

***Estimation globale***

Après une reconnaissance systématique ou on a implanté les sondages suivant une maille plus ou moins régulière. On a procédé par la suite à l'estimation globale des ressources disponibles.

L'étape suivant consiste donc à l'estimation globale du réserve. L'estimation du minerai est donnée par la relation

$$\text{Tonnage} = \frac{\text{Moyenne teneur en graphite} \times \text{Densité} \times \text{surface minéralisée}}{100}$$

avec

**Surface minéralisée**

Précédement on a créer des mailles fictives et dont l'ensemble positive sont regroupés. Donc l'estimation de la surface du gisement est donnée par :

$$S^* = n \cdot a_1 \cdot a_2$$

Avec  $a_1=46$

$a_2=60$

n : nombre de sondage positives

$a_1$  et  $a_2$  sont les nombres de mailles fictives qu'on a créé pour englober la zone. Comme on dispose ici d'une colline alors il faut tenir compte des dénivellation c'est la raison que le logiciel crée ici une maille de 46x 20 au lieu de 20x20.

Ici le sondage positive est au nombre de 42.

Mais en procédant comme suit on commet une erreur géométrique dont la variance est :

$$\frac{\sigma^2}{s^2} = \frac{1}{n^2} \left( \frac{1}{6} n_2 + 0,06 \frac{n_1^2}{n_2} \right)$$

D'après le résultat du krigeage on avait le résultat de  $\frac{\sigma^2}{s^2}$

$$\Rightarrow \frac{\sigma}{S} = 0,076 = 7,6\%$$

D'où

$$S^* = 42 \times 46 \times 60 = 115.920 \text{ m}^2$$

$$S = 115.920 \pm 8.809,92 \text{ m}^2$$

**Densité** = Mètre minéralisé x 2

Mais il faut tenir encore compte de l'erreur d'estimation du produit dont la valeur est exprimé par la relation suivante :

$$\text{Var}(Z^* - Z) = X^2 Y^2 \left( \frac{1}{X^2} \sigma_X^2 + \frac{1}{Y^2} \sigma_Y^2 \right)$$

D'après le résultat obtenu on a :

$$\text{Var}(Z^* - Z) = 0,18 (18\%)$$

⇒ Tonnage de la colline 79 = 160.112,267 ± 28.820,208 tonnes

**Conclusion partielle et discussion**

Lors du stage effectué au sein de l'entreprise Galois, nous avons employé le logiciel SURFER lors de l'évaluation du réserve de la colline 79. On a donc trouver les resultats ci-après :

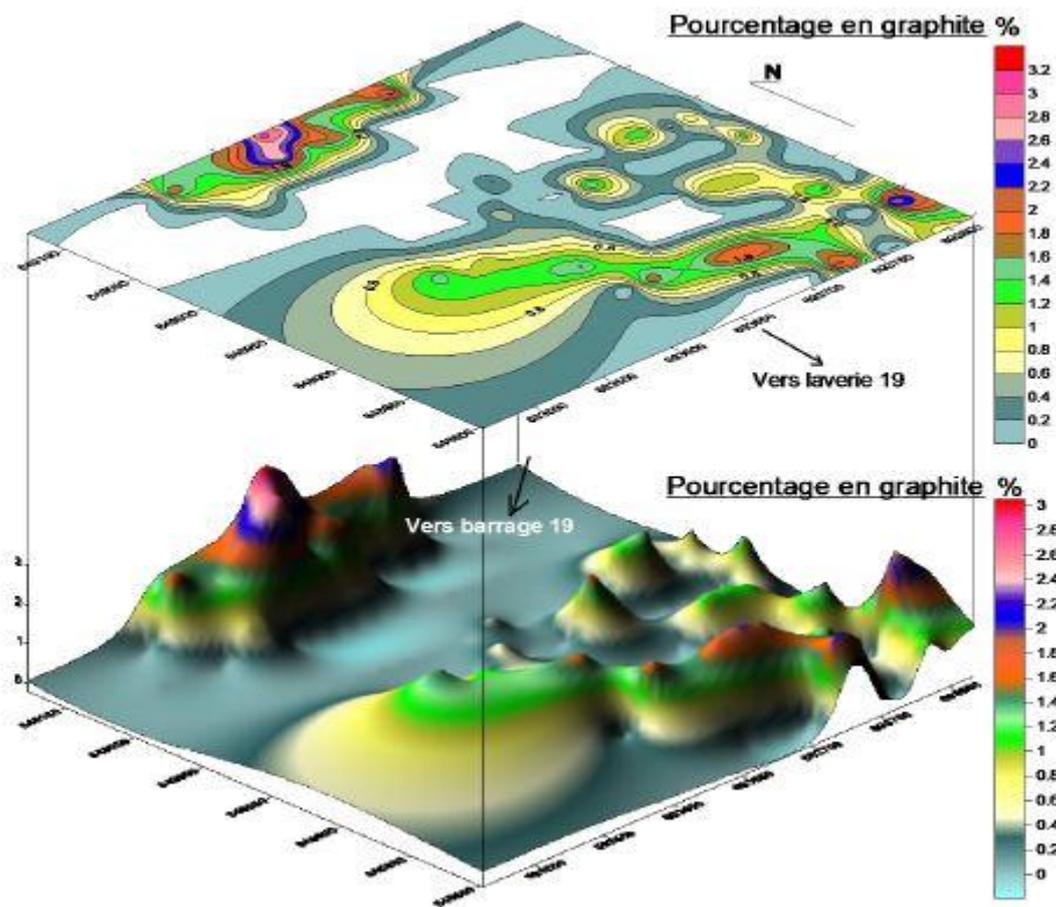


Figure 32: Estimation obtenu par SURFER

Pour la surface minéralisée on a : 161154m<sup>2</sup>

Tonnage : 118.661tonnes

Pour dépasser cette méthode et avoir un résultat on a adopté, l'étude géostatistique qui, quant à elle a apporté des précisions sur l'évaluation des réserves d'Antsirakambo. Cette méthode a permis d'estimer, principalement, le tonnage du gisement de la colline 79 ainsi que les erreurs

d'estimation ce qui la différencie du SURFER. Les valeurs de ces erreurs d'estimation sont les suivantes :

- Variance estimée = 0.401642
- Ecart type= 0.669098<sup>2</sup>
- Variance de  $z^*$  estimée de  $z = 0.182494$
- Covariance entre  $z$  et  $z^* = 0.18249$
- Corrélation entre  $z$  et  $z^* = 0.538134$

La valeur des teneurs positif correspondant à la teneur de coupure est 89,50%

En effet l'étude effectuée au niveau de la zone délimitée par les coordonnées  $X=694055,453$ ;  $X'= 693904,554$  et  $Y = 849685.055$ ;  $Y'= 849413,562$  montre la potentialité de la région d'Antsirakambo en réserve de minerai de graphite .Cette zone est dénommée col 79 et sa réserve en minerai de graphite est estimée à  $160.112,267 \pm 28.820,208$  tonnes.

En comparant les resultats obtenues sur SURFER et la méthode de la géostatistique on a trouvé un léger écart sur la surface minéralisée et le tonnage total.

Ainsi donc pour avoir plus de précision sur l'estimation, il est préférable d'utiliser une méthode plus récente dont la géostatistique.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif qu'on s'est posé dans ce travail est l'estimation des réserves de gisement de graphite dans la région d'Antsirakambo. Cette estimation d'un gisement consiste à faire une série de travaux entre autres les sondages et la collecte des données qui est une partie importante dans l'étude.

Pour arriver à terme de notre travail, on a utilisé la méthode mathématique qui est la géostatistique. En effet grâce à cet outil on a pu montrer le modèle mathématique correspondant à la minéralisation du gisement. Le modèle sphérique est ici mis en évidence car c'est la plus aisée et la plus adéquate dans notre cas. De plus c'est le modèle classique utilisé fréquemment dans presque tous les problèmes miniers. Aussi, pour minimiser l'erreur d'estimation on a aussi employé la méthode du krigeage. Plus simple à utiliser, le krigeage est la méthode optimale, au sens statistique, d'interpolation. C'est alors la méthode d'estimation la plus précise. On a introduit cette méthode dans notre étude à raison de ces vertus.

Nombreux sont les problèmes intervenant lors de ce projet, mais grâce à un logiciel assez puissante et performante pour résoudre ces difficultés de la géostatistique, on a pu surmonter les divers obstacles pour mener à bien le projet.

La présente étude nous permet d'affirmer qu'Antsirakambo possède une forte potentialité en réserve de graphite exploitable et de forte concentration en carbone. L'exploitation de ce gisement de graphite engendrerait des intérêts non négligeables pour la population riveraine par la création d'emplois et infrastructures de développement. L'état en tirerait également profit par le biais de taxes et impôts

# **ANNEXES**

Annexe I : Sondage col 79

n°sondage	X	Y	Z	Teneur en carbone	Teneur en graphite	prof tot	m M/sé	Densite
Ligne A	m	m	m	%	%	m	m	
1	694055,453	849685.055	56	Steril	0	6		
2	694061,231	849678.815	61	92.15	1,25	8	5	
3	694046,508	849675.962	70	87.73	1,2	12	6	
4	694034,766	849676.139	68	Dolerite	0	12		
5	694023.025	849676.316	70	89.85	0,12	6	5	30
6	694008.441	849682.688	69	Blende	0,14	9		
7	693999.634	849682.821	72	Dolerite	0	7		
8	693987.893	849682.998	68	Dolerite	0	12		
9	693976.151	849683.176	66	88.06	0.12	11		
10	693964.503	849689.503	64	89.73	1.96	10	7	32
11	693955.650	849686.561	62	93.86	1.25	7	6	29,8
12	694122.967	849684.036	58	90.6	0.87	6	5	29,8
Ligne B								
1	694010.819	849645.740	66	Dolerite	0	7		
2	693999.819	849648.992	72	89.05	1,16	8	4	
3	693993.124	849649.081	74	Dolerite	0	12		
4	693978.530	849646.227	76	82.53	2.1	12	11	34
5	693966.788	849646.404	76	84.7	1.4	12	8	29,5
6	693952.111	849646.626	70	85.23	0.94	12	11	27,8
7	693937.434	849646.847	68	82.11	1.17	12	11	34,5
8	693925.693	849647.024	68	77.97	1.18	11	10	35,2

9	693916.887	849647.157	67	85.23	0.47	11	7	
10	693905.145	849647.334	65	78.9	1.31	11	10	29,7
11	693893.404	849447.511	64	84.40	1.23	12	9	28,9
Ligne C								
1	694069,248	849626,654	61	85,98	1,27	7	6	31,5
2	694057,553	849629,654	59	89,72	2,53	8	7	33,2
3	694048,561	849617,485	69	88,71	2,15	12	11	36,9
4	694036,866	849620,738	72	86,28	2,3	12	11	38,9
5	694022,096	849614,809	73	85,51	1,86	8	7	39,7
6	694010,308	849611,911	66	81,36	0,98	12	9	37,7
7	693995,632	849612,132	68	79,1	0,9	12	7	
8	693981,001	849615,429	74	75,1	0,73	6		
9	693969,213	849612,531	82	Dolerite	0	7		
10	693960,407	849612,664	82	85,57	0,22	12	8	30,5
11	693961,239	849612,842	77	79,81	0,67	12	6	29,5
12	693936,954	849613,018	71	83,96	1,5	12	9	30,2
13	693925,09	849607,044	76	85,65	2,73	12	11	35
14	693913,348	849607,222	70	82,14	2,58	12	11	41
15	693898,671	849607,443	68	86,63	2,1	12	9	41,2
16	693889,865	849607,576	64	78,47	3,1	8	7	30,9
Ligne D								
1	694059,699	849577,328	72	89,74	2,11	8	5	37,4
2	694053,089	849577,417	69	80,95	0,6	9	7	37,7
3	694042,087	849577,594	76	82,1	0,34	12	9	39,4
4	694030,438	849583,922	82	82,72	1,96	12	9	

5	694021,586	849580,98	84	Dolerite	0	8		
6	694006,909	849581,201	87	84,46	1,85	9	2	
7	693995,121	849578,303	83	85,42	1,35	12	11	38,9
8	693983,38	849578,48	86	80,6	1,7	12	10	38,7
9	693974,527	849575,538	78	85,52	1,42	8	6	36,8
10	693962,739	849572,64	72	84,29	0,94	7	6	39,5
11	693953,979	849575,848	71	79,3	1,3	8	5	30,5
Ligne E								
1	694047,261	849531,375	64	Dolerite	0	5		
2	694038,502	849534,583	68	eau	0	6		
3	694026,76	849534,761	68	eau	0	7		
4	694018,001	849537,969	70	76,6	3	6	5	34,5
5	694006,306	849541,222	72	77,85	0,9	7	4	
6	693997,499	849541,354	77	sable	0	6		
7	693988,693	849541,487	82	85,35	1,8	4	6	32,5
8	693979,887	849541,62	86	steril	0	8		28,9
9	693968,099	849538,722	84	80,8	0,95	12	8	
10	693959,247	849535,78	82	85,91	0,98	12		
11	693947,459	849532,881	83	Dolerite	0	12		
12	693935,671	849529,983	83	84,18	0,92	11	2	
13	693923,93	849530,16	77	86,99	1,38	12	9	40
14	693912,188	849530,337	73	94,51	1,72	10	8	
15	693900,4	849527,439	66	94,48	1,17	10	7	28,3
Ligne F								
1	694043,815	849497,569	71	steril	0	4		28,6

2	694035,009	849497,723	73	74,37	1,54	8	6	30
3	694026,25	849500,932	75	78,32	1,91	12	9	26,4
4	694011,48	849495,002	71	82,76	0,5	12	10	
5	693987,997	849495,357	70	79,29	0,82	7	6	
6	693987,997	849435,357	7285	87,65	1,22	7	4	
7	694191,124	849492,29	80	90,5	1,61	12	9	27
8	693967,496	849498,742	91	Dolerite	1,11	12		
9	693964,421	849489,561	86	94,6	2,85	12	11	34,5
10	693949,745	849489,782	82	94,57	1,1	12	11	36,2
11	693940,939	849489,915	78	79,93	1,53	12	3	
12	693929,104	849483,941	72	85,41	1,3	6	4	
13	693920,252	849480,999	76	85,35	0,61	7	2	
Ligne G								
1	694019,776	849461,04	76	82,05	1,02	7	5	31
2	694011,016	849464,249	78	gneiss	0	11		
3	693999,182	849458,275	79	90,62	1,6	10	5	30,5
4	693993,311	849458,364	91	91,42	1,68	12	8	35,2
5	693972,717	849455,599	84	92,3	2,24	12	11	32,9
6	693966,753	849449,536	87	84,02	2,6	12	10	34
7	693955,058	849452,789	87	92,11	2,08	12	9	32,5
8	693943,271	849449,891	87	93,89	0,68	12	3	
9	693931,529	849450,068	83	kaolin	0	6		
10	693919,834	849453,321	76	kaolin	0	7		
Ligne H								
1	694016,237	849421,105	77	90,9	0,79	11	9	25

2	694001,514	849418,251	72	84,2	1,11	12	11	27
3	693989,865	849424,579	70	93,03	1,2	12	8	39,5
4	693975,142	849421,725	66	83,96	2,21	12	9	36,5
5	693963,308	849415,752	67	89,25	2,7	12	6	35
6	693960,175	849597,287	76	89,75	0,93	8	6	37
7	693948,584	849412,898	73	91,07	1,01	11	10	40
8	693936,797	849410	78	93,61	0,64	12	8	
9	693927,991	849410,133	73	94,41	1,08	12	4	
10	693916,249	849410,31	69	91,76	1,35	10	3	
11	693904,554	849413,562	65	90,37	1,21	12	7	41

Annexe II: Data File

=====  
|                   Kriging procedure                   |  
=====

Data File Information:

Directory = data  
File = concentration  
Variable(s) = teneur

Target File Information:

Directory = data  
File = grid  
Variable(s) = kriging  
Variable(s) = st dv  
Type = GRID (1 cells)

Model Name = variofit

Neighborhood Name = teneur - MOVING

Model : Covariance part

=====

Number of variables = 1  
Number of basic structures = 2  
S1 : Nugget effect  
Sill = 0.330098  
S2 : Spherical - Range = 70.00m  
Sill = 0.300089

Neighborhood parameters

=====

Type = MOVING  
X-Radius = 88.83m  
Y-Radius = 88.83m  
Z-Radius = 88.83m  
Use Isotropic Distances  
Rotation angle around Z = 0 degrees  
Rotation angle around Y = 0 degrees

Rotation angle around X = 0 degrees

Minimum # of information = 1

Optimum # of information = 10

Automatic Sorting is ON

X-Mesh of sorting grid = 88.83m

Y-Mesh of sorting grid = 88.83m

Z-Mesh of sorting grid = 88.83m

No Heterotopic Search

No Minimum Distance used between Data Points

No Maximum Distance without Samples

No Maximum Number of Consecutive Empty Sectors

The following parameters are used only for Block Estimation

Do not Select All the Samples in the Target Cell

No replacement of Kriging by Arithmetic Mean will be performed

Discretization method = Regular

Discretization along X = 5

Discretization along Y = 5

Discretization along Z = 1

Target definition

=====

Indices of the target : 29 36 1

Location of target X : 693990.00m

Location of target Y : 849575.00m

Location of target Z : 0.00m

Display of the (Co-) Kriging weights

=====

Weights for option : Punctual

Rank X Y Data V1\*

Using variable V1

1	6.940e+005	8.496e+005	1.350e+000	2.335e-001
2	6.940e+005	8.496e+005	1.700e+000	2.075e-001
3	6.940e+005	8.496e+005	1.420e+000	1.212e-001
4	6.940e+005	8.496e+005	1.850e+000	1.151e-001

5 6.940e+005 8.496e+005 9.400e-001 4.755e-002  
6 6.940e+005 8.496e+005 2.600e-001 4.240e-002  
7 6.940e+005 8.495e+005 1.800e+000 3.934e-002  
8 6.940e+005 8.495e+005 1.700e-001 4.129e-002  
9 6.940e+005 8.495e+005 1.400e-001 3.252e-002  
10 6.940e+005 8.496e+005 1.300e+000 1.458e-002  
Sum of weights on variable V1 8.950e-001

Variable V1

Known mean = 1.348e+000  
Estimate = 1.352e+000  
Variance = 4.477e-001  
Std. Dev = 6.691e-001

General results of the estimation

=====

Results for : Punctual

- For variable V1

Number of Neighbors = 10  
Mean Distance to the target = 24.55m  
Weight assigned to the mean = 0.105025  
Sum of positive weights = 0.894975  
Known mean = 1.347876  
Estimated value = 1.351616  
Estimation variance = 0.401642  
Estimation standard deviation = 0.669098  
Variance of Z\* (Estimated Z) = 0.182494  
Covariance between Z and Z\* = 0.182494  
Correlation between Z and Z\* = 0.538134  
Slope of the regression Z | Z\* = 1.000000  
Signal to Noise ratio (final) = 0.670302

### Annexe III : Krigage

#### **Krigage dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque**

On est souvent amené à une nouvelle hypothèse, moins forte, appelée hypothèse intrinsèque qui consiste à dire que ce sont les accroissements  $R(\bar{x}, \omega_k) - R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k)$  pour une distance  $\bar{h}$ , qui sont stationnaires d'ordre 2.

Moyenne constante :

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

Les accroissements sont nuls en moyenne, et  $R(\bar{x}, \omega_k)$  est stationnaire en moyenne.

Variance constante pour une distance  $\bar{h}$  :

$$\text{Var}_D \{R(\bar{x}, \omega_k) - R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k)\} = 2\gamma(\bar{h})$$

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

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

$$\begin{aligned} 2\gamma(\bar{h}) &= \text{Var}_D \{R(\bar{x}, \omega_k) - R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k)\} \\ 2\gamma(\bar{h}) &= E_D \left\{ \left[ R(\bar{x}, \omega_k) - R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k) \right]^2 \right\} - \left[ E_D \{R(\bar{x}, \omega_k) - R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k)\} \right]^2 \\ 2\gamma(\bar{h}) &= E_D \left\{ \left[ R(\bar{x}, \omega_k) - R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k) \right]^2 \right\} - 0 \\ 2\gamma(\bar{h}) &= E_D \left\{ \left[ R(\bar{x}, \omega_k) \right]^2 \right\} - 2E_D \left\{ R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k) R(\bar{x}, \omega_k) \right\} + E_D \left\{ \left[ R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k) \right]^2 \right\} \end{aligned}$$

Mais :

$$\begin{aligned} E_D \left\{ \left[ R(\bar{x}, \omega_k) \right]^2 \right\} - m^2 &= E_D \left\{ \left[ R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k) \right]^2 \right\} - m^2 = C(0) \\ 2E_D \left\{ R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k) R(\bar{x}, \omega_k) \right\} - 2m^2 &= 2C(\bar{x}, \bar{x} + \bar{h}) = 2C(\bar{h}) \end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned} 2\gamma(\bar{h}) &= E_D \left\{ \left[ R(\bar{x}, \omega_k) \right]^2 \right\} - m^2 - 2E_D \left\{ R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k) R(\bar{x}, \omega_k) \right\} + 2m^2 + E_D \left\{ \left[ R(\bar{x} + \bar{h}, \omega_k) \right]^2 \right\} - m^2 \\ \gamma(\bar{h}) &= C(0) - C(\bar{h}) \end{aligned}$$

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

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

et sous forme matricielle :

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

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

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

Cette construction se fait en travaillant 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 du variogramme en reportant :

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

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

On ajuste aux  $\gamma(h')$  un modèle théorique  $\gamma^*(h')$  et enfin on remplit les matrices  $[\Gamma_{i,j}]$  et  $[\Gamma_{0,i}]$  avec les  $\gamma^*(h)$  correspondant.

### Krigeage universel

C'est la forme la plus large où on ne peut supposer que la moyenne soit constante. On dit alors qu'il existe une dérive et que  $m(\bar{x}_i) \neq m(\bar{x}_j)$ . La difficulté principale résulte de l'étude de variogramme. En effet, nous avons posé :

$$2\gamma(\vec{h}) = \text{Var}_D \left\{ \mathbf{R}(\vec{x}, \omega_k) - \mathbf{R}(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k) \right\}$$

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

mais contrairement au cas précédent  $m(\vec{x}_i) \neq m(\vec{x}_j)$  et :

$$\left[ E_D \left\{ \mathbf{R}(\vec{x}, \omega_k) - \mathbf{R}(\vec{x} + \vec{h}, \omega_k) \right\} \right]^2 \neq 0$$

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

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

le variogramme réel  $\gamma(\vec{h})$  est donc tel que:

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

Dans le cas du krigeage universel, il faut bien garder à l'esprit que le variogramme brut n'est qu'une image déformée du variogramme réel sous-jacent. Cette déformation est due à la dérive. Il faut donc simultanément étudier la dérive que l'on suppose généralement être une fonction simple variant relativement lentement et le variogramme réel

## 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 shamwaienne majeure de 2 600 Ma, comprenant à la base : une série silico-alumineuse Souvent à graphite (série de Manampotsy) avec des migmatites et granites stratoïdes dans la zone centrale (Ambatolampy) ; au sommet : faciès à dominante calcique renfermant de vastes complexes basiques et ultrabasiques : sillon Beforona Alaotra, Maevantanàna, Andriamena.

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

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

Un âge Catarchéen et Archéen est attribué à la majorité des terrains constituant les deux tiers Nord de l'île, à l'exclusion des formations du Protérozoïque Inférieur au Sud de la structure de Bongolava-Ranotsara, du Protérozoïque Moyen de Daraina et d'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 shamwaienne majeure de 2 600 Ma, comprenant à la base : une série silico-alumineuse Souvent à graphite (série de Manampotsy) avec des migmatites et granites stratoïdes dans la zone centrale (Ambatolampy); au sommet : faciès à dominante calcique renfermant de vastes complexes basiques et ultrabasiques : sillon Beforona Alaotra, Maevantanàna, Andriamena.

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

### **- La nappe d'Itremo :**

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

### **- Le bloc d'Ikalamavony-Amborompotsy :**

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

### **- La suture Betsimisaraka**

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

### **- Le Sud de Madagascar**

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

## *Références Bibliographie*

[1]. **BESAIRIE H.;1966**

Gîtes et minéraux de Madagascar. Annales .Géol. Madagasikara. Fasc. XXXIV; Antananarivo; 416p

[2]. **BESAIRIE H.; 1973**

Les diverses interprétations du socle malgache. Service géologique de Madagascar Antananarivo. 1973

[3]. **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

[4]. **Bureau de Recherches Géologiques et Minières avec la collaboration coopération de la société française de céramique; 1966**

Le graphite Étude documentaire technique et économique

[5]. **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

[6]. **FOUCAULT .J, RAOULT. F** « Dictionnaire de géologie, 3<sup>ème</sup> édition Masson, 120, bd Saint Germain, Paris, 1992, 300-301 p

[7]. **JACQUES(CARIGNAN)**, géochimie et géostatistique appliquées a ll exploration des gisements volcanogenes:le gisement de Millenbach thèse de doctorat ès sciences appliqué. (génie géologique) juillet 1979

[8]. **LACROIX. A**,« Minéralogie de Madagascar », Tome I, Paris, Augustin Challamel, 1962,14p, p152-154

[9]. **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.

[10]. **MATHERON, G. 1969 Cours de geostatistique**. Les cahiers du centre de morphologie mathématique, de Fontainebleau. Fasc. 2.

[11]. **MOHAMMAD KONESHLOO** Caractérisation, estimation et valorisation de gisements d'argiles kaoliniques du bassin des Charentes, Déc. 2007

[12]. **RAKOTOARISON Hobiarioa**, Étude du marché de quelque substance minière de Madagascar, juin 2006 Mémoire de fin d'études ESPA

- [13]. **RASOAMALALA Léonie Francine**, Eude d'optimalisation de valorisation de graphite de société Gallois par conception d'un appareil de flottation adapté. Décembre 2004, Mémoire de fin d'étude ESPA
- [14]. **F.Barthélémy,J.F.Labbé,J.C.Picot** ,Panorama 2011 du marché du graphite naturel ,Rapport public, Juillet 2012.
- [15]. [www .wikipedia.org/wiki](http://www.wikipedia.org/wiki)(18 Novembre 2014)
- [16]. <http://www.asbury.com> (12 Décembre 2014)
- [17]. [www.usgs.com](http://www.usgs.com)(22 Décembre 2014)
- [18]. <http://www.geovariances.com> (17 Janvier 2015)
- [19]. [http://dnre\\_mrne.gnb.ca/mineral occurrence](http://dnre_mrne.gnb.ca/mineral_occurrence) (25 Janvier 2015)
- [20]. [www.mcgroup.co.uk/researches/G/04/Graphite%20Market%20Research.html](http://www.mcgroup.co.uk/researches/G/04/Graphite%20Market%20Research.html)(17 Février 2015)
- [21]. [http://dnre\\_mrne.gnb.ca/mineral occurrence](http://dnre_mrne.gnb.ca/mineral_occurrence) (17 Février 2015)
- [22]. [www.aosabook.org/en/graphite.htm](http://www.aosabook.org/en/graphite.htm)(17 Février 2015)
- [23]. [www.mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/.../mineraux-proprietes-graphite.js](http://www.mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/.../mineraux-proprietes-graphite.js)(22Février 2015)
- [24]. [www.planetoscope.com/.../1490-consommation-mondiale-de-graphite.ht](http://www.planetoscope.com/.../1490-consommation-mondiale-de-graphite.ht)(22Février 2015)
- [25]. [www.focusgraphite te.com/french/technology/graphite](http://www.focusgraphite te.com/french/technology/graphite)(22 *Février 2015*)

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	i
SOMMAIRE .....	ii
LISTE DES TABLEAUX .....	ii
LISTE DES FIGURES.....	iii
LISTE DES PHOTOS.....	iv
LISTE DES ABREVIATIONS .....	vi
GLOSSAIRE.....	vii
INTRODUCTION.....	1
<b>PARTIE I:ETUDE ET RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>CHAPITRE I GENERALITES SUR LE GRAPHITE.....</b>	<b>2</b>
<b>I.1.Historique .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2.Généralités .....</b>	<b>2</b>
<b>I.3.Proprietes .....</b>	<b>2</b>
<b>I.3.1.Métallogénies .....</b>	<b>3</b>
<b>I.3.2.Proprietes physique .....</b>	<b>5</b>
<b>I.4.Classification du graphite .....</b>	<b>5</b>
<b>I.4.1.Le Graphite amorphe .....</b>	<b>5</b>
<b>I.4.2.Le graphite en paillette .....</b>	<b>6</b>
<b>I.4.3.Le graphite filonien.....</b>	<b>7</b>
<b>I.5.Principales utilisations.....</b>	<b>7</b>
<b>CHAPITRE II : LE GRAPHITE AU NIVEAU MONDIAL .....</b>	<b>10</b>
<b>II.1.La production .....</b>	<b>10</b>
<b>II.2.Les principaux pays producteurs de graphite .....</b>	<b>11</b>
<b>II.3.Le commerce international.....</b>	<b>14</b>
<b>II.3.1.La consommation. ....</b>	<b>14</b>
<b>II.3.2.Prix .....</b>	<b>14</b>
<b>II.3.3.Demande sur le marché mondial .....</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE III : LE GRAPHITE A MADAGASCAR.....</b>	<b>16</b>
<b>III.1.Generalites .....</b>	<b>16</b>
<b>III.2.Les principaux gisements de graphite à Madagascar .....</b>	<b>19</b>
<b>III.2.1.Region orientale .....</b>	<b>19</b>

III.2.1.1.Faisceau Moramanga .....	20
III.2.1.2.Axe Vatomandry .....	22
III.2.1.3.Region d'Ampasinambo.....	23
III.2.1.4.Axe Sahanavo-Sahamamy. ....	24
III.2.1.5.Region Ouest et Sud Ouest de Toamasina.....	26
III.2.2.Region d'Ampanihy-Bekily-Benenitra .....	28
III.2.3.Region d'Antsirabe-Ambatolampy .....	28
<b>PARTIE II:CADRE D'ETUDE</b>	
<b>CHAPITRE IV:SITUATION GEOGRAPHIQUE</b>	
IV.1.Localisation géographique .....	30
IV.2.Topographie .....	31
IV.3.L'hydrographie .....	31
IV.5.Végétation .....	31
IV.6.Habitant et ses principales activités .....	32
IV.7.Reseaux routiers.....	32
<b>CHAPITRE V:CADRE GEOLOGIQUE</b> .....	
V.1.Stratigraphie .....	34
V.2.Recouvrement et roches intrusives .....	34
V.3.Nature du minerai .....	34
<b>PARTIE III:METHODOLOGIE</b>	
<b>CHAPITRE VI:PROSPECTION</b> .....	
VI.1.Generalites .....	36
VI.2.Etudes géologiques .....	36
VI.3.Travaux de terrain.....	37
VI.4.Sondage à maille carrée.....	38
VI.5.Exécution des travaux de sondage.....	39
VI.7.Echantillonnage.....	41
<b>CHAPITRE VII:LA GEOSTATISTIQUE</b> .....	
VII.1.Definition.....	42
VII.2.Objectif de la géostatistique .....	42
VII.3.Application de la géostatistique à la recherche minière .....	42

<b>VII.4.Comportement à l'origine du variogramme et détermination de <math>C_0</math>(effet de pépite)</b>	<b>44</b>
.....	
<b>VII.4.1.Determination du palier C.....</b>	<b>44</b>
<b>VII.4.2.Determination de la portée a .....</b>	<b>44</b>
<b>VII.4.3.La teneur moyenne.....</b>	<b>46</b>
<b>VII.5.Variance de dispersion.....</b>	<b>46</b>
<b>VII.5.1.Definition.....</b>	<b>46</b>
<b>VII.5.2.Expression de la variance de dispersion.....</b>	<b>47</b>
<b>VII.5.3.Variances des teneurs ponctuelles .....</b>	<b>47</b>
<b>VII.6.Variances d'estimation.....</b>	<b>48</b>
<b>VII.6.1.Definition.....</b>	<b>48</b>
<b>VII.6.2.Calcul de la variance d'estimation.....</b>	<b>48</b>
<b>VII.7.Krigeage .....</b>	<b>49</b>
<b>VII.7.1.Definition.....</b>	<b>49</b>
<b>VII.7.2.Principe du krigeage .....</b>	<b>49</b>
<b>VII.7.3.Krigeage simple en covariance.....</b>	<b>49</b>
<b>PARTIE IV:EVALUATION DU GISEMENT</b>	
<b>CHAPITRE VII:TRAITEMENT DES DONNEES ET EVALUATION DES RESERVES.....</b>	
<b>52</b>	
<b>VIII.1.Presentation des informations sur le gisement.....</b>	<b>52</b>
<b>VIII.2.Choix des variables régionalisées .....</b>	<b>52</b>
<b>VIII.2.1.VARIABLES régionalisées teneur .....</b>	<b>52</b>
<b>VIII.2.2.Verification aux regles correspondant aux choix des variables regionalisees....</b>	<b>54</b>
<b>VIII.2.3.Description quantitative de la méthode de calcul .....</b>	<b>59</b>
<b>VIII.3.Histogramme des teneurs.....</b>	<b>59</b>
<b>VIII.4.Modelisation des variogramme .....</b>	<b>59</b>
<b>VIII.5.Variance d'estimation .....</b>	<b>59</b>
<b>VIII.5.1.Estimation d'une teneur .....</b>	<b>59</b>
<b>VIII.5.2.Erreur d'estimation. ....</b>	<b>59</b>
<b>VIII.6.Krigeage et estimation globale.....</b>	<b>61</b>
<b>VIII.6.1.Krigeage.....</b>	<b>61</b>
<b>VIII.6.2.Estimation globale .....</b>	<b>65</b>

**CONCLUSION GENERALE ..... 68**

**BIBIOGRAPHIE**

**ANNEXES**

**Titre : « Application de la géostatistique dans l'estimation des réserves du gisement de graphite d'Antsirakambo »**

**Nombre de pages : 68**

**Nombre de figures : 32**

**Nombre de photos : 9**

**Nombre de tableaux : 02**

### **RESUME**

La zone d'Antsirakambo se trouve sur la Côte Est de Madagascar, plus précisément dans la région Atsinanana, sous district de Toamasina. Elle présente une forte potentialité en ce qui concerne la réserve de minerai de graphite. Le socle cristallin de cette partie de Madagascar se trouve dans le système du graphite.

Pour une meilleure évaluation du gisement de graphite on a utilisé la géostatistique, le modèle sphérique a été choisi pour représenter la variation des variables régionalisés De plus c'est le modèle classique utilisé fréquemment dans tout problème miniers.

Mais pour être beaucoup plus précise sur l'évaluation du gisement on a aussi employé la méthode du krigeage. Plus simple à utiliser c'est la méthode optimale en ce qui concerne l'estimation des réserves disponibles.

À raison de ces vertus la géostatistique est un outil efficace pour l'évaluation d'un gisement minier.

**Mots clés** : *géostatistique, variogramme, krigeage, Antsirakambo, graphite*

### **ABSTRACT**

The zone of Antsirakambo is on the East coast of Madagascar, more precisely in the Atsinanana area, under district of Toamasina .It presents a strong potentiality with regard to the graphite ore reserve. The crystalline base of this part of Madagascar is in the system of graphite.

For a better evaluation of the graphite layer one used the geostatistic , the spherical model was selected to represent the variation of the variables regionalized Moreover it is the traditional model frequently uses in almost all mining problems.

But to be much more precise on the evaluation of the layer one also employed the method of krigeage. Simpler to use it is the optimal method with regard to the estimate of the reserves available.

At a rate of these virtues the geostatistic is an effective tool for the evaluation of a mining layer.

**Keywords** : *geostatistic, variogram, kriging, Antsirakambo, graphite*

**Nom : RAJAONARISON**

**Prenom : Lanja Maminirina**

**Tel : 0330487336**

**Mail : lanjamaminirina@gmail.com**

**Adresse : IVO 178 Ankorondrano**