



CHAPITRE V CADRE GEOLOGIQUE

V.1.Stratigraphie

La formation appartient au système du graphite et dans le groupe de Manampotsy selon la stratigraphie de Baiserie .Elles se sont formées pendant l'Archéen (3000-2600MA).

Selon la stratigraphie du BRGM il y a 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. La région est aussi affectée par le phénomène de boudinage.

En effet pour le gneiss sans graphite supérieur des latérites rouges, brune, ocre y dominent dans la zone synclinale. Ce sont donc des gneiss supérieur très latéralisés.

Les roches sont constituées de quartz, de feldspath avec des rares minéraux ferromagnésiens tels que les pyroxènes et le mica noir ou biotite.

A la base du niveau gneissique on y trouve de la sillimanite sous forme d'agrégat ou parfois disséminée.

Par contre dans le gneiss inférieur à graphite les roches renferment de quartz et de feldspath avec une très faible proportion en biotite ou en pyroxène. La sillimanite se rencontre dans la partie supérieure à proximité de contact avec le gneiss supérieur .Des lamelles de graphite s'alignent parallèlement aux schistosités .Ce type de gneiss prédomine dans les anticlinoriales Ouest et Est.

V.2.Recouvrement et roches intrusives

La couverture c'est-à-dire la couche supérieure est formée de sol ferralitique. Les sols sont généralement acides et très sensible à l'érosion et à la dégradation.

En effet ces sols sont de la dolérite qui est répandue sous forme d'argile rougeâtre très friable.

Concernant les roches intrusives on trouve des intrusions gabbroïque et quelques pegmatites dans certaines formations.

V.3.Nature du minerai

Le gneiss altéré ou latéralisé renferme le graphite .Ce minerai doit être friable par le phénomène d'altération très poussée pour que l'abattage soit possible.

Le graphite résiste à l'altération du gneiss et reste intacte. Souvent il est associé à du mica tels que la biotite et la phlogopite ainsi qu'avec des sables dérivant de l'altération des quartzs et des feldspaths. L'existence des nontronites par la transformation des gneiss feldspathiques ou pyroxéniques réduit la qualité du minerai. Cette présence de silicate de fer et d'aluminium ainsi que de sodium rend aussi difficile la flottation.

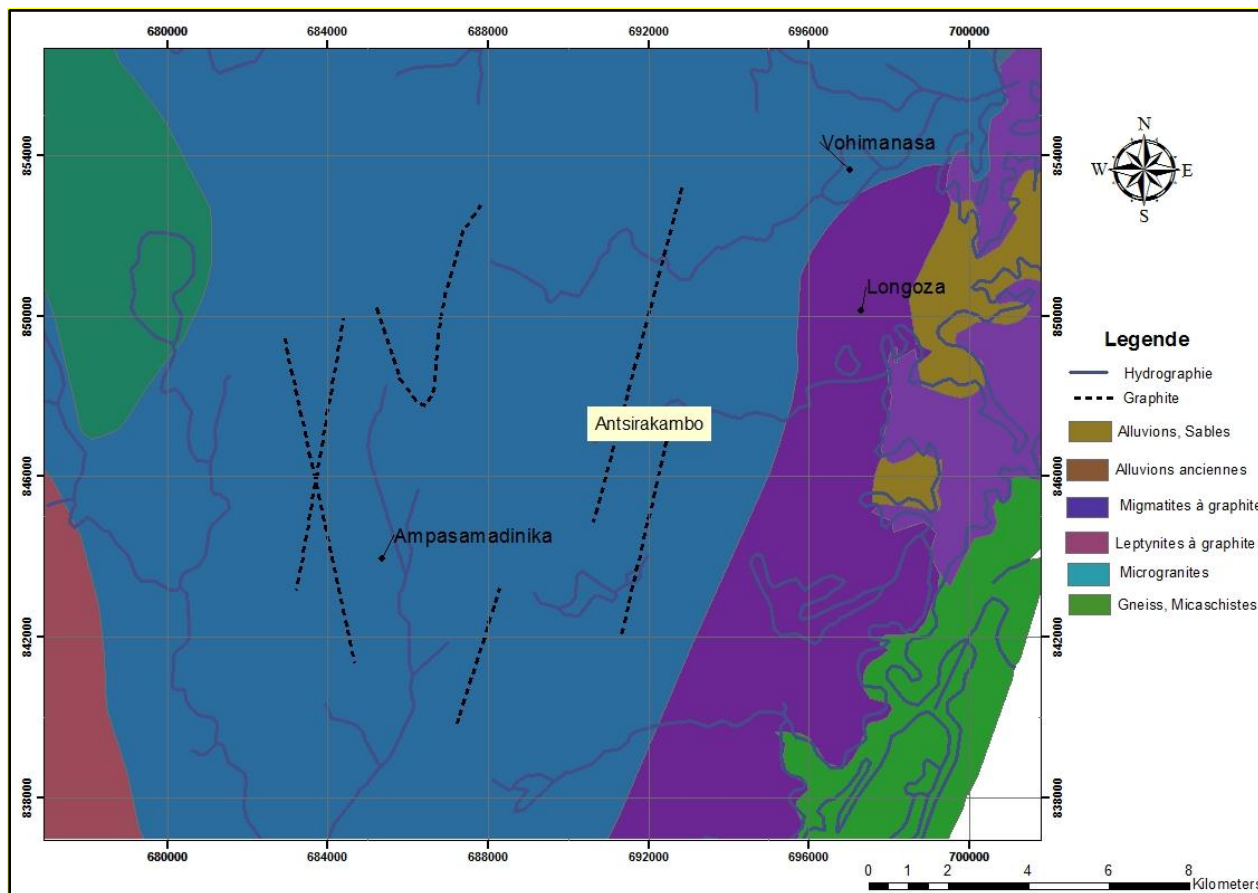


Figure 19: Carte géologique (source : BD 500)

PARTIE III
METHODOLOGIE

CHAPITRE VI PROSPECTION

VI.1 Généralité

La prospection représente l'ensemble des opérations qui consiste à procéder à des investigations superficielles en vue de découverte des indices de substances minéralisés. Elle est la première étape à faire avant toutes les activités d'exploitation.

Ainsi, la prospection minière est une recherche systématique afin de découvrir des gisements. C'est à partir de la prospection que dépend les résultats de l'exploitation peut être réalisable. La prospection correspond aussi à l'étude de faisabilité et de rentabilité d'une exploitation.

L'objectif de l'étude étant d'évaluer et d'estimer la réserve de graphite dans la carrière d'ANTSIRAKAMBO. Avec la méthode que nous avons choisi, qui est la géostatistique nous pouvons calculer la cubature et le volume de graphite exploitable de la zone que l'on a prospecté.

Avant de passer à l'estimation des réserves de la zone que l'on a prospecté, des études géologiques ainsi que les cartes sur le terrain sont nécessaires pour récoltés les données utiles pour l'application de la géostatistique.

VI.2 Etudes géologiques

Pour cette étape on fait une étude des cartes géologiques de la région, plus exactement sur notre lieu d'étude. C'est à partir de cette étude que l'on peut avoir une idée globale sur la formation préexistante c'est-à-dire la nature des roches ou les minéraux qui constitue la zone. L'objectif est d'avoir les informations nécessaires afin de prévoir la méthode appropriée pour la prospection.

Les cartes géologiques et les informations obtenues lors de la recherche systématique, nous montre la présence des filons de graphite qui se trouve dans une formation latéritique de gneiss migmatitique. et dont la délimitation est donnée par $X=694055,453m$; $X'=693904,554m$ et $Y = 849685.055m$; $Y'= 849413,562m$

La région est presque constituée par une couche de latérite .favorable à l'érosion et fortement altérée donc. La méthode de surface à adopter la plus adéquate et la moins couteuse sera alors le sondage à la main.

Aussi, comme le graphite à rechercher est un filon donc nous pouvons adopter le plan de sondage à maille carrée.

D'autres informations sont nécessaires afin de bien déterminer quel type de prospection à utiliser. C'est pour cette raison que nous allons poursuivre notre étude par la visite du lieu.

VI.3 Travaux de terrain

La visite du lieu est une étape nécessaire pour mener à bien l'exécution d'un projet.

▪ But

Le but est de vérifier l'état du site interprété lors de la consultation des données géologiques mais aussi de rechercher des indices nécessaires comme les affleurements et la végétation.

▪ Principe

Pour la vérification de l'état du site, le principe est de savoir visuellement et tester manuellement la dureté de la latérite.

Pour les indices, le principe est de rechercher les collines montrant les végétations qui indiquent la forte présence de graphite, de trouver des affleurements de graphite sur les fronts de collines et d'effectuer les mesures de la direction du filon de graphite.

▪ Matériels

- **Boussole** : pour la mesure de la direction du filon de graphite.
- **Cahier à couverture rigide** : pour prendre des notes et aussi pour aider à mesurer la direction.
- **GPS** (Global Positioning System) : permet de prendre les coordonnées géographiques du site.



Figure 20:GPS 62stc Garmin



Figure 21:Boussole et clinomètre

VI.4. Sondage a maille carrée

- **Définition**

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, en effet on a choisi ici un espacement de 20m pour la distance entre deux points de sondages de même que celle de deux lignes de sondages.

▪ **Principes :**

Le principe est de choisir une ligne de base qui coupe la direction du filon de graphite pour l'implantation des trous de sondages qui devraient avoir une distance de 20m.

Les trous sont donc forés tous les 20m et les lignes ou layon doivent être aussi distant de 20m les unes des autres.

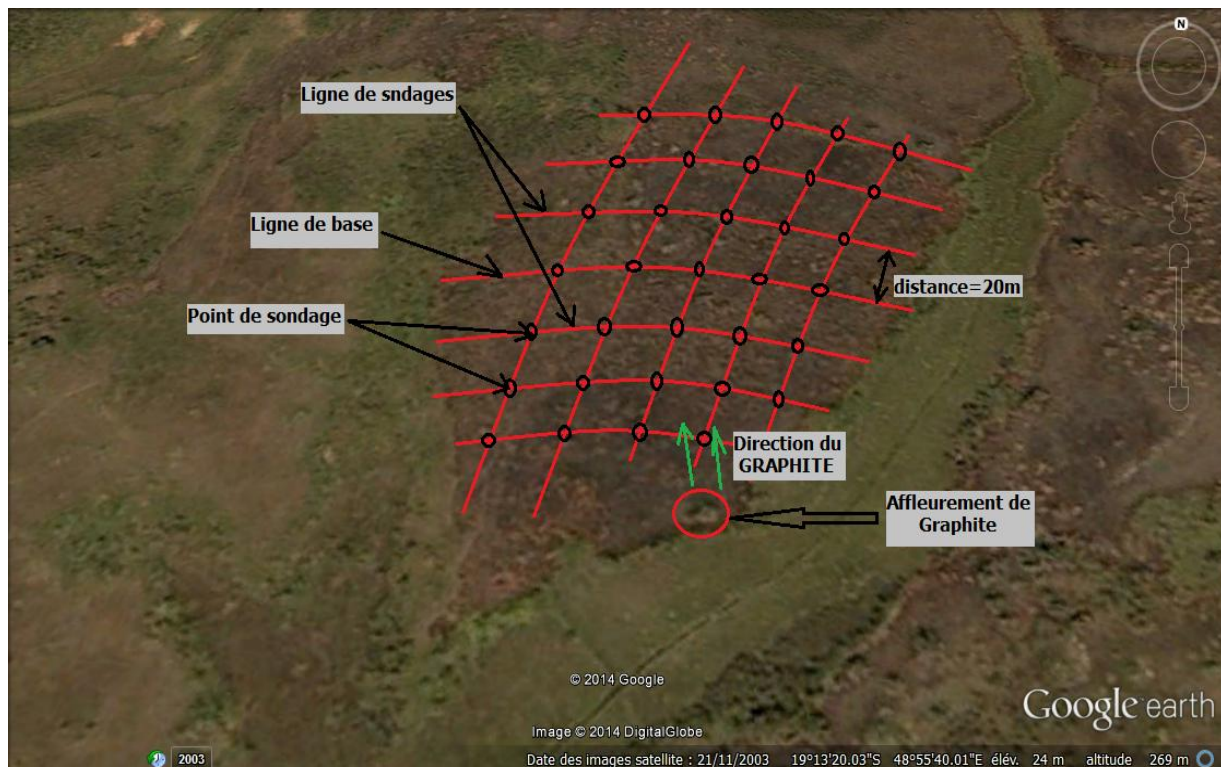


Figure 22 : Méthodes pour le choix de la ligne de base (source : Google earth, modifié par l'auteur)

VI.5.Exécution des travaux de sondages

Après avoir fini le choix de la ligne de base et le coté à entreprendre pour la carrière On procède maintenant a l'exécution du sondage.

▪ **Méthodes**

Il consiste à sonder le terrain horizontalement pour avoir du cutting (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**

- 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 dénommé « 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 2m 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. Cette outil mesure 40cm de long et comporte une cavité et un bout fileté qui s'enfonce au fur et à mesure que la T tourne.

- Clé de fourche et clé de retenue

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

- Angady

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

- Brise roche

Brise roche appelé également casse pierre .Elle est utilisée à la place de la tarière quand la formation est devenue rocheuse.

- GPS (Global Positioning System) pour les coordonnées de chaque trou
- Sachets d'échantillonnage pour les minerais trouvés

Résultats du sondage

Voici un exemple de résultat de sondage qu'on a fait à un point :

- Le trou 1 A est un trou minéralisé
- Sterile : non minéralisée
- Graphite : minéralise dont la profondeur est de sept (7) mètres.
- Sable : 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.

1A	X=694055.453
	Y=849685.055
1m	STERILE
2m	
3m	
4m	GRAPHITE
5m	
6m	
7m	
8m	
9m	
10m	
11m	
12m	SABLE

VI.6.Échantillonnage

Après avoir obtenu les minerais lors d'un sondage d'un point, on a effectué une prise d'échantillon pour chaque mètre minéralisé afin de pouvoir faire des essais au laboratoire .Les analyses au laboratoire permettent de savoir la proportion en graphite du minerais.

▪ Méthodes d'échantillonnage

- À chaque mètre minéralisé, mettre les échantillons obtenus sur un plateau ;
- Faire le quartage jusqu'à ce qu'on obtient la quantité nécessaire pour les essais au laboratoire ;
- Mettre l'échantillon dans un sachet bien fermé.

Après avoir obtenus les échantillons nécessaires et effectués tous les sondages sur terrain, nous devons procéder aux analyses au laboratoire.

CHAPITRE VII LA GEOSTATISTIQUE

VII.1 Définition

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 :

$$Q = T \times Z$$

VII.2 Objectif de la géostatistique

Le terme géostatistique, employé par G. Matheron, désigne l'emploi de la statistique dans l'étude des phénomènes géologiques.

À chaque stade de la vie d'un gisement minier on se trouve confronté à des problèmes d'estimation :

- au stade de l'exploration préliminaire, il s'agit d'obtenir une image de l'ensemble du gisement, de le délimiter, d'évaluer ses ressources in situ globales ainsi que sur de grands panneaux ;
- on cherche ensuite à rationaliser les campagnes de sondage complémentaires, à préciser les ressources, à estimer les réserves récupérables compte tenu de contraintes technico-économiques (conception de fosse par exemple) ;
- au stade de l'exploitation, on dispose de données beaucoup plus nombreuses et on cherche à estimer les teneurs de petits blocs, les unités de sélection minière, pour déterminer si on doit les extraire et les traiter, ou les mettre au stérile, ou les laisser en place : on souhaite aussi disposer d'indicateurs de précision sur ce qui sera exploité à moyen ou court terme.

VII.3 Application de la géostatistique à la recherche minière

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*

Une fois que la première campagne systématique est achevée, on procède généralement à l'estimation globale des ressources in situ, aux estimations du tonnage du minerai, de la quantité du métal et de la teneur moyenne par krigeage.

La détermination de l'erreur d'estimation sous forme de variance de krigeage est aussi obtenue à l'aide de la géostatistique. Elle constitue l'un des principaux avantages de la géostatistique par rapport aux méthodes traditionnelles d'estimation.

▪ *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.

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.

VII.4 Comportement à l'origine du variogramme et détermination du C_0 (effet de pépité)

Généralement, 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.

VII.4.1. Détermination du palier C

La stabilisation des valeurs du variogramme à partir d'une certaine distance permet de fixer la valeur de C sur l'axe des ordonnées.

VII.4.2. Détermination de la portée a

La portée a est la valeur correspondante au palier sur l'axe des abscisses

La droite (D) coupe au point d'abscisse $\frac{2}{3}a$, on sait que pour

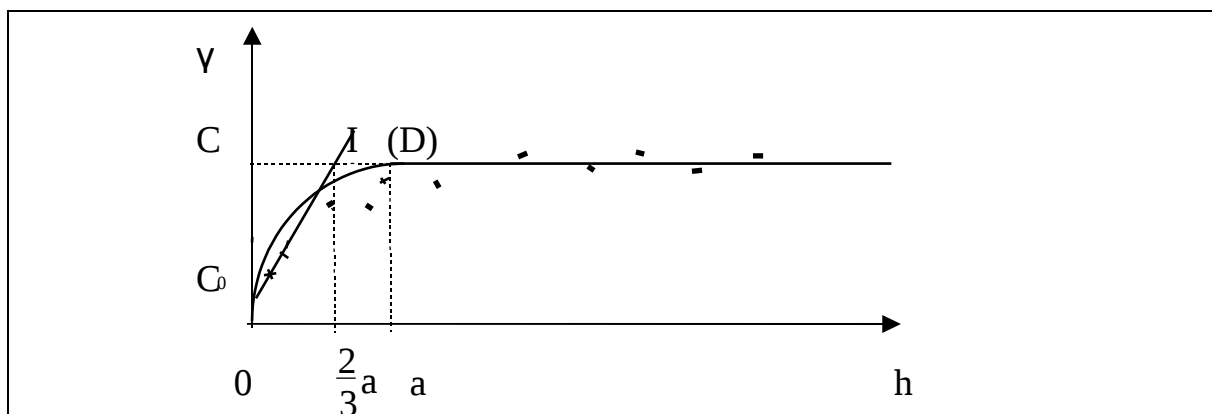
Modèle sphérique

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

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

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

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



C est le palier, a la portée

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

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

C est le palier et a le paramètre d'échelle. 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

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

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

Modèle puissance

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

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

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

Modèle sinus cardinal

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

C est le palier et a le paramètre d'échelle. 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.

VII.4.3. La teneur moyenne

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

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

VII.5 Variance de dispersion

VII.5.1 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.

VII.5.2 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.

VII.5.3 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.

VII.6. Variance d'estimation

VII.6.1 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 pourrions, 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

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

VII.6.2 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 :

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

VII.7. Le Krigeage

VII.7.1. 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.

VII.7.2. 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.

VII.7.3. Krigeage simple en covariance

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

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

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