



REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département des Mines et géologie

Memorie de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Option : Exploitation minière

Présenté par

M^{elle} : BELKAI Hadjila

M^{elle} : BEN HAMICHE Assia

Thème

Evaluation géostatistique des ressources minières « cas de gisement de Kef Es Sennoun »

Soutenu le 25/06/2015 devant le jury composé de:

Président: Mr. DJEMA Amar
Encadreur: Mr. BOUKARM Riadh
Co-encadreur: Mr. MAZARI Messaoud
Examineur: Mr. AYADI Brahim

Année Universitaire: 2014-2015

Remerciements

*Nous remercions le bon dieu qui nous a donné la force et le courage
d'aller au bout de notre projet.*

*Nous avons l'honneur et le plaisir d'exprimer nos gratitude
remerciement à **Mr. BOUKARM Riadh** notre promoteur et*

***Mr. MAZARI Messaoud** notre*

*Co-promoteur, pour leurs orientations, leurs disponibilité et de nous
avoir confié ce travaille.*

*Mes sincères remerciements vont aussi a l'examineur et les
membres du jury, de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce projet de
fin d'étude.*

*Nous adressons nos vis remerciement à l'ensemble de personnel de
département des mines et géologies et à tous ceux qui ont contribué à
la réalisation de ce modeste travail.*

Dédicaces

*Avec ma grande gratitude et mes sincères sentiments je dédie
ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de
m'encourager et à me soutenir pendant toute ma scolarité.*

Mon frère et ma sœur ;

A ma grande famille ;

A tous mes amis ;

A tous mes collègues.

BEN HAMICHE Assia

Dédicaces

*Avec ma grande gratitude et mes sincères sentiments je dédie
ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de
m'encourager et à me soutenir pendant toute ma scolarité.*

Mes frères et ma sœur ;

A ma grande famille ;

A tous mes amis ;

A tous mes collègues.

BELKAI Hadjila

Sommaire

Listes des sigles et abréviations.....	I
Liste des tableaux.....	III
Liste des figures.....	IV
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : Présentation géologique de gisement

I.1. Le gisement de Djebel Onk.....	3
I.1.1. Historique du complexe de Djebel Onk	3
I.1.2. Situation géographique de gisement.....	4
I.1.3. Aperçu géologique.....	6
I.1.3.1. Géologie de gisement	6
I.1.3.1.1. Stratigraphie.....	6
I.1.3.1.2. Tectonique régionale.....	11
I.2. Gisement Kef Es Sennoun.....	16
I.2.1. Historique	16
I.2.2. Situation géographique	16
I.2.3. Aperçu géologique.....	16
I.2.3.1. Stratigraphie.....	17
I.2.4. Les teneurs	17
I.2.5. Réserves géologiques	18
I.2.6. Historique de recherche	19
I.2.7. Travaux des recherches	19

CHAPITRE II : Interpolation linéaire par partitionnement dans l'espace

II.1. Méthode de section	20
II.2. Méthodes déterministes.....	22
II.2.1. Méthodes d'interpolation par partitionnement dans l'espace	22
II.2.1.1. Méthode des polygones	22
II.2.1.2. Méthode de triangulation	23
II.2.2. Les méthodes barycentriques.....	25
II.2.2.1. La méthode de l'inverse de distance	25
Conclusion.....	26

CHAPITRE III : Théorie de la variable régionalisée

III.1. Histoire de la géostatistique	27
--	----

III.2.	Langage de la géostatistique	29
III.3.	Domaines d'application de la géostatistique	29
III.4.	Notions de la géostatistique	31
III.5.	Le semi-variogramme	32
III.5.1.	Le semi-variogramme théorique	32
III.5.2.	Le semi-variogramme expérimental (γ_e)	34
III.5.3.	Modèles théoriques de variogrammes	36
III.6.	Le krigeage	39
III.6.1.	Le krigeage ordinaire	41
III.6.2.	Krigeage simple	43
III.7.	Propriétés du krigeage	43
III.8.	Choix du type du krigeage à utiliser	44
	Conclusion.....	44

CHAPITRE IV : Etude statistique et variographique

IV.1.	Présentation des données et leur implantation sur les lieux	45
IV.2.	Base de données numériques	48
IV.3.	Etude statistique.....	50
IV.3.1.	Notion de statistique	50
IV.3.2.	Statistique descriptive et histogramme	51
IV.3.2.1.	L'épaisseur(m)	51
IV.3.2.2.	Les teneurs	53
IV.4.	Analyse variographique	54
IV.4.1.	Variogrammes expérimentaux.....	54
IV.4.2.	Isotropie et anisotropie	54
IV.4.3.	Ajustement de fonction sur le variogramme.....	55
IV.4.4.	Paramètres pour le calcul du variogramme expérimental	55
IV.4.5.	Calcul et ajustement des variogrammes	56
IV.4.5.1.	Les variogrammes des épaisseurs	61
IV.4.5.2.	Les variogrammes des teneurs en phosphate	65

CHAPITRE V : Krigeage 2D, résultats et interpolation

V.1.	Grille de krigeage	69
V.2.	Krigeage 2D, résultat et interprétation	69
V.2.1.	Cartes des épaisseurs de la couche minéralisée	69
V.2.2.	Variance de krigeage pour les épaisseurs	70

V.2.3. Cartes de répartition des teneurs en P_2O_5	71
V.2.4. Variance de krigeage pour les teneurs	71
V.3. Résultats de calcul des réserves du gisement de Kef Es Sennoun	73
V.4. Présentation graphique des réserves en phosphate.....	74
V.5. Les réserves estimées en utilisant la méthode géostatistique (krigeage).....	76
Conclusion générale.....	78
Références bibliographiques.....	79

Liste des sigles et abréviations

- b** : puissance
- a** : Portée du semi-variogramme.
- C(0)** : Palier du semi-variogramme
- C. V** : Coefficient de variation.
- C. S** : Coefficient d'asymétrie.
- C₀** : Effet de pépite.
- e** : Erreur d'estimation.
- E[]** : Espérance mathématique.
- h** : Pas du semi-variogramme ou inter-distance moyenne.
- K. S** : Krigeage simple.
- K. O** : Krigeage ordinaire.
- L(λ)** : Lagrangien.
- m** : Moyenne.
- M** : Mode.
- n** : Nombre d'observations.
- N(h)** : Nombre de paires d'observations séparées par la distance h.
- Var** : Variance.
- v.a** : Variable aléatoire.
- (X, Y, Z)** : Coordonnée UTM (Transverse Universel de Mercator)
- Z(x)** : Fonction aléatoire.
- σ^2_e** : Variance d'estimation.
- σ** : Ecart-type.
- $\gamma(h)$** : Semi-Variogramme théorique.
- $\gamma_e(h)$** : Semi-Variogramme expérimental.
- θ** : Angle directionnel du variogramme.
- μ** : Multiplicateur de Lagrange.
- λ** : Poids de krigeage.
- G** : champ ou gisement
- E_p** : épaisseur
- S** : section
- V** : volume
- t_m** : teneur moyenne

t_i : teneur en un point donné

d_i : distance

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

EN FERPHOS : Entreprise National pour l'Exploitation de Fer et de Phosphate

EREM : EX SNAREM

Liste des tableaux

Tableau. I.1. Les réserves géologiques de gisement de Kef Es Sennoun	18
Tableau II.1. Présente les formules pour les 7 cas afin d'obtenir le volume et la teneur.	21
Tableau.IV.1. Présentation des coefficients d'asymétrie et de variation.	51
Tableau .IV.2. Principaux paramètres des variogrammes expérimentaux.	64
Tableau IV.3. Principaux paramètres relevant des variogrammes expérimentaux.....	68
Tableau V.1. Analyses des résultats des cartes krigées (cartes des teneurs et des épaisseurs)	73
Tableau V.2. Calcul des réserves en phosphate en fonction des teneurs de coupures.	73
Tableau.V.3. Représentation des teneurs de coupure et leurs tonnages en Phosphate	74
Tableau V.4. Tableau comparatif des résultats d'évaluation.....	76

Listes de figures

Fig.I.1. Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk (D'après Prian et Cortial, 1993).....	5
Fig.I.2. colonne stratigraphique de la région de djebel el onk Ranchinn 1963.....	10
Fig.I.3. Carte structurale de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa – Mélaoui – Onk (Aissaoui, 1984).....	11
Fig.I.4. Coupes stratigraphiques et structurales des flancs Nord et Sud de Djebel Onk (E.R.E.M, 1986).....	12
Fig. I.5. Les cinq secteurs miniers de Djebel Onk.....	15
Fig. II.1. Technique de partitionnement de l'espace.....	23
Fig.II.2. Triangulation de Delaunay.....	24
Fig.II.3. Exemple de l'inverse de distance.....	25
Fig. III.1. Représentation des points X_i d'un ensemble des variables aléatoires $Z(X_i)$	31
Fig.III.2. Représentation schématique des points de mesure de la variable.....	32
Fig. III.3. Schéma type d'un variogramme.....	33
Fig. III.4. Schéma de calcul du variogramme expérimental.....	34
Fig.III.5. Ajustement d'un modèle théorique (courbe) de semi-variogramme à un semi-variogramme expérimental (croix).....	35
Fig.III.6. Graphe d'un variogramme expérimental et son model d'ajustement.....	35
Fig.III.7. Schéma type d'un semi-variogramme (effet de pépité).....	36
Fig.III.8. Schéma type d'un semi-variogramme (effet de pépité).....	37
Fig. III.9. Schémas type d'un modèle de semi-variogramme : exponentiel.....	38
Fig.III.10. Schémas type d'un modèle de semi-variogramme : gaussien.	38
Fig.III.11. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme shérique.....	39
Fig. IV.1. Carte de positionnement des sondages.....	46
Fig. IV.2. Carte d'iso teneur avec positionnement des sondages échantillonnés de gisement de Kef Es Sennoun.....	46
Fig. IV.3. Carte d'iso teneur de gisement de Kef Es Sennoun.....	47
Fig. IV.4. Fichier représentatif de la forme de la base des données, préparé pour l'analyse...49	49
Fig.IV.5. Fréquences des épaisseurs de minéralisation de phosphate de Kef Es Sennoun.....	52
Fig. IV.6. Fréquence des teneurs en P_2O_5 de gisement de Kef Es Sennoun.....	53

Fig. IV.7. Tolérance linéaire.....	56
Fig. IV.8. Tolérance angulaire.....	56
Fig.IV.9. Nuage variographique des épaisseurs (première étape de modélisation des variogrammes).....	57
Fig.IV.10. Nuage variographique des teneurs (première étape de modélisation des variogrammes).....	58
Fig.IV.11. La nue variographique des épaisseurs, avec ajustement de variogramme d'un pas de 40 m.....	59
Fig. IV.12 . La nue variographique des teneurs, avec ajustement de variogramme d'un pas de 40 m.....	60
Fig. IV.13. Ensemble des variogrammes directionnels et omnidirectionnel des épaisseurs....	61
Fig.IV.14. Ensemble des variogrammes directionnels des épaisseurs avec l'ajustement des modèles expérimentaux.....	62
Fig.IV.15. Variogramme omnidirectionnel avec l'ajustement de variogramme expérimental des épaisseurs.....	63
Fig. IV.16. Ensemble des variogrammes directionnels et omnidirectionnel.....	65
Fig.IV.17. Ensemble des variogrammes directionnels avec ajustements des variogrammes expérimentaux.....	66
Fig.IV.18. Variogramme omnidirectionnel avec l'ajustement de variogramme expérimentale.....	67
Fig. V.1. carte représentative du krigeage des épaisseurs de la couche minéralisée.....	70
Fig. V.2. Carte de la variance de krigeage des épaisseurs de la couche minéralisée.....	70
Fig.V.3. Carte représentative du krigeage final des teneurs en P ₂ O ₅ , montrant la répartition de la minéralisation.....	71
Fig. V.4. Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en P ₂ O ₅	72
Fig.V.5. Représentation graphique de l'évolution des réserves en fonction des teneurs de coupures considérées.....	74
Fig.V.6. Représentation graphique des pourcentages des réserves en fonction de leurs teneurs en P ₂ O ₅	75
Fig.V.7. Représentation graphique des réserves en phosphate estimées par les différentes études effectuées sur le gisement de Kef Es Sennoun.....	77

Introduction générale

Introduction générale

La production classique pour la conception d'une mine ou d'un projet miniers en général, commence par l'identification de la minéralisation qui est une phase fondamentale dans la réussite d'un projet minier. La détermination des caractéristiques géologiques et géotechniques du sol avant les travaux d'extraction permet la planification des tâches et leur réalisation dans les délais impartis.

Le coût d'une bonne reconnaissance du sous-sol peut être élevé, mais c'est largement justifié par les conditions de sécurité optimales requises durant les travaux d'ouverture, et plus tard lors de l'exploitation de l'ouvrage.

L'étude du sous-sol se fait à partir des observations récoltées sur le terrain par des levés cartographiques, par des mesures géophysiques ou encore par des forages. Souvent, les campagnes de reconnaissance par forages coûtent cher. Le temps de réalisation peut aussi être très long. Par conséquent, et par souci de financement et de délais, les entreprises procèdent à un nombre limité de sondages sur le site concerné. Cependant, ces données sont toujours en nombre limité de sorte qu'un modèle géologique est bâti sur une large part d'interprétation du géologue.

Pour compléter ces reconnaissances ponctuelles, les bureaux d'études procèdent le plus souvent à faire des estimations de réserves minières par des interpolations linéaires par partitionnement dans l'espace ou par des considérations statistiques.

L'estimation de réserve est un paramètre utile afin d'évaluer la rentabilité du gisement, et de justifier l'arrêt ou la continuité des travaux.

Les techniques d'évaluation de réserve sont des méthodes ayant comme objectif de fournir des estimations de la teneur pour tout élément de volume ou de surface à partir d'un échantillonnage limité. Elles sont basées sur le calcul de la moyenne pondérée, qui a attribué des poids à des observations spatiales de ces dernières, par rapport à l'élément de volume ou de surface que l'on veut estimer. Parmi ces techniques on cite :

- ✓ La méthode de section.
- ✓ Les méthodes conventionnelles :
 - Interpolation par partitionnement dans l'espace (méthode de polygone, méthode triangle).
 - Interpolation barycentrique (méthode de l'inverse de distance).

- ✓ Les méthodes géostatistiques (le Krigeage).

Ce travail a pour objet, d'une part, la modélisation de la variabilité spatiale entre les sondages qui sont réalisés dans le cadre de la cartographie et l'évaluation des réserves de gisement de Kef Es Sennoun de Djebel El Onk à Tébessa. Cette modélisation sera principalement fondée sur la théorie de la variable régionalisée, ou géostatistique.

Nous utiliserons ensuite le modèle ainsi calculé (variogramme) pour interpoler, par krigeage, les variables étudiées là où elles n'ont pas été échantillonnées afin de montrer l'efficacité et la précision de calcul, ainsi que la simplicité de la manipulation des cartes numériques.

Notre travail consiste à estimer les teneurs de minéralisation et les épaisseurs des couches minéralisées.

Chapitre I

Présentation géologique de gisement

Introduction

Dans ce chapitre, en premier lieu on va présenter le gisement de djebel Onk en générale puis on va spécifier sur le secteur minier de Kef Es Sennoun dont lequel on a fait notre étude qui a comme objectif « le calcul des réserves en phosphate dans ce gisement par la méthode géostatistique ».

I.1. Le gisement de Djebel Onk

I.1.1. Historique du complexe de Djebel Onk [17]

Les phosphates Algériens ont été découverts à Boghari par Ph. Thomas (1873), un peu avant les phosphates de Gafsa(1855).

Dans la période 1906 / 1907, Joleau a découvert le gisement de Djebel Onk avec la mise en évidence de deux couches phosphatées dans un ravin du Oued de Djemi – Djema au Sud de Djebel Onk.

En 1912, Dussert a présenté les premières informations sur les gisements phosphatés Algériens avec des coupes lithologiques détaillées des gîtes de la zone de Djebel Onk.

La prospection systématique a été débuté par « la compagnie des Phosphates de Constantine » en 1930 et avait confirmé l'existence des réserves considérables, ce qui amené à la création de la société de Djebel Onk (S.D.O), en 1936 ; mais l'éloignement de la mer, la désertification de la région, le manque d'eau et de l'énergie et les méthodes de l'exploitation reflètent une exploitation irrationnelle.

La connaissance sur la géologie régionale et des gisements progresse avec les études de R. Laffitte (1939), L. Cayeux (1939 –41 – 50), et R.Flandrin (1948).

En 1951, L. Visse a étudié le gisement de phosphate du Djebel Djemi – Djema dont il reprend avec beaucoup de détails la stratigraphie et évalue les réserves (110 Million de tonne de minerai à 24.80 – 25.20 % P_2O_5 , soit 54 – 55 % TPL, pour un total de 600 MT dans toute la zone de Djebel Onk.

A partir de 1960, dans le cadre de l'industrialisation de l'Algérie (plan de Constantine), le projet d'exploitation des phosphates devient prioritaire.

De 1961 à 1963, des essais de prospection radiométrique aéroportée effectués au – dessus du gisement du Djebel Onk pour tester la méthode utilisée avec succès par le BRGM dans l’Atlas Tellien le long des affleurements de l’Eocène.

Les études ont été reprises par Ranchin (1963) qui avait établi les cartes géologiques à l’échelle 1 / 5000.

Ce n’est qu’au Février 1965 l’exploitation de Djemi-Djema a débuté par la société de Djebel Onk en se basant sur les données prévisionnelles de Servajeau.

A la suite de l’aménagement de la carrière, l’intérêt porté à la géologie de Djebel Onk s’accroît. Ces terrains devenaient, alors, l’objet de nombreux travaux, parmi lesquels ceux de Kettouche (1970), Berats et Fur(1982), Mezghache (1991).

De 1971 à 1974, les travaux de recherches et de prospection sur les phosphates de l’Est Algérien ont été relancés par la SONAREM en s’appuyant sur un levé aéro-radiométrique.

De 1985 à 1987, L’E.N. FERPHOS à confier à l’ EREM des travaux de recherche et d’évaluation des ressources en phosphate de tous les gisements potentiels de la région de Djebel Onk, ces importants travaux, réalisés avec la coopération soviétique, ont vu en particulier la réalisation de 97 sondages carottés, totalisant 10732 m de série, ainsi qu’un important programme de tranchées au de 79.

En Avril 1992, c’est la signature du contrat entre l’E.N. FERPHOS et le BRGM / SOFREMINES concernant le rassemblement des éléments techniques et économiques permettant d’arrêter un projet de développement de l’exploitation des gisements de phosphates de Djebel Onk.

En 1998/1999, le bureau d’étude FERTIBIRIA, a réalisé un projet d’exploitation, une étude technico-économique et une étude de faisabilité du gisement Bled El Hadba.

I.1.2. Situation géographique de gisement[8]

La région de Djebel Onk est située au Sud – Est de l’Algérie, à 100 km de la Wilaya de Tébessa et à 20 km de la frontière Algéro – Tunisienne, sur la route qui relie Tébessa et El Oued. Cette région constitue la limite géographique naturelle entre les hauts plateaux constantinois et le domaine saharien. Le massif de Djebel Onk forme un ensemble calcaire de

20 km de longueur qui culmine à 1198 m d'altitude au Djebel Tarfaya. Ce massif constitue l'extrémité orientale des monts de Nememcha qui prolonge vers l'Est le massif des Aurès. Les altitudes les plus basses au pied du Djebel Onk sont d'environ 635m.

Le climat est subaride, caractérisé par un régime continental avec deux saisons très nettes ; un hiver froid et rigoureux et un été où les températures peuvent dépasser 45°C. Les précipitations sont peu abondantes avec une moyenne de 300 mm / an.

La population est peu dense. Sa situation économique s'est améliorée grâce à l'installation du complexe minier de Bir El Ater ; ce qui a contribué à l'agrandissement et au développement de la ville.

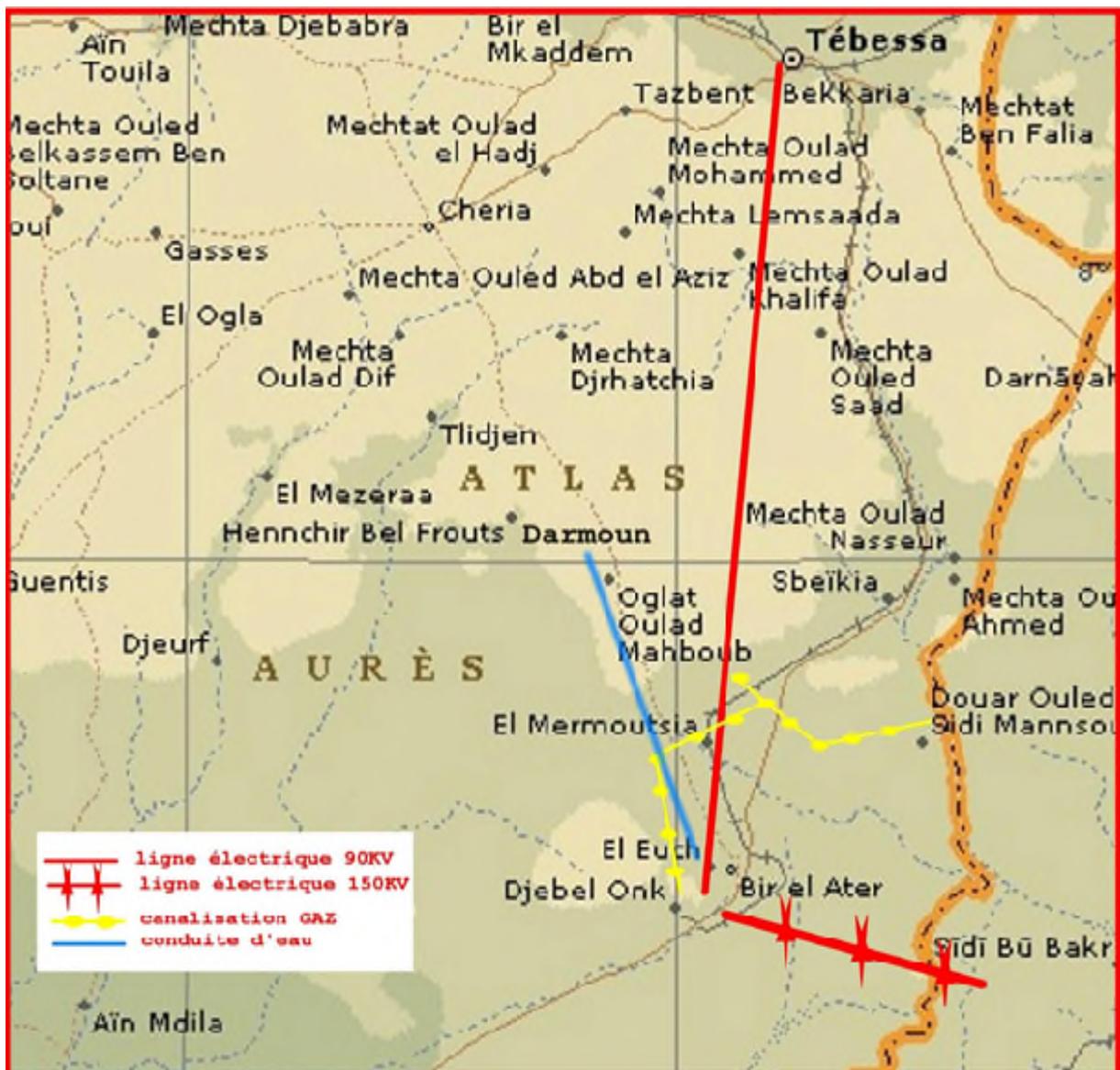


Fig. I.1. Carte de situation géographique des gisements de Djebel Onk [8]

I.1.3. Aperçu géologique [8]

I.1.3.1. Géologie de gisement

Le gisement est situé dans le prolongement de la retombée méridionale de la flexure antiforme du Djebel Onk, dont la structuration majeure est due à la tectonique post-Miocène.

Litho-logiquement, le gisement de Kef Es Sennoun est constitué de bas en haut, par la série calcaro-dolomitique à silex de l'Yprésien surmonté par les calcaires marneux du Lutétien, puis par les sables du Miocène, et les alluvions du Quaternaire.

La majeure partie du gisement est constituée par une couche unique de phosphate sombre, gris –noir, sans intercalation carbonatée stérile, vers le Nord-Est de gisement appartient une couche de phosphate claire brun –beige oxydé sus-jacente à la couche de phosphate noir, la proportion des deux types de minerai est de 75% pour la première et 25% pour la deuxième.

I.1.3.1.1. Stratigraphie

La stratigraphie de la région de Djebel Onk a été établie par Visse (1952). La série sédimentaire affleurant est exprimée par une succession stratigraphique allant du Crétacé Supérieur (Maestrichtien) à l'Eocène moyen (Lutétien), surmontée par une série sablo – argileuse continentale datée du Miocène et du Quaternaire.

1. Crétacé

Ce sont les sédiments les plus anciens au cœur de l'anticlinal de Djebel Onk Tectoniquement très accidentés. Seuls les dépôts du Maestrichtien y affleurent.

Les sédiments de cet âge, au cœur de Djebel Onk, sont représentés par des calcaires à silex et des intercalations de marnes (de 5 à 10 m). Ils représentent à leur partie supérieure, une surface taraudée, rubéfiée, facilement repérable dans la topographie.

2. Paléogène

Le Paléogène comporte les sédiments du Paléocène et de l'Eocène. Ce sont des sédiments marins représentés par des calcaires, des phosphates et des gypses. Dans la région, le Paléogène atteint d'assez grandes épaisseurs de 350 m, les variations lithologiques et les restes des organismes ont permis d'en faire les subdivisions stratigraphiques suivantes :

2.1. Danien

Il est différent du Crétacé, il est conventionnellement adopté au contact calcaire Maestrichtien série argilo – marneuse. Cette différence lithologique est présentée par une subdivision en deux séries distinctes, où on note la séparation entre le Danien supérieur et le Danien inférieur. L'épaisseur totale du Danien est d'environ 100 m.

a) Danien inférieur: Il est représenté par des argiles marneuses schisteuses, de couleur grise foncée à brun vert, intercalé par des marnes dures et irrégulières. L'ensemble est traversé par des filons de gypses de différentes orientations.

b) Danien supérieur : Il est formé par des calcaires durs blancs, très fins souvent à cassure conchoïdale, avec des intercalations de marnes tendres, argileuses et schisteuse. Dans la partie supérieure du Danien, on note la présence d'un banc caractéristique de 1 à 2 m d'épaisseur, formé de calcaire beige à lumachelle surmontés par des marnes en plaquettes blanches. C'est dans cet étage qu'apparaissent les premiers minces niveaux (10 à 30 cm) de marne phosphatée.

2.2. Montien

Cet étage est marqué par la présence d'une série de calcaire, calcaires détritiques, calcaires à lumachelle avec des intercalations de marne et dolomie, ces sédiments se caractérisent par une absence ou une faible quantité de silex. Les huîtres sont abondantes, en bancs gris à noire. Les *Ostera*, *Ostera off digitilina* du bois, *Pittor*, sont des espèces caractéristiques.

2.3. Thanétien

C'est l'horizon porteur de la minéralisation. Il est visible sur le flanc de l'anticlinale de Djebel Onk avec une épaisseur de 72 m. Il se subdivise en deux parties :

a) Thanétien inférieur: Caractérisé par des schistes marneux irrégulièrement intercalés de calcaire. Ces schistes sont de couleur grise foncé à noir.

A la base, on trouve des conglomérats à gastéropodes, et des minces passées phosphatées et d'une série d'intercalation de marnes à faunes caractéristiques riche en matière organique.

Dans la partie supérieure du Thanétien inférieur apparaissent des intercalations phosphatées atteignant jusqu'à 2 m d'épaisseur, et très riche en matière organique surmontées par des calcaires et des marnes à gros gastéropodes. La puissance varie de 30 à 40 m.

b) Thanétien supérieur : Il débute par un niveau dolomitique à gastéropodes, sous-jacent à une couche phosphatée de 30 m d'épaisseur en moyenne à Djebel Onk et à Bled El Hadba, et qui diminue jusqu'à la disparition vers le Nord, l'Ouest et le sud de ce gisement se termine généralement par un niveau lumachellique. La limite entre le Thanétien et l'Yprésien est obtenue seulement par le changement du faciès phosphaté à celui de calcaire marneux à une épaisseur de 0 à 50 m.

2.4. Yprésien

Il repose directement sur les dépôts du Thanétien et affleure dans la carrière de Djemi-Djema et au Nord du Djebel Onk, il a une épaisseur de 32 m, on note :

a) Yprésien inférieur : Il est représenté à la base, par des conglomérats marquant la limite avec le Thanétien et sous-jacent une couche à alternance de calcaire, marne, dolomie et de la couche phosphatée. On note la présence de couches minces de silex dans les calcaires. L'épaisseur moyenne de l'Yprésien inférieur est de 30 m au maximum.

b) Yprésien supérieur : Il est constitué par l'alternance de calcaires, calcaire dolomitique et marnes, sa puissance est de 2 à 3 m.

2.5. Lutétien

Les formations de cet étage recouvrent en concordance les séries Yprésiens ; elles sont répandues dans la région de Djebel Onk, on distingue :

a) Lutétien inférieur: Il est marqué par un changement de faciès où les marnes remplacent le calcaire, il est assez riche en matière organique.

b) Lutétien supérieur: Il est représenté par une alternance de marnes blanches et d'argiles, il est caractérisé par la présence de gypse, son épaisseur peut atteindre 100 m, ce type de faciès termine le cycle de la sédimentation marine Tertiaire inférieure (Paléogène).

3. Néogène

Le Néogène est caractérisé par un faciès sablo-argileuse de type continental d'une puissance avoisinante à 600 m.

3.1. Miocène

La datation des roches de Miocène a été faite grâce à la découverte des rares fossiles, il est formé essentiellement par des sédiments représentés par des roches terrigènes (conglomérats, grés, sables, argile) et des schistes argilo – gréseux. Tandis que les sédiments de la région de Bled El Hadba sont composés de nombreux fragments silicatés.

Le Miocène est subdivisé en trois unités de bas en haut :

a) Miocène inférieur: Débute par des conglomérats, sable à gros grain présentant une épaisseur d'une dizaine de centimètres à quelque mètre, surmontés par des sables blancs avec intercalation d'argile bruns, ou gris beige, sa puissance atteint plus de 200 m.

b) Miocène moyen: Il est constitué d'argile marron, d'argile à structure schisteuse, brune, la puissance est d'environ 100 m.

c) Miocène supérieur: On constate la présence des sables, grés à blanc de graviers, le matériel est très grossier nettement stratifié.

4. Quaternaire

Les formations Quaternaires couvrent de vastes surfaces dans la région ; elles sont essentiellement représentées par des éboulis, de dépôts sableux éoliens, fluviaux et des dépôts alluviaux.

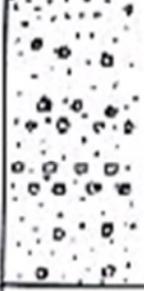
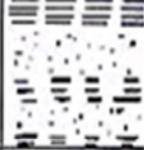
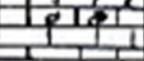
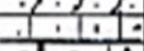
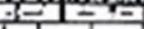
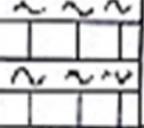
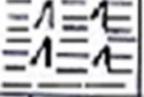
QUATERNAIRE			Eboulis et formations alluvionnaires sableuses
MIOCENE	SUP (350m)		Sables, grès à grains grossiers
	MOY (250m)		Argiles, schistes argileux de couleur marron, bronze avec intercalation de sables blancs
	INF (100m)		Sables fins blancs avec des couches de grès et argiles
LUTETIEN	SUP (100m)		Gypses avec interlits de marnes (évaporites)
	INF (40m)		Calcaires et dolomies avec géodes de quartz
YPRESIEN (70m)	SUP		Calcaires et dolomies avec silex
	INF		Calcaires avec lentilles de silex et calcaire phosphaté
THANETIEN (80m)	SUP		Phosphates pseudoolithiques, coprolithiques, gris et noirs
	INF		Marnes sombres schistifiées
MONTIEN (100m)			Minéralisation en Baryto-Céladonite Calcaires avec bancs à Ostréa
DANIEN	SUP (80m)		Alternance de calcaires et de marnes claires
	INF (35m)		Argiles noires avec fibre de gypse
MAESTRICHTIEN SUPERIEUR (200 m)			Calcaires, calcaires noduleux de couleur blanche

Fig.I.2.Colonne stratigraphique de la région de Djebel El Onk [8]

I.1.3.1.2. Tectonique régionale

La région de Djebel Onk appartient à l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien. La série supérieure à l'Eocène du bassin de Djebel Onk – Gafsa - Mélaoui est structuré en une suite d'anticlinaux et de synclinaux dissymétrique, généralement faillés dans leurs flancs, d'axe le plus souvent SW – NE, et décrochés par des accidents transverses N 120° à 140° E.

Les anticlinaux de Djebel Onk, Djebel Djemi-Djma et Oued Bétita sont localisés à la bordure de la flexure Sud – Atlasique qui correspond à une zone d'affleurement entre le domaine Atlasique mobile et la plate – forme Saharienne stable, ils appartiennent à la branche Nord de la flexure Sud Atlasique de direction E – W.

L'anticlinal de djebel Onk prolonge des monts de Nememcha jusqu'à l'Est en périclinal sous les formations du Miocène d'une direction E – NE, cet anticlinal est asymétrique au flanc méridional avec un pendage de 80° et flanc septentrional de 10°.

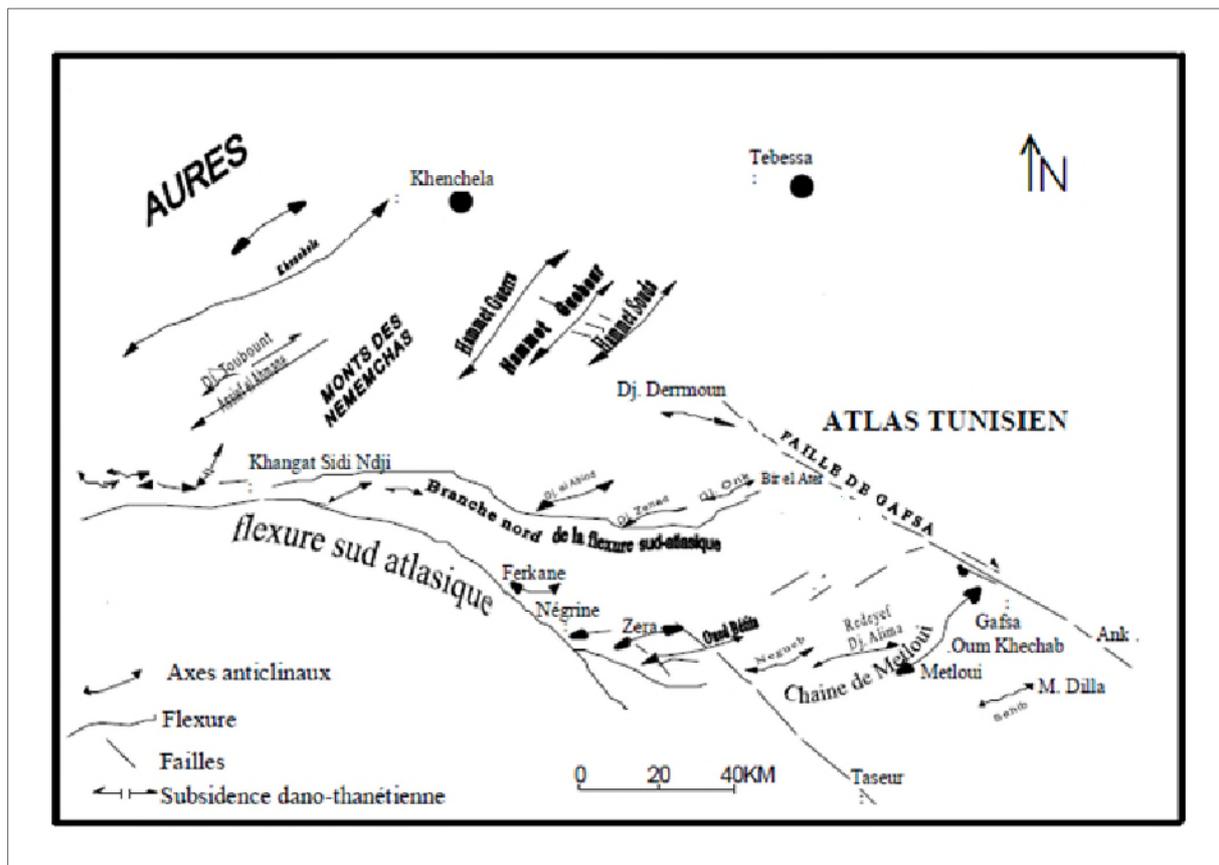


Fig. I.3. Carte structurale de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa – Mélaoui – Onk [8]

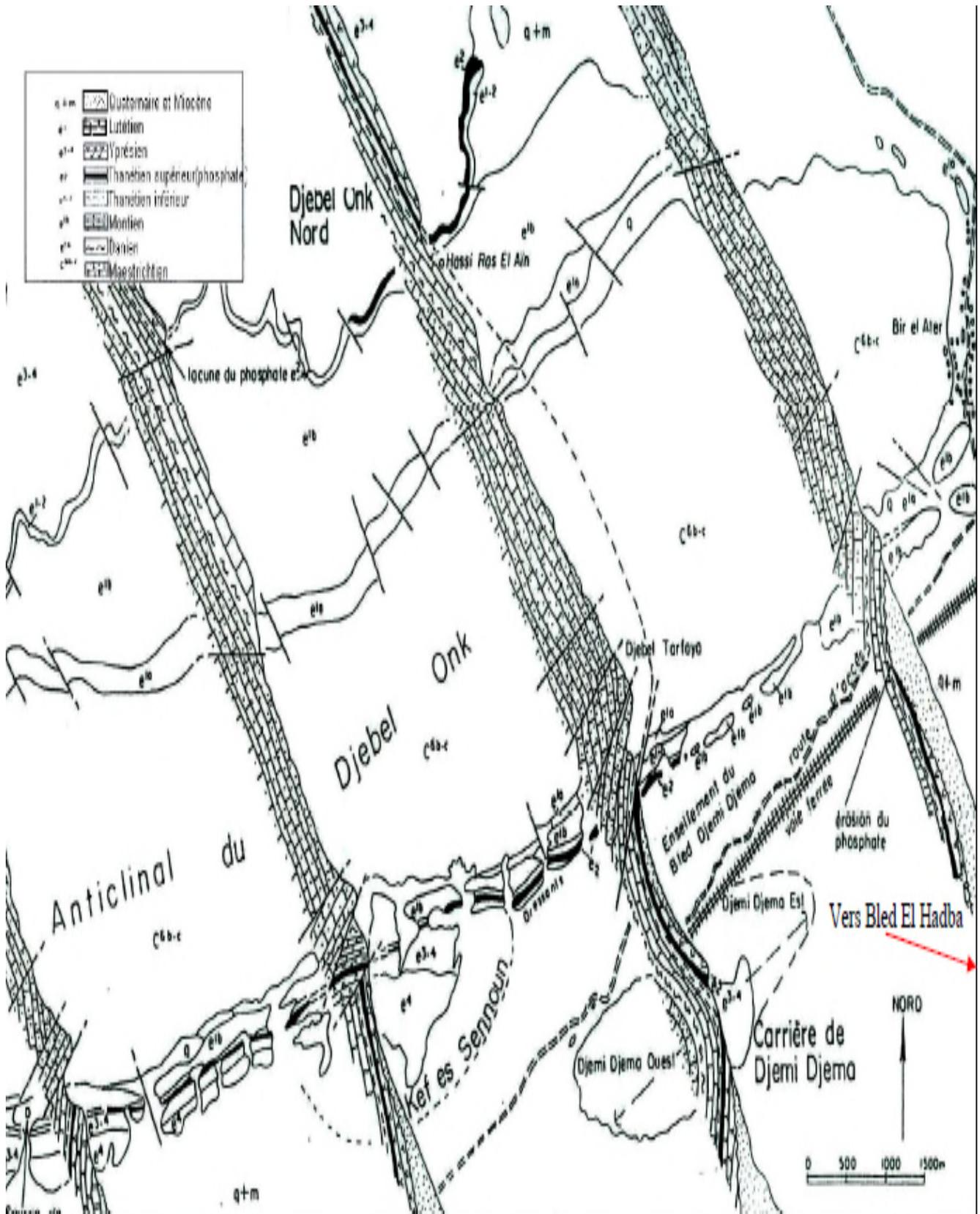


Fig. I.4. Coupes stratigraphiques et structurales des flancs Nord et Sud de Djebel Onk [8]

1. Phases tectoniques responsables de cette structuration

Trois phases tectoniques d'ampleur très inégales ont marqué leur empreinte sur la région de Djebel Onk :

a) Tectonique Paléocène – Eocène (syndimentaire)

Une phase compressive NW – SE contemporaine à la sédimentation Paléogène, s'exprime par des ondulations et des failles syndimentaires. Cette tectonique précoce induit des lacunes de sédimentation dans la série Paléocène – Eocène et a conduit à l'édification des dispositifs paléogéographiques en Hauts fonds et sillons qui vont contrôler la sédimentation des phosphates. Ces déformations précoces peuvent être liées à la montée diapirique des évaporites triasiques, notamment au Paléocène – Eocène.

b) Tectonique post – Eocène moyen et anté – Miocène

Contemporaine à l'émersion de la série au Lutétien supérieur, La phase majeure des plissements des Aurès et des déformations distensives transverses (N120° à N150°) induisant un début de destruction de la série Crétacé Supérieur à Eocène en petits horsts et grabens, allongés suivant la direction N170°E qui vont être affectés par la pénéplanation et l'érosion différentielle anté – Miocène. Ces plissements sont, en majorité, antérieurs aux dépôts des sables Miocènes. C'est à la faveur de cette phase tectonique qu'apparaît l'anticlinal de Djebel Onk (In Mezghache et al, 2000).

c) Tectonique tardi – Miocène, post – Burdigalienne, à Pliocène – Pléistocène

C'est la phase majeure du plissement de l'Atlas Tunisien. Les plissements de la série Crétacé supérieur – Paléocène – Eocène et Miocène en grandes structures antiformes et synformes jouent en horsts et grabens dans les structures antérieurs ; ils forment vers le Sud et sur le flanc inverse des méga plis de Djebel Onk et Djemi-Djema (comportement en dressant). Cette tectogénèse est responsable de la structure actuelle de la région de Djebel Onk.

2. Paléogéographie

Au paléocène supérieur – Eocène inférieur, la région de Djebel Onk appartenait à la partie occidentale du bassin de Gafsa – Méthlaoui – Djebel Onk. Il se différencierait cependant par une subsidence plus marquée, ce qui explique le tonnage énorme de phosphate accumulé, mais aussi les teneurs moyennes en phosphates tricalciques plus faibles que celle enregistrées dans le gisement de Méthlaoui. Ce sillon, occupé par une mer épicontinentale peu profonde, était situé entre l'île ou dôme de Kassarine au Nord, le môle de Djeffera au Sud et haut fond de Djebel Fouris à l'Ouest.

La région a connu au cours de l'histoire géologique de la région, plusieurs étapes de développement bien marquées dans les sédiments :

a) Période de sédimentation marine

Cette période de sédimentation qui débute à la fin de développement du bassin géosynclinal couvrant l'Afrique du Nord et allant du Maestrichtien à l'Eocène supérieur.

Le Maestrichtien se caractérise par une subsidence lente et une sédimentation calme. A la limite entre le Maestrichtien et le Danien, on note un changement de faciès, précurseur de mouvements orogéniques mettant fin au cycle de sédimentation géosynclinal. La profondeur du bassin diminue alors d'une manière brusque, ce qui reflète dans les roches par une sédimentation argilo – carbonatée qui dure pendant tout le Danien.

Le Montien est une période de lente subsidence et de sédimentation assez calme. La mer est alors peu profonde, en masse s'y déposent les bancs d'huîtres, caractéristiques pour les eaux profonds.

Au Thanétien inférieur, la profondeur du bassin a de nouveau diminué. On a alors un apport important de substance argileuse et des sédiments argilo – marneux qui indiquent une fermeture progressive du domaine de sédimentation et une tendance régressive de régime marin. Par contre le Thanétien supérieur est caractérisé par un apport considérable de sédimentation phosphatée qui témoigne d'une réouverture du domaine sédimentaire et du retour des influences transgressives.

A la fin de sédimentation phosphatée principale, une phase régressive se produit à nouveau, elle est matérialisée par des remaniements de phosphate, puis localement par un horizon conglomératique à galets de dolomie formé en milieu marin sans indice de l'émersion.

La présence de dolomie est l'indice d'une saturation de l'eau de mer proche des conditions qui permettent le dépôt des faciès à évaporites. Elle souligne le caractère régressif de ces faciès phosphatés (Ranchin, 1963). Cette phase régressive est suivie régionalement par transgression Yprésienne (calcaire à silex) qui déborde largement les limites des formations précédentes. Au Lutétien, on note une lente diminution de la profondeur du bassin, ce qui a conduit à la formation des hauts fonds et de lagunes et au dépôt d'évaporites. Les variations d'épaisseurs, ainsi que l'homogénéité de la couche phosphatée elle-même traduisant cette paléogéographie diversifiée. Ainsi, la couche de phosphate, calée entre les marnes noires du

mur et les dolomies du toit, est la plus épaisse au niveau des gisements de Djemi-Djema (30 m) et de Kef Es Sennoun (proche de 50 m) qui caractérise le sillon subsident.

b) Période de sédimentation continentale

A partir du Lutétien supérieur, les terrains s'émergent. L'Oligocène n'a pas laissé de trace du fait de l'érosion anté - Miocène. Alors que le Miocène - Paléocène fut une période d'intense sédimentation continentale marquée par les sables, les argiles et les conglomérats. Tandis que le Quaternaire se caractérise par les produits d'érosion qui se déposent sur les flancs et les vallées. Ce sont les colluvions, les alluvions et les éboulis de pente. Des traces d'une glaciation au Pléistocène de courte durée très nette sont bien conservées à Djebel Onk.

La région de Djebel Onk est subdivisée en cinq secteurs miniers :

- ✓ Gisement de Djemi-Djema ;
- ✓ Gisement de Kef Es Senoun ;
- ✓ Gisement de Djebel Onk Nord ;
- ✓ Gisement d'Oued Betita ;
- ✓ Gisement de Bled El Hadba.

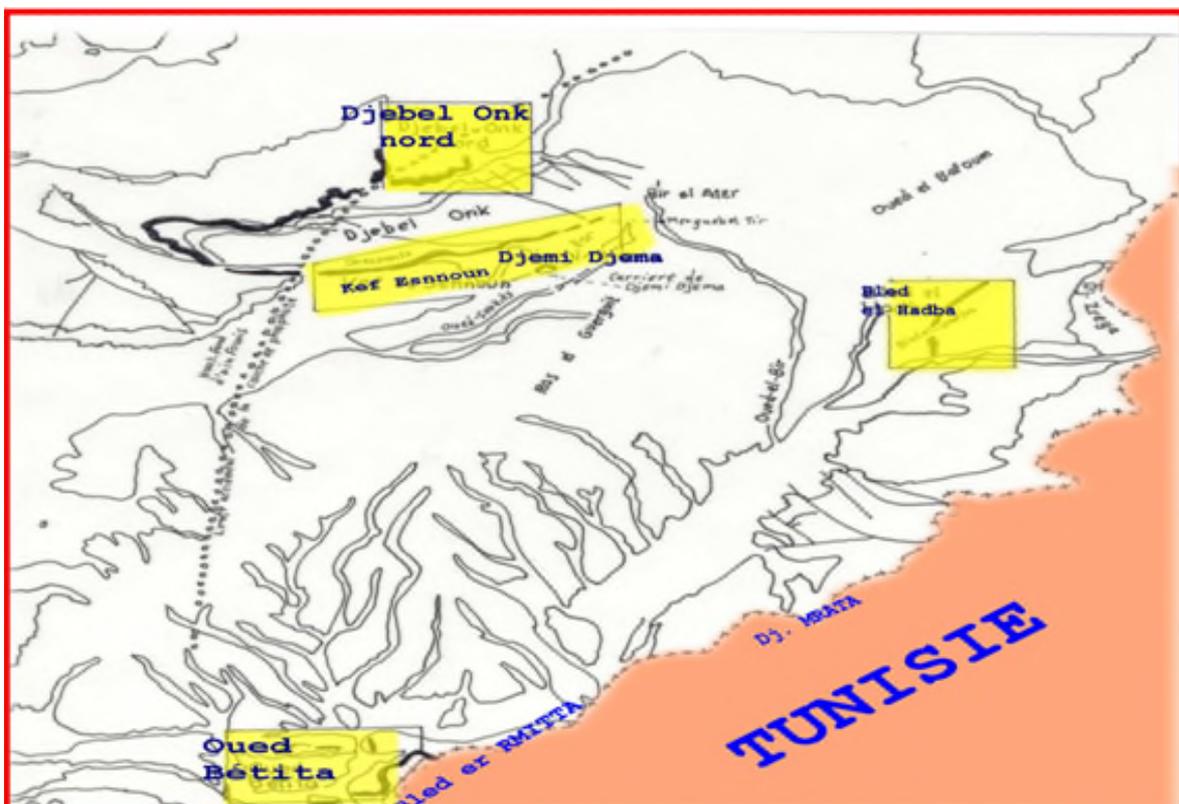


Fig. I.5. Les cinq secteurs miniers de Djebel Onk [8]

I.2. Gisement Kef Es Sennoun [17]

I.2.1. Historique

Le gisement de Kef Es Sennoun a été reconnu en détail par L'EREM au cours de l'année 1986 ; grâce à 32 sondages carottés réalisés à la maille de 250 x 300m.

En outre L'EREM à réaliser dans la zone des dressant 22 tranchées. Des données plus anciennes proviennent des recherches réalisées par G.Ranchin, en 1936 (puits, descenderie, tranchées dans les dressant) ainsi que trois sondages et tranchée des dressant réaliser par la SONAREM (1977-1979).

I.2.2. Situation géographique

Le gisement est situé à 6km au Sud de la Ville de Bir El Ater, et a 2 km à l'Ouest du gisement de Djemi-Djema.

Topographiquement, la zone du gisement, située au pied du Djebel El Onk, constitue un plateau descendant en pente douce vers le Sud-Ouest. Les cotes topographiques varient de 720m au Sud –Ouest à 810m au Nord-Est (dressant Nord).

Le gisement est situé à environ 2 Km à l'ouest du gisement de Djemi-Djema. Il s'étant sur une longueur de 2,7 Km et une largeur de 0,8 Km, ce qui correspond à une superficie de 2.16 Km². Les altitudes sont d'environ 810 m au Nord-Est, pour 720m au Sud-Ouest.

I.2.3. Aperçu géologique

Le gisement de Kef Es Sennoun est situé dans le prolongement de la retombée méridionale de la flexure antiforme du Djebel Onk, dont la structuration majeure est due à la tectonique post-Miocène.

Les dressant de Kef Es Sennoun correspondent à la zone de flexure faillée du flanc inverse de la mégastructure antiforme, ou du flanc Nord de la structure synforme.

Le flanc Sud, normal, de celle-ci est constitué par la table de Kef Es Sennoun, à faible pendage vers le Sud-Ouest (10° à 15°).

Dans le flanc de la flexure-faille, la couche de phosphate peut être en série normale, à pendage vers le Sud-Est, ou bien en série inverse, à pendage vers le Nord-Ouest.

Concernant la zone de Kef Es Sennoun, proviennent des recherches réalisées par G.RANCHIN, en 1963 (puits, descenderie, tranchées), ainsi que plus récemment, de 1977 à 1979, par la SONAREM (sondages, tranchées), au cours de l'année 1986, le gisement de Kef Es Sennoun a été reconnu en détail par l'EREM (sondages, tranchées).

I.2.3.1. Stratigraphie

La séquence rencontrée au gisement de Kef Es Sennoun de bas en haut est la suivante :

- ✓ Calcaires blancs compacts (mæstrichtien) ;
- ✓ Argiles marneuses gris - foncées à vertes intercalées de marnes dures (Danien inférieur) ;
- ✓ Calcaires durs, blancs très fins intercalés de marnes tendres, argileuses et renfermant de minces niveaux phosphatés (Danien supérieur) ;
- ✓ Couche principale de phosphate gisant sur un niveau dolomitique et recouvert par une alternance de dolomies marneuses et dolomies phosphatées (thanétien supérieur), Alternance de calcaires marneuses blancs, marnes et dolomies renfermant des nodules de silex et de minces couches phosphatées surmontant un niveau conglomératique (yprésien inférieur) ;
- ✓ Alternance de calcaires, calcaires dolomités, marnes et marnes phosphatées. Les tous renfermant des nodules de silex (yprésien supérieur) ;
- ✓ Calcaires marneux blancs et marnes blanches crayeuses avec la présence de nodules de silex à la mie hauteur de la couche. Plus haut il y a du gypse (Lutétien inférieur) ;
- ✓ Alternance de marnes blanches, d'argilites vertes parfois phosphatées renfermant de minces bancs de calcaire et de niveaux gypseux (Lutétien supérieur) ;
- ✓ Formation continentale de sable quartzeux à lentilles argileuses (Miocène) ;
- ✓ Alluvions et éboulis de pente (quaternaire).

I.2.4. Les teneurs

La moyenne de teneurs au $P_2 O_5$ sont assez constantes sur toute l'étendue du gisement et oscillent entre 25,05 et 27,94 % avec une teneur moyenne générale pour tous les sondages de 26,53 %.

La moyenne de teneurs en MgO sont faible et constantes sur pratiquement toute l'étendue du gisement, elles sont comprises entre 2 et 3 % avec une moyenne générale de 2,61% avec moyenne générale du rapport CaO/ $P_2 O_5$ du 1,73.

La couche productive est représentée par des phospharénites grises noires, d'épaisseur variant de 22 m au Nord – Est à 43 m au Sud- Ouest.

I.2.5. Réserves géologiques

Le gisement est subdivisé en quatre blocs de calcul de réserves qui sont de l'ordre de 317 millions de tonnes dont :

- ✓ Les réserves prouvées sont de 168 Mt de minerais situés sous des ratios linéaires de 1,32 à 4,5.
- ✓ Les réserves probables sont de 50 Mt situés sous de ratios linéaires plus élevés 4,3 à 6,5.
- ✓ Les réserves possibles sont de 99 Mt situés sous de ratios linéaires supérieurs à 5.

Tableau. I.1. Les réserves géologiques de gisement de Kef Es Sennoun [17]

carrière	Tv (Mt)	Stérile (Mt)	sondages	Teneur de phosphate				Inclinaison De la couche de phosphate%
				Premier gradin		Deuxième gradin		
				P205 %	Mg0 %	P205 %	Mg0 %	
Kef-Es Sennoun sud-est et sud- ouest	3	18,8	20	26,22	3,6	26,25	3,14	17,43 vers sud- ouest
			17	25,83	/	26,03	/	3,62 vers ouest
			32	25,18	3,72	25,1	2,52	7,22 vers sud- est

TPL = Très Phosphate Lime = $T \times 2,183$

Conclusion

Après la présentation géologique de gisement de Kef Es Sennoun on va entamer notre étude qui est présenté dans les chapitres qui suit.

Chapitre II

Interpolation linéaire par partitionnement dans l'espace

L'interpolation linéaire est une méthode ancienne et simple pour estimer la valeur entre deux points déterminés. Elle utilise des méthodes conventionnelles pour faire des estimations de réserve.

L'objectif est de fournir des estimations de la teneur pour tout élément de volume ou de surface à partir d'un échantillonnage limité. Parmi les méthodes qu'elle utilise pour évaluer ces réserves on peut citer :

- ✓ La méthode de section ;
- ✓ Les méthodes déterministes :
 - Méthodes d'interpolation par partitionnement dans l'espace (méthodes de polygones, méthodes de triangles).
 - Méthodes d'interpolation barycentrique (méthode de l'inverse de distance).

Pour estimer la valeur ponctuelle en un site, nous utilisons des combinaisons linéaires pondérées. La distance entre les lieux d'observations a une influence sur ce que l'on observe. Autrement dit, les valeurs dans deux localités voisines sont souvent plus semblables que dans deux localités éloignées. Les poids doivent donc tenir compte non seulement de la disposition des observations les unes par rapport aux autres, mais aussi de la distance entre le site à estimer et les sites observés [2].

II.1. Méthode de section [1]

Cette méthode consiste à tracer une suite de sections à travers un gisement, à déterminer les zones du minerai dans chaque section et, à compiler le volume total en utilisant les distances entre chaque section. Elle est particulièrement indiquée dans le cas des gisements en forme de veine ou de lentille. Les forages soient positionnés parallèlement entre eux et orthogonaux par rapport aux corps minéralisés.

La méthode de section exige de diviser le gisement en solide et s'effectue en trois étapes :

1. Détermination des zones minéralisées sur chaque forage pour une teneur donné ;
2. Définition de la surface minéralisée sur chaque section à partir des intersections minéralisées des forages ;
3. Jonction des surfaces minéralisées entre les sections pour construire le volume.

Les estimations approximatives des ressources minérales par la méthode des sections se fait manuellement comme suit :

- ✓ Calcul de la teneur moyenne sur chaque section en délimitant la zone minéralisée sur chaque forage, puis on relie les zones minéralisées entre elles ;
- ✓ On étend la teneur moyenne sur la section au volume entourant la section, et ceci se fait de deux façons :
 1. **Changement brusque** : le volume est égal à la surface (S) de la section multiplié par la distance (L) entre les sections.
 2. **Changement graduelle** : on utilise deux sections consécutives pour définir le volume et la teneur devant être affectée à ce volume. Pour le calcul de volume (V), on peut supposer que :
 - La surface varie linéairement d'une section à l'autre ;
 - La surface sur chaque section est un cercle dont le rayon varie linéairement d'une section à l'autre ;
 - La surface sur chaque section est un rectangle dont les cotés (a et b) varient linéairement d'une section à l'autre.

Tableau II.1.Présente les formules pour les 7 cas afin d'obtenir le volume et la teneur [1].

Méthode pour les Volumes	Teneur variée	Formule pour le volume	Formules pour teneur moyenne du volume entre deux sections S1 et S2
Surface brusque	B	$V = \frac{(S1+S2) L}{2}$	$T = \frac{(S1t1+S2t2)}{S1+S2}$
Surface linéaire	B	$V = \frac{(S1+S2) L}{2}$	$T = \frac{(3S1+S2)t1+(S1+3S2)t2}{4(S1+S2)}$
	L	$V = \frac{(S1+S2) L}{2}$	$T = \frac{(2S1+S2)t1+(S1+2S2)t2}{3(S1+S2)}$
Cône tronqué	B	$V = \frac{(S1+S2+\sqrt{S1S2})L}{3}$	$T = \frac{(7S1+S2+4\sqrt{S1S2})t1+(S1+7S2+4\sqrt{S1S2})t2}{8(S1+S2+\sqrt{S1S2})}$
	L	$V = \frac{(S1+S2+\sqrt{S1S2})L}{3}$	$T = \frac{(3S1+S2+2\sqrt{S1S2})t1+(S1+3S2+2\sqrt{S1S2})t2}{4(S1+S2+\sqrt{S1S2})}$
Obélisque	B	$V = \frac{(S1+S2+a1b2+a2b1)L}{6}$	$T = \frac{a1b1(7t1+t2)+(2t1+2t2)(a1b2+a2b1)a2b2(t1+7t2)}{8a1b1+8a2b2+4a1b2+4a2b1}$
	L	$V = \frac{(S1+S2+a1b2+a2b1)L}{6}$	$T = \frac{a1b1(3t1+t2)+(t1+t2)(a1b2+a2b1)a2b2(t1+3t2)}{4a1b1+4a2b2+2a1b2+2a2b1}$

II.2. Méthodes déterministes

II.2.1. Méthodes d'interpolation par partitionnement dans l'espace [3]

Les méthodes d'interpolation par partitionnement dans l'espace se distinguent par l'utilisation d'un partitionnement du champ d'étude afin de déterminer les poids des observations et le voisinage du point de prévision. Cette section présente d'abord des techniques de partitionnement de l'espace, puis des méthodes d'interpolation se basant sur ces techniques.

Ils existent deux principaux types du partitionnement du champ « G » en région disjointes à partir des sites d'observation :

- ✓ Par polygones ;
- ✓ Par triangles.

II.2.1.1. Méthode des polygones

Le partitionnement par polygone porte plusieurs nom, les principaux sont : « polygones de thiessen », « diagramme de voronoi » et « mosaïque ou thesselation de Dirichlet ». Ce partitionnement est formé en définissant pour chaque site d'observation S_i , un polygone d'influence de sorte que chaque point du polygone soit plus proche de S_i que de toute autre site d'observation[3].

Supposons que l'on désire estimer la valeur en un point « S_0 » du champ (Fig. II.1).

Le point appartient nécessairement à l'un des polygones d'influence des points d'observation.

Un polygone d'influence pour l'observation « C » s'obtient en traçant les médiatrices des segments joignant « C » aux sites voisins [2].

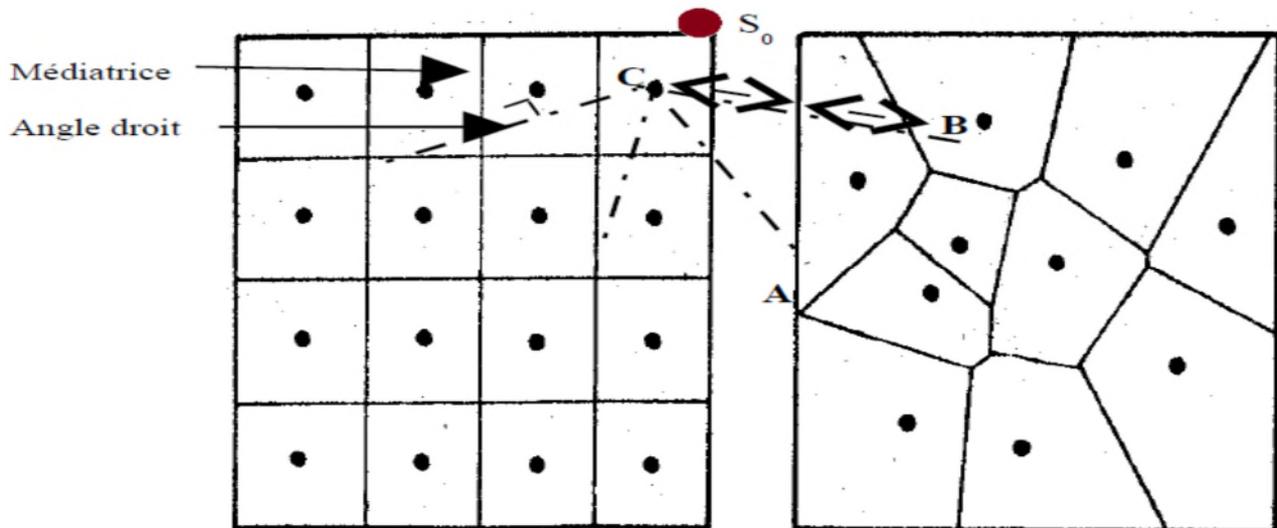


Fig. II.1. Technique de partitionnement de l'espace. [2]

On attribue au point « S_0 » et à tout point appartenant au même polygone la valeur du site ayant ce polygone d'influence.

Remarque :

Sur la figure (II.1), la valeur estimée au point « S_0 » sera identique à celle du site « C ».

II.2.1.2. Méthode de triangulation [1]

Le partitionnement par triangles appelée triangulation, découpe le champ en triangles disjoints dont les sommets sont des sites d'observation. Différents critères permettent de sélectionner les sommets appartenant à un même triangle.

Il existe plusieurs façons de construire les triangles. En général, il est préférable de tracer des triangles parallèles à la continuité de la minéralisation. La triangulation de Delaunay est unique et fournit les triangles les plus équilatéraux possibles.

La triangulation de Delaunay est obtenue lorsque le cercle passant par les sommets d'un triangle n'inclut aucun point échantillon à l'intérieur, et ce pour chaque triangle.

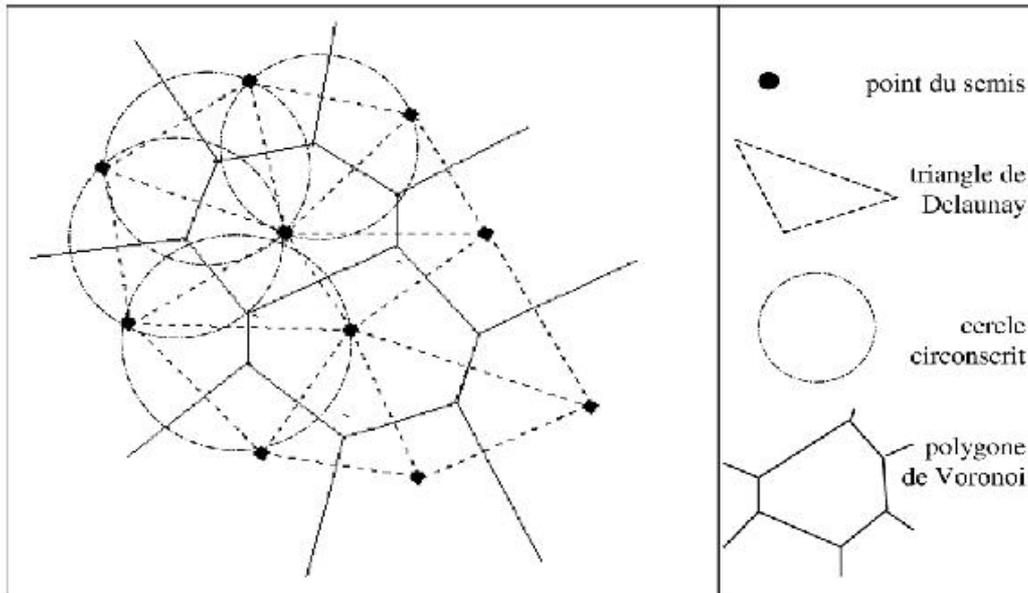


Fig.II.2.Triangulation de Delaunay [1].

1) Calcul du volume des prismes triangulaires

$$v = \frac{\sum E_{pi}}{3} * S \quad (\text{II.1})$$

2) Calcul de la teneur moyenne

Il existe deux méthodes selon les hypothèses que l'on est prêt à adopter :

a) Moyenne pondérée

$$t_m = \frac{\sum (t_i * E_{pi})}{\sum E_{pi}} \quad (\text{II.2})$$

b) Méthodes de %

$$t_m = \frac{\sum t_i + \left[\frac{\sum (t_i * E_{pi})}{\sum E_{pi}} \right]}{4} \quad (\text{II.3})$$

II.2.2. Les méthodes barycentriques

Les méthodes d'interpolation précédentes ne considèrent pour estimer la valeur d'un site S_0 , que les sites d'observation immédiatement voisins. Elles ignorent par conséquent une grande partie de l'information disponible. Les méthodes barycentriques permettent de prendre en compte un nombre plus importants de données [2].

II.2.2.1. La méthode de l'inverse de distance [2]

Cette méthode sert à estimer les valeurs aux points inconnus, en utilisant les distances et les valeurs approximatives des points.

On attribue à chaque site S_i retenu un poids inversement proportionnel à la distance entre ce site et le point à estimer S_0 . Considérons que l'on a retenu N_0 données dans le cercle alors on obtient comme estimateur :

$$t_{moy} = \frac{\sum \left(\frac{t_i}{d_i^b} \right)}{\sum \left(\frac{1}{d_i^b} \right)} \quad (\text{II.4})$$

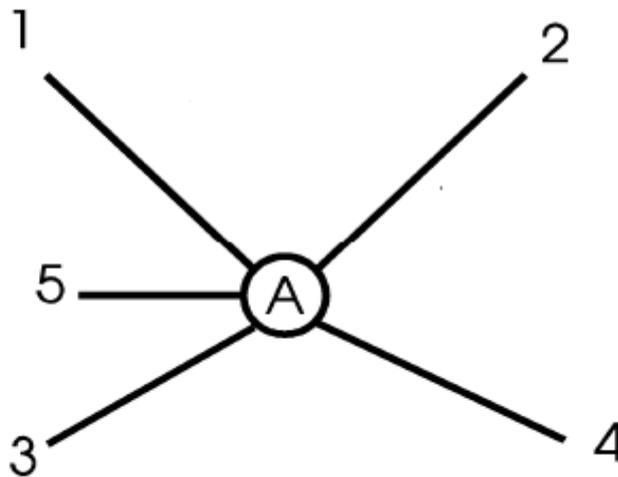


Fig. II.3.Exemple de l'inverse de distance [2]

Remarque :

Le point A est le point où nous allons calculer la teneur moyenne.

✓ Inconvénient des méthodes déterministe

Ces méthodes ont l'inconvénient de prendre en compte uniquement la distance qui sépare les sites entre eux. Cela donne une valeur importante aux données, alors qu'elle n'est pas nécessairement justifiée [1].

Conclusion

Les méthodes présentées auparavant ont la caractéristique de traiter uniquement les données de la variable étudiée, et présentent néanmoins des défauts. Elles ignorent la structure spatiale de la variable, et produisent du coup des surfaces interpolées.

Des situations locales très spécifiques pouvant être omises.

Nous prenons le risque d'aboutir à des cartes peu réalistes, et dans ce cas aucun critère statistique ne peut juger la validité et la précision de ces cartes.

Si l'on veut optimiser la précision des estimations, il faudra donc utiliser d'autres outils qui feront appel à des modèles probabilistes, tels que la géostatistique et le Krigeage.

Chapitre III

Téorie de la variable régionalisé

Le problème fondamental qui se pose au mineur, lorsqu'il a reconnu un gisement à partir d'un certain nombre de sondage et de travaux miniers et qu'il a procédé à partir de ces données à l'évaluation de tonnage de minerai et de métal, et de la teneur moyenne de son gisement, c'est de savoir avec quelle précision l'estimation qu'il fait représente la réalité.

Avant la naissance de la géostatistique minière, cette discipline utilisait seulement les outils les plus rudimentaires des statistiques. Le composant statistique de la décision pour établir une mine a été typiquement basé sur le prélèvement du dépôt (parfois biaisé à cause de l'échantillonnage plus dense d'affleurement). Plus souvent, la moyenne de la teneur des échantillons multiplié par le volume estimé de masse minérale était utilisée comme la méthode d'évaluation. Cela n'est pas une très bonne évaluation de la ressource récupérable. De plus, l'écart type des échantillons ne donne pas une bonne image (c.-à-d., de la variabilité locale spatiale de petite taille) dans tout le corps minéralisé. Et c'est cette variabilité locale qui fait marcher ou mettre en péril une entreprise minière.

Contrairement à ce que l'on croit en général, un tel problème ne relève pas de la statistique pure. Étant donné le caractère de pseudo continuité d'une variable régionalisée, nous devons nous attendre à ce que la précision de l'estimation du mineur dépende, non seulement du nombre d'échantillons prélevés, mais avant tout de leurs formes et de leurs dimensions ainsi que de leurs positions respectives, c'est-à-dire de la géométrie des travaux miniers effectués.

On ne peut songer à formuler un tel problème qu'à la condition de disposer d'un outil conceptuel et mathématique capable de caractériser de façon simple la propriété spécifique d'une distribution régionalisée [1].

III.1. Histoire de la géostatistique [5]

La géostatistique est plus vaste que la technique d'estimation du krigeage. Mais l'histoire de la géostatistique est liée à l'estimation des gisements exploités en Afrique du Sud. Donc, l'utilisation du mot krigeage (technique de l'estimation de la géostatistique) dans le domaine de statistique spatiale est devenue synonyme de la prévision optimale dans l'espace, en utilisant des observations prises au voisinage des endroits connus.

Dans les années 40, les gisements d'or de l'Afrique du Sud employaient avec précision la moyenne de la teneur des échantillons voisins pour estimer la teneur moyenne dans un bloc

d'exploitation. Au début des années 50, D.G. Krige a apporté une grande contribution au sujet en notant trois défauts fondamentaux de cette technique :

1. La distribution des données d'analyse d'or est log-normale, ce qui nécessite une transformation à une distribution normale pour calculer la moyenne et une back-transformation pour en déduire la teneur du bloc.
2. En second lieu, la variabilité de la teneur de bloc est considérablement moins variable que la teneur des carottes échantillonnées. Cela veut dire qu'il y a un effet dû au changement de taille (support).
3. Troisièmement, la teneur de bloc et la teneur des carottes échantillonnées sont corrélées, ce qui devrait être exploité pour avoir une meilleure prévision. Krige propose la façon dont la régression peut améliorer la prévision, dans un contexte d'extraction minier.

À ce moment-là, les ingénieurs des mines étaient plus concentrés à la correction de la moyenne de la teneur estimée. En ignorant la cause de cette différence dans la variation entre les blocs et les échantillons, ces corrections étaient dans le faux sens.

Dans les années 50, des ingénieurs des mines sud-africains faisaient des calculs pour évaluer les ressources d'un gisement à partir d'un petit nombre de sondages répartis dans le domaine d'étude. Dans ce contexte, la quantité d'intérêt (la réserve totale disponible) était inconnue et traitée comme une variable aléatoire. Mais il était impossible d'assimiler les teneurs mesurées aux différents sites sondés à des réalisations de variables aléatoires indépendantes. De toute évidence, cette solution d'utilisation de la moyenne mobile à quelque chose de sous-optimal, Il semble souhaitable d'utiliser une méthode qui donne plus de poids aux sites proches qu'aux autres points de mesure.

Cette théorie a ensuite été développée pendant les années 60 par Georges MATHERON. De 1954 à 1963, lors de son passage au Bureau de Recherches Géologiques et Minières en Algérie et en France, il découvrira les travaux pionniers de l'école sud-africaine (Krige, Sichel, de Wijs) consacrés aux mines d'or du Witwatersrand et élaborera à cette occasion les concepts majeurs de la géostatistique, théorie pour l'estimation des ressources naturelles.

III.2. Langage de la géostatistique [5]

La géostatistique s'intéresse à des grandeurs telles que les teneurs, puissances, accumulations, surfaces et volumes minéralisés, etc., qui sont considérées comme des variables régionalisées caractérisées par un support (échantillon, coupe) dans un champ (gisement). Les variables régionalisées sont le reflet des effets superposés de multiples phénomènes physico-chimiques et de ce fait ont des variations parfois très brutales qui leur donnent un caractère apparemment aléatoire, alors qu'elles ne sont pourtant pas indépendantes : deux points proches ont des valeurs "corrélées». La corrélation diminue lorsque la distance augmente et s'annule au-delà d'une certaine portée.

Les variables régionalisées peuvent être représentées par des "fonctions aléatoires".

L'hypothèse de départ est que la distribution de la grandeur étudiée dans le gisement est une réalisation particulière $Z(X)$, résultant d'un tirage au sort, d'une fonction aléatoire $Z(X)$. La valeur de la variable en un point X_0 est la fonction aléatoire $Z(X_0)$ dont la réalisation particulière est $Z(X_0)$.

Une deuxième hypothèse permet de raisonner à partir de la réalisation particulière observée on admet que le phénomène observé est homogène dans l'espace étudié, on peut alors considérer que la dispersion du phénomène obéit dans tout le champ à une même loi de dispersion intrinsèque ou absolue, ou encore que la fonction aléatoire $Z(x)$ est stationnaire.

III.3. Domaines d'application de la géostatistique [9]

La géostatistique est utilisée dans plusieurs domaines parmi lesquels :

✓ **L'environnement**

- Etude des Sites et Sols pollués (pollution métallique ou organique) ;
- Etude des hétérogénéités des sites ;
- Etude de la caractérisation de sols pollués dans le cadre de sites présentant un échantillonnage suffisamment dense.

✓ **Estimation des champs de perméabilité**

- Estimation de la charge et de la transmissivité avec prise en compte des conditions aux limites dans la modélisation. Simulations géostatistiques de la perméabilité et autres ;
- L'interpolation de la charge est effectuée par la méthode dite de krigeage.

✓ La Géotechnique

- Etude de la quantification par simulation des incertitudes sur le comportement de gros ouvrages et Simulation géostatistique de paramètres géotechniques.

✓ L'agronomie

- Estimation et cartographie de la pluviométrie, application à la classification de sols, composition granulométrique, chimique,... des sols.

✓ La modélisation démographique

- Géostatistique sur les données de recensement.

✓ Le pétrole

- Modélisation géométrique: elle consiste à interpoler les surfaces servant de limites ou de surface de référence pour les unités en tenant compte de toutes les informations disponibles: cotes des toits mesurées aux puits, données de pendage et d'orientation et contraintes d'inégalités, facteurs de forme donnés par les couvertures sismiques. L'interpolation de ces surfaces géologiques doit pouvoir utiliser les données provenant de sondages déviés (ou horizontaux) et prendre en compte la structure géologique.
- Caractérisation de réservoir : Elaborer des méthodes de simulations conditionnelles des variables pétro physiques (porosité, perméabilité) en accord avec la géologie.

✓ La santé

- En épidémiologie et hygiène industrielle.

III.4. Notions de géostatistique [2]

MATHERON (1971) définit la géostatistique de la façon suivante : "la géostatistique est l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des phénomènes naturels".

Une fonction aléatoire $Z(x)$ est un ensemble de variable aléatoire $Z(x_i)$, définie en chaque point x_i du gisement G :

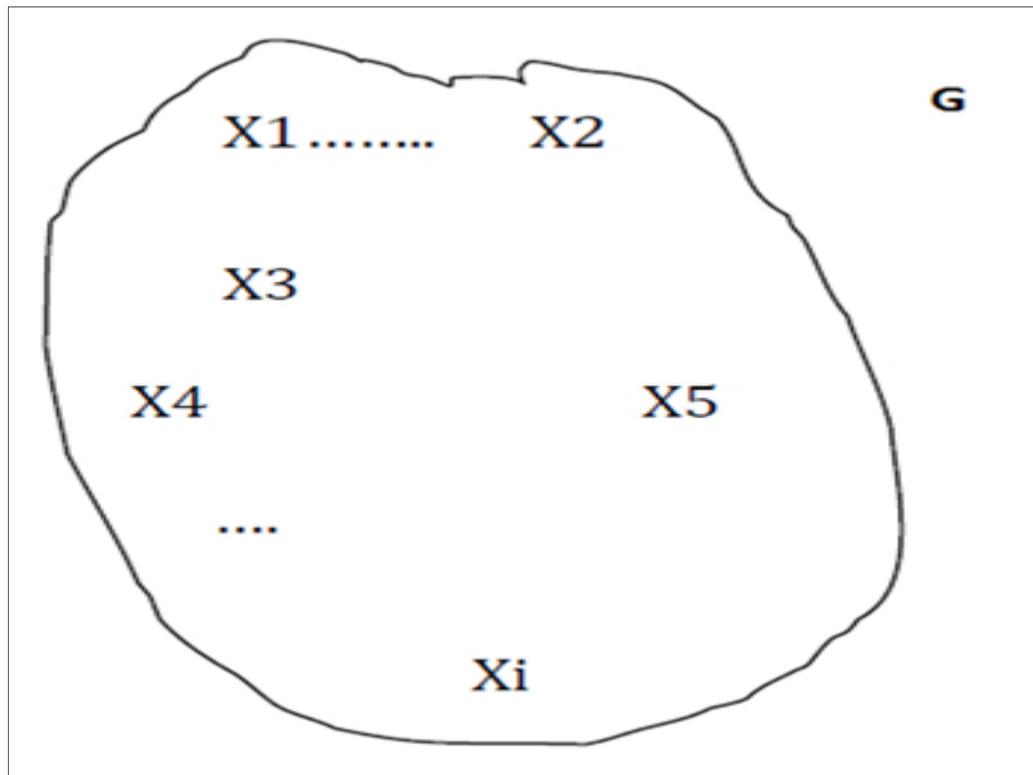


Fig .III.1. Représentation des points X_i d'un ensemble des variables aléatoires $Z(X_i)$

Un phénomène minéralisé peut être caractérisé par la répartition dans l'espace d'un certain nombre de grandeurs mesurables, que nous appelons " variables régionalisées".

Ces variables ont une structure d'auto-corrélation qui dépend du module et de la direction du vecteur séparant deux points de mesure. Mathématiquement, une variable régionalisée est une fonction du point x . Cette fonction est généralement irrégulière et présente deux aspects complémentaires.

- Un aspect aléatoire qui explique les irrégularités locales ;
- Un aspect structuré qui reflète les tendances du phénomène à grande échelle.

Le choix constitutif de la géostatistique minière consiste à interpréter chaque valeur de la variable régionalisée $Z(x)$, comme une réalisation particulière d'une variable aléatoire $Z(x_i)$ implanté au point x_i , plusieurs réalisations sont donc possibles. C'est la géostatistique intrinsèque.

III.5. Le semi-variogramme [6]

Le semi-variogramme est un outil servant à décrire la continuité spatiale d'un phénomène. Il repose sur l'idée que deux observations séparées par une faible distance, se ressemblent davantage en moyenne que deux observations séparées par une plus grande distance.

Il existe deux types de semi-variogrammes :

- Le semi-variogramme théorique ;
- Le semi-variogramme expérimental.

Soit deux variables aléatoires, $Z(x)$ et $Z(x+h)$ mesurées en 2 points "x" et "x+h", la variabilité entre ces deux points se caractérise par une fonction notée $2\gamma(x, h)$ appelée variogramme.

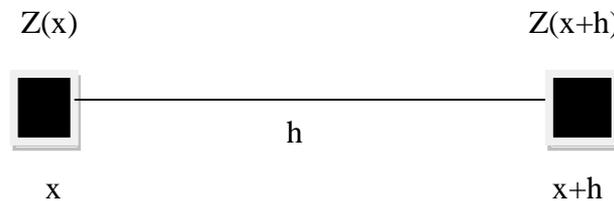


Fig. III.2. Représentation schématique des points de mesure de la variable.

III.5.1. Le semi-variogramme théorique [1]

Soit Z la variable considérée distribuée dans un domaine 1D (dimension), 2D ou 3D. La formulation théorique du semi-variogramme $\gamma_{th}(h)$ fait appel à la notion de variance (Var) appliquée à la différence entre deux observations $Z(x)$ et $Z(x+h)$ séparées par une distance h .

Ce qui donne le semi-variogramme théorique, pour tout x dans G :

$$\gamma_{th}(h) = \frac{1}{2} \text{var} \left[(Z(X) - Z(X+h)) \right] \quad (\text{III.5})$$

On peut schématiser l'ensemble des modèles théoriques de semi-variogramme par le graphique de la (fig. III.3). Ce graphique met en avant trois paramètres fondamentaux : l'effet de pépite, le seuil, et la portée. Ces trois paramètres sont brièvement décrits ci dessous.

a. Effet de pépite :

L'effet de pépite C_0 est défini par la valeur de semi-variogramme au voisinage de l'origine. C'est la limite de cette fonction quand h tend vers 0.

Il représente une discontinuité à l'origine qui est expliquée par d'éventuelles erreurs de mesure ou par la présence d'une microstructure d'une portée plus faible que la maille d'échantillonnage utilisée.

b. La portée :

Dans l'étude de la variabilité spatiale, il est important d'examiner le comportement du semi-variogramme à grande distance. La fonction semi-variogramme peut atteindre une limite à partir d'une certaine distance appelée portée (a). A partir de cette distance il n'y a plus de corrélation spatiale entre les données.

Cette limite est nommée palier et désigne la variance totale $C(0)$. Dans la pratique, la portée est définie par la distance à laquelle le semi-variogramme atteint 95% de la valeur de son palier.

c. Le seuil ou palier :

On appelle seuil du semi-variogramme sa valeur limite pour de grandes valeurs de h . Ce paramètre suscite un intérêt très important dans l'analyse de la régularité des variations locales. En effet, si le seuil d'un semi-variogramme est infini, alors le processus des variations locales n'est pas stationnaire.

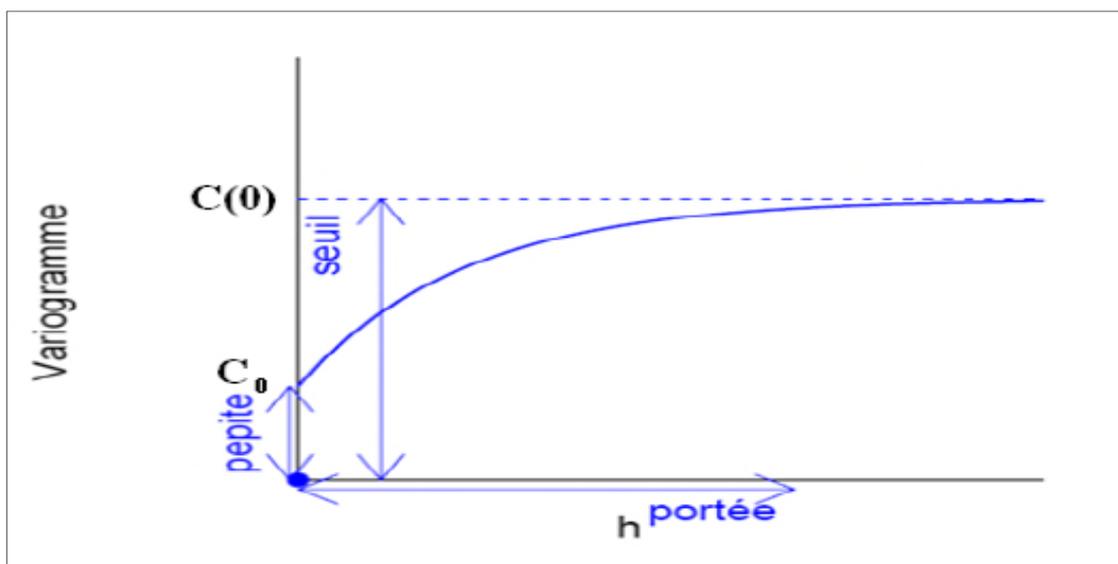


Fig. III.3. Schéma type d'un variogramme. [7]

III.5.2. Le semi-variogramme expérimental (γ_e)[1]

Dans la pratique, il n'est pas possible de calculer le variogramme théorique tel qu'il est décrit, car on ne dispose que des échantillons. Pour l'approcher, une expression du semi-variogramme expérimental est plus pratique.

Le semi-variogramme permet de mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée $z(x)$, en calculant la différence entre deux échantillons z_1 et z_2 situés en deux points x_1 et x_2 d'un domaine spatial. Cette différence notée γ_e s'écrit :

$$\gamma_e = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{2} \quad (\text{III.6})$$

Pour voir si l'azimut décrit par les deux points considérés a un effet quelconque, on fait dépendre γ_e de la distance et de l'orientation de la paire de points.

$$\gamma_e = \frac{1}{2} (Z(X) - Z(X+h))^2 \quad (\text{III.7})$$

En formant la moyenne des dissemblances γ_e entre les valeurs pour toutes les $N(h)$ paires de points reliées par un vecteur h donné pour une maille donnée, on obtient la notion de semi-variogramme expérimental.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_i^{N(h)} [(Z(X) - Z(X+h))^2] \quad (\text{III.8})$$

Où : $N(h)$ représente le nombre de paires d'observations séparées par la distance h .

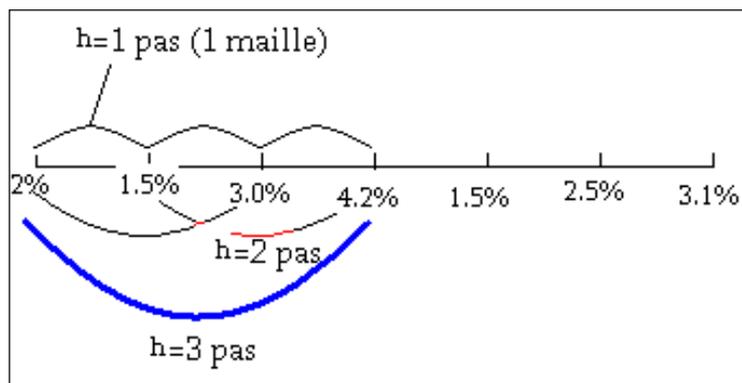


Fig.III.4. Schéma de calcul du variogramme expérimental. [10]

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques à l'aide d'une expression particulière du variogramme :

$$\gamma(h, \theta) = \frac{1}{2N(h, \theta)} \sum_i^{N(h, \theta)} [(Z(X) - Z(X + h))^2] \quad (III.9)$$

Où $N(h, \theta)$: est le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ .

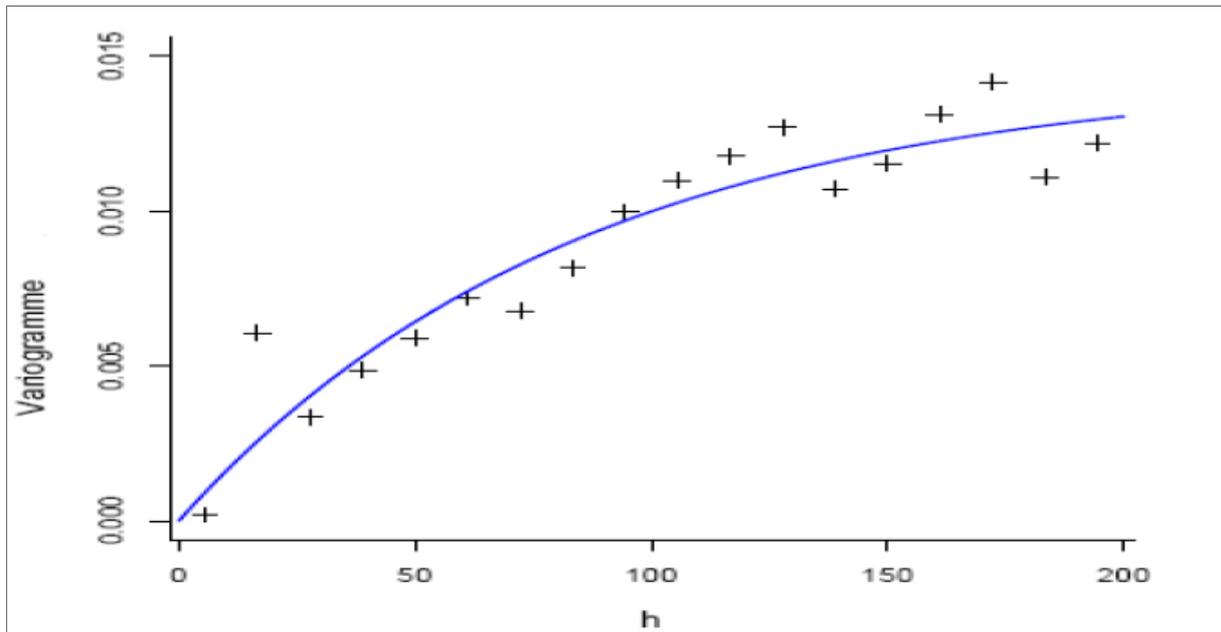


Fig.III.5. Ajustement d'un modèle théorique (courbe) de semi-variogramme à un semi-variogramme expérimental (croix).[7]

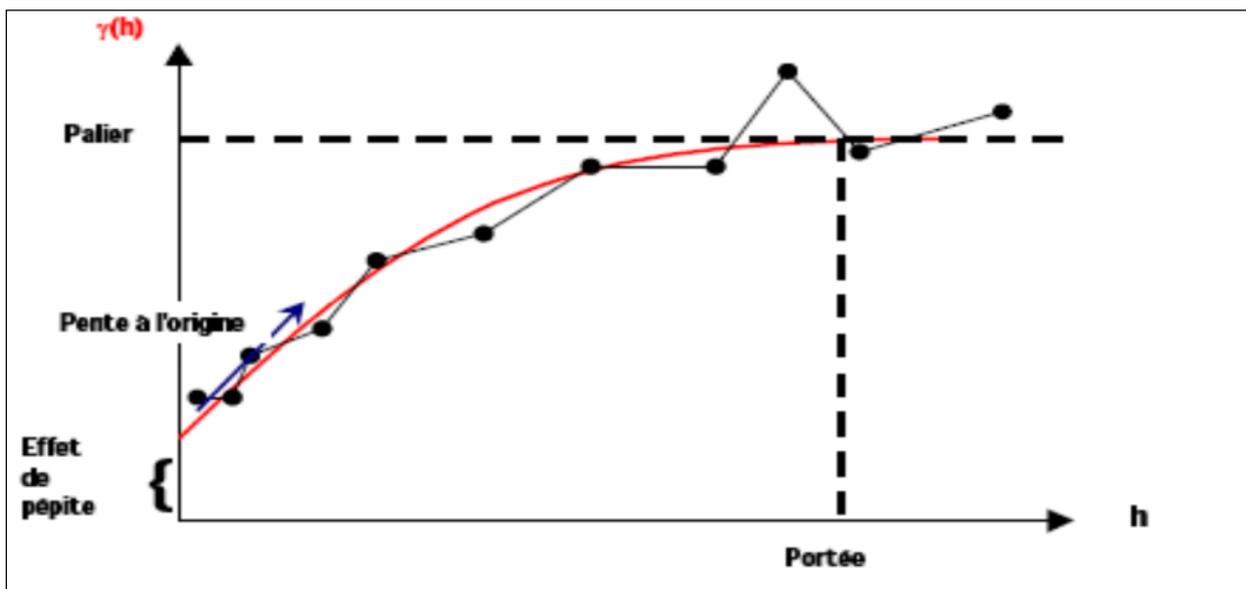


Fig. III.6. Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement. [4]

Remarque :

- En pratique, la portée "h" donne alors un sens à la notion de zone d'influence d'un échantillon ou d'un sondage. Cette portée n'est pas forcément la même dans toutes les directions de l'espace. Elle permet donc de détecter une éventuelle « anisotropie » ou « isotropie » dans la structure de la minéralisation. [4]
- Afin qu'un point du semi-variogramme expérimental soit jugé représentatif, il est nécessaire que $N(h) \geq 30$. À ces valeurs ponctuelles on ajuste un modèle théorique de semi-variogramme admissible.[9]

III.5.3. Modèles théoriques de variogrammes [9]

Une fois que le semi-variogramme expérimental a été construit, on passe à l'adaptation du modèle théorique de semi-variogramme aux points obtenus en optimisant le modèle par contre vérification. Le semi-variogramme théorique est recherché par modélisations en utilisant une fonction connue de la nuée variographique. L'objectif est de trouver la courbe théorique qui s'adapte le mieux à la courbe expérimentale.

Les principaux modèles admissibles sont l'effet de pépité, le modèle linéaire, le modèle sphérique, le modèle puissance, le modèle gaussien et le modèle exponentiel. Une combinaison de deux de ces modèles ou plus est également faisable.

a. L'effet de pépité

La situation de plus forte irrégularité des variations locales correspond à une absence de dépendances entre des mesures effectuées en des sites différents, ce qui se traduit par l'effet de pépité :

Pour tout $h \neq 0$;

$$C(h) = 0,$$

$$\gamma(h) = C(0).$$

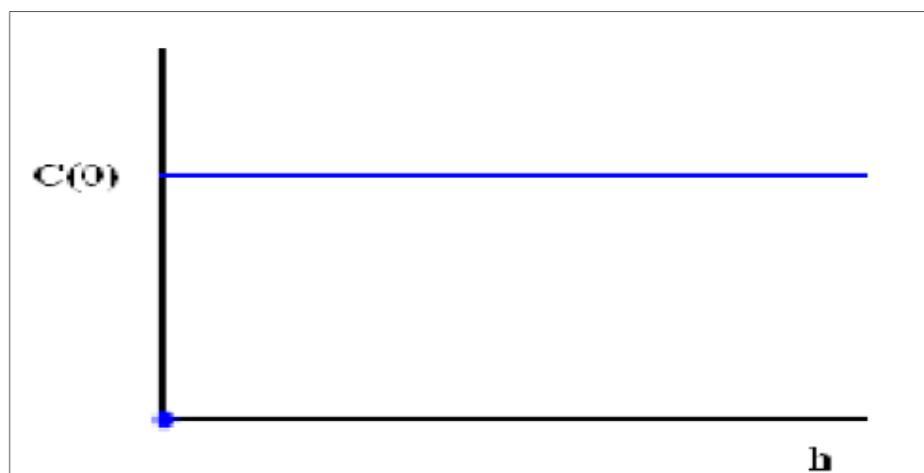


Fig.III.7. Schéma type d'un semi-variogramme (effet de pépité). [7]

Inversement, la situation théorique de plus grande régularité correspond à des dépendances locales maximales :

Pour tout $h \neq 0$;

$$C(h) = C(0),$$

$$\gamma(h) = 0$$

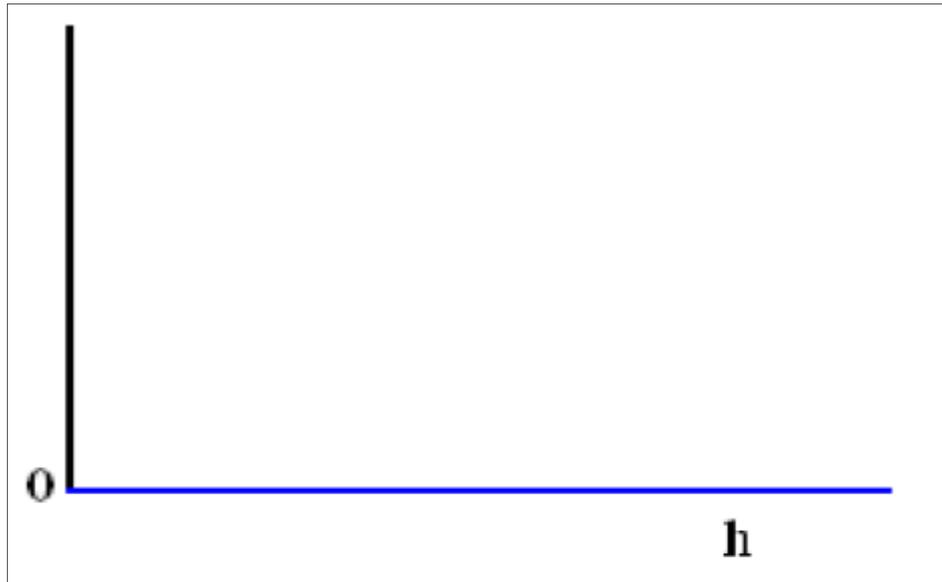


Fig.III.8.Schéma type d'un semi-variogramme (effet de pépité). [7]

Entre ces deux situations extrêmes, la régularité du processus des variations locales se mesure à la régularité fonctionnelle du semi-variogramme de ce processus au voisinage de 0.

Lorsque le semi-variogramme atteint une limite, on s'intéresse à la valeur de h pour laquelle cette limite est atteinte. En effet, cette valeur, qu'on appelle la portée des variations locales, caractérise l'écart entre les sites de mesures au-delà desquels les dépendances entre les mesures du processus sont nulles.

Les trois modèles suivants constituent trois exemples très classiques de semi-variogrammes pour des processus stationnaires se différenciant par leur régularité au voisinage de 0.

b. Le modèle exponentiel :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad (\text{III.10})$$

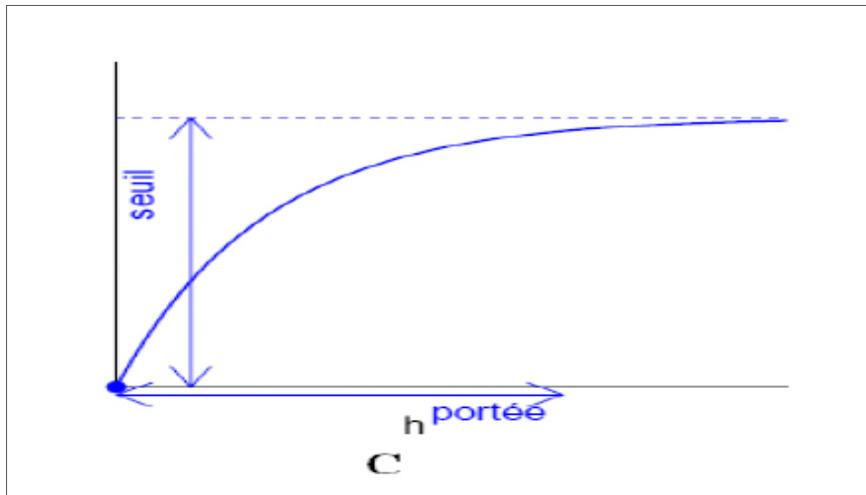


Fig. III.9. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme exponentiel. [7]

c. Le modèle gaussien :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right] \quad (\text{III.11})$$

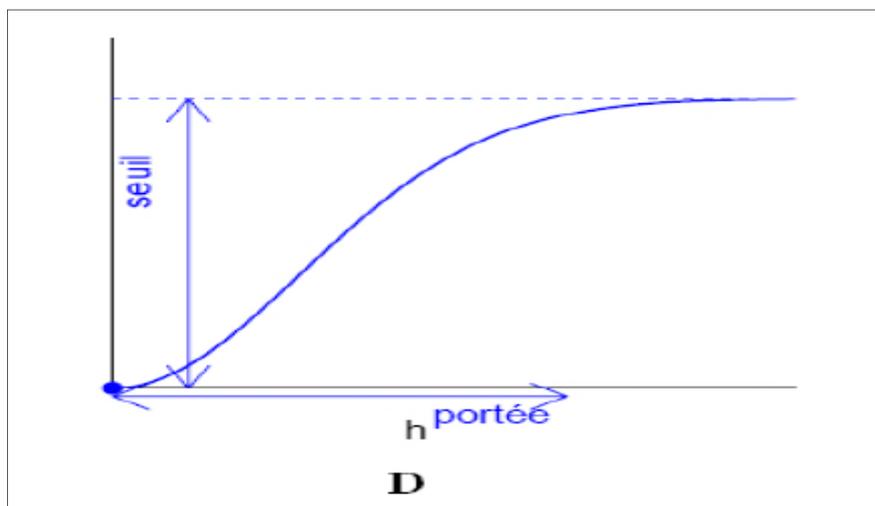


Fig. III.10. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme gaussien. [7]

d. Le modèle sphérique :

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & \dots\dots\dots 0 \leq h \leq a \\ C + C_0 & \dots\dots\dots h > a \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

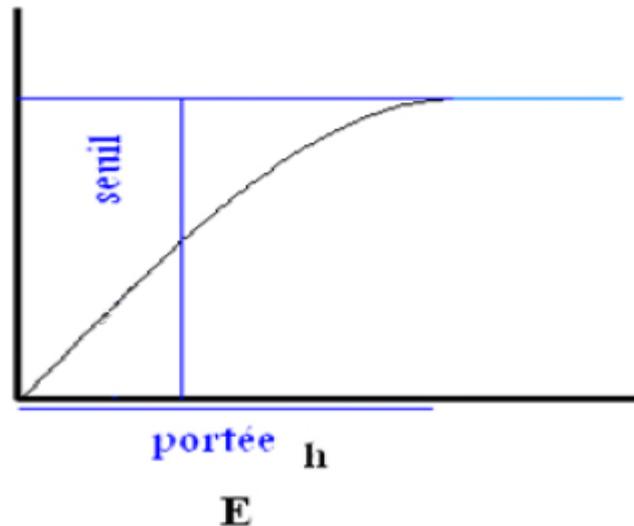


Fig. III.11.Schéma type d'un modèle de semi-variogramme sphérique. [7]

III.6. Le krigeage[2]

Cette section expose l'une des techniques de géostatistique d'estimation locale, connue sous le nom de krigeage et cokrigeage ordinaire.

Nous cherchons à estimer la valeur d'une variable régionalisée $Z(X)$ en un point x_i quelconque du champ à partir des mesures observées $Z(X_i)$, $i=1, \dots, n$ (n : nombre de points observés).

Le krigeage est un interpolateur exact (la valeur estimée sur un point de mesure est égale à la valeur du point de mesure) et optimal (il minimise la variance sur l'erreur d'estimation).

Il existe trois types de krigeage : le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel. Le krigeage ordinaire est le plus fréquemment utilisé en pratique car les hypothèses de départ sont moins contraignantes que celle du krigeage simple. Seul le krigeage ordinaire sera développé ici car il répond aux besoins de notre problématique.

Supposons que l'on veut estimer un gisement G concentré en un point X_0 , et notons $Z(X)$ la vraie valeur (inconnue) de gisement, et $Z^*(X)$ l'estimateur que l'on veut estimer.

$$Z^*(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (\text{III.13})$$

Les poids λ_i sont les inconnues du problème.

On définit alors l'erreur d'estimation comme étant la différence entre la valeur réelle et la valeur estimée :

$$e = Z(x) - Z^*(x) \quad (\text{III.14})$$

Le meilleur estimateur est celui qui fournit le minimum d'erreur « e » possible au point estimé. Pour l'ensemble des estimations réalisées, la variance de cette erreur doit être la plus petite possible.

La variance de cette erreur est la variance d'estimation σ_e^2 :

$$\text{Var}(e) = \text{Var}(Z(x)) + \text{Var}(Z^*(x)) - 2\text{Cov}(Z(x), Z^*(x)) \quad (\text{III.15})$$

Substituant $Z^*(x)$ par son expression, en fonction des $Z(x_i)$, donnée en (équation (III.13)), on obtient :

$$\sigma_e^2 = \text{var}(Z(X)) + \sum_i \sum_j \lambda_j \text{cov}(Z(x_i), Z(x_j)) - 2 \sum_i \lambda_i \text{cov}(Z(x_i), Z(X)) \quad (\text{III.16})$$

Rappelons que, ce qui nous intéresse ici est de calculer les poids λ_i qui sont les inconnues. Pour minimiser la variance d'estimation on doit calculer les dérivées partielles :

$$\frac{d\sigma_e^2}{d\lambda_i} = 0, \quad i = 1 \dots n \quad (\text{III.17})$$

Cela représente un système d'équation à n inconnues (les n poids) qui donnera la variance la plus petite possible, mais dont la somme des poids ne sera pas nécessairement égale à 1 puisqu'il n'y a aucune contrainte dans ce sens.

Pour que l'estimateur soit sans biais (équilibré), il faut que :

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (\text{II.18})$$

En effet, dans ce cas, on a :

$$E[Z^*] = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot E[Z_i] = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot m = m \quad (\text{II.19})$$

Pour obtenir le meilleur estimateur linéaire sans biais, nous devons donc résoudre le système à « n+1 » équations mais seulement n inconnues :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma_e^2}{d\lambda_i} = 0, \quad i=1\dots n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{array} \right. \quad (\text{III.20})$$

Puisqu'on a un système quadratique sous contrainte d'égalité que l'on solutionne par la méthode de Lagrange, où on fait équilibrer le système, nous devons introduire une nouvelle inconnue sous la forme de multiplicateur de Lagrange μ , et on forme Lagrangien $L(\lambda)$ qui doit être minimisé pour trouver les n inconnues :

$$L(\lambda) = \sigma_e^2 + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) = \text{var}[Z_X] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{cov}[Z_i, Z_j] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{cov}[Z_X, Z_i] + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \quad (\text{III.21})$$

Le minimum est atteint lorsque toutes les dérivées partielles par rapport à chacun des λ_i et par rapport à μ s'annulent.

Remarque :

La variable d'estimation peut s'écrire en fonction du variogramme :

$$\sigma_e^2 = \left[\sigma^2 - \bar{\gamma}(X, X) \right] + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \left(\sigma^2 - \gamma(X_i - X_j) \right) - \sum_i \lambda_i \left(\sigma^2 - \bar{\gamma}(X_i, X) \right) \quad (\text{III.22})$$

Puis finalement, puisqu'on a habituellement $\sum \lambda_i = 1$, par simplification on arrive à :

$$\sigma_e^2 = 2 \sum_i \lambda_i \bar{\gamma}(X_i, X) - \bar{\gamma}(X, X) - \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma(X_i, X_j) \quad (\text{III.23})$$

III.6.1. Le krigeage ordinaire [9]

La méthode de krigeage a été développée par Matheron G. Dans cette méthode la moyenne est supposée inconnue mais utilise l'invariante sur le voisinage de point d'estimation. Cette méthode ne réclame que l'hypothèse de stationnarité intrinsèque.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_j \lambda_j \text{cov}[Z_i, Z_j] + \mu = \text{cov}[Z_i, Z_j] \quad \forall i = 1, \dots, n \\ \sum_j \lambda_j = 1 \end{array} \right. \quad (\text{III.24})$$

La variance d'estimation minimale, appelée variance de krigeage, est obtenue en substituant les équations de krigeage dans l'expression générale pour la variance d'estimation:

$$\sigma_k^2 = \sigma_e^2 = \text{var}[Z_X] - \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{cov}[Z_X, Z_i] - \mu \quad (\text{II.25})$$

Remarque :

Cette variance de krigeage ne dépend pas des valeurs observées. Elle ne dépend que du variogramme et de la configuration des points servant à l'estimation par rapport au point (ou bloc) à estimer.

Comme la variance d'estimation s'écrit aussi en termes de variogramme, on peut aussi réécrire le système de krigeage en fonction du variogramme. Ceci tient au fait que $C(h) = \sigma^2 - \gamma(h)$ et que $\sum \lambda_i = 1$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_j^n \lambda_j \gamma(X_i, X_j) - \mu = \bar{\gamma}(X, X_i) \quad \forall i = 1, \dots, n \\ \sum_j^n \lambda_j = 1 \end{array} \right. \quad (\text{III.26})$$

Et, alors

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(X, X_i) - \bar{\gamma}(X, X) - \mu \quad (\text{III.27})$$

Il est intéressant de visualiser le système de krigeage ordinaire et la variance dekrigeage ordinaire sous forme matricielle :

$$K\lambda = K$$

$$\sigma_k^2 = \sigma^2 - \lambda K$$

Où :

$$\left(\begin{array}{cccccc} \sigma^2 & \text{cov}(Z_1, Z_2) & \cdot & \text{cov}(Z_1, Z_n) & 1 \\ \text{cov}(Z_2, Z_1) & \sigma^2 & \cdot & \text{cov}(Z_2, Z_n) & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \text{cov}(Z_n, Z_1) & \text{cov}(Z_n, Z_2) & \cdot & \sigma^2 & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{array} \right) \quad (\text{III.28})$$

$$k = \left(\begin{array}{c} \text{cov}(Z_1, Z_X) \\ \text{cov}(Z_2, Z_X) \\ \cdot \\ \text{cov}(Z_n, Z_X) \\ 1 \end{array} \right) \quad \text{et} \quad \lambda = \left(\begin{array}{c} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu \end{array} \right) \quad \text{et} \quad \sigma_X^2 = \bar{c}(X, X) \quad (\text{III.29})$$

III.6.2. Krigeage simple [9]

On vient de voir le krigeage ordinaire, on a remarqué que pour ce dernier, il n'est pas exigé de connaître la moyenne de la variable étudiée, elle est supposée constante partout.

Mais parfois on connaît la moyenne "m" du champ à estimer ou au moins on possède un estimé fiable. On peut alors former un estimateur sans biais, dans lequel intervient la moyenne m, sans imposer la contrainte que la somme des poids soit égale à 1 :

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) \cdot m \quad (\text{III.30})$$

Où les Z_i désignent les V. A. correspondant aux échantillons.

Tout comme pour le krigeage ordinaire, on écrit la variance d'estimation et on substitue l'expression précédente pour l'estimateur Z^* . On trouve :

$$\sigma_{ks}^2 = \text{var}[Z] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{cov}[Z_i, Z_j] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{cov}[Z, Z_i] \quad (\text{III.31})$$

On dérive cette expression par rapport à chacun des λ_i . Dans ce cas nous n'avons pas besoin de faire intervenir de nouvelle variable (Lagrangien) car le système d'équation est équilibré. On trouve alors le système de krigeage simple :

Système de krigeage simple

$$\sum_j \lambda_j \text{cov}[Z_i, Z_j] = \text{cov}[Z, Z_i] \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (\text{III.32})$$

Et la variance d'estimation, appelée variance de krigeage simple s'écrit :

$$\sigma_{ks}^2 = \text{var}[Z] - \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{cov}[Z, Z_i] \quad (\text{III.33})$$

III.7. Propriétés du krigeage [1]

Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont:

- ✓ Linéaire, sans biais, à variance minimale, par construction.
- ✓ Interpolateur exact. : si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue.
- ✓ Présente un effet d'écran: les points les plus près reçoivent les poids les plus importants.

Cet effet d'écran varie selon la configuration et selon le modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus l'effet de pépite est important, moins il y a d'effet d'écran.

- ✓ Tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux.
- ✓ Par l'utilisation du variogramme, tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépite, anisotropie, etc.).
- ✓ Presque sans biais conditionnel. Ceci signifie que lorsqu'on applique une teneur de coupure à des valeurs estimées, on récupérera approximativement la teneur prévue. C'est une propriété très importante pour les mines. Cette propriété implique que l'estimateur utilisé soit plus lisse que la valeur qu'il cherche à estimer, ce qui est le cas pour le krigeage.

III.8. Choix du type du krigeage à utiliser [3]

Une bonne exploration des données est essentielle au choix du modèle. En se basant sur les résultats de l'analyse descriptive, le type de krigeage à employer peut être choisi par l'analyse variographique menée de façon adéquate.

Si plusieurs modèles variographiques sont envisagés, la validation croisée peut être utilisée afin d'en sélectionner un. Mais avant tout, il faut déterminer si l'interpolation sera faite directement sur la fonction aléatoire d'intérêt ou sur une transformation de celle-ci. Le plus simple est bien sûr de travailler sur les données non transformées. Cette option est toujours privilégiée. Cependant, un utilisateur peut choisir de travailler sur une transformation des données pour améliorer la qualité de l'interpolation dans le cas d'un important écart à la normalité. Dans ce cas, il doit toutefois s'assurer d'être en mesure d'effectuer la transformation inverse après le krigeage.

Lorsque la stationnarité du premier moment peut être acceptée, un krigeage stationnaire est sélectionné. Si l'espérance de la fonction aléatoire à interpoler est connue, le krigeage simple est employé, sinon le krigeage ordinaire est utilisé.

Conclusion

La méthode de krigeage est précédée par l'estimation d'une fonction variographique. C'est cette fonction qui va tenir compte à la fois de la géométrie des données, des caractéristiques de la régionalisation et de la précision de l'échantillonnage. Il est donc important de souligner que la qualité de l'estimation et l'appréciation de sa précision reposent uniquement sur le modèle variographique utilisé. Il doit par conséquent, être le plus cohérent possible avec ce qui a été observé.

Chapitre IV

Etude statistique et variographique

La mise en œuvre des techniques d'estimation géostatistique exige une analyse préalable de données expérimentales. L'étude exploratoire a pour but d'apprécier la distribution des données dans l'espace, de comprendre leur degré d'homogénéité, de rechercher et de visualiser les observations atypiques ou tout simplement de se familiariser avec la variable.[2]

Dans ce chapitre nous présentons les données des variables ayant un intérêt, avant d'entamer l'étude statistique et variographique.

Les variables d'intérêt étudiées sont : l'épaisseur des couches et les teneurs en phosphate équivalents avec un objectif d'estimer les réserves en phosphate du gisement de Kef Es Sennoun.

IV.1. Présentation des données et leur implantation sur les lieux

Dans le cadre de l'exploration du gisement de Kef Es Sennoun, 32 sondages carottés, notés S₂ à S₄₆, réalisés avec une maille de (250*300m). Le sondage le plus profond est le S₇ (250m) situé au sud-ouest du gisement, le plus court est le S₂₅ (76,1m) implanté à proximité de la bande d'affleurement des dressants de Kef Es Sennoun. Seul le S₁₄ n'apporte pas d'informations complètes puisqu'il a été arrêté, pour des raisons techniques, au toit du faisceau phosphaté. Ces sondages ont défini l'allure général du gisement et permettent de calculer les réserves.

Dans le cadre de ce travail, la taille du champ à estimer est de 2,7*0,8 Km, c'est à dire une superficie de 2,16 Km².

Les données numériques des échantillons analysés à partir de ces sondages sont présentées dans le tableau 1(annexe 1). Le numéro 999 déclaré dans le tableau signale l'absence de l'information dans cette zone.

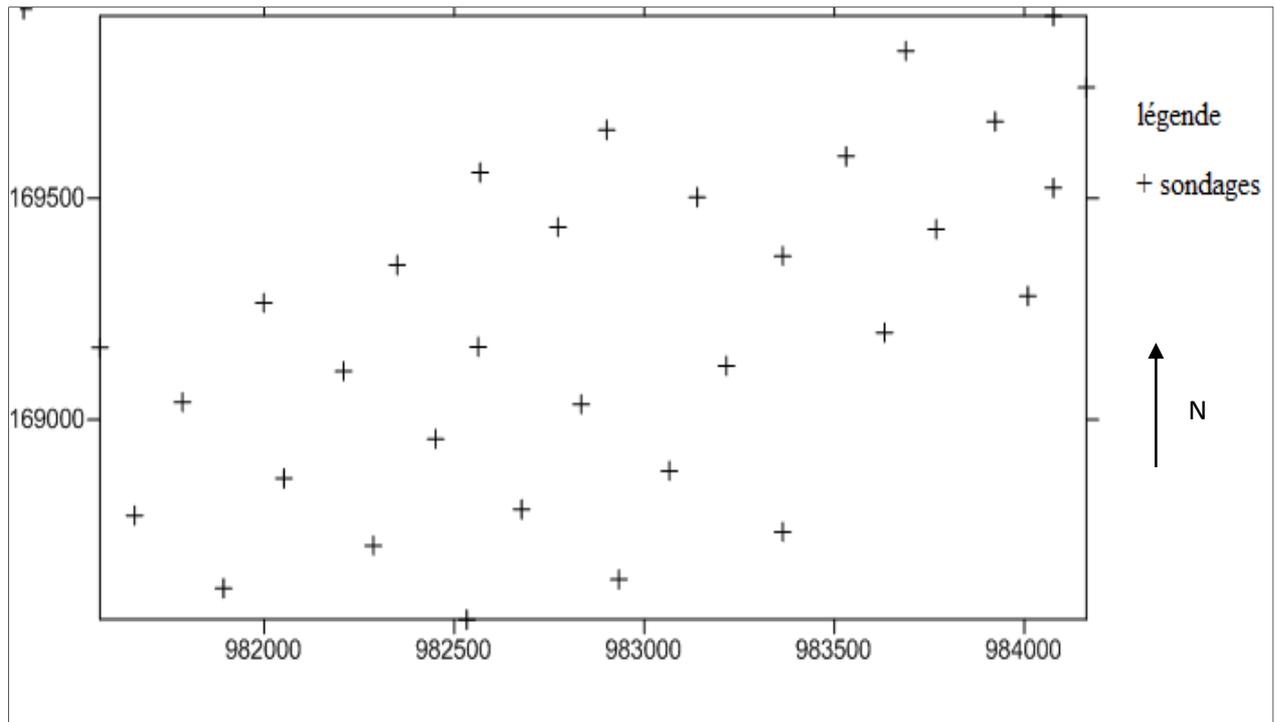


Fig. IV.1. Carte de positionnement des sondages.

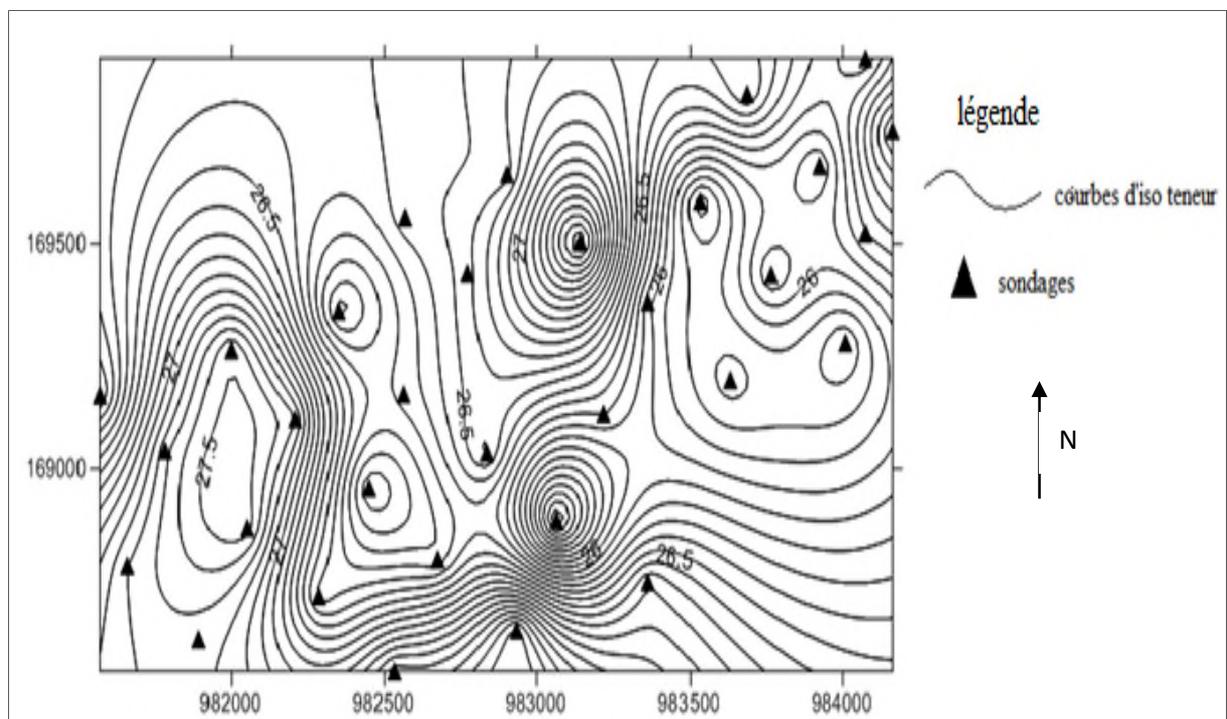


Fig. IV.2. Carte d'iso teneur avec positionnement des sondages échantillonnée de gisement du Kef Es Sennoun.

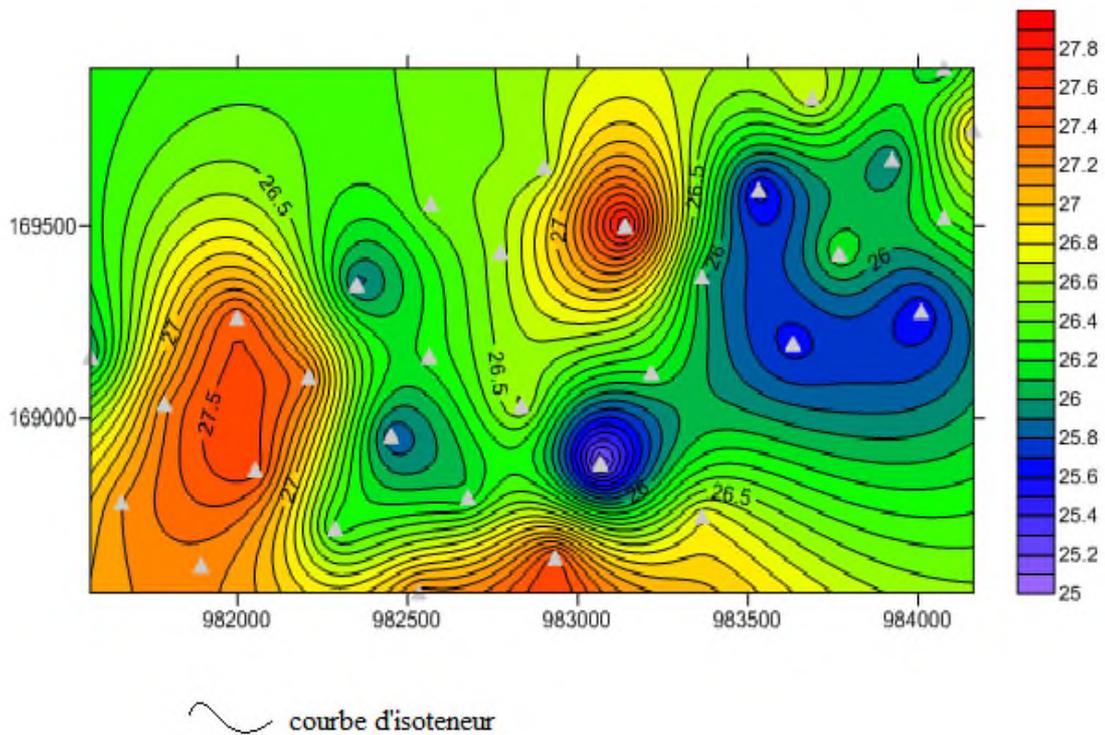


Fig. IV.3. Carte d'iso teneur du gisement de Kef Es Sennoun

La présentation de la distribution des sondages des courbes d'iso teneur (la figure IV.2) montre l'alignement des sondages. La figure (IV.3) illustre bien comment les teneurs sont distribuées selon une direction, ce qu'il faut prendre en considération pour l'interprétation de cartes obtenues par la modélisation géostatistique des teneurs.

On remarque que le gisement de Kef Es Sennoun a une direction Nord-Est /Sud-Ouest et les teneurs dans la zone étudié dépassent les 25%.

Les cartes d'iso teneur obtenues sont réalisées par le logiciel surfer 10.

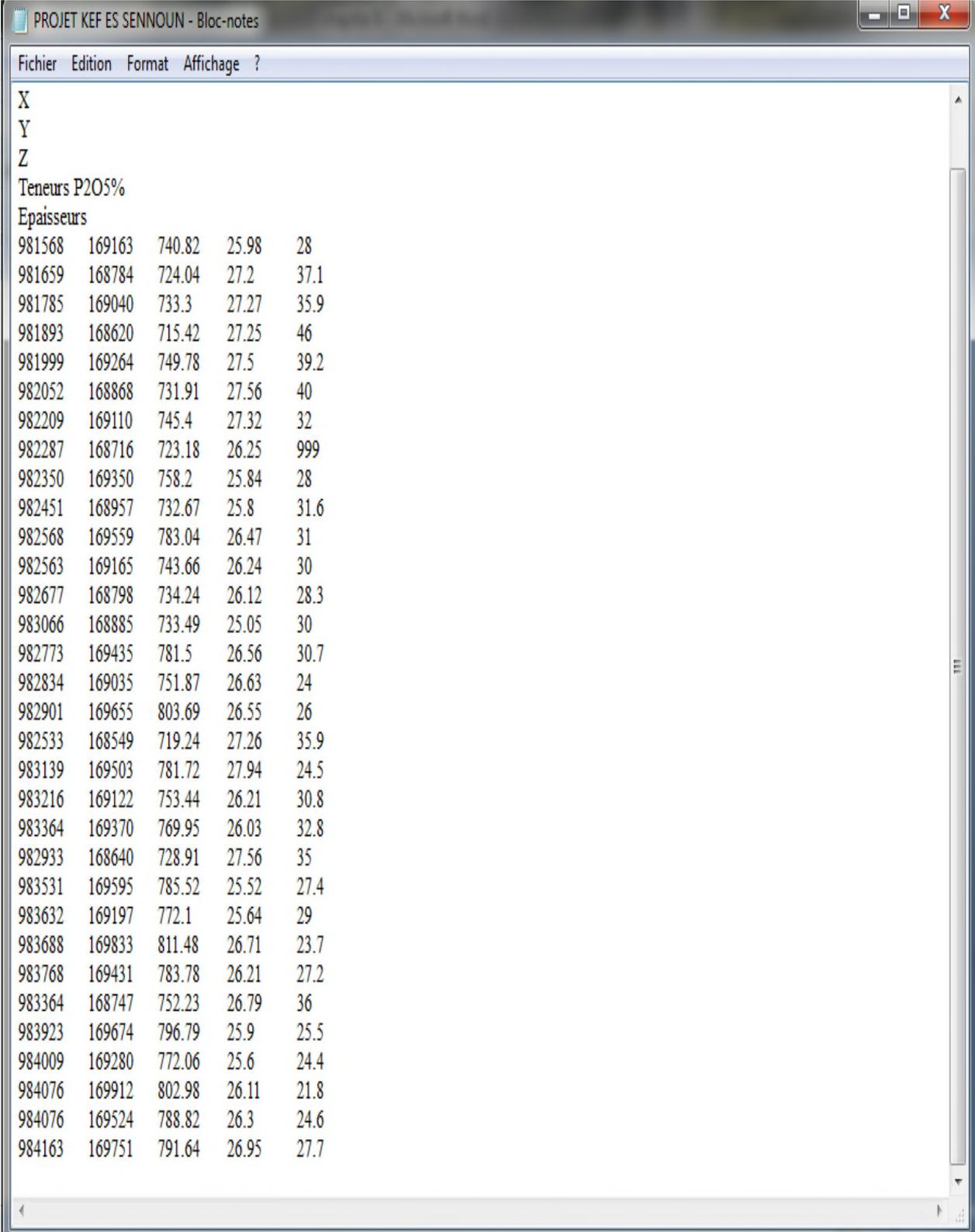
IV.2. Base de données numériques

L'étape de l'estimation par krigeage est liée à une étude variographique. Il ne s'agit que de définir une grille d'estimation et un voisinage de krigeage (domaine de champ qui contient le site à estimer et les données utilisées dans l'estimation). L'estimation par krigeage peut alors être entièrement automatisée. [2]

Le choix du voisinage de krigeage est un peu plus délicat, le nombre de points inclus dans le voisinage doit être assez grand pour une estimation de précision. Il dépend également de la continuité spatiale de la variable régionalisée. Le modèle variographique doit être acceptable à l'échelle de ce voisinage, c'est-à-dire qu'il existe une dépendance spatiale. [2]

Dans le cadre de ce travail, les calculs variographiques, leur modélisation ainsi que les calculs de krigeage ont été effectués à l'aide du programme S-GeMS version 2.5b. Ce programme permet de calculer les histogrammes, les variogramme avec l'ajustement de modèle théorique, les cartes de kriegage et leurs variances.

L'analyse et le traitement des données disponibles (annexe1) à l'aide d'un outil informatique, exige une forme spéciale du fichier contenant ces informations du terrain. Une base de données sera préparée en fonction du logiciel utilisé (dans notre cas le S-GeMS), la figure(IV.4) représente les éléments essentiels pour la mise en place des données sous forme numérique. Le type de fichier peut être enregistré en extension « .Txt » ou bien « .Dat ».



PROJET KEF ES SENNOUN - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

X
Y
Z
Teneurs P2O5%
Epaisseurs

981568	169163	740.82	25.98	28
981659	168784	724.04	27.2	37.1
981785	169040	733.3	27.27	35.9
981893	168620	715.42	27.25	46
981999	169264	749.78	27.5	39.2
982052	168868	731.91	27.56	40
982209	169110	745.4	27.32	32
982287	168716	723.18	26.25	999
982350	169350	758.2	25.84	28
982451	168957	732.67	25.8	31.6
982568	169559	783.04	26.47	31
982563	169165	743.66	26.24	30
982677	168798	734.24	26.12	28.3
983066	168885	733.49	25.05	30
982773	169435	781.5	26.56	30.7
982834	169035	751.87	26.63	24
982901	169655	803.69	26.55	26
982533	168549	719.24	27.26	35.9
983139	169503	781.72	27.94	24.5
983216	169122	753.44	26.21	30.8
983364	169370	769.95	26.03	32.8
982933	168640	728.91	27.56	35
983531	169595	785.52	25.52	27.4
983632	169197	772.1	25.64	29
983688	169833	811.48	26.71	23.7
983768	169431	783.78	26.21	27.2
983364	168747	752.23	26.79	36
983923	169674	796.79	25.9	25.5
984009	169280	772.06	25.6	24.4
984076	169912	802.98	26.11	21.8
984076	169524	788.82	26.3	24.6
984163	169751	791.64	26.95	27.7

Fig.IV.4. Fichier représentatif de la forme de la base des données, préparé pour l'analyse.

IV.3. Etude statistique

En géologie, généralement les statistiques s'appliquent pour l'analyse des données telles que les données hydrologiques, géophysiques, géochimiques notamment celles dont on envisage l'étude. Elles permettent essentiellement de décrire les liens entre les variables et les observations d'une matrice de données. [1]

A partir des données récoltées lors d'un sondage, il est intéressant d'avoir, dans un premier lieu, une idée de la manière dont les données sont distribuées. En effet, l'étude de l'homogénéité statistique de la variable de travail est nécessaire afin de faire une synthèse sur la qualité de l'information et de sa représentation vis-à-vis du site étudié.

IV.3.1. Notion de statistique

Une technique souvent utilisée pour la représentation des ensembles de données et la table de fréquence est l'histogramme.

L'information contenant dans l'histogramme peut être résumé par un certain nombre de variables statistiques telles que :

- 1) **Mesure de tendance centrale** : Ces mesures donnent une idée sur la localisation du centre de la distribution. Ce sont : la moyenne, le mode et la médiane ;
- 2) **Mesure de dispersion** : décrivent la variabilité des valeurs des données et ces mesures sont : les variances, l'écart type, l'écart interquartile ;
- 3) **Le coefficient d'asymétrie et le coefficient de variation** : qui décrivent la forme de la distribution.

Le coefficient d'asymétrie est utilisé pour décrire la symétrie de la distribution. Il est défini par :

$$C.S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_i - m)^3}{\sigma^3} \quad (IV.33)$$

Où :

- m : est la moyenne arithmétique des échantillons x_i ;
- n : le nombre des échantillons ;
- σ : est l'écart-type ;

$$\sigma = \sqrt{Var}$$

- Var : variance.

Si le coefficient d'asymétrie (C.S) est proche de zéro, l'histogramme est approximativement symétrique, et la médiane est proche de la moyenne.

Le coefficient de variation (C. V) est défini, pour sa part, comme étant le rapport entre l'écart-type et la moyenne. Ce coefficient est utilisé si les valeurs qu'on représente sont toutes positives. En outre, il n'est valable que si le coefficient d'asymétrie est positif. [15]

Calcul des coefficients :

Tableau. IV.1.Présentation des coefficients d'asymétrie et de variation.

Coefficients	Épaisseurs	Teneurs en phosphate %
C.S	-0.07466307	0.106871706
C.V	0.183165692	0.02676208

On remarque que les coefficients calculés pour les teneurs sont positifs, par contre en ce qui concerne les épaisseurs, le coefficient d'asymétrie est inférieur à zéro. Le coefficient de variation n'est donc pas valable.

IV.3.2. Statistique descriptive et histogramme

Beaucoup de variables dans les ensembles des données des Sciences de la Terre (teneurs) ont des distributions qui ne sont pas proches de la normale. Il est commun de rencontrer de nombreuses valeurs assez petites et quelques-unes très grandes. La distribution normale est souvent inappropriée comme modèle pour ce type de distribution asymétrique, une distribution log normale peut parfois être une bonne alternative. Une variable aléatoire X suit une loi log-normale quand son logarithme suit une loi normale.

Comme dans le tracé de probabilité normale, les fréquences cumulées représenteront une ligne droite si les valeurs données ont une distribution log-normale.

IV.3.2.1. L'épaisseur(m)

Dans cette partie de l'étude nous allons faire une analyse statistique des données de terrain fournies dans la phase d'exploration. La traduction statistique des épaisseurs (Fig. IV.5) révèle des valeurs importantes (50% des valeurs sont inférieures à 30m, un quart des valeurs est inférieure à 26 m avec une valeur maximale de 46m)

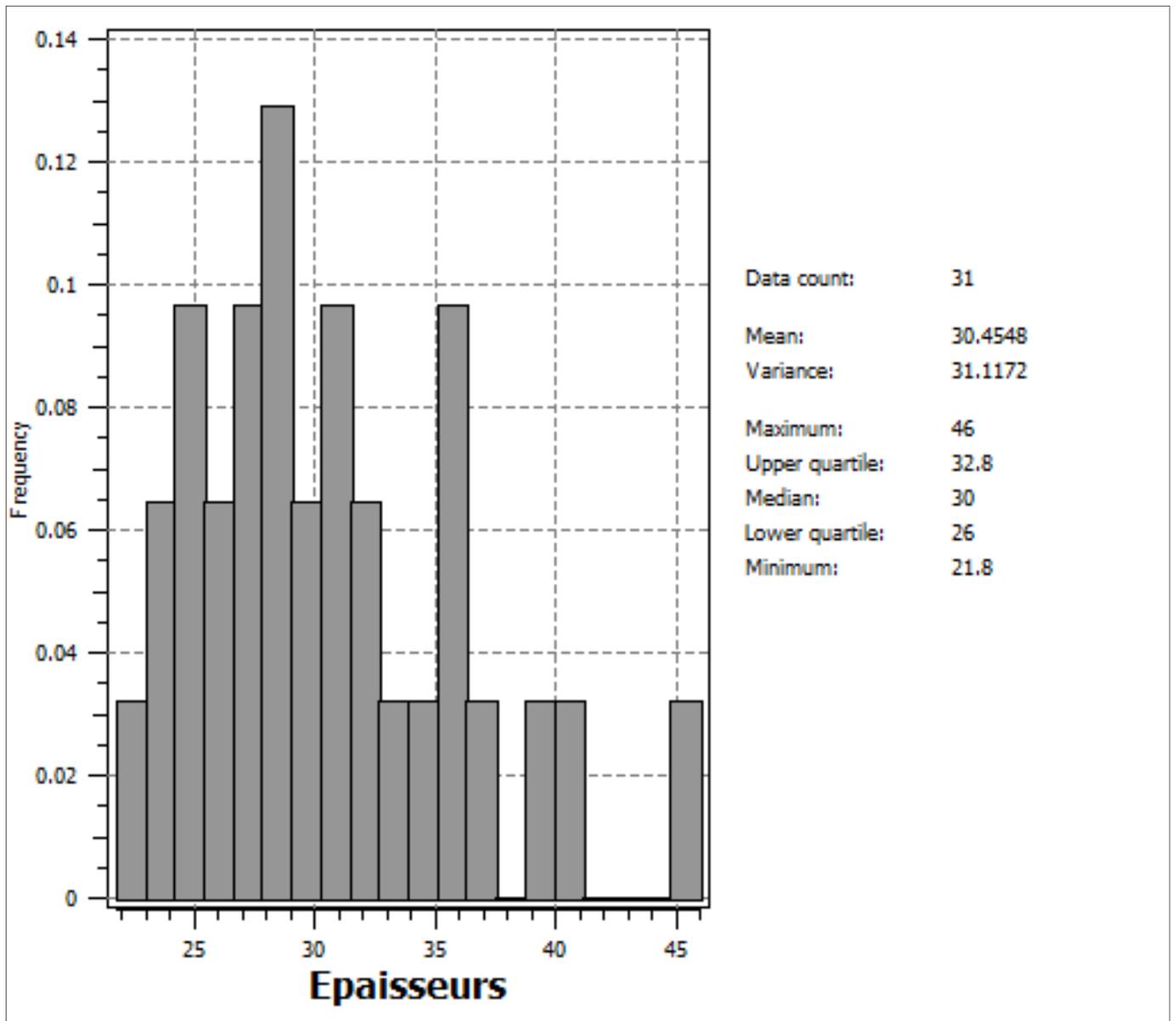


Fig. IV.5. Fréquences des épaisseurs de minéralisation de phosphate de Kef Es Sennoun

IV.3.2.2. Les teneurs

La teneur moyenne des sondages présentant est de 26.51%, avec un maximum de 27.94%, et les trois quarts des données sont inférieures à 27.2%, pour une variance de 0.5.

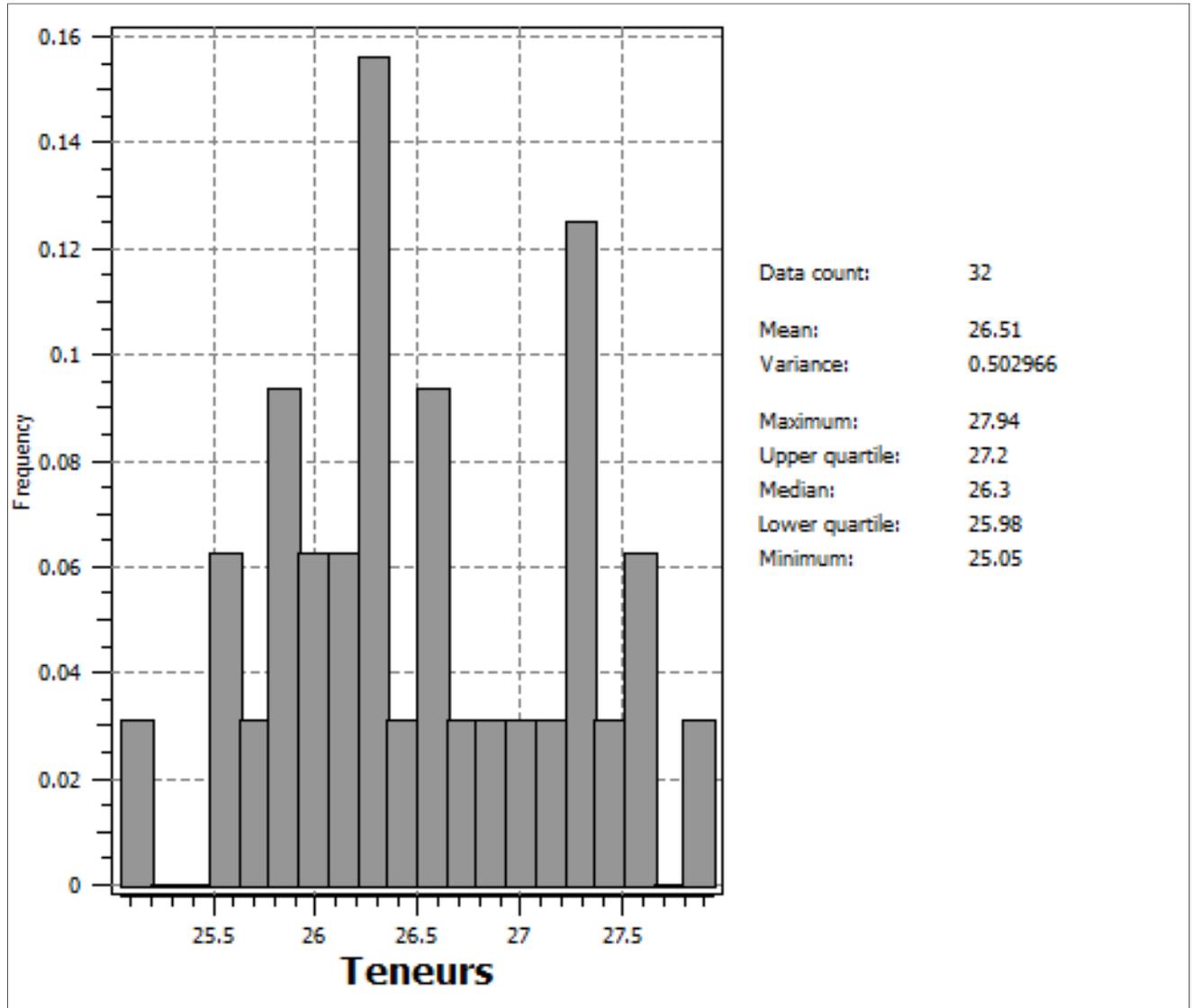


Fig. IV.6. Fréquence des teneurs en P2O5 de gisement de Kef Es Sennoun

Remarque :

Pour les deux courbes de fréquences (épaisseurs, teneurs), nous constatons que les distributions possèdent des valeurs nulles qui par la suite ne peuvent pas se rapprocher ni de la loi log-normal, ni de la loi normal.

IV.4. Analyse variographique

L'analyse variographique est l'étape préalable au krigeage. Le manque d'observations de la variable à prédire, l'abondance d'information de la variable auxiliaire et l'information de position (longitude/latitude) pour chacune des observations, nous conduit à choisir l'interpolation par « krigeage ».

Cette analyse permet d'estimer la fonction de la continuité spatiale de la variable d'intérêt. Dans cette partie nous présentons les variogrammes expérimentaux selon diverses directions, l'étude du comportement à courte distance et enfin l'ajustement d'un modèle théorique qui sera utilisé par la suite dans la modélisation par krigeage.

IV.4.1. Variogrammes expérimentaux

Les variogrammes expérimentaux ne sont pas définis partout, notamment aux distances h pour lesquelles il n'existe pas de paires de points de mesures. Ainsi une fonction mathématique appelée modèle de variogramme leur est-elle ajustée.

Pour cela, le pas (h) est choisi suivant la localisation des échantillons, on procède donc dans ce qui suit à choisir les paramètres avec lesquels on peut trouver une représentation optimale des variogrammes.

En raison de la distribution irrégulière des puits (sondages échantillonnés), nous ne pouvons pas compter de trouver beaucoup de paires de valeurs de données séparées par exactement la même distance (h). Ici nous avons présenté un pas ($h=75\text{m}$) et une tolérance de retard de 37.5 m pour les teneurs et un pas ($h=100$) et une tolérance de retard de 50 m pour les épaisseurs.

IV.4.2. Isotropie et anisotropie

Le variogramme ne dépend que de h , c'est-à-dire le vecteur de déplacement entre les points x et $x+h$. Ce vecteur donne l'information sur la distance entre ces deux points, par l'intermédiaire de sa norme, et sur l'orientation de h . Si le variogramme ne dépend que de la norme de h , il est dit isotrope. S'il dépend aussi de la direction (Θ) vecteur de translation, il est dit anisotrope [2].

Bien qu'il existe une très grande variété d'anisotropies, la plupart des ouvrages de géostatistique montrent uniquement comment modéliser les anisotropies géométriques.

Les caractéristiques de l'anisotropie géométrique montrent que:

- Les variogrammes des différentes directions ont le même palier et le même effet pépité mais des portées différentes.
- Les portées maximales et minimales s'observent selon deux directions orthogonales.

Pour revenir à une situation isotrope, le principe consiste à effectuer une transformation linéaire des coordonnées spatiales c'est-à-dire une rotation en suivant les directions de plus petite et plus grande continuité.

IV.4.3. Ajustement de fonction sur le variogramme

Lors du paragraphe consacré au calcul de carte, nous verrons que pour effectuer un krigeage, il est indispensable de pouvoir estimer la semi variance pour toute distance entre le point d'acquisition et le point où l'on souhaite effectuer l'estimation de la valeur.

Pour cela, il faut ajuster une fonction sur les points du variogramme. Tout type de fonction ne peut être utilisé. En effet, ces fonctions doivent respecter certaines conditions, et en particulier elles doivent tendre vers une valeur finie « c » lorsque la distance tend vers l'infini. Dans le cas contraire, par exemple si la semi variance estimée par la fonction tend vers l'infini, ceci signifie que l'écart autour de la moyenne tend vers l'infini, c'est à dire que l'on acquiert des mesures infiniment positives et infiniment négatives, ce qui est impossible.

IV.4.4. Paramètres pour le calcul du variogramme expérimental

Pour le calcul du variogramme expérimental nous avons besoin des données suivantes [14] (Fig. IV.7 et 8):

- La distance de l'intervalle de classe ou le pas ;
- La tolérance de l'intervalle de classe qui peut être la moitié de l'intervalle de classe ou plus petite ;
- L'angle azimutal ou l'angle suivant lequel $\gamma(h)$ est calculé ;
- La tolérance angulaire ;
- La largeur de la bande ou distance maximale acceptable dans la direction perpendiculaire au vecteur directeur.
- Dans notre cas nous avons considéré les paramètres suivants :
- Le pas ($h=75$ m) pour les teneurs et ($h=100$) pour les épaisseurs ;

- Tolérance de l'intervalle de classe = 37.5 m pour les teneurs et 50 m pour les épaisseurs ;
- L'angle azimutal (0° , 45° , 90° , 135°) ;
- Les tolérances angulaires = 22.5° (pour les variogrammes directionnels) et 90° (pour le variogramme omnidirectionnel) ;
- La largeur de la bande = 500 m.

Les figures suivantes présentent les différents paramètres entrant dans le calcul des variogrammes expérimentaux.

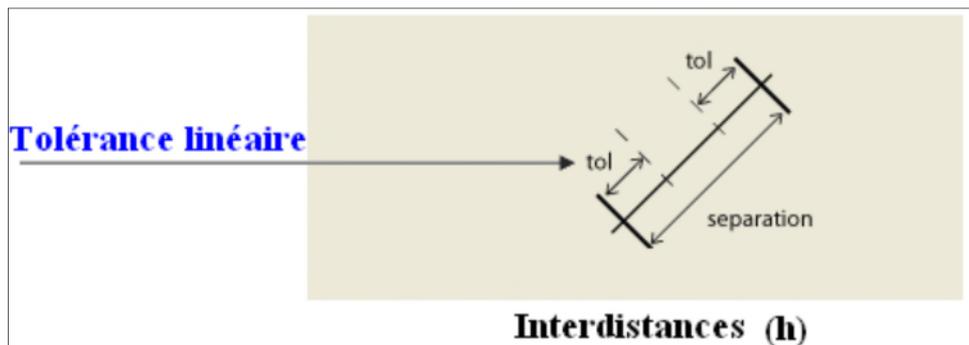


Fig. IV.7. Tolérance linéaire [16]

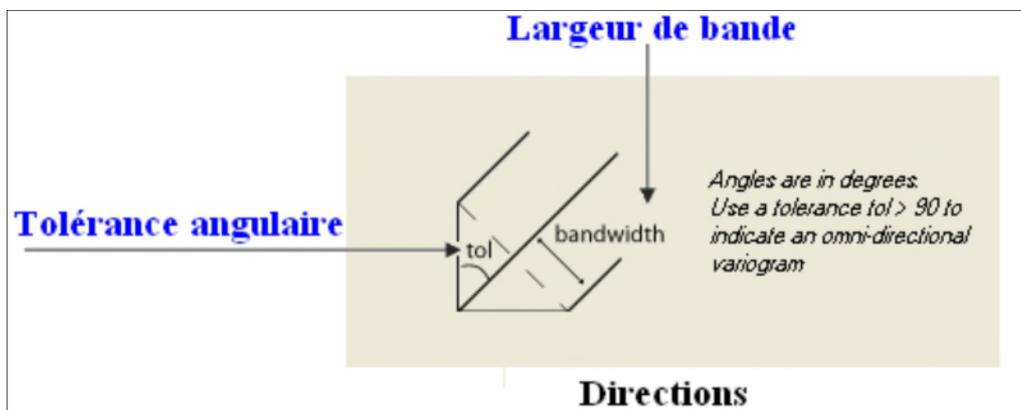


Fig. IV.8. Tolérance angulaire [16]

IV.4.5. Calcul et ajustement des variogrammes

Nous allons présenter et déterminer les paramètres essentiels des variogrammes expérimentaux. La première partie est consacrée aux variogrammes expérimentaux des épaisseurs des couches minéralisées, la seconde partie aborde l'étude variographique des teneurs en phosphate et des épaisseurs afin de caractériser la continuité spatiale des variables régionalisées.

Au niveau de la Variable Régionalisée, il est donc naturellement d'interroger l'écart quadratique pour l'ensemble des données $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$. Les figures (IV.9 ; IV.10) montrent les nuées variographique des teneurs et des épaisseurs, et montrent les semi variances pour un pas de 10m.

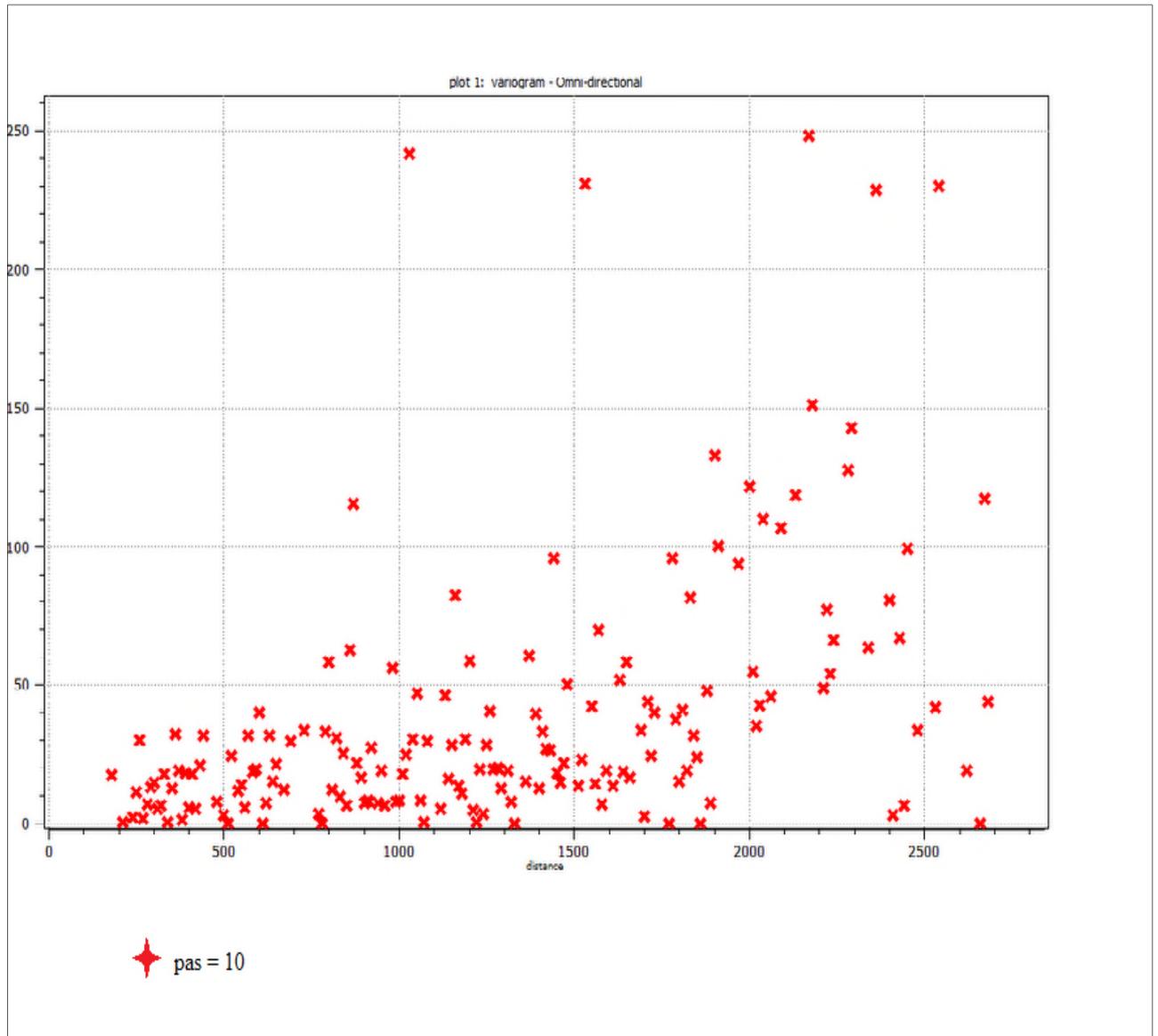


Fig. IV.9. Nuage variographique des épaisseurs (première étape de modélisation des variogrammes)

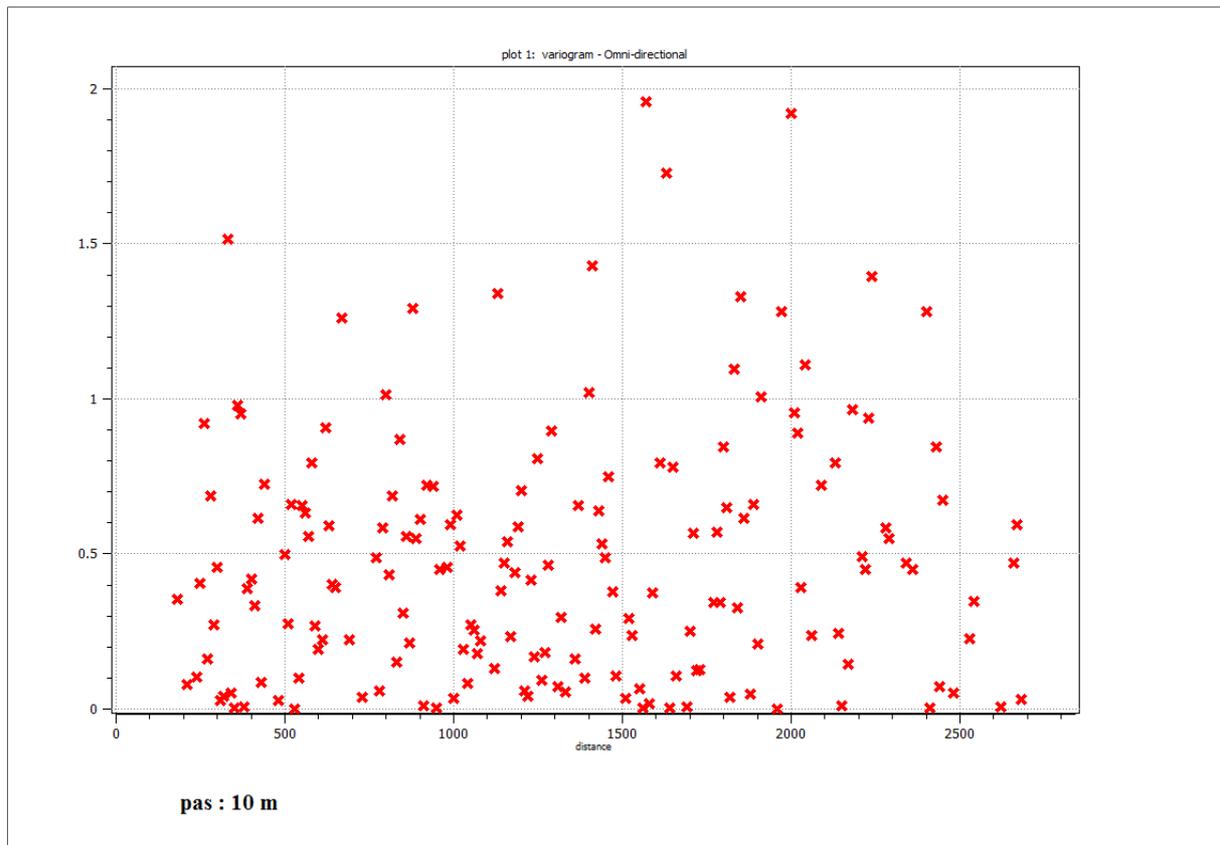


Fig. IV.10. Nuage variographique des teneurs (première étape de modélisation des variogrammes)

Sachant qu'il est conseillé de calculer le semi-variogramme expérimental seulement pour des distances plus petites que la mi-distance maximale entre deux points d'observation, la largeur de la fenêtre est choisie en faisant un compromis entre la quantité et la qualité des points composant le semi-variogramme expérimental.

Plus la largeur de la fenêtre est petite, plus le semi-variogramme expérimental comporte de points, mais plus ces points sont imprécis car ils sont calculés à partir de peu de données. Idéalement, il faut s'assurer que chaque point provient d'un nombre suffisant de données. En conséquence, l'analyse variographique est difficile et imprécise lorsqu'il y a peu de données [5].

Les figures (IV.9; IV.10) présentent ce qu'on appelle une nuée variographique (nuage de point d'un variogramme). C'est un outil d'analyse extrêmement précieux, à la base d'une « Géostatistique exploratoire », mais elle apporte peu d'information structurale synthétique, il reste difficile à modéliser sans hypothèses solides. On souhaite donc disposer d'une fonction structurale plus globale, qui puisse exprimer l'évolution de l'écart-carré entre deux échantillons en fonction de la distance entre ces deux échantillons [14].

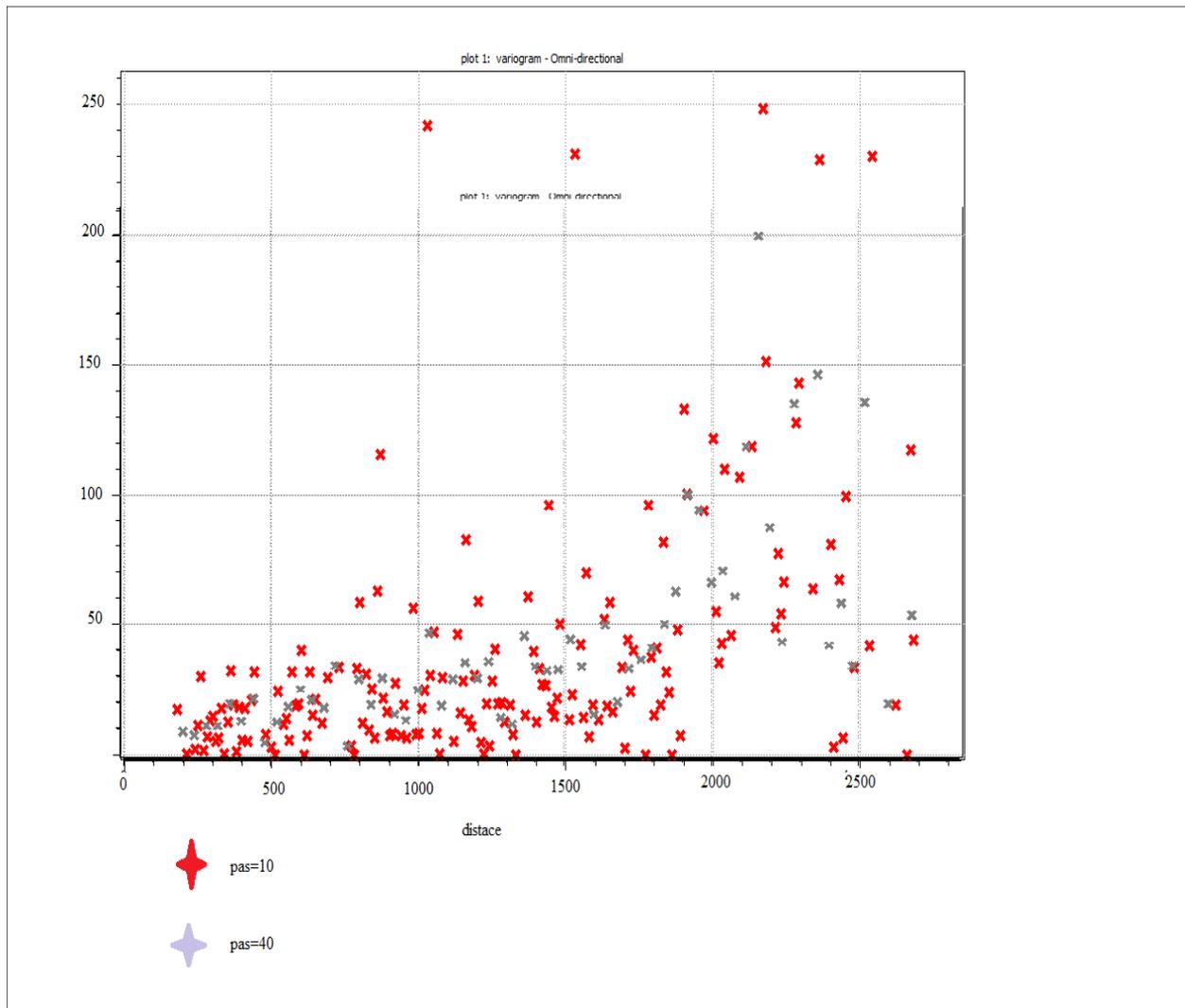


Fig. IV.11. La nuée variographique des épaisseurs, avec ajustement de variogramme d'un pas de 40 m

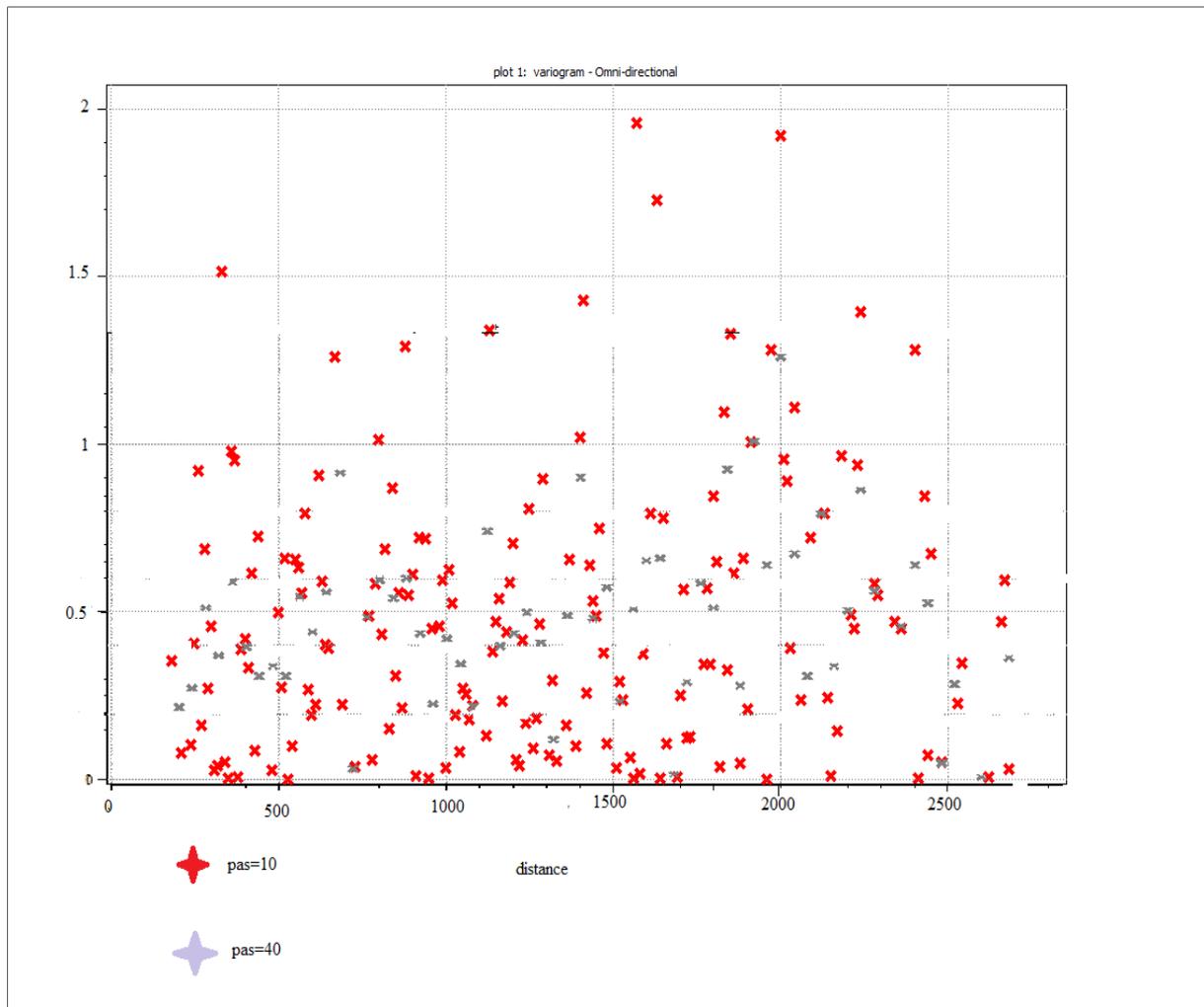


Fig. IV.12 : La nuée variographique des teneurs, avec ajustement de variogramme d'un pas de 40 m

Cette étape consiste à augmenter le pas des classes de 10 à 40 m, et prendre dans chaque nouvelle classe les moyennes des écarts quadratiques correspondants. On obtient donc pour chaque classe une valeur unique (fig. IV. (11,12)) qui sera utilisée dans la modélisation des variogrammes expérimentaux.

IV.4.5.1. Les variogrammes des épaisseurs

Dans un premier temps, nous présentons les variogrammes expérimentaux calculés suivant les principales directions (quatre) dans un plan, afin de pouvoir bien estimer les paramètres des variogrammes des épaisseurs. La figure IV.13 regroupe les variogrammes expérimentaux suivant les différentes directions (0° , 45° , 90° , 135° , et le variogramme omnidirectionnel), calculés pour des distances multiples d'un pas de 100 m.

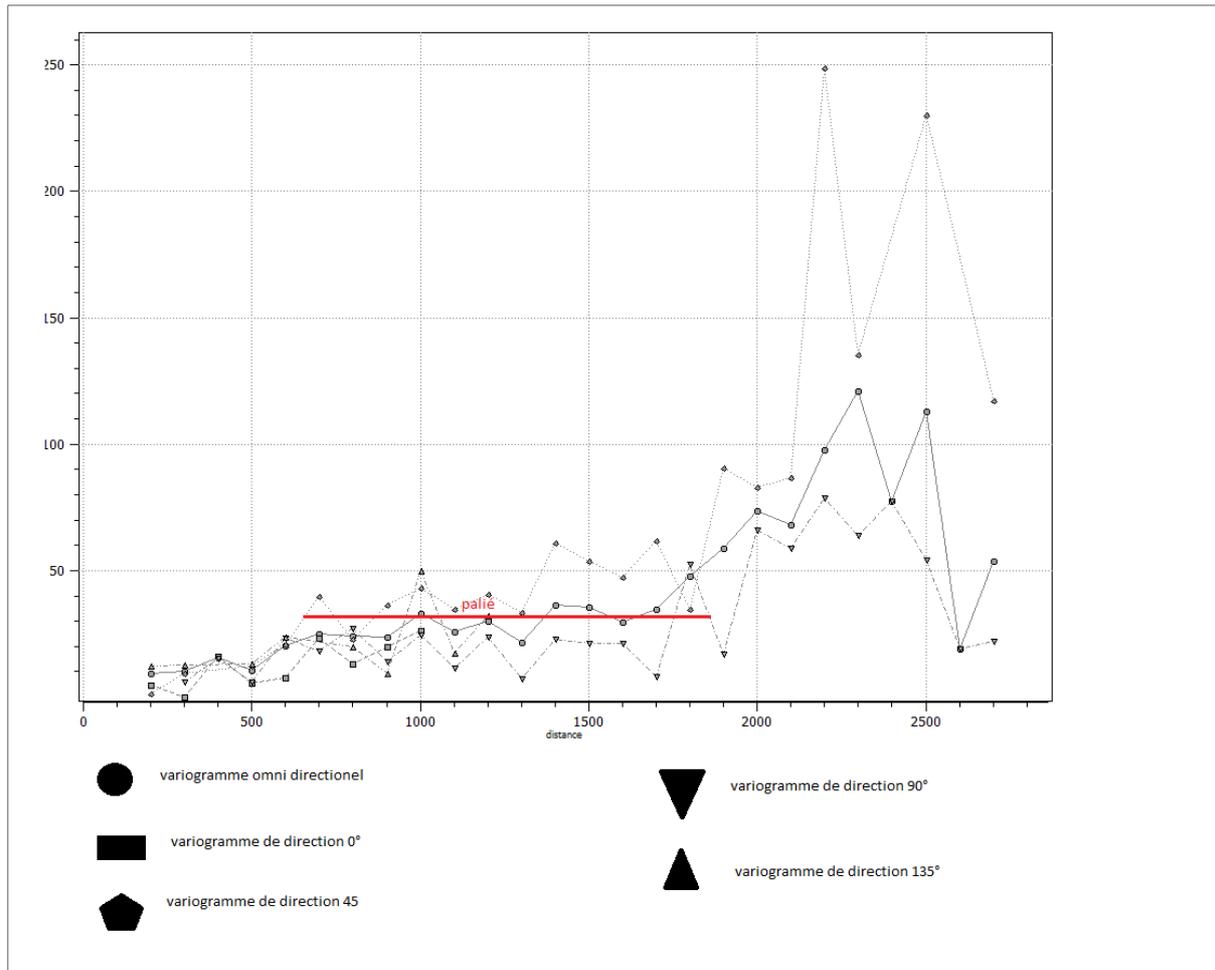


Fig. IV.13 : Ensemble des variogrammes directionnels et omnidirectionnel des épaisseurs.

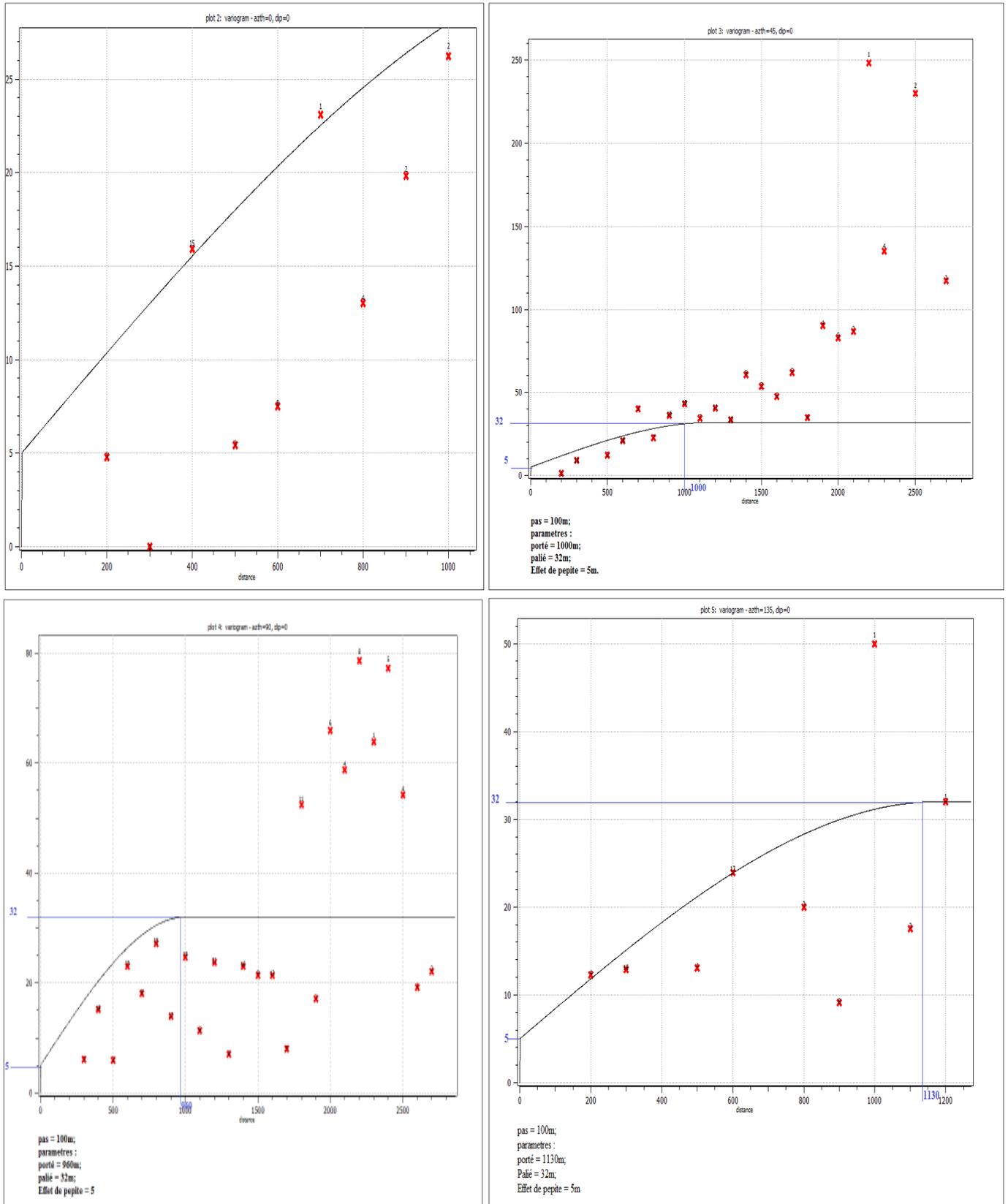


Fig. IV.14. Ensemble des variogrammes directionnels des épaisseurs avec l'ajustement des modèles expérimentaux

Ils sont présentés plus claires sur l'annexe III

La figure (IV.14) englobe l'ensemble des variogrammes calculés dans les quatre directions principales du plan (0° , 45° , 90° , 135°) considérées par rapport à l'axe azimutal. Après avoir estimé le palier (Fig. IV.13), nous avons procédé à la détermination du modèle du variogramme le plus adapté pour la suite du travail (krigeage). La différence entre les portées des variogrammes explique l'existence d'une anisotropie géométrique. Une portée maximale $a=1440\text{m}$, est apparue dans le variogramme omnidirectionnel par rapport à l'axe azimutal. Le choix du variogramme omnidirectionnel est basé sur la différence entre le nombre des paires ($N(h)$) entrant dans le calcul des $\gamma(h)$.

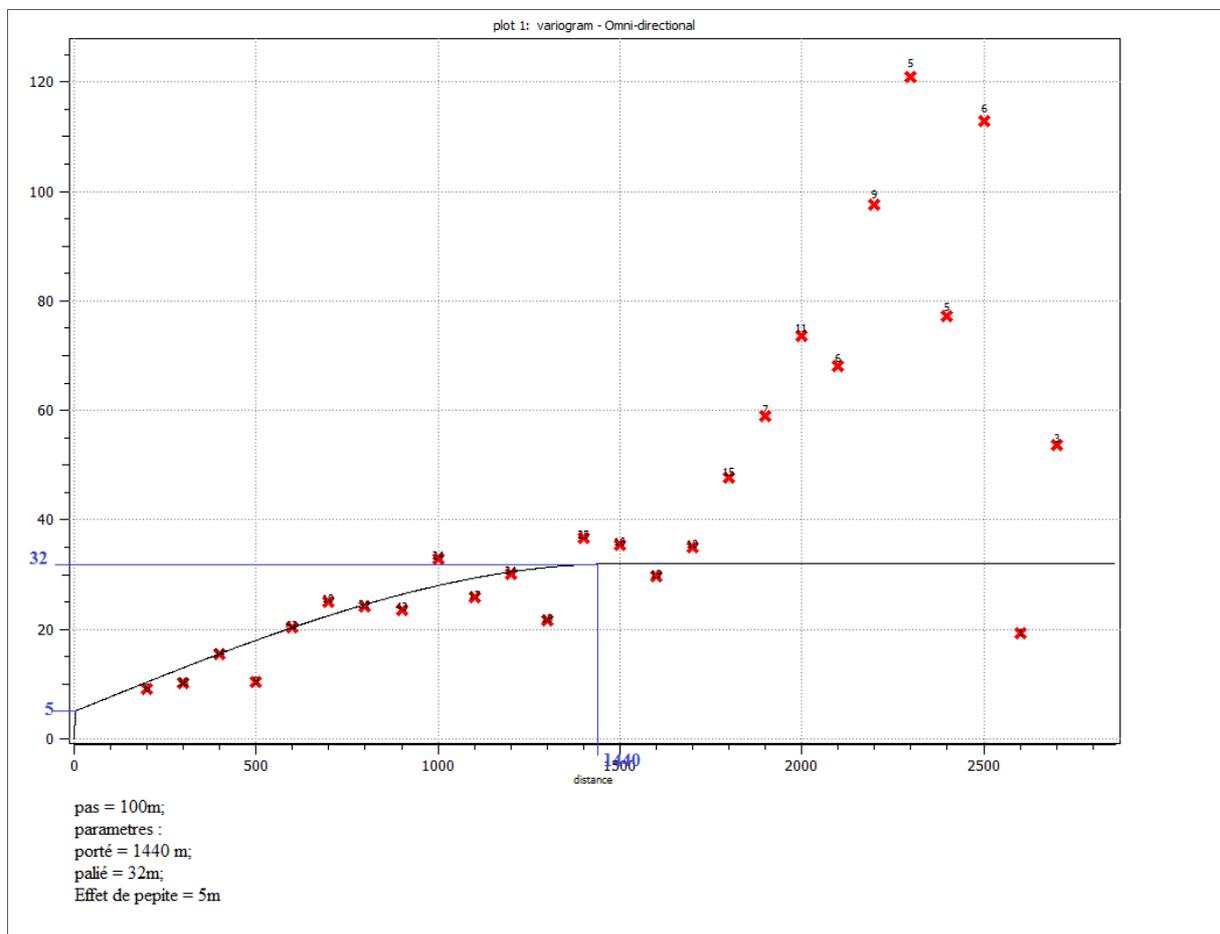


Fig. IV.15. Variogramme omnidirectionnel avec l'ajustement de variogramme expérimental des épaisseurs

Ces variogrammes atteignent un palier $C(0) = 32$ à une portée maximale de $a = 1440$ m pour le variogramme omnidirectionnel, et une portée minimale suivant la direction 90° ($a = 960$ m) pour les autres directions. Les paramètres sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau .IV.2. Principaux paramètres des variogrammes expérimentaux.

Direction(°)	Porté(m)	Palier (seuil)	Effet de pépité
0° (omni directionnel)	1440	32	5
0°	----	----	---
45°	1000	32	5
90°	960	32	5
135°	1130	32	5

En ce qui concerne l’effet de pépité, les modèles présentés ont un effet de pépité $C_0=5$ dû à la discontinuité à l’origine.

Nous avons ajusté des variogrammes théoriques du modèle sphérique, afin de pouvoir estimer la carte de répartition des épaisseurs. Le modèle sphérique est le modèle le mieux adapté à l’estimation des paramètres géologiques.

Nous avons utilisé les paramètres du variogramme omnidirectionnel pour l’estimation (krigeage) de la carte des épaisseurs de la couche minéralisée (fig. IV.15).

Avec : $C_0 = 5$; $C(0) = 32$; $a = 1440$ m.

Le variogramme théorique correspondant est un modèle sphérique d’équation :

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & \dots\dots\dots 0 \leq h \leq a \\ C + C_0 & \dots\dots\dots h > a \end{cases}$$

D’où:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 5 + 32 \left(\frac{3h}{2 \cdot 1440} - \frac{h^3}{2 \cdot 1440^3} \right) & \dots\dots\dots 0 \leq h \leq 1440 \\ 32 + 5 & \dots\dots\dots h > 1440 \end{cases}$$

IV.4.5.2. Les variogrammes des teneurs en phosphate

Avec la même méthode, on détermine les paramètres du variogramme théorique, et afin de choisir le modèle théorique à utiliser, on peut déduire à partir des variogrammes directionnels (fig. IV.16), le palier (seuil) $C(0) = 0.6$, et un effet de pépite $C_0 = 0.2$.

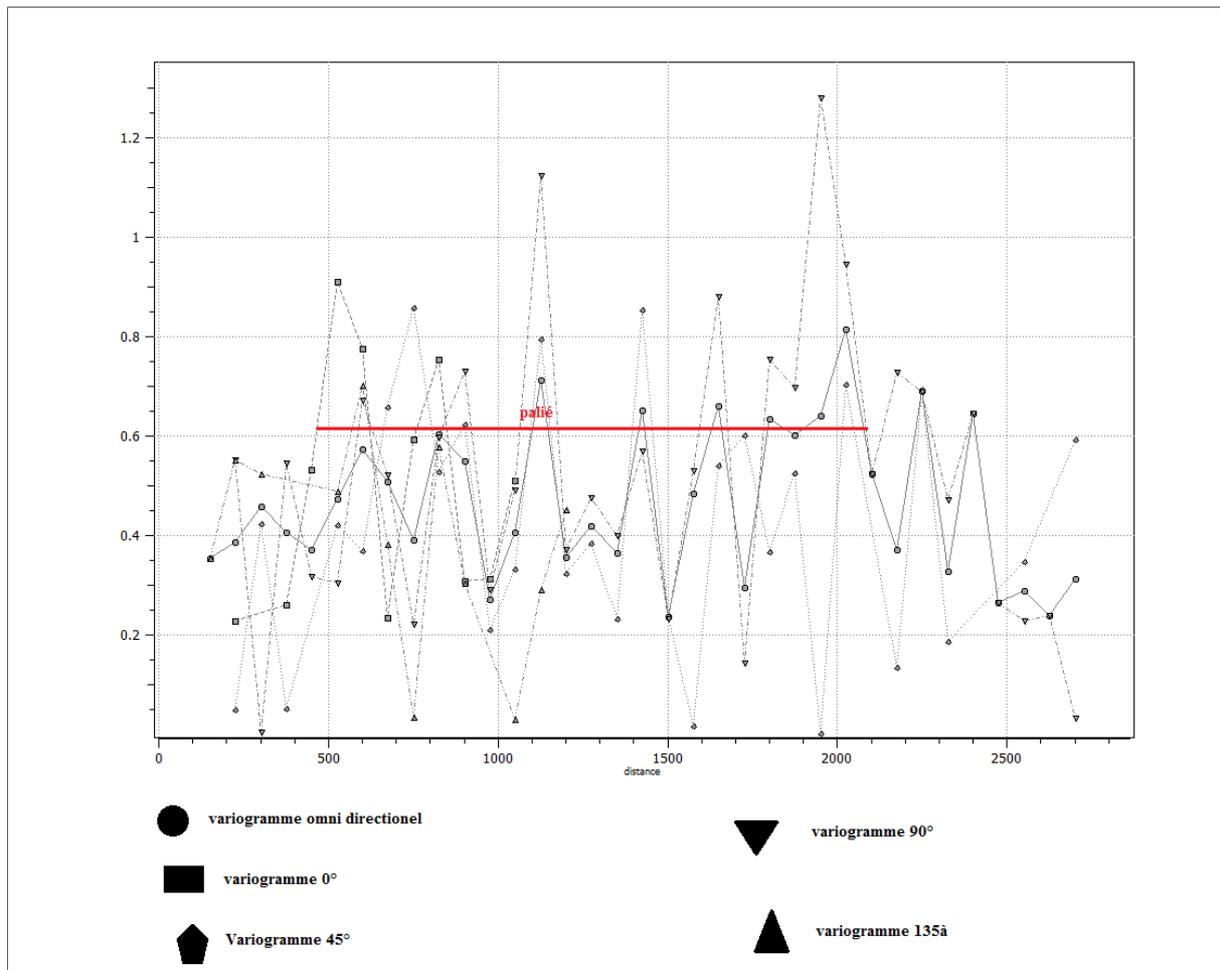


Fig. IV .16.Ensemble des variogrammes directionnels et omnidirectionnel.

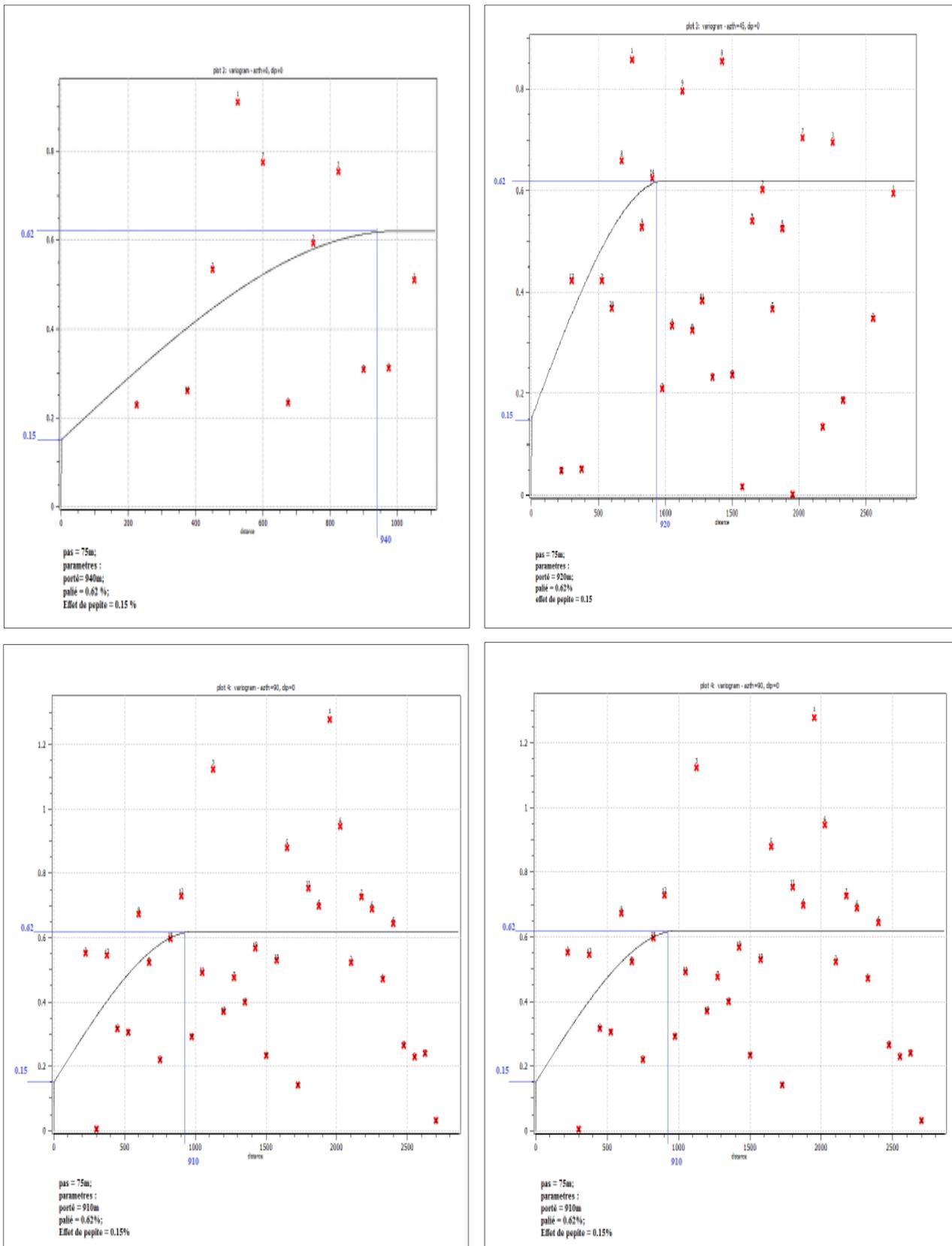


Fig. IV.17. Ensemble des variogrammes directionnels avec ajustement des variogrammes expérimentaux

Ils sont présentés plus claire sur l'annexe III

La figure (IV.17) montre les différents variogrammes directionnels le long des quatre directions principales du plan, d'orientation 0° , 45° , 90° et 135° par rapport à la direction azimutale.

Les variogrammes expérimentaux de la zone d'étude montrent une discontinuité spatiale dans la direction 0° par rapport à la direction azimutale (omni directionnel).

Remarque :

Il existe deux types d'anisotropie :

- **Anisotropie géométrique** : portées différentes, même palier selon la direction ;
- **Anisotropie zonale** ou stratifiée : même portée, paliers différents selon la direction.

Dans notre cas on a un même palier pour toutes les directions, et d'une portée différente ce qui explique l'existence d'une anisotropie géométrique.

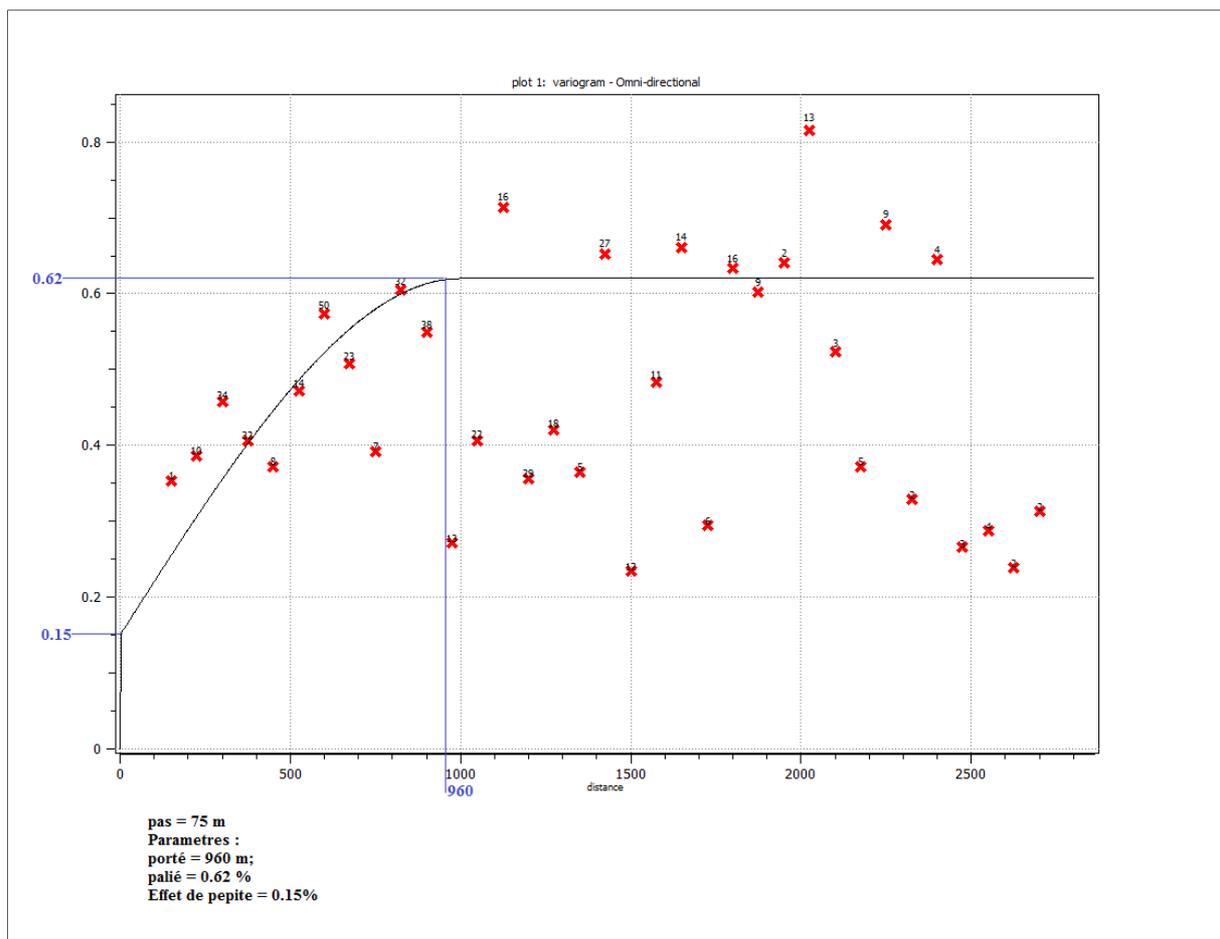


Fig. IV.18. Variogramme omnidirectionnel avec l'ajustement de variogramme expérimentale.

Les principaux paramètres relevant des variogrammes expérimentaux sont présentés ci dessous.

Tableau IV.3. Principaux paramètres relevant des variogrammes expérimentaux.

Direction(°)	Porté(m)	Palier (seuil) (%)	Effet de pépite(%)
0° (omni directionnel)	960	0.62	0.15
0°	940	0.62	0.15
45°	920	0.62	0.15
90°	910	0.62	0.15
135°	950	0.62	0.15

Concernant la modélisation de cette structure nous avons opté pour un modèle sphérique (Fig. IV.18) avec une portée de 960 m, un seuil de $C(0) = 0.62 \%$ et un effet pépite $C_0 = 0.15 \%$.

Le variogramme théorique correspondant est un modèle sphérique d'équation :

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & \dots\dots\dots 0 \leq h \leq a \\ C + C_0 & \dots\dots\dots h > a \end{cases}$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0.15 + 0.62 \left(\frac{3h}{2 \cdot 960} - \frac{h^3}{2 \cdot 960^3} \right) & \dots\dots\dots 0 \leq h \leq 960 \\ 0.62 + 0.15 & \dots\dots\dots h > 960 \end{cases}$$

Conclusion

Après avoir obtenu les résultats de l'étude statistique et variographique on va passer au krigeage pour calculer des réserves en phosphate du gisement de Kef Es Sennoun .

Chapitre V

Krigeage 2D, résultats et interprétations

Dans ce chapitre, nous allons présenter les cartes résultant du krigeage ainsi que les cartes de variance d'estimation correspondantes. Les réserves estimées lors de krigeage font l'objet d'une présentation sous forme de tableaux dans lesquels les surfaces minéralisées sont comptabilisées pour chacune des catégories des teneurs de coupeurs.

L'objectif de notre travail est de faire une étude d'estimation sur les réserves en phosphate de gisement de Kef Es Sennoun par la méthode géostatistique.

V.1. Grille de krigeage

Une fois la modélisation variographique terminée, l'étape suivante consiste à déterminer le support géométrique sur lequel le krigeage sera effectué. La précision voulue est due non seulement à la qualité du matériel à utiliser pour la modélisation, mais aussi au nombre de points à estimer. Cela nous oblige à minimiser le pas (inter distance) de la grille.

Dans notre cas d'étude, nous avons travaillé sur une grille régulière horizontale (2D) qui s'allonge sur tout le gisement de Kef Es Sennoun (d'une superficie de 2.1 km²).

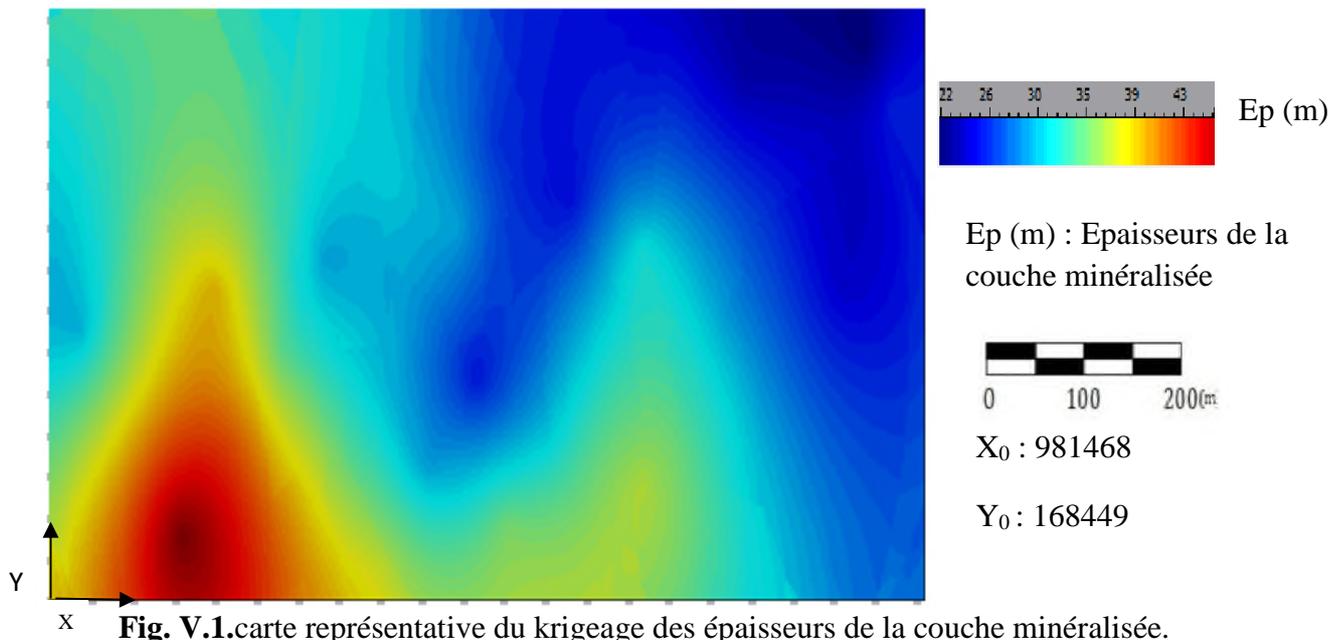
La maille unitaire de cette grille a pour dimension de 3*3 m², et elle comprend au total (932*521) points, donc il y aura en tout 485573 points à kriger.

V.2. Krigeage 2D, résultat et interprétation

Après avoir établi les modèles expérimentaux de variogrammes, nous avons utilisé leurs propriétés (la portée « a », le palier C(0) et l'effet de pépité), afin de procéder au krigeage ordinaire sur les données de terrain, et d'obtenir par la suite une estimation globale du site accompagnée de la carte de la variance d'estimation.

V.2.1. Cartes des épaisseurs de la couche minéralisée

La carte (Fig. V.1) présente les épaisseurs de la couche minéralisée du gisement de Kef Es Sennoun avec une tendance des épaisseurs en direction Nord-Est et Sud-Ouest. Les épaisseurs variaient de (21 à 33) m dans la direction Nord-Est, et de (37 à 46) m dans le coté Sud-Ouest.

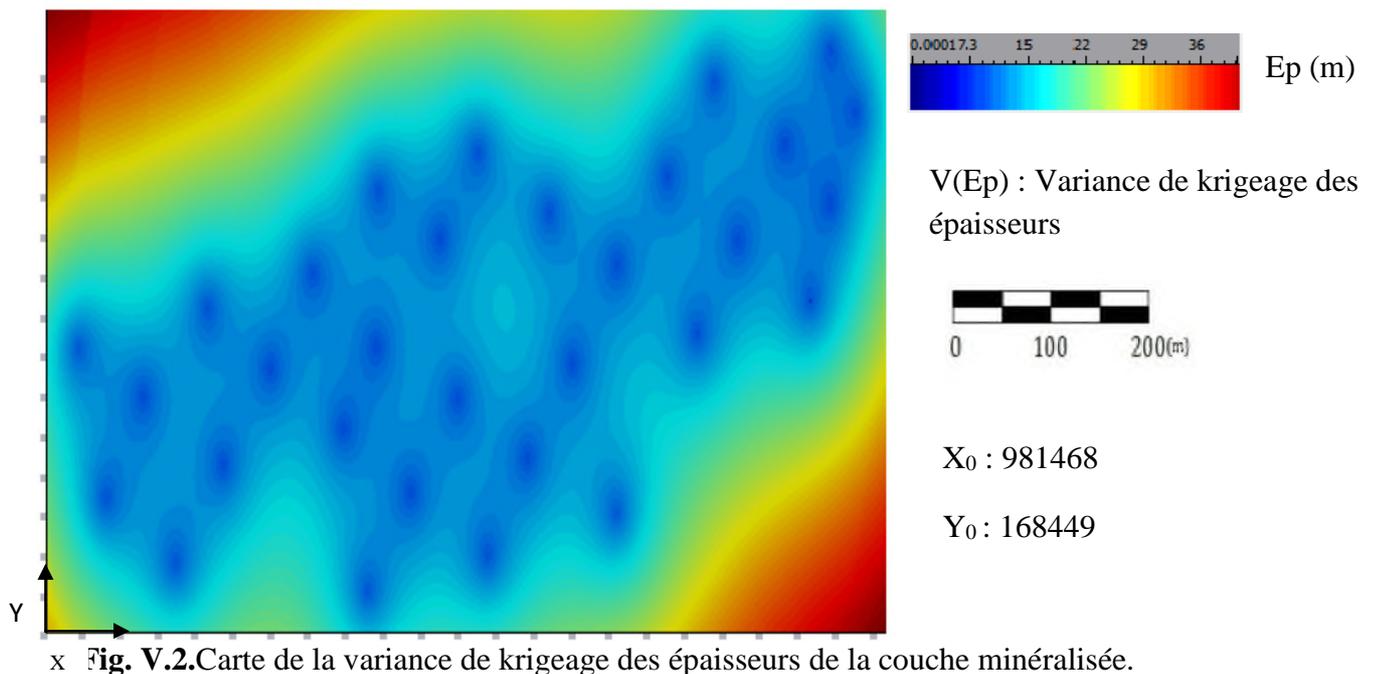


V.2.2. Variance de krigage pour les épaisseurs

Rappelons que la variance maximale du variogramme des épaisseurs est de 32.

La (Fig. V.2) montre une variance de krigage maximale ne dépassant pas 19, donc inférieure à 32 ce qui montre une très bonne estimation.

Dans la zone étudiée, on remarque une variance inférieure à 19, là où on a des épaisseurs acceptables pour l'exploitation, ce qui donne des éclaircissements sur la qualité de la carte estimée par krigage.



V.2.3. Cartes de répartition des teneurs en P_2O_5

La (Fig. V.3) représente une carte globale de la répartition spatiale des teneurs. Cette carte nous permet de voir l'ensemble des endroits où les teneurs sont élevées, ce qui justifie la continuité des travaux d'exploitation dans ces endroits.

Sur la figure, nous remarquons une distribution des teneurs qui atteint et dépasse les 27% dans la direction Sud-Ouest ainsi que vers le nord, et dans la direction Nord-Est les teneurs dépassent les 25% allant en approximative vers les 27%.

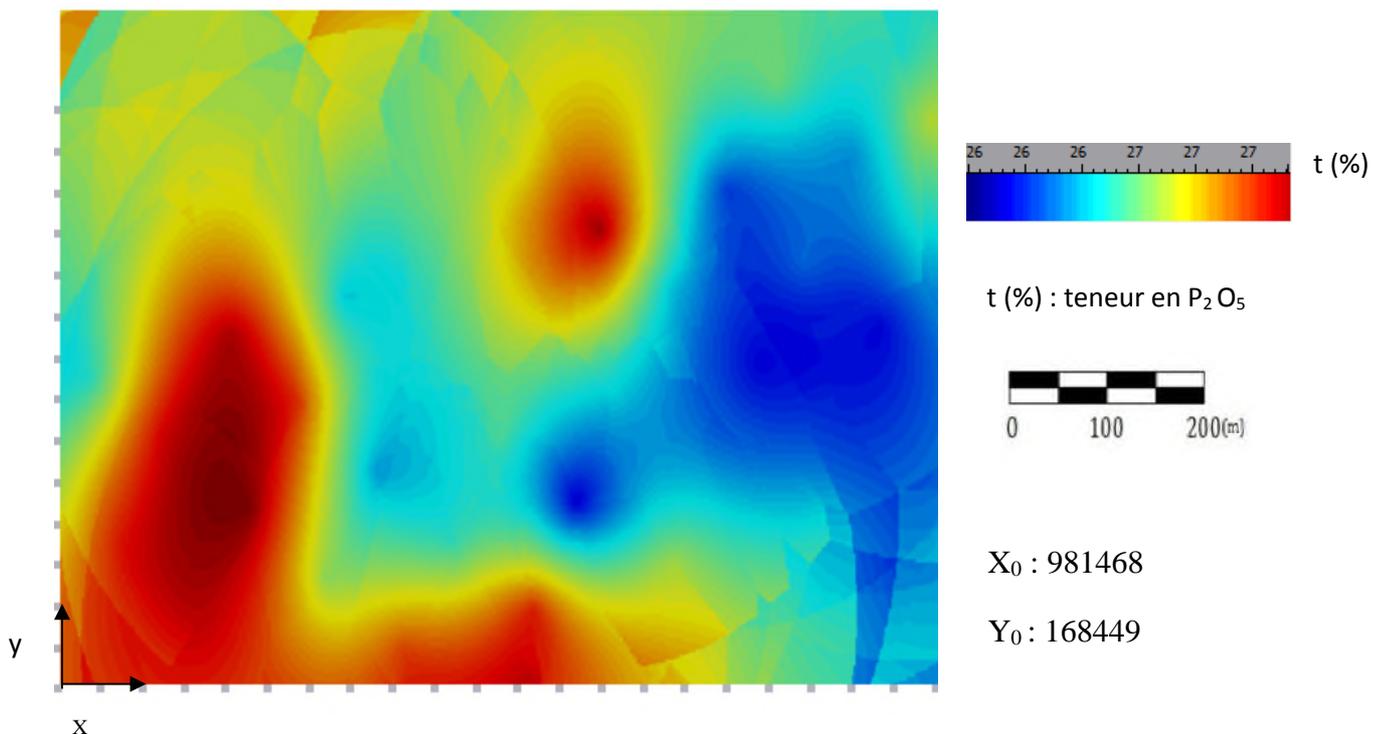


Fig. V.3. Carte représentative du krigage final des teneurs en P_2O_5 , montrant la répartition de la minéralisation.

V.2.4. Variance de krigage pour les teneurs

Rappelons que la variance maximale de variogramme des teneurs est de 0.62.

La (Fig. V.4) montre une variance de krigage maximale ne dépassant pas 0.4 et donc inférieure à 0.62, ce qui montre une très bonne estimation. Dans la zone étudiée, on remarque une variance d'estimation inférieure à 0.4, là où on a des teneurs acceptables et justifier la continuité des travaux d'exploitation.

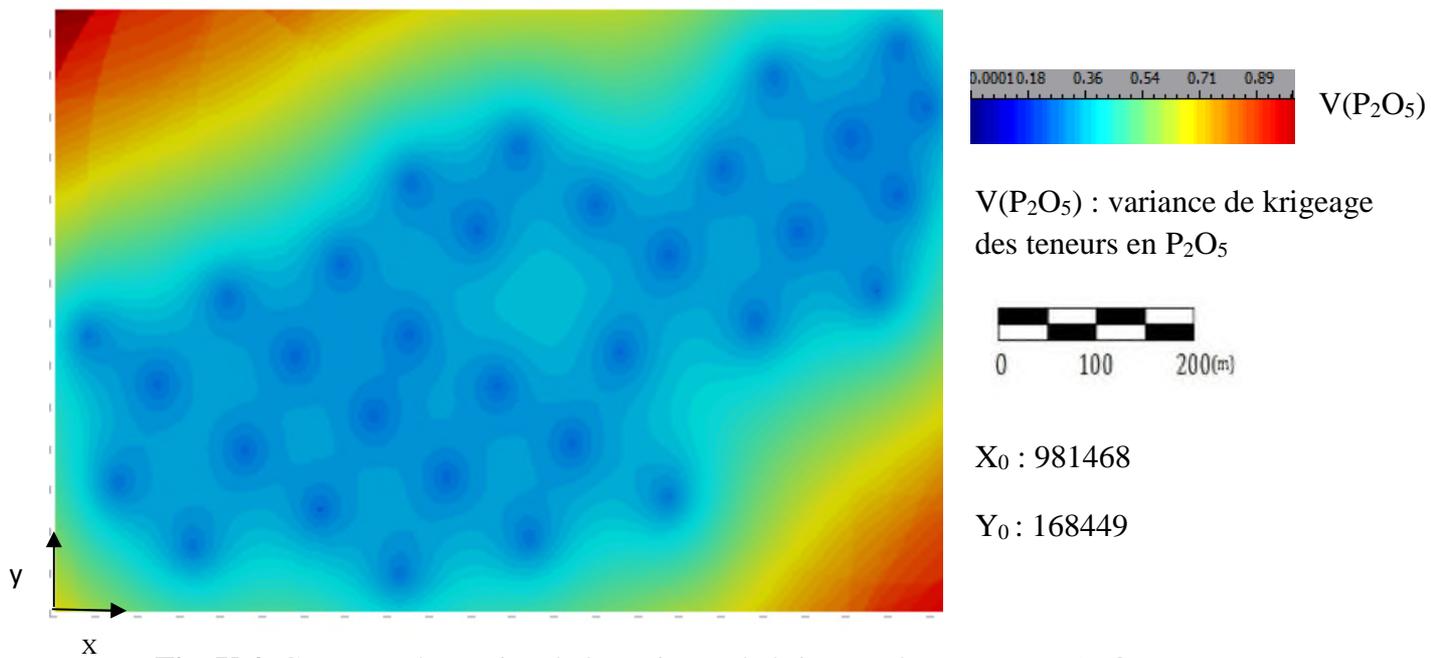


Fig. V.4. Carte représentative de la variance de krigage des teneurs en P₂O₅.

Remarque :

Les figures (V. 2 ; V.4) présentent la variance σ^2 sur la même grille de l'endroit krigé, qui va nous permettre de juger la qualité des informations utilisées dans la procédure de calcul, et de voir les endroits où la variance est élevée (entourage des périmètres). Ceci peut s'expliquer par le manque d'informations (manque d'échantillonnage) dans ces endroits.

V.3. Résultats de calcul des réserves du gisement de Kef Es Sennoun

Afin de faire une estimation des réserves en phosphate du gisement de Kef Es Sennoun par la méthode géostatistique, nous avons suivi plusieurs étapes résumées dans le tableau (V.1).

Comme première étape, nous avons fixé les teneurs de coupures, comme étant des catégories pour signaler les réserves estimées pour chacune des teneurs limitées. Pour simplifier les calculs nous avons présenté les sommes des teneurs, des épaisseurs ainsi que les variances de krigage correspondantes.

Tableau V.1. Analyses des résultats des cartes krigées (cartes des teneurs et des épaisseurs)

Teneur de coupeur(%)	somme des épaisseurs(m)	Var épaisseurs(m)	somme des teneurs (%)	Var teneur (%)	Cumul épaisseurs(m)	Cumul teneur(%)
27%	2254156,37	12,68107069	1635581,881	0,326101529	2254156,37	1635581,881
26%	11431473,59	17,06380173	10045838,08	0,421256936	13685629,96	11681419,96
25%	1278124,23	14,30029201	1189085,001	0,36343799	14963754,19	12870504,96

On peut déduire que les variances moyennes maximales du krigage sont de 17.06 pour les épaisseurs, et de 0.42 pour les teneurs en phosphate, avec une teneur de coupure de 26%.

Tableau V.2. Calcul des réserves en phosphate en fonction des teneurs de coupures.

N° Surfaces	Ep moy	Tn moy	Surface minéralise	volume	Tonnage (en P ₂ O ₅ 100%)	Tonnage en phosphate
60 255	37,41	27,14	542 295,00	5 506 881,73	13 161 447,33	17 767 953,89
439 683	31,13	26,57	957 147,00	32 723 765,06	78 209 798,49	105 583 227,96
485 569	30,82	26,51	4 370 121,00	35 696 670,36	85 315 042,17	115 175 306,93

Dans le tableau (V.2), nous avons estimé les réserves et les surfaces minéralisées respectivement, à partir de l'estimation des épaisseurs moyennes et par la détermination du nombre de surfaces pour chaque catégorie.

Une grille régulière d'une maille de 3x3 m² a été utilisée pour le krigage des teneurs et des épaisseurs. Chaque point de cette grille représente une surface de 9 m² et une épaisseur de la couche. Le volume de la minéralisation est le produit des épaisseurs par le nombre de surfaces minéralisées et par le pourcentage de leurs teneurs équivalentes.

Le tonnage en phosphate (100%) est le produit du volume par la masse volumique de P₂O₅. ($\rho=2.39 \text{ t/m}^3$)

Pour FERPHOSE, le concentré (le produit marchand) est de 60% donc : le tonnage pour une teneur de coupure de 26.57% est de 105 Mt.

V.4. Présentation graphique des réserves en phosphate

Dans le but d'avoir une information complète et claire, nous avons tracé des graphes (Fig. V.5 et 6). Dans le premier graphe (diagramme circulaire), nous a permis d'évaluer des réserves en phosphates en fonction des teneurs de coupure.

Tableau. V.3. Représentation des teneurs de coupure et leurs tonnages en Phosphate

teneur en phosphate	Tonnage en phosphate
27%	17767953.89
26%	105583228
25%	115175306.9

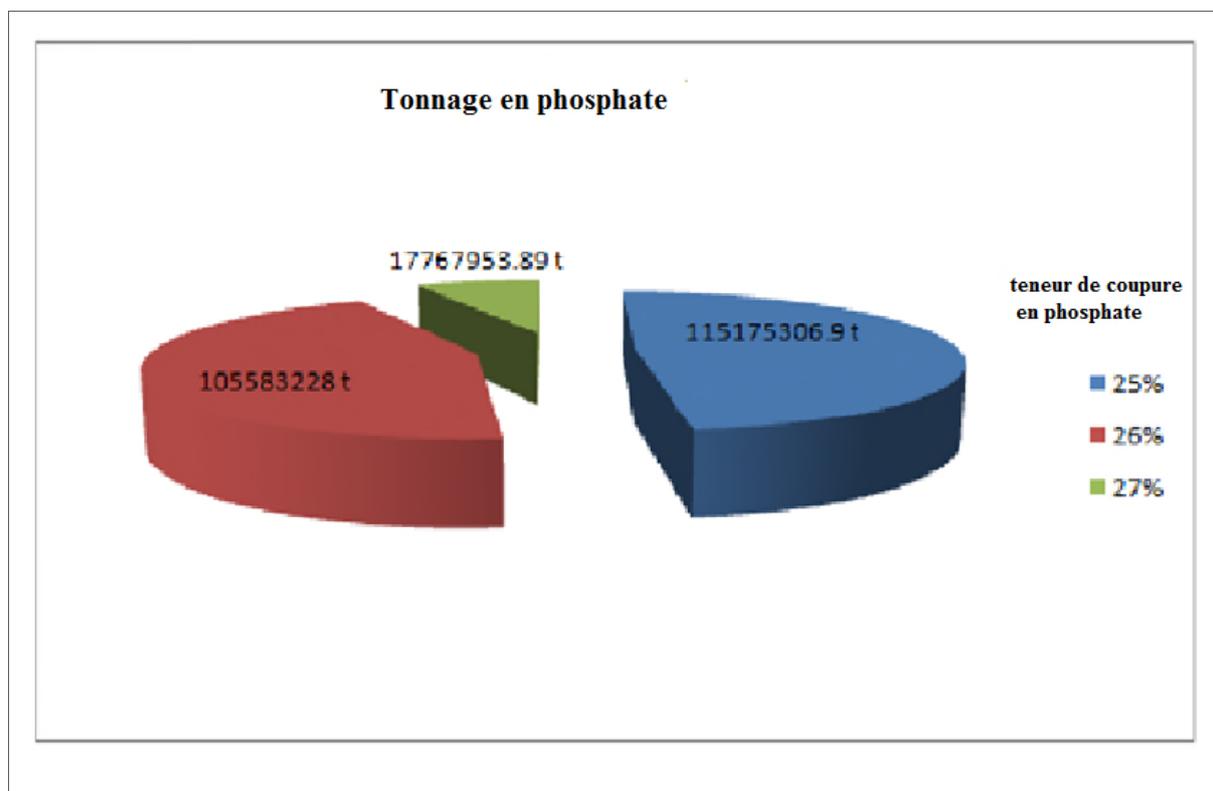


Fig. V.5. Représentation graphique de l'évolution des réserves en fonction des teneurs de coupures considérées.

Dans le deuxième graphe (histogramme), nous présentons les quantités de teneur estimée pour chaque intervalle de 1%. Cela montre que pour une teneur de coupeur de 26%, les réserves sont de 76% équivalent à 87815274.04 tonnes, et de 8.5% et 15.5% respectivement pour le teneur de coupeur de 25% et 27%, équivalent à un tonnage de 27360032.86 tonnes.

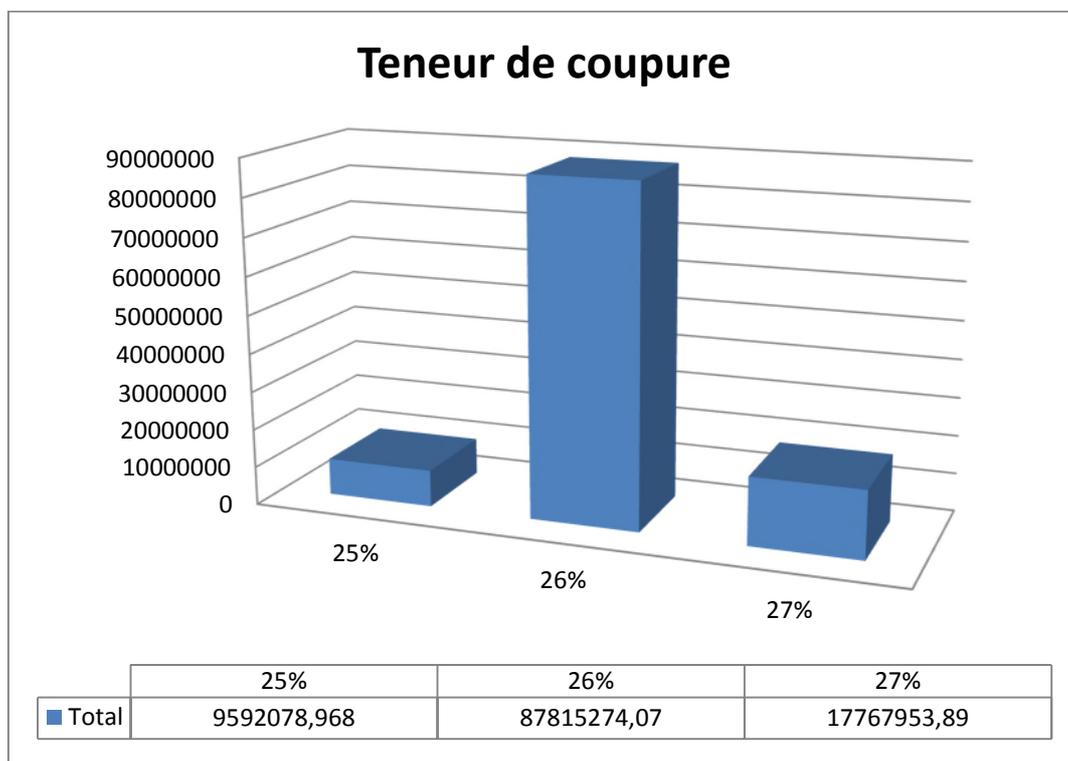


Fig. V.6. Représentation graphique des pourcentages des réserves en fonction de leurs teneurs en phosphate

Total : tonnage en phosphate

V.5. Les réserves estimées en utilisant la méthode géostatistique (krigeage)

Dans le tableau (V.4) nous présentons les résultats quantitatifs de notre évaluation de réserves en phosphate de gisement de Kef Es Sennoun et celle de l'EREM et la BRGM .

Tableau V.4. Tableau comparatif des résultats d'évaluation

Évaluateur	Resserves géologiques(Mt)	Teneur de coupure(%)	Teneur moyenne(%)	Tonnage en phosphate(Mt)
EREM (1985-87)	370	26	26.37	97
BRGM (1993)	317	26	26.53	84
Présente étude (2015)	397	26	26.57	105

Les études de l'EREM et BRGM évaluent des réserves en phosphate avec une différence de 13Mt, c'est-à-dire 15% de l'évaluation de BRGM. Cette quantité ne peut pas être négligeable.

Dans le but d'orienter une telle exploitation des données, il est indispensable de procéder à une évaluation précise des réserves afin d'éviter une surestimation ou une sous-estimation de ces dernières.

L'utilisation des méthodes classiques (interpolation linéaire entre les sondages) pour l'évaluation des réserves génère des résultats plus au moins discutables. Néanmoins, une estimation géostatistique basée sur la corrélation entre les données des sondages, en plus des cartes de variance de krigage, illustrant la qualité d'estimation, peut remédier à ce problème. Cependant, la méthode des polygones utilisée par l'EREM, n'utilise dans l'interpolation que des observations localisées assez près du point de prévision [3]. Ce type de méthodes (estimation par partitionnement de l'espace) ne permet pas de juger de la qualité des valeurs estimées.

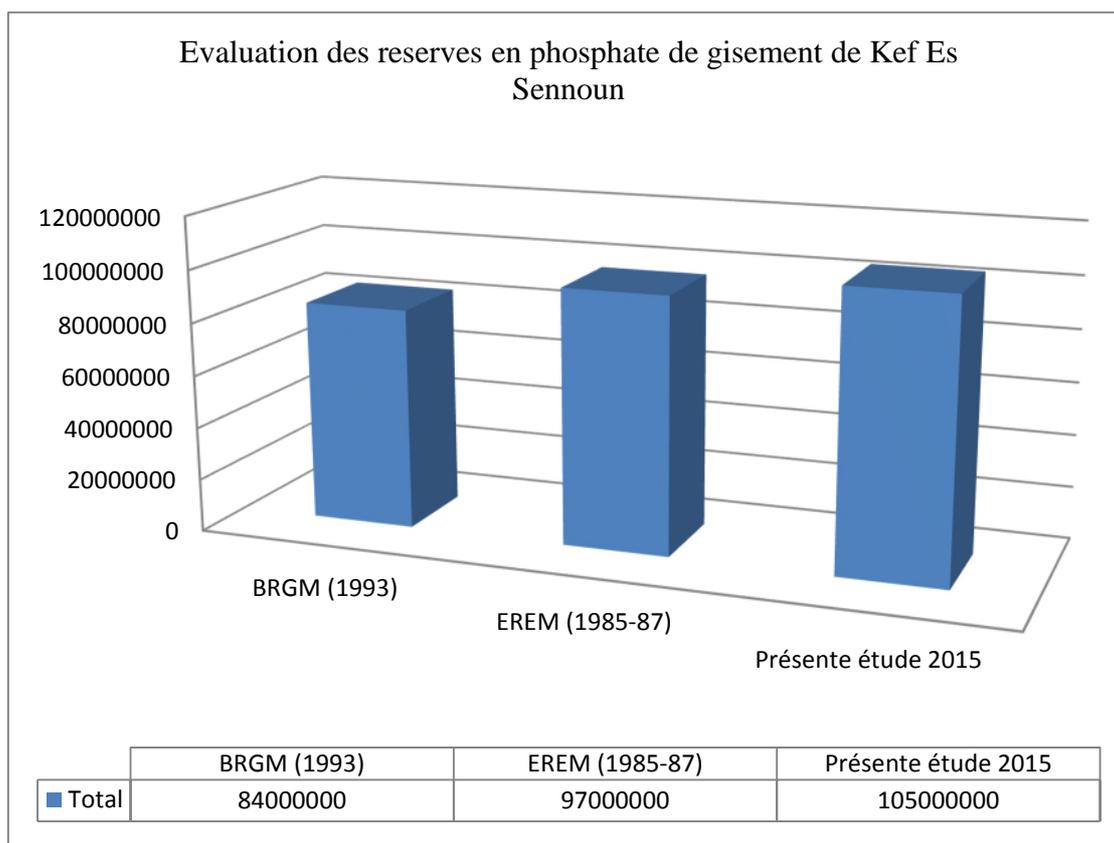


Fig. V.7. Représentation graphique des réserves en phosphate estimées par les différentes études effectuées sur le gisement de Kef Es Sennoun

Le graphe histogramme (V.7) présente une comparaison entre les réserves estimées par notre étude et, les études de l'EREM et BRGM. En effet, nous avons utilisé les mêmes données avec une approche de modélisation géostatistique. Le krigeage ordinaire a donné une réserve estimée à 105 Mt, avec une teneur de coupure de 26% et une teneur moyenne de 26.57%.

Nos résultats semblent proches des résultats obtenus par les évaluations de l'EREM avec une différence de 8Mt.

Conclusion

A la fin de ce chapitre on est arrivé à dire que l'utilisation des méthodes classiques (interpolation linéaire entre les sondages) pour l'évaluation des réserves génère des résultats plus au moins discutables. Néanmoins, une estimation géostatistique basée sur la corrélation entre les données des sondages, en plus des cartes de variance de krigeage, illustrant la qualité d'estimation, peut remédier à ce problème.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre étude est d'estimer les réserves en phosphate de gisement de Kef Es Sennoun par la méthode géostatistique.

La géostatistique est une méthode d'interpolation spatiale basée sur le krigeage. Cette méthode est précédée par une étude statistique et variographique. La quantité et la précision d'une estimation reposent sur la validité et la cohérence d'une étude variographique. Cette dernière tient en compte à la fois de la géométrie et la précision des échantillons, ainsi que des caractéristiques de la régionalisation.

La fonction qui suit est le krigeage qu'assure la valorisation et l'implantation des cartes de teneurs et des épaisseurs, ainsi que les cartes de variances d'estimation pour l'évaluation des réserves.

Dans notre cas d'étude, vu le manque de donnée et d'information issue de sondage carottées, la modélisation en trois dimensions (3D) n'a pas été concluante et les estimations obtenues par ce krigeage est de mauvaise qualité. Ce qu'est nous a obligés de travailler avec un krigeage de deux dimensions (2D).

Le krigeage utilisé est le krigeage ordinaire (le plus utilisé en géologie). Ce dernier nous a permis de consolider les évaluations antérieures des réserves, qui est justifié par des cartes de variances de krigeage. Ces cartes peuvent indiquer le taux d'utilisation des données de terrain.

Enfin, la cartographie du gisement, la manipulation des cartes obtenues, ainsi que l'évaluation des réserves, en utilisant des méthodes géostatistiques, peuvent être considérés comme étant des outils d'aide à la prise de décision au profit des exploitants, ce qui contribue à l'amélioration des conditions de travail tout en permettant le contrôle de l'exploitation et du traitement des minerais.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- **BAILLARGEON S, 2005.** Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. [3]
- **CAUSEUR D, 2006.** Modélisation géostatistique. [7]
- **DESPAGNE Wilfried; 2005-2006.** Méthodes géostatistique pour l'interpolation et la modélisation en 2D/3D des données spatiales. [2]
- **FERKOUS Haroune, 2007.** Interprétation géostatistique des données semi quantitatives d'une campagne de prospection géochimique des polymétaux : cas du district de Batna (Algérie orientale) Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister. [4]
- **FERPHOS ,2009.** Synthèses géologiques du gisement de Djebel Onk Nord. [8]
- **KONESHLOO Mohammad, 2007.** caractérisation, estimation et valorisation de gisements d'argiles kaoliniques du bassin des charentes. [6]
- **MAGASSOUBA Moussa Balla et ABAKAR MAHAMAT ALI. ; 2009.** Rapport de stage de fin d'étude. [17]
- **MARCOTTE D, 2000.** Traitement statistique des données géologiques. Cours GLQ3402 (géostatistiques). Ecole Polytechnique de Montréal. (chapitre2, chapitre7, chapitre5. [1]
- **MUTABAZI J.B. et Mr. VANSNICK A, 1991,** Contribution à la géostatistique des gisements miniers. [15]
- **MATHERON G, (1962).** Traité de géostatistique appliqué. [5]
- **MAZARI Messaoud, Juin 2012.** Etude géostatistique des ressources minières : exemple d'une mine en cours d'évaluation Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister. [9]
- **MEZGHACHE A. Hamid.** La géostatistique linéaire appliquée. [10]
- **NICOLAS R, 2006.** Programme S-GeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software) Version 1.4. [16]
- **PRIAN J.P** avec la collaboration de ph. Cortial (1993)-Etude de développement du gisement de phosphate de Djebel Al Onk (Algérie) rapport d'expertise géologique ; Rap. BRGM. [14]
- **SAADOUNE Abderrahmane, 2010.** Projet de Fin d'Études, Caractérisation et enrichissement du minerai phosphaté de Djebel Onk (W. TEBESSA). [11]

Références bibliographiques

- **WACKERNAGEL Hans**, Déc. 2010. Géostatistique et assimilation séquentielle de données. [12]
- **ZERAIBI El Hadj, Mr. SMAILI Hakim**.2011. Projet de Fin d'Etudes, Caractérisation de la matière organique dans la région du Djebel Onk (Tébessa). [13]

Annexes

Annexes

Annexes I :

Tableau 1 : tableau résumant les données des teneurs des épaisseurs des couches ainsi que leur coordonnée.

sondages N°	X(m)	Y(m)	Z(m)	Teneurs (p2o5)%	Epaisseurs(m)
1	981568	169163	740,82	25,98	28
2	981659	168784	724,04	27,2	37,1
3	981785	169040	733,3	27,27	35,9
4	981893	168620	715,42	27,25	46
5	981999	169264	749,78	27,5	39,2
6	982052	168868	731,91	27,56	40
7	982209	169110	745,4	27,32	32
8	982287	168716	723,18	26,25	999
9	982350	169350	758,2	25,84	28
10	982451	168957	732,67	25,8	31,6
11	982568	169559	783,04	26,47	31
12	982563	169165	743,66	26,24	30
13	982677	168798	734,24	26,12	28,3
14	983066	168885	733,49	25,05	30
15	982773	169435	781,5	26,56	30,7
16	982834	169035	751,87	26,63	24
17	982901	169655	803,69	26,55	26
18	982533	168549	719,24	27,26	35,9

19	983139	169503	781,72	27,94	24,5
20	983216	169122	753,44	26,21	30,8
21	983364	169370	769,95	26,03	32,8
22	982933	168640	728,91	27,56	35
23	983531	169595	785,52	25,52	27,4
24	983632	169197	772,1	25,64	29
25	983688	169833	811,48	26,71	23,7
26	983768	169431	783,78	26,21	27,2
27	983364	168747	752,23	26,79	36
28	983923	169674	796,79	25,9	25,5
29	984009	169280	772,06	25,6	24,4
30	984076	169912	802,98	26,11	21,8
31	984076	169524	788,82	26,3	24,6
32	984163	169751	791,64	26,95	27,7

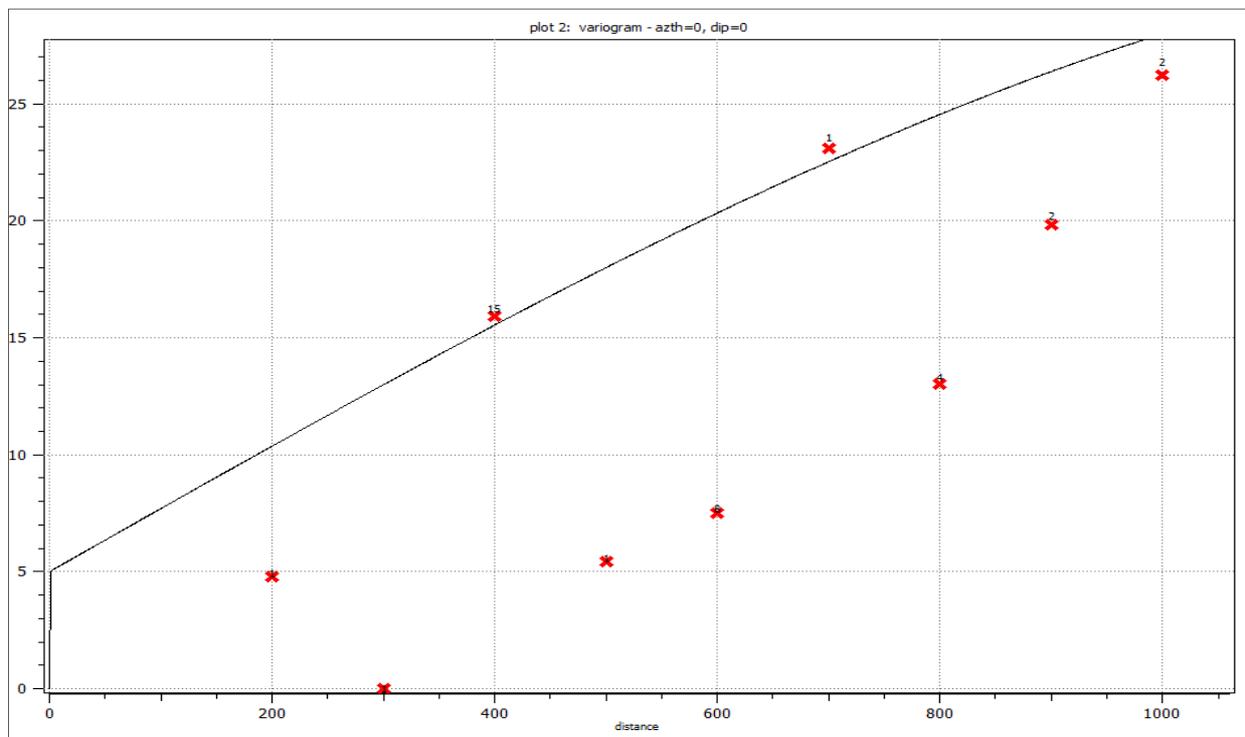
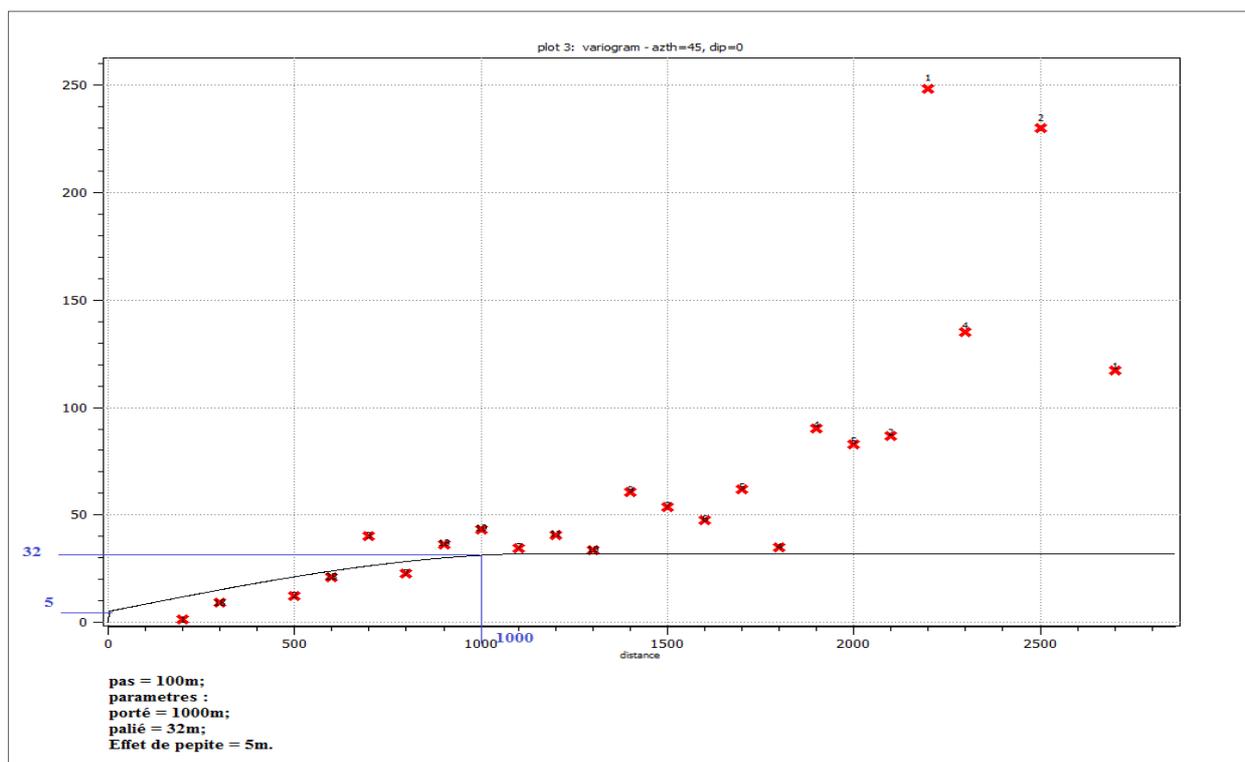
N.B : la valeur 999 veule dire qu'il y a pas de donnée dans ces points.

Annexe II : Tableau résumant les données de la base de l'échelle

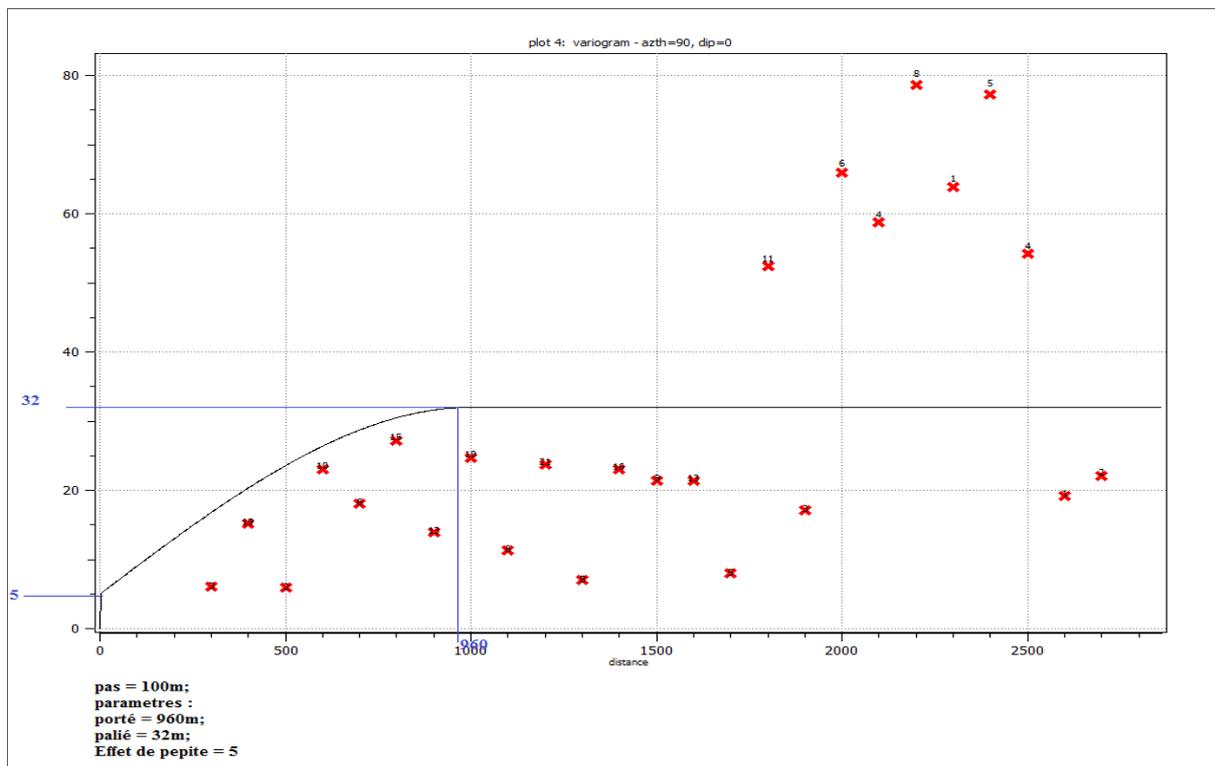
X	Y
981500	168500
981500	168600
981500	168700
981500	168800
981500	168900
981500	169000
981500	169100
981500	169200
981500	169300
981500	169400
981500	169500
981500	169600
981500	169700
981500	169800
981500	169900
981600	168500
981700	168500
981800	168500
981900	168500
982000	168500
982100	168500
982200	168500
982300	168500
982400	168500
982500	168500
982600	168500
982700	168500
982800	168500
982900	168500
983000	168500
983100	168500
983200	168500
983300	168500
983400	168500
983500	168500
983600	168500
983700	168500
983800	168500
983900	168500
984000	168500
984100	168500

Annexe III :

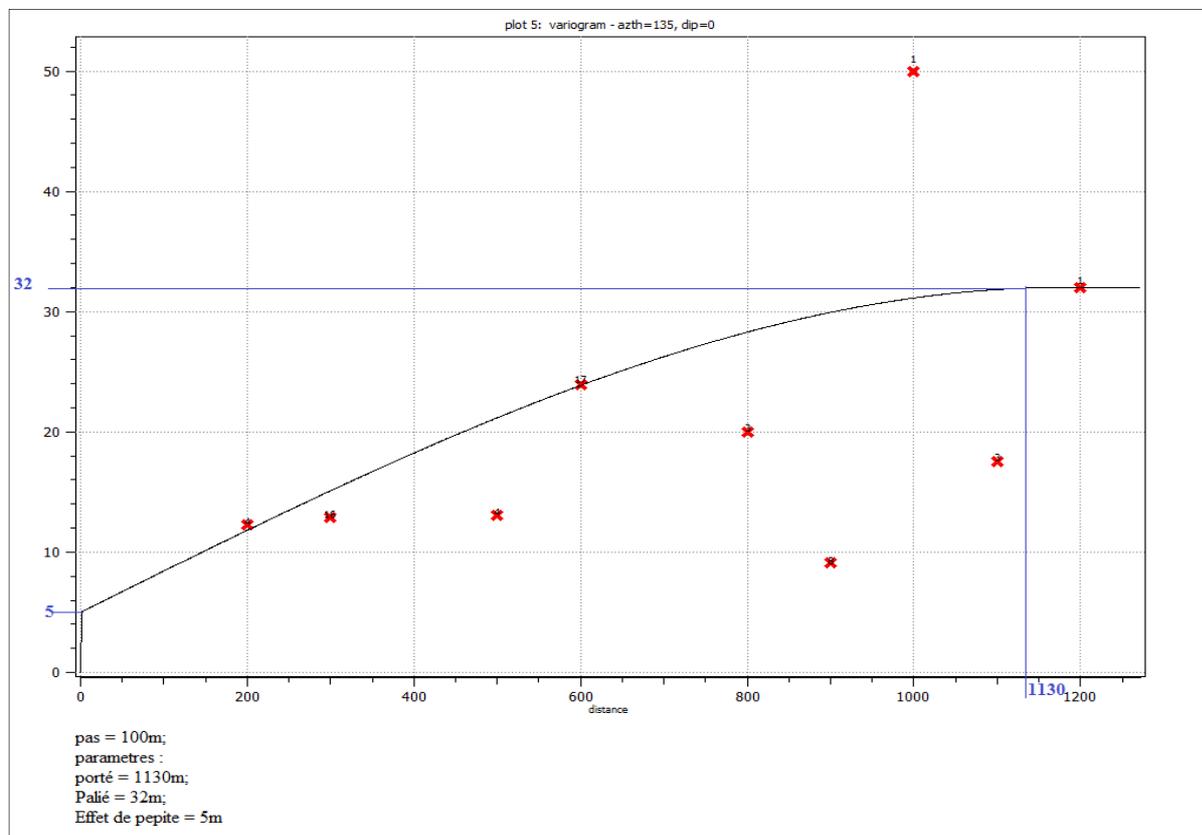
1. Variogrammes directionnels des épaisseurs de la couche minéralisée :

a. 0° par rapport à l'axe azimutal :b. 45° par rapport à l'axe azimutal :

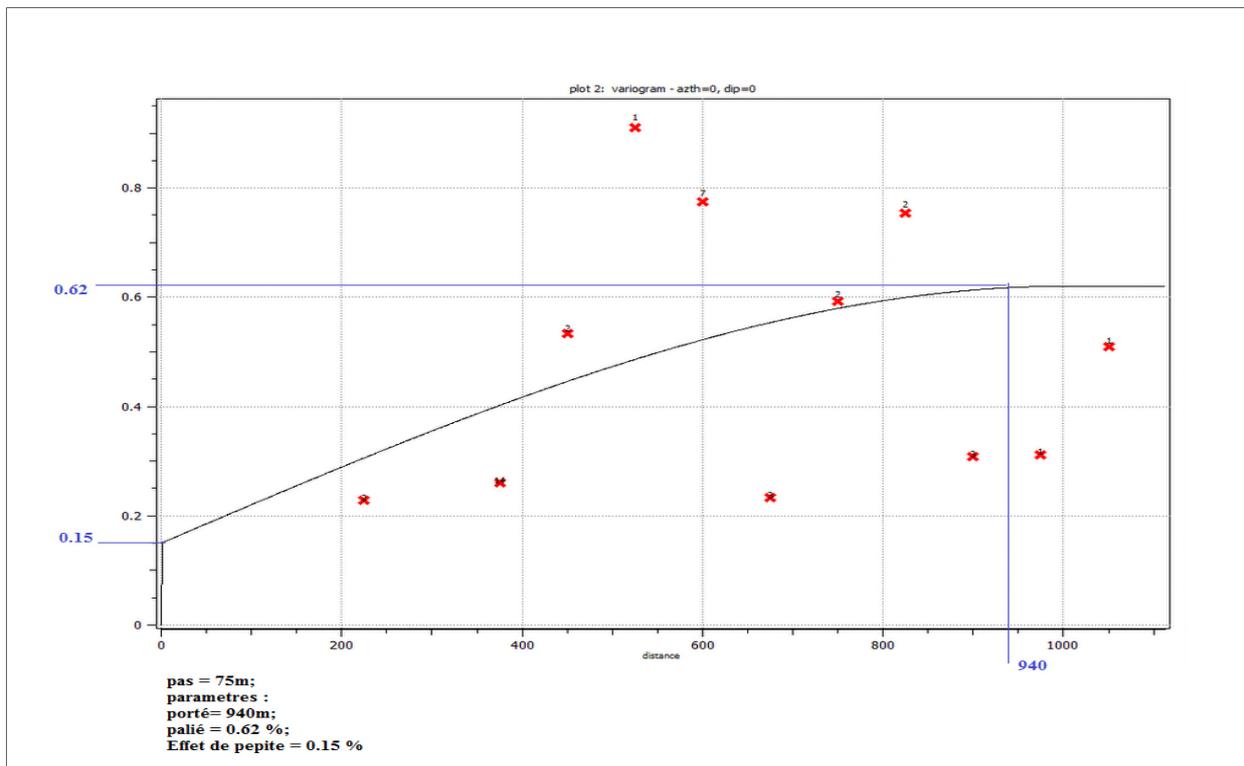
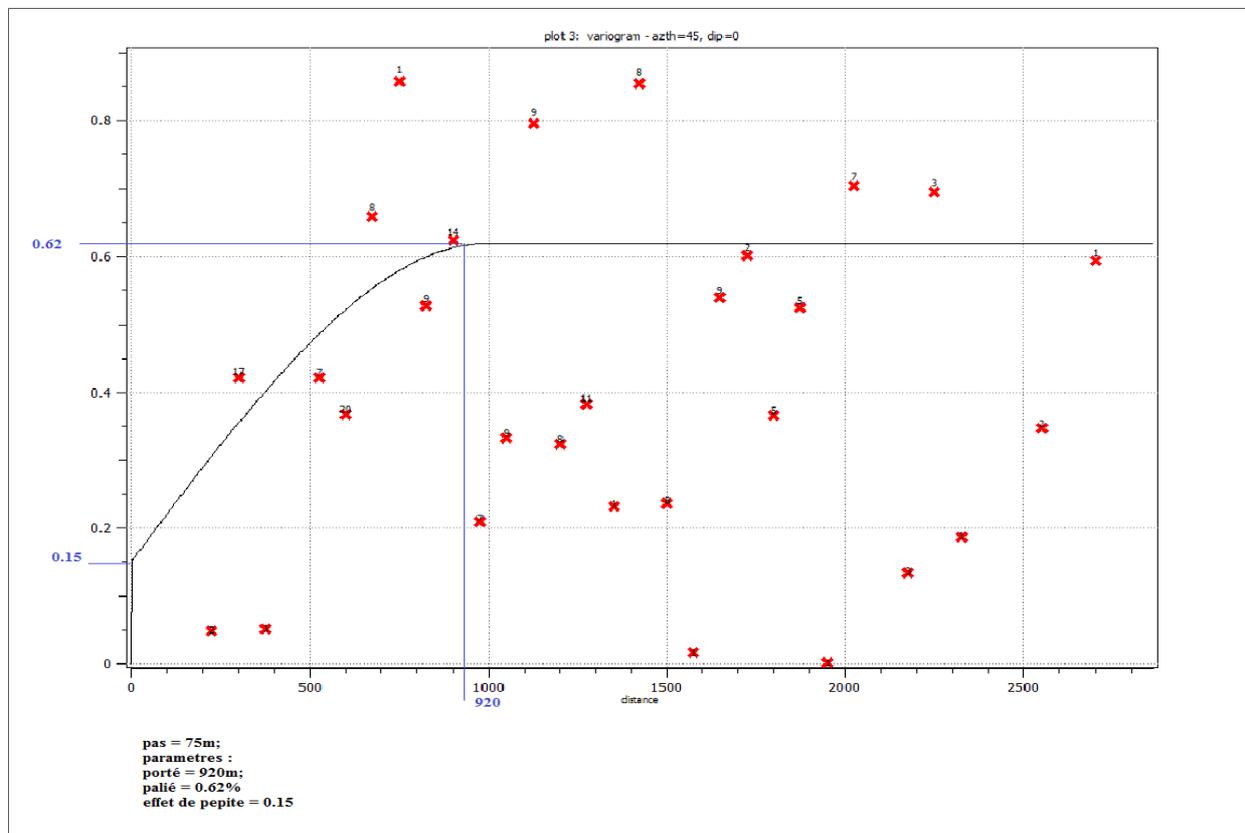
c. 90° par rapport à l'axe azimutal:



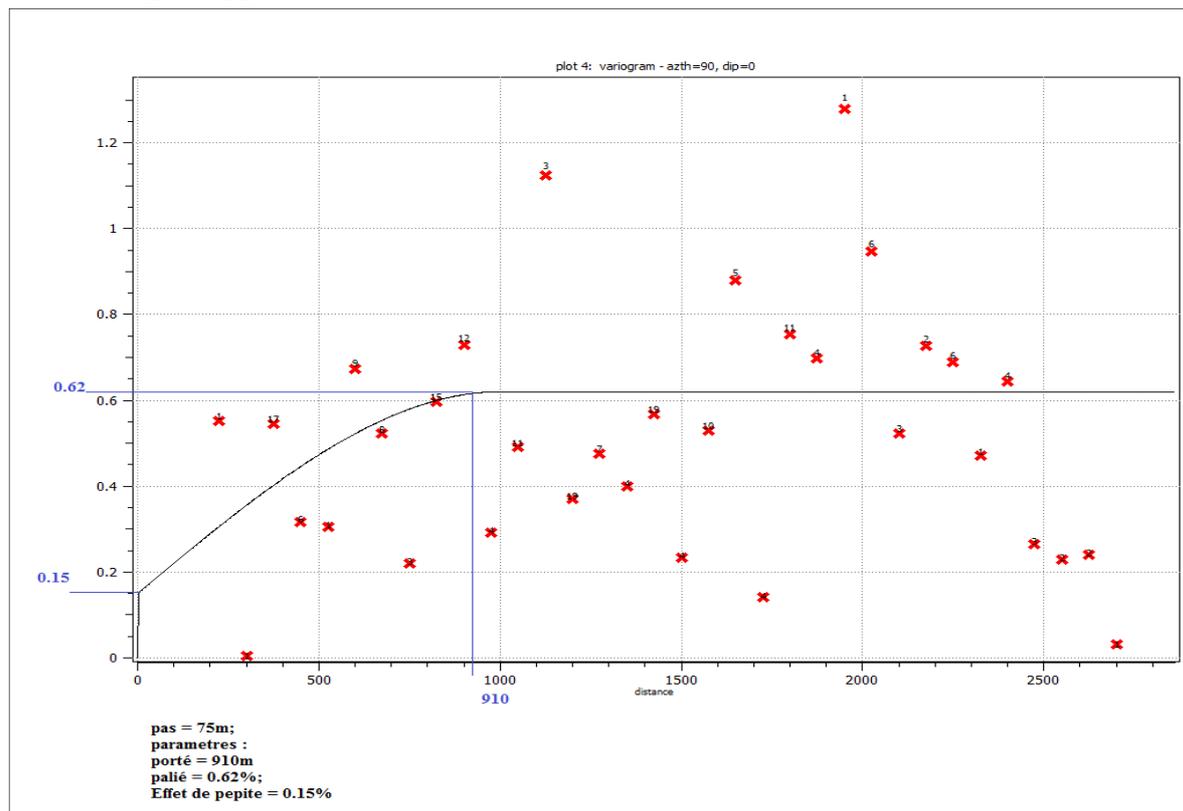
d. 135° par rapport à l'axe azimutal :



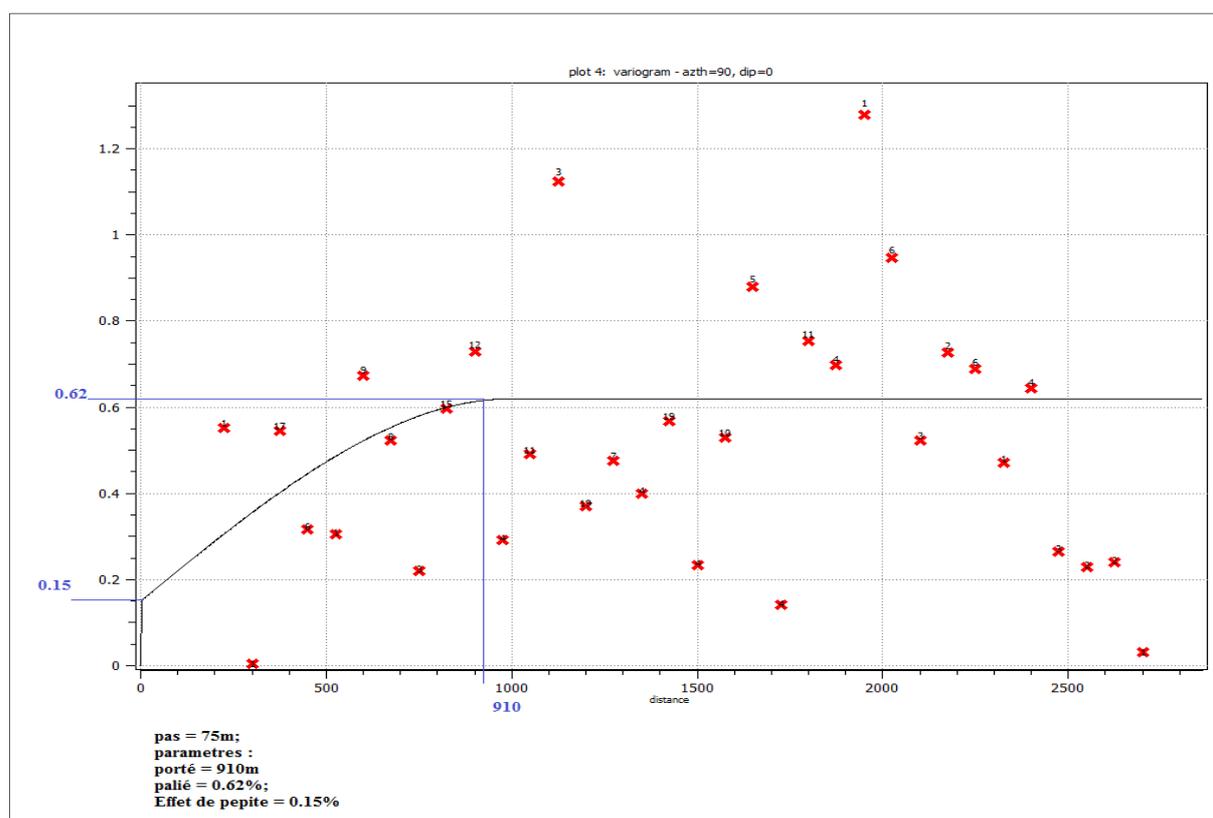
2. Variogrammes directionnels des teneurs en phosphate :

a. 0° par rapport à l'axe azimutal :b. 45° par rapport à l'axe azimutal :

c. 90° par rapport à l'axe azimutal :



d. 135° par rapport à l'axe azimutal :



résumé

Résumé

Le projet minier passe par plusieurs étapes, et l'étape la plus importante est celle de l'estimation des réserves qui montre la rentabilité du gisement afin de justifier la continuité ou l'arrêt des travaux d'exploitation.

La géostatistique fournit un outil rationnel pour interpréter l'information disponible et évaluer cette variabilité.

Notre étude consiste à estimer les réserves de gisement de Kef Es Sennoun par la méthode géostatistique.

La géostatistique plus particulièrement le krigeage ordinaire, pour la modélisation de la variabilité spatiale entre sondages (réalisé dans le cadre de la cartographie) et l'évaluation des réserves de gisement de Kef Es Sennoun.

Mots clés: Gisement, krigeage, krigeage ordinaire, géostatistique, variance, Kef Es Sennoun, Phosphate, P_2O_5 (pentoxyde de phosphore).

ملخص

مشروع استغلال المناجم يمر بعدة مراحل , المرحلة الأهم هي تقدير الاحتمالات التي تبين إمكانية مواصلة أو عدم مواصلة المشروع. إن الطرق الإحصائية للمتغيرات الجيولوجية تتوفر على طرق عقلانية في تفسير المعلومات المتوفرة لدينا, وتقدير هذه التحولات في المتغير.

دراستنا تعمل على تقدير الاحتمالات من الفوسفات في منجم كاف السنون اعتمادا على الطريقة الإحصائية. الطريقة الإحصائية التي تدعى الكريجاج العادي, لموافقة التغيرات المكانية للعينات (التي تهدف إلى رسم الخرائط المنجمية) وتقدير المخزون الذي يتوفر عليه منجم كاف السنون.

الكلمات المفتاحية: منجم, الكريجاج, الكريجاج العادي, الإحصاء في المتغيرات الجيولوجية, المتغير, كاف الفوسفات خامس اكسيد (P_2O_5) السنون, فوسفات,

Abstract

The mining project goes through several stages, and the most important step is the reserve estimate which shows the deposit profitability to justify the continuation or discontinuation of mining exploitation.

The geostatistic methods provide a rational tool to interpret information available and to evaluate this variability.

Our study is to estimate the deposit's reserves Kef Es Sennoun by geostatistics method.

Geostatistic more particularly the ordinary kriging for the modeling of space variability between the surveys (realized within the framework of the cartography) and the evaluation of deposit reserves of the Kef Es Sennoun.

Key words: deposit, kriging, ordinary kriging, geostatistic, variance, Kef Es Sennoun , Phosphate, P_2O_5 (phosphorus pentoxide).