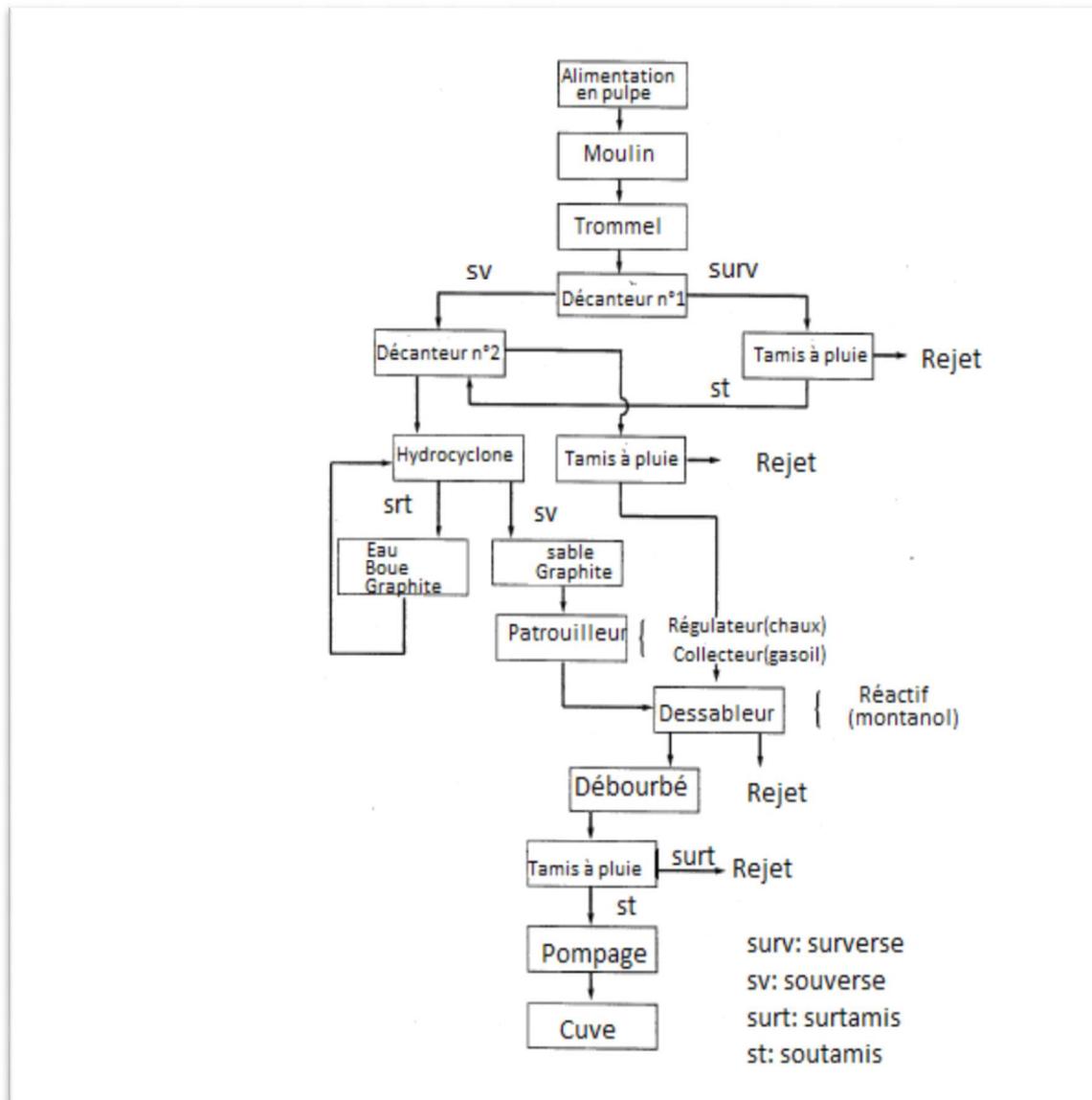


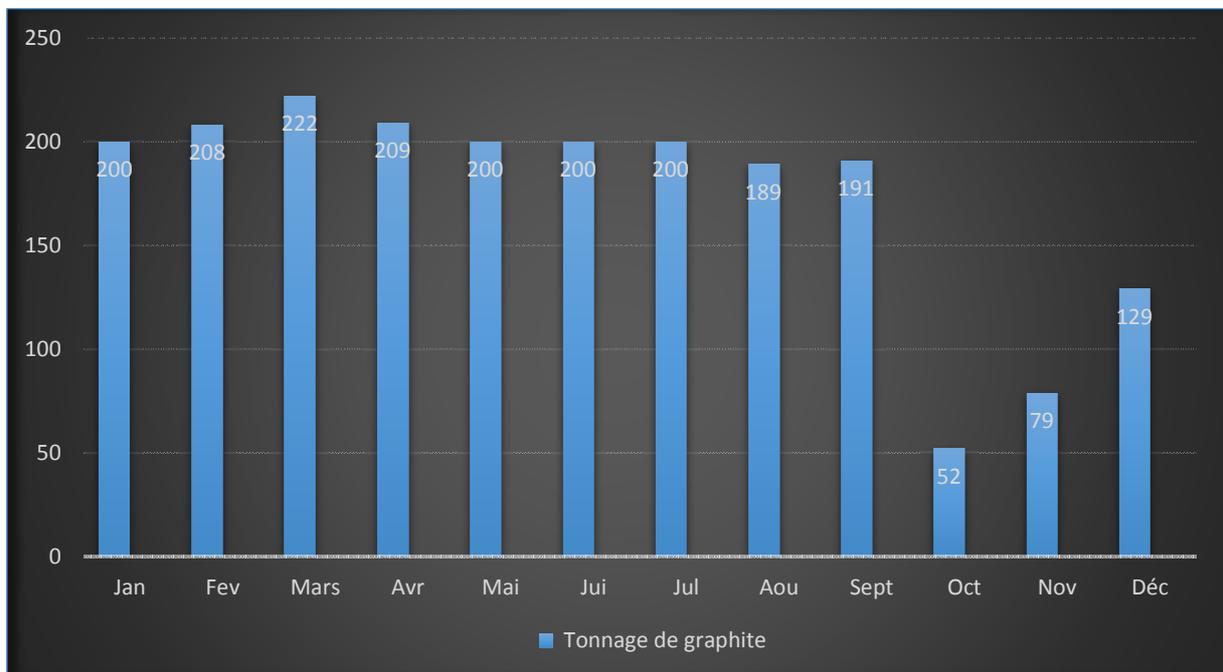
Figure 3 : Flowsheet de débouillage

### I.5 Production

L'Etablissement Gallois Marovintsy occupe une place importante dans l'exportation de graphite à Madagascar. Il produit, depuis 1957, du graphite en paillette de qualité supérieure dont la teneur en carbone peut atteindre les 80 à 95%. Mais à cause des vieillissements et des fautes d'appareils, on constate une diminution de la production et actuellement, celle-ci est de 6.5t en moyenne par jour. Les trois zones d'exploitations (Zone VII, Zone VIII, Zone IX) fournissent du graphite :

- ✦ en grande paillette (GR) ;
- ✦ moyenne paillette (MP) ;
- ✦ petite paillette (PP) ;
- ✦ fine paillette (FP) ;
- ✦ extra fine paillette (EFP).

Les graphites en grande et moyenne paillette sont les plus abondants. La figure suivante montre les productions mensuelles de l'année 2014.



*(Source : Ets Gallois)*

**Figure 4 : Production de graphite en 2014 par l'Etablissement Gallois Marovintsy**

## **CHAPITRE II : GENERALITES SUR LE GRAPHITE**

Etant un carbone aux propriétés uniques, le graphite fait l'objet de multiples utilisations industrielles, commerciales et de haute technologie. Madagascar possède des ressources importantes de ce minerai. Ce chapitre a été abordé afin de donner plus amples connaissances sur le graphite ainsi que les réserves exploitables dans la grande île.

### **II.1 Historiques [W1] [W2]**

Au XVII<sup>ème</sup> siècle, un important gisement de minerais de couleur noir semblable au plomb a été découvert en Angleterre d'où son appellation plombagine. Un siècle plus tard, le suédois Carl Wilhelm Scheele a identifié qu'il s'agissait en fait du minerai de graphite.

Le graphite a été nommé ainsi d'après un chimiste et minéralogiste allemand appelé Alfred Gottlieb Werner en 1789. Le terme graphite vient du mot grec « graphein » qui signifie écrire.

#### **II.1.1 Minéralogie descriptive [W1] [W2] [6]**

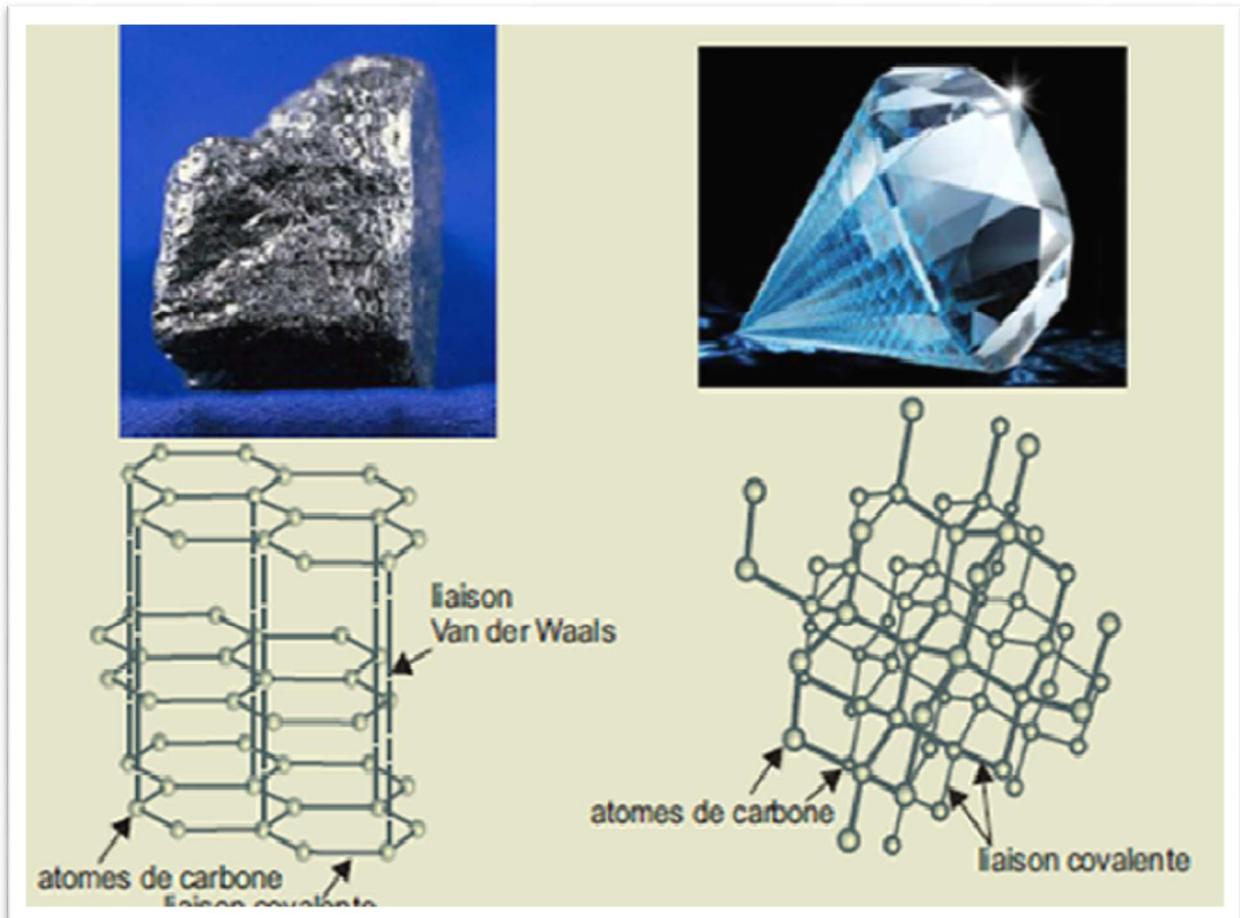
Le carbone se présente sous 04 formes allotropiques, le diamant, le fullerène, le carbone amorphe et le graphite qui est la forme stable du carbone à température et à pression ordinaires. Les atomes de carbone qui sont liés à trois autres atomes de carbone par des liaisons covalentes forment un réseau infini d'hexagones.

Ces hexagones forment à leurs tours des couches appelées graphènes. Entre les feuillets, les liaisons sont faibles, de type Liaison de Van der Waals, ce qui explique le clivage et la faible dureté. Par contre, chez le diamant, chaque atome de carbone est entouré de quatre liaisons covalentes dans un arrangement tétraédrique, ce qui leurs confèrent une forte interaction et donc une grande dureté.

Le graphite est un minéral natif qui se cristallise dans le système hexagonal. Il a un clivage parfait et se fracture en feuillets. Sa densité cristallographique est de 2,26 à 2,30 qui pourrait être supérieure à cet intervalle s'il contient des impuretés et inférieur dans le cas où il comporte des porosités.

L'apparence du graphite est celle d'un solide noir à l'éclat submétallique ; sa dureté est faible, entre 1 et 2 sur l'échelle de Mohs. Il tâche les doigts et son coefficient de frottement est faible.

Le graphite a une haute conductivité réfractaire puisqu'il ne fond pas au chalumeau (c'est le solide élémentaire le plus stable à haute température) et il est également chimiquement inerte.



(Source : New Brunswick)

**Figure 5: Comparaison entre la morphologie du graphite et du diamant**

### II.1.2 Métallogénie du graphite [W3] [W4] [W5]

Le graphite se forme à haute température et à haute pression. Ce sont des conditions essentielles pour transformer le carbone amorphe en graphite cristallin. Par conséquent, il se forme soit dans les roches métamorphiques soit dans les roches ignées. Il ne se forme jamais dans les couches sédimentaires mais on peut l'y retrouver en tant que produit d'érosion et d'altération. A part cela, le milieu dans lequel s'est formé le graphite doit être pauvre en

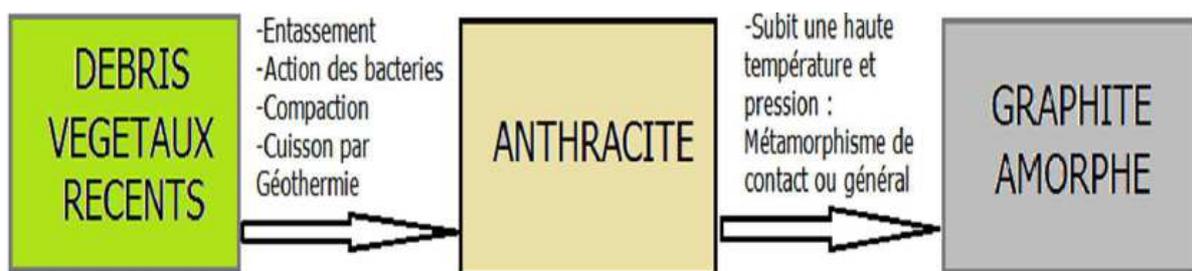
oxygène. En effet, il doit se former dans un milieu favorable à la réaction de réduction puisqu'à haute température, le carbone se combine avec l'oxygène pour former du monoxyde de carbone ou du dioxyde de carbone.

### II.1.3 Classification du graphite [W1] [W3] [6]

Le graphite naturel se présente sous trois formes différentes : le graphite amorphe, le graphite en paillette et le graphite filonien. Ces trois types de graphite se rencontrent dans des environnements géologiques différents.

#### II.1.3.1 Graphite amorphe

Le graphite amorphe, comme son nom l'indique, ne possède pas de forme cristalline raison pour laquelle on le nomme également graphite microcristallin ou cryptocristallin. C'est un graphite massif et non stratifié. Il résulte de la transformation d'une couche d'antracite (charbon) à la suite d'un métamorphisme de contact, il est donc d'origine organique. De tous les graphites, c'est celui qui présente le plus d'impureté : 40 à 60 % alors que les autres en contiennent 10% et moins. Ceci est probablement dû au fait que les proto-carbones ont été déposés contemporanément et associés avec des impuretés de quartz ou d'argiles.



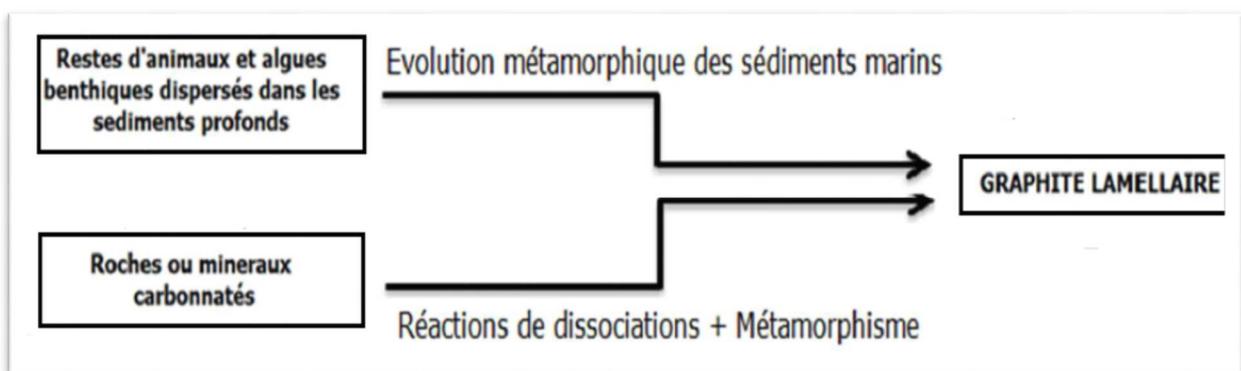
(Source : [www.asbury.com](http://www.asbury.com))

**Figure 6: Formation du graphite amorphe**

#### II.1.3.2 Graphite en paillette

Le graphite en paillette est le graphite le plus familier parce qu'on l'utilise comme mine de crayons. Macroscopiquement, il se présente sous forme de lamelles aplatis. Ainsi, en microcristalline, ce graphite présente un arrangement bien défini.

Ce type est le plus répandu dans le monde. Des gisements ont été exploités aux Etats-Unis, en Amérique du sud, en Allemagne, en Chine ainsi qu'à Madagascar. Le graphite en paillette se rencontre surtout dans les roches métamorphiques, rarement dans les roches ignées. Les pétrologues pensent que les graphites en paillettes se sont formés sous faciès granulite (à une pression d'environ 10 kbars et une température avoisinant les 750°C). Sur le marché, il est considéré comme graphite de haute qualité puisqu'il renferme généralement une teneur en carbone supérieure ou égale à 90%. L'origine du carbone peut être organique ou inorganique, il proviendrait de micro-organismes ou algues benthiques du protérozoïque qui seraient tombés au fond des océans.

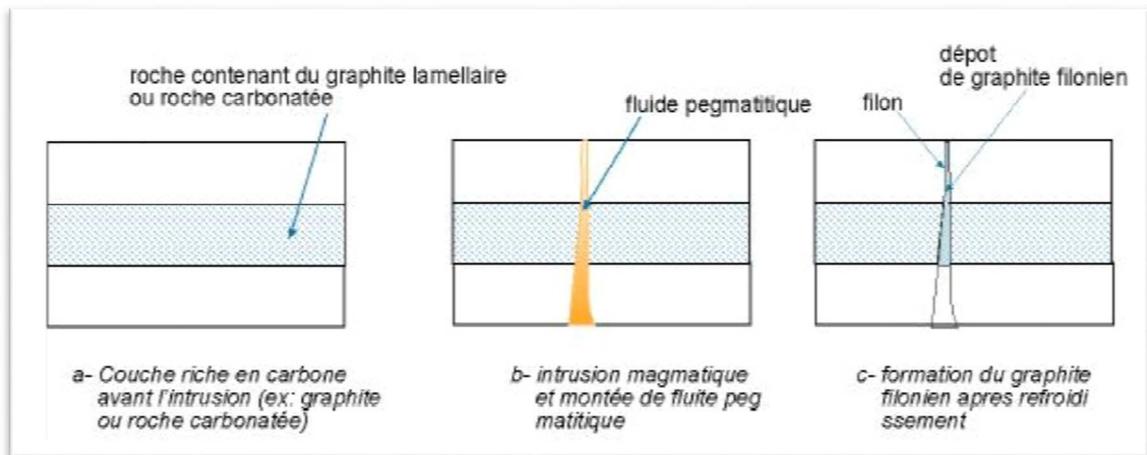


(Source : [www.asbury.com](http://www.asbury.com))

**Figure 7: Formation de graphite lamellaire**

### II.1.3.3 Graphite en bloc ou graphite filonien

Le graphite en bloc ou graphite filonien est un type contenu dans les fissures ou filon de l'écorce terrestre. On l'appelle également graphite de Ceylan parce que c'est le seul pays qui le commercialise. Il est souvent associé à d'autres minéraux hydrothermaux comblant les fissures. Le graphite filonien présente également une haute teneur en carbone de 90 à 95 %. L'origine du carbone reste encore mal comprise. Cependant, certains scientifiques pensent que lors des intrusions, des fluides pegmatitiques ont entraînés des graphites en paillettes déposés plus loin.



(Source : [www.asbury.com](http://www.asbury.com))

**Figure 8 : Formation de graphite filonien**

## II.2 Utilisation et marché mondial du graphite [6] [W4] [W5]

### II.2.1 Utilisation [6]

A cause de ses multiples propriétés, le graphite trouve ses applications dans de nombreux domaines.

#### Fonderie

Du fait de sa grande résistance thermique et sa bonne conductibilité thermique, le graphite entre dans la composition d'enduits destinés à recouvrir la surface des moules de fonderie pour éviter le phénomène de dilatation provoqué par le métal en fusion.

#### Réfractaire

Ayant un pouvoir réfractaire élevé, il entre dans la fabrication de revêtements d'engins aérospatiaux, participe aux revêtements des orifices de coulée des fours.

#### Balais pour moteurs électrique, pile sèche, électrode

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

#### Matériaux de friction : garnitures de freins et embrayages

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

### **Lubrifiants**

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

### **Crayons**

On mélange le graphite avec un peu d'argile et d'autres adjuvants puis cuit à une température de 1000 à 1800°C, on fabrique la mine de crayon.

### **Autres applications**

#### **❖ Peinture**

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

#### **❖ Forages**

Le graphite est utilisé comme additif dans les boues de forage où il contribue à renforcer le « mud-cake » essentiel pour la tenue des parois des forages.

#### **❖ Nucléaire**

Le graphite présente une faible absorption des rayons X et des neutrons, une forte conductivité thermique et une aptitude à conserver ces propriétés à haute température. Il 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 du verre**

Les équipements utilisés pour la fabrication de verre utilisent de préférence du graphite amorphe, de granulométrie très fine ( $> 1 \mu\text{m}$ )

### II.2.2 Principaux pays producteurs [6] [W5] [W8]

On découvre des gisements de graphite naturel partout dans le monde, néanmoins on peut retenir certains pays qui exploitent ces gisements :

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

La Chine domine largement le marché en fournissant environ 73 % de la production mondiale. Elle est suivie de l'Inde avec environ 11% et du Brésil avec 7%, seul pays producteur de graphite naturel d'Amérique du Sud qui a considérablement augmenté sa production. Le reste de la production se répartit entre une quinzaine de pays (Canada, Corée du Nord, Sri Lanka, Autriche, Norvège, Madagascar...). Le tableau ci-dessous montre la production mondiale de graphite.

**Tableau 1 : Production mondiale de graphite**

Année \ Pays	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chine	72000000	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)

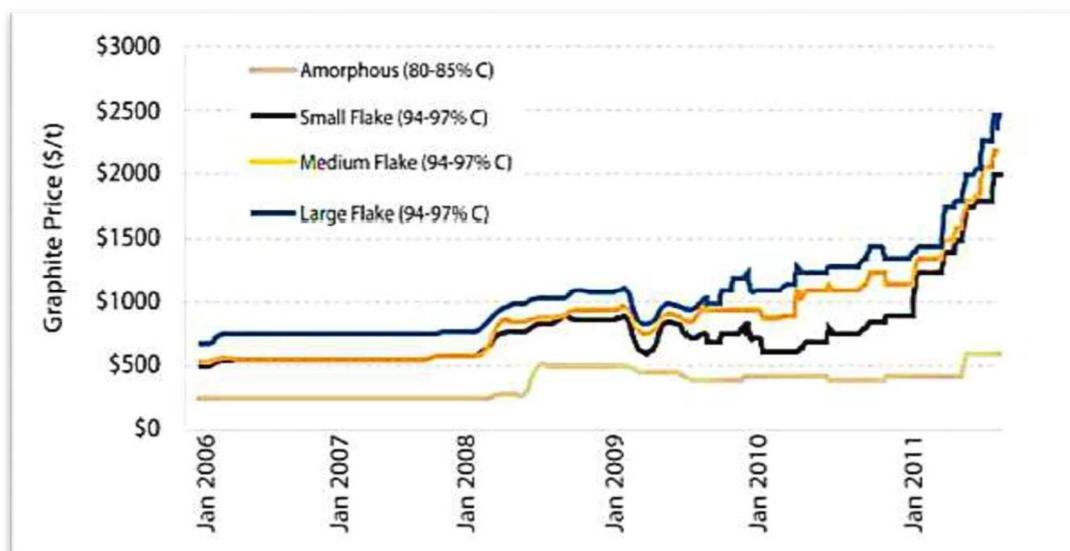
### II.2.3 Répartition de la consommation [W4] [W5]

Les principaux importateurs sont, en 2005, 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.

Actuellement, c'est le graphite lamellaire qui est très recherché. Reconnu pour ses applications à forte valeur ajoutée, il est limité à la Chine, au Brésil et au Canada. Ce qui fait que juste 40% de la production mondiale est constituée de graphite lamellaire. En fait, il n'en est produit annuellement que 400 000 tonnes alors que la demande mondiale y afférente devrait croître de 30% par an de 2011 à 2016. Cette demande croissante est surtout due à l'augmentation des fabricants de batteries au lithium-ion.

### II.2.4 Prix sur le marché [W3] [W4] [W6]

Les prix du graphite dépendent de sa nature (paillette ou amorphe) et de sa teneur en carbone. Ils ont augmenté entre 2007 et 2008, en raison de l'augmentation de la demande et du relèvement par la Chine de ses taxes à l'export. Ils ont baissé début 2009 avec la crise financière, puis ont ensuite fortement augmenté jusqu'à fin 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 9 : Evolution du prix de graphite**

### **II.3 Graphite à Madagascar [5]**

A Madagascar, le graphite 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 Tolongoïna. Les réserves en graphite de Madagascar sont considérables. De ce fait, les travaux de prospections de plusieurs auteurs tels que ceux de H. Besairie, J.A. Rasoamahanina ou encore Noizet ainsi que les informations concernant le volet exploitation et commercialisation recueillis auprès des exploitants de l'époque ont été synthétisés afin 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**

Cette puissance doit être au moins de 5m sinon, il est très difficile d'atteindre les 100 000t de réserves en minerai tout venant qui pourrait justifier l'implantation d'une installation de pré concentration. En effet, de telles réserves, à une teneur relative de 5%, représentent une production de 5000t en graphite, d'où cinq à dix années de durées de vie pour une cadence minimum de 500 à 1000t/an.

#### **✦ la qualité du graphite**

Ce critère est très important car l'objectif sera 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. Avec un produit dont la dimension des paillettes et la teneur en carbone sont de bonnes qualités, le prix de vente et la facilité de commercialisation vont croître.

#### **✦ l'accessibilité et la proximité d'un port**

En effet, l'évacuation et l'accessibilité sont importantes. Les gisements placés près d'une voie ferrée, d'une route bitumée ou d'un port présentent plus d'avantage.

#### **✦ le pendage de l'horizon graphite**

Le but est de réduire au maximum le coût d'extraction. Cela consiste alors à extraire le minimum de stérile. Il est donc plus favorable de faire l'extraction sur une couche horizontale, parallèle au versant.

### ✦ la profondeur d'altération

L'objectif est d'éviter l'abattage à l'explosif et le broyage du minerai, généralement trop coûteux. De plus, les paillettes vont être brisées. L'altération d'un horizon de gneiss graphiteux feldspathique se fait beaucoup plus en profondeur qu'un horizon quartzitique.

### ✦ la présence d'eau

L'exploitation du graphite nécessite une grande quantité d'eau. En effet, la carrière et l'unité de débouillage consomment  $80\text{m}^3$  d'eau par heure pour produire l'équivalent de 1,5t de graphite raffiné par poste. Les exploitants travaillent généralement en eau perdue mais il est certain qu'en cas de pénurie, cette eau peut être décantée et recyclée.

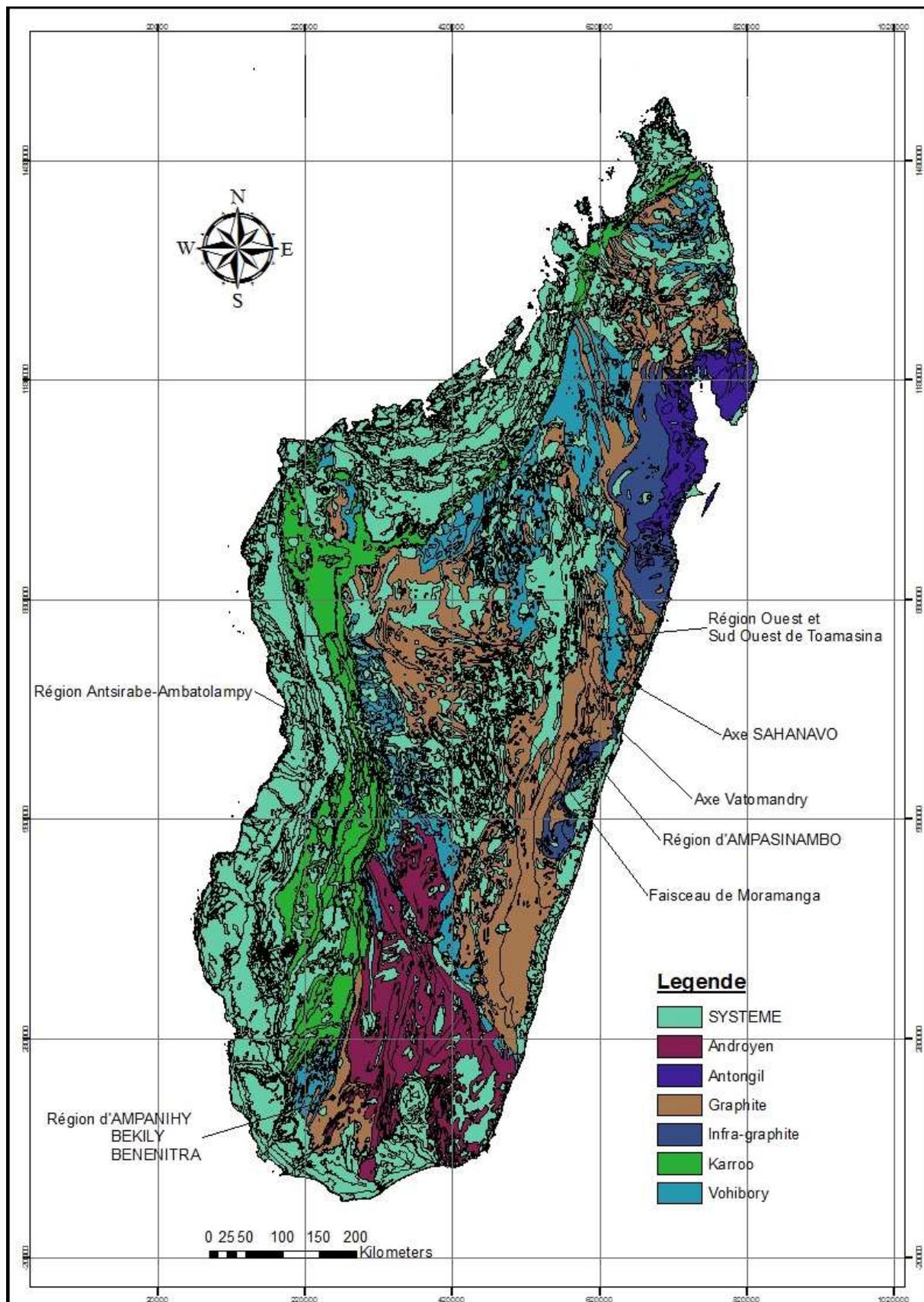
### ✦ la présence d'une source d'énergie

Dans toute exploitation minière, une source d'énergie est assez importante, il peut s'agir d'une ligne électrique appartenant au réseau national, ou mieux d'un torrent offrant la possibilité d'un équipement de microcentrale électrique. Mais la facilité d'approvisionnement en bois ou charbon est aussi utile ne serait-ce que pour le séchage des concentrés.

### **II.3.1 Indices graphiteux de Madagascar [5] [17]**

Les gisements de graphite à Madagascar se rencontrent principalement dans les régions citées ci-après: la région orientale, la région Antsirabe-Ambatolampy et la région d'Ampanihy.

(Voir carte 1)

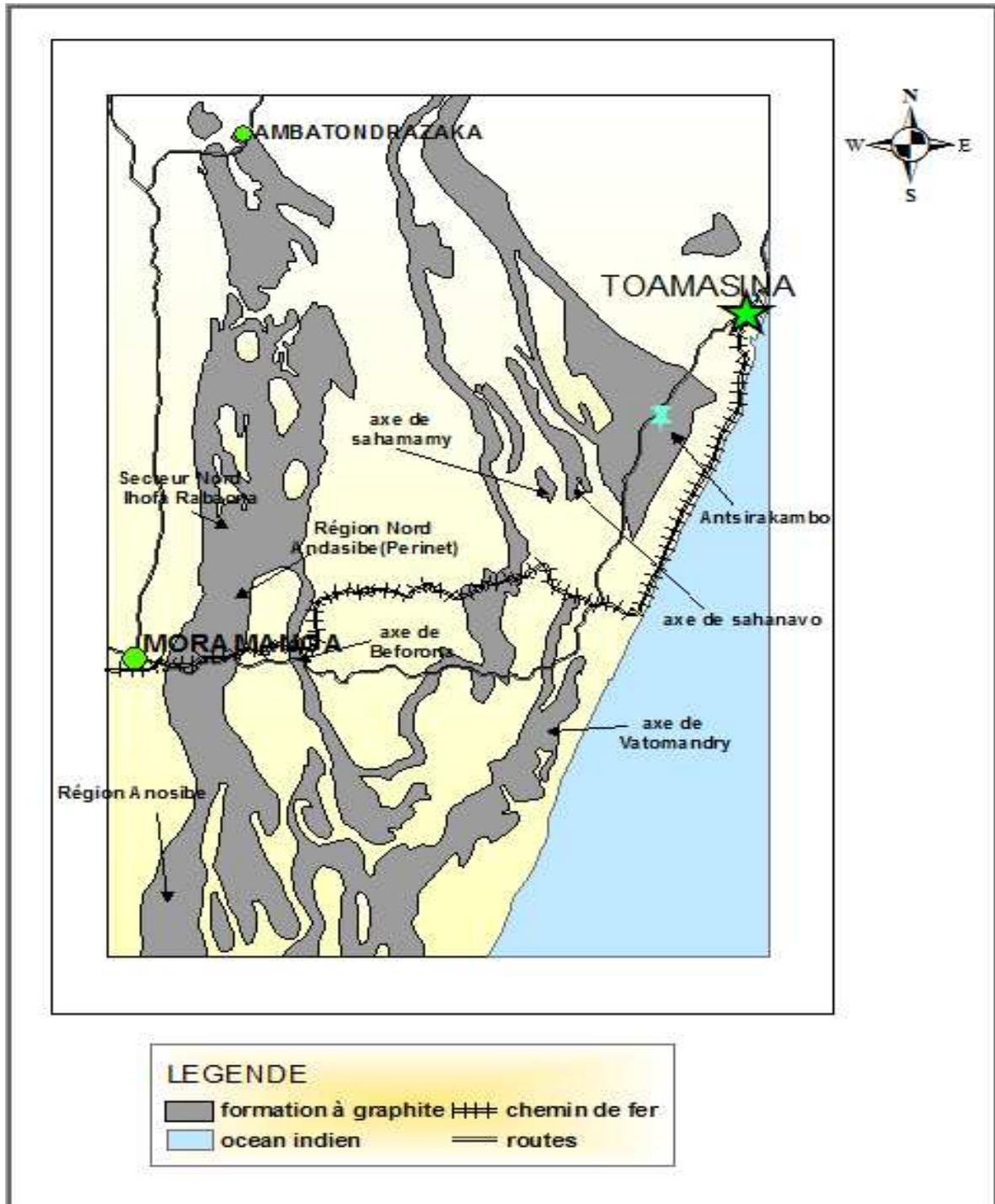


(Source : BD 500)

Carte 1: Carte des gîtes de graphite à Madagascar

### II.3.1.1 Région orientale

Dans cette région, les indices de graphite se trouvent principalement au niveau d'Ampasinambo, la partie 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 région orientale**

**a. Faisceau de Moramanga**

✦ **Localisation**

Le faisceau de Moramanga est formé d'un ensemble de faisceau de direction sensiblement Nord Sud partant d'Ambatondrazaka et prend fin à Anosibe.

Ce faisceau est subdivisé en secteur :

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

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

✦ **Géologie et topographie**

Dans cette région, on peut retrouver une formation à migmatites appelée migmatite granitoïde de Brickaville à la base. Suivie après par des formations à gneiss graphiteux latéralisés qui reposent en concordance sur le socle. La plupart des gisements en exploitations et exploitables ont un pendage favorable (subhorizontal).

✦ **Type de graphite**

On trouve d'une part les graphites de grosses paillettes dans la partie d'Andasifahatelo qui sont déjà en exploitation et d'autre part, les gisements importants de petites et moyennes paillettes.

**b. Axe Vatondry**

✦ **Localisation**

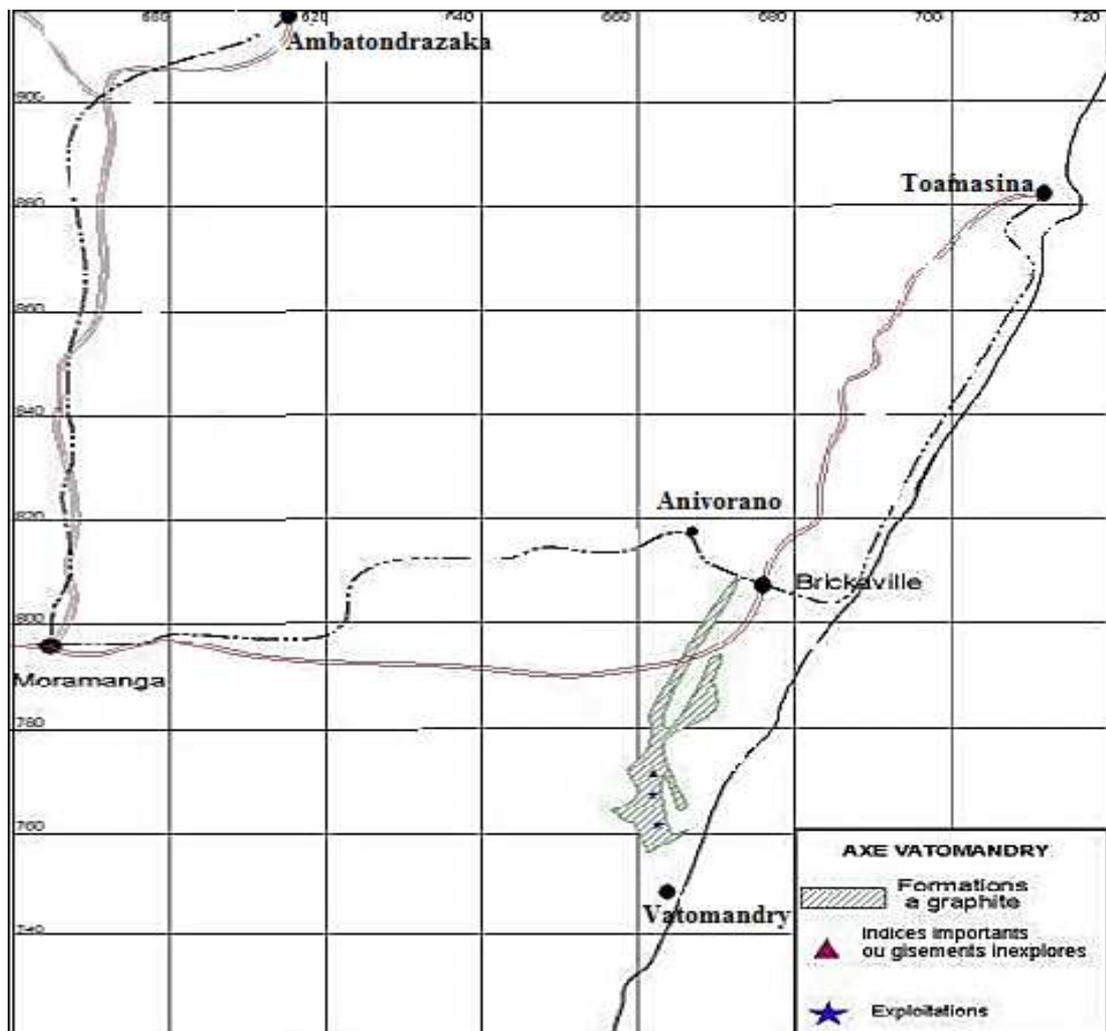
Les exploitations se trouvaient à environ 23 km au nord de Vatondry. De plus, des réserves de graphite se trouvent dans un rayon de 2,5 km du mont AMBOHITRANALA. On peut accéder à ce mont à partir de Vatondry en prenant le chemin menant vers Ambilalematso jusqu'à Vohitrampasina, il est au environ de 25 km au nord, 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 sensiblement égale à celle de la côte Est malgache. La couche de gneiss migmatisé à graphite se trouve sous une autre couche de gneiss stérile. Dans cette axe, la couche minéralisée est assez épaisse car sa puissance peut atteindre 50 m. Dans l'exploitation qui se trouve plus au nord c'est-à-dire à Marivolanitra la couche graphiteuse est très plissée et dessinant une boutonnière anticlinale complexe. 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 forte teneur en carbone car la concentration moyenne est de 85 %.



*(Source : Ministère des Mines)*

**Carte 3 : Axe graphiteux de la région Vatomandry**

**c. Région d'Ampasinambo**

Actuellement, on a peu d'information et de donnée sur cette région en raison de la difficulté d'accès. De plus, elle est parfois submergée par la mer et les couches ont un pendage sub-vertical.

Malgré tout, cette région a une assez forte potentialité en graphite car de là, des petites exploitations ont vu le jour et ont gratté des grands gisements qui pouvaient s'étendre jusqu'à des centaines de mètres.

**d. Axe sahanavo-sahamamy**

✦ **Localisation**

Le gisement de Sahamamy se situe à 20 km au nord d'Anivorano et celui de Sahanavo se trouve au nord de Brickaville, on y accède par voie routière en empruntant le chemin d'Ambinaninony sur la route de Brickaville. Ces deux axes sont généralement de petites dimensions.

✦ **Géologie et topographie**

Ces deux gisements c'est à dire celle de SAHANAVO et de SAHAMAMY se trouvent sur une même formation qui est la migmatite granitoïde de Brickaville. La topographie dans la vallée de SAHANAVO est relativement plate. Les couches graphiteuses plongent en sens inverse de la pente topographique, ce qui engendre une difficulté lors de l'exploitation mais par contre la couche de graphite a une puissance atteignant souvent 100 m.

La région de SAHAMAMY a une structure de détail relativement complexe avec plis, assez serré et plongement généralement faibles de 20 à 40°. On observe aussi dans cette zone une charnière renfermant un banc graphiteux d'une puissance d'environ vingt mètres. 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 minerai de gneiss à sillimanite, parfois à passage quartzeux.

### **e. Région ouest et sud-ouest de Toamasina**

#### **✦ Localisation**

La zone 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 partie, on recense de nombreux points d'indices mais seulement deux points principales gites 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 à une cinquantaine 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. Elle repose au-dessous des gneiss sans graphite.

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

#### **✦ Types de graphite**

Les types de graphite trouvés dans ces régions sont en fines paillettes au niveau d'Antetetzampaly 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 48000t de graphite.

### **II.3.1.2 Région d'Ampanihy-Bekily-Benenitra**

#### **✦ Localisation :**

Cette partie du gîte de 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. La spécificité de cette région est son climat aride et sa faible pluviométrie. A raison de cela, il y a peu de couverture végétale.

#### **✦ Géologie et topographie :**

La région n'est pas latéralisée et les affleurements de graphite sont parfaitement visibles. Le groupe d'Ampanihy est essentiellement formé par des roches dures telles que les gneiss et leuco-gneiss comme les leptynites. La formation de ces roches est due à un métamorphisme intense connu sous le nom de faciès granulite à une température de plus de 700°C et une pression de 15 bars. A Tranoroa, les couches graphiteuses sont souvent très puissantes atteignant même 150 m avec une teneur en carbone avoisinant les 75%.

#### **✦ Type de graphite :**

Le graphite rencontré dans cette région est de type Ceylan. Facilement observable et contenu dans des filons quartzeux, il fait office de remplissage des filons quartzeux 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.

### **II.3.1.3 Région d'Antsirabe-Ambatolampy**

L'exploitation a été intensive dans cette région depuis 1910 jusqu'en 1953 d'après les conclusions de H.Besairie. Mais à partir de 1953, on avait constaté une fermeture de toutes les exploitations. Les causes de ce repli sont multiples :

D'une part, la plupart des gros gisements bien installés arrivaient à épuisement car l'Amas de stérile est de puissance métrique élevé et l'exploitation à ciel ouvert n'est plus économiquement rentable à cause 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 trouvés 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. Il en existe trois types dans la nature dont le graphite amorphe, en paillette et filonien. Le graphite en paillette est le plus répandu et le plus demandé dans le monde en raison de ses diverses applications. A Madagascar, trois grandes régions présentent des indices graphiteux importants selon les multiples travaux de recherches effectués. Mais la partie orientale, y compris la région de Marovintsy, zone exploitée par la société Gallois, se distingue par la bonne qualité de ses gisements.

**DEUXIEME PARTIE**  
**EXPLORATION DU SITE**  
**D'ETUDE**

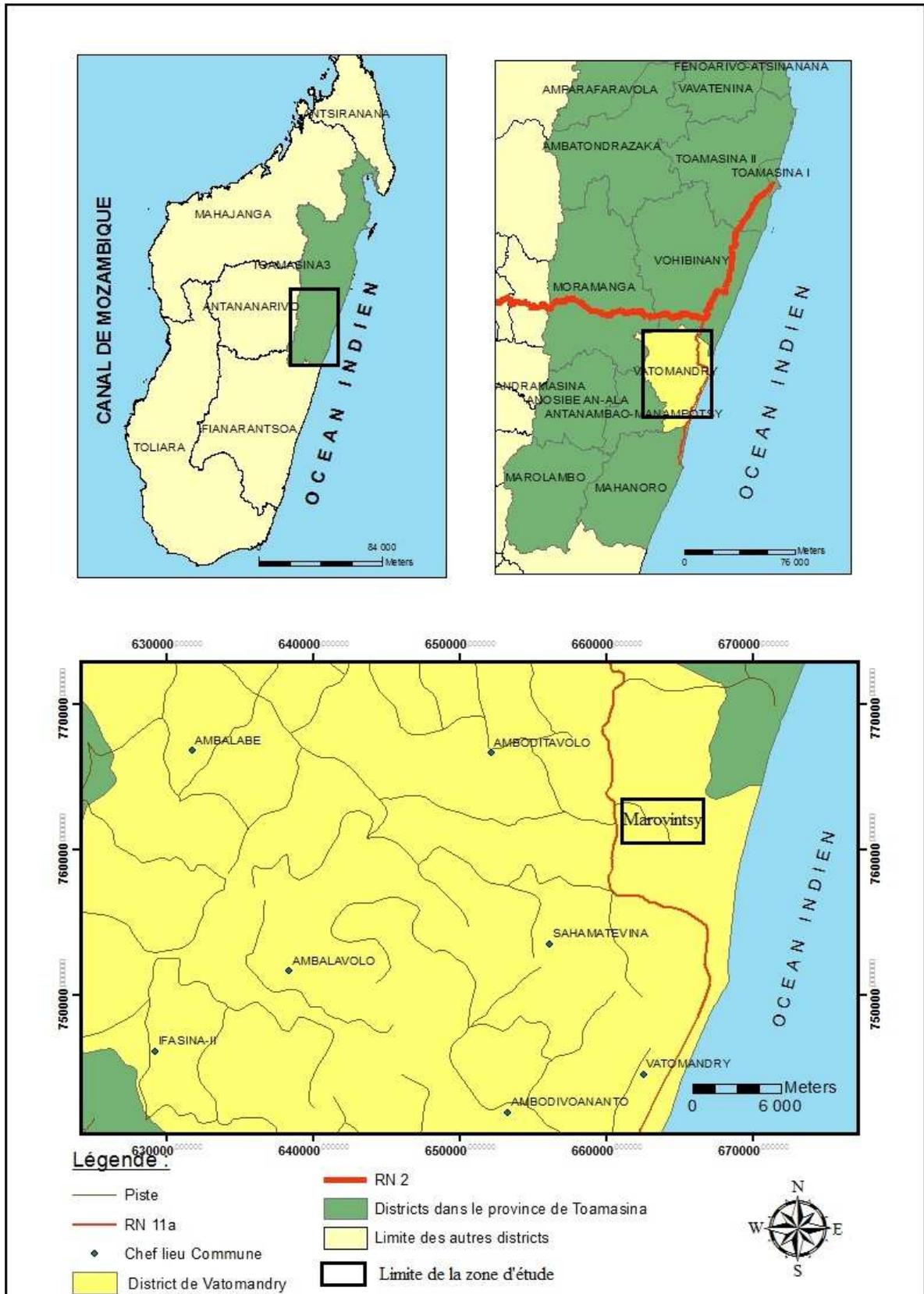
## CHAPITRE III : CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

La Côte Est de Madagascar se distingue des autres régions par 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...

C'est dans cette partie de l'île que notre étude a été réalisée, plus précisément dans la région de Vatondry. Dans ce chapitre, on va donner les caractéristiques physiques et socio-économiques de cette zone.

### III.1 Localisation géographique

La zone d'étude se situe à l'Est de Madagascar dans la Région Atsinanana, District de Vatondry, Commune Rurale de Sahamatevina, Fokontany de Marovintsy. Le site en question se trouve dans le périmètre minier de l'Etablissement Gallois, repéré par les coordonnées géographiques Laborde X = 664700 m et Y = 760900 m. On peut y accéder par la RN2 reliant Antananarivo-Toamasina. Une fois à Antsampanana, on prend la RN11a vers Mananjary et à 20 km avant d'arriver à Vatondry, au PK 34, on joint la bifurcation qui mène vers le village situé à une distance de 7 km.



(Source : BD 500)

Carte 4 : Localisation de la zone d'étude

## III.2 Contexte physique et biologique [8] [5] [21]

### III.2.1 Relief [8]

La Région Atsinanana se démarque des régions avoisinantes par une 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; caractérisée par deux complexes :

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



**Photo 3 : Aperçu de la région de Marovintsy**

### III.2.2 Pédologie

Trois types de sols décoiffent la région :

**Les sols hydromorphes** se trouvant dans les bas-fonds, ils sont dénommés localement « horaka ». Ces sols sont en permanence saturés d'eau et dégagent une odeur de soufre. De

couleur noirâtre, ils présentent des dépôts ferrugineux de couleur rouille à la surface de l'eau. Les matières organiques y sont mal décomposées. Ce type de sol, pour être favorable à la riziculture nécessite beaucoup de drainage ;

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

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



**Photo 4: Sols de la région de Marovintsy**

#### **III.2.3 Contexte géologique et stratigraphique [5] [6] [21]**

Géologiquement, la partie Est de Madagascar est marquée par la juxtaposition de deux étalons de terrains :

- ✦ les terrains sédimentaires qui couvrent la partie Nord Est et Sud Est, précisés 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 Toamasina à Mahanoro ;
- ✦ les terrains cristallins avec prédominance de type graphite dans la partie de Toamasina et de Vatomandry, Mahanoro, Marolambo et Antanambao Manampontsy.

Suivant la définition d'Henri Besairie, le système du graphite est divisé en trois groupes qui sont :

- ✦ le groupe d'Ampanihy (dans le Sud de Madagascar) ;
- ✦ le groupe d'Ambatolampy (dans la région centrale) et
- ✦ le groupe de Manampontsy (dans la partie Est)

Le secteur de Marovintsy se trouve dans l'axe Vatomandry appartenant au groupe de MANAMPOTSY, dans des séries gneissico-migmatitiques ferro-calco-magnésiennes du système de graphite caractérisé par l'omniprésence de ce dernier. Les caractéristiques des graphites présents dans les gneiss et celles enclavés dans l'ensemble migmatitiques sont sensiblement identiques, c'est le degré de désagrégation des roches qui est plus poussé dans les gneiss.

Le groupe de Manampontsy, un socle cristallin précambrien de Madagascar, s'est formé pendant l'Archéen (3500MA- 2500MA). Il est composé d'une série de séquences de paragneiss du sud au nord par la formation d'Ampasary, Pernet, Sakanila, Ambatondrazaka, et Sasomanangana. Il est dominé par des gneiss quartzo-feldspathique, interprété comme étant une dérivé de protolithes volcanoclastiques felsiques, mais contient aussi des paragneiss à biotite avec mafiques, amphibole, grenat, graphite et sillimanite ainsi que des unités calco-silicatées mineures. Les roches représentées par ce groupe sont fortement déformées, métamorphisées localement amphibolites, et recoupées par des granitoïdes d'âge Néoproterozoïque (Suite Itsindro - Imorona, 840-760 Ma, Ambalavao Suite, 560-530 Ma).

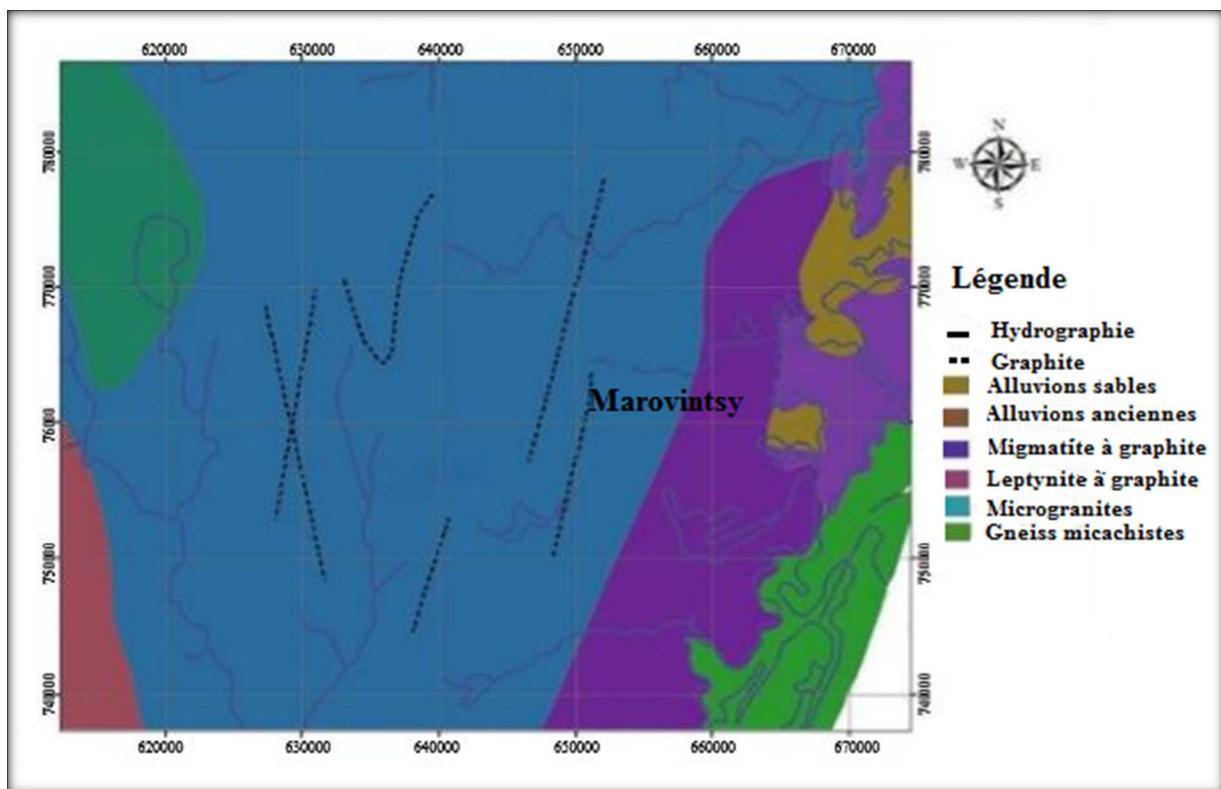
D'après la stratigraphie du BRGM, on y observe une succession de deux strates dont le gneiss sans graphite supérieur et le gneiss à graphite inférieur. Ils se différencient du point de vue pétrographique.

Pour le gneiss sans graphite supérieur, des latérites rouges, brunes, ocres dominant dans la zone synclinale. Ce sont donc des gneiss supérieurs très latéralisés. Les roches sont constituées de quartz, de feldspath avec des rares minéraux ferromagnésiens tels que le

pyroxène et le mica noir ou biotite. A la base du niveau gneissique, on trouve de la sillimanite sous forme d'agrégat ou parfois disséminée.

Pour le gneiss inférieur à graphite, les roches renferment des quartz et des feldspaths avec une très faible proportion en biotite ou en pyroxène. La sillimanite se rencontre dans la partie supérieure à proximité du contact avec le gneiss supérieur. Des lamelles de graphite s'alignent parallèlement aux schistosités. Ce type de gneiss prédomine dans les anticlinoriums Ouest et Est. En effet, des migmatites à graphite abondent au cœur des plis anticlinaux.

Il est aussi à remarquer la présence de minéralisations de pierres précieuses dans cette région à savoir l'or, le corindon, le béryl, le quartz et le saphir.



(Source : BD500)

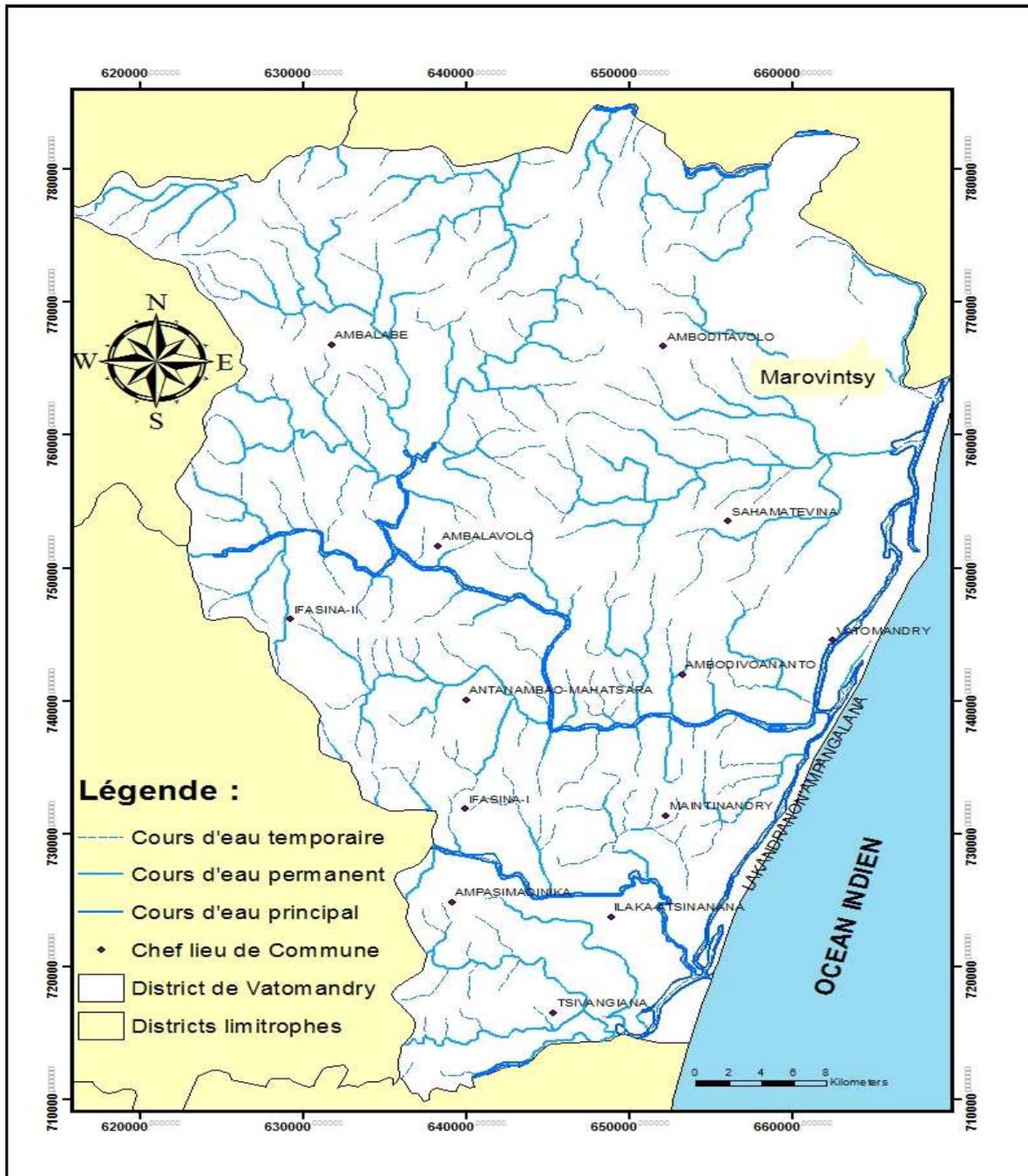
**Carte 5 : Géologie de la zone d'étude**

### III.2.4 Hydrologie

La région possède des ressources en eau importantes et presque dominées par des lacs et des cours d'eau. On y trouve trois types de cours d'eau à savoir le cours d'eau temporaire, le cours d'eau permanent et le cours d'eau principal.

### Chapitre III : Contexte général de la zone d'étude

La majeure partie de ces cours d'eau est à courant rapide sur la partie moyenne de leurs cours. Le débit des eaux est fortement lié à la pluviométrie 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 : le canal des Pangalanes, Laroka, Sakanila et Manampotsy.



(Source : BD 500)

Carte 6 : Hydrographie de la région

### III.2.5 Climatologie

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

De par sa position géographique délimitée par l'océan indien à l'Est, le climat de la zone d'étude (District de Vatomaniry) 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 32°C tout au long du mois de Décembre et de Janvier tandis que sa valeur minimale varie entre 17°C et 18°C, surtout pendant le mois de Juillet.

La précipitation moyenne annuelle varie entre 200 mm et 600 mm d'eau. 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, Mars, Avril et Juillet sont les plus pluvieux. Les saisons les plus sèches correspondent aux mois d'Octobre et de Novembre.

#### ✦ **Vents et cyclones**

Le vent de l'Est ou « Varatraza » prédomine partout en toutes saisons avec des composantes Nord ou Sud selon la latitude. Pendant la période de Juin à Septembre, l'Alizé, vent du Sud-Est apporte une humidité constante et abondante. 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 provoquent 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.

La région de Vatomaniry se situe dans une zone très cyclonique. Elle est souvent victime des cyclones et des dépressions tropicales. Ces phénomènes arrivent surtout entre le mois de Janvier

#### **III.2.6 Formation végétale [8]**

L'une des réputations de la partie Est de Madagascar est l'importance tant en qualité qu'en quantité de ses forêts naturelles et la diversité biologique de ses formations végétales.

Dans la zone d'étude, on peut distinguer :

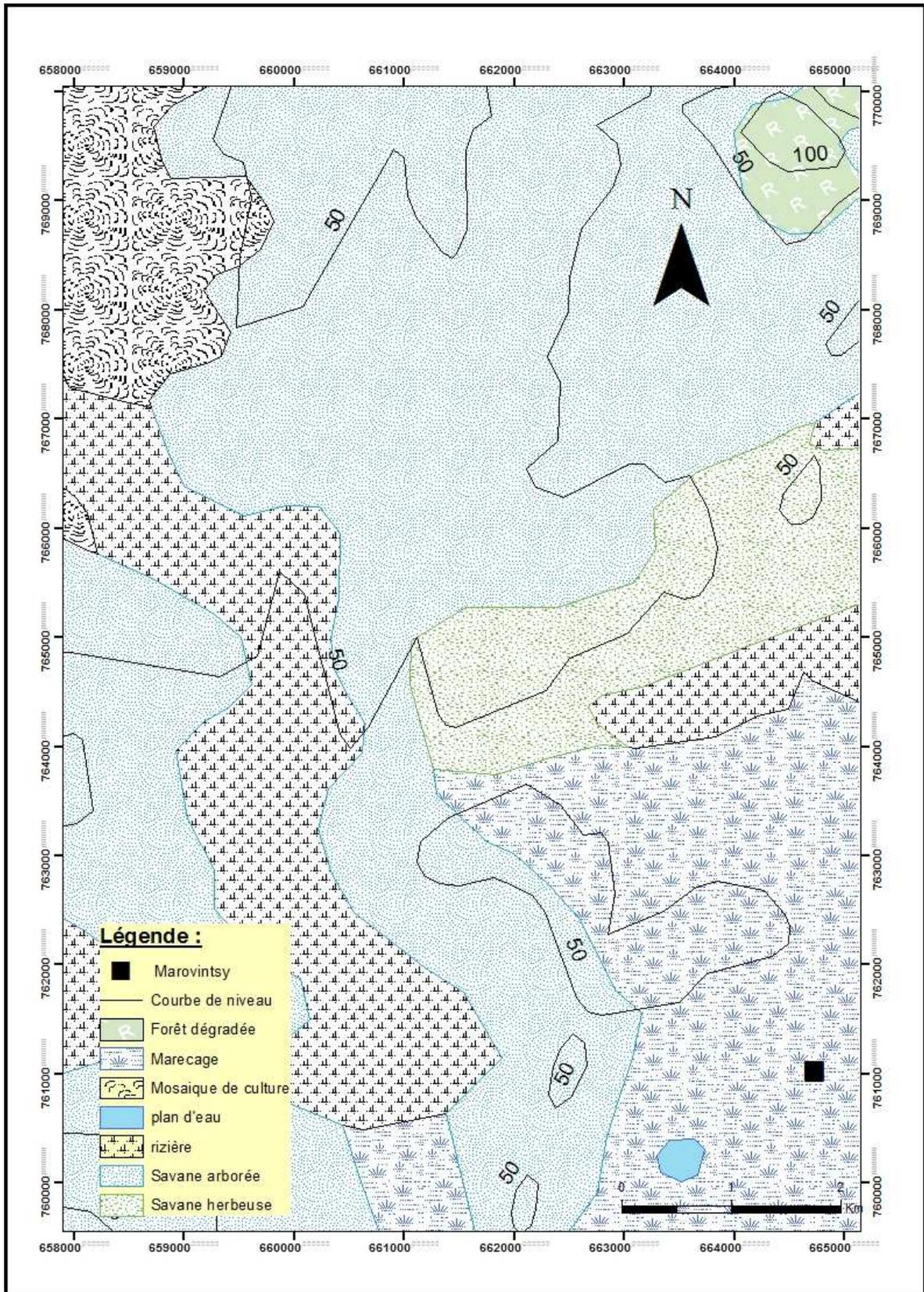
- ✦ les forêts naturelles primaires denses ombrophiles ;
- ✦ les forêts sclérophylles avec des végétations de « savoka » et des pseudos steppes ;
- ✦ les forêts de reboisement à savoir : grevillea, pins, eucalyptus, plantations de cocotiers.

Les formations végétales présentent une grande diversité en fonction des conditions climatiques et pédologiques.

Dans les zones marécageuses où les sols sont hydromorphes, la végétation est adaptée à l'excès d'eau dominée par : les « Viha » ou « Tatamo ».

Dans la majeure partie de la zone étudiée, on a constaté la prédominance de Ravinala et de quelques mangroves.

Les bananes, les avocats, les mangues, les sakoa manga, les litchis, l'Ampalibe sont les fruits comestibles dans le site.



(Source : BD 500)

Carte 7 : Occupation du sol

### III.3 Contexte monographique et socio-économique [8]

#### III.3.1 Monographie

Le site abrite plusieurs groupes ethniques, outre la population Betsimisaraka (population majoritaire), il y a des Merina, des Betsileo, des Sihanaka, des Antaisaka, des Antaimoro, des Antandroy.

L'effectif total de la population dans le Fokontany de Marovintsy est de 945 dont 344 foyers. La répartition de ces habitants se présente comme suit :

**Tableau 2 : Répartition de la population de Marovintsy**

0 à 5 ans		6 à 17 ans		18 ans et plus		Total	
M	F	M	F	M	F	Population	Foyer
44	73	145	179	217	287	945	344

*(Source : Fokontany Marovintsy)*

#### III.3.2 Activités économiques de la population

La société Gallois est très importante pour la vie de ces populations. Elle emploie des centaines des salariés locales. Par contre l'agriculture, la pêche et l'élevage constituent l'activité principale de la population. Mais jusqu'à maintenant, la pratique reste artisanale et ne constitue que des activités des subsistances.

#### III.3.3 Equipements et Infrastructures

##### a) Education

En termes d'éducation, le site dispose d'enseignement général public de niveau primaire (EPP). Pour la suite des études, la majeure partie des élèves vont rejoindre le Chef-lieu de District (Vatomandry). Et c'est la Société Gallois qui assure le transport de ces écoliers.

#### **b) Santé**

L'Ets Gallois dispose une infirmerie pour ses employés et leurs familles. Le chef-lieu de Commune possède également deux CSB2 ; l'un à Sahamatevina et l'autre au Fokontany d'Anosimanasa. Durant notre passage (Avril 2015) la conjonctivite caractérisée par des rougeurs, l'irritation de l'œil, des sensations de brûlures ou d'égratignures, ou des écoulements d'aspect purulent a été est très répandue dans la région de Toamasina et Vatondry. Selon les médecins, le paludisme, la diarrhée ainsi que les MST sont les maladies les plus fréquentes dans la zone.

## **CHAPITRE IV : TRAVAUX DE PROSPECTION**

La prospection représente l'ensemble des opérations d'investigations superficielles en vue de découvrir des gisements ayant un intérêt économique. Elle correspond à une étude de faisabilité et de rentabilité, la première étape à faire avant toutes activités d'exploitation.

Pendant notre stage à l'Etablissement Gallois Marovintsy, on a procédé à la prospection au marteau pour la recherche de minéralisation de graphite dont la durée était de 10 jours.'

### **IV.1 Prospection au marteau [2][19]**

La prospection au marteau consiste à rechercher et à collecter des indices de minéralisation par observation des affleurements et des éboulis de pierres ainsi que des anciens travaux (tranchées, exploitations abandonnées ...). Elle se fait le long des itinéraires qui sont choisis au préalable à partir des documents disponibles (cartes géologiques, carte des permis miniers, images satellites, ...). Elle requiert des simples matériels pour la recherche et, ultérieurement des matériels plus sophistiqués pour l'étude des indices ou des anomalies découvertes.

#### **IV.1.1 Objectif**

Le but de la recherche d'indices est de conduire 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.

#### **IV.1.2 Matériels utilisés et mode de fonctionnement de quelques appareils [2][19]**

Les matériels utilisés au cours de cette prospection sont :

- ✦ deux cartes géologiques N50 et O50 à l'échelle 1/100 000 du P.G.R.M ;
- ✦ des images satellites ;
- ✦ une carte des permis miniers ;
- ✦ un marteau de géologue pour le prélèvement d'échantillons ;
- ✦ des sacs à échantillons ;

- ✦ des feutres indélébiles pour référencer les échantillons ;
- ✦ Boussole ; [W2]



**Photo 5 : Boussole**

Il existe différents types de boussoles, mais la plus couramment utilisée est la boussole Chaix universelle. Elle est utilisée à la fois pour les levés topographiques et géologiques.

Dans le cas d'un levé géologique, les mesures comprennent les directions et les pendages de filon, de plan de stratification, de schistosité et de fracture, ainsi que la direction et le prolongement d'axes de plis, de linéations, de colonnes minéralisées, etc.

- ✦ GPS (Global Positioning System) : [W2]



**Photo 6 : GPS Garmin 72**

Les échantillonneurs doivent utiliser un G.P.S pour localiser la position d'un site d'échantillonnage. Ils doivent être formés à marquer des "points de passage" et à les associer à des numéros d'échantillons.

Ci-après quelques points importants à se rappeler en utilisant le GPS :

Il doit être utilisé pour configurer le système de coordonnées adéquat ;

Il doit être régulièrement vérifié à un endroit "standard" pour en vérifier le calibrage et le bon fonctionnement ;

Les utilisateurs doivent savoir qu'il est difficile de capter les satellites lorsqu'on travaille dans des forêts denses et des vallées profondes.

### **IV.1.3 Observation de la morphologie des sols**

La morphologie du paysage peut donner de bonnes indications sur la présence d'affleurements et sur l'ossature géologique de la région. C'est ainsi qu'on peut repérer un filon, une fracture, un quartzite ou une amphibolite, un dôme granitique. C'est de cette manière qu'on a procédé lors de la prospection au marteau.

Il est aussi nécessaire de porter une grande attention aux pierres d'éboulis ; quand elles sont constituées de roche minéralisée, elles permettent souvent de remonter à la minéralisation en place.

### **IV.1.4 Recherche d'anciens travaux [2]**

La présence d'anciens travaux de recherche ou d'exploitation constitue un indice précieux de l'existence d'un gîte qui, parfois, peut être encore exploitable en fonction de l'évolution de la technologie moderne, notamment pour le traitement des minerais à basse teneur.

Les exploitations abandonnées depuis un temps relativement court (moins d'un siècle) se reconnaissent assez facilement. L'entrée des galeries est presque toujours masquée par des buissons et quelques fois leur présence se remarque par des filets d'eaux qui en sortent. Le but de ces explorations est essentiellement de définir la nature de la minéralisation.

### **IV.1.5 Observation des affleurements [2]**

L'observation des affleurements constitue l'étape principale de la prospection au marteau. Souvent, les affleurements sont des surfaces réduites et il faudra bien prendre le temps de les observer dans leur totalité en procédant de la façon suivante :

- ✦ casser en plusieurs endroits et de préférence à la masse ;
- ✦ déterminer succinctement la roche ; nous rappelons que sur une roche mouillée, la structure apparait beaucoup mieux ;
- ✦ mesurer la direction et le pendage de la stratification, de la schistosité et des fractures significatives, ainsi que la direction et le plongement des linéations ;
- ✦ rechercher les minéralisations à l'œil nu et éventuellement à la loupe ; se demander si la roche a subi une altération. L'attention portera sur les roches altérées, cariées, teintées de rouge, brun ou noir à cause de l'oxydation.



**Photo 7 : Affleurement de graphite**

## **IV.2 Sondages**

Le sondage désigne 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).

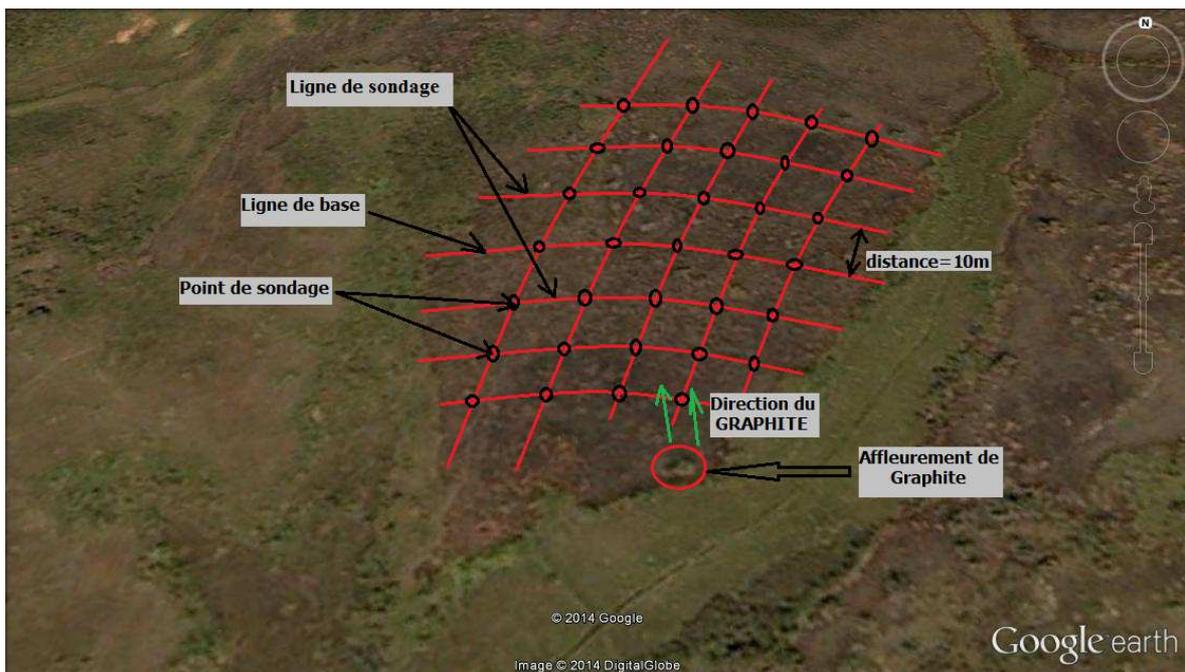
Au minimum on a besoin de 6 hommes dont l'un est le chef de poste pour effectuer un sondage ; ce nombre varie en fonction de la formation in situ. On prélève des échantillons sur chaque sondage.

Le sondage s'avère avantageux principalement en fournissant des renseignements plus précis sur l'objectif visé. La raison est qu'il touche directement le sol, alors que les autres méthodes procèdent par déduction. Il est donc destiné à la vérification des hypothèses émises lors des phases antérieures.

### IV.2.1 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. Ce plan de prospection est ainsi recommandé pour la recherche d'un filon de gisement.

Pour une extension à taille moyenne, comme dans notre cas, 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.



(Source : Google Earth, modifié par l'auteur)

**Figure 10 : Méthodes pour le choix de la ligne de base**

### IV.2.2 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'entreprind.



**Photo 8 : Sondage**

**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.



**Photo 9 : Tarière**

✦ **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.

✦ **Bêche**

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

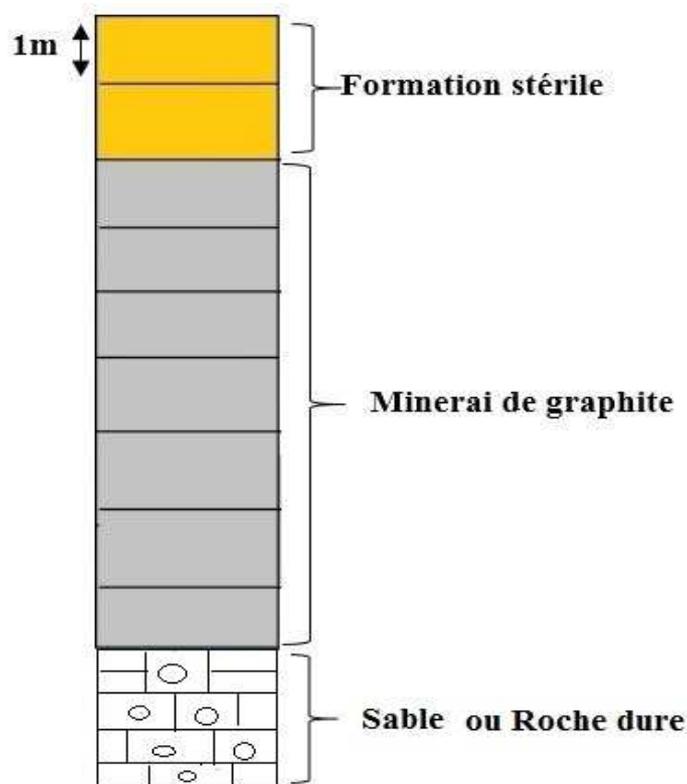
✦ **Sachets d'échantillonnage** : pour le collecte des échantillons

**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 11 : Résultat du sondage**

**IV.2.3 Tenue du carnet de terrain**

Le carnet de terrain sert à enregistrer toutes les données obtenues ; 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 tableau 3 montre un exemple de carnet de sondage qu'on a fait à Marovintsy.

**Tableau 3: Carnet de terrain**

Date	N°	X	Y	Z	Lieu	Résultat		Observation
15/04/15	8A	19°14'28''	48°57'278''	42 m	Colline 44	1m	STERILE	Latérite
						2m		
						3m		
						4m	GRAPHITE	Graphite de couleur noire, gris, brun
						5m		
						6m		
						7m		
						8m		
						9m	STERILE	Roches dures
						10m		
						11m		
						12m		

#### IV.2.4 Emballage et étiquetage des échantillons

Après l'obtention des minerais 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, mettre les échantillons obtenus sur un plateau ;
- ✦ Quartage : pour réduire le poids de l'échantillon, le quartage est le mode le plus efficace pour le partage des échantillons afin d'avoir un échantillon représentatif ;
- ✦ Emballage : mise en sachet des échantillons ;
- ✦ Étiquetage : pour l'identification de l'échantillon (numéro, coordonnées, localité)

#### IV.3 Travaux de laboratoire

L'objectif des analyses réalisées dans le laboratoire est de connaître la proportion en graphite des échantillons obtenus auparavant. Pour ce faire, on entreprend d'abord les deux procédés

suivants : la flottation et le broyage qui permettent l'extraction et l'épaississage du graphite de la gangue.



**Photo 10 : Concentré du graphite**

**Séchage :**

Les graphites obtenus sont ensuite séchés soit au four ou à l'air libre afin de libérer les particules d'eau.

**Tamissage et pesage :**

Une fois cette étape terminée, on procède au tamissage ou distribution granulométrique des particules de graphite. Dans notre cas, l'appareil utilisé est le ROTAP, un appareil de type chauvin de référence 331 STEIN ROUBAIX.

Les tamis utilisés sont les tamis N° 20, N° 30, N°40, N°50, N°60, N°80, N°100. Afin de connaître le pourcentage par tamis, on fait rotaper 100g de graphite pendant 15 minutes, puis on pèse le graphite cumulé venant du Rotap.



**Photo 11 : ROTAP**

Pour avoir une connaissance de la quantité de carbone contenue dans le graphite, voici les étapes à suivre :

Etape 1 : Pesage du graphite et nacelle (100 mg par nacelle) en utilisant une balance de précision.

Etape 2 : Passage au four dont les caractéristiques sont les suivants :

- Capacité de 1<sup>er</sup> étage contour de 20 nacels
- Temps de puissance : 12h/jour en température  $80 \times 100^{\circ}\text{C}$

Mode d'emploi : Chauffer pendant une heure comme  $40 \times 100^{\circ}\text{C}$  au maximum avant d'augmenter à la température exigée

Etape 3 : Refroidissement.

Etape 4 : Pesage du produit obtenu après cuisson.

Le pourcentage de Carbone (C) est la différence entre le graphite brut et le cendre.

#### **IV.4 Synthèse des résultats de prospection**

Le travail de prospection a été réalisé dans la colline 44 Ambodimangabe Marovintsy, qui fait partie du permis minier de l'Etablissement Gallois. C'est une colline de faible altitude (44 m de sommet) qui se situe à 600 m au Nord de l'usine de Marovintsy. Les sondages réalisés comptent 113 dont 63 sont des trous minéralisés. La distance entre deux sondages mesure vingt mètres et la puissance de la couche minéralisée est d'environ 7 m. La zone

présente une forte teneur en graphite et en carbone d'après les analyses effectuées au laboratoire où la teneur moyenne de graphite et de carbone pour les trous minéralisés sont respectivement de 3.56% et 85%.

## 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 Marovitsy-Vatomandry, 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 au marteau et les sondages à la tarière ont été les moyens employés dans la phase d'investigation de cette minéralisation de graphite.

**TROISIEME PARTIE**  
**METHODOLOGIE**  
**ET**  
**APPLICATION**

## CHAPITRE V : GEOSTATISTIQUE

La géostatistique consiste à l'étude de phénomènes corrélés dans l'espace ou dans le temps, au moyen d'un outil probabiliste, ce qui constitue la théorie des variables régionalisées. Le terme géostatistique, employé par G. Matheron, désigne l'emploi de la statistique dans l'étude des phénomènes géologiques. C'est la science qui sert à déterminer la précision sur l'évaluation d'un gisement. Dans la phase de prospection, on utilise la reconnaissance systématique pour estimer le tonnage du minerai (T) contenu dans le gisement, les tonnages du métal (Q) et les teneurs (Z) liées par la relation :

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

### V.1 Objectifs de la géostatistique [16]

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

Elle a les objectifs suivants :

- analyse structurale et interprétation du phénomène considéré
- cartographie
- évaluation et prédiction
- simulation utilisant des modèles numériques

### V.2 Application de la géostatistique à la recherche minière [16]

La géostatistique est appliquée à la recherche minière en utilisant essentiellement différentes informations qui sont disponibles concernant le gisement. Ces informations doivent être de qualité et de quantité suffisantes, telles que les informations sur les structures géologiques, sur les valeurs des teneurs obtenues lors des campagnes de sondage.

Voici quelques opérations utilisant l'approche géostatistique :

❖ **Estimation globale d'un gisement**

La première étape importante dans une étude de faisabilité est la détermination des réserves in situ. La géostatistique peut aider l'ingénieur d'exploitation à obtenir, à partir des informations disponibles, de bonnes estimations du tonnage global in situ et de la teneur moyenne, et ainsi lui permettre de décider si un projet mérite des investissements plus importants ou non.

❖ **Estimation des erreurs**

Aucune méthode d'estimation ne peut donner à coup sûr une valeur exacte, puisqu'il y a inévitablement une erreur associée dont il est important de connaître l'ordre de grandeur. La géostatistique fournit non seulement la valeur estimée, mais aussi, avec la variance de krigeage, une mesure de la précision de l'estimation. C'est l'une des supériorités de la géostatistique sur les méthodes traditionnelles d'estimation des réserves.

❖ **Estimation locale**

Une fois la minéralisation jugée exploitable, la phase suivante est l'estimation bloc par bloc. Cette estimation locale donne 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 fournir 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**

On peut à l'aide de la géostatistique évaluer la variance d'estimation pour plusieurs variétés de schéma de sondage. Ainsi, sans avoir à exécuter de sondages, on peut calculer la variance d'estimation dépendant à la fois du modèle de variogramme et de la localisation des trous de sondage. On peut donc réaliser une économie sur le budget alloué au sondage ou à l'échantillonnage. On remarque aussi que la géostatistique est utilisée généralement pour le cas de l'estimation des valeurs dans les mailles régulières.

❖ **Analyse structurale**

C'est une étude qui consiste à élaborer un modèle optionnel de variogramme caractéristique de la région. On y étudie la nature physique du phénomène. L'objectif était de parvenir à estimer les caractéristiques du gisement.

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.

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

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

**V.3 Comportements du variogramme [16] [23]**

❖ **Effet de pépite ( $C_0$ )**

L'effet de pépite est la variation à très courte échelle, erreurs  $\gamma(h) = \sigma^2 - C(h)$ . On admet que le variogramme a un comportement linéaire à l'origine.  $C_0$  est obtenue par l'intersection de l'axe des  $\gamma(h)$  avec la droite (D), passant par les deux premiers points du variogramme expérimental.

❖ **Palier (C)**

Le palier est la valeur du variogramme correspondant à la variance de la variable aléatoire  $\sigma^2 = C_0 + C = \text{Var}(Z(x))$   $C_0 \neq \gamma(0)$ . La stabilisation des valeurs du variogramme à partir d'une certaine distance permet de fixer la valeur de  $C$  sur l'axe des ordonnées.

❖ **Portée (a)**

La portée est une distance où 2 observations ne se ressemblent plus en moyenne, ne sont plus liées linéairement. C'est la valeur correspondante au palier sur l'axe des abscisses.

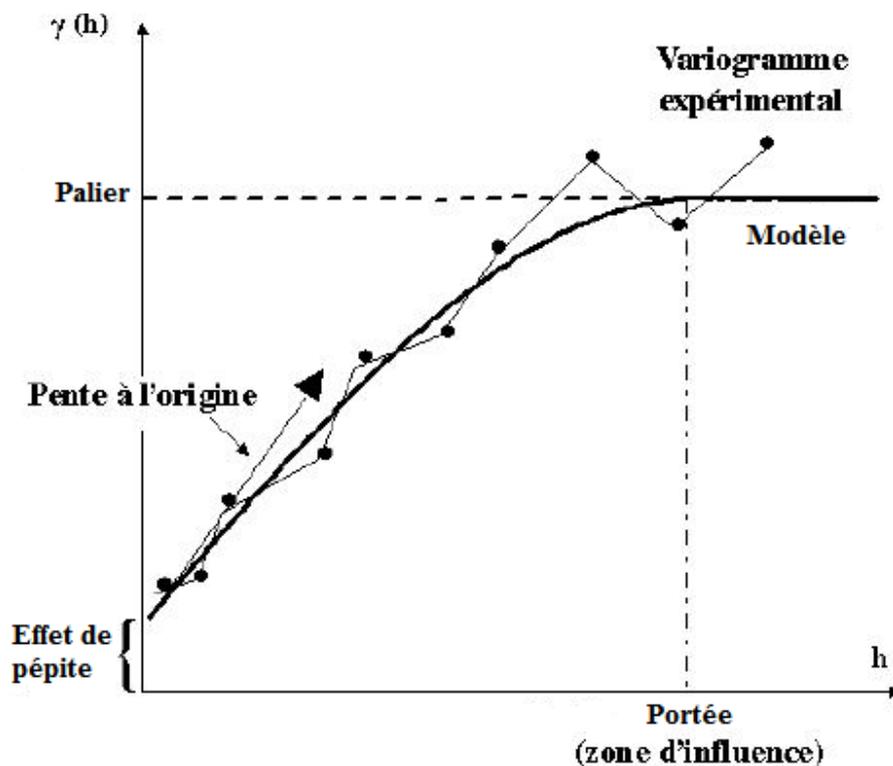


Figure 12 : Comportements du variogramme

La droite (D) coupe au point d'abscisse  $\frac{2}{3} a$ .

### V.3.1 Types de modèles courants [15]

#### ❖ Modèle sphérique

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right]$$

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

Et l'intersection de (D) avec  $y = C$

On a,  $h = \frac{2}{3}a \Rightarrow$  Il a comme abscisse  $\frac{2}{3} a$

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  $0.81 a$ .

❖ **Modèle cubique**

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

Ce variogramme 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  $0.69 a$ .

❖ **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**

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

$\alpha$  est un paramètre de forme, compris entre 0 et 2.  $\omega$  est un coefficient multiplicatif positif. Pour  $\alpha = 1$ , on obtient le modèle linéaire, pour lequel  $\omega$  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". On rencontre ce type de variogramme lorsqu'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.

**V.3.2 La teneur moyenne [16]**

La teneur moyenne ( $T_m$ ) est la moyenne pondérée des teneurs, car les teneurs trouvées correspondent aux différentes épaisseurs de couches.

$$T_m = Z^*(V) = Z(V) = \frac{1}{V} \sum Z(V_i) \cdot V_i$$

**V.4 Variance de dispersion [16]**

**V.4.1 Définition**

Sur 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 polluant, est notée  $Z(v_i)$ .

La teneur moyenne expérimentale et la variance expérimentale sont :

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

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

Noter que  $\bar{z}$  n'est autre que la valeur moyenne de la teneur dans  $V$ , que l'on peut noter  $z(V)$ .

Lorsqu'on considère 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  $V$  est

$$\sigma^2(v | V) = E[S^2]$$

Sa dénomination provient de ce qu'elle caractérise 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.

#### V.4.2 Expression de la variance de dispersion

On démontre que

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

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

$$\bar{\gamma}(V, V) = \frac{1}{V^2} \int_V \int_V \gamma(x' - x) dx dx' \quad \bar{\gamma}(v, v) = \frac{1}{v^2} \int_v \int_v \gamma(x' - x) dx dx'$$

#### Formule d'additivité

Si  $D$  est un domaine constitué de plusieurs panneaux de taille  $V$ , il résulte immédiatement de la formule ci-dessus que

$$\sigma^2(v | D) = \sigma^2(v | V) + \sigma^2(V | D)$$

Ceci est la relation de Krige. Elle a été obtenue expérimentalement par 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.

### V.4.3 Variance des teneurs ponctuelles

Les teneurs ponctuelles correspondent à un support de volume nul, que l'on note par convention "0". Comme  $\bar{\gamma}(0,0) = \gamma(0) = 0$ , la variance de dispersion des teneurs ponctuelles dans  $V$  est tout simplement

$$\sigma^2(0|V) = \bar{\gamma}(V,V)$$

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).

Une application de ceci est 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.

## V.5 Variance d'estimation [16]

### V.5.1 Définition

Soit un volume  $V$  reconnu par  $n$  points de mesure  $x_i$ . On dispose des mesures  $z(x_i)$  et on s'intéresse à la valeur moyenne de  $z(x)$  dans  $V$ , soit

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

Ne connaissant pas  $Z(V)$ , on peut lui substituer l'estimateur

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

En estimant  $z(V)$  par  $z^*$  nous commettons une erreur, qui est la différence  $z^* - z(V)$ . Pour caractériser cette erreur, nous nous plaçons dans le cas où  $z$  peut être considérée comme une réalisation d'une fonction aléatoire stationnaire ou intrinsèque  $Z$  de variogramme  $\gamma(h)$ .

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

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

Autrement dit, l'estimateur  $Z^*$  est sans biais : il ne provoque ni surestimation ni sous-estimation systématique. L'ordre de grandeur de l'erreur, ou plus exactement de son carré, est mesuré par la variance d'estimation, définie par

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

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

Si nous sommes capables de calculer cette variance, nous pourrons, moyennant une hypothèse sur la loi de l'erreur, en déduire un intervalle de confiance. Si par exemple l'erreur peut être considérée comme gaussienne, l'intervalle de confiance à 95% sera

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

### V.5.2 Calcul de la variance d'estimation

On montre que cette variance s'exprime à l'aide du variogramme comme

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

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

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

## V.6 Le Krigeage [16] [23]

### V.6.1 Définition

Le krigeage est une technique qui consiste à trouver la meilleure estimation possible de la teneur d'un panneau ou d'un bloc, compte tenu des informations disponibles au voisinage, c'est-à-dire des teneurs des différents échantillons qui ont été prélevés soit à l'intérieur, soit à l'extérieur du panneau que l'on veut estimer.

### **V.6.2 Principe du krigeage**

Le krigeage consiste à réaliser une pondération en attribuant un poids à la teneur de chaque échantillon. On calcule ensuite ces poids de façon à rendre minimale la variance d'estimation résultante, correspondant aux caractéristiques géométriques du gisement comme les dimensions et l'implantation relative du panneau et des échantillons.

Généralement, le krigeage attribue des poids faibles aux échantillons éloignés et inversement. Il est nécessaire de faire certaines hypothèses sur les caractéristiques géostatistiques du gisement étudié pour pouvoir résoudre le problème de krigeage.

On suppose que le gisement est géostatistiquement homogène, c'est-à-dire que 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 d'homogénéité est fondamentale car aucun krigeage rigoureux n'est possible entre des portions hétérogènes d'un même gisement. La deuxième hypothèse, qui n'est pas très fondamentale, concernant l'isotropie. On la considère ainsi car certains types d'anisotropie, comme l'anisotropie zonale et l'anisotropie géométrique, qui sont fréquents dans la pratique, peuvent être ramenés à un modèle isotrope.

### **V.6.3 Krigeage simple en covariance**

On suppose à priori que la fonction aléatoire est stationnaire d'ordre 2 :

$$m(\vec{x}) = m$$

$$\sigma^2(\vec{x}) = \sigma^2$$

$$C(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = C(\vec{x}, \vec{x} + \vec{h}) = C(\vec{h})$$

et l'on cherche à exprimer  $R(\vec{x}, \omega)$  par la fonction linéaire suivante :

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

On impose à priori à  $a_0$  d'être nul. Mais la condition de non-biais :

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

se transforme aisément (puisque  $m(\bar{x}) = m$  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 krigeage" :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j C(\bar{x}_j, \bar{x}_i) - \mu = C(\bar{x}_0, \bar{x}_i)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Soit sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} C(\bar{x}_1, \bar{x}_1) & C(\bar{x}_1, \bar{x}_2) & \dots & C(\bar{x}_1, \bar{x}_j) & \dots & C(\bar{x}_1, \bar{x}_n) & 1 \\ C(\bar{x}_2, \bar{x}_1) & C(\bar{x}_2, \bar{x}_2) & \dots & C(\bar{x}_2, \bar{x}_j) & \dots & C(\bar{x}_2, \bar{x}_n) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C(\bar{x}_i, \bar{x}_1) & C(\bar{x}_i, \bar{x}_2) & \dots & C(\bar{x}_i, \bar{x}_j) & \dots & C(\bar{x}_i, \bar{x}_n) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C(\bar{x}_n, \bar{x}_1) & C(\bar{x}_n, \bar{x}_2) & \dots & C(\bar{x}_n, \bar{x}_j) & \dots & C(\bar{x}_n, \bar{x}_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_i \\ \dots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(\bar{x}_1, \bar{x}_0) \\ C(\bar{x}_2, \bar{x}_0) \\ \dots \\ C(\bar{x}_i, \bar{x}_0) \\ \dots \\ C(\bar{x}_n, \bar{x}_0) \\ 1 \end{pmatrix}$$

Nous sommes alors amenés à faire une seconde hypothèse : valeurs de  $m$ ,  $\sigma^2$  et  $C(\bar{h})$  qui sont normalement définies à partir de plusieurs événements  $\omega_k$  (estimations climatologiques), peuvent se définir à partir d'une seule distribution spatiale sur le domaine  $D$ . Cette hypothèse est appelée hypothèse d'ergodicité.

On suppose donc :

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

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

On évaluera donc la moyenne du champ par :

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

Pour la fonction de covariance  $C(\bar{h})$  on procédera par pas de distance  $\Delta h$  (dans le cas anisotrope on travaillera de plus, sur des tranches d'azimut). Les couples  $(\bar{x}_i, \bar{x}_j)$  tels que :

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

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

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

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

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

Voici ainsi présenter le krigeage simple qui permet des reconstitutions telles que l'écart  $R(\bar{x}_0, \omega) - R^*(\bar{x}_0, \omega)$  soit nul en moyenne et que la variance de cet écart  $d^2$  soit minimale. On montre d'ailleurs que ce minimum est :

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

## **Chapitre VI : Evaluation du gisement**

Ce chapitre est consacré au cas pratique de l'utilisation de la géostatistique pour l'évaluation du gisement de Marovintsy. En premier lieu, on va présenter le logiciel de traitement des données, suivi des résultats et interprétations.

### **VI.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 fondée en 1986 par un trio d'ingénieurs chercheurs à l'École des Mines de Paris, en 1991, une recapitalisation marque, le recentrage de l'entreprise vers la géostatistique pure. Deux ans plus tard arrive le nouveau logiciel *Isatis*, qui va devenir le principal fonds de commerce de l'entreprise. Jusqu'en 1998, la croissance continue, grâce à une forte activité récurrente dans le domaine minier et pétrolier. Et c'est aussi à partir de 1998 que l'acquisition du savoir-faire du logiciel *Isatis*, s'est renforcée grâce à l'arrivée du fondateur du dit logiciel, Yves Touffait

#### **VI.1.1 Généralités [W9]**

*Isatis* en lui-même représente un programme de calcul écrit en langage C, il pèse quand même aux environs de 35 Mo. Le logiciel en revanche, n'a aucune limitation, et propose aux utilisateurs la quasi-intégralité des algorithmes reconnus disponibles.

Inconvénient découlant 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.

Pourtant ISATIS est complémentaire par rapport aux SIG d'Esri. Les deux pourraient fonctionner en symbiose Esri pour la visualisation et/ou la génération des paramètres de calcul, *Isatis* pour les algorithmes. Le logiciel sait donc interpréter des fichiers au format Shape. A part le logiciel *Isatis*, même intégré avec la SIG, dispose d'une interface graphique autonome performante. Car étant 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 13 : Interface du logiciel Isatis

### VI.1.2 Les applications d'ISATIS

Toutes les applications 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

### VI.I.3 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

## **VI.2 Traitements des données**

Pour le gisement de Marovintsy, les échantillons étaient des cuttings obtenus par sondage à la tarière dont l'analyse a été réalisée au sein du laboratoire de la Société Gallois elle-même. Les teneurs des échantillons s'obtiennent suivant le principe de calcul de la teneur moyenne indiqué ci-dessous :

$$Z_m = \frac{e_1 Z_1 + e_2 Z_2 + e_3 Z_3 + \dots + e_n Z_n}{e_i} = \frac{e_i Z_i}{e_i}$$

Pour une prise d'échantillons tous les 1 m, on a  $t_m = \frac{Z_i}{e_i}$

$Z_m$  : teneur moyenne

$e_i$ : épaisseur de la couche

$Z_i$ : teneur correspondante à la couche i

### **VI.2.1 Analyse exploratoire des données**

L'analyse exploratoire des données est toujours une étape préalablement utile, voir nécessaire, à une démarche de modélisation. Elle permet une première détermination des plages de variations des données, des liens éventuels entre les caractéristiques que l'on étudie, d'une éventuelle structuration des données qui orientent donc naturellement le choix du modèle formalisant l'ensemble des caractéristiques. Elle vise ainsi à caractériser la variabilité spatiale ou temporelle des concentrations avec le milieu.

Les données c'est-à-dire les teneurs utiles pour cette étude ont été prises dans un temps précis ainsi la représentativité des données demeure constante dans le temps. Elles ont été acquises par le même procédé de sondage à la tarière donc la représentativité des données est aussi constante dans l'espace.

#### **VI.2.1.1 Variable régionalisée teneur [15]**

La notion de variable régionalisée sert à définir les fonctions de l'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 : échantillon de cuttings pris tous les 1 mètre

Champ géométrique : colline 44 de l'exploitation de graphite de Marovintsy

#### **VI.2.1.2 Variable régionalisée Accumulation**

Pour étudier l'estimation globale d'un gisement, la variable accumulation doit être considérée dans l'étude car l'objectif est de déterminer le cubage total du minerai ainsi que la quantité totale de graphite.

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

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

Pour notre cas,  $Z(x)$  étant la teneur moyenne pondérée

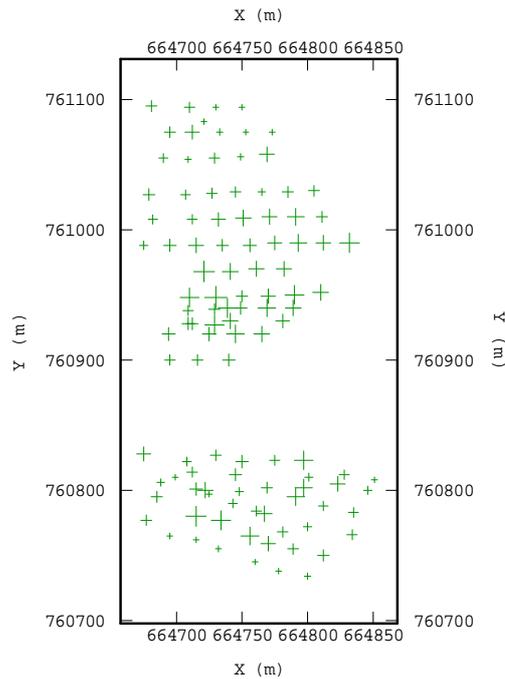
$P(x)$  la puissance des teneurs supérieurs à 1% graphite.

Comme pour le cas de la teneur, la variable a comme nature l'accumulation en graphite. Le support pour notre cas sera considéré comme ponctuel car on a ramené à la surface libre les valeurs obtenues sur chaque point de sondage. Le champ géométrique est toujours la colline 44 de la Gallois Marovintsy. En effet, les conditions nécessaires pour que l'accumulation soit une variable régionalisée sont toutes vérifiées.

La zone qu'on a recueilli les données est limitée par :

$$664650 \text{ m} < X < 664900 \text{ m} ; 760700 \text{ m} < Y < 761200 \text{ m}$$

La carte 9 représente la répartition des points d'échantillonnages :



**Carte 8 : Répartition des points d'échantillonnages**

### **VI.2.1.3 Vérification aux règles correspondantes aux choix des variables régionalisée**

❖ Additivités des variables

Comme les teneurs sont des valeurs obtenues par la moyenne pondérée des teneurs à chaque passe métrique tout le long d'un trou de sondage. Donc la règle d'additivité est vérifiée.

❖ Homogénéité des variables

D'après les observations géologiques la nature du minerai sur le gisement reste la même.

De ce fait, on a aussi constaté que la nature et le support de la variable teneur varie peu car les tronçons étudiés sont tous de même taille. Notre donnée est donc ici homogène.

### **VI.2.2 Analyses statistiques**

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

### VI.2.2.1 Histogramme des teneurs et des accumulations

Les échantillons ont été ici regroupés en fonction de leur teneur en graphite. Le nombre des échantillons est 110, on a trouvé une teneur moyenne de 2.47 % et un écart type de 0.89 %. La teneur maximale est de 4.74%.

Pour l’histogramme d’accumulation, le nombre des échantillons est toujours 110, la moyenne est de 14.50 m% et l’écart type est de 6.09 m%.

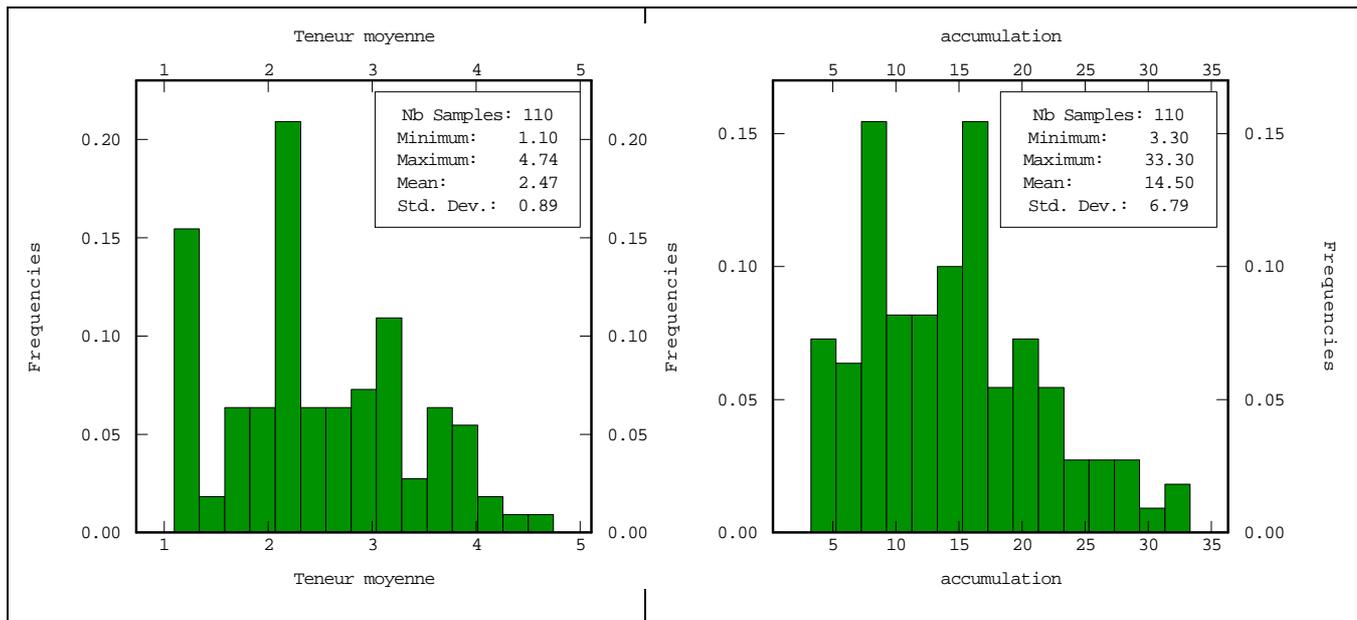


Figure 14 : Histogrammes des teneurs et accumulations

### VI.2.3 Analyse variographique de la variable teneur et accumulation

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

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

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2}{N(h)}$$

avec :

$h$  = distance pour laquelle on calcule le variogramme

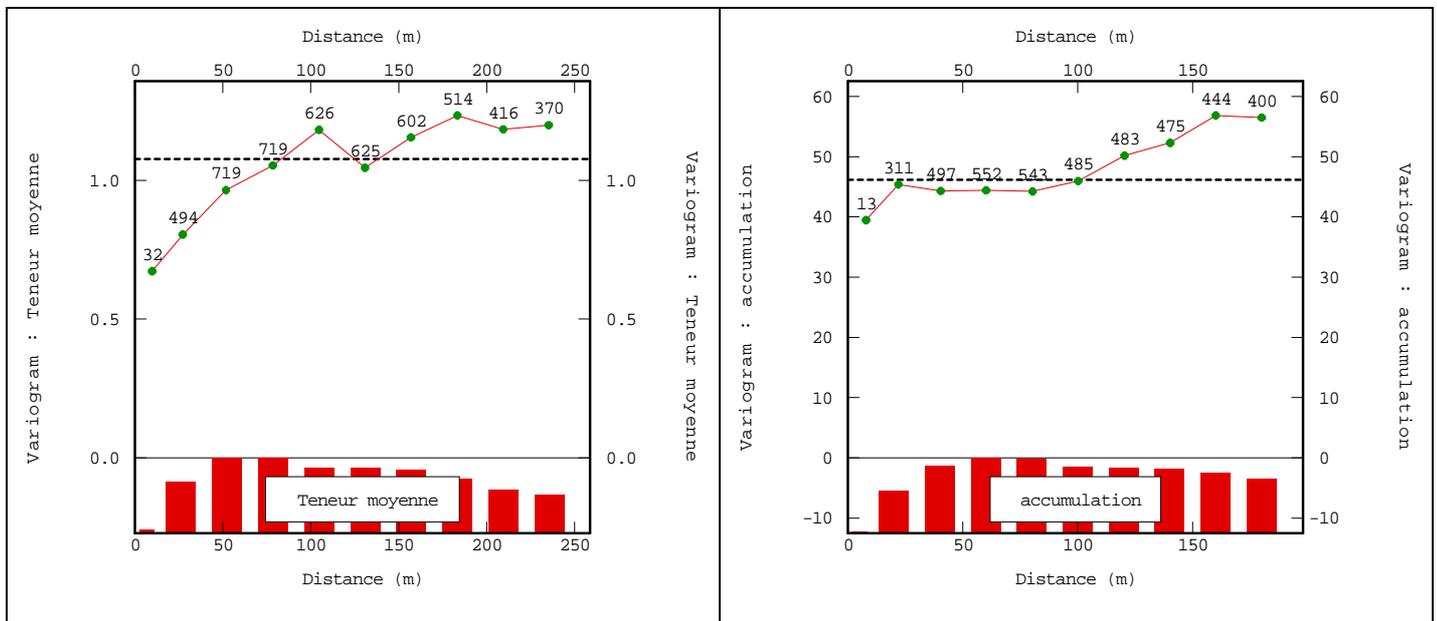
$Z(x_i)$  = valeur mesurée au point  $x_i$  (épaisseur, concentration, ...)

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

$N(h)$  = nombre de couples de points distants de  $h$

### VI.2.3.1 Calcul covariographique

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 15 : Variogrammes expérimentaux**

**Tableau 4 : Description des variogrammes expérimentaux**

Variation	Pas d'échantillonnage	Nombre de pas	Tolérance	Tolérance angulaire
Teneur	25 m	10	50 %	90°
Accumulation	20 m	10	50 %	90°

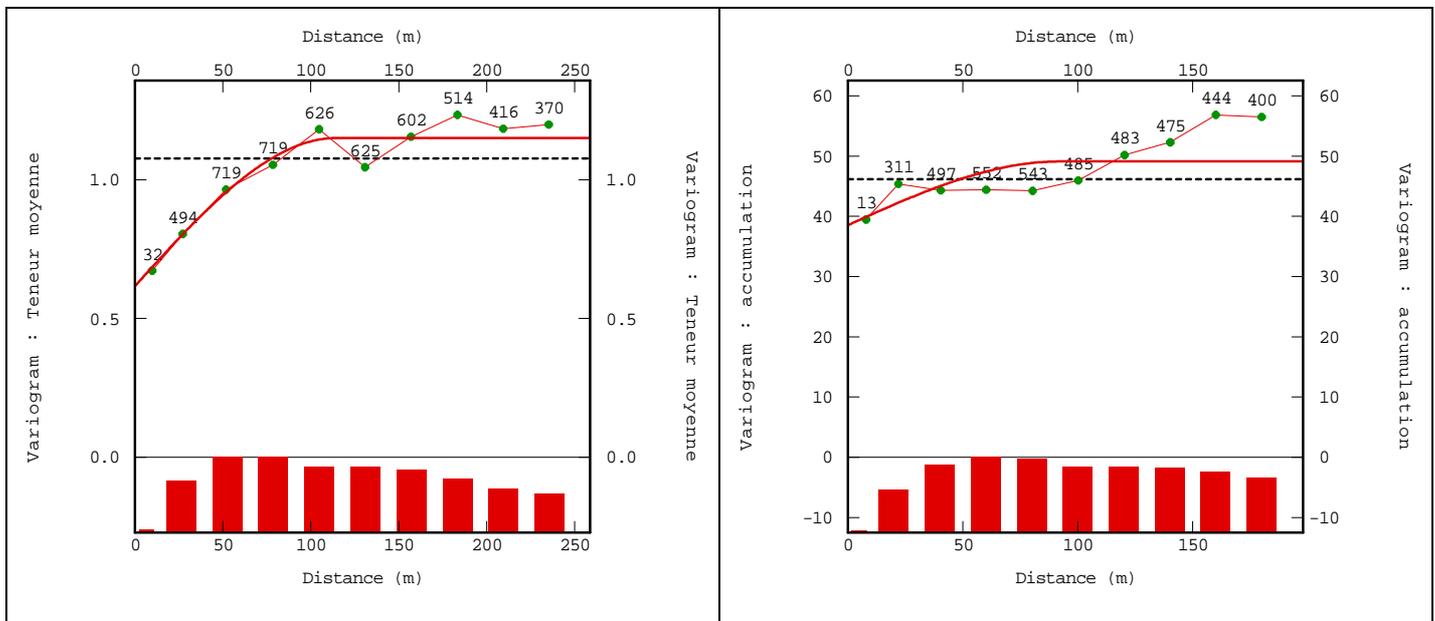
Le tableau 4, ci-dessus, montre les paramètres choisis pour les deux variogrammes expérimentaux considérés (teneur et accumulation).

### VI.2.4 Modélisation du variogramme

Les modèles sont des expressions analytiques que l'on tente 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 16 : Ajustement des variogrammes**

Le tableau 5 représente les paramètres des deux variogrammes expérimentaux ajustés.

**Tableau 5 : Paramètres des variogrammes**

Variables	Effet de pépite	Palier	Portée [m]
Teneur	0.66	1.4	110
Accumulation	39.5	50	93

#### **VI.2.4.1 Choix du modèle utilisé**

En géologie, les modèles les plus courants sont :

- **Effet de pépite.**
- **Puissance (cas particulier : linéaire).**
- **Sphérique.**
- **Gaussien.**
- **Exponentiel.**

Après l'essai de ces différents modèles, le modèle sphérique s'est avéré être le plus approprié dans l'ajustement de nos deux variogrammes expérimentaux. Dans notre cas, il est donc plus avantageux de le choisir. Cependant, dans les recherches minières, ce modèle est déjà le plus utilisé car il est qualifié comme étant le plus adéquat dans ce domaine.

#### **VI.2.5 Validation du variogramme [16]**

Une pratique intéressante pour valider le modèle de variogramme et le voisinage utilisé pour le krigeage consiste à effectuer une validation croisée. Le principe est d'éliminer à tour de rôle chaque observation et de l'estimer à l'aide de ses voisins. En chaque point, on obtient donc une valeur vraie et une valeur estimée que l'on peut comparer pour déterminer si le modèle fournit des estimations se comportant comme prévu, si le voisinage utilisé est adéquat, etc.

Plus précisément, soit  $Z_i^*$  l'estimation obtenue par krigeage au point "i" (en enlevant la valeur observée  $Z_i$ ) ainsi que la variance de krigeage  $\sigma_{ko}^2$ . On peut définir un résidu  $e_i = Z_i - Z_i^*$  et un résidu normalisé  $n_i = \frac{e_i}{\sigma_{ko}}$

Un modèle et un voisinage adéquats devraient fournir:

a)  $\sum_i e_i \cong 0$  et  $\sum_i n_i \cong 0$

b)  $\sum_i |e_i| \text{ min}$  et  $\sum_i |e_i^2| \text{ min}$

c)  $\frac{1}{n}(\sum_i (n_i^2))^{0.5} \cong 1$

La moyenne de l'erreur, qui doit tendre vers 0, permet de vérifier si le krigeage est effectivement non-biaisé. La variance de l'erreur standardisée, qui doit se rapprocher de 1, correspond au rapport entre les variances expérimentale et théorique de krigeage. Elle permet de vérifier si les erreurs de krigeage sont cohérentes avec la variance calculée.

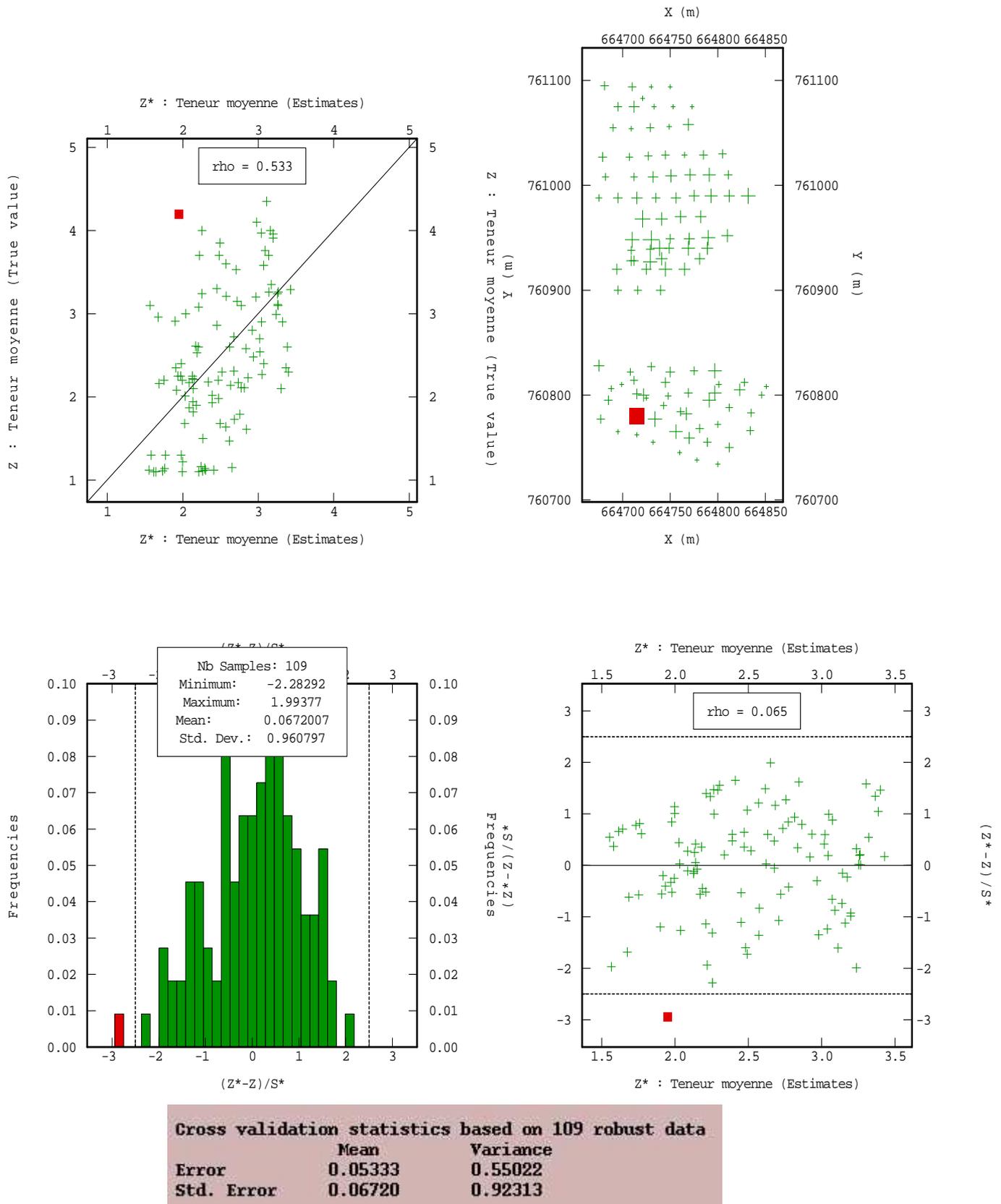


Figure 17 : Résultat de la validation croisée de la variable teneur

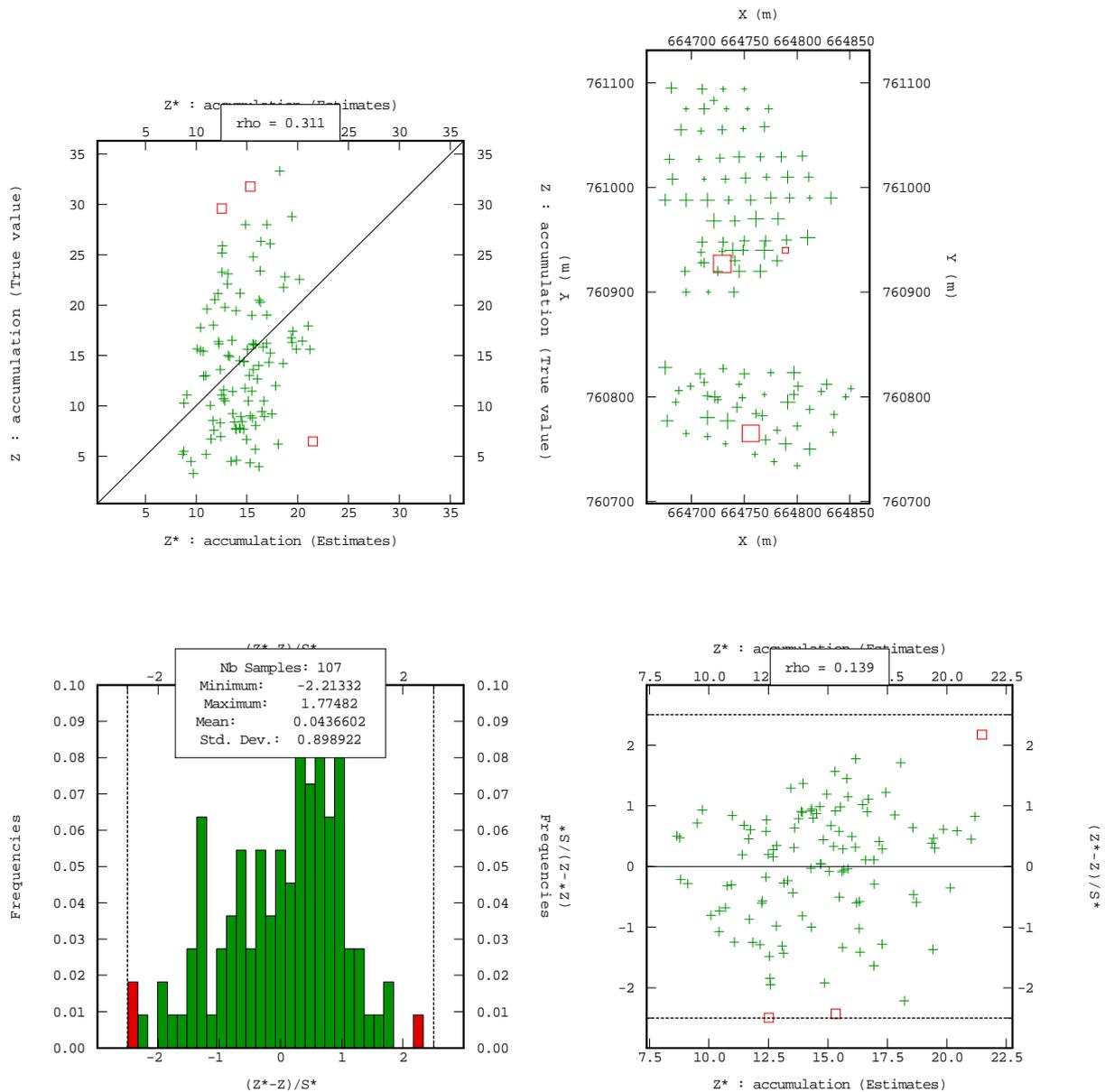


Figure 18 : Résultat de la validation croisée de la variable accumulation

Les figures 17 et 18 montrent un aperçu du résultat de la validation croisée de la variable teneur et accumulation en utilisant le modèle sphérique testé au voisinage glissant. Les petits carrés rouges sont des masques qu'on a effectué au point mal estimé pour avoir un modèle plus corrélé. Les points mal estimés 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 issues de la validation croisée pour chaque variable considérée sont récapitulées dans le tableau 6.

**Tableau 6 : Paramètres de validation croisée**

Variables	Résidu ( $e_i$ )		Voisinage	résidu normalisé ( $n_i$ )		Données robustes sur 110	Coefficient de corrélation
	Moyen	Variance		Moyen	Variance		
Teneur	0.053	0.55	Glissant	0.067	0.923	109	0.533
Accumulation	0.149	44.68	Glissant	0.022	0.94	110	0.311

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 (0.923 et 0.94) pour les deux variables. Pour les deux variables, le modèle sphérique testé au voisinage glissant présente des statistiques légèrement meilleures.

Pendant le processus de la validation croisée, les données robustes sont au nombre de 109 pour la variable teneur et 110 pour la variable accumulation. Rappelons qu'une donnée est dite robuste si l'erreur standardisée est comprise entre -2.5 et 2.5.

### **VI.3 Modélisation par krigeage**

En un point de donnée, la meilleure estimation linéaire est égale à la valeur elle-même. Le krigeage est donc un interpolateur exact. En effet, dans une exploitation minière sélective, l'estimation des valeurs inconnues des blocs par leur échantillonnage présente un risque d'erreur assez élevé. C'est pour éviter cela qu'on a utilisé le krigeage.

#### **VI.3.1 Choix du bloc d'estimation**

Le logiciel crée ici des mailles régulières de dimension 5m × 5 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 modifié au fur et à mesure selon les besoins.

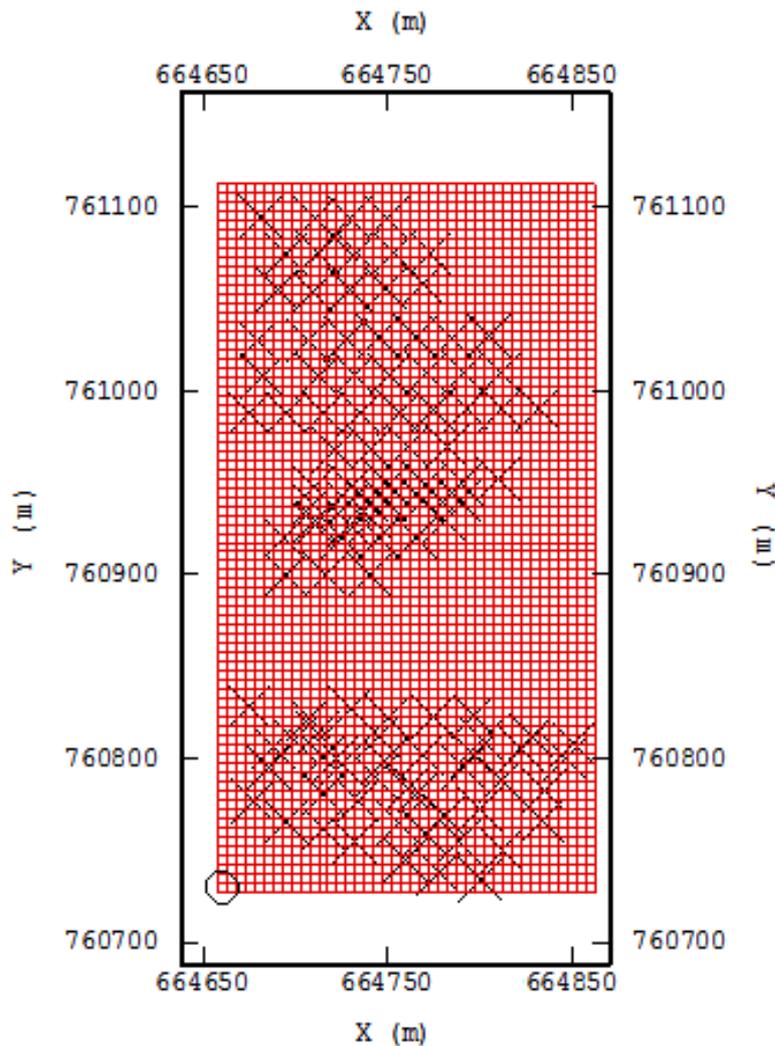


Figure 19 : Bloc d'estimation

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 deux secteurs pour avoir un meilleur résultat d'estimation. Pour ce faire, il a suffi d'utiliser deux polygones définissant ainsi les deux zones prospectées (Figure 20) : polygone 1 ou zone A (la partie supérieure) et polygone 2 ou zone B (la partie inférieure).

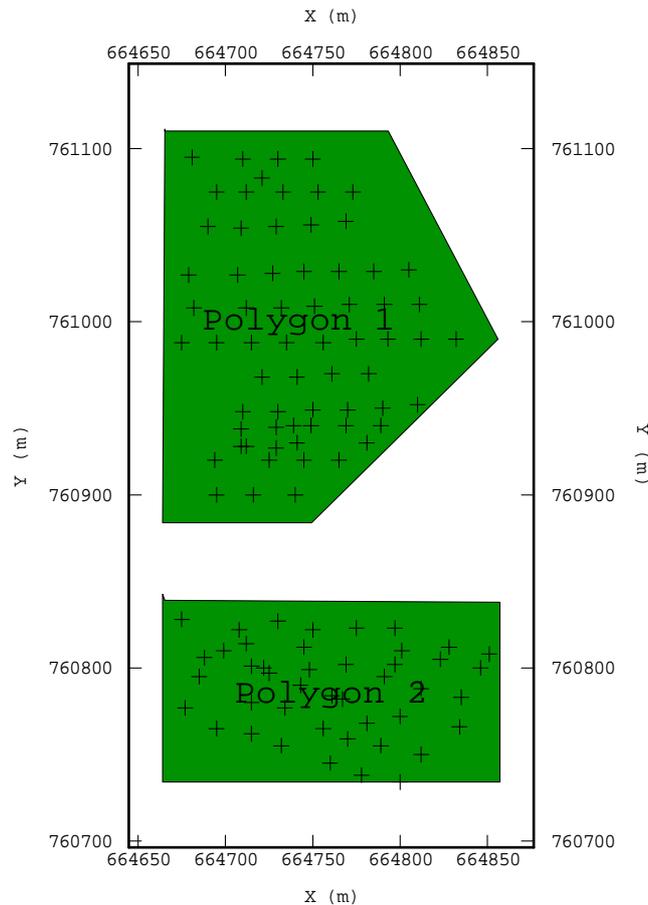


Figure 20 : Estimation par polygones

### VI.3.2 Résultats et interprétations

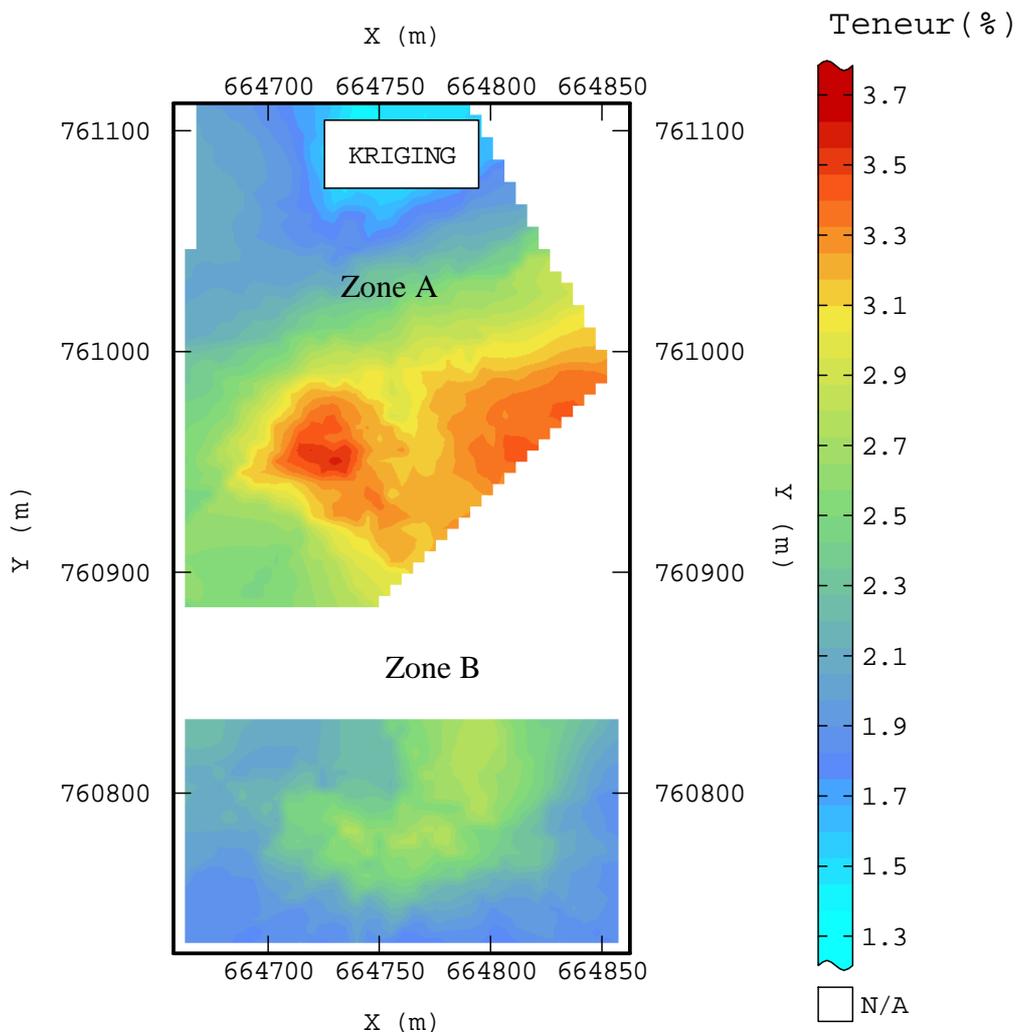
En considérant toujours le bloc d'estimation qu'on a choisi précédemment, le tableau 7 récapitule les caractéristiques statistiques des résultats de l'estimation par krigeage des deux variables.

Tableau 7 : Résultat de calcul par krigeage

Variable	Nombre	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Variance
Teneur	2206	1.37	3.81	2.41	0.52	0.27
Erreur	2206	0.27	0.59	0.35	0.06	0.00
accumulation	2206	8.07	22.22	14.26	2.79	7.80
Erreur	2206	2.27	4.03	2.82	0.36	0.13

En tenant compte des données initiales, les moyennes entre les vraies valeurs et les valeurs estimées sont proches. Pour la variable teneur, la moyenne après krigeage est de 2.41 % alors que la moyenne initiale était de 2.47%. Dans le cas de la variable d'accumulation, la moyenne est de 14.26 m% alors qu'initialement elle était de 14.50 m%. On constate que les variances après krigeage 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 0.33% à 0.58% et dans le cas de la variable accumulation l'erreur est de l'ordre de 3%. On a donc réalisé une bonne estimation pour les deux variables. Les parties du gisement contenant des concentrations fortes se distinguent par la coloration rouge entourée de jaune (voir figure 20 et 22).



**Figure 21 : Carte d'estimation après krigeage de la variable teneur**

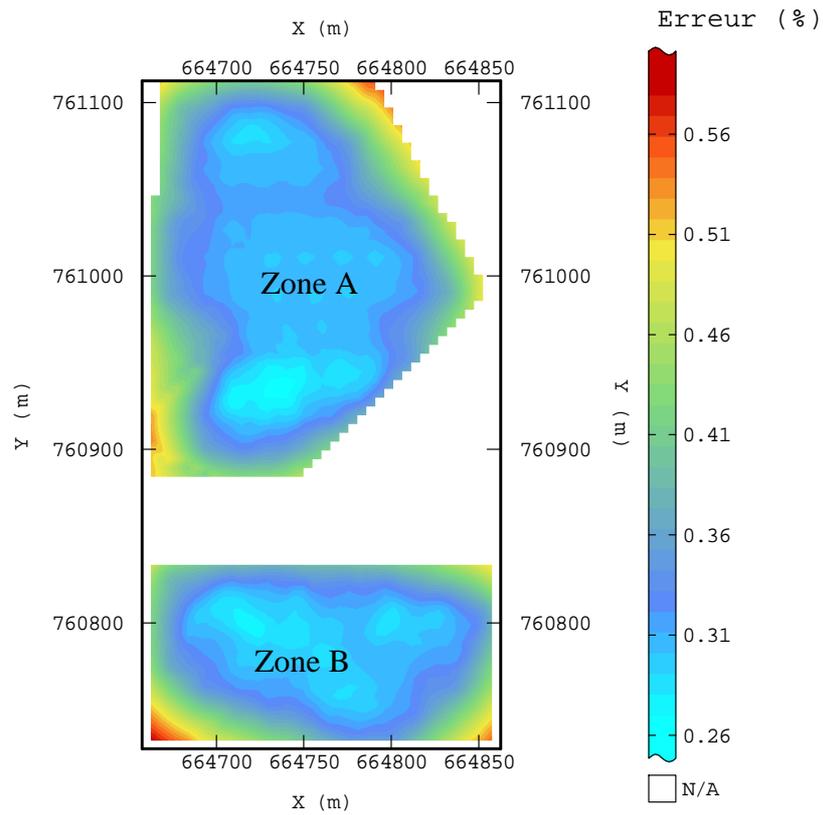


Figure 22 : Carte d'erreur après krigeage de la variable teneur

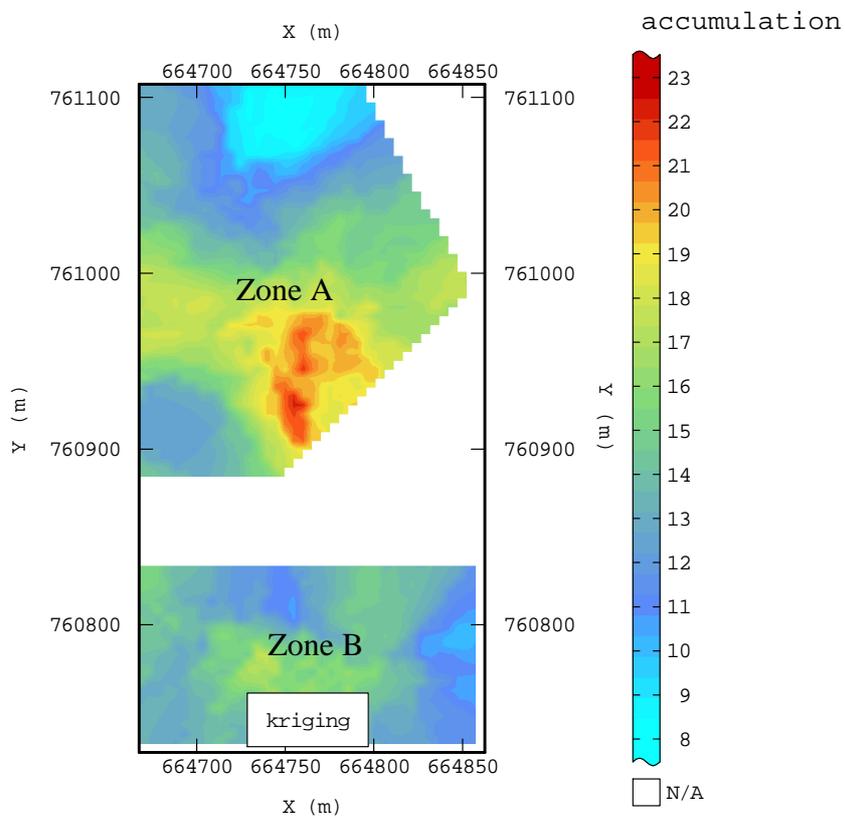


Figure 23 : Carte d'estimation après krigeage de la variable accumulation

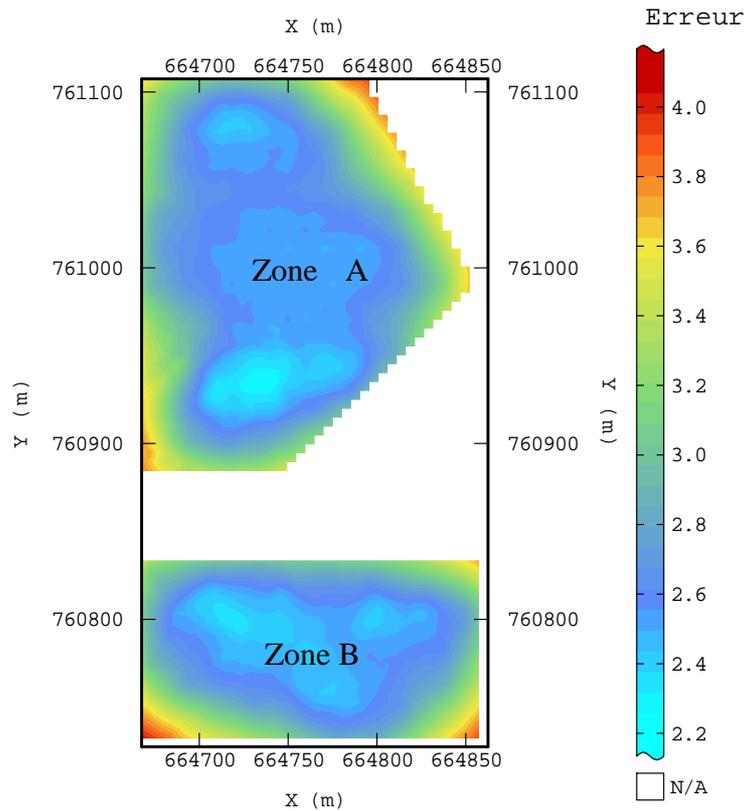


Figure 24 : Carte d'erreur après krigeage de la variable accumulation

#### VI.4 Estimation des réserves

##### ❖ Estimation de la teneur

D'après le résultat obtenu par utilisation du logiciel Isatis, la teneur moyenne du graphite estimée est  $Z_m^* = 2.41\%$  c'est à dire  $Z_m^* = 2.41$  [g/hg], ou encore  $Z_m^* = 24.1$  [kg/t]

Pour la zone A, la teneur moyenne de graphite estimée est de 2.54 % et 2.21 % pour la zone B.

La masse volumique  $\rho$  du graphite est comprise entre 2.09 et 2.23 [g/cm<sup>3</sup>] ou [t/m<sup>3</sup>], dans la suite du calcul, on prendra une valeur moyenne de masse volumique  $\rho = 2.16$  [t/m<sup>3</sup>]

Pour une masse de 1t, on a  $v = \frac{1}{2.41}$  (en convertissant l'unité de masse en unité de volume)

Alors  $Z_m^* = 24.1 \times \left(\frac{1}{2.16}\right)^{-1} = 52.056$  [kg/m<sup>3</sup>]

##### ❖ Estimation de l'accumulation

Par définition  $A(x) = p(x)Z(x)$

Après krigeage, la valeur de l'accumulation moyenne estimée est de  $A_m^* = 14.26$  [m%]

❖ **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, on commet une erreur qui est égale à  $e = Z^* - Z$

La variance de cette erreur est de  $\text{Var}(Z^* - Z) = \text{Var}(e) = 0$

▪ **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  $\text{Var}(A^* - A) = \text{Var}(e) = 0.13 = 13(\text{m}\%)^2$

❖ **Estimation de la surface minéralisée**

Le nombre total des mailles du gisement est de 2 206 dont 1 386 pour la zone A (partie supérieure) et 820 pour la zone B (partie inférieure)

L'estimation de la surface minéralisée est la suivante :

$$S_t^* = 5 \times 5 \times 2\,206 = 55\,150 \text{m}^2$$

$$S_A^* = 5 \times 5 \times 1\,386 = 34\,650 \text{m}^2$$

$$S_B^* = 5 \times 5 \times 820 = 20\,500 \text{m}^2$$

❖ **Variance de l'erreur géométrique**

En estimant  $S$  par  $S^*$ , on commet une 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 choisies telles que  $n_1 \geq n_2$

D'après le résultat par krigeage on avait  $\frac{\sigma^2(S)}{S^2}$

$$\frac{\sigma}{S} = 0.045 = 4.5\%$$

D'où

$$S^* = 55\,150 \text{ m}^2 \rightarrow S = 55\,150 \pm 2\,481.75 \text{ m}^2$$

#### ❖ Estimation de la quantité du graphite

La quantité du graphite estimée est donnée par la formule :

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

Avec  $S$  : surface minéralisée

$$p : \text{puissance moyenne avec } p = \frac{A_m^*}{Z_m^*} = \frac{14.26}{2.41} = 5,91 \cong 6\text{m}$$

$A_m^*$  = accumulation moyenne krigée

$Z_m^*$  : teneur moyenne krigée

#### Application numérique :

$$Q^* = 55\,150 \times 6 \times 52.056 = 17\,225\,330.4 \text{ kg}$$

La quantité du graphite de la colline 44 est donc  $Q = 17\,225.330 \pm 771$  [t]

Le tableau 8 récapitule les résultats des estimations effectuées.

**Tableau 8 : Récapitulation des résultats**

	Teneur moyenne [%]	Surface [m <sup>2</sup> ]	Cubage du minerai [m <sup>3</sup> ]	Quantité du graphite [t]
Zone A	2.54	34 650	207 900	11 400
Zone B	2.21	20 500	123 000	5 825
Totale	2.41	55 150	330 900	17 225

La répartition de cubage de minerai suivant les teneurs en graphite est donnée par le tableau 9.

**Tableau 9 : Répartition de cubage de minerai suivant les teneurs**

Teneur	Surface [m <sup>2</sup> ]	Cubage [m <sup>3</sup> ]	Pourcentage [%]
$1 \leq \text{Teneur} < 2$	12 800	76 800	23.2
$2 \leq \text{Teneur} < 3$	31 875	121 250	57.8
$3 \leq \text{Teneur} < 4$	10 475	62 850	19

## CONCLUSION PARTIELLE

Le but principal de l'étude a été d'estimer globalement la réserve de minerai de graphite sur le site de Marovintsy par la méthode géostatistique. Isatis, le logiciel 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 minerai estimé est de 330 900 m<sup>3</sup> pour un tonnage de graphite de 17 225[t].

## CONCLUSION GENERALE

La prospection effectuée dans la colline 44 sise à Marovintsy a permis d'affirmer la présence d'un gisement de graphite de type paillette. Pour juger de l'exploitabilité d'un gisement, l'estimation des réserves est une étape qui s'impose. Ainsi dans cet ouvrage, l'étude s'est surtout portée sur l'évaluation du gisement tant qualitativement que quantitativement et pour ce faire la géostatistique a été utilisée.

La géostatistique dépasse la méthode traditionnelle car elle apporte plus de précisions dans l'évaluation des réserves par le fait qu'elle puisse représenter la minéralisation du gisement par un modèle mathématique. Effectivement, Isatis, le logiciel géostatistique utilisé, 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, pour le gisement de Marovintsy, le tonnage de graphite est estimé à 17 225 tonnes avec une teneur moyenne en carbone de 85%, le tout réparti sur une superficie de 55 150m<sup>2</sup>. Ce résultat s'avère intéressant pour l'Ets Gallois étant donné le fait qu'actuellement, les trois zones en exploitation produisent en moyenne 2 400 tonnes de graphites par an. Donc, il est clairement démontré que cette région possède une forte potentialité en graphite, un éventuel projet d'exploitation pourrait constituer un plus tant pour la société que pour la population locale. Cependant, des études plus poussées (méthodes d'exploitation, étude d'impact environnementale, étude économique,...) demeurent nécessaires pour juger de la faisabilité et de la rentabilité d'un tel projet.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] **ALLARD M. et al ; 1970** Géologie de Madagascar, 88p
- [2] **ANDRIANARIMANANA Jaobelison**, Cours de gîtes minéraux, pétrographie et recherche minière, Département Mines, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
- [3] **ARISOA Rivah K.**, Cours de minéralogie et cristallographie, Département Mines, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
- [4] **BESAIRIE H.;1966** Gîtes et minéraux de Madagascar. Annales .Géol. Madagasikara. Fasc. XXXIV; Antananarivo; 416p
- [5] **BESAIRIE H.; 1973**  
Les diverses interprétations du socle malgache. Service géologique de Madagascar Antananarivo. 1973
- [6] **BRGM**, Rapport public : « panorama 2011 du marché du graphite naturel », 2012.
- [7] **Bureau de Recherches Géologiques et Mines; 1984**  
Plan directeur pour la mise en valeur des ressources du sol et du sous-sol de Madagascar, Ministère de l'Industrie, de l'Énergie et des Mines; Antananarivo; 416p
- [8] **Centre de Recherches d'Etudes et d'Appui à l'analyse économique à Madagascar (CREAM) ; février 2013**  
Monographie Région Atsinanana ; 162p
- [9] **COLLINS A.S et WINDLEY B F.; 2002**  
The tectonic evolution of central and northern Madagascar and its place in the final assembly of Gondwana
- [10] **D.G. Krige et E.J Magri** : « Geostatistical case studies of the advantages of lognormal-De Wijsian kriging with mean for a base metal mine and a gold mine »,  
Math. Geol., vol. 14 n° 6 (1982)
- [11] **FOUCAULT .J, RAOULT. F** « Dictionnaire de géologie, 3 ème édition Masson, 120, bd Saint Germain, Paris, 1992, 300-301 p

- [12] **JACQUES (CARIGNAN)**, géochimie et géostatistique appliquées à l'exploration des gisements volcanogènes: le gisement de Millenbach thèse de doctorat ès sciences appliquées. (Génie géologique) juillet 1979
- [13] **J.M. Rendu** : « Kriging, logarithmic kriging and conditional estimation: comparison of theory and actual results », 16th Application of computers and operations research in the mineral industry, T.J. O' Neil Editor, Society of Mining Engineers of AIME (1979)
- [14] **LACROIX. A.**, « Minéralogie de Madagascar », Tome I, Paris, Augustin Challamel, 1962, 14p, p152-154
- [15] **MATHERON, G. 1970.** La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers du centre de morphologie mathématique, Fasc. 5. Centre de géostatistique de Fontainebleau.
- [16] **MATHERON, G. 1969** ; Cours de géostatistique. Les cahiers du centre de morphologie mathématique, de Fontainebleau. Fasc. 2.
- [17] **MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DES MINES ; 1966** Le graphite; Antananarivo; 127p
- [18] **MOHAMMAD KONESHLOO** Caractérisation, estimation et valorisation de gisements d'argiles kaoliniques du bassin des Charentes, Déc. 2007
- [19] **MORER J. et al ; 1981** Manuel du prospecteur minier, Orléans: BRGM; 273p
- [20] **NICOLINI P.; 1990**  
Gîtologie et exploration minière, Lavoisier; Paris; 589p
- [21] **RAKOTOMANANA Dominique** Cours de géologie de Madagascar, Département Géologie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
- [22] **RASOAMALALA Léonie Francine**, Etude d'optimisation de valorisation de graphite de société Gallois par conception d'un appareil de flottation adapté. Décembre 2004, Mémoire de fin d'étude ESPA
- [23] **RASOLOMANANA Eddy** Cours de géostatistique, Département Mines, ESPA  
F.Barthélémy, J.F.Labbé, J.C.Picot, Panorama 2011 du marché du graphite naturel, Rapport public, Juillet 2012.

## REFERENCES WEBOGRAPHIQUES

- [W1] <http://www.usgs.com> (01 Mai 2015)
- [W2] [www.wikipedia.org/wiki](http://www.wikipedia.org/wiki) (01 Mai 2015)
- [W3] <http://www.asbury.com> (05 Mai 2015)
- [W4] [www.planetoscope.com/.../1490-consommation-mondiale-de-graphite.html](http://www.planetoscope.com/.../1490-consommation-mondiale-de-graphite.html)  
(25 Mai 2015)
- [W5] [www.mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/.../mineraux-proprietes-graphite.js](http://www.mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/.../mineraux-proprietes-graphite.js)  
(25 Mai 2015)
- [W6] [www.mcgroup.co.uk/researches/G/04/Graphite%20Market%20Research.html](http://www.mcgroup.co.uk/researches/G/04/Graphite%20Market%20Research.html)  
(10 juin 2015)
- [W7] [http://dnre\\_mrne.gnb.ca/mineral occurrence](http://dnre_mrne.gnb.ca/mineral_occurrence) (10 Juin 2015)
- [W8] [www.aosabook.org/en/graphite.htm](http://www.aosabook.org/en/graphite.htm) (15 Juin 2015)
- [W9] <http://www.geovariances.com> (15 Juillet 2015)

# **ANNEXES**

**Annexe 1 : Rapport de sondage de la colline 44 Ambodimangabe Marovintsy**

Nom	X [m]	Y[m]	Z[m]	Teneur carbone [%]	Teneur moyenne [%]	Epaisseur [m]	Accumulation [m%]
7-1A	664681	761095	25	84.7	2.25	8	18
4-1A	664710	761094	25	85.6	2.2	7	15.4
3-1A	664730	761094	26	83.2	1.1	5	5.5
1-1A	664750	761094	25	80.1	1.12	4	4.48
2A	664721	761083	30	80.11	1.14	9	10.26
1-3A	664773	761075	25	92.7	1.11	10	11.1
3-3A	664753	761075	28	90.5	1.1	3	3.3
5-3A	664733	761075	31	94.3	1.3	4	5.2
6-3A	664712	761075	31	92	2.96	6	17.76
8-3A	664695	761075	30	89.7	2.25	2	4.5
9-5A	664690	761055	32	88.5	1.87	11	20.57
7-5A	664709	761054	32	83.6	1.22	7	8.54
5A	664729	761055	32	81.2	2.16	6	12.96
4-5A	664749	761056	32	80.5	1.3	4	5.2
2-5A	664769	761058	29	88.9	3.1	5	15.5
13-8A	664679	761027	31	88.01	2.4	6	14.4
10-8A	664707	761027	34	81.64	1.94	4	7.76
8-8A	664727	761028	34	87.65	2.17	6	13.02

7-8A	664745	761029	35	88.75	2.18	9	19.62
5-8A	664765	761029	36	85.81	1.47	8	11.76
3-8A	664785	761029	29	82.68	2.31	7	16.17
1-8A	664805	761030	24	80.12	2.23	7	15.61
4-10A	664811	761010	25	86.7	2.27	6	13.62
6-10A	664791	761010	29	86.14	3.53	6	21.18
8-10A	664771	761010	36	84.67	3.15	3	9.45
10-10A	664751	761009	38	85.05	3.3	5	16.5
11-10A	664732	761008	38	78.63	2.86	4	11.44
13-10A	664712	761008	36	87.12	1.98	2	3.96
16-10A	664682	761008	34	80.11	1.9	10	19
16-12A	664675	760988	33	90.25	1.73	11	19.03
14-12A	664695	760988	36	78.5	2.6	9	23.4
12-12A	664715	760988	38	92.22	3.1	8	24.8
10-12A	664735	760988	42	91.72	2.4	5	12
9-12A	664756	760988	42	91.94	2.7	6	16.2
7-12A	664775	760990	38	90.61	2.9	7	20.3
5-12A	664793	760990	29	94.3	3.58	4	14.32
3-12A	664812	760990	25	92.5	3.1	2	6.2
1-12A	664832	760990	24	96.3	4.1	5	20.5
1-14A	664782	760970	35	84.5	3.11	7	21.77

3-14A	664761	760970	42	90.52	3.2	9	28.8
4-14A	664741	760968	43	86.57	3.35	5	16.75
6-14A	664721	760968	41	80.72	4.35	6	26.1
12-16A	664710	760948	38	84.67	3.96	4	15.84
10-16A	664730	760948	43	85.95	4.74	3	14.22
16A	664750	760949	42	83.6	2.35	7	16.45
7-16A	664770	760949	40	80.99	2.99	6	17.94
5-16A	664790	760950	28	79.32	3.91	4	15.64
3-16A	664810	760952	26	80.04	3.29	8	26.32
1-17A	664789	760940	29	87.54	3.24	2	6.48
3-17A	664769	760940	40	83.08	3.7	9	33.3
5-17A	664739	760940	43	84.97	4	7	28
17A	664749	760940	43	85.78	2.6	6	15.6
6-17A	664729	760939	42	84.78	2.3	4	9.2
8-17A	664709	760938	38	77.68	2.1	5	10.5
7-18A	664709	760928	40	84.09	2.58	3	7.74
5-18A	664729	760927	42	85.16	3.97	8	31.76
4-18A	664741	760930	42	82.01	3.26	5	16.3
1-18A	664781	760930	40	87.66	2.9	6	17.4
1-19A	664765	760920	31	79.87	3.26	7	22.82
3-19A	664745	760920	40	79.95	3.76	6	22.56

19A	664725	760920	42	88.25	2.8	5	14
6-19A	664712	760928	41	88.5	2.48	6	14.88
8-19A	664694	760920	38	78.6	2.72	5	13.6
21A	664716	760900	42	89.6	2.17	2	4.34
4-21A	664695	760900	41	92.3	2.14	5	10.7
1-21A	664740	760900	43	82.14	2.54	6	15.24
1B	664675	760828	41	80.56	2.91	8	23.28
3B	664688	760806	42	87.35	1.5	7	10.5
1-4B	664708	760822	41	80.36	1.82	9	16.38
1-6B	664730	760827	39	84.23	2.22	5	11.1
1-8B	664750	760822	41	85.25	2.61	6	15.66
1-10B	664775	760823	38	86.9	2.11	4	8.44
1-12B	664797	760823	34	90.2	3.85	6	23.1
2-5B	664712	760814	42	80.76	2.1	5	10.5
2-8B	664745	760812	42	75.9	2.53	3	7.59
2-10B	664769	760802	41	78.43	2.3	2	4.6
2-13B	664801	760810	34	78.19	1.61	9	14.49
1-15B	664828	760812	28	81.46	2.02	8	16.16
1-17B	664851	760808	23	77.82	1.16	6	6.96
6B	664715	760801	42	76.52	2.6	5	13
4-9B	664748	760799	42	87.5	1.68	5	8.4

3-11B	664722	760800	41	80.03	3.24	6	19.44
3-13B	664797	760802	35	85.5	3.6	4	14.4
2-15B	664823	760805	30	82.05	3.08	3	9.24
2-17B	664846	760800	26	79.31	1.68	4	6.72
05B	664699	760810	42	80.59	1.12	8	8.96
7B	664725	760797	42	82.19	1.15	7	8.05
9B	664743	760790	42	84.23	1.79	9	16.11
11B	664761	760784	42	86.25	2.11	6	12.66
13B	664781	760768	39	92.08	2.2	4	8.8
4-11B	664767	760782	42	93.93	3.21	5	16.05
4-13B	664791	760795	38	85.21	3.7	7	25.9
4-15B	664812	760788	34	80.63	1.93	6	11.58
4-17B	664835	760783	28	91.29	2.01	5	10.05
15B	664800	760772	35	94.5	1.64	7	11.48
17B	664834	760766	30	85.6	2.08	4	8.32
7-17B	664812	760750	29	84.2	2.35	9	21.15
7-15B	664789	760755	24	83.7	2.21	10	22.1
7-13B	664770	760759	26	87.2	3	5	15
6-11B	664756	760765	39	79.82	3.7	8	29.6
6-9B	664734	760777	42	96	4	7	28
5-7B	664715	760780	42	94.5	4.2	6	25.2

4-4B	664685	760795	41	92.3	2.25	4	9
6-4B	664677	760777	38	90.5	2.2	9	19.8
7-5B	664695	760765	34	87.6	1.1	7	7.7
7-8B	664715	760762	38	84.2	1.12	8	8.96
8-10B	664732	760755	38	88.6	1.14	5	5.7
9-13B	664760	760745	32	84.5	1.11	6	6.66
9-15B	664778	760738	30	86.5	1.1	7	7.7
9-17B	664800	760734	25	85.2	1.3	6	7.8

**Annexe 2 : Quelques résultats sur Isatis**

2.04	2.05	2.05	2.06	2.05	2.05	2.11	2.11	2.11	2.06	2.15	2.23	2.27	2.14	2.21	2.28	2.29	2.34	2.41	2.47	2.51	2.49	2.58	2.59	2.67	2.66	2.66	2.65	2.69	2.72	2.75	2.79	2.82	2.86	2.89
2.05	2.06	2.06	2.07	2.07	2.07	2.07	2.15	2.16	2.18	2.24	2.28	2.32	2.35	2.37	2.41	2.37	2.40	2.43	2.57	2.67	2.62	2.65	2.64	2.70	2.70	2.69	2.74	2.75	2.77	2.80	2.83	2.87	2.90	2.93
2.06	2.07	2.07	2.08	2.08	2.17	2.13	2.16	2.17	2.23	2.34	2.38	2.44	2.41	2.43	2.46	2.52	2.56	2.56	2.65	2.73	2.71	2.73	2.74	2.77	2.78	2.76	2.81	2.81	2.82	2.85	2.88	2.82	3.01	3.04
2.07	2.07	2.07	2.14	2.16	2.19	2.21	2.25	2.27	2.31	2.37	2.42	2.43	2.46	2.48	2.57	2.57	2.60	2.62	2.71	2.80	2.83	2.79	2.80	2.85	2.86	2.89	2.88	2.88	2.93	2.95	2.99	3.02	3.06	3.05
2.07	2.13	2.14	2.15	2.18	2.22	2.25	2.28	2.30	2.48	2.55	2.61	2.59	2.67	2.62	2.60	2.60	2.70	2.70	2.75	2.85	2.88	2.88	2.89	2.84	2.88	2.87	3.01	3.00	3.00	3.01	3.04	3.07	3.11	3.13
2.24	2.24	2.26	2.23	2.33	2.37	2.40	2.44	2.45	2.49	2.62	2.69	2.72	2.79	2.80	2.75	2.83	2.78	2.79	2.92	2.93	2.95	2.98	2.93	3.05	2.98	3.07	3.06	3.06	3.06	3.07	3.10	3.13	3.16	3.18
2.33	2.33	2.37	2.32	2.36	2.41	2.45	2.50	2.52	2.57	2.63	2.80	2.84	2.85	2.84	2.89	2.89	2.91	2.81	3.03	2.94	2.97	3.00	3.11	3.05	3.01	3.12	3.11	3.11	3.12	3.13	3.16	3.19	3.22	3.24
2.31	2.40	2.41	2.45	2.47	2.45	2.51	2.56	2.63	2.69	2.78	2.90	2.90	2.94	2.92	2.96	3.06	3.05	3.00	3.02	3.08	3.11	3.10	3.11	3.12	3.08	3.21	3.18	3.18	3.19	3.24	3.26	3.30	3.33	3.34
2.35	2.35	2.37	2.43	2.54	2.60	2.65	2.71	2.81	2.87	3.03	3.11	3.11	3.00	3.12	3.01	3.08	3.07	2.92	3.03	3.08	3.11	3.13	3.13	3.18	3.19	3.22	3.30	3.30	3.26	3.28	3.30	3.33	3.35	3.36
2.33	2.40	2.43	2.48	2.53	2.59	2.65	2.83	2.83	3.09	3.14	3.22	3.21	3.23	3.21	3.17	3.03	3.03	2.94	2.95	3.06	3.07	3.21	3.20	3.23	3.27	3.31	3.32	3.32	3.33	3.35	3.37	3.38	3.36	3.37
2.44	2.46	2.48	2.52	2.58	2.79	2.80	2.87	3.00	3.07	3.22	3.27	3.33	3.34	3.23	3.24	3.13	3.14	3.04	2.99	3.03	3.15	3.23	3.18	3.20	3.28	3.23	3.33	3.34	3.35	3.36	3.38	3.40	3.41	3.42
2.47	2.47	2.51	2.56	2.53	2.77	2.86	2.99	3.06	3.17	3.22	3.38	3.39	3.41	3.23	3.27	3.22	3.17	2.93	2.96	3.07	3.16	3.16	3.24	3.28	3.23	3.30	3.37	3.31	3.36	3.37	3.38	3.40	3.41	3.42
2.43	2.52	2.56	2.61	2.67	2.82	2.92	3.00	3.24	3.25	3.37	3.42	3.40	3.46	3.38	3.24	3.25	3.13	3.20	3.07	3.08	3.13	3.17	3.26	3.23	3.31	3.32	3.32	3.37	3.34	3.35	3.36	3.35	3.39	
2.51	2.55	2.58	2.63	2.83	2.90	2.93	3.01	3.22	3.28	3.45	3.41	3.41	3.36	3.40	3.23	3.22	3.16	3.21	3.15	3.10	3.15	3.13	3.13	3.30	3.32	3.33	3.31	3.41	3.42	3.40	3.35	3.36		
2.53	2.56	2.60	2.78	2.83	2.90	3.08	3.13	3.13	3.36	3.51	3.55	3.52	3.46	3.54	3.42	3.23	3.20	3.13	3.23	3.11	3.15	3.14	3.20	3.23	3.34	3.34	3.33	3.41	3.41	3.41	3.41	3.44		
2.48	2.59	2.67	2.75	2.73	2.84	3.10	3.15	3.35	3.41	3.43	3.43	3.47	3.61	3.53	3.40	3.22	3.17	3.17	3.11	3.16	3.13	3.18	3.21	3.27	3.30	3.36	3.33	3.40	3.40	3.42	3.42			
2.54	2.56	2.58	2.62	2.78	3.15	3.17	3.18	3.21	3.31	3.35	3.41	3.43	3.44	3.50	3.32	3.32	3.21	3.20	3.14	3.13	3.14	3.18	3.24	3.27	3.29	3.35	3.35	3.32	3.40	3.40				
2.55	2.57	2.60	2.63	2.97	2.90	3.10	3.10	3.10	3.08	3.16	3.22	3.28	3.28	3.32	3.32	3.27	3.22	3.17	3.21	3.23	3.18	3.20	3.23	3.25	3.28	3.33	3.31	3.38	3.38					
2.45	2.46	2.45	2.70	2.70	2.86	2.87	2.88	2.98	3.00	3.07	3.16	3.23	3.22	3.27	3.26	3.36	3.33	3.12	3.20	3.20	3.22	3.23	3.18	3.21	3.23	3.25	3.25							

**Valeurs de krigeage de la zone A**

2.25	2.26	2.25	2.23	2.16	2.13	2.10	2.03	2.08	2.11	2.05	2.10	2.13	2.16	2.23	2.24	2.24	2.27	2.45	2.38	2.54	2.57	2.61	2.70	2.73	2.73	2.75	2.75	2.66	2.55	2.43	2.43	2.43	2.36	2.30	2.24	2.13
2.24	2.24	2.23	2.20	2.17	2.10	2.08	2.06	2.06	2.03	2.05	2.10	2.13	2.16	2.23	2.25	2.26	2.27	2.27	2.51	2.54	2.56	2.60	2.70	2.74	2.75	2.78	2.77	2.67	2.56	2.43	2.43	2.42	2.34	2.27	2.21	2.12
2.16	2.13	2.17	2.17	2.14	2.07	2.04	2.04	2.04	2.00	2.05	2.11	2.14	2.16	2.22	2.23	2.25	2.27	2.25	2.46	2.60	2.56	2.60	2.71	2.75	2.75	2.77	2.72	2.66	2.56	2.43	2.48	2.40	2.32	2.24	2.14	2.08
2.13	2.13	2.14	2.11	2.07	2.04	2.01	2.01	2.03	2.01	2.15	2.11	2.14	2.21	2.21	2.26	2.23	2.24	2.23	2.40	2.57	2.55	2.67	2.72	2.74	2.78	2.77	2.68	2.66	2.61	2.55	2.47	2.38	2.30	2.22	2.11	2.04
2.11	2.10	2.08	2.21	2.04	2.01	2.10	2.11	2.08	2.14	2.20	2.23	2.08	2.19	2.19	2.23	2.24	2.20	2.21	2.40	2.51	2.70	2.65	2.71	2.75	2.79	2.69	2.65	2.63	2.60	2.54	2.46	2.38	2.28	2.16	2.08	2.01
2.14	2.13	2.11	2.04	2.19	2.19	2.15	2.17	2.15	2.21	2.27	2.23	2.09	2.18	2.34	2.35	2.30	2.26	2.19	2.33	2.51	2.58	2.66	2.73	2.70	2.79	2.70	2.67	2.69	2.53	2.52	2.46	2.38	2.22	2.14	2.06	1.99
2.13	2.12	2.11	2.10	2.09	2.25	2.12	2.16	2.22	2.33	2.38	2.46	2.51	2.47	2.35	2.32	2.35	2.36	2.30	2.51	2.52	2.59	2.67	2.69	2.70	2.72	2.79	2.66	2.62	2.55	2.50	2.43	2.26	2.18	2.10	2.05	1.90
2.12	2.12	2.11	2.11	2.12	2.10	2.15	2.25	2.17	2.49	2.47	2.47	2.47	2.53	2.47	2.46	2.37	2.38	2.43	2.65	2.57	2.55	2.51	2.52	2.57	2.74	2.78	2.64	2.59	2.50	2.44	2.31	2.11	2.07	2.01	1.96	1.91
2.12	2.12	2.12	2.12	2.19	2.08	2.13	2.18	2.12	2.43	2.47	2.43	2.51	2.60	2.66	2.57	2.43	2.50	2.49	2.63	2.59	2.71	2.72	2.61	2.61	2.66	2.71	2.67	2.52	2.47	2.31	2.28	2.03	2.05	2.01	1.97	1.89
2.05	2.05	2.05	2.05	2.03	2.06	2.04	2.03	2.15	2.40	2.40	2.46	2.44	2.45	2.77	2.76	2.59	2.59	2.61	2.60	2.72	2.74	2.72	2.78	2.58	2.50	2.47	2.51	2.40	2.33	2.28	2.25	2.07	2.04	2.06	2.02	1.92
2.04	2.04	2.04	2.00	2.02	1.99	2.02	2.07	2.32	2.42	2.43	2.33	2.37	2.58	2.54	2.67	2.64	2.47	2.70	2.75	2.77	2.61	2.76	2.74	2.53	2.56	2.48	2.48	2.37	2.34	2.30	2.29	2.26	2.09	2.06	2.02	1.99
2.02	2.02	2.05	1.94	1.95	1.96	1.93	2.22	2.25	2.32	2.33	2.31	2.49	2.57	2.55	2.53	2.67	2.49	2.62	2.60	2.58	2.65	2.57	2.70	2.65	2.53	2.49	2.40	2.37	2.36	2.34	2.28	2.24	2.03	2.06	2.03	2.00
2.00	2.02	1.92	1.92	1.92	1.92	1.97	2.11	2.16	2.21	2.21	2.35	2.40	2.48	2.49	2.51	2.38	2.50	2.52	2.53	2.63	2.57	2.49	2.45	2.43	2.48	2.39	2.41	2.22	2.32	2.31	2.30	2.17	2.03	2.01	2.00	1.91
2.01	1.86	1.86	1.86	1.90	1.90	1.91	2.03	2.07	2.10	2.09	2.24	2.30	2.23	2.33	2.50	2.53	2.47	2.51	2.54	2.53	2.47	2.43	2.38	2.44	2.25	2.21	2.13	2.16	2.17	2.15	2.15	2.03	2.01	1.96	1.92	1.91
1.90	1.83	1.83	1.83	1.88	1.88	1.88	1.98	2.00	2.02	2.10	2.16	2.08	2.05	2.24	2.40	2.44	2.34	2.38	2.43	2.41	2.25	2.23	2.17	2.18	2.14	2.16	2.10	2.09	2.02	2.02	2.12	2.02	2.02	1.95	1.93	1.90
1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.87	1.87	1.94	1.96	2.08	2.07	1.97	2.00	2.08	2.12	2.31	2.12	2.20	2.32	2.31	2.30	2.20	2.15	2.16	2.12	2.08	1.97	2.06	1.97	1.97	1.97	2.00	1.91	2.01	1.94	1.93	1.91
1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.86	1.92	1.93	1.91	1.89	1.92	1.96	2.02	2.06	2.10	2.03	2.08	2.20	2.18	2.02	2.03	2.05	2.07	2.04	2.02	1.95	1.89	1.94	1.96	1.96	1.96	1.90	1.90	1.99	1.92	1.91
1.84	1.84	1.84	1.84	1.85	1.85	1.91	1.91	1.87	1.85	1.86	1.90	1.93	1.91	1.93	2.04	1.98	1.96	2.03	2.06	1.91	1.92	2.01	1.98	1.96	1.95	1.91	1.84	1.86	1.92	1.93	1.93	1.93	1.88	1.88	1.92	1.90
1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.77	1.85	1.85	1.84	1.85	1.94	1.85	1.86	1.88	2.02	1.89	1.94	2.03	1.83	1.83	1.87	1.92	1													

### **Annexe 3 : 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'orogénèse majeure de 2,6Ga appelée Shamwaienne aurait métamorphisé.

Des études plus récentes sur le Précambrien de l'ensemble de Madagascar ont été présentées par Hottin en 1976. 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'orogénèse shamwaiennemajeure 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'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'orogénèse shamwaiennemajeure 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 BeforonaAlaotra, 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 leptynitesgranulites 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 faciès 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-alkalines 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 méta sédimentaires à néoprotérozoïque scharriées sur le Bloc d'Antananarivo. Des imbrications locales ont été décrites. Les épisodes gabbroïques du 790 et 810 Ma, syenitiques 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'Ikalavony-Amborompotsy :**

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

- **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 rétro-morphosé 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 4 : Le Précambrien malgache et les différents évènements géologiques**

(Razafinimparany, 1978)

Chronologie absolue	Echelle stratigraphique	Formations mises en place	Evènements géologiques principaux
550MA-100 550MA	CAMBRIEN		Orogenèse Mozambicaine panafricaine : réactivation locales des migmatites, mise en place des granites, pegmatites ( U,Th,Nb,Ta) ; rajeunissement des biotites
550MA+100 1200MA+100	PROTEROZOIQUE SUPERIEUR	Pas de dépôts connus	Orogenèse kibarienne ; Métamorphisme des séries précédentes et réactivation des plus anciennes, mise en place des migmatites, granites et charnockites
1200MA 1200MA+200	PROTEROZOIQUE MOYEN (S.Q.C : schistes-quartzites-cipolins	Dépôts des séries Amborompotsy, Ikalamavony, Ihosy, Horombe, Bevinda, S.Q.C, Daraina-Milanoa, Vohibory, Ambohipato-Vohémar	Formation des leptynites
2000MA 2300MA	PROTEROZOIQUE INFÉRIEURE	Volcanisme et sédimentation dans le Sud ; formations des séries de Fort-Dauphin, Tranomaro, Ranotsara, Tsitondroina	Episode thermique éburnéenne
2600MA	ARCHEEN	Dépôts des séries silico-alumineuses et calco-ferromagnésiennes et leurs équivalents migmatitiques	Orogenèse Shamvaïenne : plissement et métamorphisme des séries : Beforona, Alaotra, Maevatanana-Manampotsy-Ambatolampy
2600MA+200			
3000MA-200			
3000MA	KATARCHEEN	Massif ou dôme de granite et de migmatites, leptynites (Antongil, Angavo, Behara) et des metabasites	Orogenèse de 3000+ou-200 : elaborations des formations qui vont constituer les ossatures et noyaux sur lesquels vont se mouler les formations plus récentes.

**Annexe 5 : Photographies**

Voici quelques photos durant le stage au sein de la Société Gallois Marovintsy



**TABLE DES MATIERES**

<i>REMERCIEMENTS</i> .....	<i>i</i>
<i>SOMMAIRE</i> .....	<i>iii</i>
<i>LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES</i> .....	<i>iv</i>
<i>LISTE DES ANNEXES</i> .....	<i>v</i>
<i>LISTE DES CARTES</i> .....	<i>vi</i>
<i>LISTE DES FIGURES</i> .....	<i>vii</i>
<i>LISTE DES PHOTOS</i> .....	<i>viii</i>
<i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....	<i>ix</i>
<i>GLOSSAIRE</i> .....	<i>x</i>
<i>INTRODUCTION</i> .....	<i>1</i>
<b>PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GENERAL</b>	
<i>CHAPITRE I : Etablissement Gallois</i> .....	<i>2</i>
<i>I.1 Historique</i> .....	<i>2</i>
<i>I.2 Présentation de l’Etablissement Gallois</i> .....	<i>2</i>
<i>I.3 Activités de la Société</i> .....	<i>3</i>
<b>I.3.1 Organigramme de l’Ets Gallois Marovintsy</b> .....	<b>3</b>
<i>I.4 Exploitation du graphite à Marovintsy</i> .....	<i>4</i>
<i>I.4.1 Déroulement de l’exploitation</i> .....	<i>5</i>
<b>I.4.1.1 Mines</b> .....	<b>5</b>
<b>I.4.1.2 Flowsheet de débouillage</b> .....	<b>6</b>
<i>I.5 Production</i> .....	<i>8</i>
<i>CHAPITRE II : GENERALITES SUR LE GRAPHITE</i> .....	<i>10</i>
<i>II.1 Historiques [W1] [W2]</i> .....	<i>10</i>
<b>II.1.1 Minéralogie descriptive [W1] [W2]</b> .....	<b>[6]</b>

II.1.2 Métallogénie du graphite [W3] [W4] [W5].....	11
II.1.3 Classification du graphite [W1] [W3] [6].....	12
II.1.3.1 Graphite amorphe.....	12
II.1.3.2 Graphite en paillette.....	12
II.1.3.3 Graphite en bloc ou graphite filonien.....	13
II.2 Utilisation et marché mondial du graphite [6] [W4] [W5].....	14
II.2.1 Utilisation [6].....	14
II.2.2 Principaux pays producteurs [6] [W5] [W8].....	16
II.2.3 Répartition de la consommation [W4] [W5].....	17
II.2.4 Prix sur le marché [W3] [W4] [W6].....	17
II.3 Graphite à Madagascar [5].....	18
II.3.1 Indices graphiteux de Madagascar [5] [17].....	19
II.3.1.1 Région orientale.....	21
a. Faisceau de Moramanga.....	22
b. Axe Vatomandry.....	22
c. Région d’Ampasinambo.....	24
d. Axe sahanavo-sahamamy.....	24
e. Région ouest et sud-ouest de Toamasina.....	25
II.3.1.2 Région d’Ampanihy-Bekily-Benenitra.....	26
II.3.1.3 Région d’Antsirabe-Ambatolampy.....	27
CONCLUSION PARTIELLE.....	27
DEUXIEME PARTIE : EXPLORATION DU SITE D'ETUDE	
CHAPITRE III : CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE.....	28
III.1 Localisation géographique.....	28
III.2 Contexte physique et biologique [8] [5] [21].....	30
III.2.1 Relief [8].....	30

III.2.2 Pédologie.....	30
III.2.3 Contexte géologique et stratigraphique [5] [6] [21].....	31
III.2.4 Hydrologie .....	33
III.2.5 Climatologie .....	35
III.2.6 Formation végétale [8].....	36
<i>III.3 Contexte monographique et socio-économique [8].....</i>	<i>38</i>
III.3.1 Monographie .....	38
III.3.2 Activités économiques de la population.....	38
III.3.3 Equipements et Infrastructures .....	38
<b>CHAPITRE IV : TRAVAUX DE PROSPECTION .....</b>	<b>40</b>
<i>IV.1 Prospection au marteau [2][19].....</i>	<i>40</i>
IV.1.1 Objectif .....	40
IV.1.2 Matériels utilisés et mode de fonctionnement de quelques appareils [2][19] ...	40
IV.1.3 Observation de la morphologie des sols.....	42
IV.1.4 Recherche d'anciens travaux [2] .....	42
IV.1.5 Observation des affleurements [2].....	42
<i>IV.2 Sondages.....</i>	<i>43</i>
IV.2.1 Sondage à maille carrée.....	44
IV.2.2 Exécution des travaux de sondages .....	44
IV.2.3 Tenue du carnet de terrain .....	47
IV.2.4 Emballage et étiquetage des échantillons.....	48
<i>IV.3 Travaux de laboratoire.....</i>	<i>48</i>
<i>IV.4 Synthèse des résultats de prospection.....</i>	<i>50</i>
<b>CONCLUSION PARTIELLE.....</b>	<b>51</b>
<b>TROISIEME PARTIE : METHODOLOGIE ET APPLICATION</b>	
<b>CHAPITRE V : GEOSTATISTIQUE .....</b>	<b>52</b>

<i>V.1 Objectifs de la géostatistique [16]</i> .....	52
<i>V.2 Application de la géostatistique à la recherche minière [16]</i> .....	52
<i>V.3 Comportements du variogramme [16] [23]</i> .....	54
V.3.1 Types de modèles courants [15] .....	55
V.3.2 La teneur moyenne [16] .....	57
<i>V.4 Variance de dispersion [16]</i> .....	57
V.4.1 Définition .....	57
V.4.2 Expression de la variance de dispersion.....	58
V.4.3 Variance des teneurs ponctuelles .....	59
<i>V.5 Variance d'estimation [16]</i> .....	59
V.5.1 Définition .....	59
V.5.2 Calcul de la variance d'estimation .....	60
<i>V.6 Le Krigeage [16] [23]</i> .....	60
V.6.1 Définition .....	60
V.6.2 Principe du krigeage .....	61
V.6.3 Krigeage simple en covariance .....	61
<i>Chapitre VI : Evaluation du gisement</i> .....	64
<i>VI.1 Logiciel ISATIS [W9]</i> .....	64
VI.1.1 Généralités [W9] .....	64
VI.1.2 Les applications d'ISATIS .....	65
VI.1.3 Justification et raison du choix de ce logiciel .....	65
<i>VI.2 Traitements des données</i> .....	66
VI.2.1 Analyse exploratoire des données.....	66
VI.2.1.1 Variable régionalisée teneur [15].....	67
VI.2.1.2 Variable régionalisée Accumulation .....	67

VI.2.1.3 Vérification aux règles correspondantes aux choix des variables régionalisée.....	68
VI.2.2 Analyses statistiques .....	68
VI.2.2.1 Histogramme des teneurs et des accumulations.....	69
VI.2.3 Analyse variographique de la variable teneur et accumulation .....	69
VI.2.3.1 Calcul covariographique.....	70
VI.2.4 Modélisation du variogramme.....	71
VI.2.4.1 Choix du modèle utilisé .....	72
VI.2.5 Validation du variogramme [16] .....	72
VI.3 Modélisation par krigeage .....	75
VI.3.1 Choix du bloc d'estimation .....	75
VI.3.2 Résultats et interprétations .....	77
VI.4 Estimation des réserves .....	80
CONCLUSION PARTIELLE.....	83
CONCLUSION GENERALE .....	84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	I
REFERENCES WEBOGRAPHIQUES.....	III
Annexe 1 : Rapport de sondage de la colline 44 Ambodimangabe Marovintsy.....	IV
Annexe 2 : Quelques résultats sur Isatis .....	X
Annexe 3 : Aperçu sur la géologie de Madagascar .....	XI
Annexe 4 : Le Précambrien malgache et les différents évènements géologiques (Razafinimparany, 1978).....	XIV
Annexe 5 : Photographies .....	XV
TABLE DES MATIERES.....	XVI

**Nom :** RAGOSINERA

**Prénom :** Andriamparany

**Tel:** +261 33 85 195 84 / +261 34 51 870 05

**E-mail:** pagosy@yahoo.com



**Titre de l'ouvrage:** *«Estimation des réserves de gisement de graphite dans le site de Marovintsy par approche géostatistique »*

**Nombre de pages :** 84

**Nombre de cartes :** 8

**Nombre de figures :** 24

**Nombre de photos :** 11

**Nombre de tableaux :** 9

**Encadreur :**

**Nom :** RAZAFINDRAKOTO

**Prénom :** Boni Gauthier

**Grade :** Maître de Conférences

**Tel :** +261 80 962 68

### **RESUME**

La partie orientale de Madagascar, y compris la région de Marovintsy, zone exploitée par la société Gallois, se distingue par la bonne qualité de ses gisements en graphite. Le socle cristallin de cette partie de la grande île se trouve dans le système graphite du groupe de Manampotsy. Le but principal de l'étude portée dans cet ouvrage est l'estimation globale de la réserve de minerai de graphite sur le site de Marovintsy par la méthode géostatistique. La qualité des résultats qu'elle offre dans l'estimation d'un gisement donné fait de la géostatique un outil adéquat dans le domaine minier.

**Mots clés** : géostatistique, graphite, krigeage, Isatis, estimation, Marovintsy

### **ABSTRACT**

The oriental part, including the region of Marovintsy, a Gallois society exploited zone, stands out by the good quality of graphite of its layers. The crystalline pedestal of this part of the big island is in the graphite system of the group of Manampotsy. The main goal of the survey in this work is the global evaluation of the reserve of graphite ore on the site of Marovintsy by geostatistic method. The quality of the results that it offers in the evaluation of a given layer makes géostatic an adequate tool in the mining domain.

**Key words**: geostatistic, graphite, kriging, Isatis, estimation, Marovintsy