



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines

Option : Exploitation Minière

Présenté par

M^{elle}: MOUSSAOUI NACERA.

M^r: MOUSSAOUI BILLAL.

Thème

*Etude géostatistique des ressources minières :
Cas du gisement de phosphate sus à Bled El
Hadba (w. Tébessa).*

Soutenu le /07/2017 devant le jury composé de:

Président:Mr.AIT HABIB Z.

U.A.M.Bejaia.

Promoteur:Mr MAZARI M.

U.A.M.Bejaia.

Examineur:Mr BOUKARM R.

U.A.M.Bejaia.

Année Universitaire: 2016-2017



REMERCIEMENTS

On remercie ALLAH qui nous a donné le courage et la force pour compléter ce modeste travail ;

*J'exprime ma gratitude et ma reconnaissance envers
Mon encadreur M^R MAZARI MESSAOUD de m'avoir encadré.*

*Un grand merci à AIT HABIB Z qui a accepté de présider la
soutenance de ce projet de fin d'étude.*

*J'exprime ma gratitude à BOUKARM R qui accepté la tâche
d'examiner ce travail.*

*Mes remerciements vont également à tous les membres du
département des mines ;*

*Je remercie tous les cadres et les travailleurs du complexe minier de
Djebel Onk*

*Je voudrais présenter mes sincères remerciements à
M^R.KADIR.ET.M^R. ALI MOHAMED. ET.M^{elle}. TAHRI TORKIA.
ET.Mme. BOUTARFIF LEILA.*

*pour leurs aide précieux et leurs encouragements durant la période
de stage.*

*Nous remercions vivement, pour son aide, Mme SAHRI
LEILA. ET.M^R.RABAH KCHICHED, les enseignants du département
hydrocarbure de l'université kasdi merbah, ouargla .*

*Nous remercions chaleureusement M^{elle} RIMA et M^{elle} MINA et M^R
abd errezak benchebra.*

*Vers la fin, Je tient à remercier toute personne qui a participé de
près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



Dédicace

Je dédie ce modeste travail en première lieu La femme la plus effectueuse et la plus douce au monde l'ange le plus tender qui a été toujours pour moi une source d'amour, de pitié et d'espoir, ma chère mère Maadouda

A celui qui m'a toujours encouragée et soutenue moralement, mon très chère père Arezki

A mon frère Nacer

A mes sœurs siham nadia tita et leur enfants

Raouf Mouhamed Maria Mayasse

A tous les personnes de ma grande famille

A ma très chère et adorable Nawel

A tous mes Amis qui m'ont aidé dans ce mémoire

Et qu'ils ont fait partie dans ma réussite

Younes Hamza Habib Mazigh Lopi Abd errezak azro

Ali Badi Kiza Silia Kahina Mira Zahra Ouidad Firose

Tata Nadia

A toute la promotion de mine.

NACERA

Table des matières

Liste des tableaux.....	i
Liste des figures	ii
Liste des abréviations	v
Introduction générale	1
Chapitre I : Géologie de gisement Bled El Hadba	
I.1. Introduction	2
I.2. Présentation du secteur minier de Bir-El-Ater	2
I.2.1. Situation géographique.....	2
I.2.2. Lithostratigraphie de la région de Bir El Ater	3
I.2.2.1. Crétacé	3
I.2.2.2. Paléogène	4
I.2.3. Tectonique.....	5
I.2.3.1. Tectonique synsédimentaire	5
I.2.3.2. Tectonique post-Eocène moyen et anti-Miocène	5
I.2.3.2. Tectonique tardi-Miocène à Pliocène-Pléistocène.....	6
I.3. Géologie locale du gisement de phosphate de Bled El Hadba	6
I.3.1. Situation géographique.....	6
I.3.2. Lithostratigraphie du gisement.....	7
I.3.2.1. Paléocène	8
I.3.2.2. Yprésien.....	8
I.3.2.3. Miocène	8
I.3.2.4. Quaternaire	9
I.4. Aperçu Hydrologique.....	11
I.5. Caractéristiques climatiques de la région	12
I.5.1. Paramètres climatiques.....	12
I.5.1.1. Précipitation.....	12
I.5.1.2. Température.....	12
I.5.1.3. Humidité	13
I.5.1.4. Le vents.....	14
I.5.1.5. La neige	14
Conclusion	14

Chapitre II : Théorie de la variable régionalisée

II.1. Introduction	15
II.2. Objets et modèles de Géostatistique.....	15
II.3. Domaines d’application de la géostatistique	16
II.3.1. L’environnement	16
II.3.2. le pétrole.....	16
II.3.3. La prospection et la mine –étapes de reconnaissances et apporte de la géostatistique	17
II.4. Le variogramme et l’analyse structurale	17
II.4.1. Notion des moments	17
II.4.2. Hypothèse stationnaire.....	18
II.4.3. Hypothèse intrinsèque.....	19
II.5. Le variogramme.....	19
II.5.1. Le variogramme théorique	20
II.5.2. Modèles d’ajustement courants	24
II.5.2.1. Le modèle sphérique	24
II.5.2.2. Le modèle exponentiel	25
II.5.2.2. Le modèle gaussien	25
II.5.3. Analyse structurale.....	26
II.5.3.1. La vérification des données.....	26
II.5.3.2. les choix méthodologiques	26
II.5.3.3. Statistiques standard.....	26
II.6. Concept de variance d’estimation et procédure géostatistique de krigeage ordinaire.....	27
II.6.1. Concept de variance d’estimation.....	27
II.6.2. La procédure géostatistique de krigeage- Théorie du krigeage ordinaire.....	27
II.7. Contrôle des teneurs à la production	29
II.7.1. Prévision de la teneur d’une production programmée entre plusieurs chantiers	29
Conclusion	33

Chapitre III : Etude statique et variographique

III.1. Introduction	34
III.2. Variables étudiées et champ d'étude.....	34
III.3. Base de données numériques	36
III.4. Etude statistique de la couche basale	37
III.4.1. Epaisseurs	37
III.5. Analyse variographique.....	38
III.5.1. Variogramme expérimental	38
III.5.2. Paramètres pour le calcul du variogramme expérimental.....	39
III.6. Etude variographique des données.....	40
III.6.1. Les variogrammes des épaisseurs	42
III.6.1.1. Etude variographique de la couche basale	42
III.6.2. Etude variographique des teneurs	45
Conclusion	48

Chapitre VI : Krigeage 2D, résultats et interprétation

IV.1. Introduction.....	49
IV.2. Méthodologie de krigeage	49
IV.3. Grille de krigeage.....	49
IV.4. Résultats obtenus par krigeage ordinaire	49
IV.4.1. Carte des épaisseurs de la couche basale.....	49
IV.4.2. Variance de krigeage pour les épaisseurs de la couche basale	50
IV.4.3. Carte de répartition des teneurs en P ₂ O ₅	51
IV.4.4. Variance de krigeage pour les teneurs	52
IV.5. Estimation des réserves du gisement de Bled El Hadba.....	54
IV.6. Résultats obtenus par krigeage ordinaire	55
IV.6.1. Carte des épaisseurs de la couche basale.....	55
IV.6.2. Variance de krigeage pour les épaisseurs de la couche basale.....	56
IV.6.3. Carte de répartition des teneurs en P ₂ O ₅	57
IV.6.4. Variance de krigeage pour les teneurs	58
IV.7. Présentation graphique de la répartition des teneurs en phosphate dans la Couche basale	59

IV.8. Estimation des réserves en phosphate en fonction de la teneur de coupure

59

Conclusion60

Conclusion générale61

Références bibliographiques

Annexes

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1. Précipitation moyenne annuelle dans une période de 14 ans (2000-2014).....	12
Tableau I.2. Températures moyennes mensuelles en °C à la station de tébessa	13
Tableau I.3. Humidité relative moyenne en % à la station de tébessa	13

Chapitre III

Tableau III.1. Schéma d'équivalence entre système de classification soviétique (historique) et le code JORC (2012)	36
Tableau III.2. Paramètres pour le calcul des variogrammes	40
Tableau III.3. Directions d'anisotropie des variogrammes des épaisseurs	44
Tableau III.4. Paramètres intrinsèques des variogrammes des épaisseurs	45
Tableau III.5. Directions d'anisotropie des variogrammes des teneurs	48

Chapitre IV

Tableau IV.1. Réserves en phosphates du gisement de Bled El Hadba	54
Tableau IV.2. Tonnage des réserves en fonction de la teneur de coupure	60

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Carte de la situation géographique de Bir El Ater.....	3
Figure I.2. Colonne lithostratigraphique de la région de Bir-El-Ater.....	4
Figure I.3. Interprétation géologique d'après des données géophysique.1979.....	6
Figure I.4. Carte de Situation géographique de gisement de Bled El Hadba.....	7
Figure I.5. Carte géologique de Bled El Hadba élaborée par ORGM 2015.....	9
Figure I.6. Colonne Lithostratigraphique du gisement de Bled El Hadba.....	10
Figure I.7. Réseau d'écoulement des eaux de surface.....	11

Chapitre II

Figure II.1. Répartition des données.....	15
Figure II.2. Schéma représentant la relation entre le variogramme et la covariance.....	18
Figure II.3. Représentation schématique des points de mesure de la variable.....	20
Figure II.4. Les caractéristiques du graphe $\gamma(h)$ en fonction de h	20
Figure II.5. Schéma d'une anisotropie géométrique ou elliptique.....	21
Figure II.6. Ellipse des portées - anisotropie géométrique.....	22
Figure II.7. Schéma de variogrammes représentant une anisotropie zonale.....	22
Figure II.8. Schéma de calcul du variogramme expérimental.....	23
Figure II.9. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme sphérique.....	24
Figure II.10. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme exponentiel.....	25
Figure II.11. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme gaussien.....	25
Figure II.12. Schématisation de l'exploitation simultanée de plusieurs chantiers (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978).....	30

Chapitre III

Figure III.1. Plan d'implantation des sondages des différentes campagnes de prospection.....	35
Figure III.2. Fichier représentatif de la forme de la base des données, préparé pour l'analyse ...	37
Figure III.3. Histogramme des épaisseurs de la couche basale.....	38
Figure III.4. Tolérance linéaire (a) et angulaire (b).....	39
Figure III.5. La nuée variographique des épaisseurs.....	41
Figure III.6. La nuée variographique des teneurs.....	41
Figure III.7. Ensembles des variogrammes directionnels et omnidirectionnels des épaisseurs de la couche basale.....	42
Figure III.8. variogrammes directionnels des épaisseurs de la couche basale.....	43

Figure III.9. variogramme omnidirectionnel des épaisseurs de la couche basale	44
Figure III.10. variogrammes directionnels et omnidirectionnels des teneurs de la couche basale.....	45
Figure III.11. Ensembles des variogrammes directionnels des teneurs de la couche basale, avec l'ajustement des modèles expérimentaux	46
Figure III.12. Variogramme omnidirectionnel des teneurs la couche basale	47

Chapitre IV

Figure IV.1. Carte représentative du krigeage des épaisseurs de la couche basale	50
Figure IV.2. Variance de krigeage des épaisseurs de la couche basale.....	51
Figure IV.3. Carte représentative du krigeage final des teneurs en P_2O_5 , montrant la répartition de la minéralisation.....	52
Figure IV.4. Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en P_2O_5	53
Figure IV.5. Carte représentative du krigeage des épaisseurs de la couche basale	55
Figure IV.6. Variance de krigeage des épaisseurs de la couche basale.....	56
Figure IV.7. Carte représentative du krigeage final des teneurs en P_2O_5 , montrant la répartition de la minéralisation.....	57
Figure IV.8. Variance de krigeage des teneurs de la couche basale.....	58
Figure IV.9. Représentation graphique de répartition des teneurs de la couche basale	59

Liste des abréviations

SONAREM : Société National de Recherche et d'Exploitation Minière.

ORGM : Office National de Recherche Géologique et Minière.

°C : degré Celsius.

x_i : Point.

$Z(x_i)$: La variable régionalisée.

V.A : Variable aléatoire.

$Z(x)$: Fonction aléatoire.

$Z(t)$: Fonction dépend du temps.

$E []$: Espérance mathématique.

a : Portée du semi-variogramme.

$C(0)$: Palier.

h : Vecteur.

$\gamma(h)$: Semi-variogramme théorique.

θ : Angle directionnel du variogramme.

h : Pas du semi-variogramme ou inter-distance moyenne.

Var : Variance.

$N(h)$: Nombre de paires d'observations séparées par la distance h.

σ_{Est}^2 : Variance d'estimation.

Z^* : Estimateur.

Vi : Volume.

λ : Poids de krigeage.

μ : Multiplicateur de Lagrange.

P_j : Production totale.

P_2O_5 : Pentoxyde de Phosphore.

EREM : Entreprise de Recherche et d'Exploitation Minière.

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière.

JORC : Code Australien (Joint Ore Reserves Committee).

S-GeMs : Stanford Geostatistical Modeling Software.

E_p : Epaisseur.

t_m : Teneur moyenne.

q_m : Quantité de minerai dans chaque sous-couche.

S : Section.

BEH : Bled El Hadba.

Mt : Millions de tonnes.

Introduction générale

La région de Tébessa représente un district minier, car elle renferme un grand nombre des gisements métalliques et de substances utiles associés aux contextes sédimentaires. Parmi ces substances : les phosphates natals qui se concentrent au niveau du sud de la wilaya de Tébessa en particulier, du bassin minier de Djebel Onk dont les ressources peuvent atteindre deux milliards de tonnes avec plusieurs gisements (Kef Essenoun, Bled El Hadba, ... etc.).

Dans les perspectives d'augmenter la production des phosphates à plus de 20 millions de tonnes par an à l'horizon de 2020, le propriétaire du projet SOMIPHOS-FERFHOS; prévoit la mise en production d'autres gisements dans le bassin minier de Djebel Onk tel que le gisement de Djebel Onk nord et de Bled Hadba.

L'objectif primordial de ce travail est l'application de la méthode de krigeage, dans le but d'organiser les travaux d'exploitation au niveau de la mine, et d'augmenter les réserves exploitables du gisement de Bled El Hadba. Afin d'assurer une récupération optimale en fonction de la teneur de coupure de la chaîne de traitement.

Afin d'atteindre cet objectif ; nous avons procédé à effectuer les travaux suivants :

- ✓ Une présentation de la géologie régionale et locale du gisement de Bled El Hadba ;
- ✓ L'étude analytique des techniques géostatistiques linéaires et des conditions de leurs mises en œuvre. Le krigeage ; l'analyse structural (variogramme) ;
- ✓ Estimation de teneur de P_2O_5 et des phosphates en utilisant le krigeage ordinaire et celui des blocs.
- ✓ En fin, de montrer l'efficacité et la précision de calcul des réserves en phosphates, ainsi que la réalisation des cartes de répartition des teneurs et des épaisseurs de couche minéralisées.

I.1. Introduction

Les phosphates algériens sont liés aux dépôts marins du Tertiaire Paléocène et Eocène [1]. Les gisements les plus importants sont en relation avec ceux connus en Tunisie; Il s'agit des gisements situés au nord de Tébessa (Djebel.EL- Kouif et Djebel. Dir) et des gisements qui se situent sur la bordure de l'anticlinal de Djebel Onk, région de Bir El Ater [2].

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter, la géologie régionale et locale de gisement de Bled El Hadba.

I.2. Présentation du secteur minier de Bir El Ater

I.2.1. Situation géographique

La région de Bir El Ater est située au Sud-Est de l'Algérie à 100 kilomètres au Sud de la wilaya de Tébessa et à 20 km de la frontière Algéro-Tunisienne, sur la route qui relie Tébessa à El Oued. Cette région constitue la limite géographique naturelle entre les hauts-plateaux constantinois et le domaine saharien. Le massif du 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 des Nememcha qui prolongent vers l'Est de massif des Aurès, les altitudes les plus basses au pied du Djebel Onk sont d'environ 635m [3].



Figure. I.1. Situation géographique de la région de Bir El Ater [3].

I.2.2. Lithostratigraphie de la région de Bir El Ater

Les travaux les plus importants concernant la stratigraphie de Bir El Ater sont ceux de (Dussert, 1924), (Flandrin, 1948), (Visse, 1951), (Ranchin, 1963), (Villain, 1979) et (Chabou-Mostefai, 1987).

La série sédimentaire affleurant est exprimée par une succession stratigraphique allant du crétacé supérieur (Maestrichtien) à l'Eocène moyen (Lutétien), surmonté par une série sablo argileuse continentale datée du Miocène et du Quaternaire.

Les affleurements s'observent de bas en haut de la façon suivante :

I.2.2.1. Crétacé

Ce sont les sédiments les plus anciens au cœur de l'anticlinal de Djebel Onk tectoniquement très accidentés, seuls les dépôts de Maestrichtien y affleurent.

I.2.2.2. Paléogène

Il est représenté par des sédiments marins qui atteignent d’assez grandes épaisseurs (350 m). Les variations lithologiques et les restes des organismes permettent d’en faire les subdivisions stratigraphiques suivantes [3] :

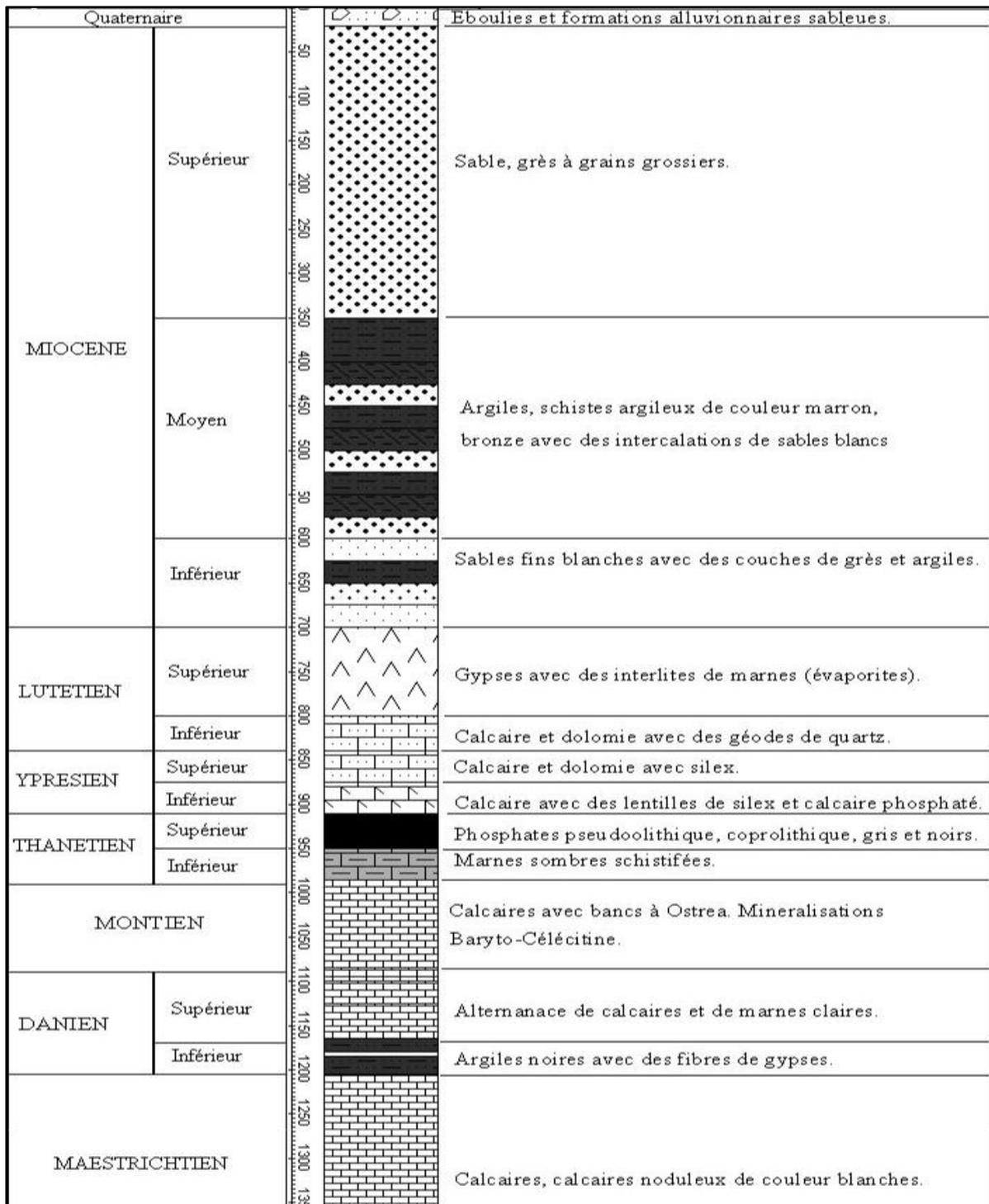


Figure I.2.Colonne lithostratigraphique de la région de Bir El Ater [3].

I.2.3. Tectonique

La région de Bir El Ater appartient, avec l'Atlas Tunisien, à l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien. La série supérieure de l'Eocène du bassin de Djebel Onk-Gafsa-Métloui est structurée en une suite d'anticlinaux et de synclinaux dissymétriques, généralement faillés dans leurs flancs, d'axe le plus souvent SW-NE et décrochés par des accidents transverses N120° à N 140° E.

Les anticlinaux de Djebels Onk, Djemi-Djema, et Oued Betita sont localisés à la bordure de la flexure Sud Atlasique qui correspond à une zone d'affrontement entre le domaine Atlasique mobile et la Plate-forme Saharienne stable. Plus particulièrement, ils appartiennent à la branche Nord de la flexure, 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 un flanc septentrional de 10° [4].

La chronologie des phases de déformations responsables de la structuration actuelle est la suivante [5]:

I.2.3.1. Tectonique synsédimentaire

Une phase compressive NW-SE contemporaine à la sédimentation Paléogène, s'exprime par des ondulations et des failles synsédimentaires. 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.

I.2.3.2. Tectonique post-Eocène moyen et anti-Miocène

Contemporaine à l'émersion de la série au Lutétien supérieur, phase majeure du plissement des Aurès et des déformations transverses (N 120° à N 150°) induisant un début de déstructuration de la série crétacé supérieur à Eocène en petits horsts et grabens allongés suivant la direction N 170°E qui vont être affectés par l'érosion différentielle anti-Miocène. Ces plissements sont, en majorité, antérieurs aux dépôts des sables Miocènes. C'est à la faveur de cette phase tectonique qu'apparût l'anticlinal de Djebel Onk.

I.2.3.2. Tectonique tardi-Miocène à Pliocène-Pléistocène

C'est la phase majeure de plissement de l'Atlas Tunisien. Les plissements de la série Crétacée supérieure-Paléocène-Eocène et Miocène, en grandes structures antiformes et synformes jouent en horst et grabens dans les structures antérieures ; ils forment vers le Sud et sur le flanc inverse des méga-plis de Djebel Onk et Djemi-Djema.

Cette tecto-genèse est responsable de la structure actuelle de la région Bir El Ater.

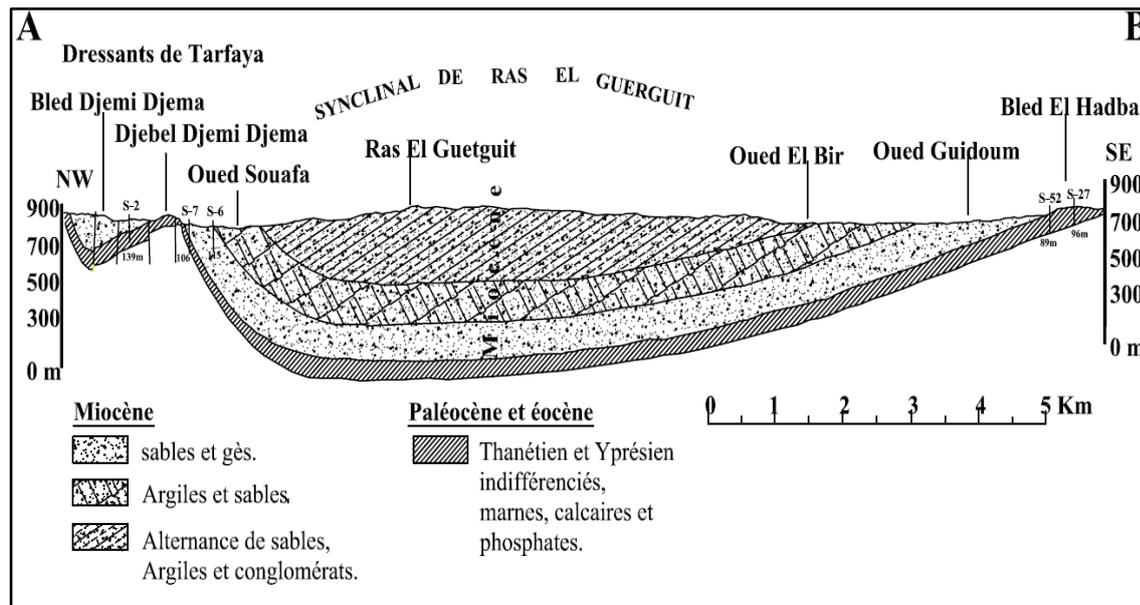


Figure I.3. Interprétation géologique d'après des données géophysique ,1979 [6].

I.3. Géologie locale du gisement de phosphate de Bled El Hadba

I.3.1. Situation géographique

Le gisement potentiel de Bled El Hadba est situé à environ 14 Km au Sud-Est de Bir El Ater et à 5 Km de la frontière Algéro-Tunisienne. Il est distant de 15 Km à vol d'oiseau du complexe minier et de la carrière de Djemi-Djema.

Les altitudes varient entre 730 et 790 m. La superficie de la zone reconnue par les sondages carottés est d'environ 2.9 Km². Géomorphologiquement, le relief est très peu accidenté par rapport aux autres gisements dans la région de Bir El Ater [7].

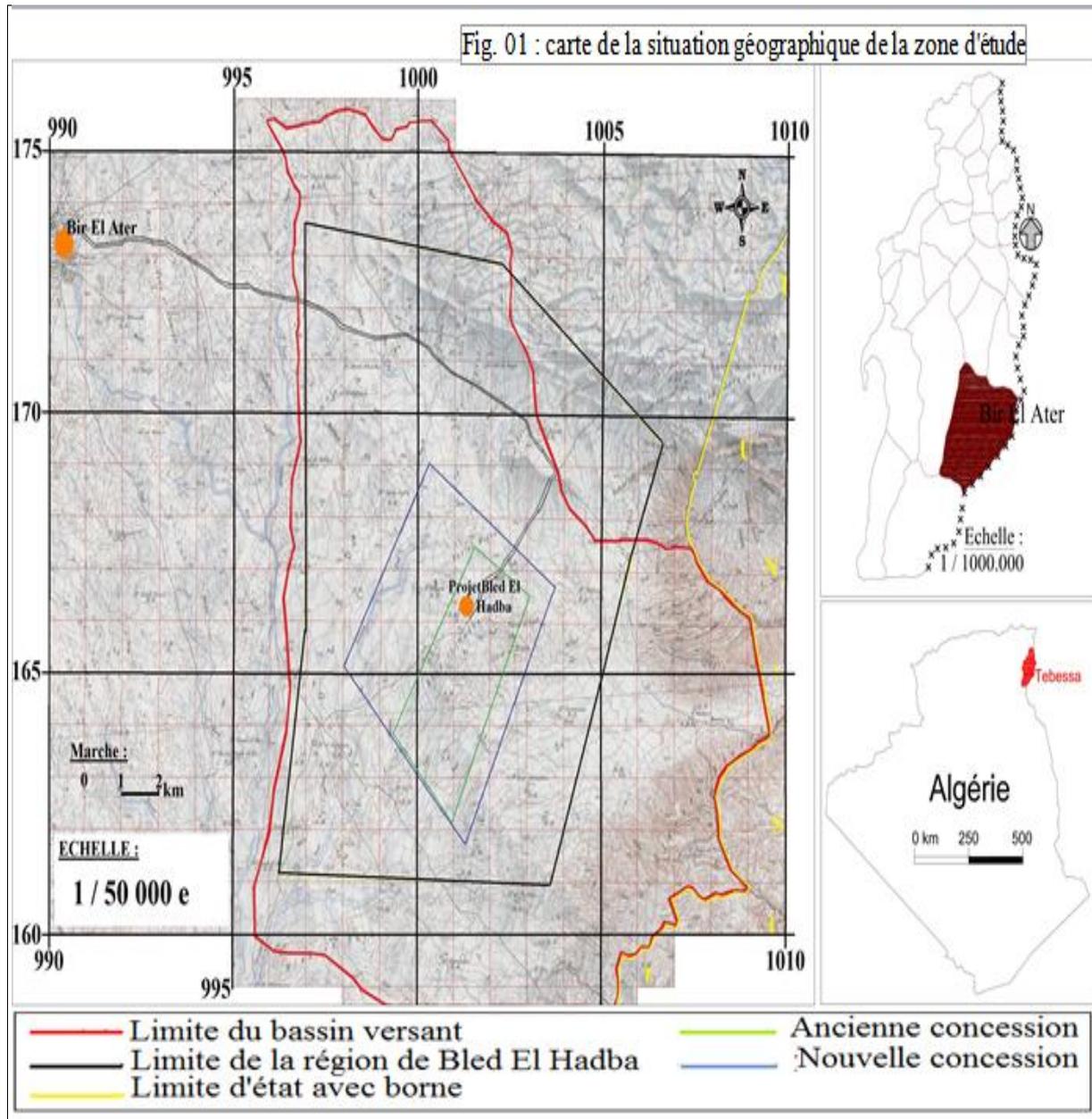


Figure I.4. Carte de Situation géographique de gisement de Bled El Hadba [3].

I.3.2. Lithostratigraphie du gisement

Les formations géologiques du gisement de Bled El Hadba sont représentées par les roches du Paléocène, l'Eocène inférieur et le Miocène. La succession lithostratigraphique est, dans ces grandes lignes ; assez semblable à celle des gisements de Djemi-Djema et Kef Sennoun. Cependant, des variations lithologiques importantes à l'intérieur du faisceau phosphaté ont été observées, a une forme d'une bande d'affleurement orientée NE-SW, cette bande s'enfonce vers l'ouest sous les calcaires à silex de l'Yprésien avec les sables du Miocène [7].

I.3.2.1.Paléocène

➤ Montien

Le Montien affleure au Sud Est du gisement, à la base de cet étage on observe des calcaires silicifiés à lumachelles bio clastes ainsi que d'autres organismes fossiles, surmonté par une série d'alternance d'argile lumachéllique, argiles calcaireux, et marnes dolomies. Ensuite un banc de dolomie au-dessus duquel repose des calcaires gris clairs, légèrement phosphatés. Son épaisseur peut atteindre 100 m. Au sommet de cette série se dépose des calcaires beiges marqués par une présence de fossiles notamment les lamellibranches, par ailleurs, on note la présence d'une minéralisation baryto – Célestine.

➤ Thanétien

Il est caractérisé par des couches de phosphate et des couches stériles entre le Thanétien inférieur et supérieur.

✓ Thanétien inférieur

À la base, sont rencontrées des marnes noires surmontées par des calcaires légèrement lumachéllique, avec des petites intercalations de phosphates de couleur marron et gris. La puissance varie de 30 à 40 m.

✓ Thanétien supérieur

Cet étage représente la couche phosphatée caractérisée par des grains phosphatés coprolithique et pseudoolithique à ciment carbonaté, avec la présence d'oxyde de fer, débris osseux et les dents de poissons. Cette couche est subdivisée en trois sous couches qui sont : la couche basale, principale et sommitale. L'épaisseur de la couche phosphatée est d'environ de 30 m [7].

I.3.2.2.Yprésien

Les dépôts de l'Yprésien affleurent sous forme de lambeaux allongés, suivant la direction Nord Est, Sud-Ouest. Il est représenté par une série calcaro-dolomitique à silex. La puissance de cette série décroît en allant du sud vers le nord, elle atteint les 57 m au sud (S.05H) et zéro mètre au nord (S58K, SH11) [7].

I.3.2.3.Miocène

Il recouvre la série précédente. Son épaisseur augmente progressivement vers l'ouest en allant vers le Nord-ouest. Il atteint 77 m dans le sondage S-7H et 80 m dans le sondage S BH02. La série est caractérisée par la présence de sable avec intercalation de calcaires marneux beige et des débris de dolomie. Dans la partie nord du gisement, le Miocène se

trouve en contact direct avec le faisceau phosphaté ce qui est dû à l'érosion de l'Yprésien [7].

I.3.2.4. Quaternaire

Les dépôts du Quaternaire sont essentiellement répandus sur la majorité du territoire étudié. Ils sont représentés par des dépôts éoliens et alluvionnaires [7].

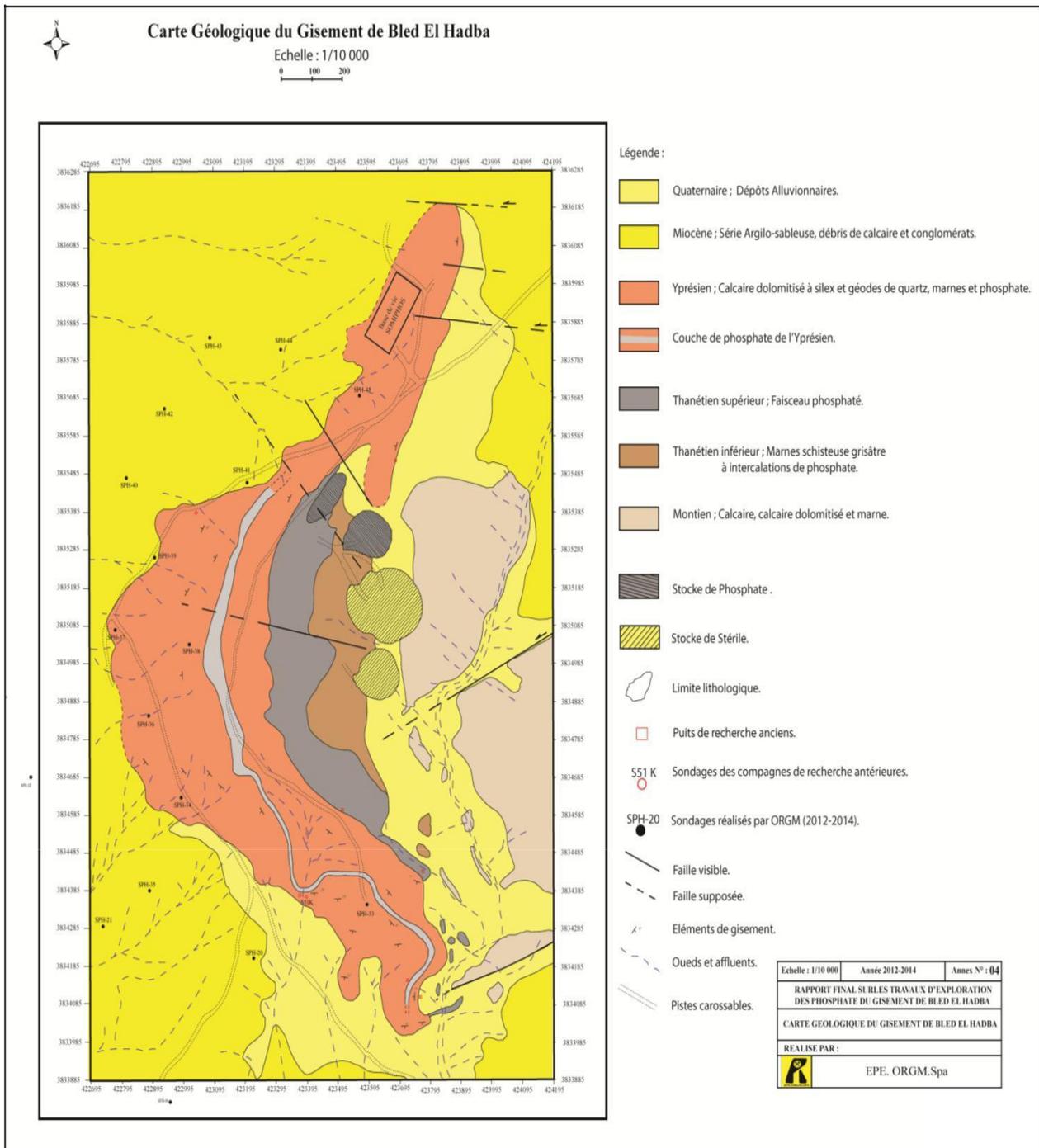


Figure I.5. Carte géologique de Bled El Hadba élaborée par ORGM 2015 [3].

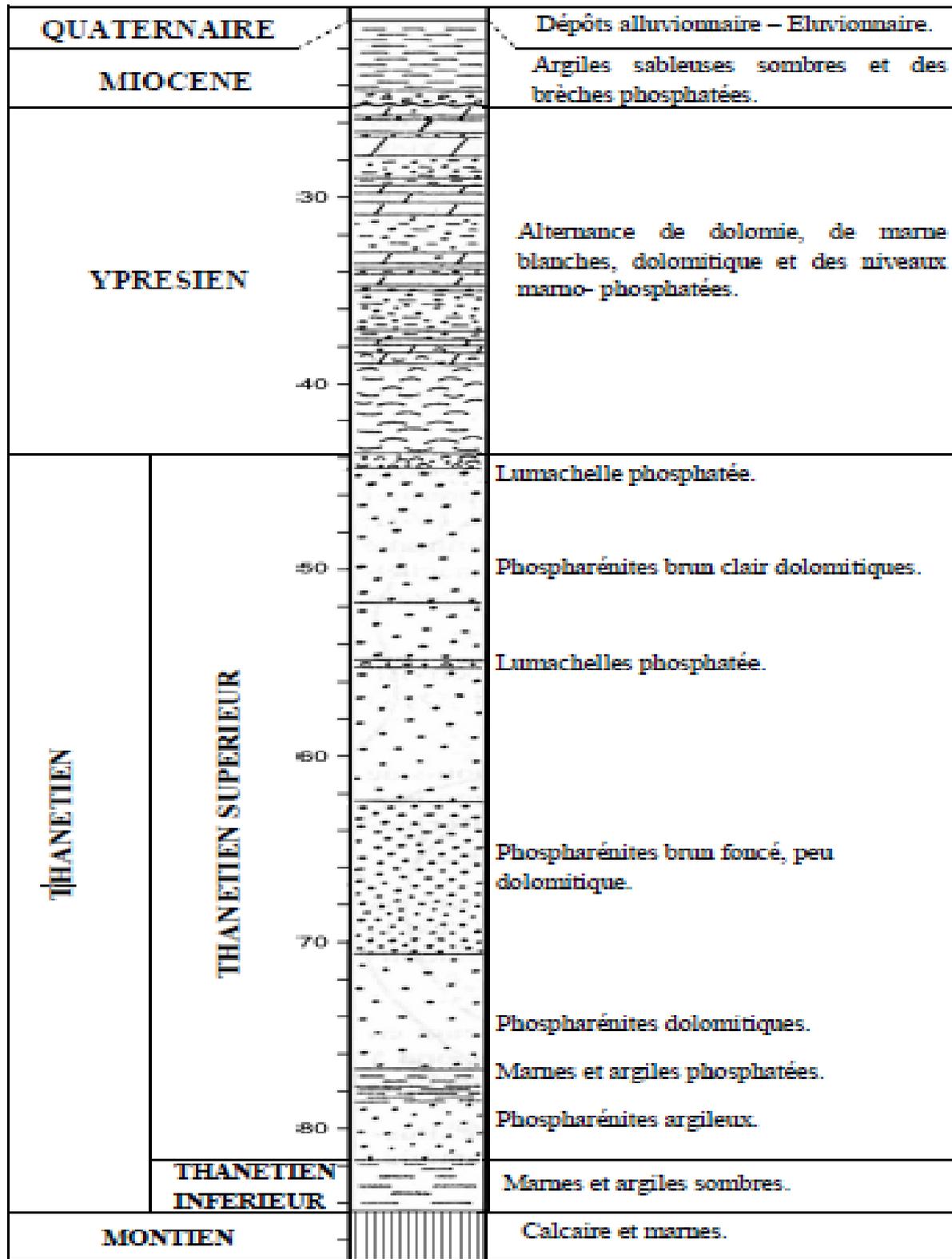


Figure I.6. Colonne Lithostratigraphique du gisement de Bled El Hadba [7].

I.4. Aperçu Hydrologique

La Wilaya de Tébessa, chevauche aussi sur deux grands systèmes hydrographiques :

Le bassin versant de L'oued Mdjerda, lui-même subdivisé en 04 sous bassins couvrant la partie Nord de la Wilaya. L'écoulement y est exoétiq ue assuré par une multitude de cours d'eau dont les plus importants sont : Oued Mellague, Oued Chabro, Oued Serdies, Oued Kebir.

Le bassin versant de Oued Melghir, qui couvre la partie Sud de la Wilaya. L'écoulement y est endoréique, il est drainé par Oued Cheria, Oued Helail, Oued Mechra, Oued Saf-Saf, Oued Gheznet, Oued Djarech, Oued Sendess, qui aboutissent et alimentent les zones d'épandage situées au Sud.

Le réseau hydrographique est assez développé et diversifié et se caractérise par des oueds fortement entaillés et profond. Secs à la longueur d'année et ne coulent que rarement à la faveur des précipitations saisonnières [6].

La zone de Bled El Hadba est tributaire de L'Oued Horchane qui s'écoule vers le sud dans le bassin versant saharien puis se jette finalement dans le chott Melghir ; le ruissellement des eaux de surface provenant du site du projet s'écoule directement dans les bassins versant de l'Oued El Kef Guidoum ou l'Oued El Louz, les deux Oueds confluent au Sud-Ouest de la zone du projet pour former l'Oued Horchane [6].

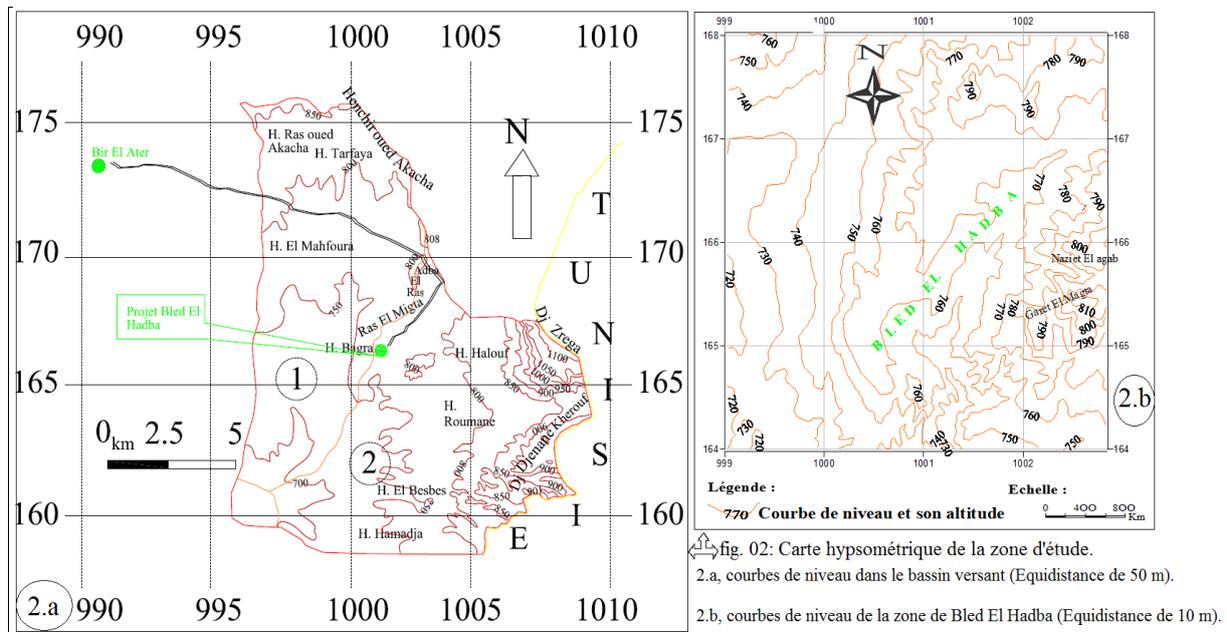


Figure I.7. Réseau d'écoulement des eaux de surface [6].

I.5. Caractéristiques climatiques de la région

La Wilaya de Tébessa est une zone de transition météorologique, elle considérée comme une zone agropastorale avec une présence d'un nombre important de phénomène : (pluie, neige, chasse neige, gelée, grêle, crue, et vent violent).

Cette région se distingue par 3 étages bioclimatiques :

- ✓ La sub-humide de (400 à 500mm/an) ; très peu étendu, elle ne couvre que quelques lots limités « les sommets de reliefs : (Djebel serdiés et Djebel Bouromene).
- ✓ Le sub-aride (200 à 300mm/an) : il couvre les plateaux steppiques (d'Oum Ali, SafSaf El Ousra, Thlidjene et Bir El Ater.).
- ✓ L'Arde ou Saharien doux (Inférieure à 200mm/an) : commence et se prolonge au delà de l'Atlas-saharien et couvre les plateaux de Négrine et Ferkmene [6].

I.5.1. Paramètres climatiques

I.5.1.1. Précipitation

La précipitation est un facteur fondamental pour caractériser le climat d'une région. Elle conditionne l'écoulement saisonnier ainsi que les régimes de cours d'eau. La pluviosité augmente avec l'altitude et diminue à mesure quand on s'éloigne de la mer.

Dans cette station, nous avons une série d'observation de 14 ans (de 2000-2014) [6].

Tableau I.1. Précipitation moyenne annuelle dans une période de 14 ans (2000-2014).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moy
P (mm)	51.4	36.8	36.8	42.4	35.1	24	31.4	44.1	36	28	20.6	29	34.63

I.5.1.2. Température

La température est un élément très important du climat qui joue un rôle déterminant pour le bilan hydrologique. Les données des températures mensuelles et annuelles permettent de dégager certaines caractéristiques comme la division de l'année en saisons thermiques.

Les températures n'ont jamais fait l'objet de mesure. La région d'étude ne possède pas de station de mesure pour ce facteur, la plus proche est celle de Tébessa aéroport, située à 809 m d'altitude au Nord de la ville, qui a servi de référence. Les données des températures

disponibles sont des valeurs moyennes mensuelles mesurées au niveau de cette station sur une période de 14 ans entre 2000 et 2014 (Tableau02) [6].

Tableau I.2. Températures moyennes mensuelles en °C à la station de Tébessa.

Mois Station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jut	Août	Moy
Tébessa Aéroport (2000-2014)	23.63	19.5	12.9	8.5	7.26	8.01	12.0	15.7	20.48	25.83	29.6	28.8	17.68

I.5.1.3. Humidité

C'est un état du climat correspondant à la quantité de vapeur d'eau dans l'air et elle peut accélérer le phénomène d'altération chimique à la surface, comme d'oxydation.

➤ L'humidité atmosphérique

Elle est l'un des éléments essentiels du cycle hydrologique. Source de toutes les précipitations, elle conditionne outre pour une large partie les taux d'évaporation du sol et de la couverture végétale, on distingue deux variantes d'humidité :

✓ **l'humidité absolue** : c'est la masse de la vapeur d'eau contenue dans un mètre cube d'air. Elle est exprimée en gramme par mètre cube.

✓ **l'humidité relative** : c'est l'état plus au moins proche de la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Elle est exprimée en pourcentage. L'humidité relative est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau à l'air humide et la pression de saturation à la même température d'humidité relative en %.

Le tableau ci-dessous montre les valeurs d'humidité relative moyenne à la station de Tébessa aéroport entre 2000 et 2014 [6].

Tableau I.3. Humidité relative moyenne en % à la station de Tébessa.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Ma	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Moy
H (%)	63.2	63.4	70.0	73.0	74.5	70.1	65.2	62.4	58.5	49.2	43.4	46.3	61.1

On remarque dans le tableau que l'humidité relative est presque moyenne peu variable durant toute l'année, le minimum est observé au mois de juillet avec une valeur de 43.4 %, alors que le maximum est de l'ordre de 74,5 % observé au mois de janvier.

I.5.1.4. Le vents

D'après la station météorologique de Tébessa, la distribution du champ de direction de vent est saisonnière (hiver, été) avec des vents prédominants :

✓ Les vents de direction Ouest-Nord-Ouest « W-N-W » du mois de novembre au mois d'avril, qui sont responsables des précipitations.

✓ Les vents de direction Sud, du mois de mai au mois de juillet se sont le siroco, engendrant une forte évaporation (évapotranspiration) et une sécheresse abaissant le taux d'humidité [6].

I.5.1.5. La neige

Ce phénomène a un rôle très important car les précipitations neigeuses suivies par une lente fonte enrichie au maximum l'infiltration et par la suite l'imbibition des sous sols des fondations et la réaction des phénomènes peuvent être dangereux pour les sols des fondations, nous citons par exemple :

- ✓ gonflement des sols argileux.
- ✓ lessivage des gypses.
- ✓ augmentation des niveaux des eaux souterraines (nappe phréatique).....etc [6].

Conclusion

L'étude géologique est une étape primordiale dans tout projet minier. Son but est la détermination de mode de formation d'un gîte minéral, son dépôt et ses caractéristiques (morphologie, structures...).

Avant de procéder à l'exploitation d'un gisement, il est nécessaire de mettre en évidence la valeur industrielle de ce dernier. Pour ce faire, les bureaux d'études procèdent le plus souvent à faire le contrôle des teneurs, à partir de l'interpolation spatiale des variables régionalisées.

II.1. Introduction

L'un des points forts de la géostatistique consiste à tirer parti des corrélations spatiales qui existent dans les données minières : elles sont modélisées par un outil probabiliste, le variogramme. Les techniques d'estimation porte le nom générique de krigeage qui est développé en détail dans la deuxième partie de ce chapitre.

Dans ce chapitre, on va exposer une méthode probabiliste des variables régionalisées qui permet de quantifier le potentiel d'un gisement.

II.2. Objets et modèles de Géostatistique

La géostatistique étudie des phénomènes naturelles répartie dans l'espace (phénomènes régionalisés) et/ou dans le temps (Minéralisation, pollution, propriété physique de roches, pluviométrie.....).

Soit un phénomène régionalisé mesurable dans chacun des points de l'espace de définition (Figure II.1) [8].

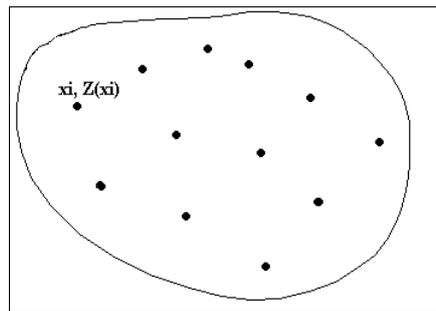


Figure II.1. Répartition des données [8].

Si au point x_i , la variable régionalisée $Z(x_i)$ est considérée comme valeur unique (valeur vraie), dans ce cas, la géostatistique étudiera la corrélation spatiale de la V.R. $Z(x)$ et la structure de cette variable dans l'espace, cette géostatistique est dite géostatistique transitive. Cette géostatistique représente le modèle primaire [9].

Considérons maintenant, qu'au point x_i , $Z(x_i)$ est une variable aléatoire et donc plusieurs réalisations sont possibles : Chaque valeur $Z(x_i)$ serait une réalisation particulière de $Z(x)$.

L'ensemble des Variables aléatoires formerait la fonction aléatoire (F.A.) $Z(X)$. La géostatistique des F.A. est dite géostatistique intrinsèque ou modèle topo-probabiliste. C'est cette dernière qui est la plus souvent utilisée. Si de plus, les moyennes des variables aléatoires aux différents points x_i de l'espace de définition sont égales, alors on dit que le phénomène

naturelle est stationnaire – L'espérance mathématique (moyenne) est constante et égale à m : C'est la géostatistique stationnaire sinon c'est la géostatistique non stationnaire [9].

En mathématique, ce phénomène est une fonction qui dépend du temps $z(t)$ que l'on considère comme une réalisation d'une fonction aléatoire $Z(t)$.

La fonction aléatoire $z(t)$ n'est connue qu'en un certain nombre de points donnés t_n et les valeurs $z(t_n)$, qui sont la réalisation des variables aléatoires $z(t_n)$.

La géostatistique peut être présentée comme une extension de méthodes mathématiques classiques (statistiques, analyse des Données, traitement du Signal, analyse de Fourier, ...) appliquée à toutes variables structurées. Mais la géostatistique est d'abord une pratique qui consiste à étudier des données réelles [10].

II.3. Domaines d'application de la géostatistique

La géostatistique est utilisée dans plusieurs domaines parmi lesquels il y a : l'environnement, le pétrole, la géologie et les mines...etc [11].

II.3.1.L'environnement

L'environnement fait appel aux techniques multi variables, en particulier l'utilisation d'informations auxiliaires (données qualitatives en pollution, images satellites ou photographies en inventaires de ressources, sondeurs multifaisceaux pour la cartographie des fonds marins). Les questions portent sur l'estimation de valeurs en place, et sur le risque de dépassement de valeurs limites [11].

II.3.2. le pétrole

Dans le domaine du pétrole, la géostatistique est utilisée pour la modélisation géométrique, la caractérisation et l'ingénierie des réservoirs.

✓ Modélisation géométrique

Cela consiste à interpoler les surfaces qui serviront 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 (soft data), 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

Il s'agit ici d'élaborer des méthodes de simulations conditionnelles des variables pétrophysiques (porosité, perméabilité) en accord avec la géologie. Pour cela on procède généralement en deux temps :

- **Ingénierie réservoir** : La géostatistique s'applique essentiellement dans le cadre du changement d'échelle pour les perméabilités absolues.
- **Sismique**: Elle est souvent traitée comme une variable secondaire qui conditionne la forme d'une surface géologique, la proportion d'un faciès. Il est donc important d'incorporer cette dernière dans l'estimation ou les simulations de variables pétrophysiques ou de lithofaciès [11].

II.3.3. La prospection et la mine –étapes de reconnaissances et apporte de la géostatistique

La prospection et la mine –étapes de reconnaissances et apporte de la géostatistique.

La mine est le domaine originel de la géostatistique. Celle-ci a développé un certain nombre de concepts et de méthodes permettant de formaliser et de résoudre les problèmes rencontrés à différents stades de l'évaluation minière.

- ✓ des réserves in situ (tonnages de minerai et de métal).
- ✓ des réserves récupérables (pourcentage de minerai et de métal contenu dans des blocs au-dessus d'une teneur critique) ainsi que la variance d'estimation.

Dans certains cas, il est plus important de prévoir l'ordre de grandeur des fluctuations autour de la moyenne (qualité du minerai à l'entrée de l'usine de traitement). Pour ceci, on a recours à des simulations au lieu d'un krigeage. Habituellement limitées à l'estimation de valeurs moyennes.

II.4. Le variogramme et l'analyse structurale

II.4.1. Notion des moments

La géostatistique linéaire s'intéresse au deux premiers moments de la Fonction Aléatoire.

✓ Le moment d'ordre 1

On parle de moment d'ordre 1 quand l'espérance de la variable z existe et reste constante sur tout le domaine étudié [10]:

$$E[Z(x)] = m(x, h) \text{ (II. 1)}$$

✓ le moment d'ordre 2

Qui mesure les corrélations entre les variables d'une fonction aléatoire et sont exprimées et quantifiées à l'aide de l'un des outils structuraux fondamentaux qui sont [10]:

➤ **Le variogramme**

$$E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = 2\gamma(x, h) \quad (\text{II.2})$$

➤ **La covariance**

$$E\{[Z(x+h) - m(x+h)][Z(x) - m(x)]\} = c(x, h) \quad (\text{II.3})$$

L'existence de la covariance entraîne celle du variogramme; les deux se correspondent alors par la relation : $\gamma(h) = c(0) - c(h)$ (figure II.2).

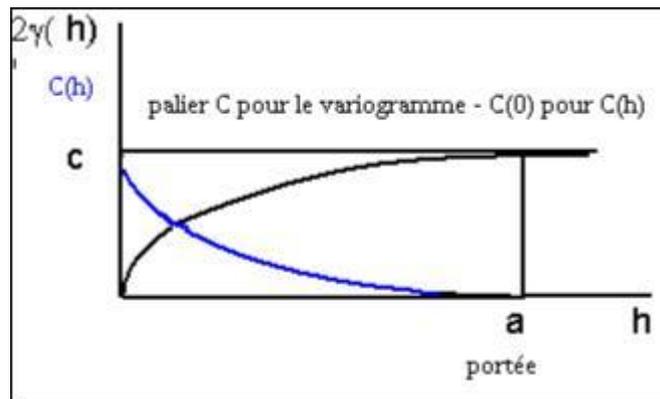


Figure II.2. Schéma représentant la relation entre le variogramme et la covariance [10].

II.4.2. Hypothèse stationnaire

On dit qu'un processus est stationnaire, si la loi de probabilité de la fonction aléatoire est invariante par translation ; c'est-à-dire qu'elle ne dépend pas de l'origine du domaine étudié, elle dépend seulement des positions relatives des sites en lesquels ces mesures sont effectuées et non de la localisation de ces sites.

Dans son sens le plus strict, la stationnarité nécessite que tous les moments soient invariants par translation, mais comme cela ne peut être vérifié avec un nombre limité de données expérimentales, on se contente généralement, de demander que les deux premiers moments (la moyenne et la covariance) soient invariants par translation. On parle alors de stationnarité faible ou d'ordre 2. En d'autres termes :

- La moyenne de la fonction $Z(x)$ est constante et ne dépend pas de point x :

$$E[Z(x)] = m(x) = m \quad (\text{II.4})$$

- La fonction de covariance entre deux points x et $x+h$ est indépendante du point x . Elle ne dépend que du vecteur h :

$$C(h) = E[(Z(x), Z(x+h))] - m^2 \quad (\text{II.5})$$

Si la covariance est stationnaire alors la variance et le variogramme le sont aussi :

$$\text{Var}\{Z(x)\} = E\{(Z(x) - m)^2\} = C(0) \quad \forall x \in D \quad (\text{II.6})$$

$$2\gamma(h) = E\{(Z(x+h) - Z(x))^2\} = C(0) - C(h) \quad \forall x \in D \quad (\text{II.7})$$

En pratique, il arrive souvent que ces conditions ne soient pas satisfaites. Bien entendu, lorsqu'on observe une tendance marquée, il n'est pas possible de supposer que la valeur moyenne est constante. Néanmoins, même lorsque c'est le cas, la variance n'existe pas nécessairement ; un exemple particulièrement frappant on a été donné par Krige (1978) à propos des teneurs en Or en Afrique du Sud. D'un point de vue à la fois pratique et théorique, il est donc utile de pouvoir affaiblir cette hypothèse [10].

II.4.3. Hypothèse intrinsèque

Sous Hypothèse intrinsèque, on suppose seulement que les accroissements de la fonction sont stationnaires d'ordre 2 : c'est-à-dire que la moyenne et la variance des accroissements $Z(x+h) - Z(x)$ existent et sont indépendants du point x :

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad (\text{II.9})$$

Le semi-variogramme $\gamma(h)$ est indépendant de la localisation de x , seulement de h (soit en module, soit en module et en direction).

Les variables régionalisées qui sont stationnaires vérifient toujours l'hypothèse intrinsèque, mais la réciproque n'est pas vraie. En effet; certains fonctions aléatoires sont stationnaires intrinsèques mais non stationnaire du deuxième ordre. L'hypothèse intrinsèque est donc plus générale. Elle est beaucoup plus faible que l'hypothèse de stationnarité [10].

II.5. Le variogramme

Est une fonction du vecteur h ; il indique si les valeurs différent beaucoup au fur et à mesure que la distance augmente, il révèle les particularités directionnelles du phénomène (si l'on examine dans différentes directions).

Soit deux variables aléatoires, $Z(x)$ et $Z(x+h)$ mesurées en 2 points x et $(x+h)$, la variabilité entre ces deux points (figure II.3) se caractérise par une fonction notée $2\gamma(x, h)$ appelée variogramme (Journel et Huijbregts 1978) [7].



Figure II.3. Représentation schématique des points de mesure de la variable [8].

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 [12].

II.5.1. Le variogramme théorique

Considérons deux valeurs numériques, $Z(x)$ et $Z(x+h)$, implantées en deux points distants du vecteur h .

On caractérise la variabilité entre ces deux mesures, par la fonction variogramme $2\gamma(x, h)$ définie comme l'espérance de la variable aléatoire :

$$[Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (\text{II.10})$$

$$2\gamma(x, h) = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} \quad (\text{II.11})$$

La fonction $\gamma(x, x+h)$ est appelée semi-variogramme.

Le graphe de $\gamma(x, h)$ en fonction de h a les caractéristiques suivantes :

- ✓ Il passe par l'origine (pour $h = 0$; $Z(x+h) = Z(x)$);
- ✓ C'est en général une fonction croissante de h ;
- ✓ Dans la plupart des cas, il croît jusqu'à une certaine limite appelée **palier**, puis s'aplatit (figure II.4.)

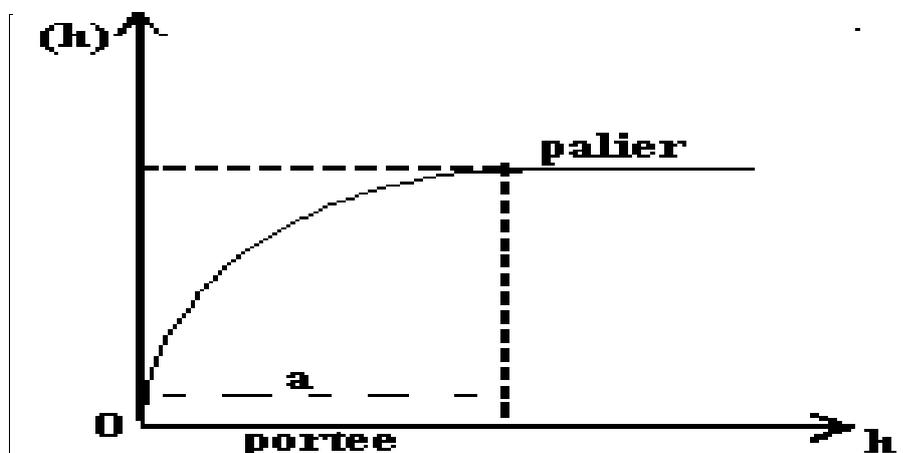


Figure II.4. Les caractéristiques du graphe $\gamma(h)$ en fonction de h [13].

Si les valeurs moyennes des variables aléatoires sont égales quel que soit x alors on dit que la régionalisation est stationnaire. On aura donc [14]:

$$E\{Z(x)\} = m \quad (\text{II. 12})$$

➤ Portée et zone d'influence

Lorsque le variogramme a atteint sa limite supérieure c'est à dire son palier, il n'y a plus de corrélation entre les échantillons séparés par cette distance h : cette distance critique est appelée portée du variogramme (figure II.4), qui fournit une définition plus précise de la notion de zone d'influence [14].

➤ Anisotropies

Lorsque de variogramme est calculé pour tout couple de points, dans certaines directions comme Nord-Sud ou Est-Ouest, il révèle parfois des différences de comportement : c'est-à-dire une anisotropie.

On distingue deux principaux types d'anisotropie : l'anisotropie géométrique et l'anisotropie zonale.

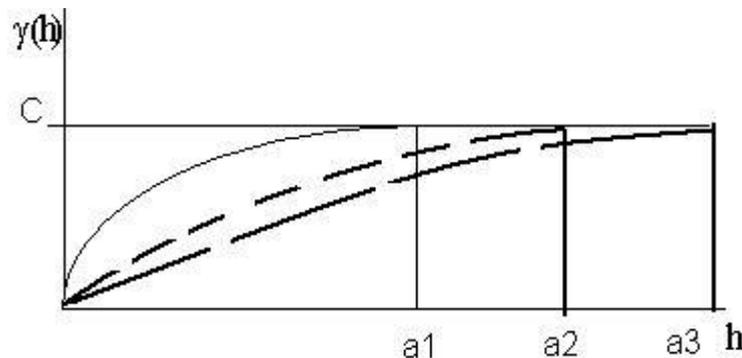


Figure II.5. Schéma d'une anisotropie géométrique ou elliptique [14].

✓ Anisotropie géométrique (elliptique)

La (figure II.6) présente un cas typique de deux variogrammes directionnels qui ont les mêmes paliers et des portées différentes. Dans ce cas on dit qu'il y a une anisotropie géométrique. Pour déterminer la présence d'une éventuelle anisotropie géométrique, on trace l'ellipse des portées (Figure II.6) [14].

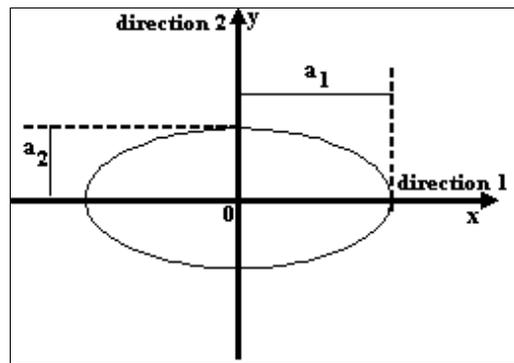


Figure II.6. Ellipse des portées - anisotropie géométrique [14].

✓ **Anisotropie zonale (stratifier)**

Il y a des types d'anisotropie plus complexes c'est l'anisotropie zonale.

En trois dimensions la direction verticale joue souvent un rôle particulier parce qu'il y a plus de variations entre les strates qu'à l'intérieur des celles –ci (figure II.7) [14].

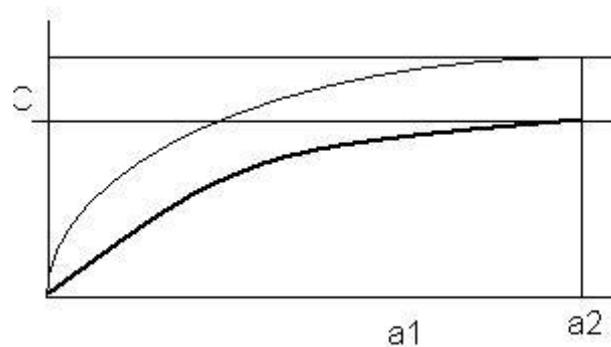


Figure II.7. Schéma de variogrammes représentant une anisotropie zonale[14].

Dans ces cas de (figure II.7), la pratique courante est de séparer le variogramme en deux termes, le premier étant isotrope, et le second ne dépendant que de la composante verticale :

$\gamma_1(h)$ = variogramme isotrope + composante verticale.

$$\gamma(h) = \gamma_1\left(\sqrt{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2}\right) + \gamma_2(h_3) \quad (\text{II. 13})$$

➤ **Le variogramme expérimental**

Le variogramme expérimental est calculé en utilisant la formule suivante :

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (\text{II.14})$$

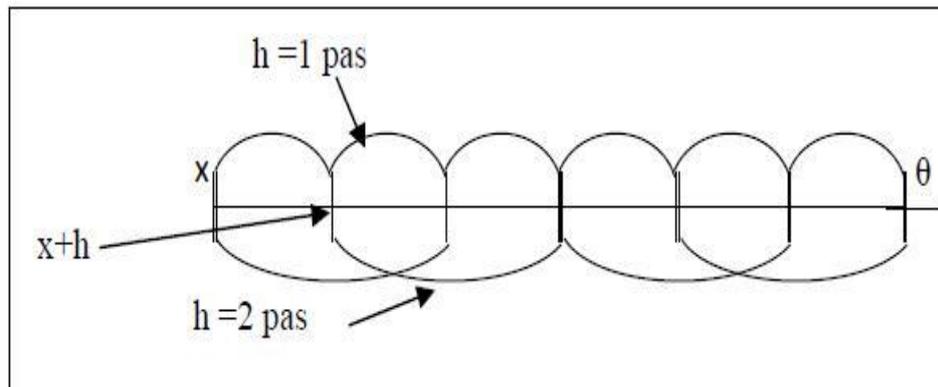


Figure II.8 : Schéma de calcul du variogramme expérimental [13].

Où :

x_i Et $x_i + h$: sont des localisations des échantillons.

$N(h)$: Nombre de paires dont les points sont séparés d'une distance h [12]

✓ **Variogramme expérimental dans le plan (en deux dimensions- 2D)**

Lorsque les données sont en deux dimensions, les variogrammes doivent être calculés suivant au moins quatre directions (0° , 45° , 90° et 135°) pour pouvoir établir l'ellipse des portées et évaluer les anisotropies. Si les données sont disposées arbitrairement, les variogrammes sont calculés pour différentes classes de directions et différentes classes de distances [14].

✓ **Variogramme a trois dimensions**

En pratique la troisième dimension joue souvent un rôle très spécial; il y souvent plus de variations suivant la direction verticale que suivant les directions horizontales du fait de la stratification de beaucoup de phénomènes naturels dans le cas le plus courant on calcule le variogramme vertical en exploitant les données issues de chaque sondage, puis on calcule les variogrammes horizontaux suivant différentes directions horizontales [14].

II.5.2. Modèles d'ajustement courants

Le variogramme expérimentale des données brut ne peut être utilisé en l'état. Il est nécessaire de le modéliser mathématiquement pour le rendre un outil utile. Ce modèle mathématique doit bien correspondre au variogramme expérimental. Deux principaux paramètres sont utilisés pour différencier entre les différents modèles. Ce sont l'existence ou non d'un palier et le comportement à l'origine [14].

➤ Comportement linéaire à l'origine

II.5.2.1. Le modèle sphérique

$$\gamma(h) = \left\{ c \left[\frac{3|h|}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right] \right\} \quad (\text{II.15})$$

Sa forme correspond bien à une croissance presque linéaire jusqu'à une certaine distance, puis une stabilisation. La tangente à l'origine rencontre la droite de palier à un point d'abscisse $h = \frac{2a}{3}$ (Figure II.9) [15].

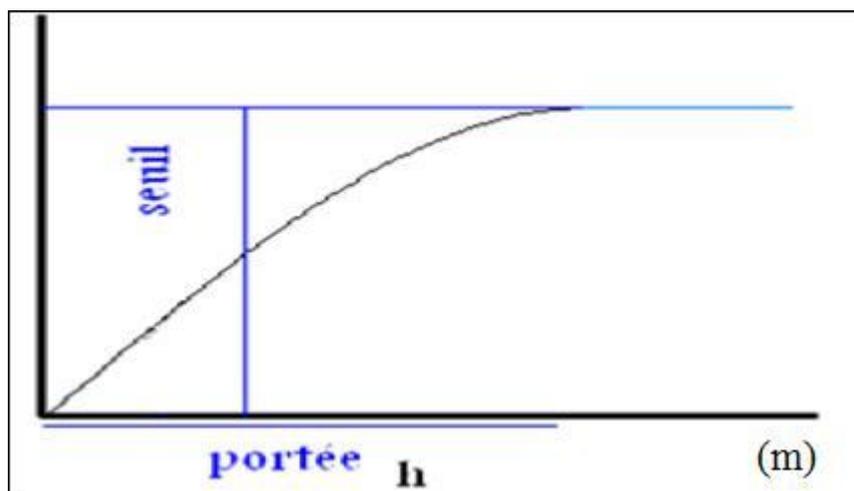


Figure. II.9. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme sphérique [15].

II.5.2.2. Le modèle exponentiel

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(\frac{-|h|}{a}\right) \right] \quad (\text{II.16})$$

La tangente à l'origine rencontre la droite du palier à l'abscisse [15].

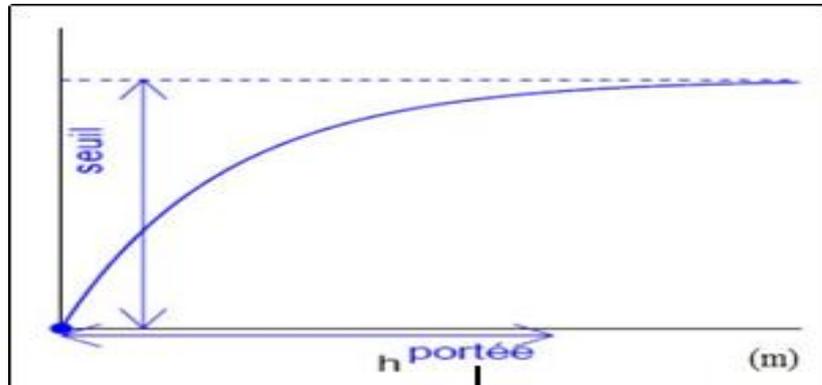


Figure II.10. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme exponentiel [15].

➤ Comportement parabolique à l'origine

II.5.2.3. Le modèle gaussien

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(\frac{-|h^2|}{a^2}\right) \right] \quad (\text{II.17})$$

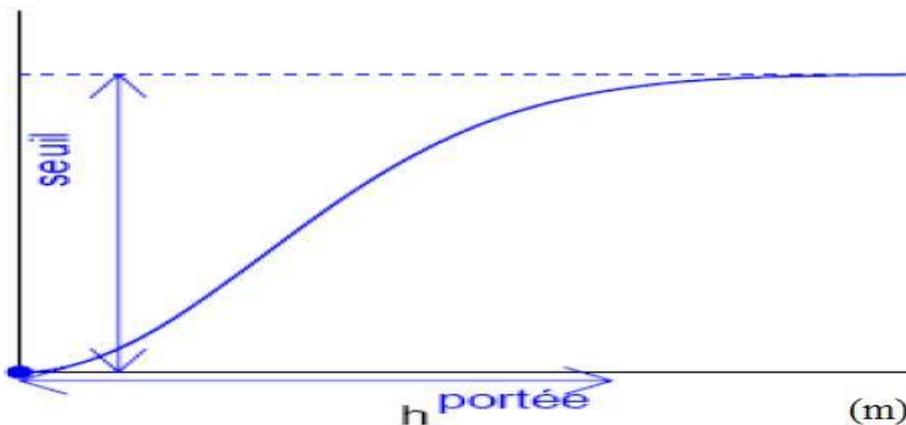


Figure II.11. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme gaussien [15].

Le modèle gaussien représente un phénomène extrêmement continu [15].

II.5.3. Analyse structurale

La première phase de toute étude géostatistique est l'analyse structurale, elle se mesure en trois étapes principales qui sont [14] :

II.5.3.1. La vérification des données

Une fois que les données ont été rassemblées, il faut qu'elles soient intégralement contrôlées afin de vérifier leur exactitude, et leur représentativité.

Avant tout, il faut se familiariser avec les données et le problème à résoudre, il faut savoir :

- ✓ Quel type de procédure (s) d'échantillonnage a été employé.
- ✓ S'il s'est produit des changements lors des procédures employées pendant les campagnes d'exploration.
- ✓ Si la zone est géologiquement homogène ou s'elle présente des failles majeures ;
- ✓ Si la zone à fortes teneurs ont été privilégiées lors de l'échantillonnage [14] ;

Remarque

Si un seul de ces points est négligé au début de l'étude, il est tout à probable de recommencer le travail ultérieurement.

II.5.3.2. les choix méthodologiques

- ✓ Quel est le support du variable ;
- ✓ Si elles sont additives et s'il faut travailler avec elles ou bien avec leurs accumulations [14].

II.5.3.3. Statistiques standard

les hypothèses fondamentales en géostatistique est que les données proviennent d'une population homogène, il est important de les soumettre à quelques tests statistiques simples avant de commencer à calculer le variogramme expérimental.

La moyenne, la variance et la corrélation doivent être calculées. Les histogrammes des valeurs doivent être examinés afin de détecter les valeurs extrêmes et voir s'il y a plus d'un mode [14].

II.6. Concept de variance d'estimation et procédure géostatistique de krigeage ordinaire

II.6.1. Concept de variance d'estimation

Si Z est la valeur inconnue que l'on cherche à estimer par la valeur mesurée ou calculée Z^* , l'erreur commise est $[Z - Z^*]$. Comme Z est une V.A. alors Z^* et $[Z - Z^*]$ sont aussi des réalisations particulières de variable aléatoire.

L'erreur aléatoire $[Z - Z^*]$ est caractérisée par ses deux premiers moments :

- ✓ Moyenne, $b = E\{[Z - Z^*]\}$, quand cette moyenne est nulle ($b = 0$), on dit que l'estimation est sans biais sinon l'estimation est biaisée.
- ✓ La variance d'estimation est définie comme étant [17] :

$$\sigma_{\text{Est}}^2 = E\{[Z - Z^*]^2\} - b^2 \quad (\text{II.18})$$

II.6.2. La procédure géostatistique de krigeage- Théorie du krigeage ordinaire

La procédure géostatistique de krigeage consiste à trouver le meilleur estimateur linéaire possible d'une V.R. d'un volume V à partir de l'information expérimentale implantée à l'intérieur ou à l'extérieur de V et d'une information structurale.

Dans le cas où la F.A. $Z(X)$ aurait les propriétés suivantes :

$Z(X)$ est stationnaire d'ordre 2 avec comme espérance mathématique $E(X) = m$ constante mais inconnu;

L'information serait constituée par un ensemble discret de N données (teneurs) Z_i par exemple ($i = 1$ à N).

Rappelons qu'il a été démontré qu'en posant :

$$\sigma_{\text{Est}}^2 = E\{[Z_v - Z^*]^2\} = 2 \sum_i \lambda_i \bar{\gamma}(S_i, V) - \bar{\gamma}(V, V) - \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \bar{\gamma}(S_i, S_j) \quad (\text{II.19})$$

La condition de non biais est que $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$

Cette équation admet comme solutions les N pondérateurs λ avec comme unique condition celle de non biais. Elle admet donc une infinité de solutions (pondérateur moyenne arithmétique, inverse des distances, polygone d'influence,...). Cependant à chaque solution correspondrait une variance d'estimation. La meilleure solution c'est celle qui donne une variance d'estimation minimale.

Le formalisme mathématique de Lagrange donne la solution la plus optimale; il permet d'aboutir au système d'équations linéaires dit système de krigeage ordinaire permettant à son tour de retrouver les N pondérateurs λ_i . Ces derniers, dit pondérateurs de krigeage, donnent la variance d'estimation la plus petite possible et elle est appelée variance de Krigeage. Ce système est le suivant [17] :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, v_j) + \mu = \bar{\gamma}(v_j, V) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{cases} \quad \forall i = 1..N \dots et \dots j = 1..N$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, V) + \mu - \bar{\gamma}(V, V)$$

Propriétés et remarques à propos du krigeage [17]:

- ✓ Le système de krigeage est un système à $N + 1$ équations à $N + 2$ inconnues qui sont les N pondérateur λ_i et μ qui est le paramètre de Lagrange.
- ✓ Le krigeage est un estimateur linéaire sans biais. C'est un interpolateur exact.
- ✓ Le système et la variance de krigeage rendent compte des 4 faits suivants :
 - de la géométrie du domaine à estimer - terme de $\bar{\gamma}(V, V)$.
 - de la géométrie entre estimant et estimateur - terme de $\bar{\gamma}(V, v_i)$
 - de la géométrie interne de l'information - terme de $\bar{\gamma}(v_j, v_i)$
 - de la structure sous-jacente - terme de $\gamma(h)$.

II.7. Contrôle des teneurs à la production

II.7.1. Prévision de la teneur d'une production programmée entre plusieurs chantiers

Soit un gisement dont la production quotidienne provient de N blocs $\{B_i, i = 1 \text{ à } N\}$ de même taille V . La teneur moyenne vraie θ_i du bloc B_i est estimée sans biais par l'estimateur θ_i^* avec la variance d'estimation $\sigma_{e_i}^2$ [16] :

$$\sigma_{e_i}^2 = E\{[\theta_i - \theta_i^*]^2\} \quad (\text{II. 20})$$

Au jour j , la production totale P_j est programmée à partir des N blocs en cours d'exploitation : chaque bloc B_i fournit le tonnage p_{ij} , de teneur vraie inconnue t_{ij} estimée par θ_i^* . Les tonnages élémentaires p_{ij} sont calculés de sorte que la teneur moyenne prévue T_j^* de la production totale P_j vérifie les contraintes de vente ou de laverie. On a ainsi, au jour j , les relations [16].

a) Tonnage totale produit :

$$P_j = \sum_{i=1}^N P_{ij} \quad (\text{II. 21})$$

b) Teneur moyenne prévue :

$$T_j^* = \frac{\{\sum_i P_{ij} \theta_i^*\}}{P_j} \quad (\text{II. 22})$$

c) Teneur moyenne vraie effectivement récupérée :

$$T_j = \frac{\{\sum_i P_{ij} t_{ij}\}}{P_j} \quad (\text{II. 23})$$

Il s'agit de contrôler l'écart entre teneur prévue T_j^* et teneur vraie T_j effectivement récupérée au travers de la variance d'estimation [16] :

$$\sigma_{E_j}^2 = E\{[T_j - T_j^*]^2\} \quad (\text{II. 24})$$

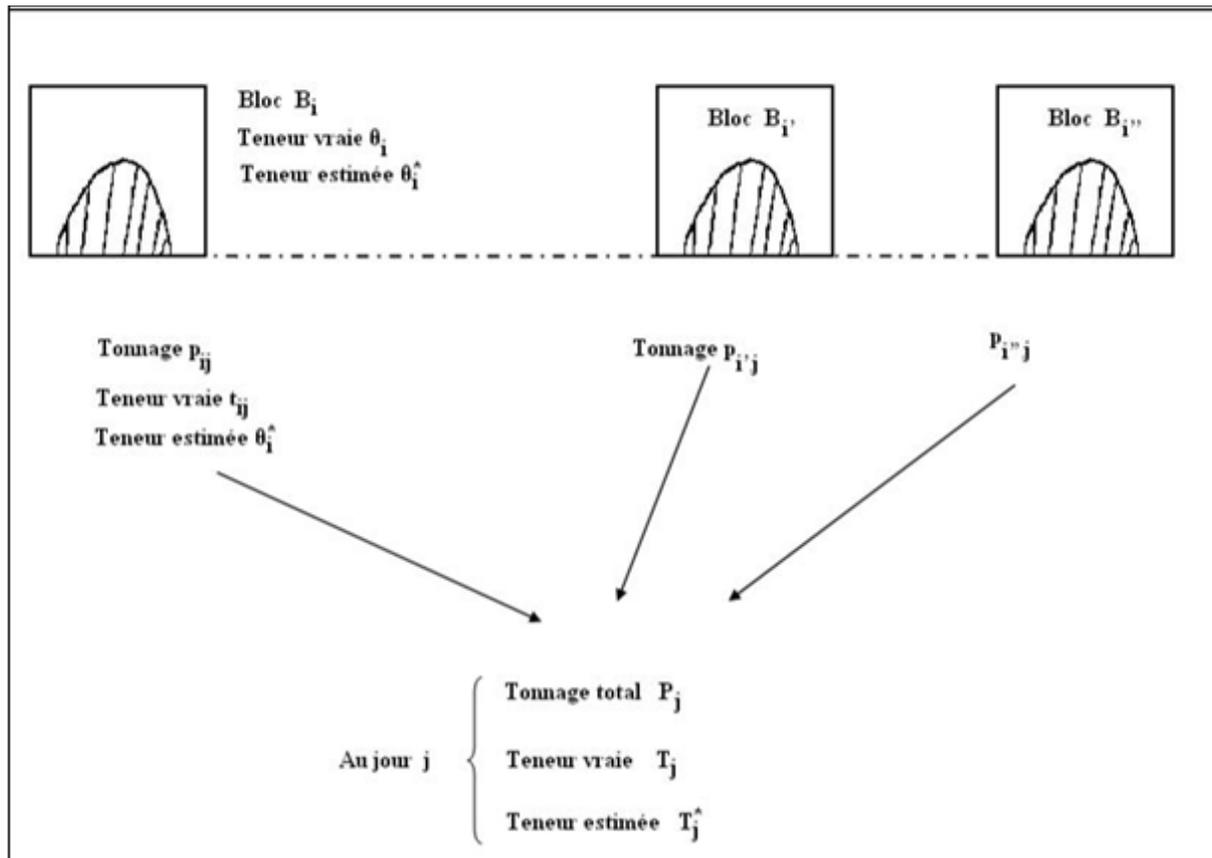


Figure. II.13. Schématisation de l’exploitation simultanée de plusieurs chantiers(JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978)[16].

On suppose les N blocs B_i plongés dans une régionalisation stationnaire dont la teneur admet l’espérance m.

Les divers teneurs :θ_i^{*}, θ_i,t_{ij}ont donne même espérance m, et la prévision de teneurest sans biais :

$$E\{T_j - T_j^*\} = \frac{\sum_i P_{ij} E\{t_{ij} - \theta_i^*\}}{P_j} = 0 \quad (II. 25)$$

Pour la variance d’estimation il vient :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{\sum_i \sum_{i'} P_{ij} P_{i'j} E\{(t_{ij} - \theta_i^*)(t_{i'j} - \theta_{i'}^*)\}}{P_j^2} \quad (II. 26)$$

Si les N blocs exploités simultanément sont suffisamment distants l'un de l'autre, on peut supposer indépendante les deux erreurs $(T_{ij} - \theta_i^*)$ et $(T_{i'j} - \theta_{i'}^*)$ pour $i = i'$. Il reste donc :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{\sum_i P_{ij}^2 E\{(t_{ij} - \theta_i^*)^2\}}{P_j^2} \quad (\text{II. 27})$$

L'erreur élémentaire peut s'écrire :

$$t_{ij} - \theta_i^* = (t_{ij} - \theta_i) + (\theta_i - \theta_i^*) \quad (\text{II. 28})$$

On peut supposer que la fluctuation des teneurs élémentaires t_{ij} à l'intérieur du bloc B_i est indépendante de l'erreur d'estimation $\theta_i - \theta_i^*$ de ce bloc; il vient alors :

$$E\{(t_{ij} - \theta_i)(\theta_i - \theta_i^*)\} = 0 \quad (\text{II. 29})$$

Si l'on connaissait exactement l'implantation du tonnage P_{ij} dans le bloc B_i , on pourrait calculer la variance d'extension de la teneur t_{ij} de ce tonnage à la teneur θ_i du bloc, c'est-à-dire le terme $E\{(t_{ij} - \theta_i)^2\}$. En pratique, il suffit de considérer la valeur moyenne de ce terme $E\{(t_{ij} - \theta_i)^2\}$ sur tout le bloc B_i , c'est-à-dire la variance de dispersion d'une unité moyenne de production t_i dans le bloc B_i :

$$\frac{1}{V} \int_{B_i} E\{(t_{ij} - \theta_i)^2\} \cong D^2(P_i/B_i) \quad (\text{II. 30})$$

P_i représente le support d'une unité de production moyenne dans le bloc B_i ; en termes de tonnages si le bloc B_i est exploité en k jours, il vient :

$$P_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k P_{ij} \quad (\text{II. 31})$$

D'autre part, par définition, $E\{(\theta_i - \theta_i^*)^2\} = \sigma_{ei}^2$ est la variance d'estimation de la teneur moyenne de bloc B_i . Si ce bloc a été estimé par krigeage, σ_{ei}^2 n'est autre que la variance de krigeage du bloc donnée directement par le système de krigeage.

Il vient finalement pour la variance d'estimation de la teneur moyenne T_j de la production totale P_j au jour j :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{1}{P_j^2} \sum_{i=1}^N P_{ij}^2 [D^2(P_i/B_i) + \sigma_{e_i}^2] \quad (II. 32)$$

Cette variance dépend donc, non seulement de la dispersion des teneurs des unités de production t_i dans chaque bloc B_i , mais aussi de la qualité des estimateurs de teneurs moyenne de ces blocs B_i (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978)[16].

Remarque 1

Si l'on peut baser la programmation de l'exploitation au jour j , non les teneurs estimées θ_i^* des blocs ou des chantiers B_i , mais sur les estimateurs t_{ij}^* de chaque unité de production, la formule précédente se réduit à la composition de N estimations élémentaires indépendantes, soit (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978) :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{1}{P_j^2} \sum_{i=1}^N P_{ij}^2 E\{[t_{ij} - t_{ij}^*]^2\} \quad (II. 33)$$

Ce cas correspond, par exemple, à un gisement à ciel ouvert dont la programmation de l'exploitation est basée sur les analyses ultimes des trous de mines permettant de former les estimateurs t_{ij}^* de chaque unité de production[16].

Remarque 2

Cependant, il arrive que l'on ne puisse pas estimer directement les teneurs t_{ij} , soit parce que l'on ne sait pas exactement où se trouve l'unité P_{ij} correspondante (ex : du soutirage par block caving de P_{ij} tonnes d'un bloc B_i), soit parce que l'on ne dispose pas de l'information nécessaire pour estimer directement t_{ij} .

Dans de tels cas, il faut bien voir que la qualité du contrôle des teneurs a une limite absolue, imposée par les dispersions des teneurs d'unités dans les blocs et obtenue en annulant les variances d'estimation $\sigma_{e_i}^2$ (c'est-à-dire en supposant les teneurs vraies θ_i des blocs B_i parfaitement connues). Il vient alors pour valeur minimale de la variance d'estimation $\sigma_{E_j}^2$ des teneurs quotidiennes:

$$\min \{ \sigma_{E_j}^2 \} = \frac{1}{P_j^2} \sum_i P_{ij}^2 D^2(P_i/B_i) \quad (II. 34)$$

Si de plus, les productions quotidiennes P_{ij} extraites de chaque bloc B_i sont à peu près égales, on a :

$$D^2(P_i/B_i) = D^2(P/B) \quad \forall i, \quad (\text{II.35})$$

Et il vient :

$$\min \{ \sigma_{E_j}^2 \} = \frac{1}{N} D^2(P/B) \quad (\text{II.36})$$

Si $N=1$, la variance d'estimation $\sigma_{E_j}^2$ prise en moyenne sur le bloc B est égale à la variance de dispersion; si $N > 1$, la formule correspond à la composition de N variances d'estimation moyennes élémentaires et indépendantes[16].

Remarque 3

On observe que si l'on veut améliorer le contrôle des teneurs de productions quotidiennes, c'est-à-dire si l'on veut diminuer en moyenne les écarts entre teneurs prévues T_j^* et teneurs effectivement récupérées T_j .

✓ Soit cherché à diminuer les variances d'estimation $\sigma_{E_j}^2$: les teneurs de blocs B_i étant mieux estimées, la programmation de la production est faite sur des bases plus sûres.

☒ Soit plutôt à diminuer la variance de dispersion moyenne $\frac{1}{N} \sum_i D^2(P_i/B_i)$ en augmentant le nombre N de chantiers : l'effet de compensation des erreurs d'estimation $(t_{ij} - \theta_i^*)$ entre les différents chantiers est alors plus fort[16].

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons essayé de présenter les principes de mise en œuvre d'une analyse géostatistique.

Dans une étude géostatistique on se base sur le variogramme, permettant une analyse de la structure spatiale de la variable étudiée. De sorte qu'on est capable de décrire la façon dont la précision de l'information acquise en un point se dégrade au fur et à mesure que l'on s'en éloigne de l'origine.

La deuxième étape de la démarche géostatistique consiste à utiliser cette structure spatiale dans une procédure d'estimation, il s'agit du krigeage.

III.1. Introduction

Au cours de ce chapitre, nous allons exposer les données d'exploration issue du gisement de Bled El Hadba, suivi par une étude statistique de ces données afin d'utiliser les paramètres des variogrammes par la suite dans l'estimation par krigeage.

III.2. Variables étudiés et champ d'étude

Dans le but d'évaluer les réserves en phosphate du gisement de Bled El Hadba, nous avons pris comme variables les teneurs en P_2O_5 et les épaisseurs de la couche basale du gisement de Bled El Hadba.

Dans le cadre des travaux d'exploration des phosphates du gisement de Bled El Hadba qui ont pour objectif, la précision et l'augmentation des réserves de minerais de phosphates vers les catégories supérieures, ainsi que la recherche de nouvelles ressources, L'ORGM a réalisé 45 sondages carottés, notés SPH01-SPH02,...SPH45, couvrants une superficie de 66044300 m² (660.43 ha), totalisant une longueur de 8 km.

Les sondages les plus profonds sont le SPH02 et SPH18 (336 m), le sondage le plus court est le SPH45 (66 m) [3].

Sur le plan, les sondages sont projetés en fonction de la maille d'exploration appropriée pour chaque catégorie de réserves, en incluant les ouvrages des compagnes antérieures dans l'ensemble des blocs.

- ✓ Pour le bloc « B », la maille est de (200 x 250 m) ;
- ✓ Le bloc « C1 » : (400 x 500 m) ;
- ✓ Le bloc « C2 » : > 500 m.

Tous les sondages « Figure III.1 », ont été implantés verticalement, vu le pendage doux de la couche de minerai ; de 6 à 10° vers l'Ouest.

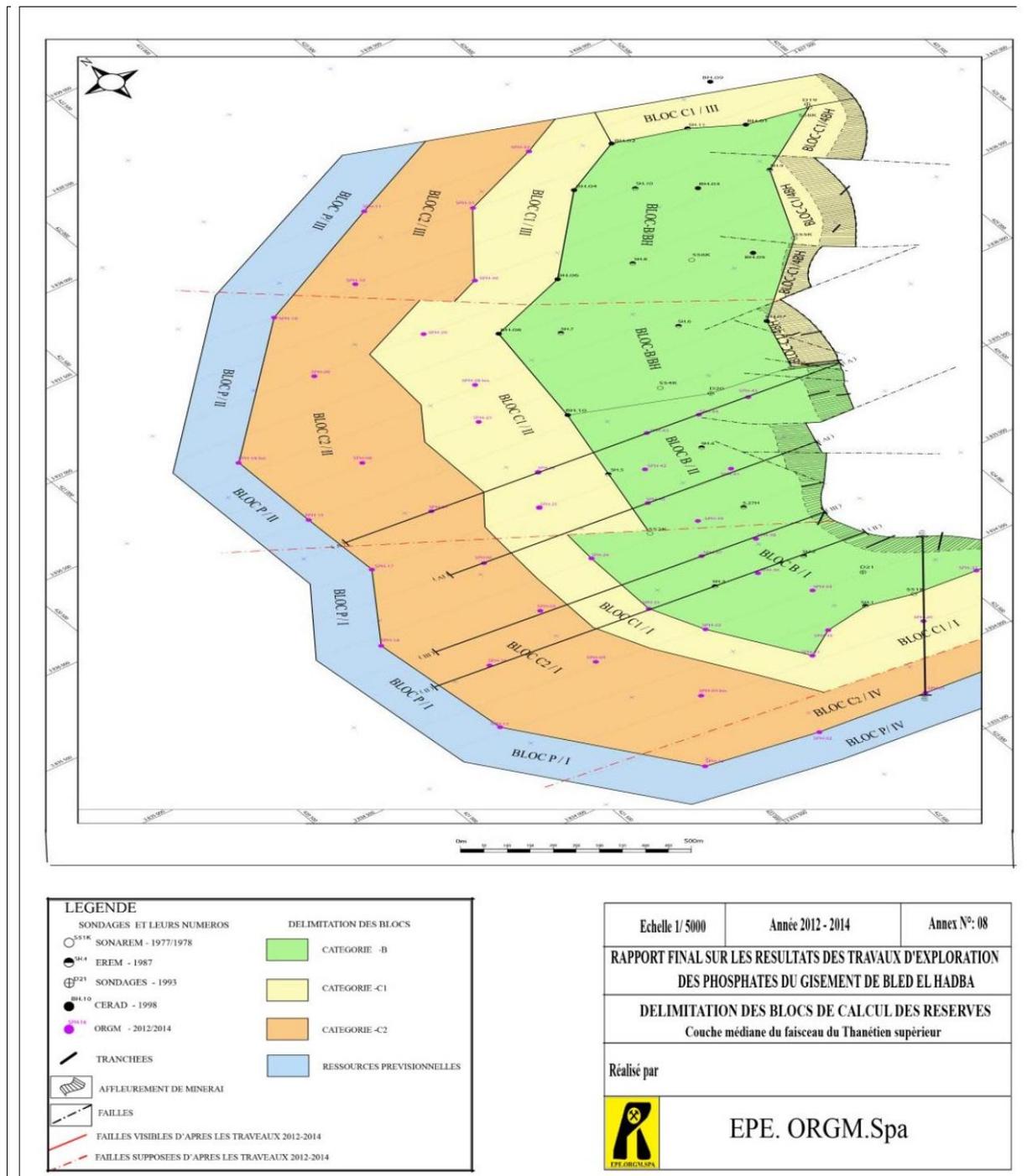


Figure III.1. Plan d’implantation des sondages des différentes campagnes de prospection [3].

Les sondages des campagnes de recherches antérieures qui sont pris en considération sont répartis comme suite :

- SONAREM.1978: S27K, S51K, S52K, S53K, S54K, de maille de 400 x 900 m;
- EREM.1987: S01H, S02H, S03H, S04H, S05H, de maille de 400 x 600 m;
- BRGM.1993: D20; EREM/FERPHOS.1998: BH02, BH04, BH06, BH8, BH10 [9].

Il est à signaler que, pour notre étude, nous avons utilisé la norme (Jorc/Soviétique) pour la classification des réserves du gisement de Bled El Hadba. La classification des réserves selon la norme JORC est basée sur le degré de prospection.

Tableau III.1. Schéma d'équivalence entre système de classification soviétique (historique) et le code JORC (2012) [3].

Russe	code de rapport international, JORCetc.
A, B	Réserve prouvée /ressource mesurée
C ₁	Prouvée ou probable
	Réserve /ressource indiquée
C ₂	Réserve probable /ressource indiquée/ ressource différée
P ₁	Ressource différée
P ₂	Ressource minérale de reconnaissance (comme indiquée dans le classement
P ₃	du cadre de L'ONU pour la réserves /ressources, code 334 non équivalent.

Le calcul des réserves a été effectué pour un ensemble des 61 sondages pour la couche basale.

Deux types de variogrammes (directionnels et omnidirectionnels) ont été construits afin d'étudier la variabilité spatiale des variables étudiées.

Ces variogrammes ont été utilisés pour estimer les réserves locales à l'aide du krigeage ordinaire et krigeage des blocs.

III.3. Base de données numériques

Dans le cadre de ce travail, les calculs variographiques, leurs modélisation ainsi que les calculs de krigeage ont été effectués à l'aide de programme S-GeMS, version 2.1. Ce programme permet de calculer les histogrammes, les variogrammes avec l'ajustement des modèles théoriques, les cartes de krigeage et leurs variances.

L'analyse et le traitement des données à l'aide d'un outil informatique, exige une forme spéciale du fichier contenant ces informations de terrain. Une base de données sera préparée en utilisant le logiciel S-GeMS (Figure III.2), représente les éléments essentiels pour la mise en place des données sous forme numérique. Le type de fichier a été enregistré en extension « .txt ».

6						
X						
Y						
Z						
Zmin						
T						
E						
422951.71	3833827.00	745.22	436.42	16.47	6.40	
422461.35	3833873.81	727.39	403.64	17.25	4.70	
422228.67	3834344.45	729.15	529.4	18.84	5.10	
422026.84	3834772.48	729.14	548.09	19.38	6.70	
422054.66	3835168.99	727.63	572.68	13.51	9.10	
422056.39	3835552.37	728.27	569.02	18.27	11.90	
422092.35	3835947.81	732.07	502.52	22.41	2.90	
422061.60	3836364.53	729.18	480.18	21.65	5.40	
422249.86	3836929.51	732.11	491.71	22.24	5.00	
422739.08	3837315.32	736.61	527.61	21.96	5.40	
423052.38	3837675.40	741.3	549.7	18.45	9.20	
421965.36	3833965.11	722.11	361.51	15.62	4.00	
421466.37	3834654.08	718.87	481.62	17.34	4.90	
421409.94	3835364.06	716.86	483.11	20.90	5.50	
421670.24	3836192.53	723.61	432.71	23.29	5.60	
421675.60	3835002.70	719.43	522.78	16.28	10.10	
421677.01	3835784.28	722.79	504.29	22.27	4.00	
421672.36	3836657.11	730.03	432.255	19.36	2.65	
422351.03	3837331.72	740.27	498.42	20.59	3.30	
423224.60	3834207.85	750.99	633.24	18.77	6.50	
422737.86	3834289.41	740.2	583.6	16.59	6.80	
422501.59	3834679.15	741.73	617.43	19.89	8.20	
422400.56	3834921.38	739.08	619.73	18.62	7.70	
422415.54	3835322.04	737.49	620.64	23.44	7.30	
422450.36	3835712.27	738.41	558.71	22.22	2.60	
422584.49	3835899.77	741.45	565.5	23.52	2.70	
422589.90	3836303.01	740.94	544.84	19.58	3.00	
422724.39	3836505.44	744.29	557.64	20.39	4.70	
422759.38	3836893.31	741.1	539.65	21.75	3.00	
423130.39	3837051.34	749.32	576.47	18.05	3.90	
423408.19	3837435.16	755.81	602.11	19.36	4.40	
423807.66	3837597.77	767.14	634.49	13.22	4.30	
423590.20	3834346.74	765.63	700.43	18.58	7.20	
422991.14	3834631.18	757.91	685.06	19.92	11.70	
422885.51	3834385.32	747.63	626.23	12.16	5.40	
422886.56	3834851.87	759.18	686.13	18.92	4.50	
422775.40	3835073.74	755.41	676.66	17.80	6.50	
423014.68	3835035.47	774.35	706.375	17.95	4.95	
422901.07	3835265.63	757.9	686.3	17.03	6.40	
422811.21	3835477.64	750.84	650.24	20.15	2.40	
423208.67	3835461.40	767.96	710.96	17.21	5.40	

Figure III.2. Fichier représentatif de la forme de la base des données, préparé pour l'analyse.

Dans ce qui suit, nous représentons une étude statistique et variographique détaillée de la couche basale ; qui possède de meilleures caractéristiques d'exploitation (Ep, t).

III.4. Etude statistique de la Couche basale

III.4.1. Epaisseurs

L'analyse statistique des données de terrain fournées à la phase d'exploration montre que la couche basale présente l'épaisseur la plus importante; où elle peut atteindre jusqu'à 18 m, avec une moyenne de 6.73 m.

Les trois quarts des épaisseurs sont inférieurs à 8.8 m, l'épaisseur minimale est de 2.4 m, avec une variance de 10.31 qui traduit l'hétérogénéité de la distribution des épaisseurs.

Les paramètres statistiques de distribution des épaisseurs ont été calculés. Les résultats obtenus sont présentés dans le graphe ci-dessous :

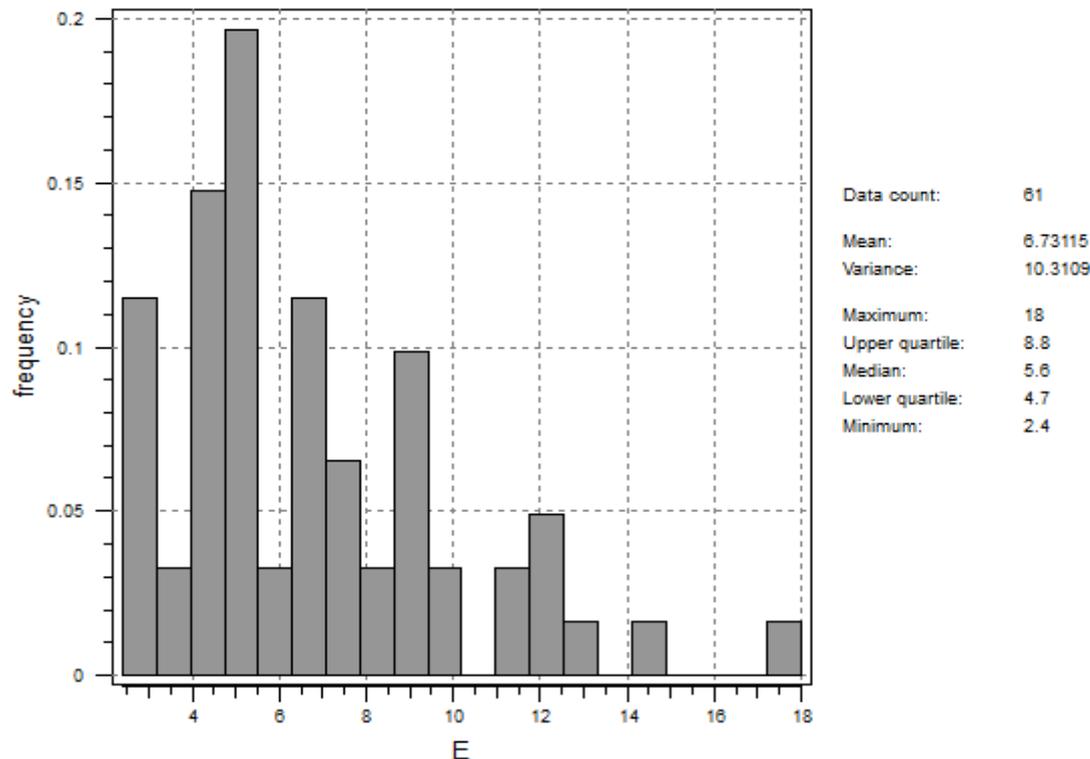


Figure III.3. Histogramme des épaisseurs de la couche basale.

III.5. Analyse variographique

Le modèle sur lequel se base le krigeage suppose la connaissance de la structure de dépendance spatiale de la fonction aléatoire γ . Cependant, en pratique celle-ci est rarement connue. L'analyse variographique est une étape préalable au krigeage qui permet de l'estimer. Cette analyse est en fait l'étude du comportement spatial de la variable régionalisée examinée.

Dans ce présent travail, l'analyse a été faite à l'aide du logiciel S-GeMS. D'abord, le variogramme expérimental est calculé, puis un modèle théorique de variogramme est choisi et ajusté au variogramme expérimental.

III.5.1. Variogramme expérimental

Le variogramme expérimental n'est pas exactement une fonction, mais plutôt un nuage de points, car il n'est calculable que pour les valeurs de h pour lesquelles $N(h)$ sont suffisamment grand. Quand les données sont irrégulièrement espacées, le variogramme expérimental est erratique, car peu de paires de données interviennent dans son calcul.

Pour le rendre plus robuste, on introduit des tolérances sur la longueur et l'angle du vecteur h , c'est-à-dire que l'on retient dans le calcul toutes les paires de données dont la séparation est à peu près égale à h .

En règle générale, la tolérance sur les distances est prise à la moitié du pas de part et d'autres de la distance considérée afin de n'utiliser données qu'une unique fois.

Les tolérances angulaires tendent à estomper les anisotropies existantes : la tolérance mélange des directions de plus ou moins grandes continuité, pour obtenir une direction moyenne. Avec une tolérance de 90° , on obtient un variogramme omnidirectionnel [14].

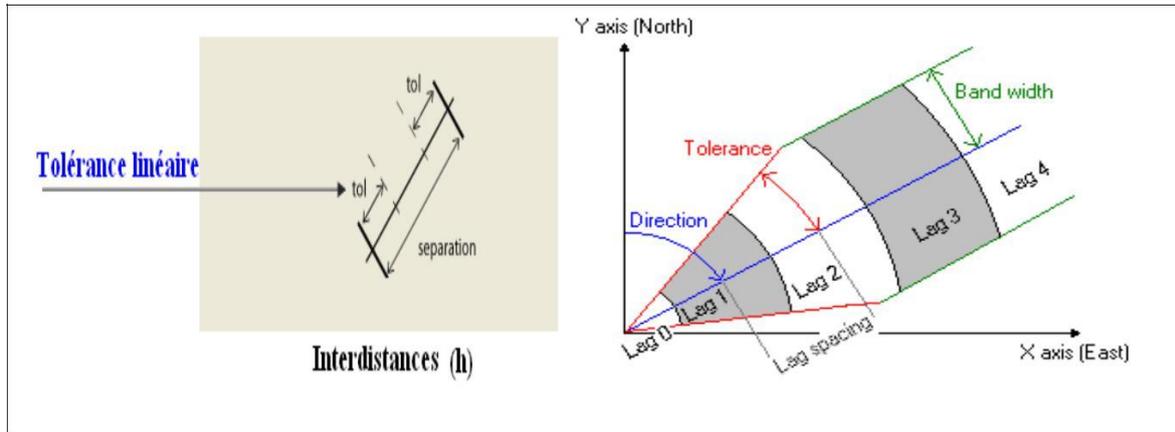


Figure III.4. Tolérance linéaire (a) et angulaire (b) [13].

III.5.2. Paramètres pour le calcul du variogramme expérimental

Le calcul du variogramme expérimental fait intervenir plusieurs paramètres, qui relèvent du choix de l'utilisateur : direction de calcul, pas et tolérance.

Pour notre cas d'étude, les paramètres utilisés pour construire les variogrammes sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.2. Paramètres pour le calcul des variogrammes.

Interdistances				
Nombre de lag	Interdistances h		Tolérance linéaire(m)	
500	10		5	
Directions				
Nombre de direction (5)				
N°	Azimut(°)	Pendage(°)	Tolérance angulaire(°)	Largeur de la bande (m)
Omnidirectionnel	0	0	90	5000
1	0	0	22.5	2000
2	45	0	22.5	2000
3	90	0	22.5	2000
4	135	0	22.5	2000

Généralement, La modélisation des variogrammes comprend deux étapes. Premièrement, il convient de déterminer le type de modèle de variogramme (ex. linéaire, sphérique, exponentiel, etc....), le nombre de structures et la présence possible d'anisotropie dans le modèle. Ensuite, les paramètres du modèle (effet de pépite, palier et portée) sont estimés.

III.6. Etude variographique des données

Nous allons présenter et déterminer les paramètres essentiels des variogrammes expérimentaux. Dans un premier temps, on va présenter les nuées variographiques des variables étudiées., Puis on va présenter les variogrammes des épaisseurs et teneurs des différentes couches minéralisées, afin de caractériser les continuités spatiales.

Les figures ci-dessous montrent les nuées variographiques des épaisseurs et des teneurs.

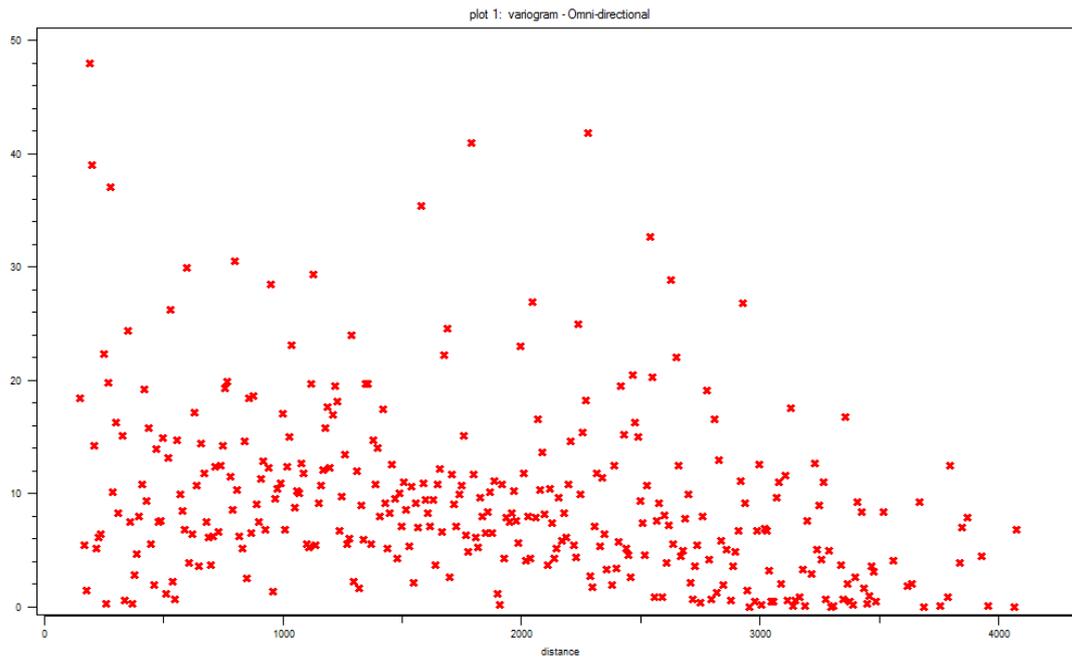


Figure III.5. La nuée variographique des épaisseurs.

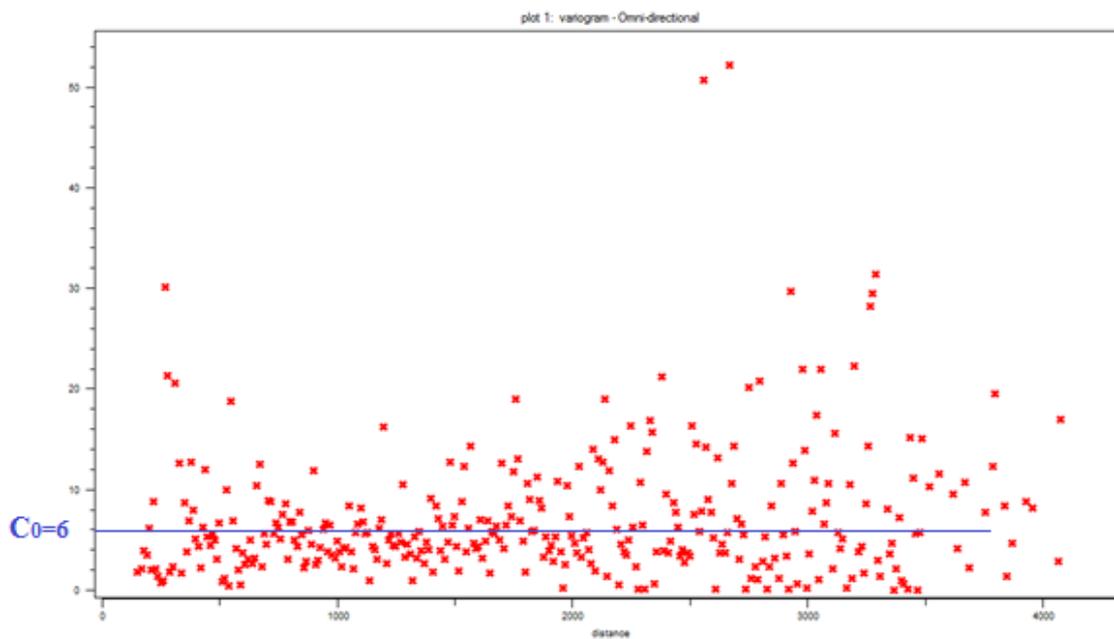


Figure III.6. La nuée variographique des teneurs.

Une bonne structure de variogramme expérimental est celle qui s'approche d'un modèle théorique connu avec un effet de pépité le plus faible possible.

De plus les points expérimentaux doivent être obtenus à l'aide d'un nombre de paires d'échantillons excédent les 30 paires.

En général, le variogramme expérimental est peu fiable au-delà d'une distance égale à la moitié du diamètre du champ dans la direction considérée [15].

La nuée variographique des teneurs c'est la première étape de modélisation des variogrammes comme représenté sur la (Figure III.6) dont la portée $C_0=6$.

III.6.1. Les variogrammes des épaisseurs

III.6.1.1. Etude variographique de la couche basale

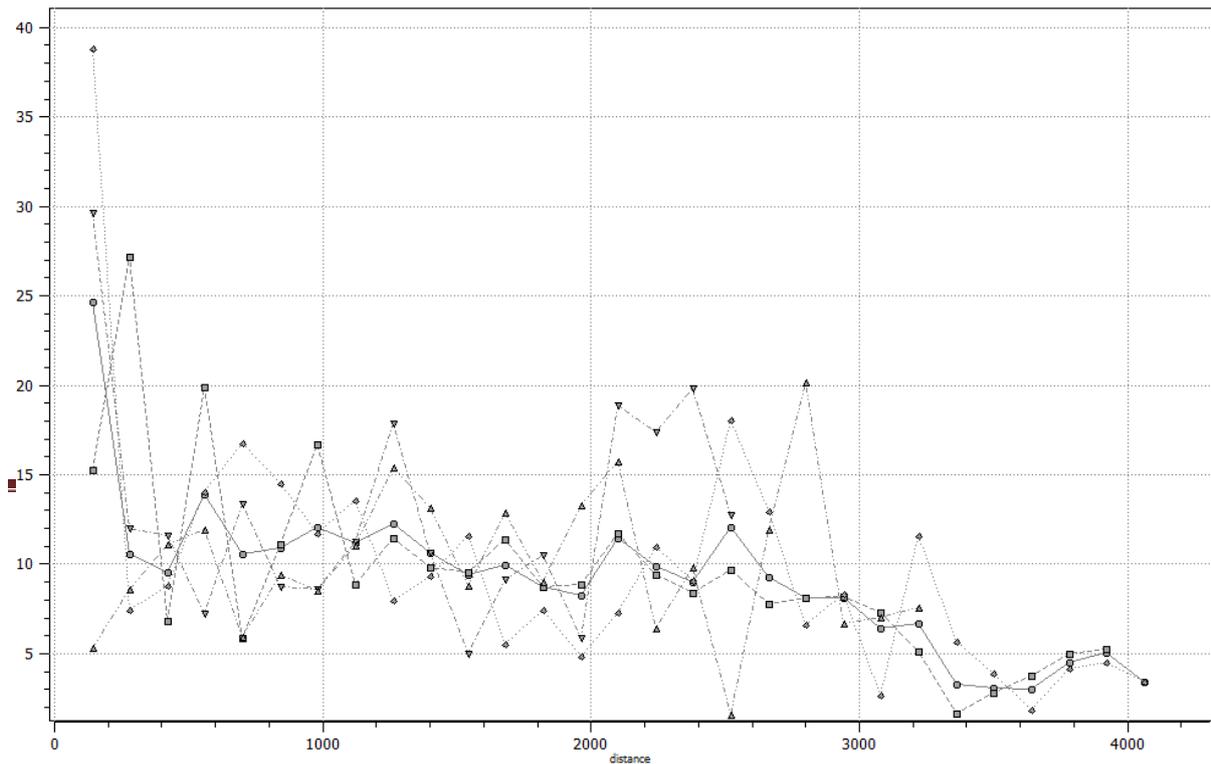


Figure III.7. Ensembles des variogrammes directionnels et omnidirectionnels des épaisseurs de la couche basale.

a) Variogrammes directionnels

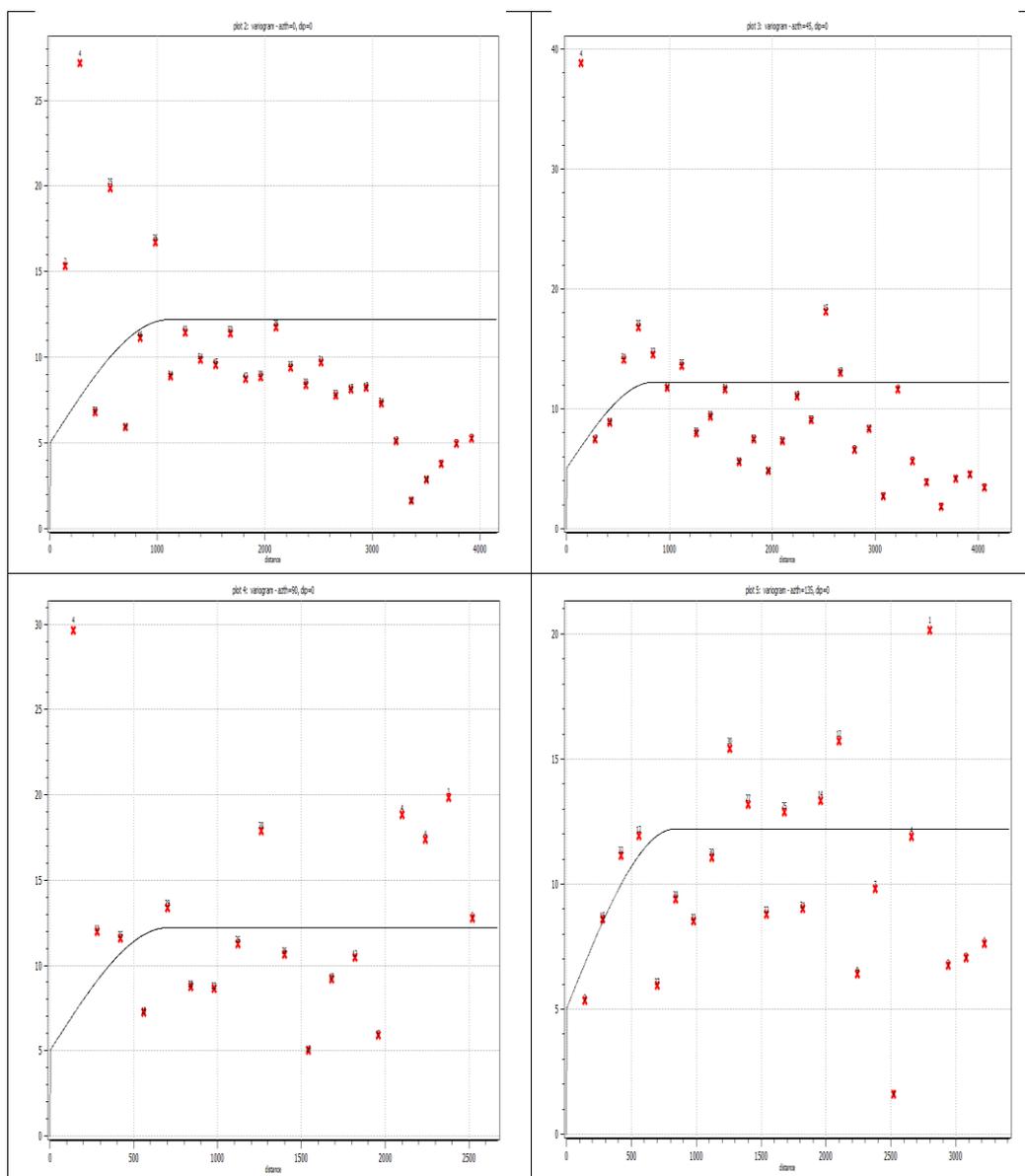


Figure III.8. variogrammes directionnels des épaisseurs de la couche basale (voir l'annexe I.1).

b) Variogrammes omnidirectionnels

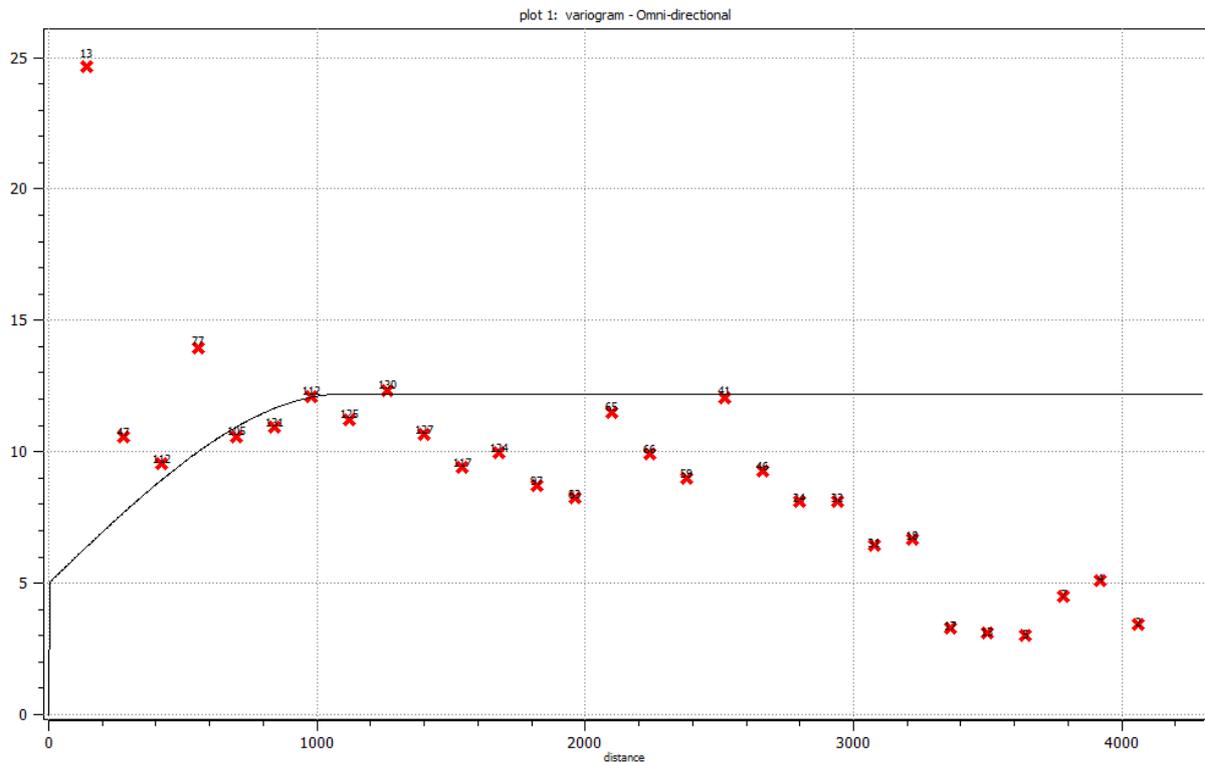


Figure III.9. variogramme omnidirectionnel des épaisseurs de la couche basale (voir l'annexe I).

Sur les (Figures III.8 et III.9), on observe que les portées diffèrent selon les directions de calcul, mais le palier reste identique ($C = 12.2$), ce qui explique la présence d'anisotropie géométrique. Une portée maximale $a = 1100$ m est apparue dans le variogramme omnidirectionnel par rapport à l'axe azimutal. La portée minimale est observée dans le variogramme de direction 90° .

Tableau III.3. Directions d'anisotropie des variogrammes des épaisseurs.

Direction ($^\circ$)	Portée (m)	Palier (seuil)	Effet de pépité
omnidirectionnel	1100	12.2	5
0°	1000	12.2	5
45°	800	12.2	5
90°	600	12.2	5
135°	800	12.2	5

Tableau III.4. Paramètres intrinsèques des variogrammes des épaisseurs.

La couche phosphatée	variable	Pas (m)	Tolérance (°)	Effet de pépité	Palier	Portée (m)	Variogramme ajusté
Basale	Epaisseur(m)	140	70	5	12.2	1100	sphérique

III.6.2. Etude variographique des teneurs

Avec la même méthode, on détermine les paramètres du variogramme théorique, afin de choisir le modèle théorique à utiliser, on peut déduire à partir des variogrammes directionnels, les paramètres caractéristiques correspondants.

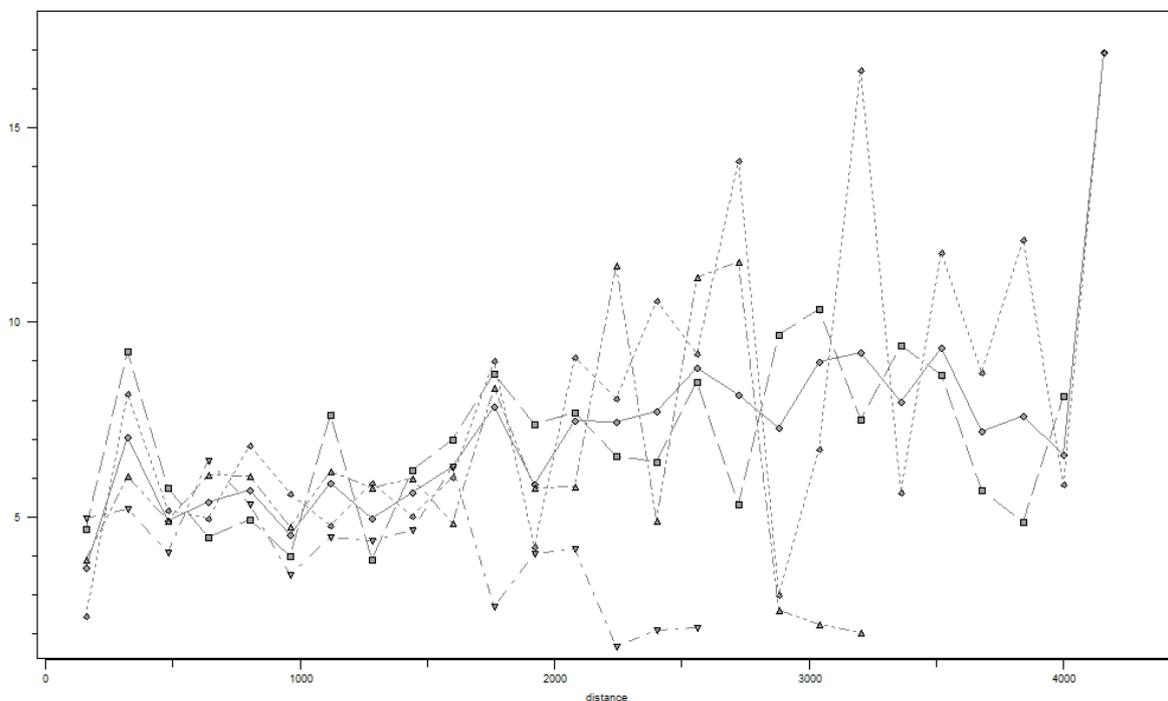


Figure III.10. variogrammes directionnels et omnidirectionnels des teneurs de la couche basale.

a) Variogrammes directionnels

La (Figure III.11), montre les différents variogrammes directionnels des teneurs en P_2O_5 , le long des quatre directions principales du plan, d'orientations 0° , 45° , 90° , 135° par rapport à la direction azimutale.

Ces variogrammes directionnels ont été construits et ajustés par un modèle exponentiel, comportant un effet de pépité de 1.3 et un palier de 6.

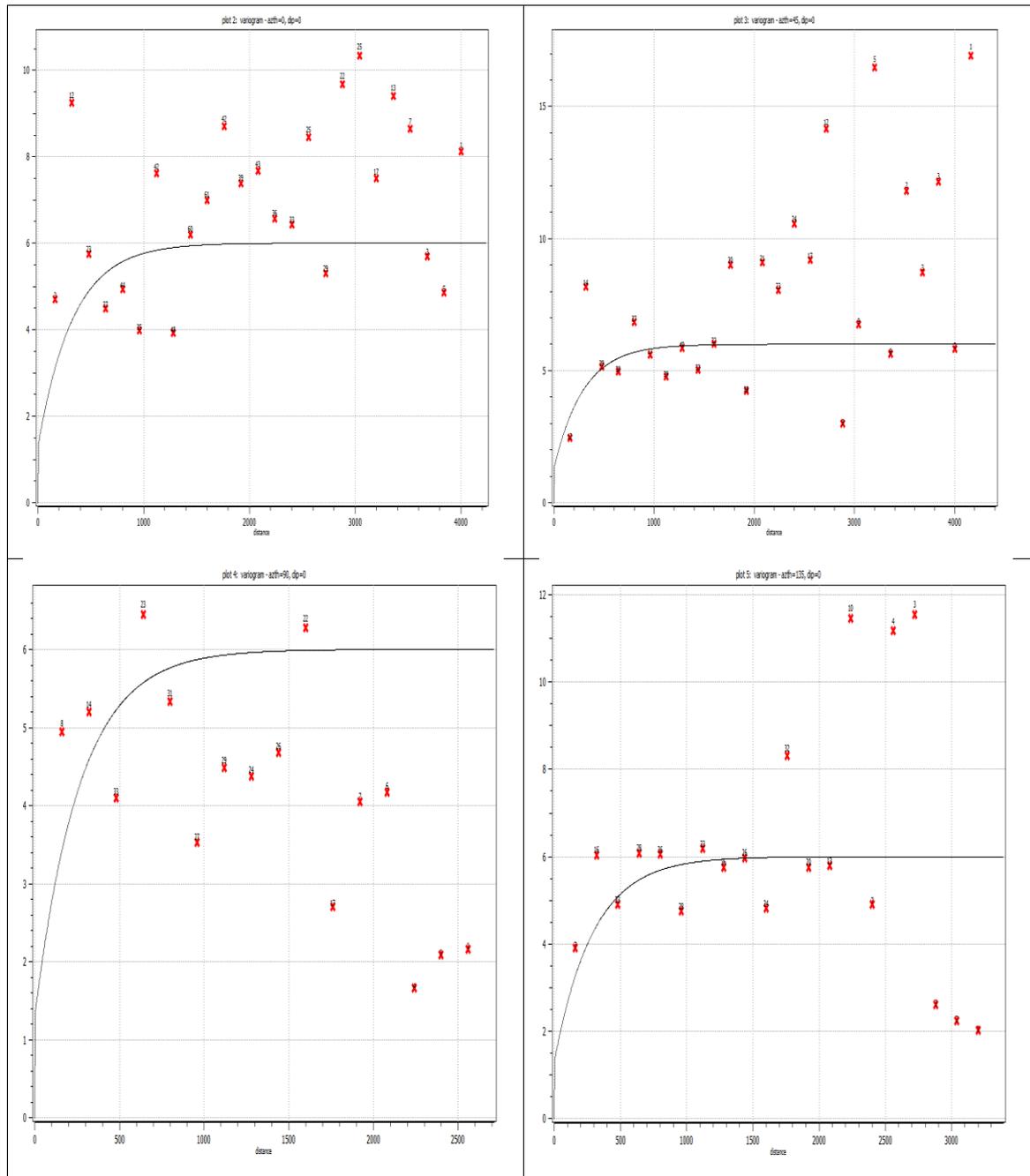


Figure III.11. Ensembles des variogrammes directionnels des teneurs de la couche basale avec l'ajustement des modèles expérimentaux (voir l'annexe II.1).

b) Variogramme omnidirectionnel

Le variogramme omnidirectionnel des teneurs en P_2O_5 de la couche basale a été construit et ajusté par un modèle exponentiel de portée $a = 1200$ m, d'un effet de pépite $C_0 = 1.3$ et d'un palier $C = 6$.

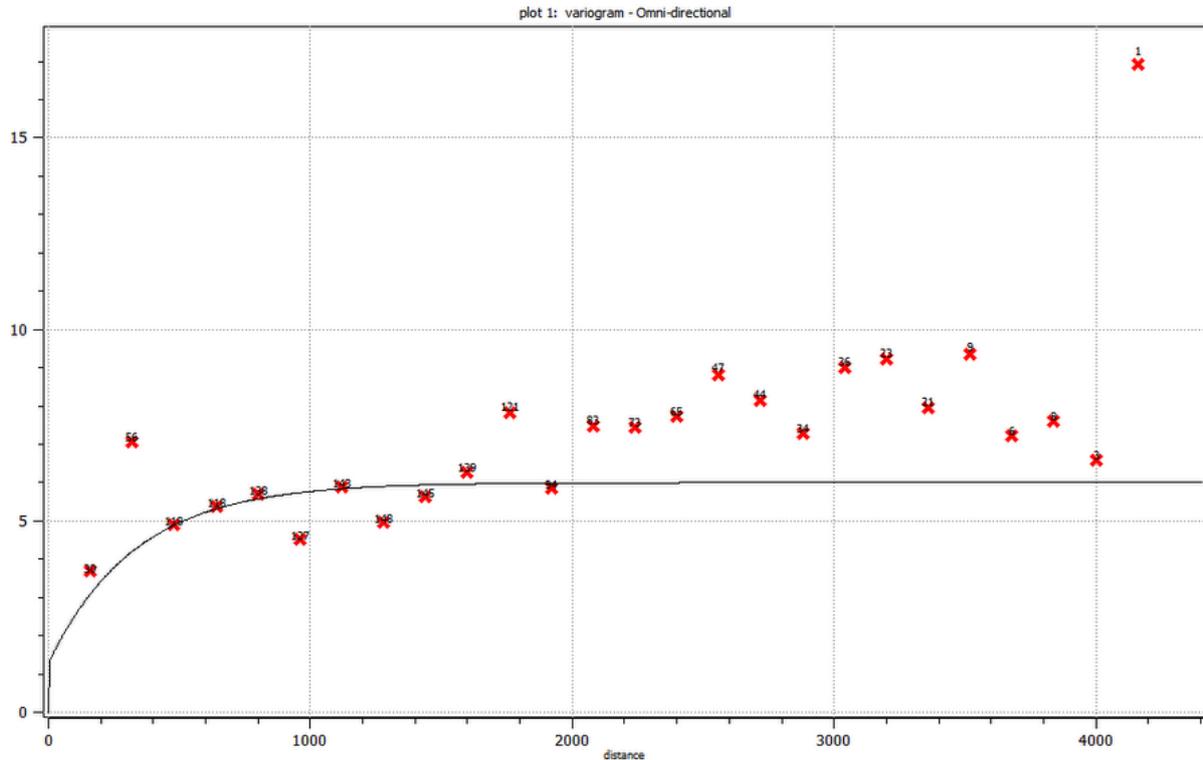


Figure III.12. Variogramme omnidirectionnel des teneurs de la couche basale (voir l'annexe II).

Il ressort de ces résultats que, les variogrammes sont anisotrope. En effet, pour un même palier ($C = 6$) ; on observe des différentes portées pour les différentes directions du plan, ce qui est expliqué par la présence d'une anisotropie géométrique.

La direction de plus grande continuité correspond à la direction omnidirectionnelle avec une portée maximale de 1500 m, et celle de plus petite continuité s'observe dans la direction 45° dont la portée est de 1200 m.

Tableau III.5. Directions d'anisotropie des variogrammes des teneurs.

Direction (°)	Portée (m)	Palier (seuil)	Effet de pépite
omni directionnel	1200	6	1.3
0°	1400	6	1.3
45°	1200	6	1.3
90°	1500	6	1.3
135°	1400	6	1.3

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé aux calculs des variogrammes expérimentaux, afin d'extraire les paramètres théoriques qu'on va utiliser par la suite, pour l'estimation par krigeage des variables étudiées, suivant la couche basale.

Au cours de cette étude variographique nous constatons que les variogrammes calculés ont un comportement anisotropique expliqué par la différence de portées dans ces derniers, cette anisotropie due généralement à l'extension du gisement, et la distribution du phosphate dans ce dernier.

La portée ressortie de ces variogrammes est largement justifié par le type de gisement objet de notre étude (gisement sédimentaire).

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les cartes résultantes du krigage ordinaire suivie par une estimation des réserves en utilisant d'une part, le krigage ponctuel et d'autre part, les réserves résultantes de l'estimation par le krigage des blocs.

A la fin de ce chapitre, nous comparons les résultats des calculs des réserves de krigage par bloc et le krigage ponctuel.

IV.2. Méthodologie de krigage

Nous avons krigé les épaisseurs et les teneurs de couche basale séparément.

Les résultats variographiques de couche phosphatée ont été utilisés pour le krigage ordinaire à deux dimensions (2D) des épaisseurs et des teneurs en P_2O_5 .

Dans notre cas d'étude, on cherche à estimer la variable régionalisée aux nœuds d'une grille régulière qui couvre la zone étudiée.

IV.3. Grille de krigage

Dans ce krigage ponctuel, on utilise une grille régulière horizontale (2D) qui prolonge sur toute la superficie de site avec une maille unitaire de $5 \times 5 \text{ m}^2$. La grille comprend au totale 578×810 points, il y aura en tout 468180 points à krigé dans une superficie de 11.66 Km^2 .

Dans ce krigage des blocs, on utilise une grille régulière horizontale (2D) qui prolonge sur toute la superficie de site avec une maille unitaire de $99 \times 99 \text{ m}^2$.

IV.4. Résultats obtenus par krigage ordinaire

Après les résultats de krigage, on utilise les propriétés de variogramme pour obtenir une estimation complète du site avec la carte de la variance d'estimation.

IV.4.1. Carte des épaisseurs de la couche basale

La carte présentée ci-dessous (figure IV.1) présente la répartition des épaisseurs de la couche basale du gisement de Bled El Hadba. Elles variaient de (4 à 7 m) au Sud-Est et de (9 à 11.37 m) dans la direction Nord-Ouest. Au centre, l'épaisseur est de (2.7 à 5 m).

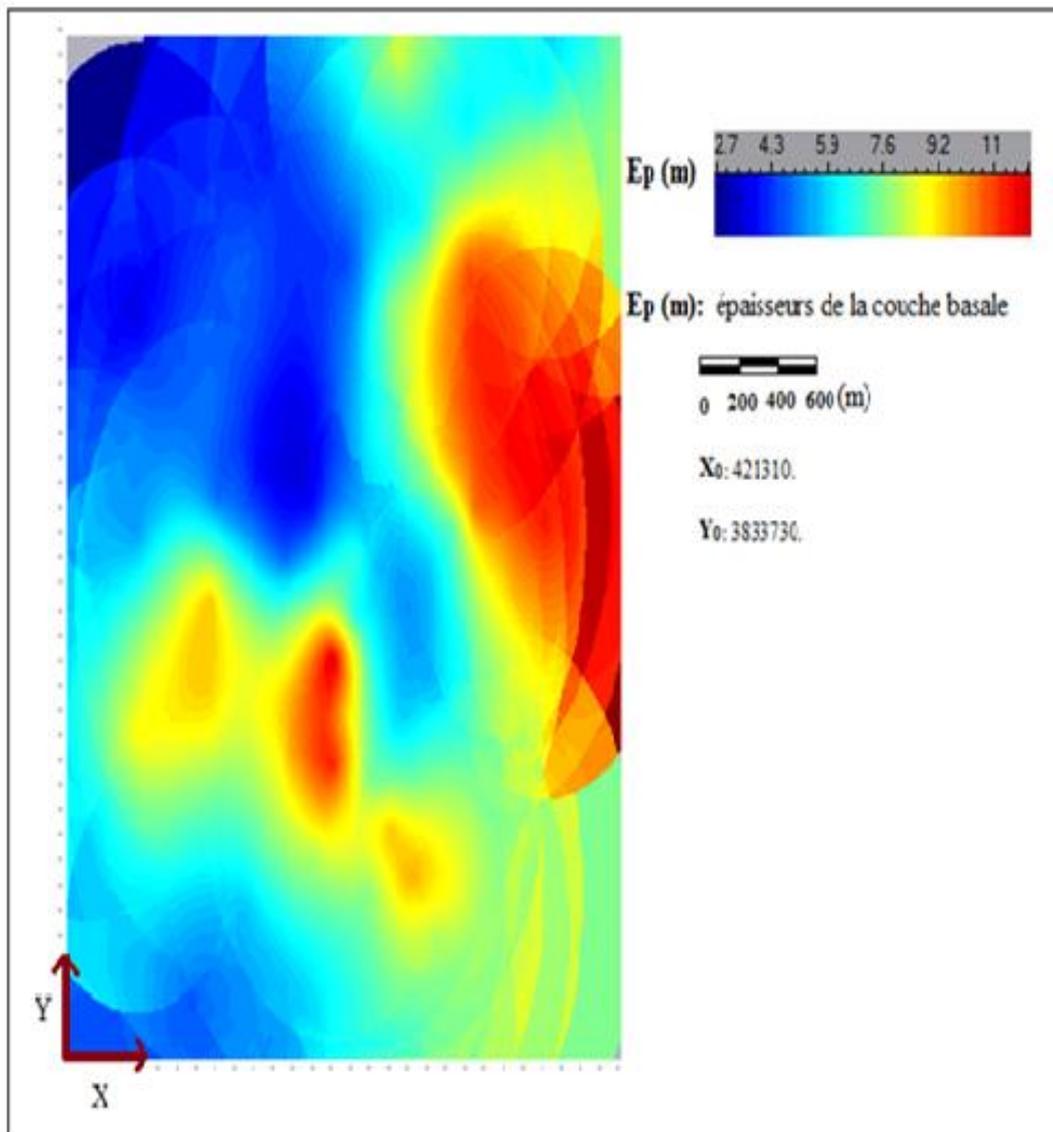


Figure IV.1. Carte représentative du krigage des épaisseurs de la couche basale.

IV.4.2. Variance de krigage pour les épaisseurs de la couche basale

Rappelons que la variance maximale du variogramme des épaisseurs est de 12.2.

La carte de la variance de krigage (Figure IV.2) montre une variance de krigage maximale de 22 aux extrémités des directions Nord-Ouest et Sud-Est.

Dans presque toute la zone prospectée, on remarque une variance d'environ de 10 donc inférieur à 12.2; là on a des épaisseurs acceptables pour l'exploitation, ce qui donne des éclaircissements sur la qualité de la carte estimée par krigage.

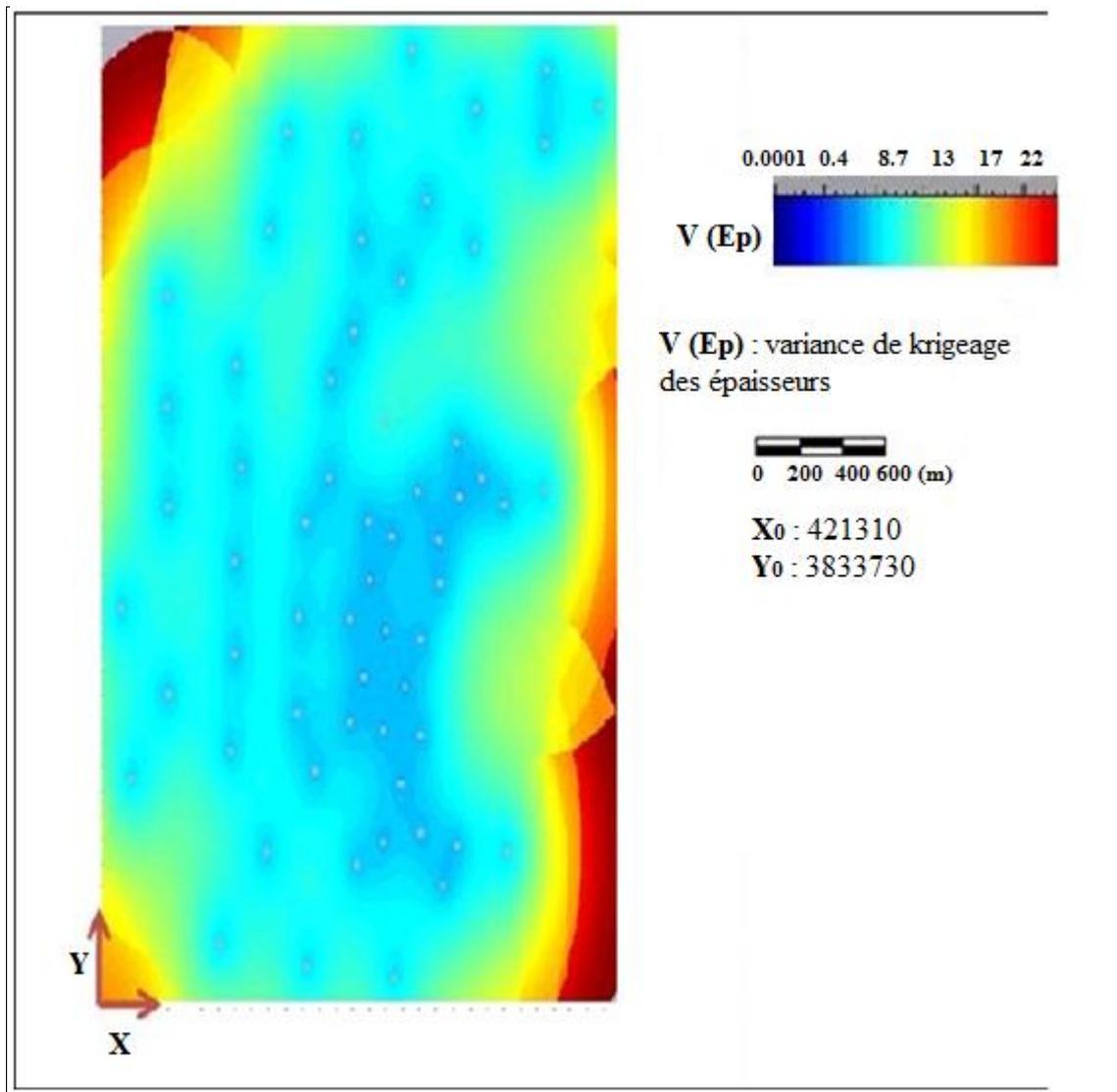


Figure IV.2. Variance de krigage des épaisseurs de la couche basale.

IV.4. 3. Carte de répartition des teneurs en P2O5

La (Figure IV.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.

Sur la figure, nous remarquons une distribution des teneurs qui varie de (20 à 22% max) dans la direction Nord-Ouest et presque dans tout le Sud, et dans la direction Nord-Est les teneurs sont d'environ de 19 %.

Dans une petite zone centrale, on observe des teneurs qui variées de 17 jusqu'à 19%.

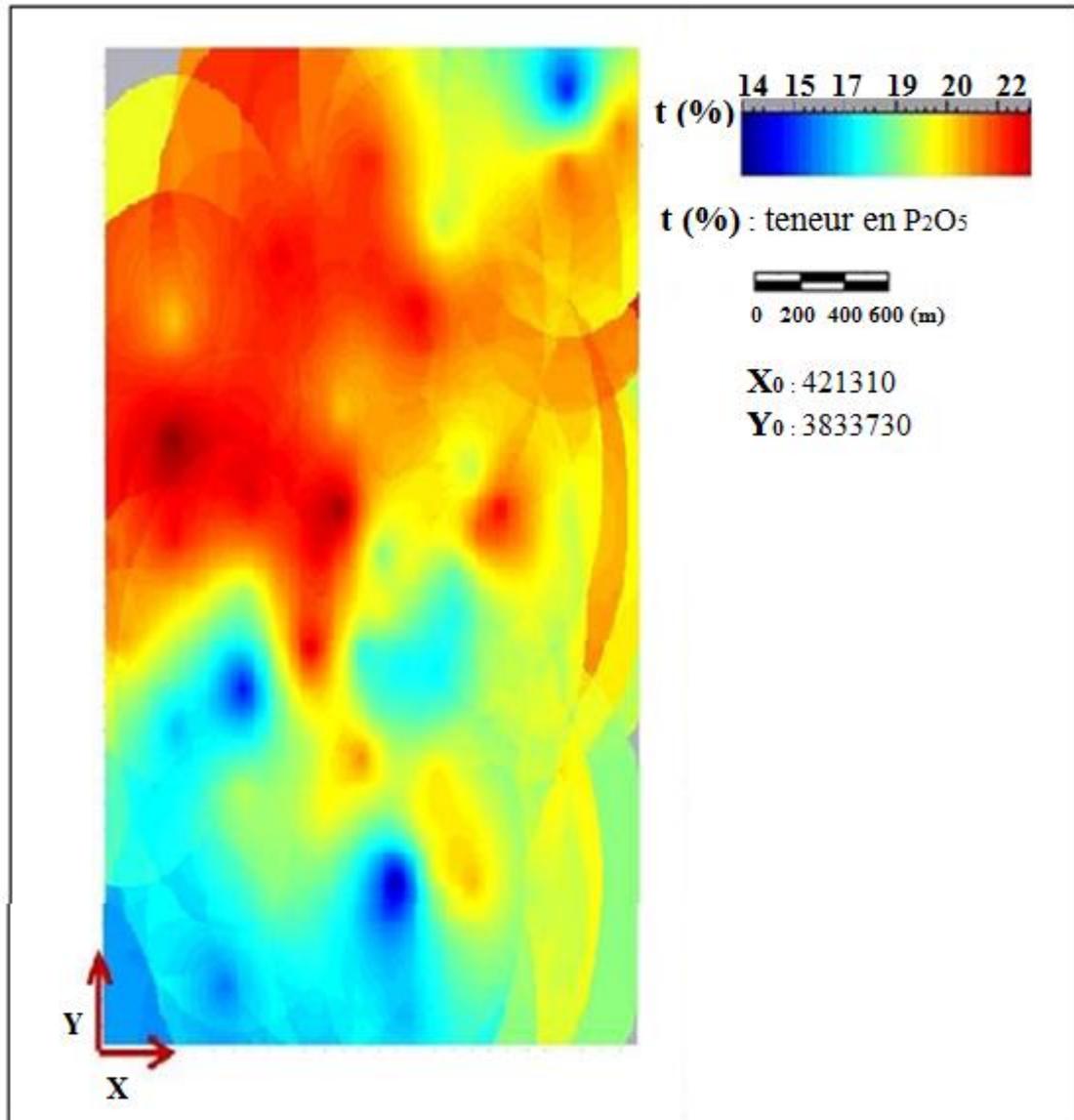


Figure IV.3. Carte représentative du krigage final des teneurs en P_2O_5 , montrant la répartition de la minéralisation.

IV.4. 4. Variance de krigage pour les teneurs

Rappelons que la variance maximale de variogramme des teneurs est de 6.

La (Figure IV.4) montre une variance de krigage maximale de 11 aux extrémités des directions Sud-Est et Nord-Ouest. Ceci peut s'expliquer par le manque d'informations (manque d'échantillonnage) dans ces endroits.

Dans la zone prospectée, on remarque une variance d'estimation de 5.2, donc inférieur à 6, ce qui montre une très bonne estimation. Cette zone montre des teneurs acceptables qui justifient la possibilité d'exploitation de cette couche.

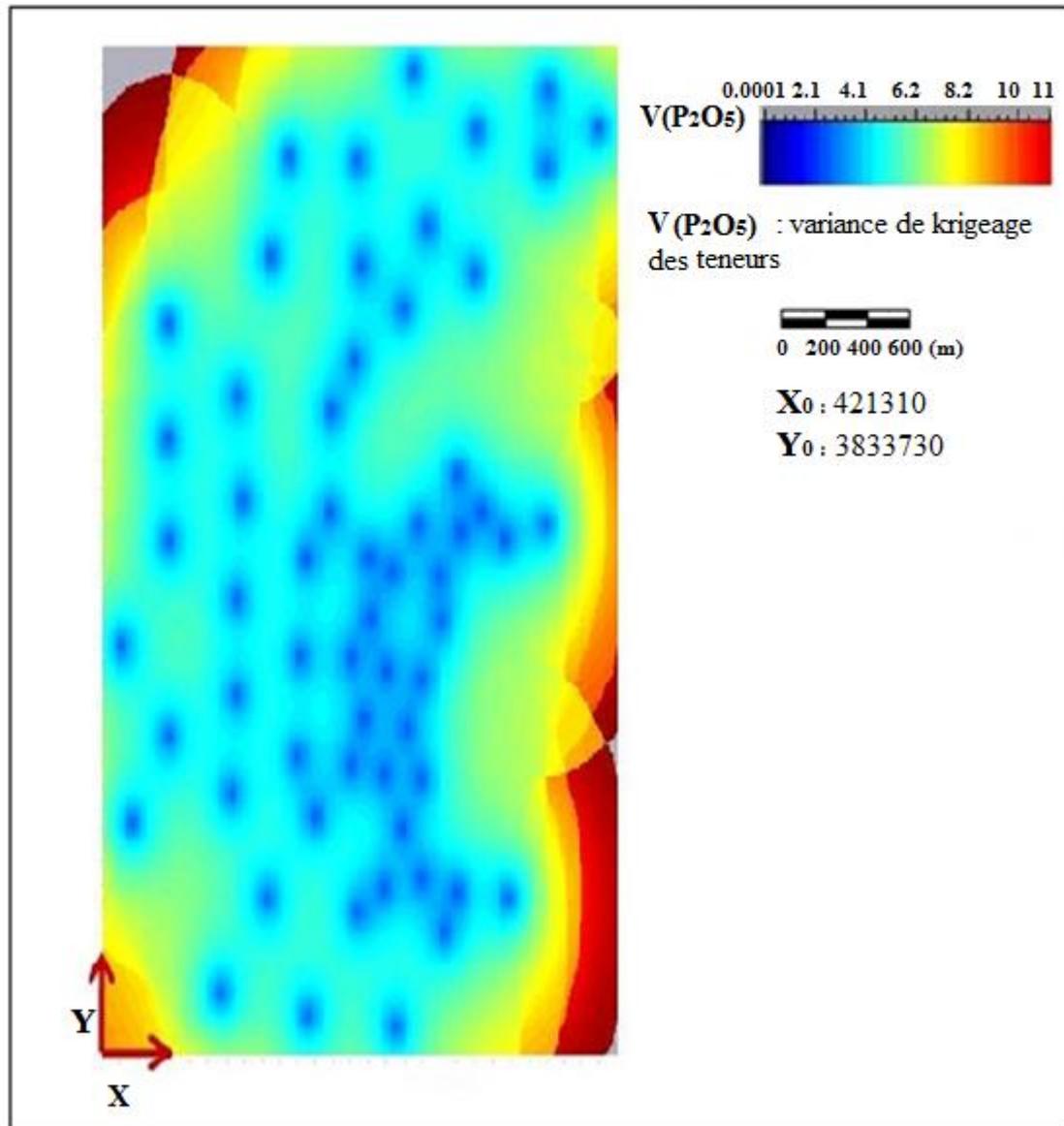


Figure IV.4. Carte représentative de la variance de krigage des teneurs en P_2O_5 .

IV.5. Estimation des réserves du gisement de Bled El Hadba

Les réserves minérales qui ont été estimées dans cette rubrique, sont exclusivement celles qui sont délimitées à la concession minière de prospection actuelle à Bled El Hadba.

Les résultats de krigage des blocs sont utilisés pour le calcul du tonnage des réserves de couche basale au niveau du gisement de Bled El Hadba (Tableau IV.1), en basant sur la formule suivante :

$$q_m = \sum V_i * \rho \quad (IV.1)$$

$$V_i = S * Ep_i \quad (IV.2)$$

Où : q_m : Quantité de minerai dans la couche;

V_i : Volume du bloc unitaire ;

ρ : Poids volumique du minerai des phosphates = (2.2 t/m^3) , pour la couche basale [3].

$S = 9801 \text{ m}^2$.

Ep_i : Epaisseur élémentaire.

Tableau IV.1. Réserves en phosphates du gisement de Bled El Hadba.

Couche	Paramètres	Probables (JORC)	Possibles (JORC)	Réserves totale de la couche	T.moyenne (P ₂ O ₅ %)
		C1	C2		
Basale	Volume (m ³)	356 281	11 818 603	26 784 746	19.28
	Quantité (t)	783 819	26 000 926		

A partir du (tableau.IV.1), les réserves du gisement de Bled El Hadba en prenant en considération le krigage de couche basale phosphatées totalisent 26.78 millions de tonnes.

IV.6. Résultats obtenus par krigage des blocs

IV.6.1. Carte des épaisseurs de la couche basale

L'analyse de données obtenues par la méthode de krigage des blocs nous donne deux zones d'épaisseurs :

-Zone de fortes épaisseurs se localise entre N-NE et S-SE dont épaisseur varie entre 8.7 et 11.37.

-Zone de faible teneur se localise a N-O et caractérisée par des teneurs varient entre 15.49 et 17.62.

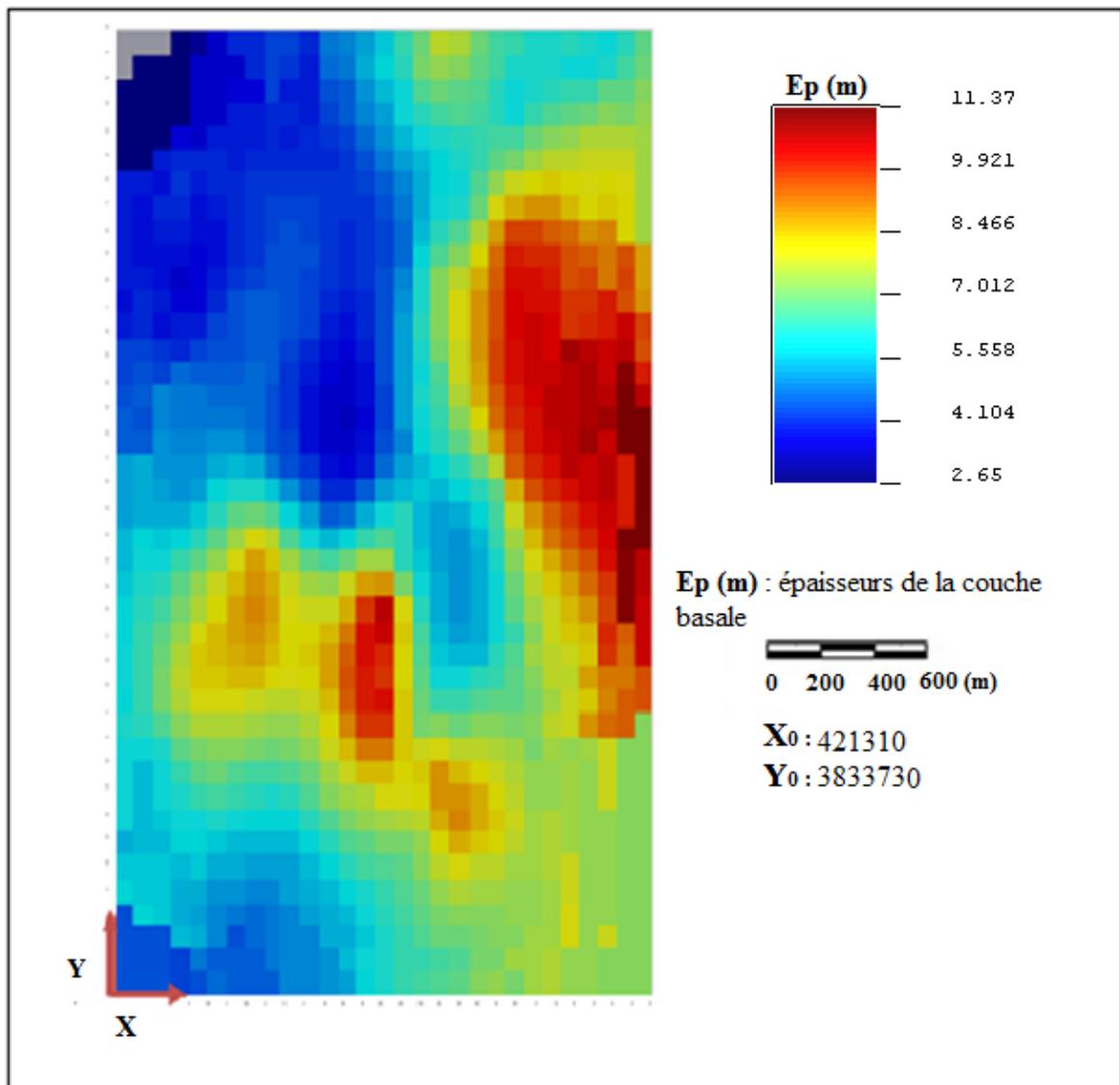


Figure IV.5. Carte représentative du krigage des épaisseurs de la couche basale.

IV.6.2. Variance de krigage pour les épaisseurs de la couche basale

Rappelons que la variance maximale du variogramme des épaisseurs est de 12.2.

La carte de la variance de krigage (Figure IV.6) montre une variance de krigage maximale de 24.39 aux extrémités des directions Nord-Ouest et Sud-Est.

Dans presque toute la zone prospectée, on remarque une variance d'environ de 10 donc inférieur à 12.2; là on a des épaisseurs acceptables pour l'exploitation, ce qui donne des éclaircissements sur la qualité de la carte estimée par krigage.

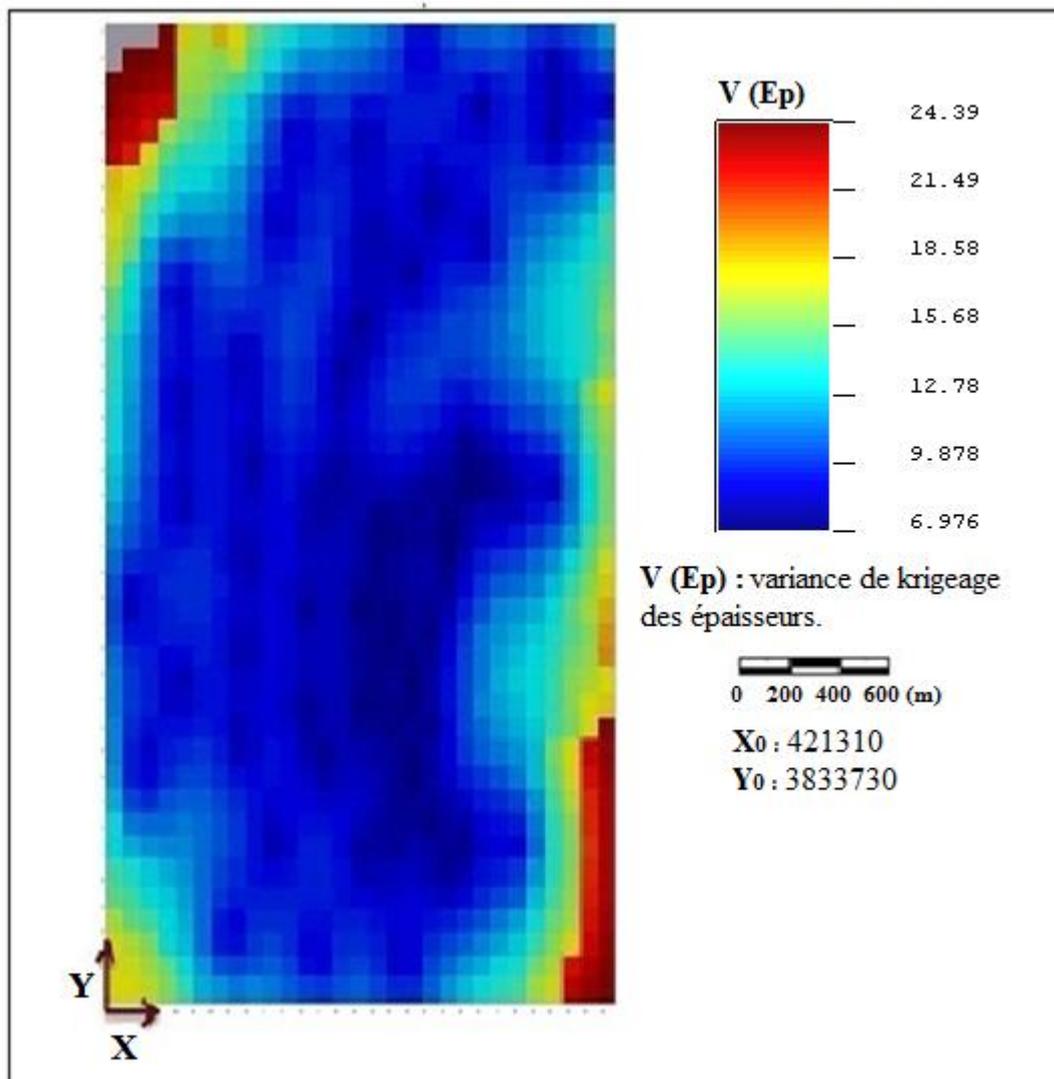


Figure IV.6. Variance de krigage des épaisseurs de la couche basale.

IV.6. 3. Carte de répartition des teneurs en P_2O_5

L'analyse de données obtenues par la méthode de krigage des blocs nous donne deux zones des teneurs :

-Zone de fortes teneurs localise au N dont teneur varie entre 20.04 et 22.47.

-Zone de faible teneur se localise a S-E et caractérisée par des teneurs varient entre 15.49 et 17.62.

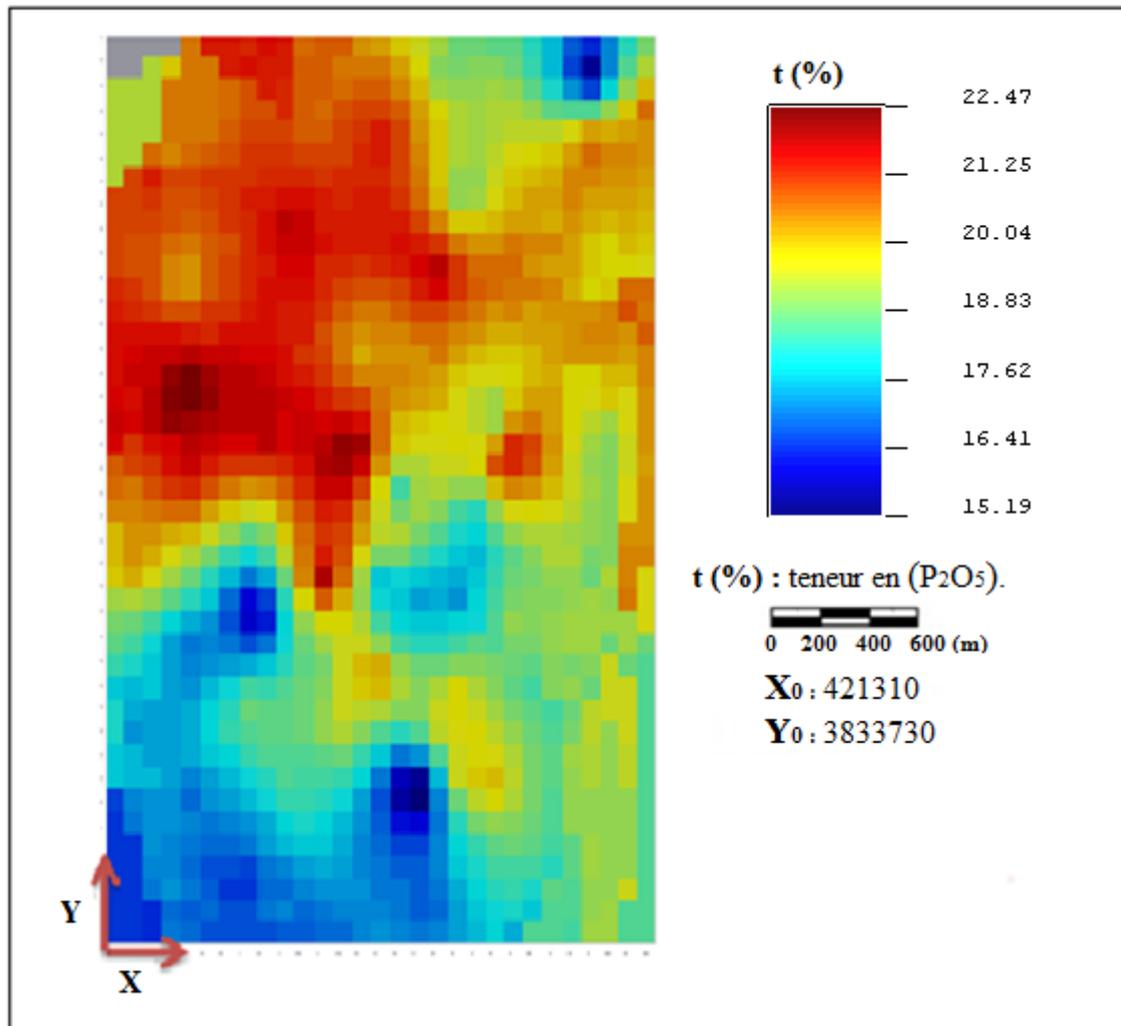


Figure IV.7. Carte représentative du krigage des teneurs en P_2O_5 , montrant la répartition de la minéralisation.

IV.6. 4. Variance de krigage pour les teneurs

Rappelons que la variance maximale du variogramme des épaisseurs est de 6.

La carte de la variance de krigage (Figure IV.8) montre une variance de krigage maximale de 11.52 aux extrémités des directions Nord-Ouest et Sud-Est.

Dans presque toute la zone prospectée, on remarque une variance d'environ de 4 donc inférieur à 6; là on a des épaisseurs acceptables pour l'exploitation, ce qui donne des éclaircissements sur la qualité de la carte estimée par krigage.

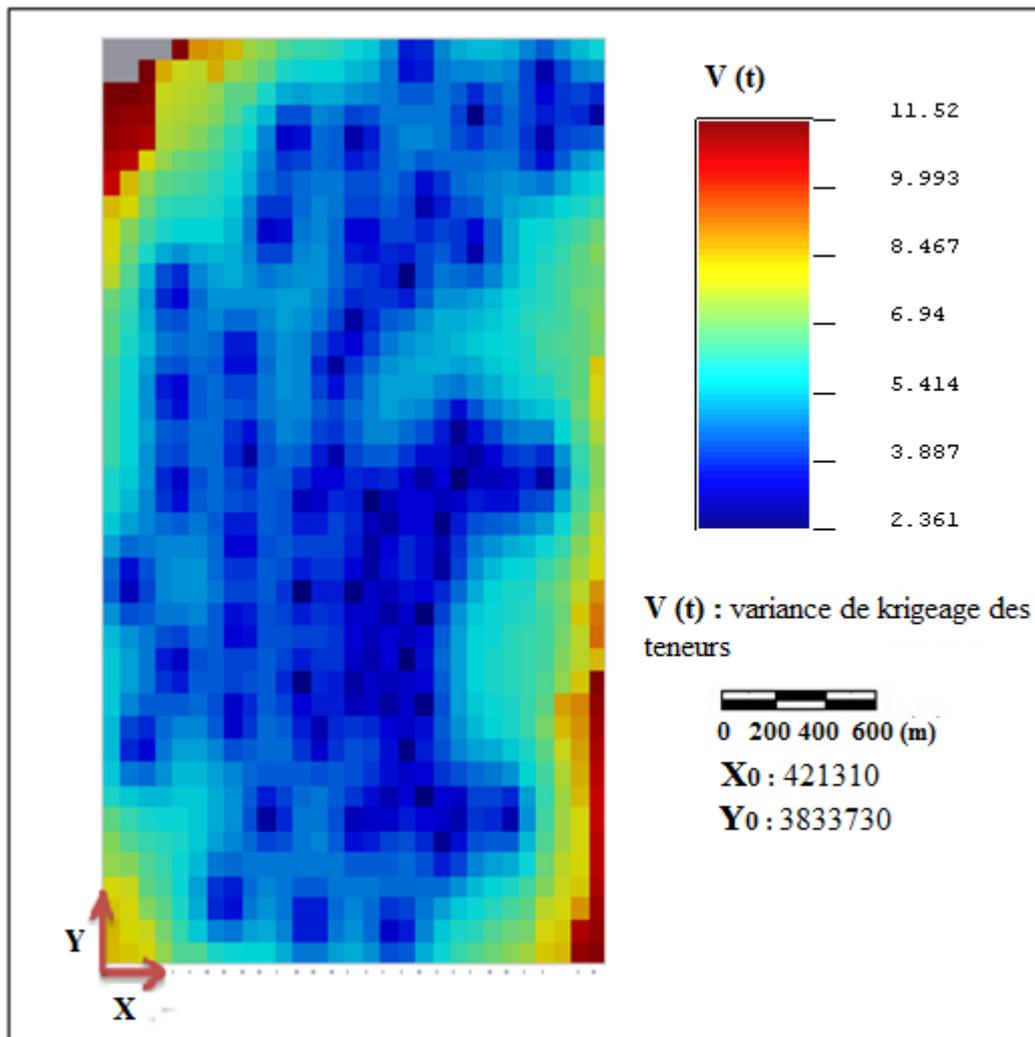


Figure IV.8. Variance de krigage des teneurs de la couche basale.

IV.7. Présentation graphique de la répartition des teneurs en phosphate dans la Couche basale

Dans le but d'avoir une information complète et claire sur la répartition des teneurs dans le gisement, nous avons tracés des graphes (figure IV.9), pour évaluer les réserves en phosphate en fonction de la teneur moyenne.

Les réserves minérales de la couche basale, sont de l'ordre de 26.78 millions de tonnes, pour des variables de teneur allant de 17.44% a 22.21%.

Les réserves par couche basale sont détaillées dans la figure suivante :

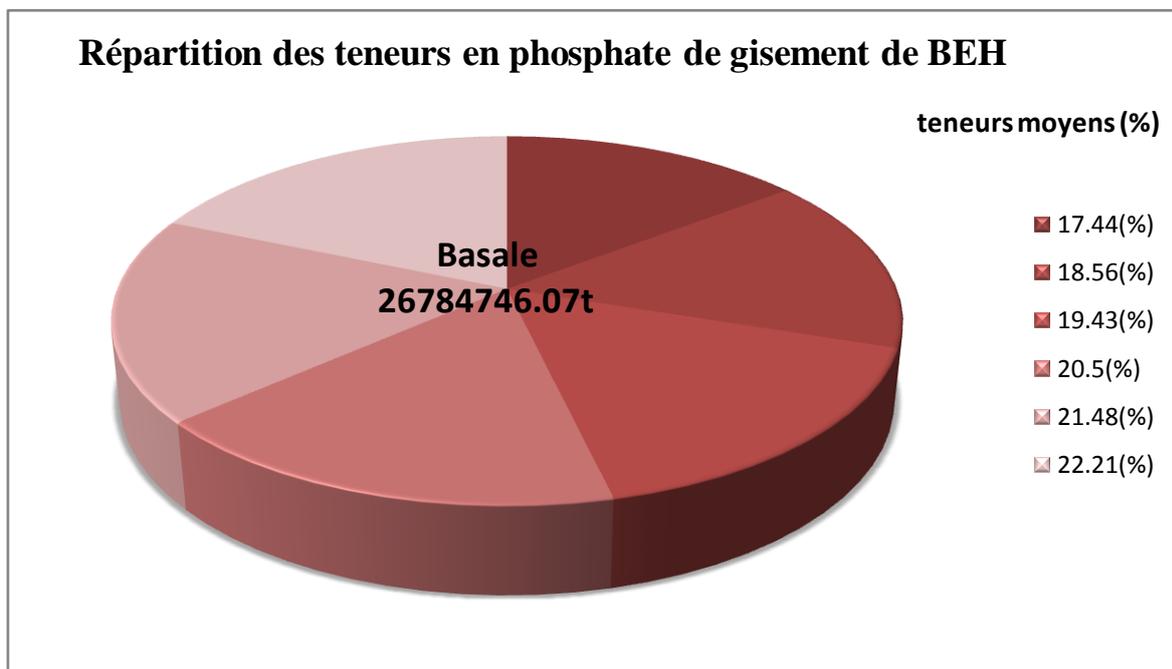


Figure IV.9. Représentation graphique de répartition des teneurs de la couche basale.

IV.8. Estimation des réserves en phosphate en fonction de la teneur de coupure.

Selon le tableau (IV.2) de la variation du tonnage en fonction de la teneur de coupure On remarque que les tonnages en P_2O_5 diminuent au fur et à mesure que la teneur de coupure augmente.

Tableau IV.2. Tonnage des réserves en fonction de la teneur de coupure.

Couche Basale	Teneur de coupure (%)					
Teneur de coupure en P ₂ O ₅	17	18	19	20	21	22
Tonnage (Mt)	122	102.55	79.86	49.84	19.66	1.174

Conclusion

Dans le premier temps nous avons présenté le krigage ordinaire, afin d'estimer la dispersion des teneurs dans le champ de gisement de Bled El Hadba, cette estimation nous apporter un aide précieux dans la préparation des plans et le suivi des travaux d'exploitations.

Le krigage des blocs nous a permis d'estimer les réserves en visant le mélange des blocs les plus riches avec ceux à faibles teneurs en utilisant le tri sélectif des blocs de minerai de phosphate. Ceci va permettre à l'entreprise d'augmenter les réserves en phosphate avec des teneurs acceptables (supérieures à la teneur de coupure).

Conclusion générale

Afin de faciliter d'une part, la gestion du projet d'exploitation en fournissant des cartes bien précises sur la répartition des teneurs et ceux des épaisseurs de la couche minéralisée, et de trouver un alternatif pour augmenter les réserves dans la mine d'autre part. Notre travail est porté sur une étude géostatistique des ressources minières de la couche basale du gisement de Bled el Hadba.

En se basant sur une teneur de coupure fixée par l'entreprise qui est de l'ordre de 20% en P_2O_5 , nous avons exploité les données d'exploration existantes de deux façons différentes. La première, en utilisant le krigeage ordinaire, qui permet de présenter la dispersion des teneurs et des épaisseurs, ce qui aide l'entreprise à une meilleure gestion des travaux d'exploitation, et à la délimitation des zones exploitables. La deuxième, en utilisant le krigeage des blocs, qui permet l'augmentation des réserves en prenant des différents blocs riches et pauvres, afin de permettre à l'exploitant de contrôler les teneurs sortant du gisement, et par la suite à la meilleure gestion des installations de traitement en faisant le mélange de minerai pour arriver à une teneur appropriée pour le traitement.

L'étude géostatistique se base sur l'outil de base appelé variogramme, qui nous a permis d'avoir une idée sur la continuité et la corrélation entre les échantillons. Cette étude était suivie par l'estimation par les deux types de krigeage. À partir de cette étude, nous avons arrivé aux conclusions suivantes :

- Les variogrammes expérimentaux montrent l'existence d'une anisotropie au niveau de la corrélation des variables étudiées.
- Le minerai de la couche basale se caractérise par une teneur moyenne en P_2O_5 de l'ordre de 19.28 % (krigeage ordinaire).
- La cartographie des teneurs krigées en P_2O_5 a permis de visualiser la répartition des blocs avec différentes teneurs en permettant un mélange entre ceux les plus riches et les pauvres, ce qui induit à l'augmentation des réserves exploitables.

Sur la base de ces résultats, nous recommandons une exploitation sélective des ressources en fonction des teneurs des blocs d'exploitation, afin d'augmenter le profit de l'entreprise exploitante, et de répondre aux exigences des clients de SOMIPHOS.

Références bibliographiques

[1] : **Dassamiour M., 2012.** Eléments en traces et valorisation des minerais de phosphate du gisement de Kef Essenoun-Dj. Onk (Algérie Orientale), thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba.

[2] : **Bezzi N., 2005.** Gestion de la qualité et valorisation des minerais de phosphate de Bled El Hadba, Djebel Onk (Tébessa), Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas-Sétif.

[3] : **Documents internes de l'entreprise :**

- **BRGM., 1992.** Phosphates du Djebel Onk (Algérie) : Gisement de Bled El Hadba-données prises en compte.
- **CERAD., 2003.** Rapport Bled El Hadba : Partie géologie et Exploitation minière.
- **DMT., 2014.** Exploitation pluriannuelle des gisements de Bled El Hadba et Djebel Onk Sud.
- **ORGM., 2014.** Rapport final sur les résultats des travaux d'exploitation des phosphates du gisement de Bled El Hadba.

[4] : **Kechiched R., 2007.** Estimation des réserves locales du gisement de phosphate de Bled El Hadba par la procédure géostatistique, mémoire d'ingénieur d'état en géologie appliquée.

[5] : **Hathout M., 2006.** Etude pétrographique et géochimique du phosphate de Kef Es-Senoune (dj –Onk), mémoire d'ingénieur d'état en géologie.

[6] : **Saadali B., 2009.** Etude hydrogéologique de la possibilité aquifère dans une région semi-aride, cas de la région de Bled El Hadba. Bir El Ater. Tebessa.

[7] : **Kechiched R., 2011.** Typologie géochimique et géostatistique des minerais de phosphates du gisement de Bled El Hadba-Djebel Onk (Algérie Orientale), Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba.

[8] : **Armstrong M., CARIGNAN J., 1997.** Géostatistique linéaire : application au domaine minier”, (les presses de l'école des mines), 115 p.

[9] : **Chauvet P., 1999.** Aide-mémoire de géostatistique linéaire. Ecole des Mines de Paris. Edition Les presses.370p.

[10] : **Chauvet P., 2008.** Aide-mémoire de géostatistique linéaire”,54 p.

[11] : **Mazghache H., 2008.** La géostatistique linéaire appliquée, 26 p.

[12] : **Boudries A., 2008.** Etude géologique et géostatistique de l'Uranium (U) dans le gisement de phosphates de Kef Es Sennoun (Algérie Orientale), Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar- Annaba.

[13]: **Morah N., 2011.**Interpolation Géostatistique le krigeage, Mémoire de Magister, Université 20 Aout 1955 Skikda.

[14] : **Mazghache H., 2008.**la géostatistique linéaire appliquée, Université Badji Mokhtar-Annaba.

[15] : **Mazari M., 2012.**Etude géostatistique des ressources minières: exemple d'une mine encours d'évaluation, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique.

[16]: **Mebarki W., 2010.**Contrôle de la qualité de Bentonite à la production par méthodes géostatistique. Cas du gisement de M'Zila, Mostaganem, Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale polytechnique.

[17]: **Xavier E., 2001.**Géostatistique linéaire, Centre de géostatistique, Ecole des Mines de Paris, p 403.

I. Variogramme omnidirectionnel des épaisseurs

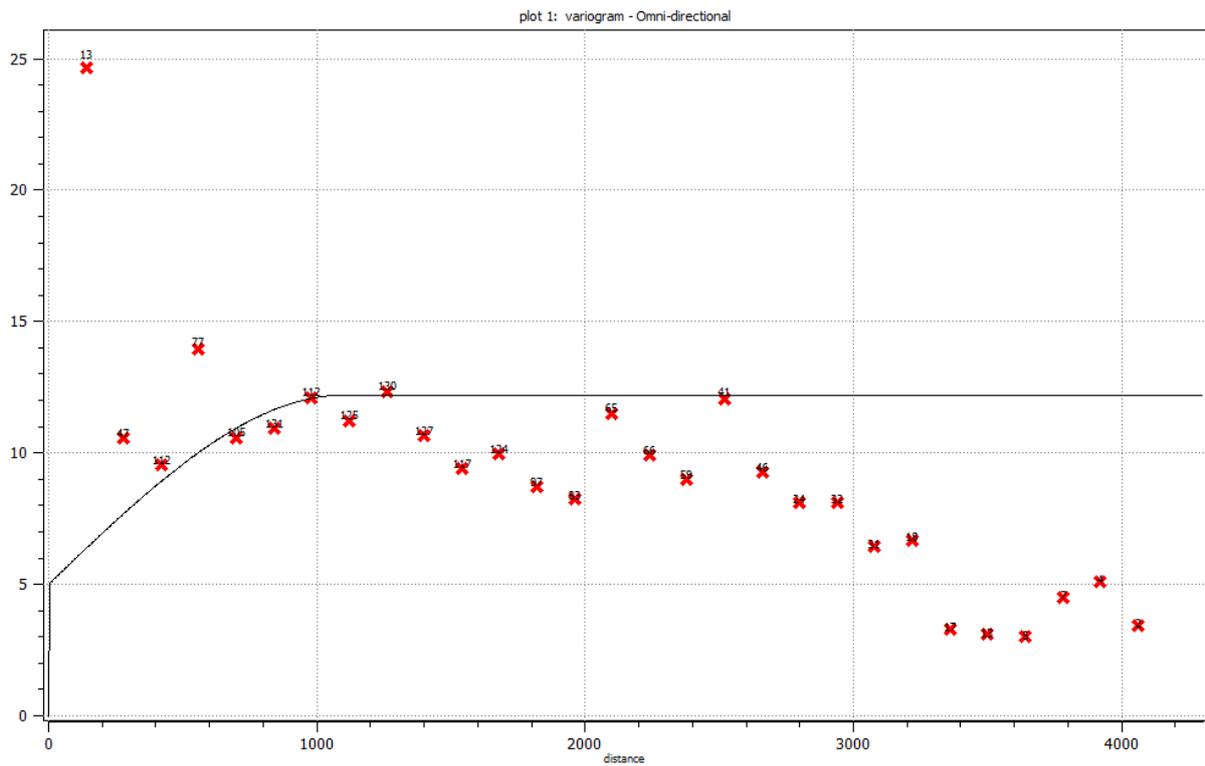
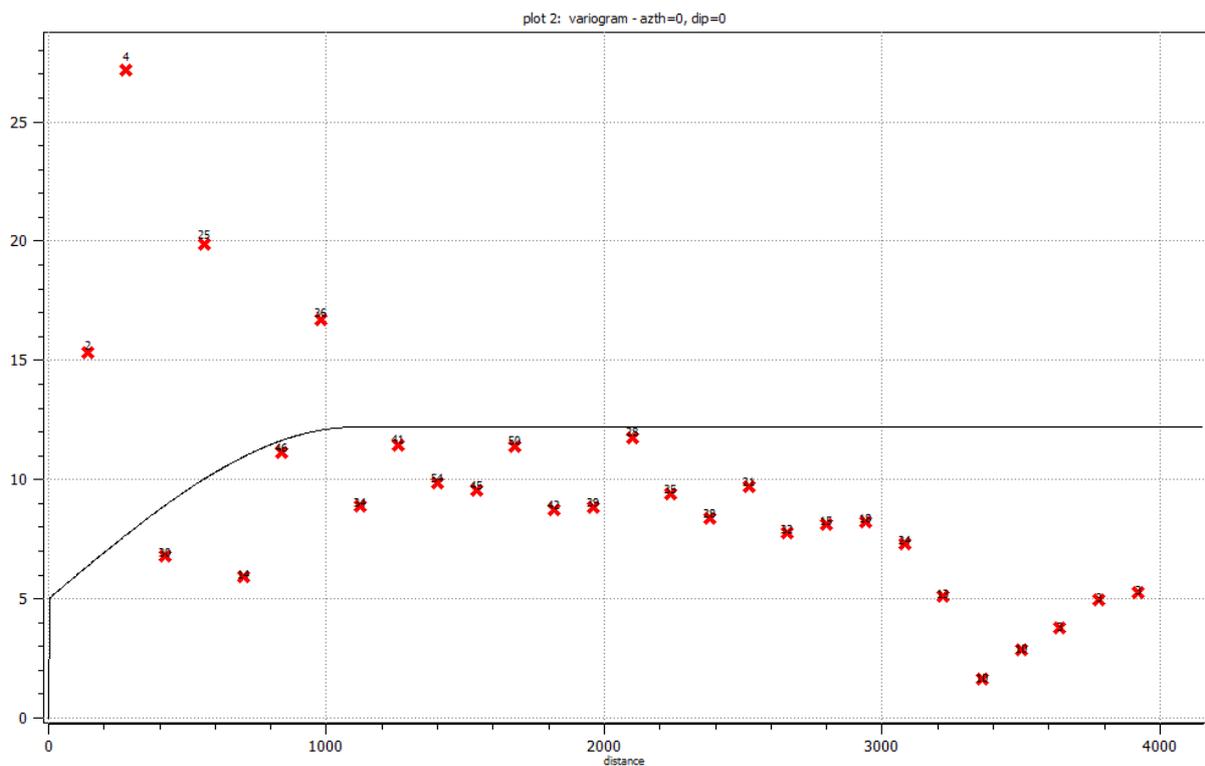
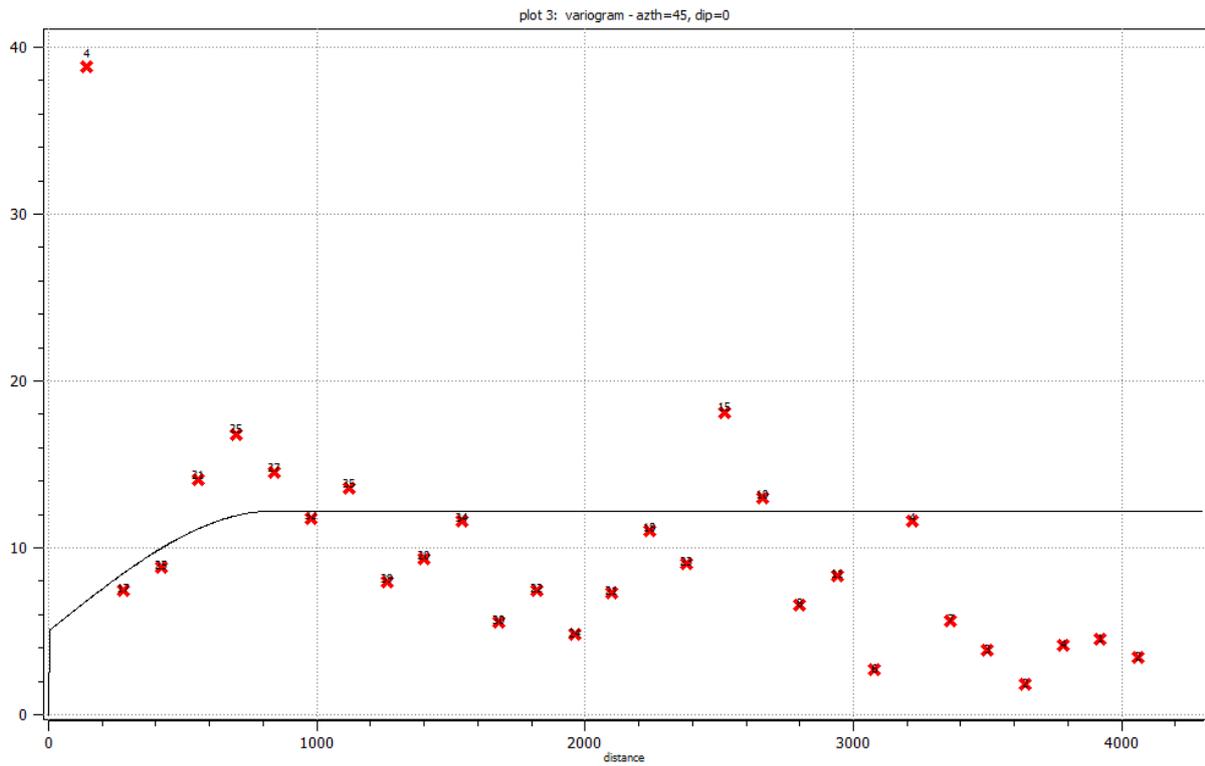
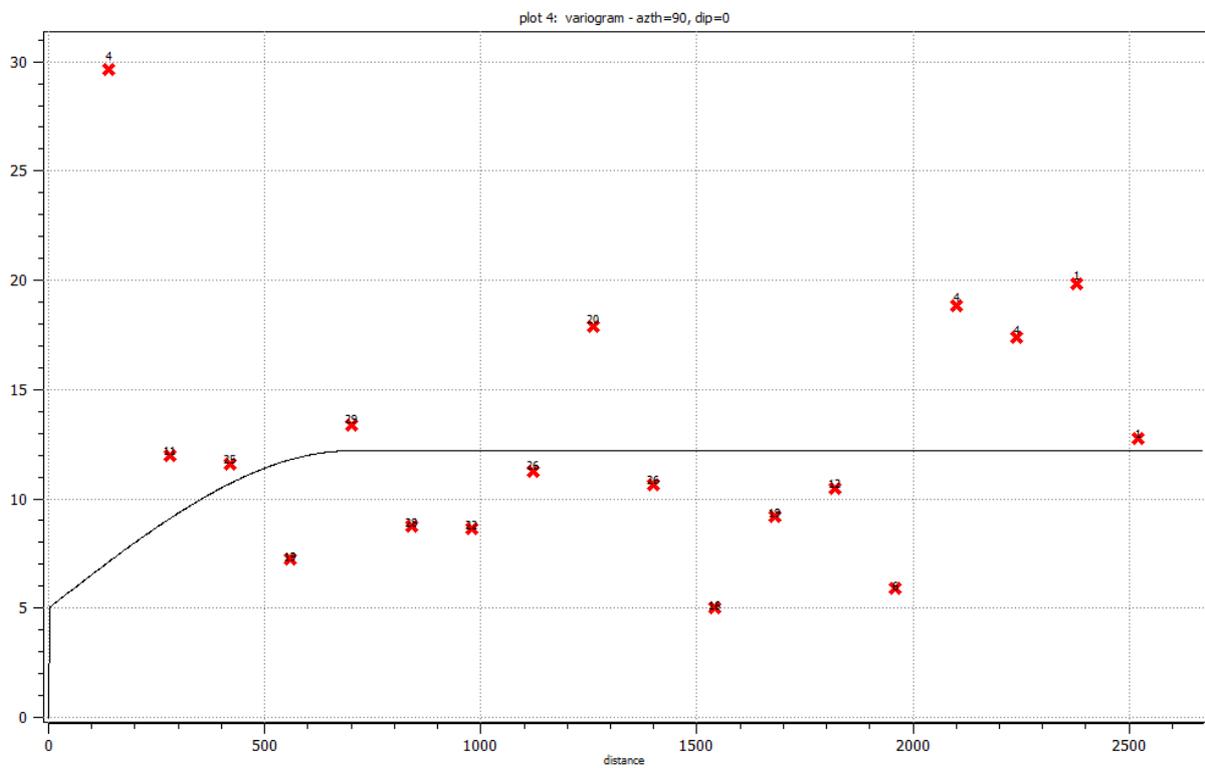


Figure III.9. variogramme omnidirectionnel des épaisseurs de la couche basale.

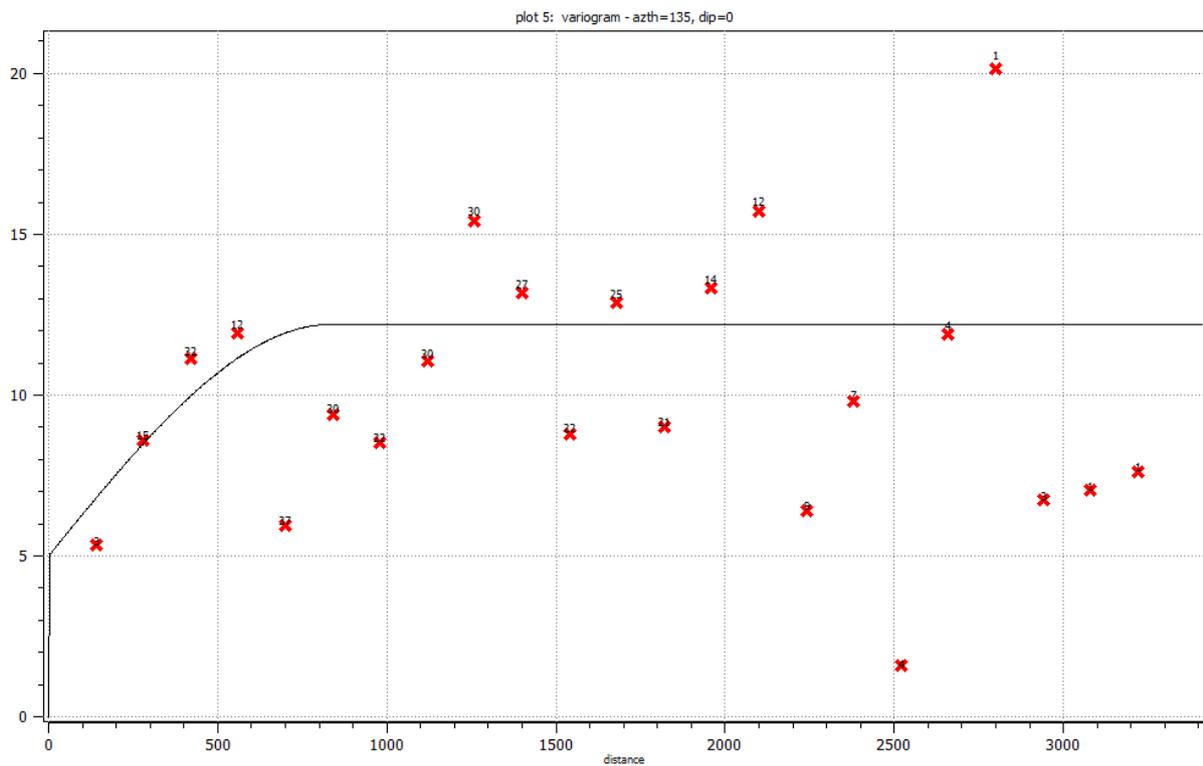
I.1. Variogrammes directionnelles des épaisseurs

a) 0° par rapport à l'axe azimutal

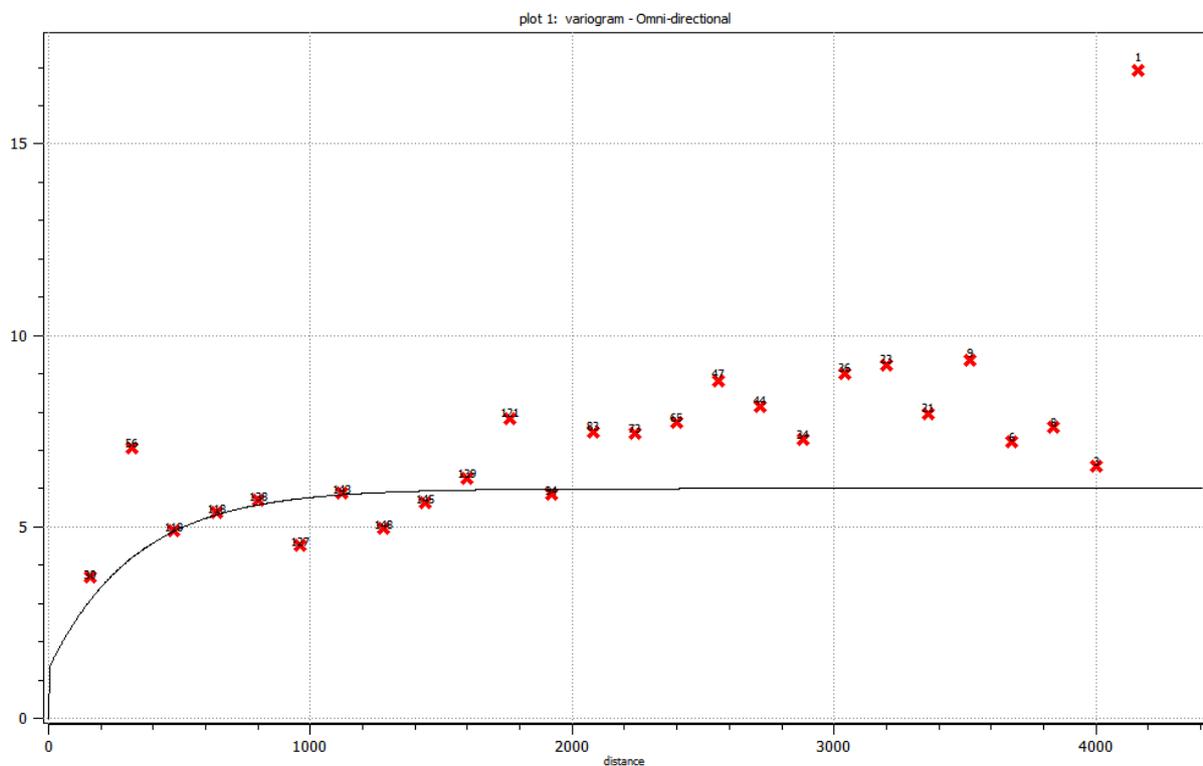


b) 45° par rapport à l'axe azimutal**c) 90° par rapport à l'axe azimutal**

d) 135° par rapport à l'axe azimutal

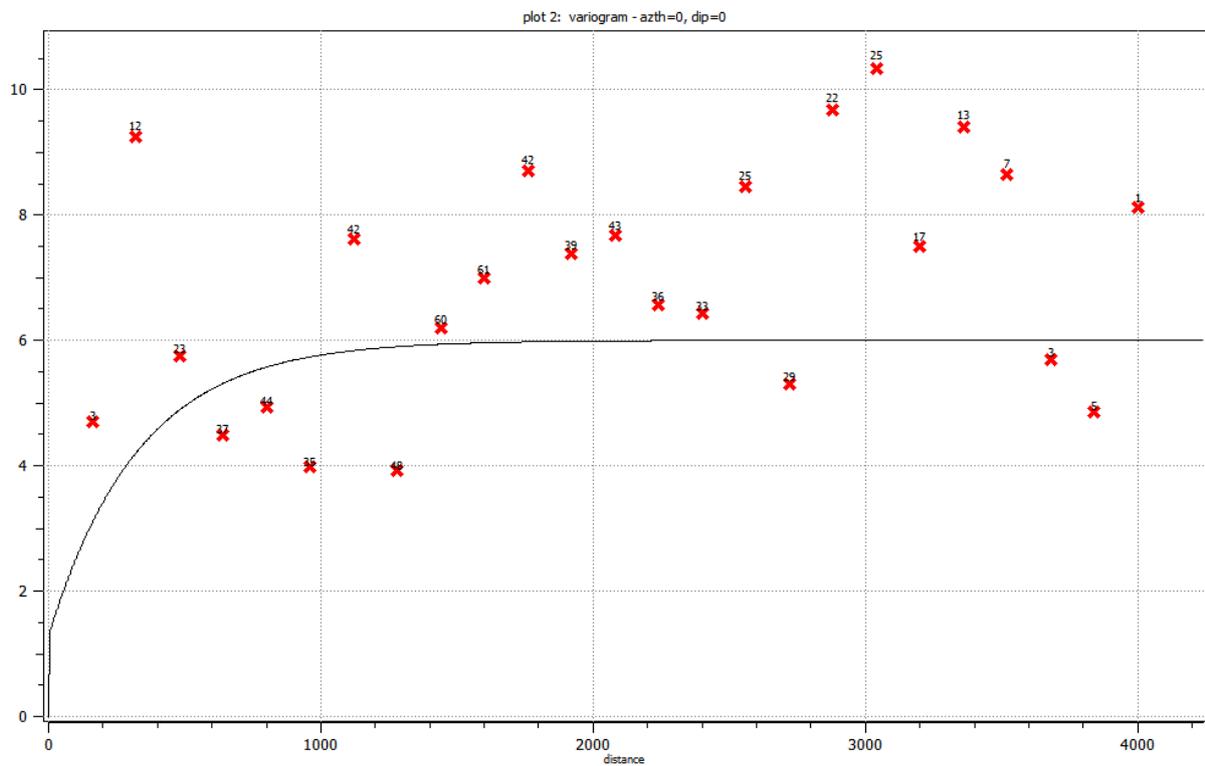


II. Variogramme omnidirectionnel des teneurs

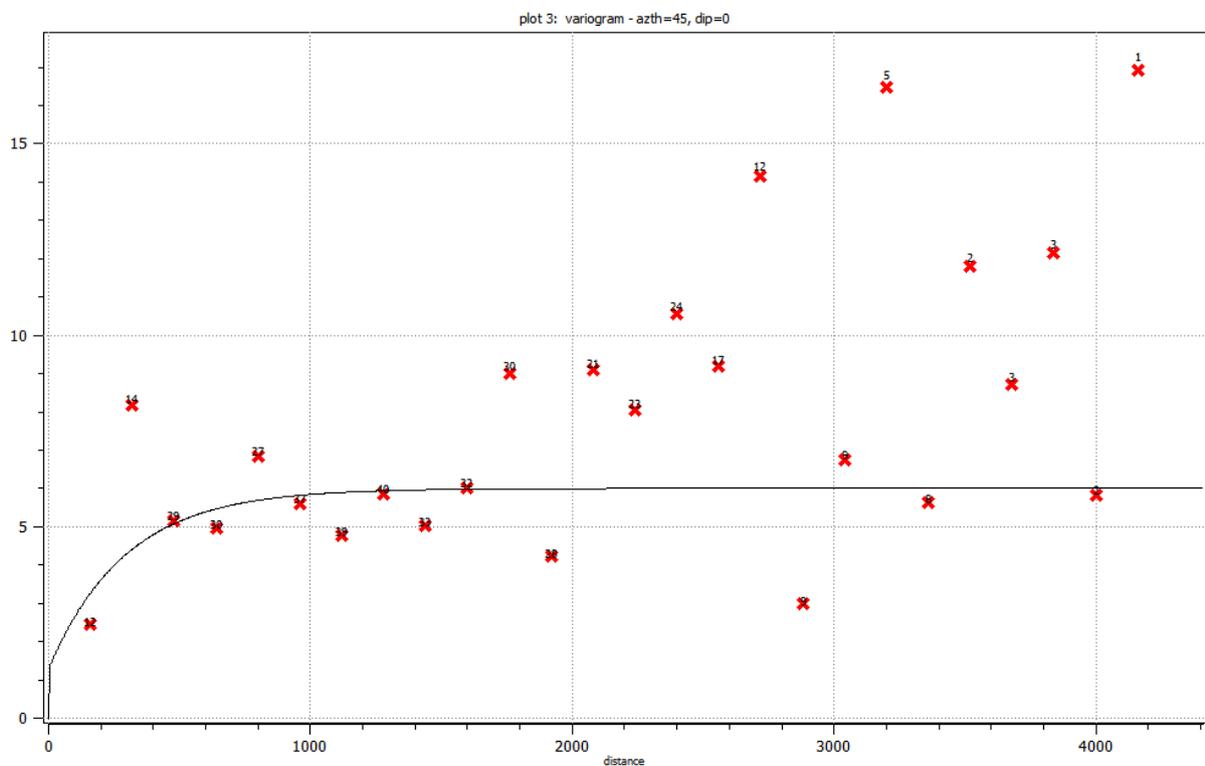


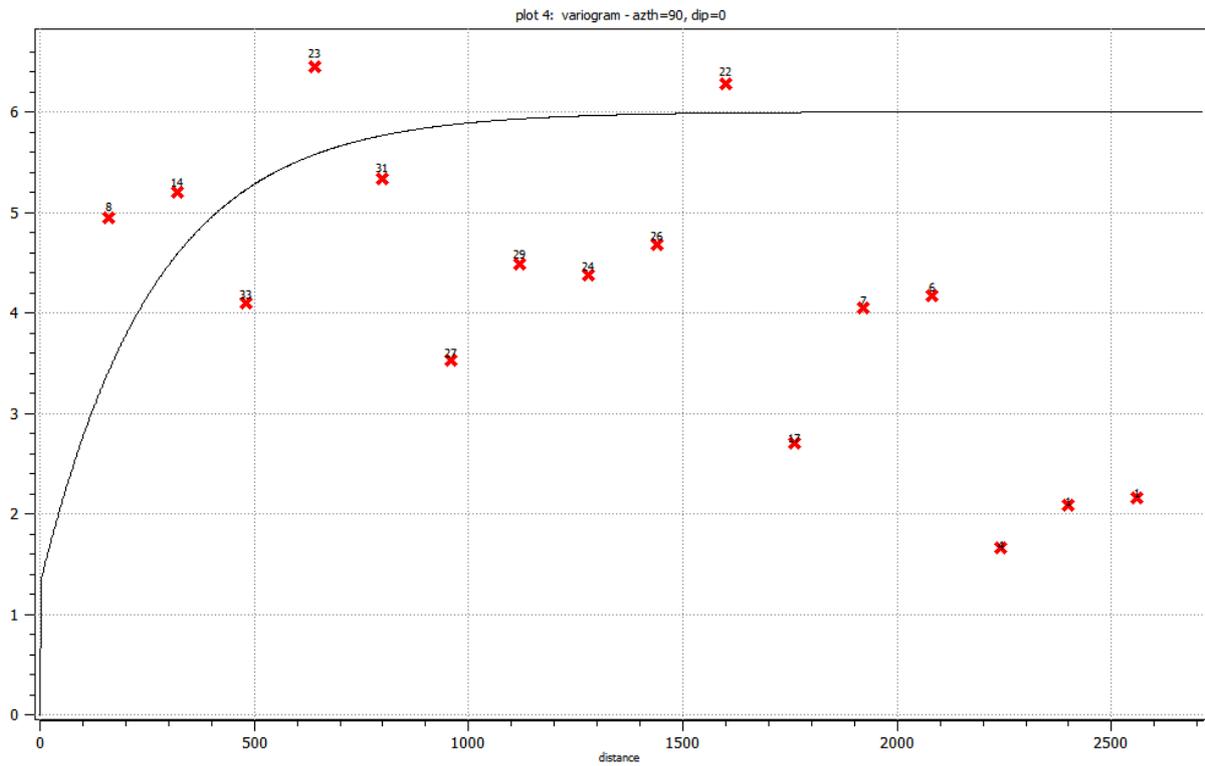
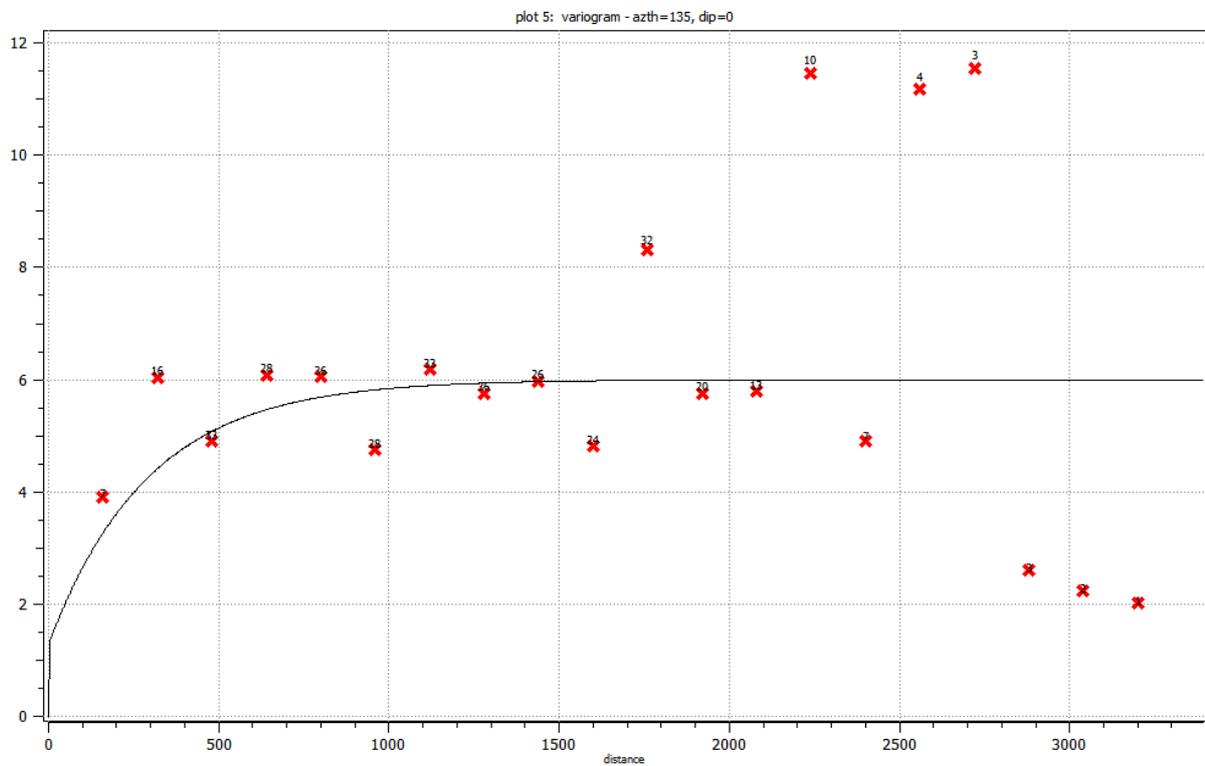
II.1. Variogrammes directionnelles des teneurs

a) 0° par rapport à l'axe azimutal



b) 45° par rapport à l'axe azimutal



c) 90° par rapport à l'axe azimutal**a) 135° par rapport à l'axe azimutal**

Résumé

Le but de notre travail est de proposer une évaluation des réserves de phosphate du gisement de Bled El Hadba dans le bassin de Djebel Onk par la méthode géostatistique linéaire.

Cette étude se base sur le principe de contrôle des teneurs, pour faciliter la gestion et la direction des travaux d'exploitation et le suivi des teneurs émanant de l'usine de traitement.

Le présent travail consiste à utiliser la modélisation géostatistique, plus particulièrement le krigeage des blocs pour la modélisation de la variabilité spatiale entre les sondages (réalisés dans le cadre de la cartographie) et l'évaluation des réserves du gisement de Bled El Hadba.

Les variogrammes directionnels expérimentaux des épaisseurs et teneurs en P_2O_5 , dans le plan de la couche, ont été calculés et ajustés pour la couche phosphatée. Ces variogrammes ont été utilisés pour le krigeage ordinaire et le krigeage des blocs.

Le krigeage, est une méthode stochastique d'interpolation spatiale qui prévoit la valeur d'un phénomène naturel en des sites non échantillonnés par une combinaison linéaire sans biais et à variance minimale des observations du phénomène en des sites voisins.

Mots clés : Géostatistique, Interpolation spatiale, Variable régionalisée, Variogramme, Krigeage ordinaire, Phosphate.

Abstract

The aim of our work is to propose an evaluation of the phosphate reserves of the Bled El Hadba deposit in the Djebel Onk basin by the linear geostatistical method.

This study is based on the principle of grade control, to facilitate the management and direction of the harvesting operations and the monitoring of grades from the processing plant.

The present work consists in using geostatistical modeling, more specifically the kriging of blocks for modeling the spatial variability between the surveys (carried out in the framework of the mapping) and the evaluation of the reserves of the Bled El Hadba deposit.

The experimental directional variograms of P_2O_5 thickness and contents in the layer plane were calculated and adjusted for the phosphate layer. These variograms were used for the ordinary kriging and kriging of the blocks.

Kriging is a stochastic method of spatial interpolation that predicts the value of a natural phenomenon at sites not sampled by an unbiased linear combination and with minimal variance of observations of the phenomenon at neighboring sites.

Key words: Geostatistics, Spatial interpolation, Regionalized variable, Variogram, Ordinary kriging, Phosphate.
