



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^r: BENCHEBRA Abd errezak.

M^{elle}: BOUMANSOURA Loubna.

Thème

***Etude géostatistique d'un projet minier :
Cas du gisement de phosphate sus à Bled El
Hadba (w. Tébessa).***

Soutenu le 27/ 06 /2016 devant le jury composé de:

Président: Mr DJEZAIRI Omar

U.A.M. Bejaia.

Promoteur: Mr MAZARI Messaoud

U.A.M. Bejaia.

Examineur: Mr FREDJ Mohamed

U.A.M. Bejaia.

Année Universitaire: 2015-2016



Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, le miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience nécessaire en vue d'accomplir ce modeste travail.

Que tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce mémoire, trouvent ici l'expression de notre grande et sincère reconnaissance, et tout particulièrement :

M^R. MAZARI. Messaoud, notre promoteur de mémoire, pour avoir accepté de nous encadrer, pour son suivi et ses orientations enrichissantes dès le commencement jusqu'à la mise en forme de ce mémoire.

M^R. Djezairi. Omar, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

M^R. Fredj. Mohamed, Qui a accepté de participer à ce jury en tant qu'examineur du mémoire.

Un grand merci pour le personnel du complexe minier de Djebel Onk en particulier M^R. FARES Sofiane, M^R. Mohamed Ali, BELGHIT Ali, FARES Mokhtar et M^R. KADER; qui malgré leurs multiples responsabilités ont été très disponibles pour nous expliquer.

Nos profonds remerciements vont également à notre cher père M^R. REMILA. Djilali pour son aide et surtout ses précieuses recommandations sur la vie active.

Nous remercions vivement, pour son aide, M^{elle}. BOUTARFIF Layla ; enseignante à l'université de Tébessa.

Nous remercions chaleureusement tous les enseignants du département des mines et géologie de l'université Abderrahmane Mira, Bejaia.

Enfin, on tient à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et dont leurs noms ne figurent pas sur cette liste.

Abdeu et Lopi 2016.





Dédicaces

*En signe de respect et de reconnaissance je dédie ce modeste travail :
A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon
cœur, celle qui m'a donné le symbole de tendresse, ma vie et mon
bonheur ; maman que j'adore.*

*A l'homme qui a été mon ombre durant toute mon enfance, mon père
que dieu le garde dans son vaste paradis*

*A mes chers frères Abdeu, Nasreu, Marouane. Mohamed et sa petite
famille et mes sœurs.*

A mes oncles en particulier Abd elkader et mes tantes.

A Mes adorables nièces en particulier Nihel; que j'adore.

A mes très chères grands-mères. Halima et Bakhta.

*A tous mes amis(es) en particulier Aboubakre, Zaki, AMRANI Abd
elhadi, Ghani, Houari , Abd Errehmane, Hossine et Bakir*

A la mémoire de mes amis Djamel et Tayeb

*A tous mes collègues de la promotion Master 2, exploitation minière
(2016), tout le groupe de berchiche 02 et de 1000 lits.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce
travail.*

A toute ma grande famille «Benchebra».

A mon binôme Loubna ainsi qu'à toute sa famille.



Mr: Abderrezak. B





Dédicaces

*En signe de respect et de reconnaissance je dédie ce modeste travail :
A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon
cœur, celle qui m'a donné le symbole de tendresse, ma vie et mon
bonheur ; **maman** Hakima que j'adore.*

*A mon très cher **père** Djamel, l'homme qui m'a donné le désir
d'apprendre et le savoir vivre, et qui a tant attendu ce moment avec
impatience.*

A mes grandes mères et à la mémoire de mes grands-parents.

A la mémoire de ma tante Kamir.

A mes très chères princesses Yasmine et Inès, que j'aime beaucoup.

A mes sœurs et à mon cher frère Kahina, Imane et Abd Elhak.

*A mes deux chères copines Kafya et Abba et leurs familles. Sans oublier
Siham, Hayat, Djahida, Alima.*

A mes cousins et cousines en particulier Nadir.

A ma très chère Khalti Hajira et son mari Mouloud.

A mes chers oncles et tantes, particulièrement Fatima et Taher.

*A tous mes collègues de la promotion Master 2, exploitation minière
(2016), et à tous mes amis de la résidence universitaire Iryahen.*

En particulier Brahim et Karim.

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce
travail.*

A toute ma grande famille «BOUMANSOURA».

A mon binôme Abderrezak ainsi qu'à toute sa famille.

Loubna.



Sommaire

Liste des tableaux.....	i
Liste des figures	ii
Liste des sigles et abréviations.....	iv
Introduction générale	1
Chapitre I : Géologie de gisement de Bled El Hadba	
Introduction.....	3
I.1. Géologie régionale de Bir-El-Ater	3
I.2. Présentation du secteur minier de Bir-El-Ater	3
I.2.1. Situation géographique	3
I.2.2. Lithostratigraphie de la région de Bir El Ater	6
I.2.3. Tectonique	10
I.3. Géologie locale du gisement de phosphate de Bled El Hadba	11
I.3.1. Situation géographique	11
I.3.2. Contexte géologique du gisement de Bled El Hadba	12
I.3.3. Lithostratigraphie	13
I.3.4. Tectonique du gisement	16
I.4. Aperçu Hydrologique	18
I.5. Climatologie	19
I.5.1. Température	19
I.5.2. Pluviométrie.....	19
I.5.3. Le vent	19
Conclusion	20
Chapitre II : Théorie de la variable régionalisée	
Introduction.....	21
II.1. La géostatistique : Historique, objet et domaine d'application.....	21
II.1.1. Historique	21
II.1.2. Objet	21
II.1.3. Domaines d'application de la géostatistique.....	22
II.2. Exemple d'étude.....	23
II.3. Théorie des variables régionalisées et leurs moments	25
II.3.1. Notions des moments	26

II.3.2. Hypothèse stationnaire	26
II.3.3. Hypothèse intrinsèque	27
II.4. Introduction à la notion de variogramme	28
II.4.1. Le semi-variogramme théorique.....	28
II.4.2. Le variogramme expérimentale	29
II.4.3. Schémas théoriques et ajustement des variogrammes.....	31
II.4.4. Isotropie et anisotropie	33
II.4.4.1. Anisotropie géométrique.....	34
II.4.4.2. Anisotropie zonale	34
II.5. Le krigeage.....	35
II.5.1. Krigeage ordinaire : (ou à moyenne inconnue)	38
II.5.2. Propriétés du krigeage	39
Conclusion	40

Chapitre III : Etude statistique et variographique

Introduction.....	41
III.1. Variables étudiées et champ d'étude.....	41
III.2. Base de données numériques	44
III.3. Etude statistique	45
III.3.1. Notions de statistique	46
III.4. Statistique descriptive et histogramme	46
III.4.1. Couche médiane	46
III.4.1.1. Epaisseurs	46
III.4.1.2. La teneur	47
III.5. Analyse variographique	49
III.5.1. Variogramme expérimental.....	49
III.5.2. Paramètres pour le calcul du variogramme expérimental	50
III.5.3. Modélisation du variogramme.....	51
III.6. Etude Variographique des données.....	51
III.6.1. Les variogrammes des épaisseurs	53
III.6.1.1. Etude variographique de la couche médiane	53
III.6.1.2. Etude variographique des couches : yprésien, sommitale, basale et thanétien inférieur	57
III.6.2. Etude variographique des teneurs	60

III.6.2.1 Etude variographique de la couche médiane	60
III.6.2.2 Etude variographique des couches : yprésien, sommitale, basale et Thanétien inférieur.....	63
Conclusion	64

Chapitre IV : Krigeage 2D, résultats et interprétations

Introduction.....	65
IV.1. Méthodologie de krigeage	65
IV.2. Grille de krigeage	66
IV.3. Résultats obtenus par krigeage ordinaire.....	66
IV.3.1. Cartes des épaisseurs de la couche Médiane.....	66
IV.3.2. Variance de krigeage pour les épaisseurs de la couche médiane.....	67
IV.3.3. Carte de répartition des teneurs en P_2O_5	68
IV.3.4. Variance de krigeage pour les teneurs	69
IV.4. Estimation des réserves du gisement de Bled El Hadba.....	70
IV.5. Présentation graphique de la répartition des réserves en phosphate dans les sous- couches.....	72
IV.6. Estimation des réserves en phosphate en fonction de la teneur de coupure	72
IV.7. Classification des réserves en P_2O_5 par catégories	74
IV.7.1. Répartition des teneurs par catégorie	75
IV.8. Travaux antérieurs effectués sur le gisement de Bled El Hadba	76
IV.8.1. Evaluation de SONAREM (1978).....	76
IV.8.2. Evaluation de L'EREM (1987).....	77
IV.8.3. Evaluation de BRGM (1992)	77
IV.8.4. Evaluation FERPHOS (1999).....	77
IV.8.5. Evaluation d'ORGEM (2012)	78
IV.8.6. Evaluation de DMT (2013).....	79
IV.8.7. Présente étude (2016).....	79
Conclusion	81
Conclusion générale.....	82

Références bibliographiques.

Annexes.

Liste des tableaux

Tableau III.1. Schéma d'équivalence entre système de classification soviétique (historique) et le code JORC (2012)	43
Tableau III.2. Les paramètres statistiques de distribution des épaisseurs et des teneurs	48
Tableau III.3. Paramètres pour le calcul des variogrammes	50
Tableau III.4. Directions d'anisotropie des variogrammes des épaisseurs	57
Tableau III.5. Paramètres intrinsèques des variogrammes des épaisseurs	59
Tableau III.6. Directions d'anisotropie des variogrammes des teneurs	62
Tableau III.7. Paramètres intrinsèques des variogrammes des teneurs	64
Tableau IV.1. Réserves en phosphates du gisement de Bled El Hadba.....	71
Tableau IV.2. Tonnage des réserves en fonction de la teneur de coupure.....	73
Tableau IV.3. Tableau récapitulatif des réserves par catégorie	74

Liste des figures

Figure I.1. Carte de situation géographique de la région de Bir-El-Ater	4
Figure I.2. Carte de situation géographique des gisements de Bir-El-Ater. (Prian et Cortiel, 1993).....	5
Figure I.3. Colonne lithostratigraphique de la région de Bir-El-Ater–Algérie Orientale- (d’après Cielensky et al, 1988).....	9
Figure I.4. Carte structurale de la région du Djebel Onk à l’intérieur du bassin de Gafsa-Métlaoui-Djebel Onk (Aissaoui, 1984)	11
Figure I.5. Carte de situation géographique du gisement de Bled El Hadba	12
Figure I.6. Carte géologique du gisement de Bled El Hadba.....	13
Figure I.7. Lithostratigraphie du gisement de Bled El Hadba (Cielensky et Benchernine, 1987).....	15
Figure I.8. Coupe géologique représentent le prolongement des couches phosphatées de gisement de Bled El Hadba	17
Figure I.9. Réseau d’écoulement des eaux de surface.....	18
Figure II.1. Exemple explicatif	25
Figure II.2. Représentation schématique des points de mesure de la variable.....	28
Figure II.3. Schéma type d’un variogramme	29
Figure II.4. Schéma de calcul du variogramme expérimental	30
Figure II.5. Exemples de variogrammes multidirectionnels (WACKERNAGEL, 1993)	30
Figure II.6. Schéma type d’un semi-variogramme (effet de pépité).....	31
Figure II.7. Schéma type d’un modèle de semi-variogramme sphérique	32
Figure II.8. Schéma type d’un modèle de semi-variogramme exponentiel	32
Figure II.9. Schéma type d’un modèle de semi-variogramme gaussien	33
Figure II.10. Ajustement d’un modèle théorique (courbe) de semi-variogramme à un semi-variogramme expérimental (croix).....	33
Figure II.11. Schéma des variogrammes représentant une anisotropie géométrique et zonale.	34
Figure III.1. Plan d’implantation des sondages des différentes campagnes de prospection.....	42
Figure III.2. Carte de positionnement des sondages	44
Figure III.3. Fichier représentatif de la forme de la base des données, préparé pour l’analyse .	45
Figure III.4. Histogramme des épaisseurs de la couche médiane	47

Figure III.5. Histogramme des teneurs de la couche médiane.....	47
Figure III.6. Tolérance linéaire (a) et angulaire (b).....	50
Figure III.7. La nuée variographique des épaisseurs (Première étape de modélisation des variogrammes).....	52
Figure III.8. La nuée variographique des teneurs (Première étape de modélisation des variogrammes).....	52
Figure III.9. Ensembles des variogrammes directionnels et omnidirectionnels des épaisseurs .	54
Figure III.10. Ensembles des variogrammes directionnels des épaisseurs avec l'ajustement des modèles expérimentaux	55
Figure III.11. Graphe du variogramme omnidirectionnel des épaisseurs et son ajustement	56
Figure III.12. Variogrammes omnidirectionnels des différentes couches phosphatées	58
Figure III.13. Ensembles des variogrammes directionnels et omnidirectionnels des teneurs	60
Figure III.14. Ensembles des variogrammes directionnels des teneurs de la couche médiane, avec l'ajustement des modèles expérimentaux	61
Figure III.15. Variogramme omnidirectionnel de la couche médiane	62
Figure III.16. Variogrammes omnidirectionnels des teneurs en P ₂ O ₅ des différentes couches..	63
Figure IV.1. Carte représentative du krigeage des épaisseurs de la couche médiane	67
Figure IV.2. Carte de la variance de krigeage des épaisseurs de la couche médiane	68
Figure IV.3. Carte représentative du krigeage final des teneurs en P ₂ O ₅ , montrant la répartition de la minéralisation.....	69
Figure IV.4. Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en P ₂ O ₅	70
Figure IV.5. Représentation graphique de répartition des réserves en phosphate dans le gisement de Bled El Hadba	72
Figure IV.6. Tonnage des réserves en P ₂ O ₅ en fonction de la teneur de coupure.....	73
Figure IV.7. Réserves possibles (C ₂) de la couche médiane.....	75
Figure IV.8. Réserves probables (C ₁) de la couche médiane	75
Figure IV.9. Réserves prouvées (B) de la couche médiane	76
Figure IV.10. Représentation graphique des réserves en phosphate estimées par les différentes études effectuées sur le gisement de Bled El Hadba.....	80

Liste des sigles et abréviations

a : Portée du semi-variogramme.

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière.

C(0) : Palier.

C₀ : Effet de pépite.

CaO : Oxyde de Calcium.

Cov : Covariance.

D : Champ ou gisement.

DMT : Bureau d'étude Allemand.

E [] : Espérance mathématique.

e : Erreur d'estimation.

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

E_p : Epaisseur.

EREM : Entreprise de Recherche et d'Exploitation Minière.

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

JORC : Code Australien (Joint Ore Reserves Committee).

K. O : Krigeage Ordinaire.

L(λ) : Lagrangien.

m : Moyenne.

MgO : Oxyde de Magnésium.

Mt : Millions de tonnes.

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

ORGM : Office National de Recherche Géologique et Minière.

P₂O₅ : Pentoxyde de Phosphore.

S : Section.

S-GeMs : Stanford Geostatistical Modeling Software.

SiO₂ : Dioxyde de Silicium.

SOMIPHOS : Société des Mines de Phosphate

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

t_m : Teneur moyenne.

UTM : Universel Transversal de Mercator.

V : Volume.

v.a : Variable aléatoire.

Var : Variance.

(X, Y, Z) : Coordonnées UTM.

Z(x) : Fonction aléatoire.

γ(h) : Semi-variogramme théorique.

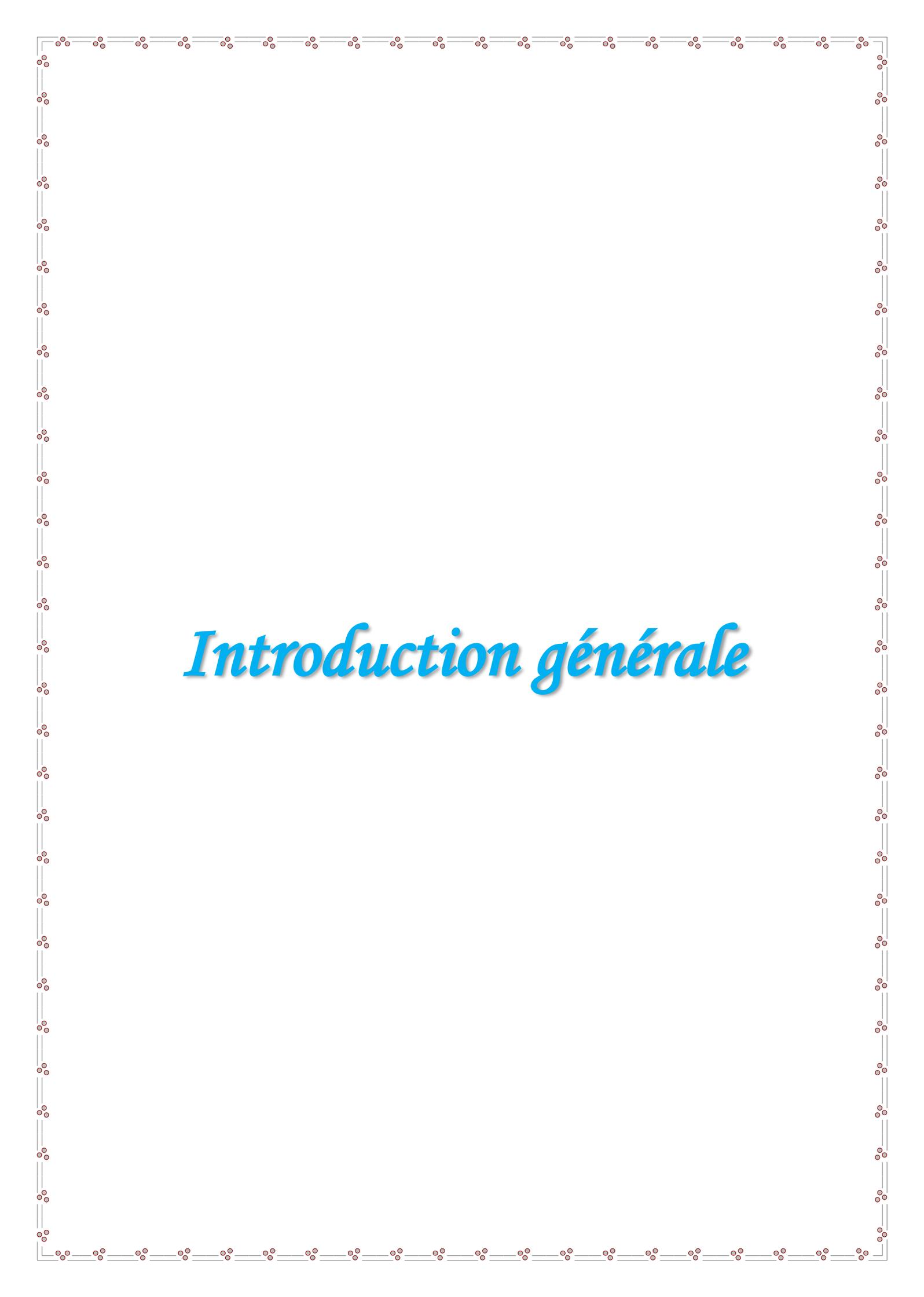
γ_e(h) : Semi-variogramme expérimental.

θ : Angle directionnel du variogramme.

λ : Poids de krigeage.

μ : Multiplicateur de Lagrange.

σ_e² : Variance d'estimation.



Introduction générale

Introduction générale

Dans l'optique de la chute du prix de pétrole durant la période 2015-2016 qui représente actuellement 98 % des recettes, l'Algérie commence à rechercher des solutions idoines pour équilibrer l'économie du pays, notamment par l'augmentation de l'exploitation des gisements de substances utiles (fer, l'or, plomb et phosphates, etc...), qui sont très demandées au niveau des marchés mondiaux.

Parmi ces matières inscrites comme matériaux stratégiques pour l'Etat, le phosphate. Ceci est justifié par l'importance de cette matière première pour l'agriculture, l'industrie chimique et les ressources considérables atteignant les 2 milliards de tonnes de réserves prouvées, dont dispose notre pays. Ces ressources se concentrent au niveau du bassin minier de Djebel Onk –Tébessa (Nord-Est Algérien) ; ce bassin renferme plusieurs gisements (Djebel Onk Nord ; Djemi Djema ; Kef Senoun ; Oued Betita et Bled El Hadba). La Société des Mines de Phosphates SOMIPHOS- Filiale FERPHOS Group, est propriétaire de ces gisements.

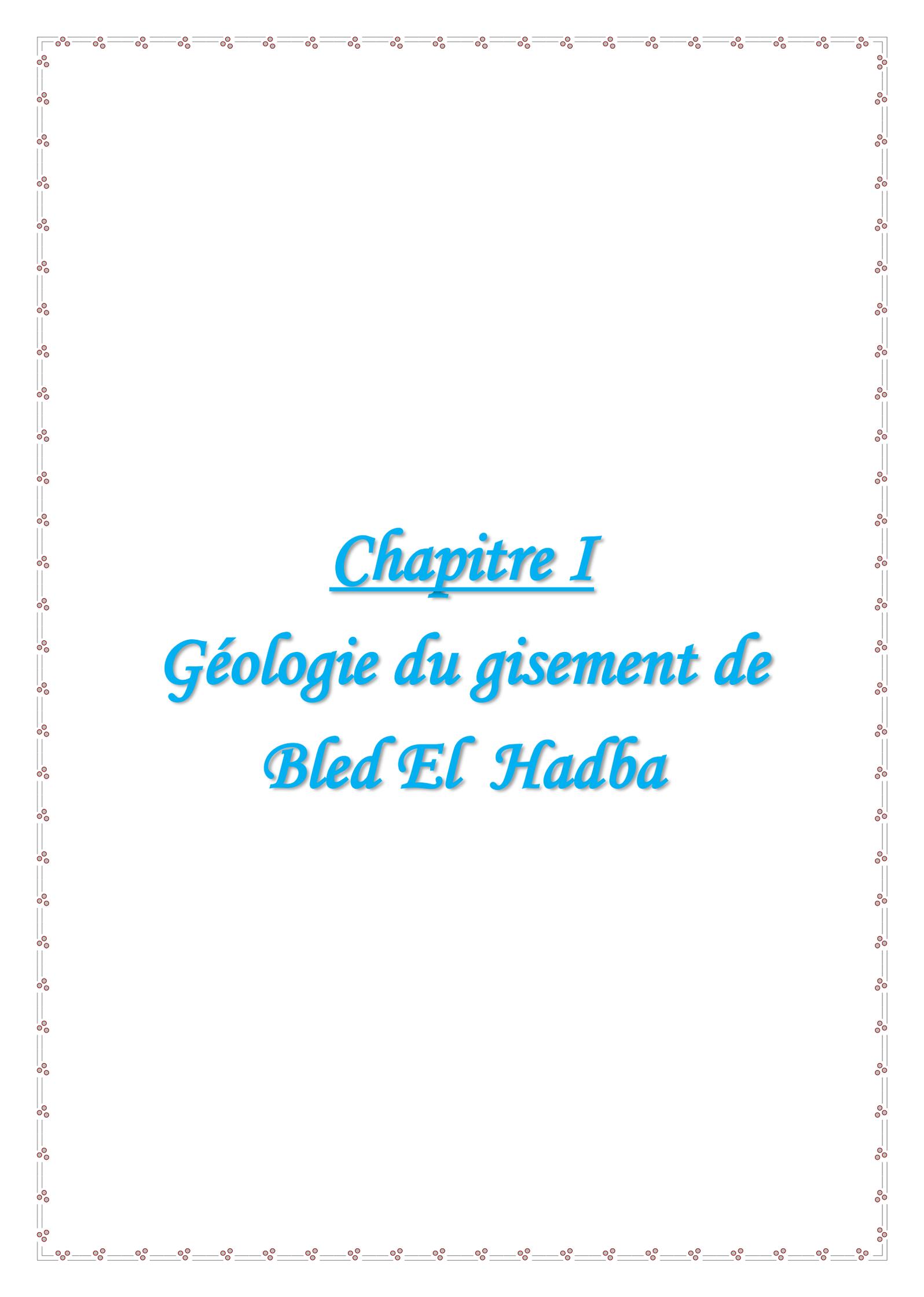
Dans les perspectives d'augmenter la production des phosphates à plus de 20 millions de tonnes par an à l'horizon de 2020, le propriétaire du projet ; l'EN. SOMIPHOS-FERPHOS; prévoit la mise en production d'autres gisements dans le bassin minier de Djebel Onk tel que le gisement de Djebel Onk Nord et de Bled El Hadba [1].

L'objectif primordial de ce travail est l'estimation des réserves en phosphates du gisement de Bled El Hadba en utilisant l'une des méthodes géostatistiques, afin d'assurer une récupération optimale en fonction de la teneur de coupure de la chaîne de traitement.

Afin d'atteindre cet objectif ; il a été nécessaire d'effectuer les travaux suivants :

- ✓ L'étude de la géologie régionale et locale de Bir-El-Ater et du gisement de Bled El Hadba ;
- ✓ L'étude analytique des techniques géostatistiques linéaires et des conditions de leur mise en œuvre. Les fondements mathématiques ainsi que leurs démonstrations sont examinés. Le krigeage et une étape préalable au krigeage ; l'analyse variographique ; sont analysés et commentés ;

- ✓ Ensuite, la présentation d'une application des méthodes géostatistiques par le logiciel (S-GMS) « chapitre III », pour obtenir un modèle numérique de terrain et calculer les variogrammes, puis interpoler, par krigeage, les variables étudiées « chapitre IV » ;
- ✓ Enfin, 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 des couches minéralisées.



Chapitre I
Géologie du gisement de
Bled El Hadba

Chapitre I : Géologie de gisement de Bled El Hadba.

Introduction

L'industrie phosphatée algérienne est née à la fin du XIX^{ème} siècle avec la découverte et la mise en exploitation de plusieurs gisements à l'Est du pays (El Kouif, Mzaita, Ras El Oued, Bordj El Ghedir). En 1962 commença l'exploitation du plus grand gisement algérien de phosphate, Le djebel Onk.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter, la géologie régionale de Bir El Ater puis locale du gisement de Bled El Hadba.

I.1. Géologie régionale de Bir-El-Ater

Les phosphates de la région de Bir El Ater font partie d'une succession d'assises sédimentaires, développées dans l'Est et le Sud-Est constantinois (Algérie), et porteuses de concentrations minérales phosphatées. Ces concentrations, d'intérêt économique, appartiennent à un vaste ensemble de gisements phosphatés formés à la période fin Crétacé-Eocène dans tout le Magreb [2].

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

I.2.1. Situation géographique

La région de Bir-Al-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 Nemencha qui prolongent vers l'Est de massif des Aurès, les altitudes les plus basses au pied du Djebel Onk sont d'environ 635 m.

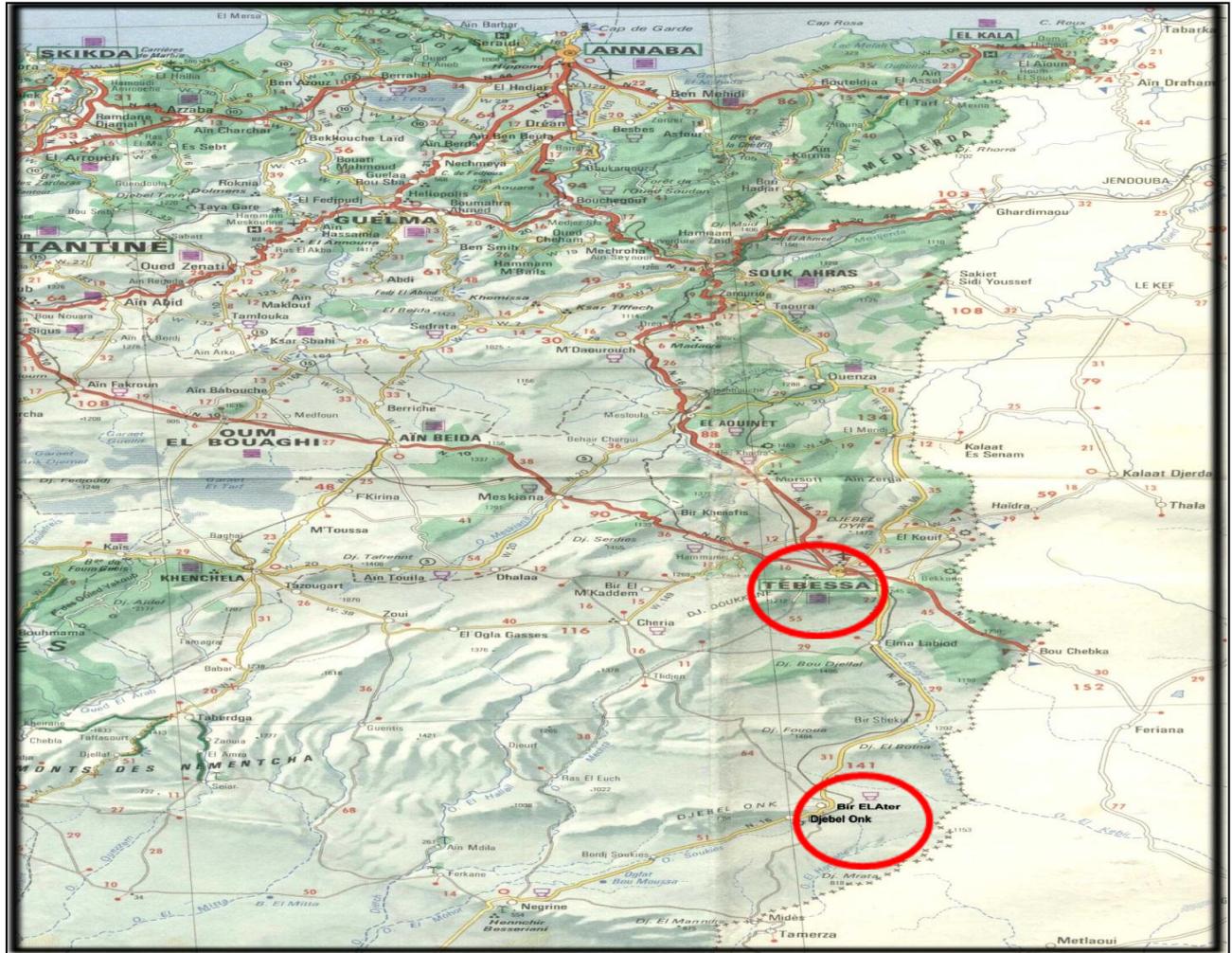


Figure I.1. Carte de situation géographique de la région de Bir-El-Ater [3].

Cinq gisements ont été découverts dans la région de Bir-Al-Ater:

- ✓ Gisement de Djemi-Djema ;
- ✓ Gisement de Kef Es Senoun ;
- ✓ Gisement de Djebel Onk Nord ;
- ✓ Gisement d'Oued Betita ;
- ✓ Gisement de Bled El Hadba [1].

Ce dernier fait l'objet de notre étude géologique et géostatistique. Il est situé à 15 Km à l'Est de la mine de Djemi-Djema, à seulement de 5 Km de la frontière Algéro-Tunisienne et sur le flanc Ouest du Djebel Zerga. Ce gisement n'est distant que de 9 Km du gisement du Djebel Mrata en Tunisie.

Le climat est subaride, caractérisé par un régime continentale avec deux saisons très nettes ; un hiver froid rigoureux et un été où les températures peuvent dépasser 45°C. Les précipitations sont peu abondantes avec une moyenne de 300 mm/an (climat semi-aride). Le réseau hydrographique de Bir El Ater est composé de 3 principaux bassins versants: celui d'Oued Rheznata au Nord-Est de la commune et ceux d'Oued Soukiès et d'Oued Horchane, au Sud de Bir El Ater.

La population est peu dense. Sa situation économique s'est améliorée grâce à l'installation du complexe minier de Bir El Ater; ce qui a contribué à l'agrandissement et au développement de la ville [4].

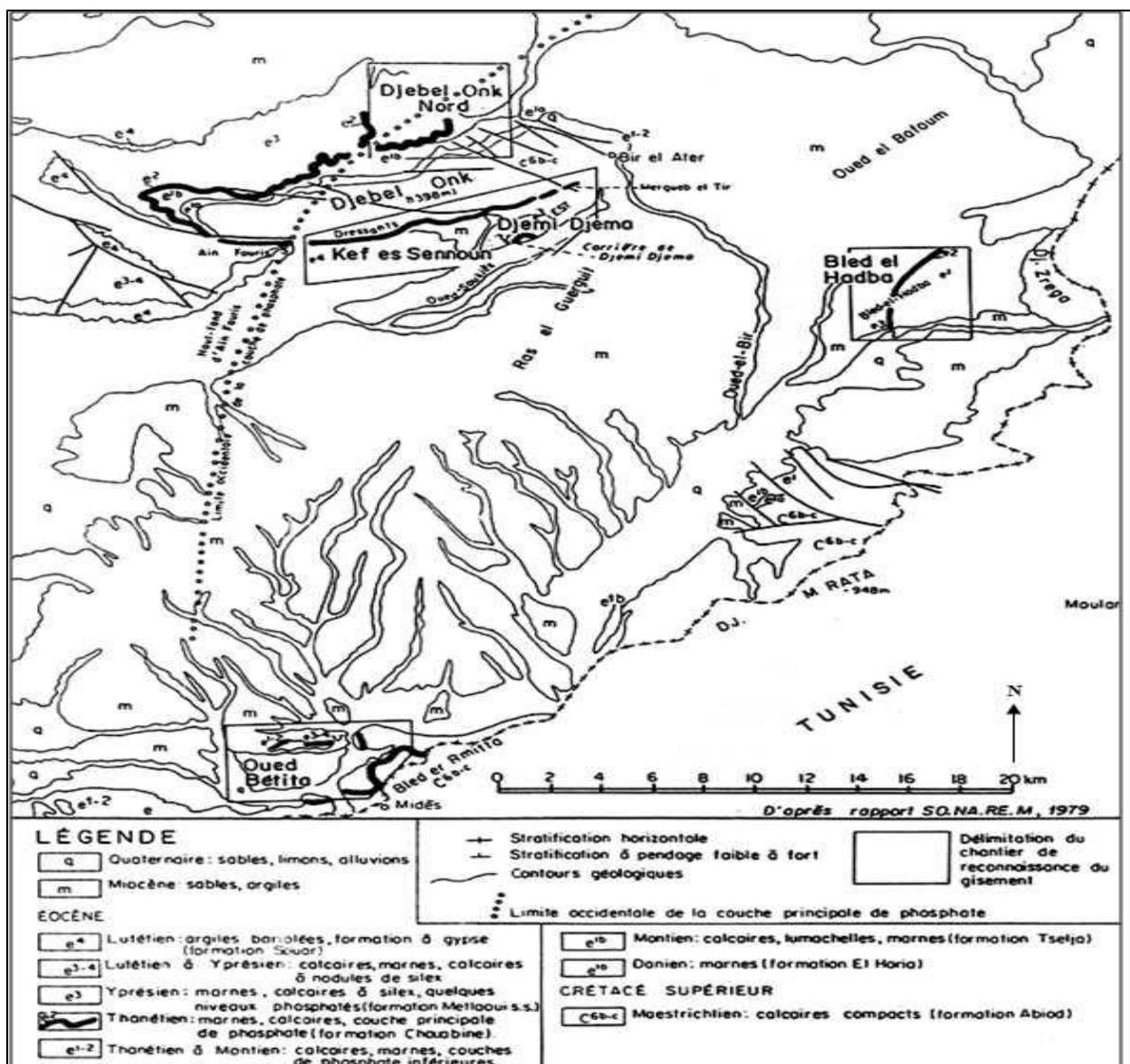


Figure I.2. Carte de situation géographique et géologique des gisements de Bir-El-Ater.

(Prian et Cortiel, 1993) [1].

I.2.2. Lithostratigraphie de la région de Bir El Ater [5].

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

La série sédimentaire affleurante 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 :

a) 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.

➤ **Maestrichtien :** ce sont des calcaires blancs massifs avec des intercalations marneuses de silex au cœur de l'anticlinal de Djebel Onk. Ils représentent à leur partie supérieure, une surface taraudée, rubéfiée, facilement repérable dans la topographie.

b) 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 :

➤ **Danien :** il est constitué par un puissant complexe marneux où on note la séparation entre le Danien supérieur et le Danien inférieur :

– **Danien supérieur :** il est représenté par des calcaires et des intercalations de marnes assez épaisses, avec des caractéristiques spécifiques; calcaires dur de couleur crème ou blanc s'intercalant avec des marnes tendres argileuses schisteuses, dont l'épaisseur varie d'une dizaine de centimètres à un mètre.

– **Danien inférieur :** il est représenté par des argiles marneuses schisteuses d'une couleur gris foncé ou brun vert avec des intercalations des marnes très dures en bancs irréguliers. L'épaisseur du Danien inférieur est de 30 à 40 m.

➤ **Montien :** cet étage est caractérisé par de puissantes couches calcaires, avec des intercalations de marne. Il affleure en plusieurs points; Djebel Onk, Djebel Darmoun, Djebel Djemi-Djema, Oued Betita et Bled El Hadba. Son épaisseur est de 60 m.

- **Thanétien** : c'est l'horizon porteur de la minéralisation. Il est visible sur le flanc de l'anticlinal de Djebel Onk avec une épaisseur de 72 m. Il se subdivise en deux parties :
- **Thanétien inférieur** : représenté par des marnes gris foncé à noir schistifiées. Dans la partie inférieure, on note la présence des conglomérats et de minces passées phosphatées, ainsi que deux niveaux de marnes à faune caractéristiques (Thésiteogracitis). Au sommet apparaissent des intercalations phosphatées atteignant jusqu'à 2 m, surmonté par des calcaires et des marnes à gros Gastéropodes. La puissance varie de 30 à 40 m.
 - **Thanétien supérieur** : il débute par un niveau dolomitique à Gastéropodes, sous-jacent à une couche phosphatée d'une épaisseur moyenne de 30 m à Djebel Onk et Bled El Hadba et qui diminue jusqu'à disparition vers le Nord.

c) **Eocène** :

- **Yprésien** : il repose directement sur les dépôts de Thanétien et prend une grande extension dans la région de Bir-El-Ater. Il a une épaisseur de 32 m. il est constitué de :
- Calcaire à silex avec une couche phosphatée, intercalée (3 m);
 - Calcaire marneux avec des lits phosphatés dans la partie supérieure (4,5m);
 - Calcaire à nodule de silex noir. Ces nodules représentent une patine ferrugineuse, noire à brun rouge. son épaisseur est de 26 m.
- **Lutéien** : les roches de cet étage recouvrent, en concordances les roches Yprésiennes. Elles sont répandues dans la région de Djebel Darmoun (270 m d'épaisseur). On distingue de bas en haut :
- **Lutéien inférieur** : il est marqué par des changements de faciès :
 - Les calcaires disparaissent et à leur place viennent les marnes blanches, crayeuses, à géodes de quartz et à silex. Son épaisseur est de 30 m;
 - Des calcaires massifs, blanchâtres à nodules de quartz (15 m d'épaisseur);
 - Du gypse avec bancs de calcaires (150 m d'épaisseur).
 - **Lutéien supérieur** : ce faciès est évaporitique; il est constitué de gypse et d'argile verdâtre, argile phosphatée verte et bancs de calcaire. A la base, on distingue l'argile verte phosphatée et bancs de calcaire d'une épaisseur de 10 m et au sommet, des argiles vertes avec banc de gypse intercalé. Son épaisseur est de 65 m.

d) Néocène :

- **Miocène** : il est représenté par un complexe de roches terrigènes composées de conglomérats, d'argiles, de sables et de schistes. Le Miocène est subdivisé en trois :
 - **Miocène inférieur** : il est formé de conglomérats, de sable à gros grains et sables blancs à grains moyens avec de minces couches d'argiles silteuses. Sa puissance est de 200 m.
 - **Miocène moyen** : il est essentiellement argileux de couleur marron, parfois schisteux, avec des intercalations de sables à grains fins et moyens. Leur épaisseur est de 100 m.
 - **Miocène supérieur** : il est constitué de roches sablo-argileuses, grés à bancs de graviers et contenant de gros blocs arrondis.

- e) **Quaternaire** : les formations quaternaires couvrent de vastes surfaces dans la région. Elles sont essentiellement représentées par des éboulis de pente, de dépôts sableux, dépôts éoliens, des graviers, des blocs, des dépôts alluvionnaires et fluviaux.

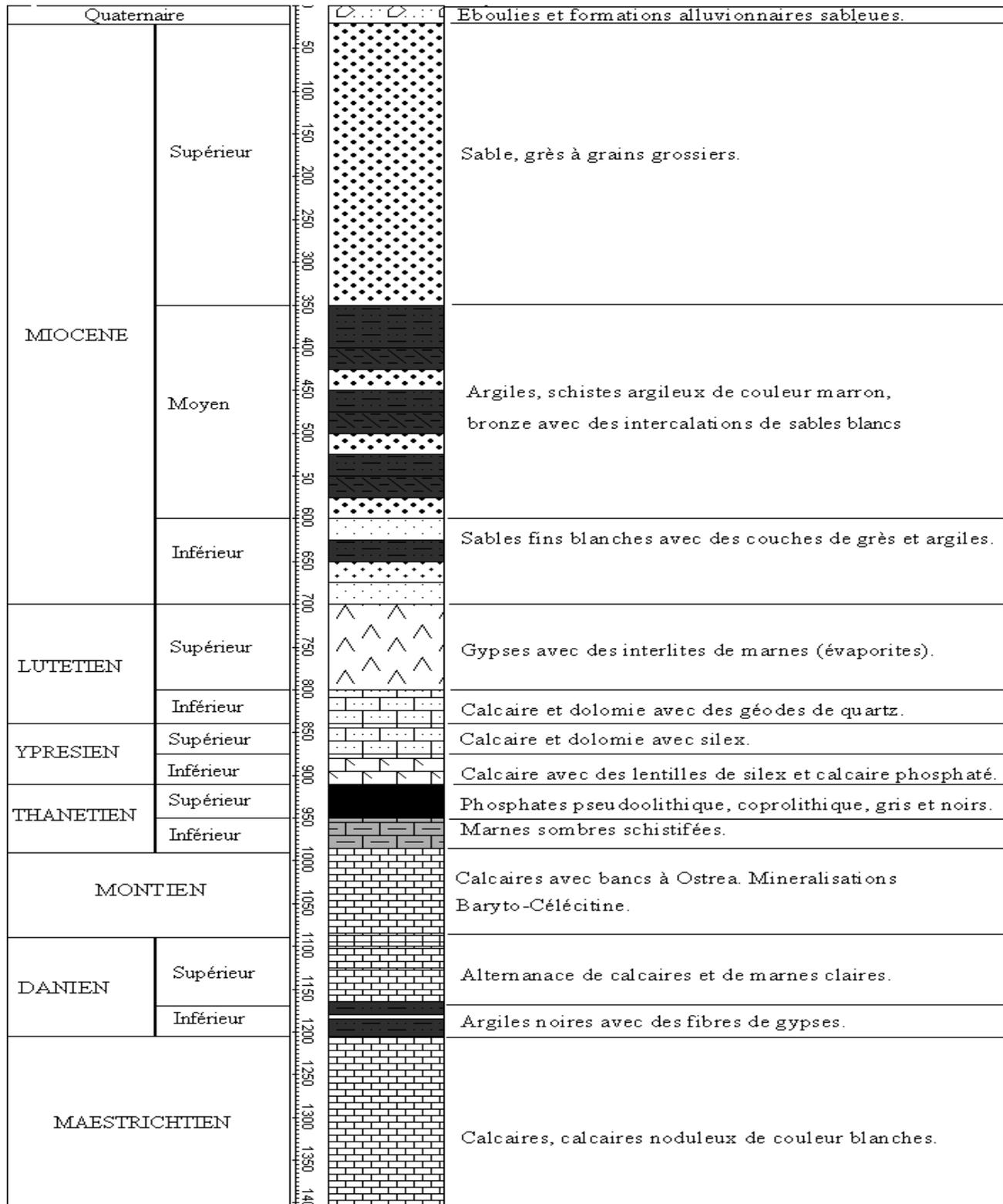


Figure I.3. Colonne lithostratigraphique de la région de Bir-El-Ater–Algérie Orientale- (d’après Cielensky et al, 1988) [1].

I.2.3. Tectonique [6]

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 (figure I.4).

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°.

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

a) 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.

b) Tectonique post-Eocène moyen et anté-Miocène

Contemporaine à l'émersion de la série au Lutétien supérieur, phase majeure du plissement des Aurès et des déformations distensives 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 la pénéplatement et l'érosion différentielle anté-Miocène. Ces plissements sont, en majorité, antérieurs aux dépôts des sables Miocènes. C'est à la faveur de cette phase tectonique qu'apparût l'anticlinal de Djebel Onk.

c) Tectonique tardi-Miocène, post-Burdigalienne, 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 tectogenèse est responsable de la structure actuelle de la région Bir-Al-Ater.

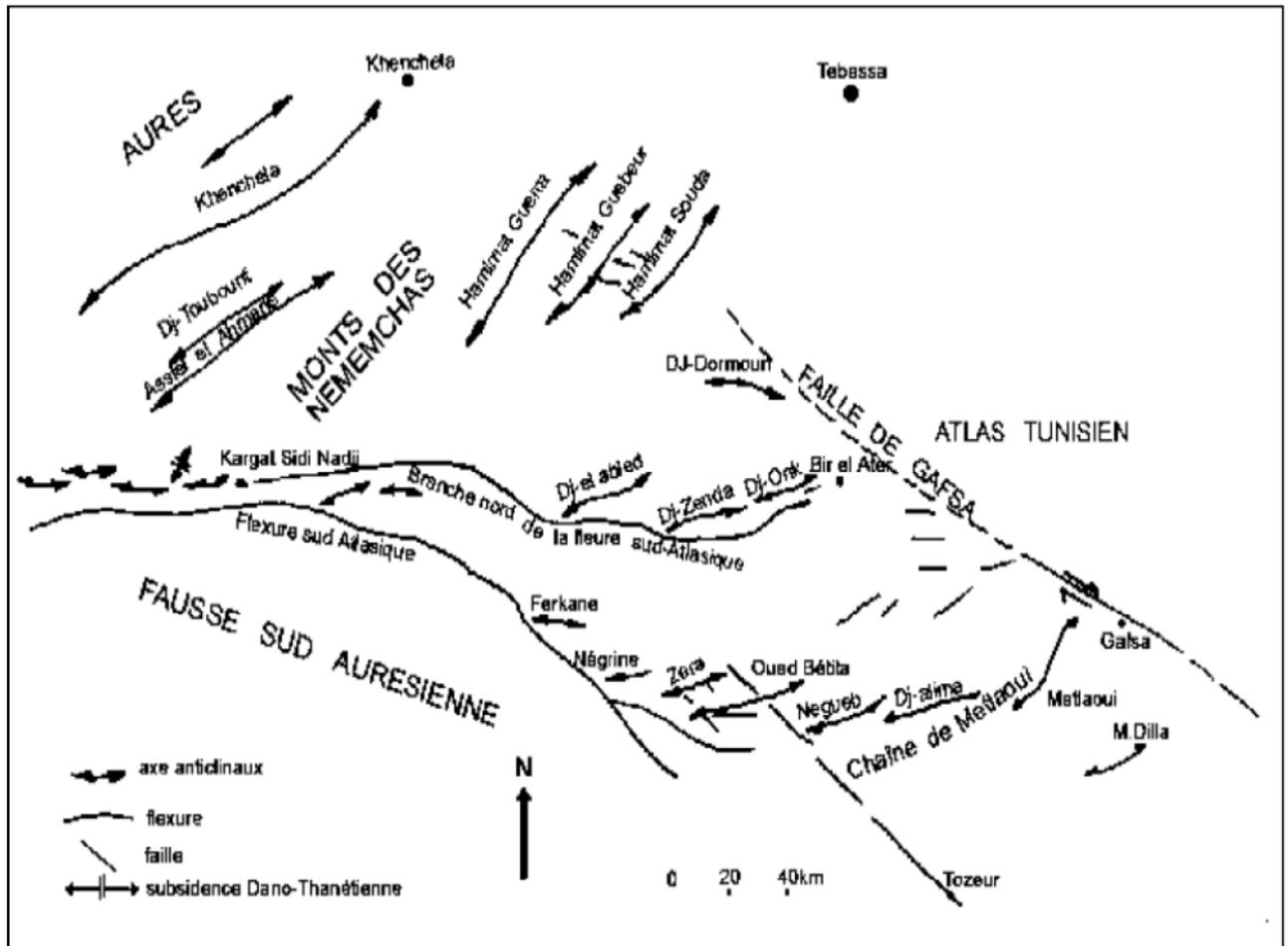


Figure I.4. Carte structurale de la région du Bir-El-Ater à l'intérieur du bassin de Gafsa-Métlaoui-Djebel Onk (Aissaoui, 1984) [1].

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

I.3.1. Situation géographique [1].

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 (figure I.5). Il est distant, en ligne droite, de 15 Km 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.

Les coordonnées UTM de ce gisement sont les suivantes :

$$X = 421.310 \text{ à } 424.200.$$

$$Y = 3.833.730 \text{ à } 3.837.780.$$

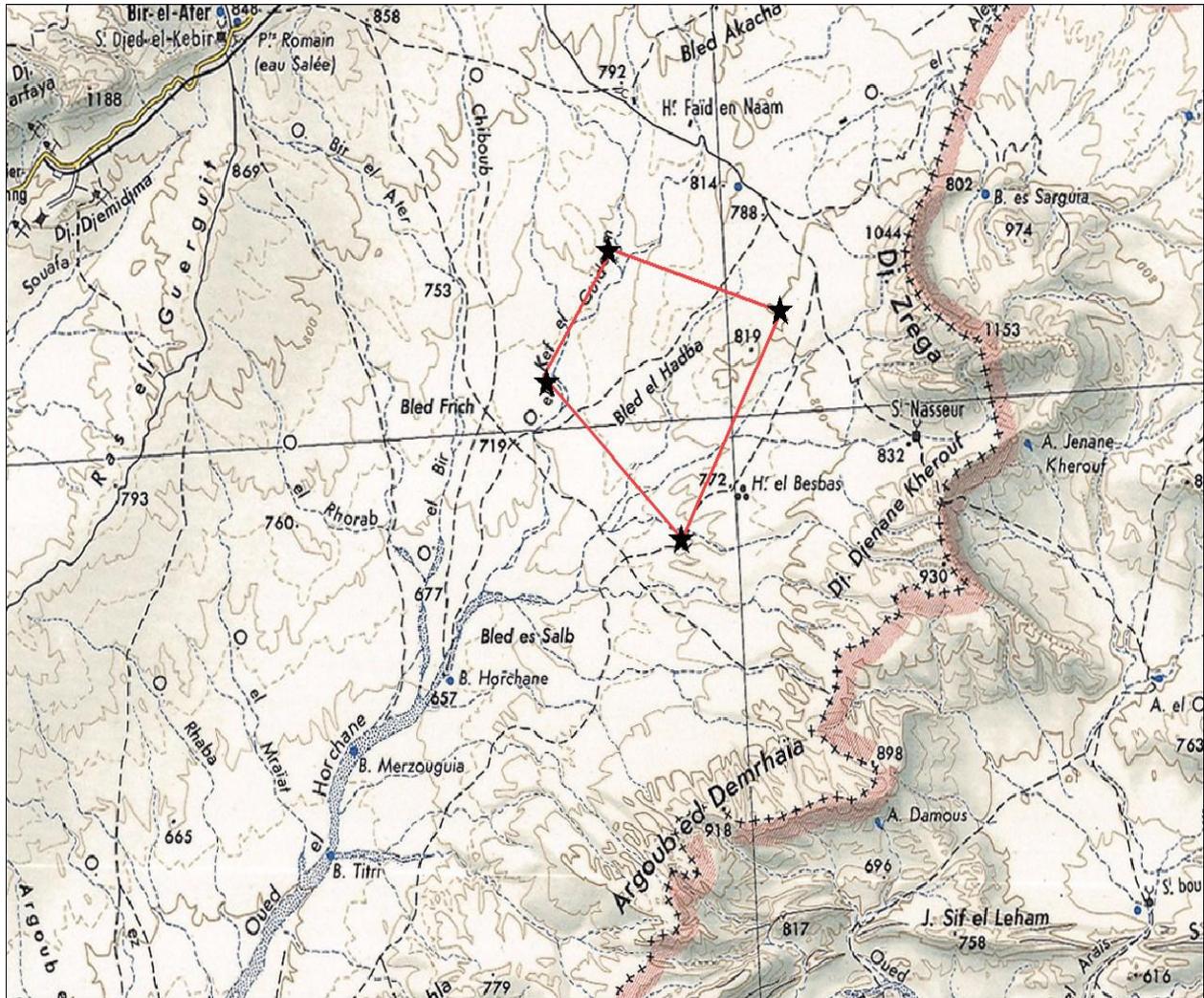


Figure I.5. Carte de situation géographique de gisement de Bled El Hadba [1].

I.3.2. Contexte géologique de gisement de Bled El Hadba [1].

La géologie du gisement est relativement simple, les couches phosphatées et leurs encaissants plongent d'une façon monoclinale et sous une pente douce de 6 à 10° vers l'Ouest et le Nord-Ouest, ce pendage devient plus accentué vers le Sud du gisement.

Néanmoins la tectonique est assez compliquée, on constate des décrochements nets, horizontaux et des failles de différentes directions.

La puissance des couches de phosphates du gisement est importante. Elle est de l'ordre de 41 m. Une grande partie du gisement est à une profondeur de 0 à 60 m.

La teneur moyenne en P_2O_5 dans le gisement de Bled El Hadba est de 21.05 %.

Le faisceau total des phosphates montre la superposition de trois sous-couches (sommitale, principale et basale). Les coupes ont permis de mettre en évidence la variabilité de l'épaisseur et l'extension latérale des sous-couches dans le gisement.

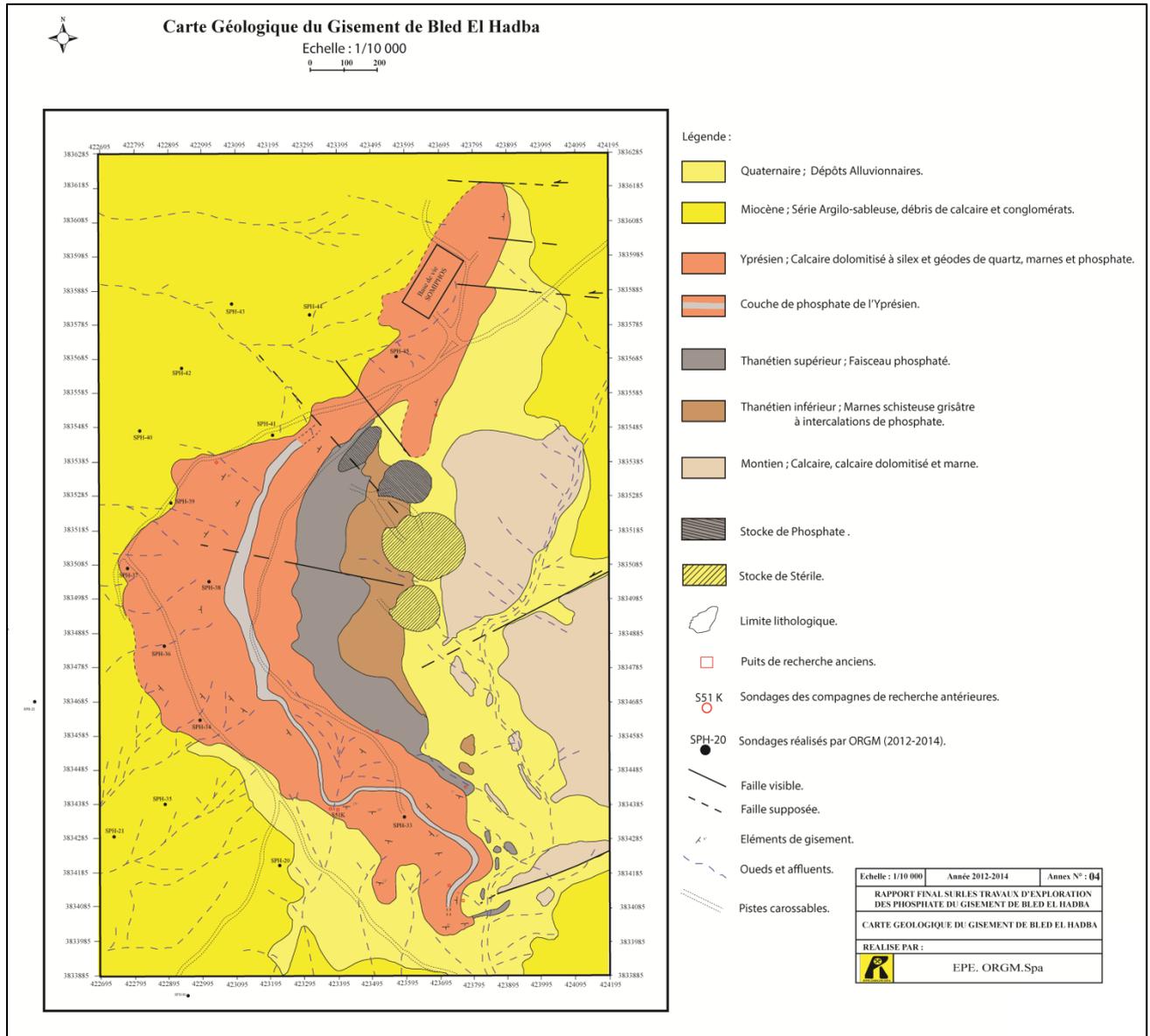


Figure I.6. Carte géologique du gisement de Bled El Hadba [1].

I.3.3. Lithostratigraphie [4]

La succession lithostratigraphique est, dans ces grandes lignes ; assez semblable à celles des gisements de Djemi-Djema et Kef Essenoun. 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.

a) Paléocène

❖ **Montien** : le Montien affleure au Sud-Est du gisement. A la base de cet étage, on observe des calcaires silicifiés à lumachelles bioclastes ainsi que d'autres organismes fossiles. Ces calcaires sont surmontés par une série d'alternance d'argile lumachéllique, argiles calcaireux, et marnes dolomies. Ensuite vient un banc de dolomie au-dessus duquel reposent des calcaires gris clairs, légèrement phosphatés. Son épaisseur peut atteindre 100 m.

❖ Thanétien

- **Thanétien inférieur** : à la base, sont rencontrées des marnes noires surmontées par des calcaires légèrement lumachélliques, 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. 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.

b) Yprésien : la série du Thanétien est surmontée par une série calcaro-dolomitique à silex. Cette série d'âge Yprésien est carbonatée, marneuse, dolomitique et calcareuse. Elle est légèrement phosphatée et peut atteindre jusqu'à 56 m d'épaisseur (S-5H).

La série Yprésien renferme, dans sa partie médiane, de minces bancs des phosphates dolomitiques de 1,7 à 2,3 m d'épaisseur, intercalés par des marnes dolomitiques et de calcaires.

c) Miocène : il recouvre la série précédente. Son épaisseur augmente progressivement vers l'Ouest et en allant vers le Nord-Ouest. Il atteint 77 m dans le sondage S-7H. La série est caractérisée par la présence de sable avec intercalation de calcaire marneux beige et des débris de dolomie.

d) Quaternaire : les dépôts du Quaternaire sont essentiellement répandus sur la majorité du territoire étudié. Ils sont représentés par des dépôts éoliens et alluvionnaires.

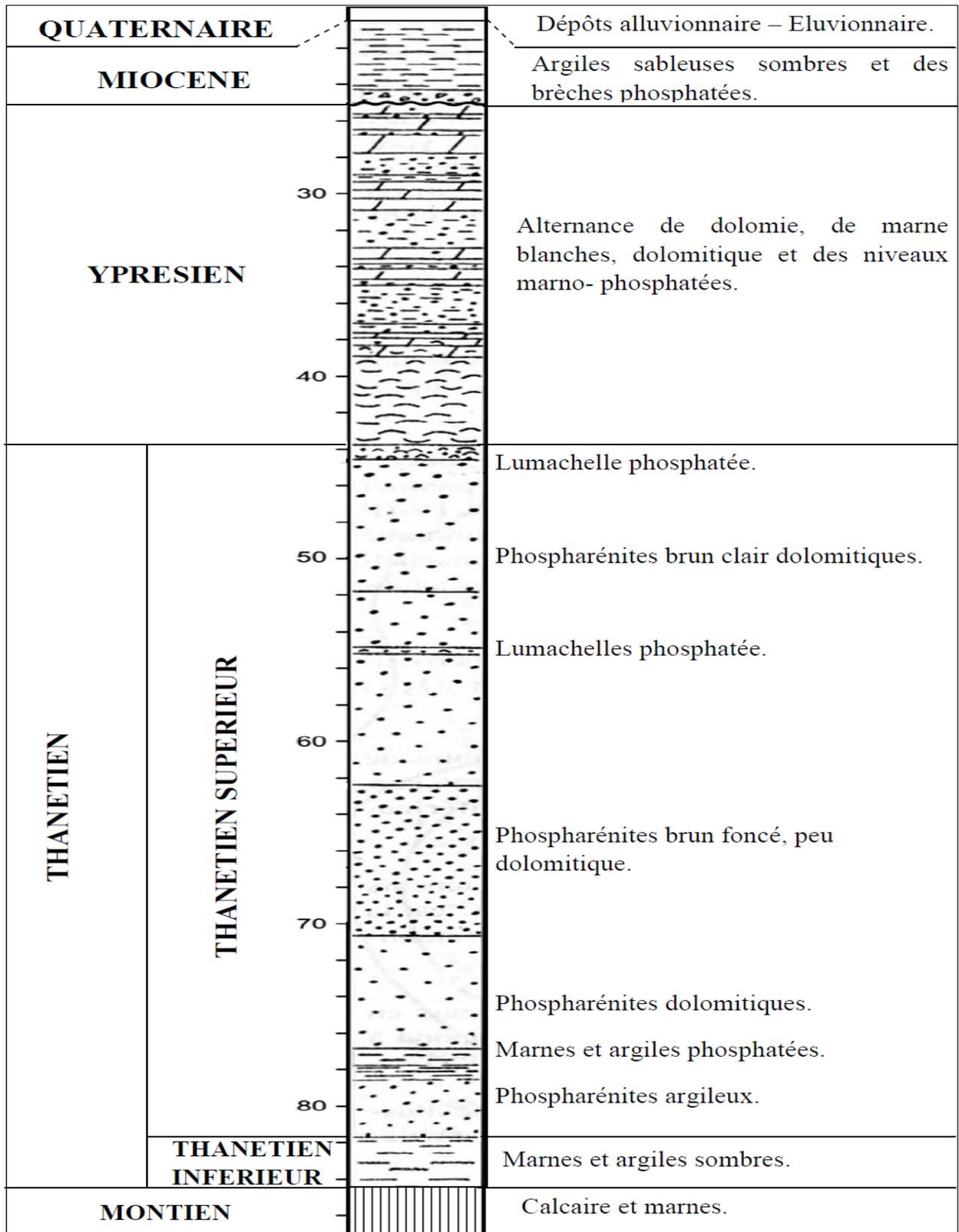


Figure I.7. Lithostratigraphie du gisement de Bled El Hadba (Cielensky et Benchernine, 1987) [1].

I.3.4. Tectonique du gisement [1]

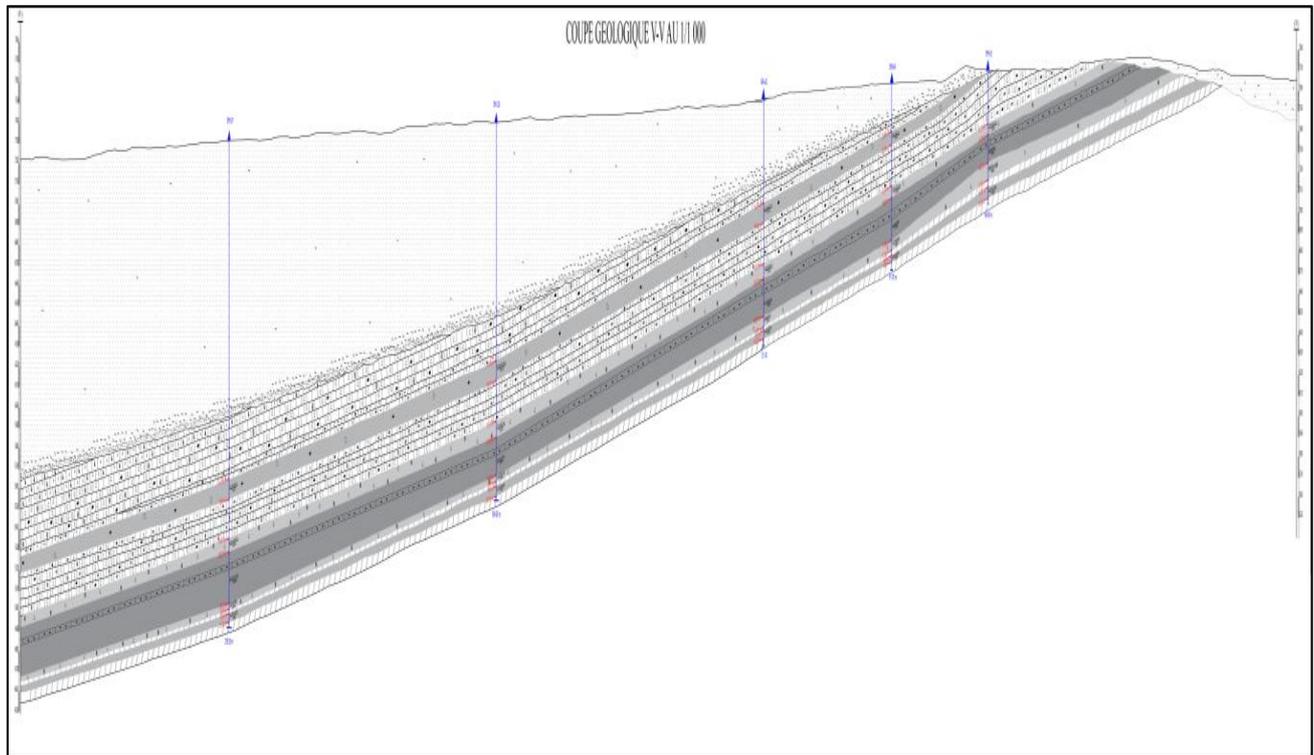
La zone de Bled El Hadba constitue le flanc Ouest de la structure antiforme du Djebel Zerga (1153 m) dont la ligne de crête forme la frontière Algéro-Tunisienne.

Cette structure antiforme, à cœur de Crétacé supérieur, constitue le prolongement Nord de la structure de Djebel M'rata en Tunisie. Par rapport à cet allongement anticlinal principal, la série phosphatée de Bled El Hadba se situe sur son flanc Ouest (Prian et Cortiel, 1993).

La structure géologique de l'ensemble du gisement est simple, puisque la série Paléocène-Eocène et Miocène se présente sous forme monoclinale à pendage variant de 6 à 10°, lié au flanc Ouest de Djebel Zerga vers le Nord-Ouest. La zone de Bled El Hadba est affectée par une série de failles et décrochements horizontaux orientés NW-SE. Ces décrochements sont visibles cartographiquement, mais ils n'entraînent pas de modifications importantes de la géométrie des couches phosphatées. Des failles secondaires à petits rejets de 5 à 20 m de direction WNW-ESE sont également enregistrées.

Les coupes géologiques tracées à travers le gisement de Bled El Hadba, (Figure I.8) montrent que le faisceau phosphaté se présente sous forme d'une bande d'affleurement orientée NE-SW. Cette couche phosphatée s'enfonce vers l'Ouest sous les calcaires de l'Yprésien et les sables du Miocènes. Vers l'Est, affleurent les marnes infra série phosphatée, puis les calcaires et marnes du Miocène ; La série phosphatée n'est donc pas exprimée dans cette direction.

Dans la partie Nord des terrains considérés, on observe la disparition de la couche phosphatée vers le sondage S-57K. Prian et Cortiel (1993) ont expliqué cette discontinuation par une érosion anté-Miocène. Cette discordance apparaît aussi dans les sondages S-11H et S-55K.



Echelle: 1/1 000	Année: 2012 - 2014	Annex N°: 05 e
RAPPORT FINAL SUR LES RESULTATS DES TRAVAUX D'EXPLORATION DES PHOSPHATE DU GISEMENT DE BLED EL HADBA		
COUPE GEOLOGIQUE SUIVANT LE PROFIL V-V		
Réalisé par :		
 EPE.ORG.M.SPA		

Légende:	
	Dépôts détritiques du Miocène (Sables et Argiles).
	Conglomerats de base du Miocène.
	Calcaire organogène blanchâtre, fortement gypseux.
	Calcaire lumachellic, résiduellement phosphaté, à nodules de silex et géodes de quartz.
	Phosphate à nodules de silex et débris de calcaire et marne.
	Marne gypseuse, blanchâtre, à nodules de silex, résiduellement phosphatée.
	1: CS + CB: Phosphate lumachellic à géodes de quartz.
	2: CM: Phosphate.
	Marne pélitique litée, résiduellement phosphatée.
	Phosphate coprolithique, à ciment marneux.
	Sondages d'exploration ORGM 2012-2014.

Figure I.8. Coupe géologique représentant le prolongement des couches phosphatées du gisement de Bled El Hadba [1].

I.4. Aperçu Hydrologique [1]

Les chaînes de montagnes de l'Atlas Saharien forment la ligne de partage des eaux entre la Méditerranée et le Sahara. D'un point de vue topographique, la zone de BEH appartient au bassin versant saharien et s'écoule finalement dans le Chott Melghir.

Il n'y a pas de cours d'eau pérennes dans la zone du projet ou à sa proximité. De nombreux modèles d'érosion dendritique et linéaire apportent la preuve de l'existence d'un écoulement des eaux superficielles pendant les périodes de précipitations abondantes.

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 versants de l'Oued El Kef El Guidoum ou de l'Oued El Louz, les deux Oueds confluent au Sud-Ouest de la zone du projet pour former l'Oued Horchane.

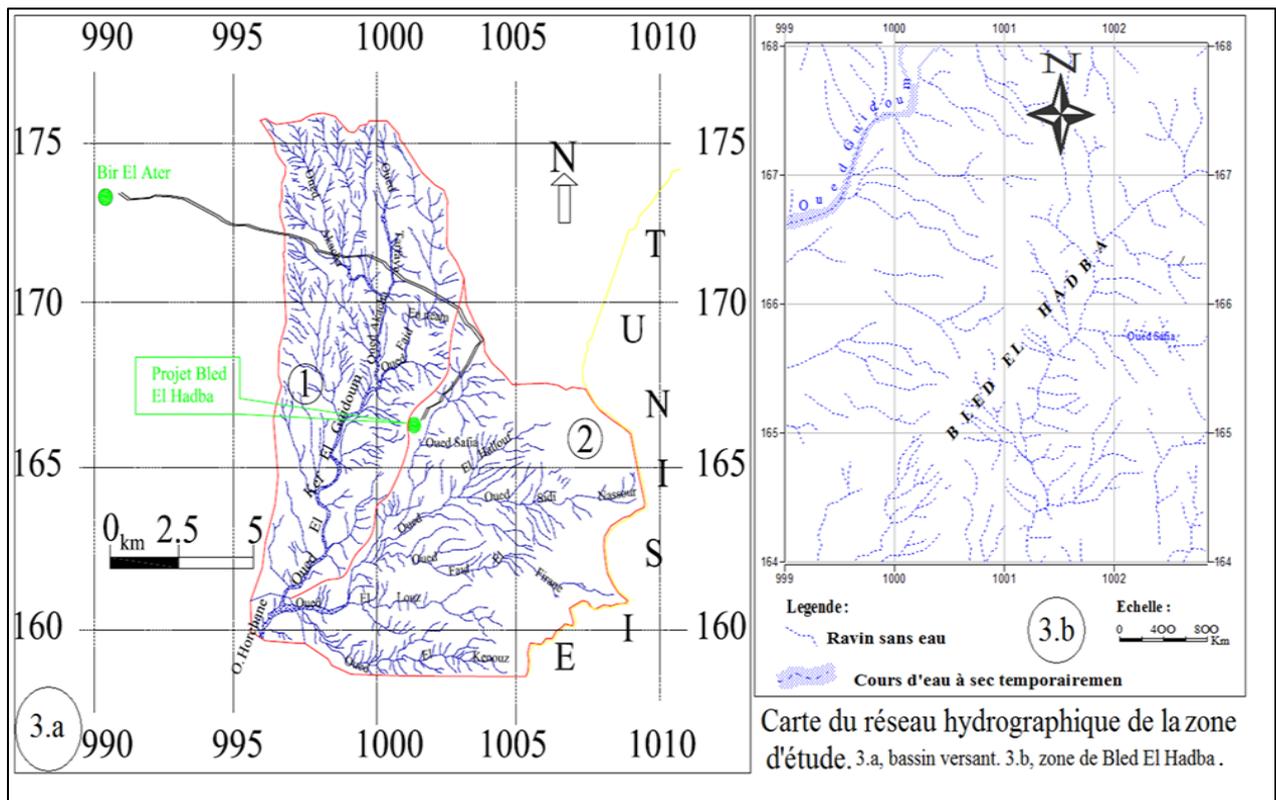


Figure I.9. Réseau d'écoulement des eaux de surface [1].

I.5. La climatologie [1]

Les conditions climatiques sont des conditions continentales types, caractérisées par des hivers froids et des étés chauds. La zone d'étude bénéficie d'un climat de transition entre la région semi-aride de Tébessa et la région subaride de Négrine.

I.5.1. Température

Sur une moyenne de 5 années, les températures évoluent de la même manière; en hiver elles fluctuent autour de 7 °C, et elles augmentent progressivement à partir du mois de mai, jusqu'à 26.5 °C en été et diminue en automne passant de 23 à 7 °C. Les températures extrêmes enregistrées dans la région d'étude sont les suivantes :

✓ -6.2 °C en février 1996.

✓ 45.8 °C en aout 1993.

I.5.2. Pluviométrie

Les précipitations durant la période estivale sont extrêmement rares et les périodes sans pluies pendant plus d'un mois, sont fréquentes.

Les périodes pluvieuses varient entre 66 et 107 jours/an. Les orages sont importants et fréquents particulièrement durant les mois d'aout et septembre.

La neige et le gel sont rares. Mais la température descend souvent en dessous de 0 °C en hiver.

I.5.3. Le vent

D'après la compilation établie par SOMIPHOS à la fin de 2013. Les principales caractéristiques des conditions de vent sont les suivantes :

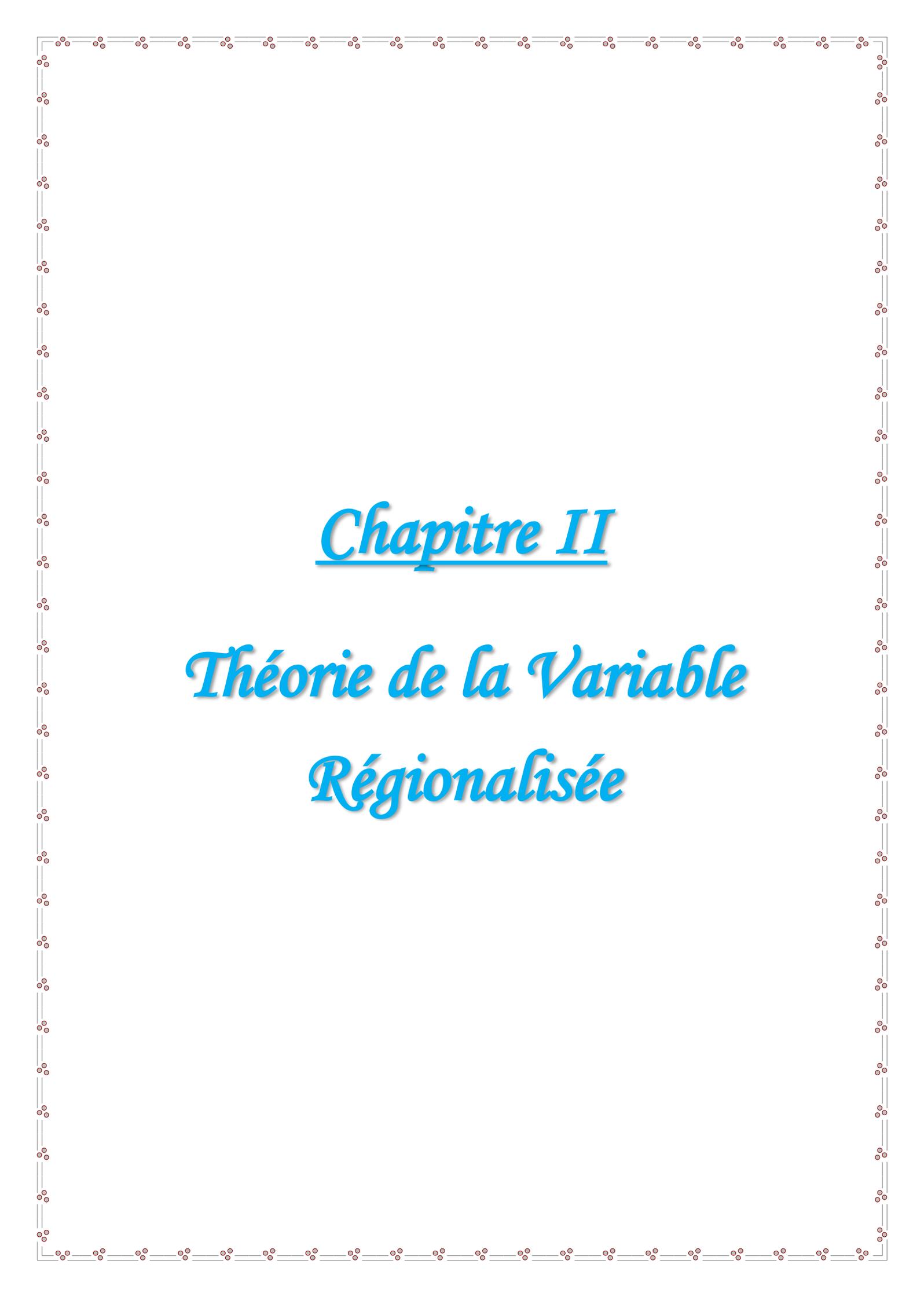
- Les vents dominants sont du Nord-Ouest, du Sud-Ouest et de l'Ouest.
- Les vents du Nord-Est, du Nord et du Nord-Ouest apportent souvent des précipitations pendant la saison humide et adoucissent le climat en réduisant les températures élevées pendant l'été; leur fréquence est de 46 %.
- La partie Nord de la wilaya n'est pas très exposée au Sirocco. Les montagnes de Tébessa et de Nememchas constituent une barrière naturelle qui réduit l'intensité de ce vent.

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 des estimations des réserves minières, à partir de l'interpolation spatiale des variables régionalisées.

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



Chapitre II

Théorie de la Variable Régionalisée

Chapitre II : Théorie de la variable régionalisée.

Introduction

L'estimation des réserves est une étape essentielle, afin d'évaluer la rentabilité du gisement, et de justifier son exploitabilité ou non.

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 portent le nom générique de krigeage qui est développé en détail dans la deuxième partie de ce chapitre [7].

II.1. La géostatistique : Historique, objet et domaine d'application.

II.1.1. Historique [4]

La géostatistique est connue depuis près de 60 ans dans les mines d'Or du Witwatersrand où Daniel Krige proposa une correction statistique à la manière traditionnelle d'estimer la teneur d'un bloc de minerai à partir d'un nombre limité d'échantillons pris autour du bloc à exploiter. La théorie était formulée par Georges Matheron (1963), qui introduisit un outil pour analyser la continuité spatiale des teneurs appelé 'le variogramme' et une méthode d'estimation basée sur le variogramme appelée 'le krigeage'.

Avec toutes les expériences et les développements des trente dernières années, La géostatistique a prouvé sa supériorité en tant que méthode d'estimation des réserves dans de nombreux types de mines (métaux précieux, fer, métaux de base etc...), et est devenue une alternative possible aux méthodes géométriques traditionnelles d'estimation des gisements. D'autres disciplines qui utilisent des données distribuées spatialement (pétrole, environnement, hydrologie, océanographie, foresterie) ont commencé à l'adopter.

II.1.2. Objet

La géostatistique étudie des phénomènes naturels répartis dans l'espace (phénomènes régionalisés) et/ ou dans le temps (Minéralisation, pollution, propriété physique de roches, pluviométrie...) [8].

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 $z(t_n)$ [9].

La géostatistique est d'abord une pratique qui consiste à étudier des données réelles. Généralement, l'étude pratique comporte trois étapes :

- **Analyse** : approche critique des données disponibles, et évaluation de leur adéquation aux problèmes posés. Il s'agit de définir clairement le sujet et s'assurer que l'on a bien compris la problématique ;
- **Modélisation** : la donnée brute n'est pas un objet utilisable directement par les outils mathématiques. D'où l'existence toujours d'une phase indispensable de recours à une formalisation abstraite. La donnée physique est d'abord convertie en objet mathématique (modèle de variogramme, modèle de gisement,...) ;
- **Synthèse** : après les traitements mathématiques et la modélisation, il faut pouvoir donner une interprétation pratique aux résultats obtenus.

La géostatistique est classiquement subdivisée en géostatistique linéaire, multivariable, non- stationnaire et non- linéaire [8].

II.1.3. Domaines d'application de la géostatistique [10]

La géostatistique est utilisée dans plusieurs domaines parmi lesquels : l'environnement, le pétrole, la géologie et les mines mais aussi la santé.

✓ L'environnement

- Sites et sols pollués : études de sites pour des pollutions métalliques ou organiques ;
- Etude des hétérogénéités des sites ;
- Etude sur la caractérisation de sols pollués dans le cadre de sites présentant un échantillonnage suffisamment dense.

✓ Estimation des champs de perméabilité

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

✓ Modélisation d'écoulement hydraulique

- Technique de simulation géostatistique conjointe de la charge et de la transmissivité, ne nécessitant pas la définition complète de conditions aux limites,

a été développée sous des hypothèses simplificatrices, et confrontée aux calculs d'écoulement par des codes usuels. (simulated annealing).

✓ **La géotechnique**

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

✓ **La modélisation démographique** : géostatistique sur les données de recensement.

✓ **Le pétrole** : *la géostatistique est utilisée pour* :

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

✓ **La prospection et la mine- Etapes de reconnaissance**

La géologie et la mine sont les domaines originels de la géostatistique :

- Des réserves in situ (tonnages de minerai et de métal) ;
- Des réserves récupérables (% de métal contenu dans des blocs) + variance d'estimation.
- Prévoir l'ordre de grandeur des fluctuations autour de la moyenne (qualité du minerai à l'entrée de l'usine de traitement ; simulations) ;
- Méthodes géostatistiques pour l'évaluation de la distribution de probabilité de la grandeur étudiée; quantifier le risque associé à un projet minier ;
- simulation des paramètres en tenant en compte la géologie. (*Paramètres des réservoirs pétroliers souterrains*).

II.2. Exemple d'étude

Le problème peut être formalisé simplement :

Soit une propriété Y qui varie dans l'espace géographique, connue de façon discontinue en n points d'observation localisés par leurs coordonnées géographiques x_i .

Des exemples de telles propriétés sont:

- Hauteur de pluies mesurées dans quelques stations météorologiques ;
- Profondeur du sol mesurée à la tarière ;
- Teneurs en métaux lourds dans le sol ;
- Teneur en or dans des couches sédimentaires à partir de quelques forages.

Soit x_0 un point quelconque de cet espace. Peut-on estimer la valeur de Y en x_0 à partir des valeurs $Y(x_j)$ connues? Sachant faire cela, peut-on obtenir la carte des variations de la propriété dans l'espace géographique ?

Afin d'estimer la valeur au point x_0 à partir des prélèvements qui l'entourent, il paraîtra raisonnable de mettre au point une procédure d'estimation où, par exemple, le point x_4 aura plus de poids que tous les autres points ; le point x_3 aura à son tour plus de poids que le x_2 et ainsi de suite. Ce qui rappelle tout simplement le principe classique de la zone d'influence.

Ainsi, il semble raisonnable d'utiliser un procédé d'estimation qui donne plus d'importance à l'échantillon n°4 qu'à l'échantillon n°1. Face à cette question classique et récurrente, plusieurs méthodes ont été proposées pour décider du poids accordé à chaque échantillon. La plupart des méthodes se sont appuyées sur la distance entre l'échantillon et le point à estimer.

Par exemple, les poids attribués à chacun des échantillons peuvent être approchés par l'inverse de la distance, ou l'inverse de la distance au carré...etc. (ISOBEL C., 1979).

Bien entendu cette approche n'est pas parfaite, certaines questions restent pertinentes. Quel est le meilleur poids ? Quelle sera la distance limite, au-delà de laquelle on ne tiendra plus compte des échantillons ? Quelle est la fiabilité de cette méthode, l'ordre de grandeur de l'erreur commise ? Sur quel type de gisement est-elle applicable ?...etc. [8] [11].

Par le biais de cet exemple, nous avons voulu relater la question de base qui a conduit à l'établissement de ce qui est connu actuellement par la théorie de la variable régionalisée ou géostatistique.

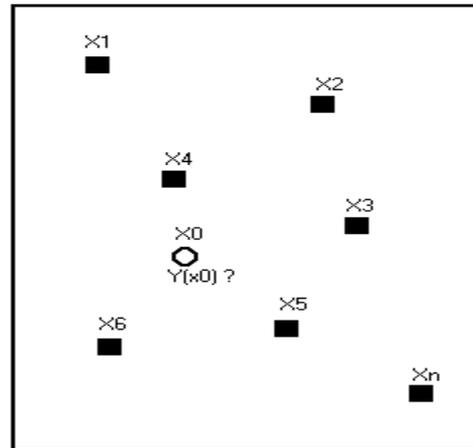


Figure II.1. Exemple explicatif [8].

II.3. Théorie des variables régionalisées et leurs moments

On appelle variable, le caractère sur lequel porte une étude d'un ensemble d'individus et qui change d'un à l'autre. Si le changement de ce caractère est imprévisible, alors la variable est appelée variable aléatoire. La teneur d'un échantillon, l'épaisseur d'une couche minéralisée ou d'un sol, la pluviométrie, ..., sont des variables aléatoires.

L'ensemble des variables aléatoires (teneurs mesurées sur des échantillons géologiques ou dans des sondages) implantées aux points X_i de coordonnées X_{1i} , X_{2i} , X_{3i} et notées $z(x_i)$ forme la fonction aléatoire $Z(X)$. La teneur $z(x_i)$ mesurée en x_i est une réalisation particulière de la variable aléatoire $z(x_i)$ et l'ensemble des teneurs mesurées en différents points est interprété comme une réalisation particulière de la fonction aléatoire $Z(X)$ [8].

Le terme de variable régionalisée a été choisi par Georges Matheron pour souligner les deux aspects contradictoires de cette variable :

- un aspect aléatoire (explique les irrégularités locales).
- un aspect structuré (reflète les tendances du phénomène à grande échelle) [7].

En géostatistique toute variable régionalisée possède une structure de variabilité particulière : la quantité $Z(x)$ et $Z(x+h)$ d'un même élément en deux points x et $x+h$ d'un domaine sont auto-corrélées.

Cette structure d'auto-corrélation dépend du module et de la direction du vecteur séparant les deux points de mesure [12].

$$\begin{array}{ccc}
 Z(x) & & Z(x+h) \\
 x \longleftarrow & h & \longrightarrow x+h
 \end{array}$$

II.3.1. Notion des moments

En géostatistique appliquée d'estimation, on s'intéresse essentiellement aux premiers moments de la variable régionalisée $Z(x)$.

- **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 :

$$E\{Z(x)\} = m(x) \quad (\text{II.1})$$

- **Moment d'ordre 2 :**

On parle de moment d'ordre 2, si la covariance entre tout paire $Z(x)$ et $Z(x+h)$ existe et ne dépend que du vecteur de translation h . Cette propriété implique l'existence de la variance et de leur indépendance de x :

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

A partir de la covariance, on définit le corrélogramme qui exprime les variations des corrélations spatiales entre les valeurs (teneurs) mesurées au point x et celles observées au point $(x+h)$ [9].

L'équation 2 suppose l'existence et la constance de l'espérance m , ce qui n'est pas toujours possible dans la réalité. C'est pourquoi on préfère souvent une autre fonction, moins exigeante que la covariance, il s'agit du semi-variogramme. Le semi-variogramme, ou variogramme, mesure la variance des incréments $[Z(x) - Z(x+h)]$.

La fonction variogramme s'écrit :

$$2\gamma(x, x+h) = \text{Var}[z(x) - z(x+h)] \quad (\text{II.3})$$

La fonction $\gamma(x, x+h)$ est appelée semi-variogramme [12]

II.3.2. Hypothèse stationnaire [7]

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.

II.3.3. Hypothèse intrinsèque [7]

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.

II.4. Introduction à la notion de variogramme

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.2) se caractérise par une fonction notée $2\gamma(x,h)$ appelée variogramme (Journel et Huijbregts, 1978) [4].



Figure II.2. Représentation schématique des points de mesure de la variable [4].

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 [13].

II.4.1. Le semi-variogramme théorique

Le variogramme théorique est défini comme étant l'espérance quadratique de la variable aléatoire $[Z(x) - Z(x+h)]$ soit :

$$\gamma(h)_{th} = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E\left[(Z(x) - Z(x+h))^2\right] \quad (\text{II.10})$$

Où x est le vecteur de coordonnées (1,2 ou 3 selon le cas).

h est le vecteur distance.

Cette fonction, habituellement croissante en fonction de h , synthétise beaucoup d'informations concernant le comportement conjoint des variables aléatoires et concernant « la continuité » de la minéralisation [14].

On peut schématiser l'ensemble des modèles théoriques de semi-variogramme par le graphique de la (figure II.3). Ce graphique met en avant 3 paramètres fondamentaux :

L'effet de pépite, le seuil, et la portée. Ces trois paramètres sont brièvement décrits ci-dessous : [12]

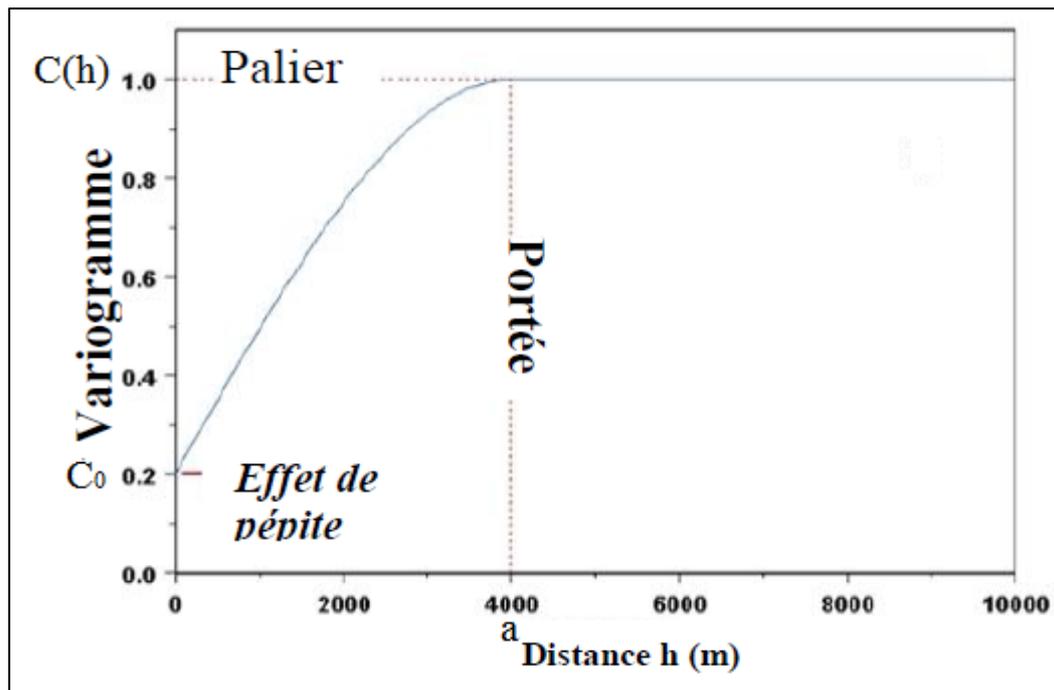


Figure II.3. Schéma type d'un variogramme [9].

Remarque : *plus la fonction croit, moins les observations se ressemblent.*

❖ **Effet de pépité :**

Il représente une discontinuité de variogramme à l'origine et traduit une forte irrégularité du processus des variations locales.

Un effet de pépité s'explique par des variations non détectées à une très faible échelle.

❖ **Portée :**

Elle représente la valeur h pour laquelle le variogramme atteint une limite et caractérise la distance entre sites de mesures au-delà de laquelle les dépendances entre mesures du processus sont nulles. Elle représente l'échelle de l'hétérogénéité du processus.

❖ **Palier :**

Il s'agit de la valeur limite du variogramme pour de grandes valeurs de h .

Comme le palier n'est atteint qu'asymptotiquement alors la portée réelle est infinie. C'est pour cela qu'on désigne une portée pratique [9].

II.4.2. Le variogramme expérimentale

Nous avons vu le variogramme théorique :

- Nécessite la connaissance des variables $Z(x)$ entièrement pour être calculé.
- Or nous n'avons qu'une valeur de celle-ci, c'est-à-dire les observations.
- C'est pourquoi en pratique, nous pouvons seulement estimer le variogramme théorique à l'aide du variogramme expérimental qui s'écrit alors :

$$\gamma_e(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_i^{N(h)} [(Z(x_i) - Z(x_i+h))^2] \tag{II.11}$$

Où N(h) : nombre de paires dont les points sont séparés d'une distance h [13].

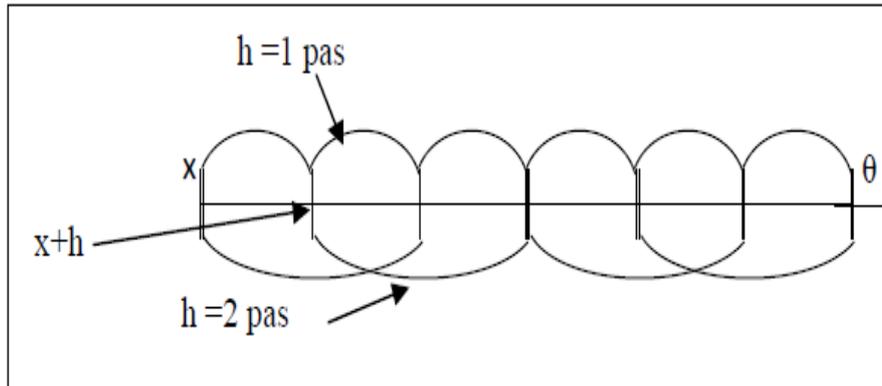


Figure II.4. Schéma de calcul du variogramme expérimental [4].

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

$$\gamma_e(h, \theta) = \frac{1}{2N(h, \theta)} \sum_i^{N(h, \theta)} [(Z(x_i) - Z(x_i+h))^2] \tag{II.12}$$

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

En pratique, on s'accorde une tolérance sur h et sur θ afin d'avoir suffisamment de paires de points pour chaque h et chaque θ [12].

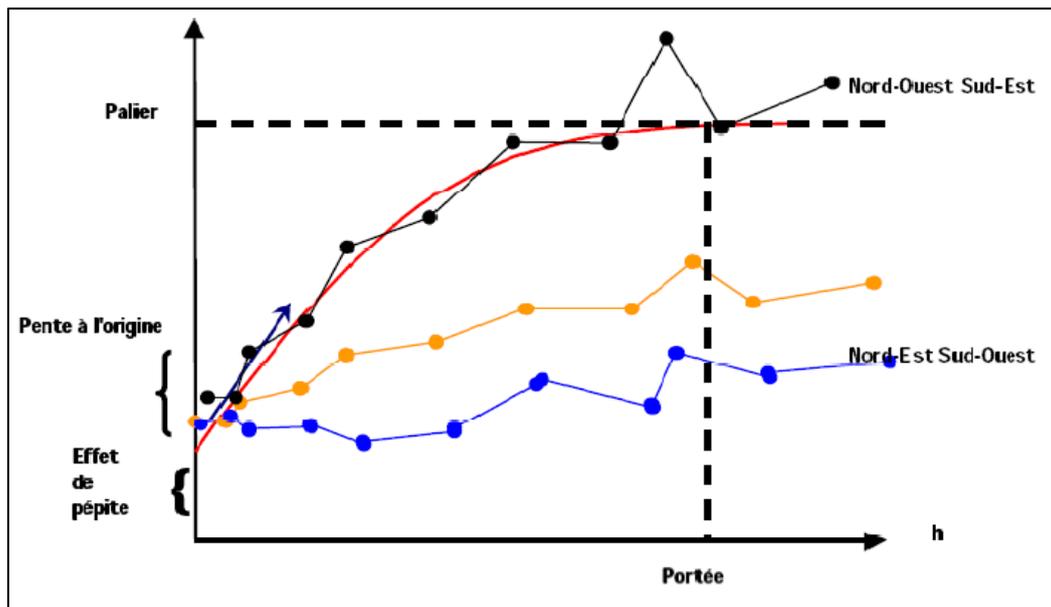


Figure II.5. Exemples de variogrammes multidirectionnels (WACKERNAGEL, 1993) [12].

II.4.3. Schémas théoriques et ajustement des variogrammes

Une fois le variogramme expérimental est calculé, il faut alors déterminer un modèle mathématique qui lui correspond et qui doit être opérationnel et simple à l'emploi : c'est l'ajustement du variogramme expérimental.

Les schémas théoriques d'usage courant sont l'effet de pépite, le modèle linéaire, le modèle sphérique, le modèle puissance, le modèle gaussien et le modèle exponentiel. Une combinaison de deux de ces modèles ou plus est également faisable [15].

❖ **L'effet de pépite :**

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= 0 && \text{si } h = 0 \\ \gamma(h) &= C && \text{si } h > 0 \end{aligned}$$

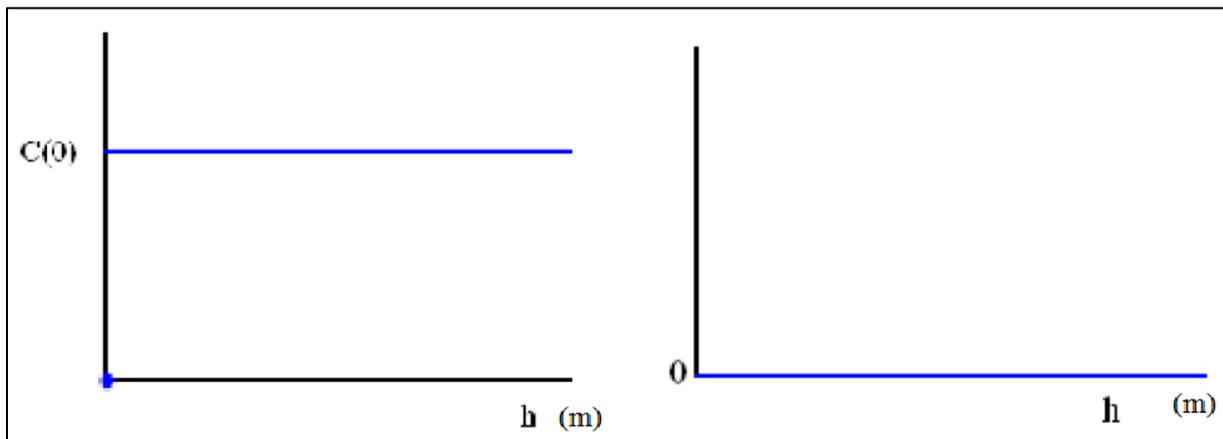


Figure II.6. Schéma type d'un semi-variogramme (effet de pépite) [15].

Ce modèle correspond à un phénomène purement aléatoire sans corrélation entre les données, quelle que soit la distance qui les sépare [7].

❖ **Le modèle sphérique :**

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & \dots\dots\dots 0 \leq h \leq a \\ C + C_0 \dots\dots\dots h > a \end{cases} \quad \text{(II.13)}$$

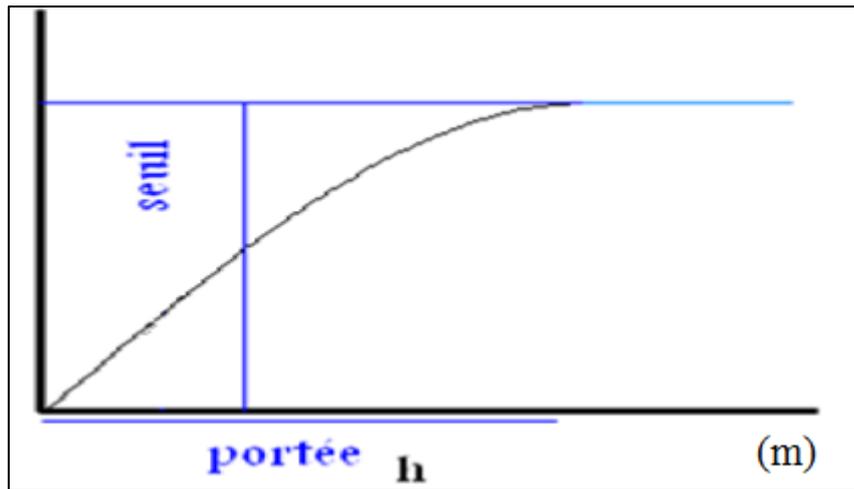


Figure II.7. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme sphérique [15].

Le modèle sphérique est probablement celui qui est le plus couramment utilisé. Il a une expression polynomiale simple et sa forme correspond bien à ce qui est souvent observé : une croissance presque linéaire jusqu'à une certaine distance, puis une stabilisation [7].

❖ **Le modèle exponentiel :**

Son expression mathématique est :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad (\text{II.14})$$

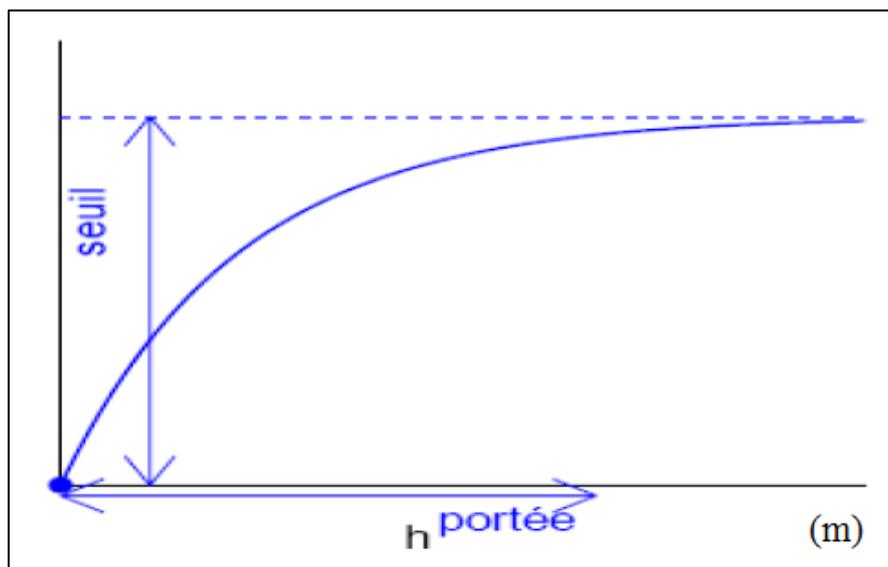


Figure II.8. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme exponentiel [15].

Le modèle exponentiel croît initialement plus vite, mais tend moins vite vers sa limite sans jamais l'atteindre réellement [7].

❖ Le modèle gaussien :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right] \quad (\text{II.15})$$

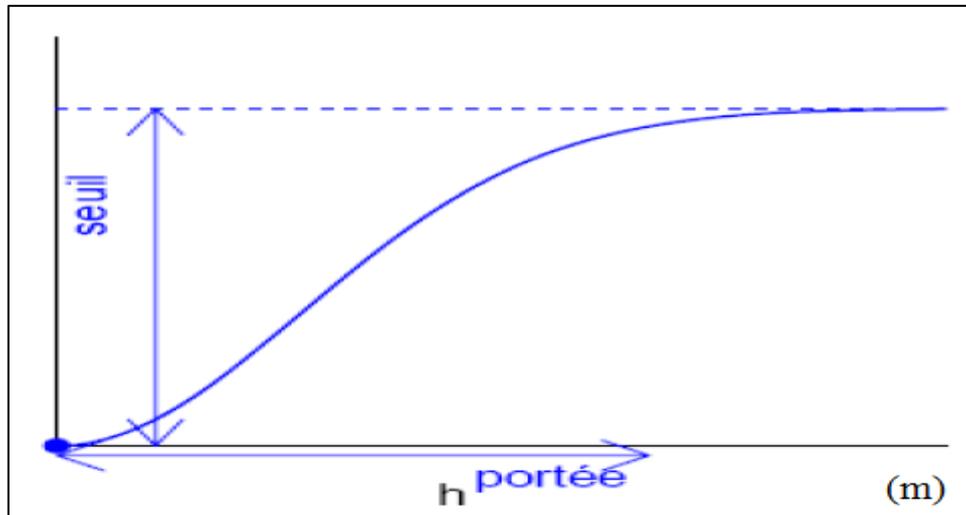


Figure II.9. Schéma type d'un modèle de semi-variogramme gaussien [15].

Le modèle gaussien représente un phénomène extrêmement continu. L'expérience montre que des instabilités numériques se produisent souvent lorsqu'il est utilisé sans effet de pépité [7].

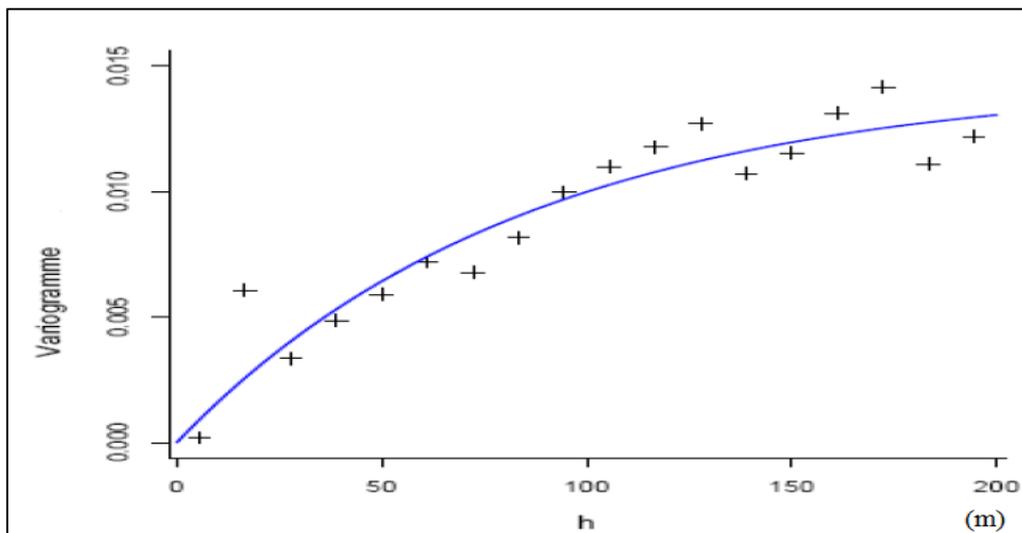


Figure II.10. Ajustement d'un modèle théorique (courbe) de semi-variogramme à un semi-variogramme expérimental (croix) [15].

II.4.4. Isotropie et anisotropie

Lorsque le 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). Si cela se produit pas, le variogramme ne dépend alors que de la distance entre les points, et on parle alors d'isotropie. On distingue deux principaux types d'anisotropie : l'anisotropie géométrique et l'anisotropie zonale [7].

II.4.4.1. Anisotropie géométrique

Il y a anisotropie géométrique quand les variogrammes présentent la même variabilité globale et en particulier le palier mais ont des portées différentes [8].

II.4.4.2. Anisotropie zonale

L'anisotropie zonale, cas le plus fréquent en pratique, affecte l'ensemble du variogramme ; les portées et les paliers sont différents. L'anisotropie zonale correspond souvent à une anisotropie génétique (exemple d'un gisement sédimentaire- direction verticale comparée aux directions horizontales) [8].

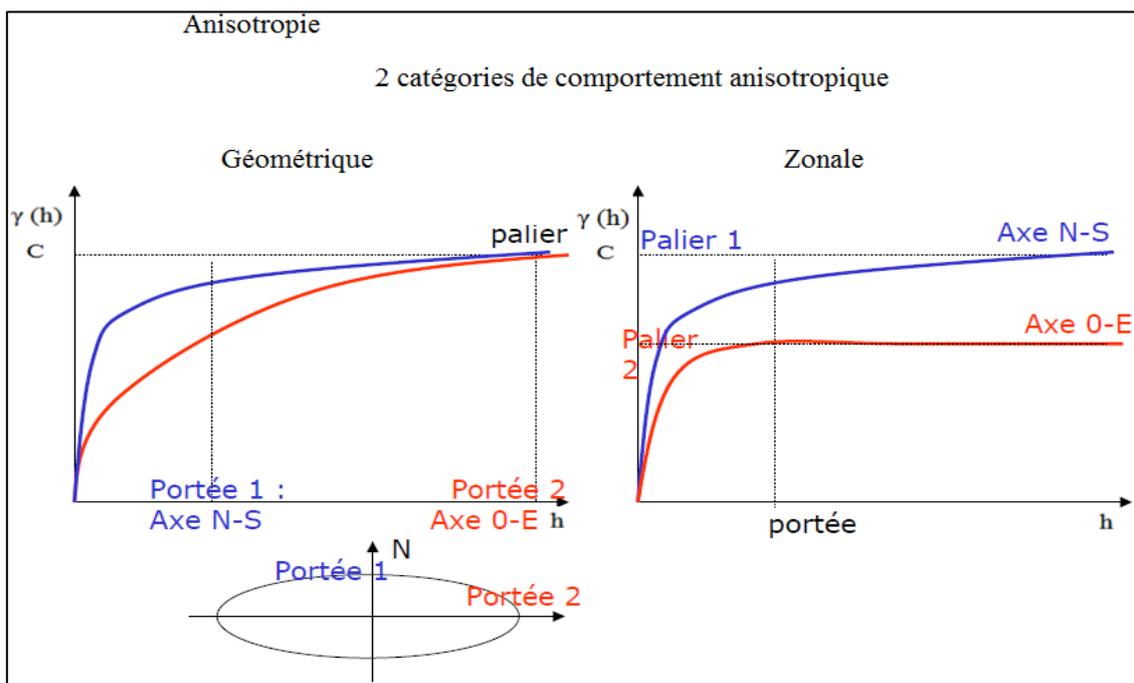


Figure II.11. Schéma des variogrammes représentant une anisotropie géométrique et zonale [16].

Pour revenir à une situation isotrope, le principe consiste à effectuer une transformation linéaire des coordonnées spatiales c'est-à-dire une rotation en suivant les directions de plus petite et plus grande continuité [15].

II.5. Le krigeage

Le krigeage doit son nom au professeur D. Krige, un ingénieur des mines Sud-Africain, qui a développé une technique simple de régression permettant d'estimer les teneurs en Or sans biais. Le professeur Matheron l'a améliorée et lui a donnée la dénomination de krigeage [7].

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

Il existe trois types de krigeage univarié (i.e. à une seule variable) : le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel. La différence entre ces types d'estimation réside dans la connaissance de la statistique de la variable à interpoler :

- ✓ Krigeage simple : variable stationnaire de moyenne connue ;
- ✓ Krigeage ordinaire : variable stationnaire de moyenne inconnue ;
- ✓ Krigeage universel : variable non-stationnaire (qui contient une tendance).

Ici, nous nous restreindrons au krigeage ordinaire, aussi appelé krigeage ponctuel par certains auteurs, qui est le plus fréquemment utilisé et qui répond aux besoins de notre problématique [17].

Le problème est le suivant : nous disposons de N valeurs $z(x_1), \dots, z(x_N)$ et nous souhaitons estimer la variable $Z(x)$ par une combinaison linéaire de ces données. Par exemple nous voulons estimer la valeur de cette variable en un point particulier $Z(x_0)$, ou bien sa moyenne dans un bloc V , notons la quantité à estimer :

$$Z(V) = \frac{1}{V} \int_V Z(x) dx \quad (\text{II.16})$$

Où le volume V se réduit à un seul point dans le cas d'une estimation ponctuelle. Pour mener à bien cette estimation nous considérons une moyenne pondérée des données :

$$z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (\text{II.17})$$

Les poids λ_i sont les inconnues du problème.

Le problème réside dans le choix des meilleurs facteurs de pondérations λ_i possibles.

C'est ici que nous avons recours au modèle géostatistique. Considérons la fonction aléatoire $Z(x)$ liée à la variable régionalisée. On définit de même :

$$Z_x^* = \sum \lambda_i Z(x_i) \quad (\text{II.18})$$

Choisissons les facteurs de pondération de telle sorte que l'estimation soit :

- Sans biais : $E [Z^*(x) - Z(x)] = 0$ (II.19)

- Et de variance minimum : $\text{Var} [Z^*(x) - Z(x)]$ (II.20)

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

$$e = Z(x) - Z^*(x) \quad (\text{II.21})$$

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

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

$$\text{Var}(e) = \text{Var}(Z(x)) + \text{Var}(Z^*(x)) - 2\text{Cov}(Z(x), Z^*(x)) \quad (\text{II.22})$$

Substituant $Z^*(x)$ par son expression, en fonction des $Z(x_i)$, donnée en (équation (II.17)), on obtient :

$$\sigma_e^2 = \text{Var}(Z(x)) + \sum_i \sum_j \lambda_i \cdot \lambda_j \cdot \text{Cov}(Z(x_i), Z(x_j)) - 2 \sum_i \lambda_i \text{Cov}(Z(x_i), Z(x)) \quad (\text{II.23})$$

Qui peut être réécrit en fonction du variogramme :

$$\sigma_e^2 = (\sigma^2 - \bar{\gamma}(x, x)) + \sum_i \sum_j \lambda_i \cdot \lambda_j (\sigma^2 - \gamma(x_i - x_j)) - \sum_i \lambda_i (\sigma^2 - \bar{\gamma}(x_i, x)) \quad (\text{II.24})$$

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

$$\sigma_e^2 = 2 \sum_i \lambda_i \bar{\gamma}(x_i, x) - \bar{\gamma}(x, x) - \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) \quad (\text{II.25})$$

Comme on vient de voir, on peut calculer la variance d'estimation soit en utilisant le covariogramme (II.23), soit le variogramme (II.24)

Rappelons que pour avoir la meilleure estimation, on doit avoir la plus petite variance d'estimation possible ; c'est-à-dire qu'on doit minimiser σ_e^2 :

$$\sigma_e^2 = \text{Var}[Z - Z^*] = \text{Var}[Z] + \text{Var}[Z^*] - 2\text{Cov}[Z, Z^*] \quad (\text{II.26})$$

Rappelons que, ce qui nous intéresse ici est de calculer les poids λ_i qui sont les inconnues. Pour minimiser la variance d'estimation on doit calculer les dérivées partielles $\frac{d\sigma_e^2}{d\lambda_i}$ qui doivent être égale à zéro :

$$\frac{d\sigma_e^2}{d\lambda_i} = 0, \quad i = 1 \dots n \quad (\text{II.27})$$

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

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

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (\text{II.28})$$

En effet, dans ce cas, on a :

$$E[Z^*] = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot E[Z_i] = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot m = m \quad (\text{II.29})$$

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

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_e^2}{d\lambda_i} = 0, & i=1 \dots n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Pour équilibrer le système nous devons introduire une nouvelle inconnue sous forme du multiplicateur de Lagrange μ et on forme le Lagrangien qui doit être minimisé pour trouver les n inconnues :

$$\begin{aligned} L(\lambda) &= \sigma_e^2 + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \\ &= \text{Var}[Z_v] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{Cov}[Z_i, Z_j] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \text{Cov}[Z_v, Z_i] + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

Où μ est le multiplicateur de Lagrange.

Le minimum est atteint lorsque toutes les dérivées partielles par rapport à chacun des λ_i et par rapport à μ s'annulent. Ceci conduit au système de krigeage ordinaire [7], [12].

II.5.1. Krigeage ordinaire : (ou à moyenne inconnue) [15]

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

$$\begin{cases} \sum_j^n \lambda_j \text{Cov}[Z_i, Z_j] + \mu = \text{Cov}[Z_i, Z_j] & \forall i = 1 \dots n \\ \sum_j^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

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

$$\sigma_k^2 = \sigma_e^2 = \text{Var}[Z_v] - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \text{Cov}[Z_v, Z_i] - \mu \quad (\text{II.33})$$

Comme la variance d'estimation s'écrit aussi en termes de variogramme, on peut aussi réécrire le système de krigeage en fonction du variogramme. Ceci tient au fait que

$$C(h) = \sigma^2 - \gamma(h) \text{ et que } \sum \lambda_i = 1.$$

$$\begin{cases} \sum_j^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - \mu = \bar{\gamma}(v, x_i) & \forall i = 1 \dots n \\ \sum_j^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Et, alors

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(v, x_i) - \bar{\gamma}(v, v) - \mu \quad (\text{II.35})$$

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

$$\begin{aligned} K \cdot \lambda &= k \\ \sigma_k^2 &= \sigma_k^2 - \lambda \cdot k \end{aligned} \quad (\text{II.36})$$

Où

$$K = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \text{Cov}(Z_1, Z_2) & \cdot & \text{Cov}(Z_1, Z_n) & 1 \\ \text{Cov}(Z_2, Z_1) & \sigma^2 & \cdot & \text{Cov}(Z_2, Z_n) & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \text{Cov}(Z_n, Z_1) & \text{Cov}(Z_n, Z_2) & \cdot & \sigma^2 & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

$$K = \begin{bmatrix} \text{Cov}(Z_1, Z_v) \\ \text{Cov}(Z_2, Z_v) \\ \cdot \\ \text{Cov}(Z_n, Z_v) \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \sigma_v^2 = \bar{C}(v, v) \quad (\text{II.38})$$

II.5.2. Propriétés du krigeage

Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont [10] :

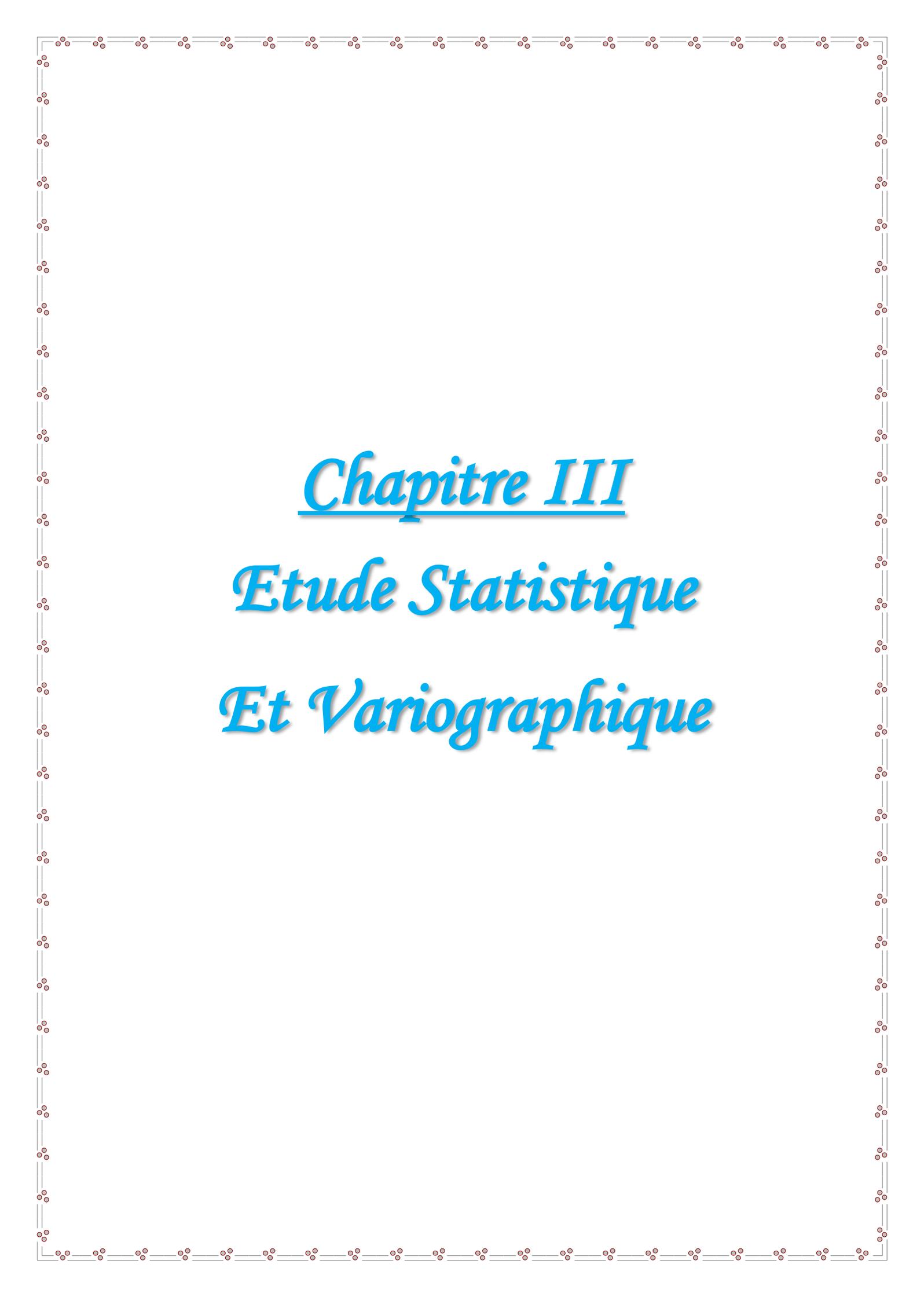
- Estimateur linéaire sans biais, à variance minimale, par construction ;
- Interpolateur exact : si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue ;
Présente un effet d'écran : les points les plus près reçoivent les poids les plus importants. Cet effet d'écran varie selon la configuration et selon le modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus l'effet de pépite est important, moins il y a d'effet d'écran ;
- Tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux ;
- Par l'utilisation du variogramme, tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépite, anisotropie, etc...) ;
- Effectue généralement un lissage, les estimations sont moins variables que les teneurs réelles (point ou bloc) que l'on cherche à estimer ;
- Presque sans biais conditionnel. Ceci signifie que lorsqu'on applique une teneur de coupure à des valeurs estimées, on récupérera approximativement la teneur prévue.
C'est une propriété très importante pour les mines. Cette propriété implique que l'estimateur utilisé soit plus lisse que la valeur qu'il cherche à estimer, ce qui est le cas pour le krigeage.

Conclusion

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

La géostatistique fournit un outil, Dans une étude géostatistique on se base sur le variogramme, permettant une analyse de la structure spatiale de la variable étudié. 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.



Chapitre III
Etude Statistique
Et Variographique

Chapitre III : Etude statistique et variographique

Introduction

Le recours à un modèle variographique est nécessaire pour pouvoir calculer ou plutôt estimer les variances d'estimation globale, et aussi pour pouvoir déterminer les poids de krigeage dans l'estimation locale. C'est ce **variogramme modélisé** (théorique) qui sera utilisé. L'étape d'estimation et de modélisation du variogramme à partir de l'ensemble des données disponibles est traditionnellement appelée analyse structurale ou analyse variographique [14].

Dans ce chapitre, nous commencerons par une exploration statistique des données disponibles sur le gisement de Bled El Hadba. La seconde partie sera consacrée à l'étude variographique de ces données.

III.1. Variables étudiées et champ d'étude :

Dans le but d'évaluer les réserves en phosphate du gisement de Bled El Hadba, nous avons pris comme variables régionalisées les teneurs en P_2O_5 et les épaisseurs des couches minéralisées.

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 m^2 (660.43 ha), totalisant une longueur de 8221.40 m. Les sondages les plus profonds sont le SPH02 et SPH18 (336 m), le sondage le plus court est le SPH45 (66 m).

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 antérieurs 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.

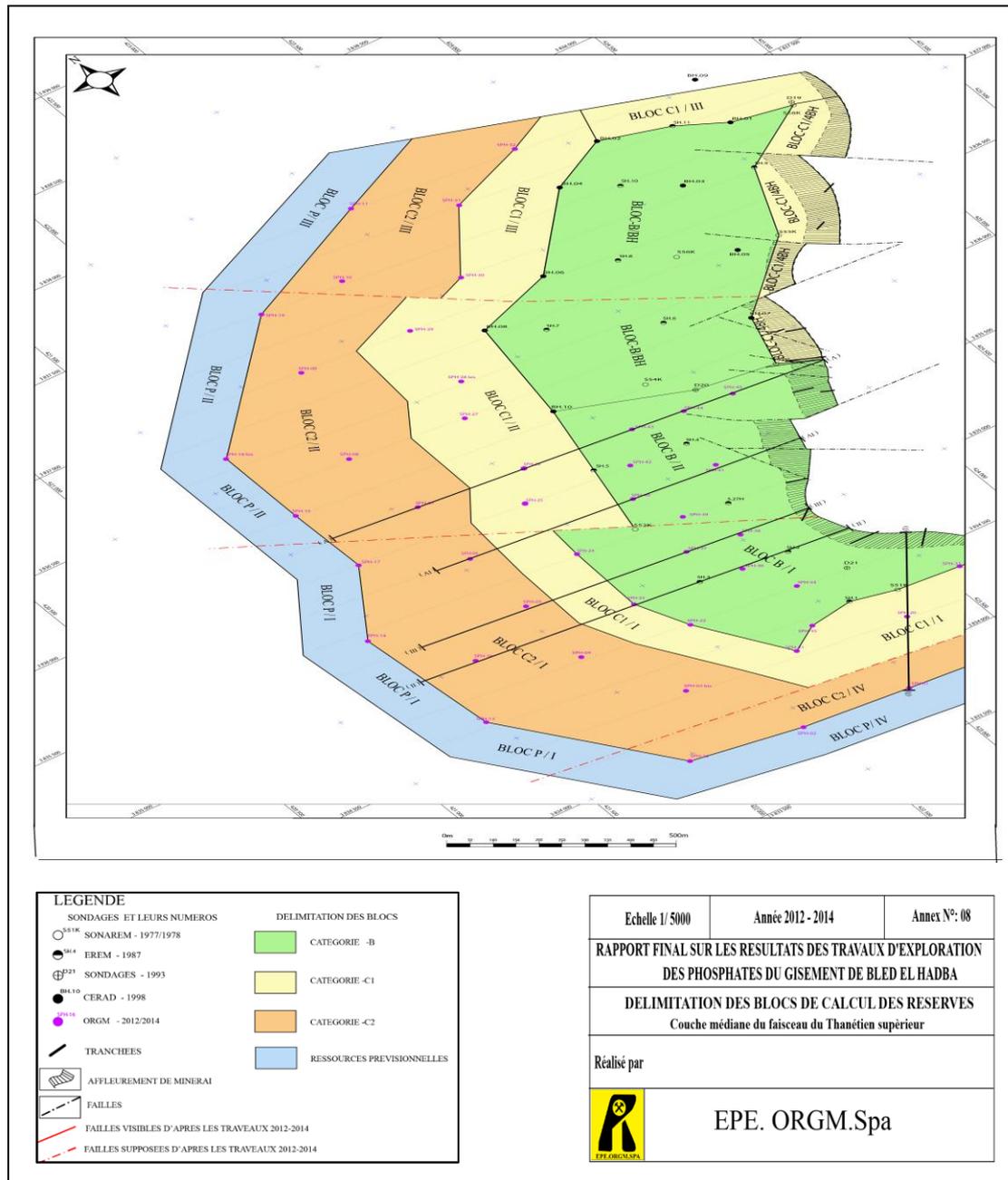


Figure III.1. Plan d’implantation des sondages des différentes campagnes de prospection [1].

Les sondages des campagnes de recherches antérieures qui sont pris en considération sont réparés 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 [7].

Il est à signaler que, pour notre étude, nous avons utilisé la norme (JORC/SOVIETIQUE) 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) [1].

Russian	International reporting code, JORC etc.
A, B	Proved reserve/ measured resource
C1	Proved or probable Reserve/ indicated resource
C2	Probable reserve/indicated resource/inferred resource
P1	Inferred resource
P2	Reconnaissance mineral resource (as found under UN Framework Classification for Reserves/ Resources, code 334
P3	No equivalent

Le calcul des réserves a été effectué pour l'ensemble des 61 sondages pour toutes les couches phosphatées de l'Yprésien, Thanétien supérieur (couche sommitale, médiane et basale) et du Thanétien inférieur.

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 de krigeage ordinaire.

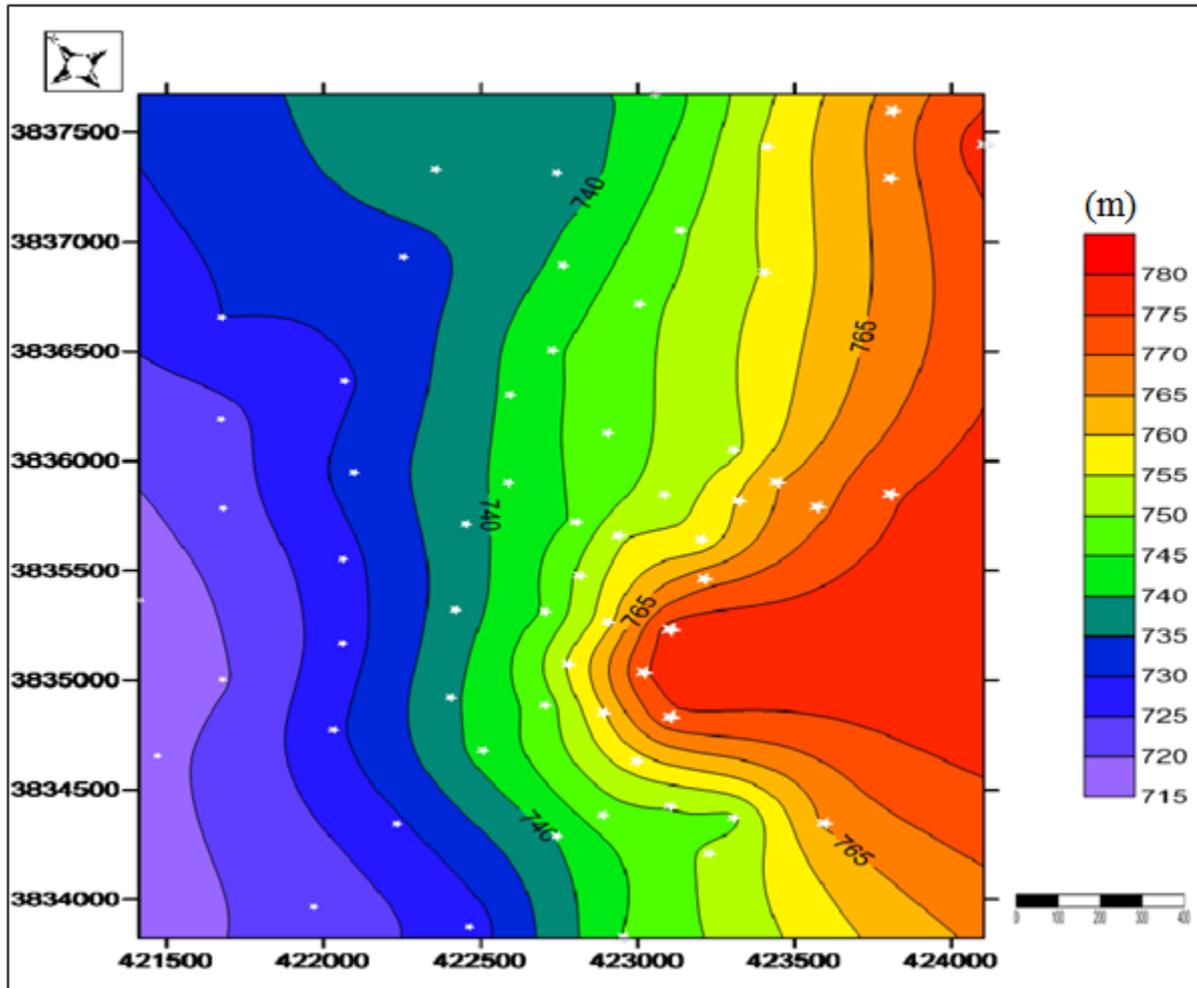


Figure III.2. Carte de positionnement des sondages.

III.2. Base de données numériques

Dans le cadre de ce travail, les calculs variographiques, leur 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, la figure III.3, représente les éléments essentiels pour la mise en place des données sous forme numérique. Le type de fichier a été enregistré en extension « .txt ».

7						
X						
Y						
E						
t,P205						
t,MgO						
t,CaO						
t,SiO2						
422951.71	3833827.00	17.60	27.68	1.66	46.14	4.13
422461.35	3833873.81	24.20	26.24	2.09	49.44	4.45
422228.67	3834344.45	20.70	26.75	2.52	37.30	3.81
422026.84	3834772.48	19.10	26.71	2.12	48.13	3.92
422054.66	3835168.99	15.40	24.56	3.09	44.74	4.35
422056.39	3835552.37	11.00	23.98	2.60	46.26	5.24
422092.35	3835947.81	25.40	24.51	3.21	44.53	3.43
422061.60	3836364.53	21.40	25.69	3.45	41.56	4.03
422249.86	3836929.51	26.50	27.90	2.44	47.57	3.25
422739.08	3837315.32	24.30	25.03	2.96	42.20	5.40
423052.38	3837675.40	19.50	24.52	3.88	45.88	4.34
421965.36	3833965.11	25.60	26.83	1.47	45.84	3.51
421466.37	3834654.08	20.60	24.16	2.11	45.95	3.86
421409.94	3835364.06	17.30	21.29	5.32	40.08	3.99
421670.24	3836192.53	21.20	25.13	2.82	47.85	4.07
421675.60	3835002.70	14.00	25.84	2.27	44.92	5.10
421677.01	3835784.28	23.30	26.67	2.53	47.10	3.85
421672.36	3836657.11	29.75	25.91	3.03	43.72	2.84
422351.03	3837331.72	24.30	25.95	3.46	47.11	3.48
423224.60	3834207.85	13.60	25.00	1.77	44.00	4.27
422737.86	3834289.41	19.50	25.37	2.16	47.54	3.72
422501.59	3834679.15	15.90	27.60	2.46	44.61	4.36
422400.56	3834921.38	15.90	26.72	2.61	44.05	4.72
422415.54	3835322.04	18.90	26.26	2.65	44.83	4.14
422450.36	3835712.27	24.10	24.42	3.67	46.06	3.51
422584.49	3835899.77	20.80	24.57	3.70	43.76	3.62
422589.90	3836303.01	26.10	24.21	3.73	46.59	3.59
422724.39	3836505.44	23.40	24.36	4.17	45.19	3.78
422759.38	3836893.31	23.90	25.85	3.73	42.33	2.49
423130.39	3837051.34	24.00	26.84	1.48	48.54	2.03
423408.19	3837435.16	27.00	26.06	2.95	47.47	2.93
423807.66	3837597.77	18.00	21.56	1.67	48.56	3.86
423590.20	3834346.74	12.00	25.29	3.58	40.23	3.80
422991.14	3834631.18	14.00	25.72	2.89	47.74	3.16
422885.51	3834385.32	22.70	26.80	2.35	47.79	4.99
422886.56	3834851.87	19.20	21.73	5.09	42.11	3.84
422775.40	3835073.74	14.70	21.25	4.88	41.46	2.80
423014.68	3835035.47	16.00	22.69	4.75	41.67	2.82
422901.07	3835265.63	17.70	18.68	5.73	40.28	2.65
422811.21	3835477.64	15.70	19.95	5.72	39.22	3.50
423208.67	3835461.40	5.70	26.00	2.90	40.90	3.06
422935.89	3835661.21	20.10	22.40	5.91	42.36	3.65

Figure III.3. Fichier représentatif de la forme de la base des données, préparé pour l'analyse.

III.3. Etude statistique

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

À partir des données récoltées lors d'un sondage, il est intéressant d'avoir, dans un premier temps, une idée sommaire de la manière dont les données sont distribuées. En effet, l'étude de l'homogénéité statistique de la variable de travail est nécessaire afin de faire une synthèse sur la qualité de l'information et de sa représentativité vis-à-vis du site étudié [15].

III.3.1. Notions de statistique

Une pratique souvent utilisée pour la représentation des ensembles de données est la table de fréquences et en particulier le graphe qui lui correspond : l'histogramme.

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

- **La moyenne, le mode et la médiane** : ces trois variables donnent une idée sur la localisation du centre de la distribution.
- **La variance, l'écart-type et ainsi l'écart interquartile** : ceux-ci décrivent la variabilité des valeurs des données [15].

III.4. Statistique descriptive et histogramme

Beaucoup de variables dans les ensembles des données des Sciences de la Terre (teneurs) ont des distributions qui ne sont pas proche de la normale. Il est commun de rencontrer de nombreuses valeurs assez petites et quelques-unes très grandes.

La distribution normale est souvent inappropriée comme modèle pour ce type de distribution asymétrique, une distribution log normale peut parfois être une bonne alternative.

Une variable aléatoire (x) suit une loi log-normale quand son logarithme suit une loi normale. Comme dans le tracé de probabilité normale, les fréquences cumulées représenteront une ligne droite si les valeurs données ont une distribution log-normale [15].

Dans ce qui suit, nous représentons une étude statistique et variographique détaillée de la couche médiane ; qui possède de meilleures caractéristiques d'exploitation (E_p , t) ; et nous avons regroupé en (Annexe I) les histogrammes et variogrammes que nous avons réalisés pour les couche restantes.

III.4.1. Couche médiane

III.4.1.1. Epaisseurs

L'analyse statistique des données de terrain fournées à la phase d'exploration montre que la couche médiane présente l'épaisseur la plus importante par comparaison aux autres couches ; où elle peut atteindre jusqu'à 29.75 m, avec une moyenne de 18.51 m.

Les trois quarts des épaisseurs sont inférieurs à 22.7 m, l'épaisseur minimale est de 5.7 m, avec une variance de 30.22 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 :

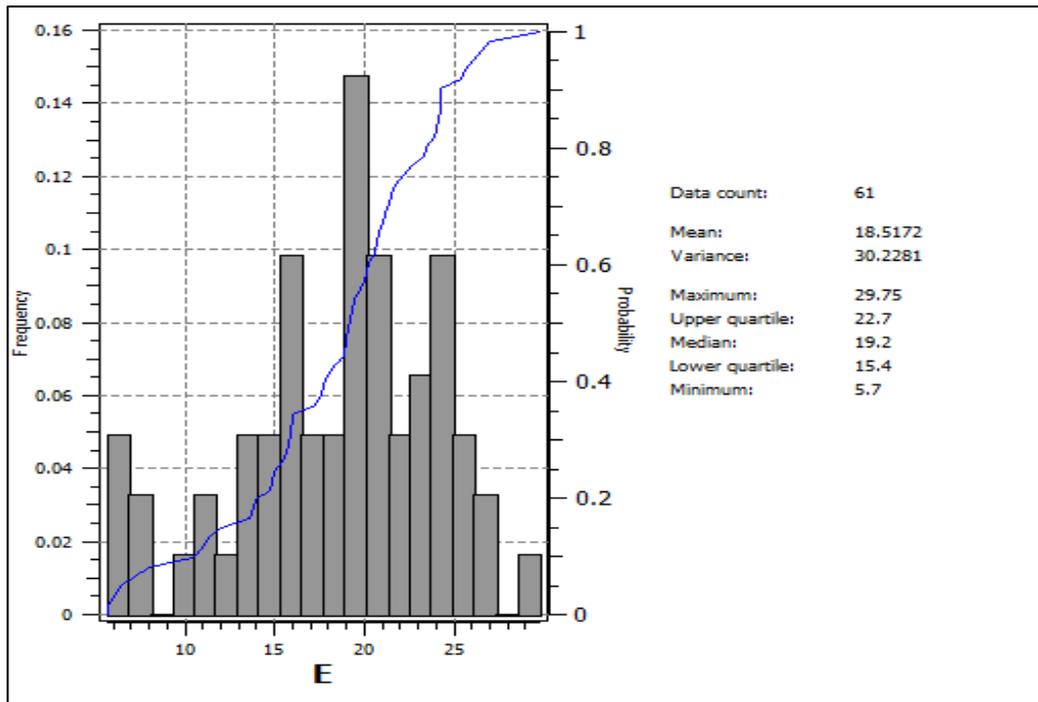


Figure III.4. Histogramme des épaisseurs de la couche médiane.

III.4.1.2. La teneur

La teneur moyenne en P_2O_5 des sondages est de 24.67 %, avec un maximum de 27.9 % et un minimum de 18.68 %. La variance est de 4.04 ce qui traduit l'homogénéité de la distribution des teneurs dans cette couche.

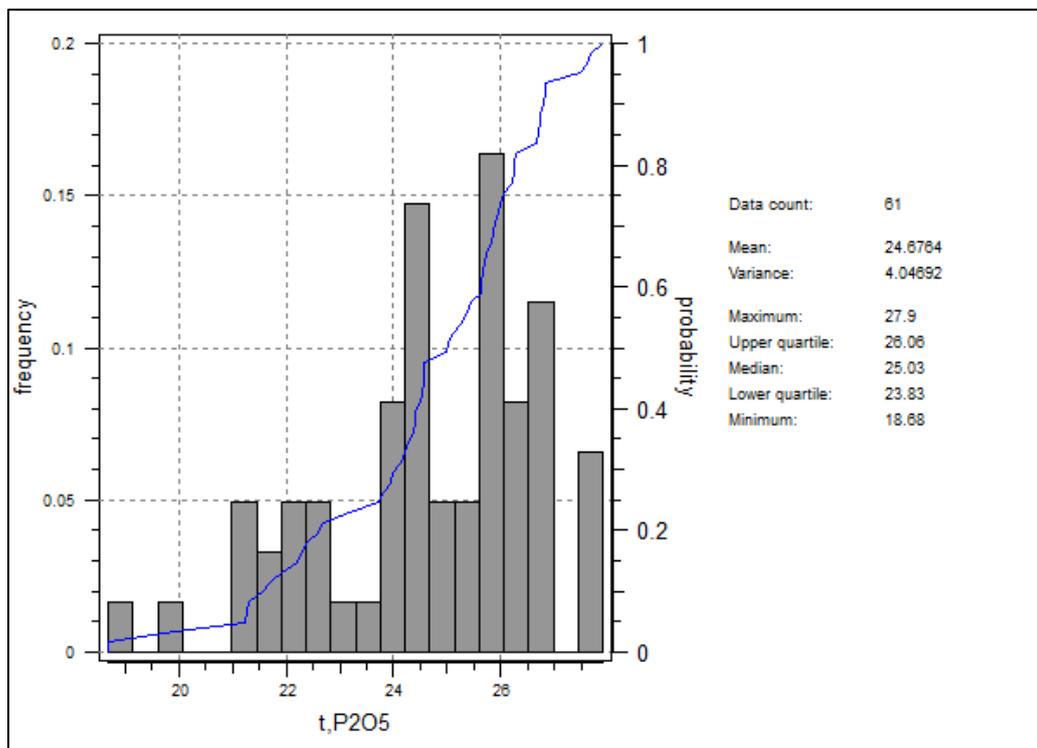


Figure III.5. Histogramme des teneurs de la couche médiane.

Les paramètres statistiques de distribution des épaisseurs et des teneurs ont été calculés aussi pour les autres couches phosphatées. Les résultats obtenus sont représentés dans le (Tableau III.2) ci-dessous, et les histogrammes correspondants sont donnés en (Annexe I).

Tableau III.2. Les paramètres statistiques de distribution des épaisseurs et des teneurs.

La couche	variables	N° de Sondages	Moyenne	Médiane	Variance	Max	Min
Yprésien	Ep (m)	40	7.75	7.6	7.02	14	3
	t.P ₂ O ₅ (%)	40	17.61	17.97	4.7	21.86	11.88
	t. MgO (%)	40	6.24	5.85	1.83	9.71	3.72
	t.CaO (%)	40	38.02	38.3	4.84	42.81	31
	t.SiO ₂ (%)	40	11.29	11.48	14.48	20.58	0.45
Sommitale	Ep (m)	60	6.06	6	5.5	18	2.3
	t.P ₂ O ₅ (%)	60	17.78	17.67	2.35	22.32	12.5
	t. MgO (%)	56	6.9	6.74	1.35	10.8	4.78
	t.CaO (%)	55	39.97	40.45	7.43	48.75	33.75
	t.SiO ₂ (%)	53	6.06	6.07	4.15	11.24	1.64
Basale	Ep (m)	61	6.73	5.6	10.31	18	2.4
	t.P ₂ O ₅ (%)	61	19.37	19.58	6.25	23.52	12.16
	t. MgO (%)	57	7.17	7.15	2.29	11.42	3.75
	t.CaO (%)	56	41.47	41.93	5.96	47.37	35.56
	t.SiO ₂ (%)	54	4.12	3.79	4.12	11.17	0.34
Thanétien inférieur	Ep (m)	37	4.12	3.9	0.71	5.9	2.2
	t.P ₂ O ₅ (%)	37	22.26	22.7	7.01	26.79	15.51
	t. MgO (%)	37	3.26	3.19	0.7	5.38	2.03
	t.CaO (%)	37	40.26	40.27	10.14	46.5	30.3
	t.SiO ₂ (%)	37	11.88	11.48	12.75	20.9	4.11

Remarque :

D'après l'analyse des courbes de fréquences (épaisseurs, teneurs) des différentes couches minéralisées, on constate que les distributions possèdent quelques valeurs nulles qui par la suite ne peuvent se rapprocher ni de la loi log-normale, ni de la loi normale. Ce qui nous pousse à rechercher d'autres méthodes d'ajustement.

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 [18].

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 [19].

Dans ce travail, nous serons dans ce cas ; les sondages de mesures sont irrégulièrement répartis sur le champ.

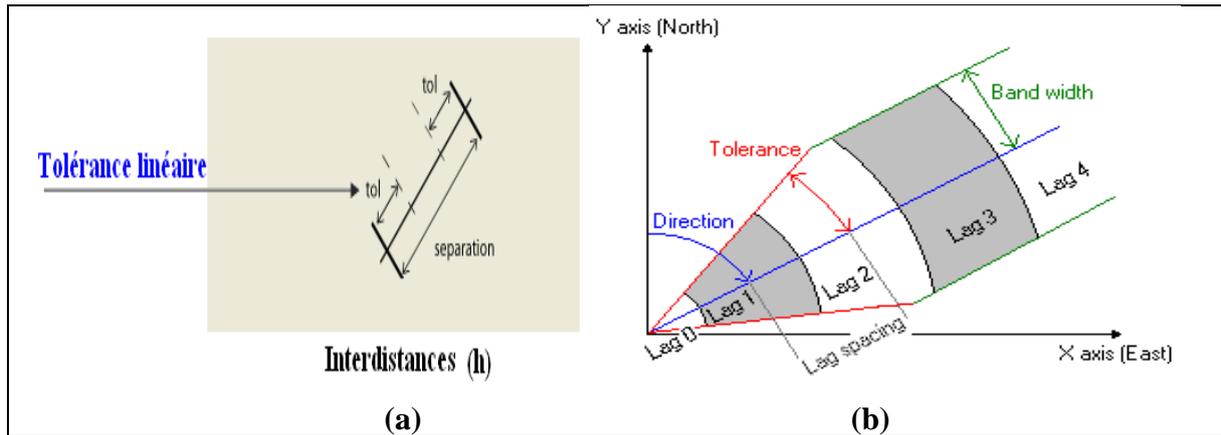


Figure III.6. Tolérance linéaire (a) et angulaire (b) [12].

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. Une modélisation maladroite de ces paramètres peut conduire à des artefacts sans relation avec le phénomène régionalisé, et avoir des conséquences fâcheuses dans la modélisation et sur les résultats ultérieurs [14].

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

Tableau.III.3. Paramètres pour le calcul des variogrammes.

<i>Interdistances</i>				
<i>Nombre de lag</i>	<i>Interdistances h</i>		<i>Tolérance linéaire (m)</i>	
500	10		5	
<i>Directions</i>				
<i>Nombre de directions</i>				
5				
<i>N°</i>	<i>Azimut (°)</i>	<i>Pendage (°)</i>	<i>Tolérance angulaire (°)</i>	<i>Largeur de bande (m)</i>
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

III.5.3. Modélisation du variogramme

Une fois le variogramme expérimental calculé, l'étape suivante consiste à modéliser ce variogramme à l'aide des modèles connus afin de pouvoir lui appliquer le krigeage.

La représentation d'une variable régionalisée par un variogramme est une opération subjective ; il n'existe pas de 'vrai' modèle sous-jacent. En pratique, il convient de s'assurer que le modèle respecte les principales caractéristiques du variogramme expérimental (comportement à l'origine, existence ou non d'un palier, anisotropie) et qu'il ne soit pas inutilement complexe [14].

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 (ex. un effet de pépité, une structure sphérique et une structure exponentielle) et la présence possible d'anisotropie dans le modèle. Ensuite, les paramètres du modèle (effet de pépité, palier et portée) sont estimés.

Concernant la modélisation de notre structure, nous avons opté deux modèles de variogrammes : le modèle sphérique et le modèle exponentiel.

III.6. Etude variographique des données

Nous allons présenter et déterminer les paramètres essentiels des variogrammes expérimentaux. Dans un premier lieu, on va présenter les variogrammes expérimentaux (nuages des points) des épaisseurs et des teneurs en P_2O_5 des couches minéralisées (couche médiane), puis on va aborder l'étude variographique des épaisseurs et teneurs des différentes couches minéralisées afin de caractériser la continuité spatiale des variables régionalisées.

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

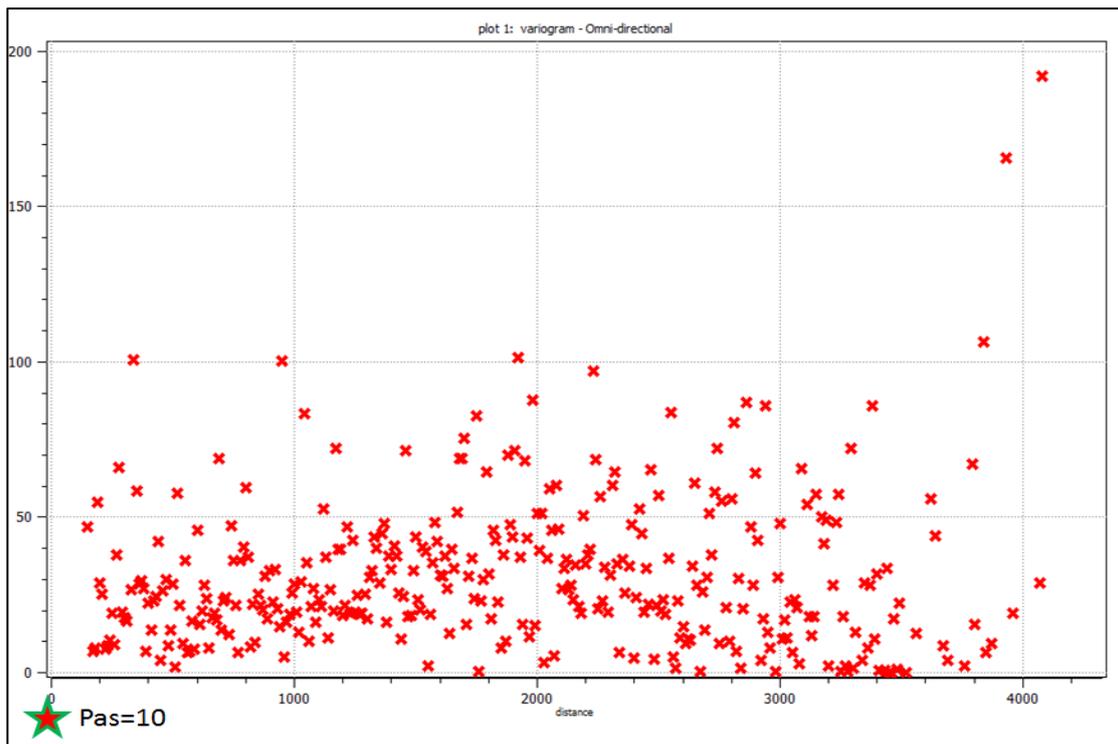


Figure III.7. La nuée variographique des épaisseurs (Première étape de modélisation des variogrammes).

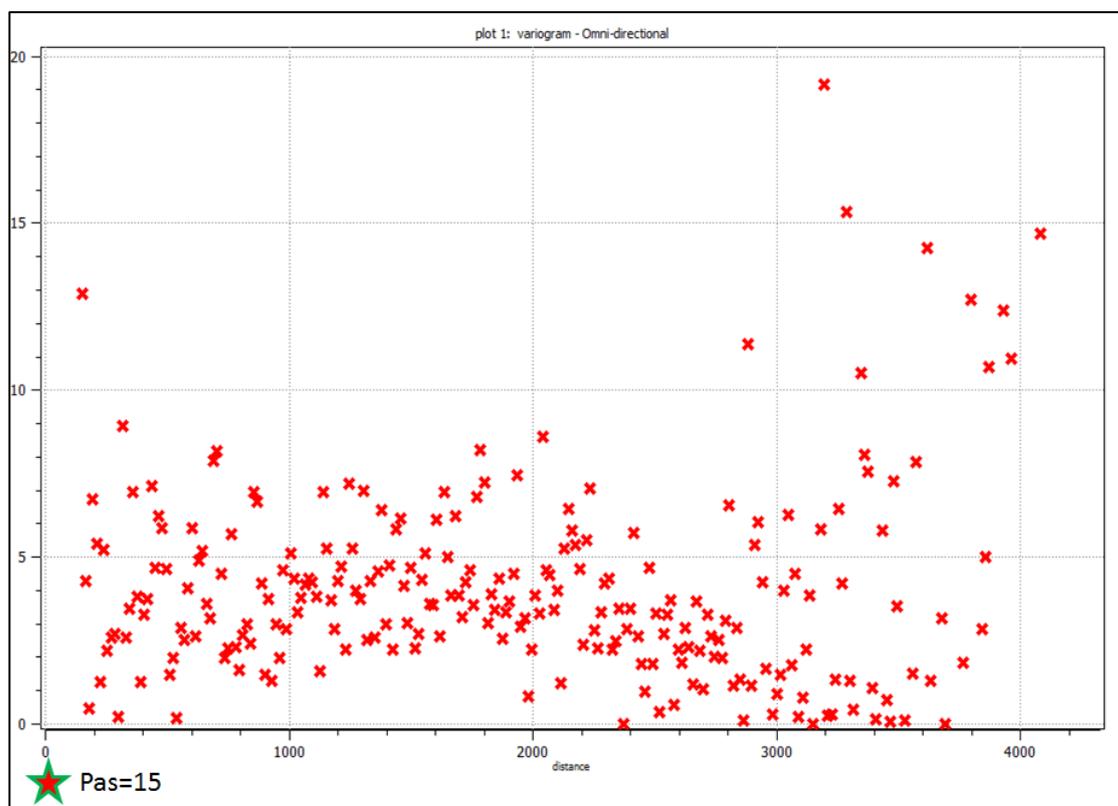


Figure III.8. La nuée variographique des teneurs (Première étape de modélisation des variogrammes).

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 20 paires (DAVID, 1977 ; ISOBEL, 1979 ; JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978...).

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 [12].

Les figures précédentes présentent ce qu'on appelle une nuée variographique, c'est un outil d'analyse extrêmement précieux, à la base d'une « géostatistique exploratoire », mais elle apporte peu d'information structurale synthétique, il reste difficile à modéliser sans hypothèses solides. On souhaite donc disposer d'une fonction structurale plus globale, qui puisse exprimer l'évolution de l'écart-quadratique entre deux échantillons en fonction de la distance entre eux [15].

III.6.1. Les variogrammes des épaisseurs

III.6.1.1. Etude variographique de la couche médiane

Dans un premier temps, nous présentons les variogrammes expérimentaux calculés suivant les principales directions (quatre) dans un plan, afin de pouvoir bien estimer les paramètres des variogrammes des épaisseurs. La figure III.9, regroupe les variogrammes expérimentaux suivant les différentes directions (0°, 45°, 90°, 135° et omnidirectionnel).

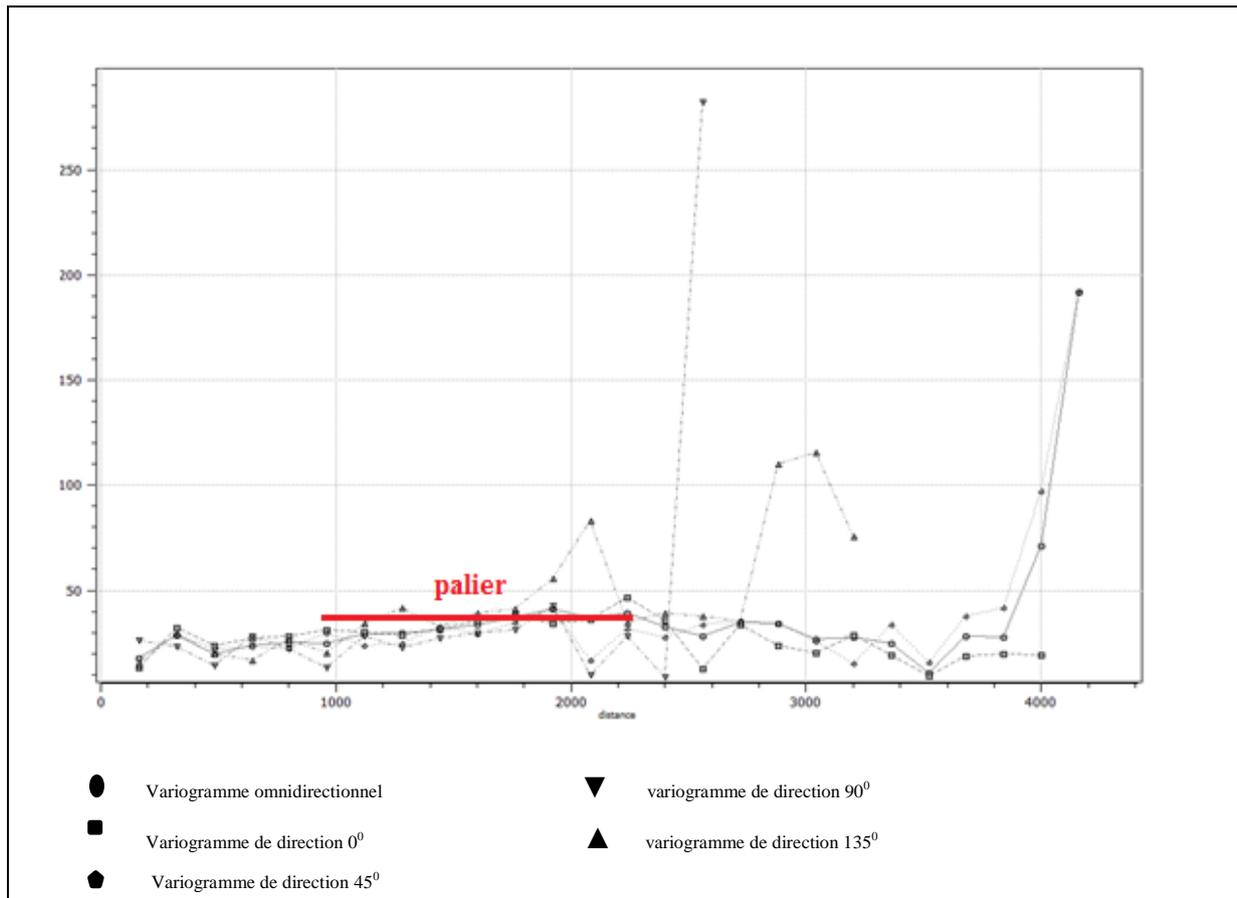


Figure III.9. Ensembles des variogrammes directionnels et omnidirectionnels des épaisseurs.

a) Variogrammes directionnels

Les résultats de la modélisation des valeurs des épaisseurs de la couche médiane calculés à partir du logiciel S-GeMS sont illustrés par (figures III.10) et (figure III.11) suivantes :

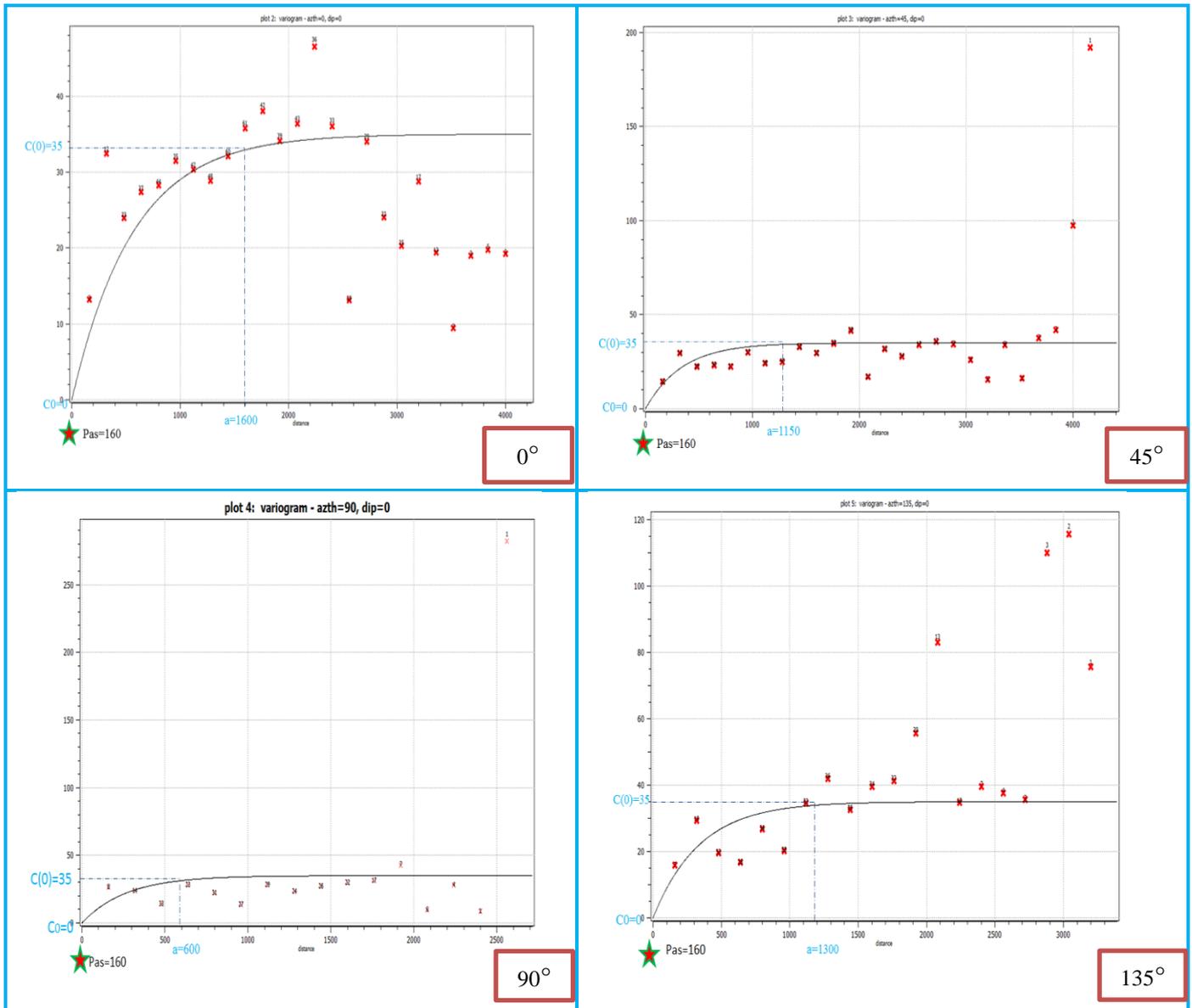


Figure III.10. Ensembles des variogrammes directionnels des épaisseurs avec l’ajustement des modèles expérimentaux.

Ces variogrammes sont calculés dans les quatre directions principales du plan (0°, 45°, 90°, 135°) considérées par rapport à l’axe azimutal.

b) Variogramme omnidirectionnel :

Le variogramme omnidirectionnel des épaisseurs dans le plan de la couche médiane a été construit et ajusté par un modèle exponentiel.

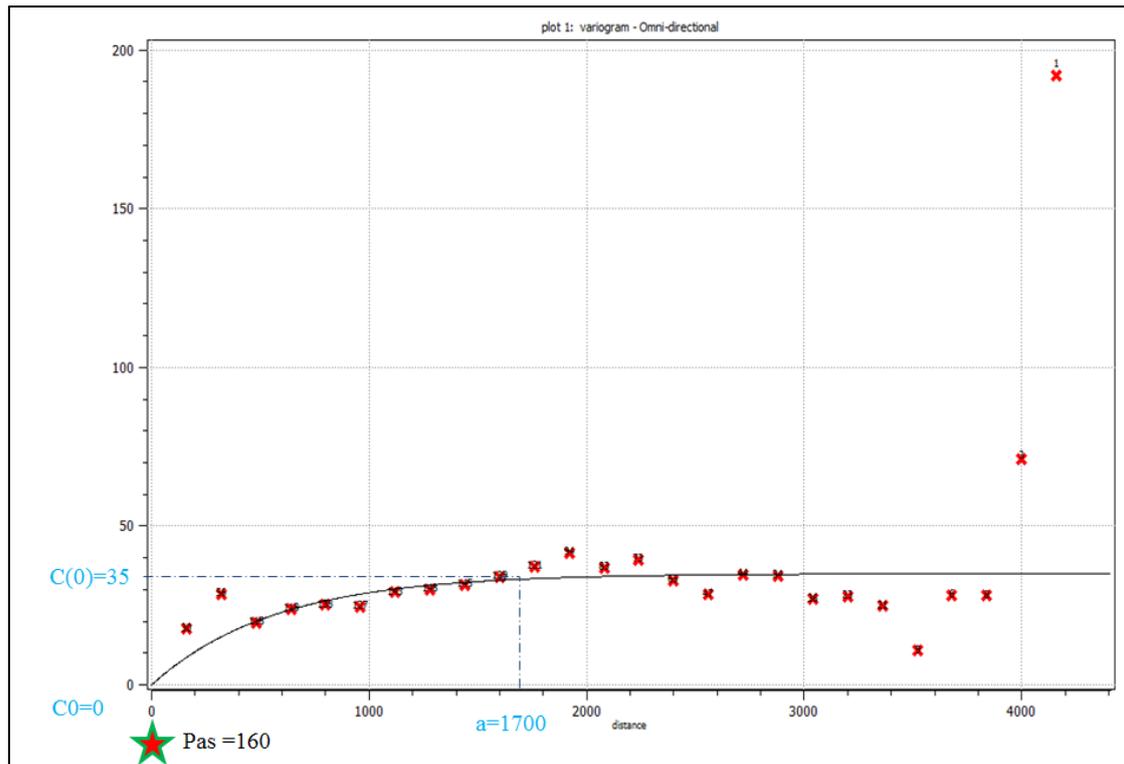


Figure III.11. Graphe du variogramme omnidirectionnel des épaisseurs et son ajustement.

Remarque :

Les chiffres sur les points représentent le nombre de paires d'échantillons utilisés pour le calcul du point en question.

Les résultats de modélisation indiquent que le modèle exponentiel exprime mieux la continuité typique des épaisseurs.

Ces modèles de variogrammes montrent un effet de pépite de 0 et un palier de 35.

c) Etude d'anisotropie

Certains phénomènes environnementaux ou géologiques présentent des directions de continuité privilégiées. Lorsque c'est le cas, on calcule le variogramme expérimental selon des directions.

Sur les figures III.10 et III.11, on observe que les portées diffèrent selon les directions de calcul, mais le palier reste identique ($C = 35$), ce qui explique la présence d'anisotropie géométrique. Une portée maximale $a = 1700$ m est apparue dans le variogramme omnidirectionnel par rapport à l'axe azimutal. La portée minimale est observée dans le variogramme de direction 90° .

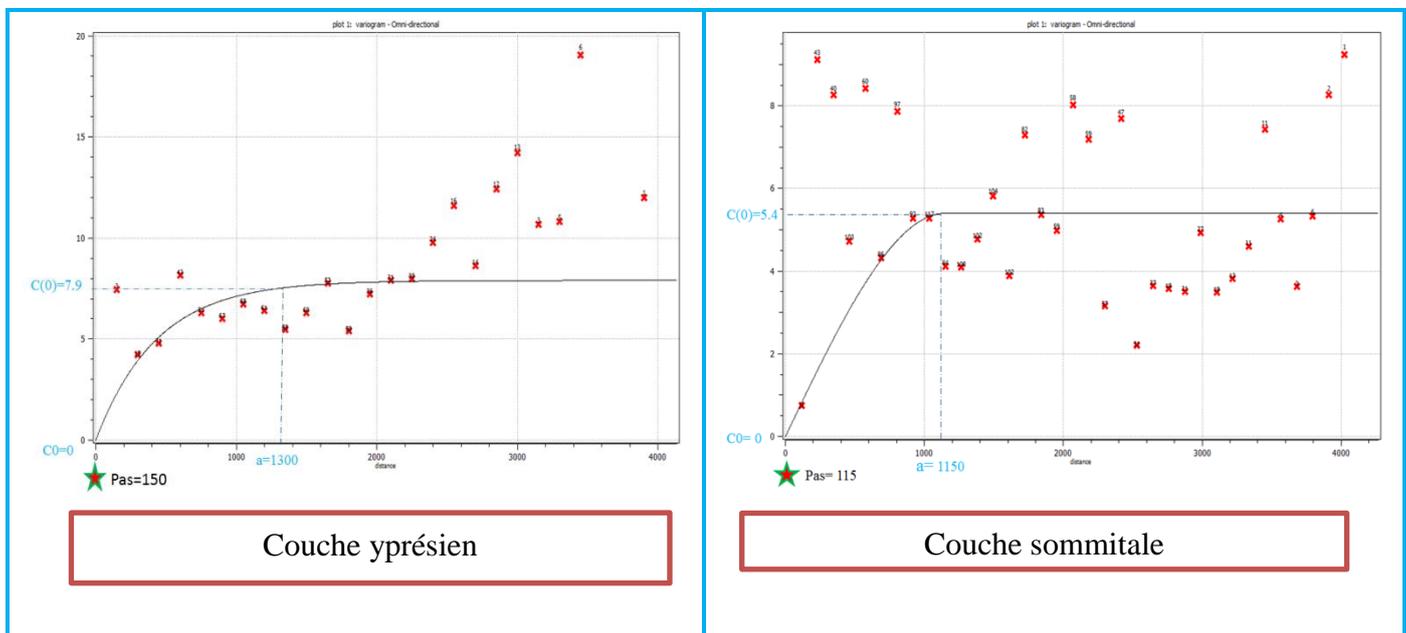
Tableau III.4. Directions d'anisotropie des variogrammes des épaisseurs.

Direction (°)	Portée (m)	Palier (seuil)	Effet de pépite
omni directionnel	1700	35	0
0°	1600	35	0
45°	1150	35	0
90°	600	35	0
135°	1300	35	0

III.6.1.2. Etude variographique des couches : yprésien, sommitale, basale et thanétien inférieur

a) Variogrammes omnidirectionnels

Les variogrammes omnidirectionnels des épaisseurs dans le plan de ces différentes couches ont été construits et ajustés par : un modèle exponentiel (couche yprésien) et un modèle sphérique (couche : sommitale, basale et thanétien inférieur), les paramètres relevant de ces variogrammes sont présentés dans le tableau III.5 :



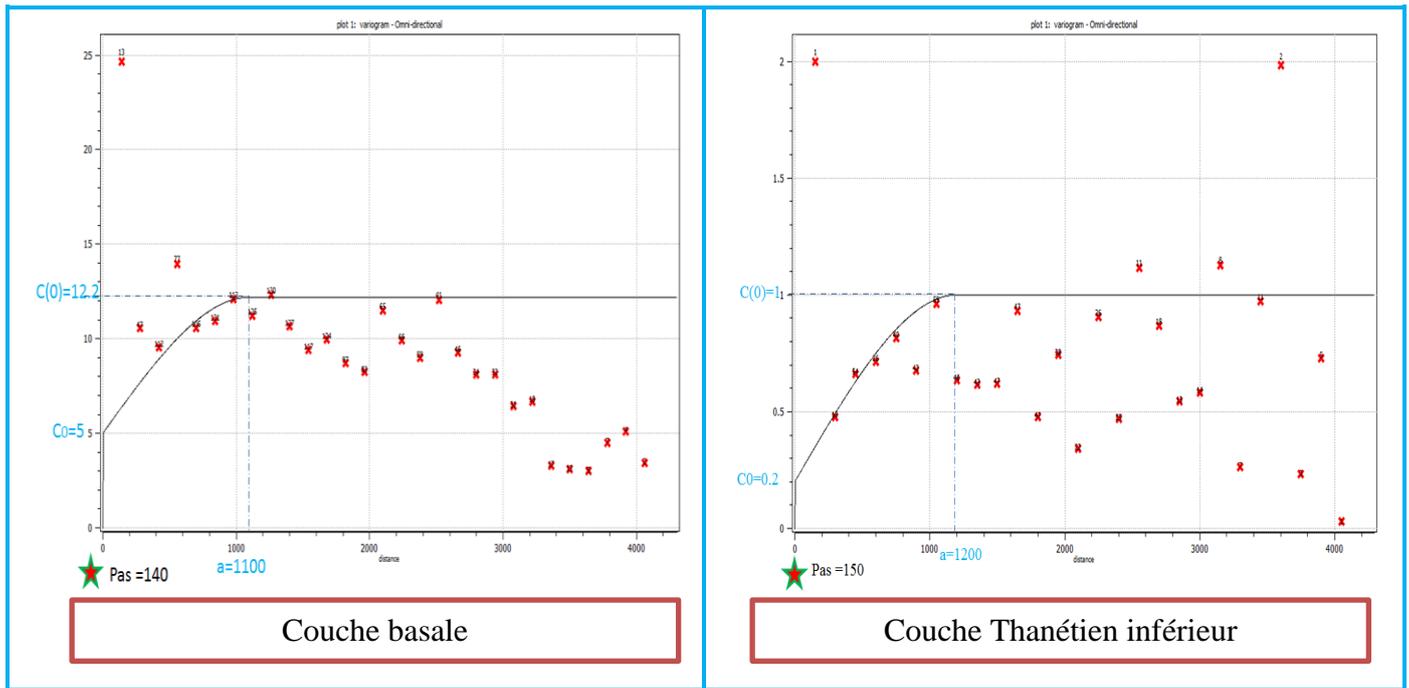


Figure III.12. Variogrammes omnidirectionnels des différentes couches phosphatées.

Le choix de variogramme omnidirectionnel est basé sur la différence entre le nombre des paires ($N(h)$) entrant dans le calcul des $\gamma(h)$.

A l'analyse, les variogrammes des épaisseurs des couches Basale et Thanétien inférieur présentent des discontinuités à l'origine ($C_0 = 5$, $C_0 = 0.2$ respectivement), cela signifie que la corrélation est imparfaite entre les valeurs prises en deux points de mesure distincts.

L'effet de pépité observé sur le variogramme omnidirectionnel de la couche basale correspond très probablement à l'erreur de mesure dont la valeur a été estimée plus haute.

L'absence de l'effet de pépité dans les variogrammes omnidirectionnels des couches Yprésienne et Sommitale indique qu'il existe une certaine corrélation entre les données.

L'analyse de ces variogrammes a consisté à décrire les comportements à l'origine et les comportements aux grandes distances.

Cette analyse a abouti à la détermination des paramètres intrinsèques du variogramme qui sont : effet de pépité (C_0), portée (a), palier ($C + C_0$).

Tableau III.5. Paramètres intrinsèques des variogrammes des épaisseurs.

La couche phosphatée	Variable	Pas (h) (m)	Tolérance (°)	Effet de pépité	Palier	Portée (m)	Variogramme ajusté
Yprésien	Epaisseur (m)	150	75	0	7.9	1300	exponentiel
Sommitale	Epaisseur (m)	115	57.5	0	5.4	1150	sphérique
Médiane	Epaisseur (m)	160	80	0	35	1700	exponentiel
Basale	Epaisseur (m)	140	70	5	12.2	1100	sphérique
Thanétien Inférieur	Epaisseur (m)	150	75	0.2	1	1200	sphérique

Les modèles les plus couramment utilisés (et ceux utilisés pour cette étude) sont le modèle sphérique et exponentiel définies de la manière suivante :

Le modèle sphérique :

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

Le modèle exponentiel :

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

D’où en remplaçant les paramètres :

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 + 35 \left(\frac{3h}{2 \cdot 1700} - \frac{h^3}{2 \cdot 1700^3} \right) & \dots\dots\dots 0 \leq h \leq 1700 \\ 35 + 0 \dots\dots\dots h > 1700 \end{cases}$$

III.6.2. Etude variographique des teneurs

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

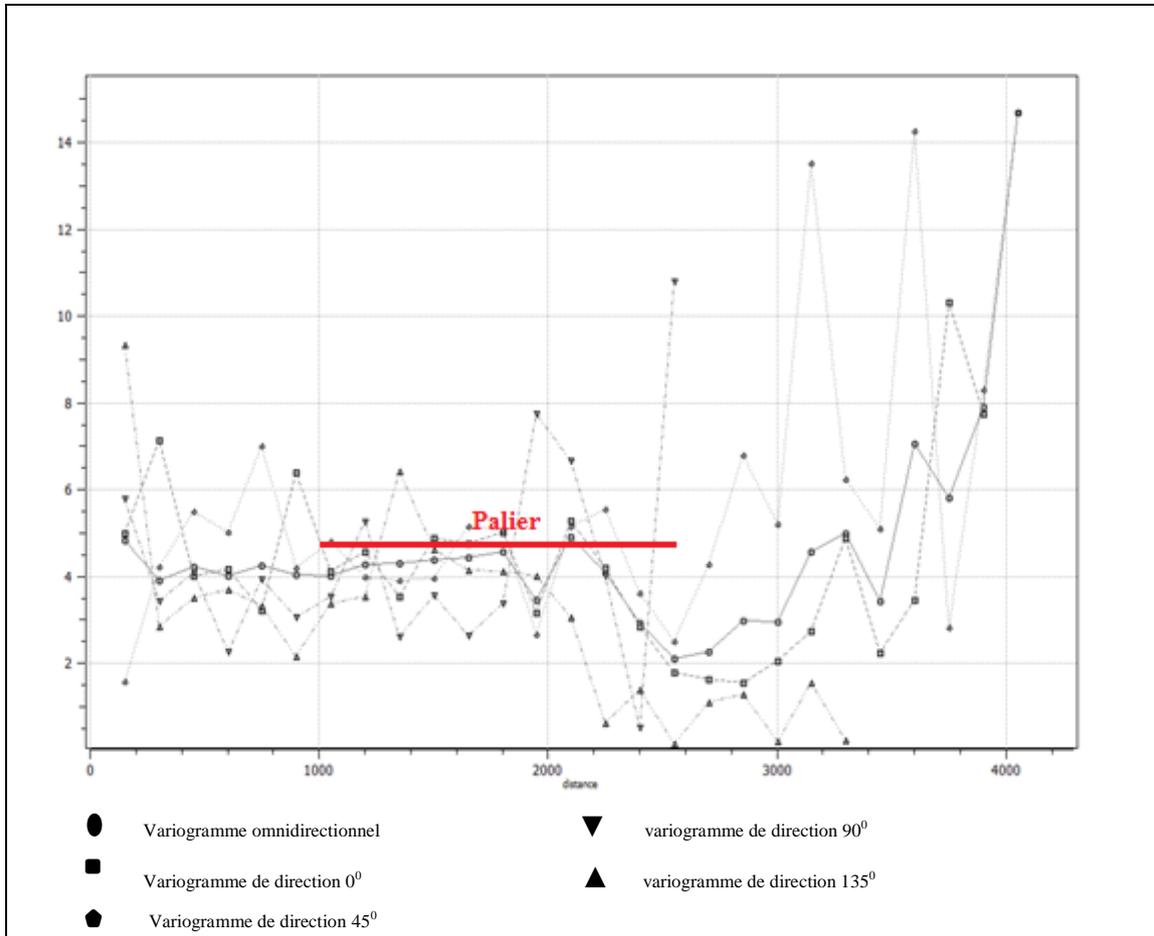


Figure III.13. Ensembles des variogrammes directionnels et omnidirectionnels des teneurs.

III.6.2.1 Etude variographique de la couche médiane

a) Variogrammes directionnels

La figure III.14 suivante, 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 pépite de 0.5 et un palier de 4.7.

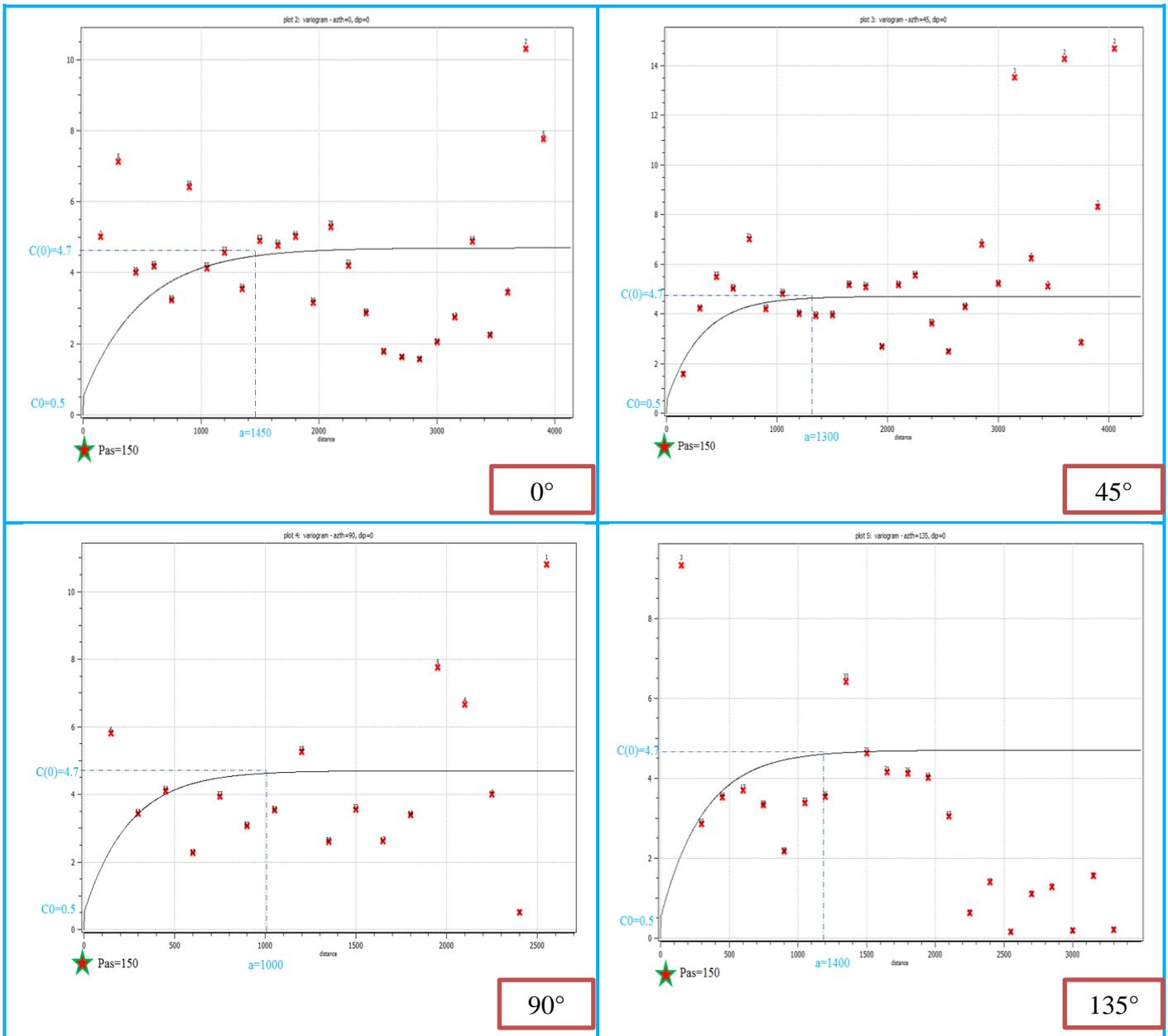


Figure III.14. Ensembles des variogrammes directionnels des teneurs de la couche médiane, avec l’ajustement des modèles expérimentaux.

b) Variogramme omnidirectionnel

Le variogramme omnidirectionnel des teneurs en P_2O_5 dans le plan de la couche médiane a été construit et ajusté par un modèle exponentiel de portée $a = 1500$ m, d’un effet de pépite $C_0 = 0.5$ et d’un palier $C = 4.7$.

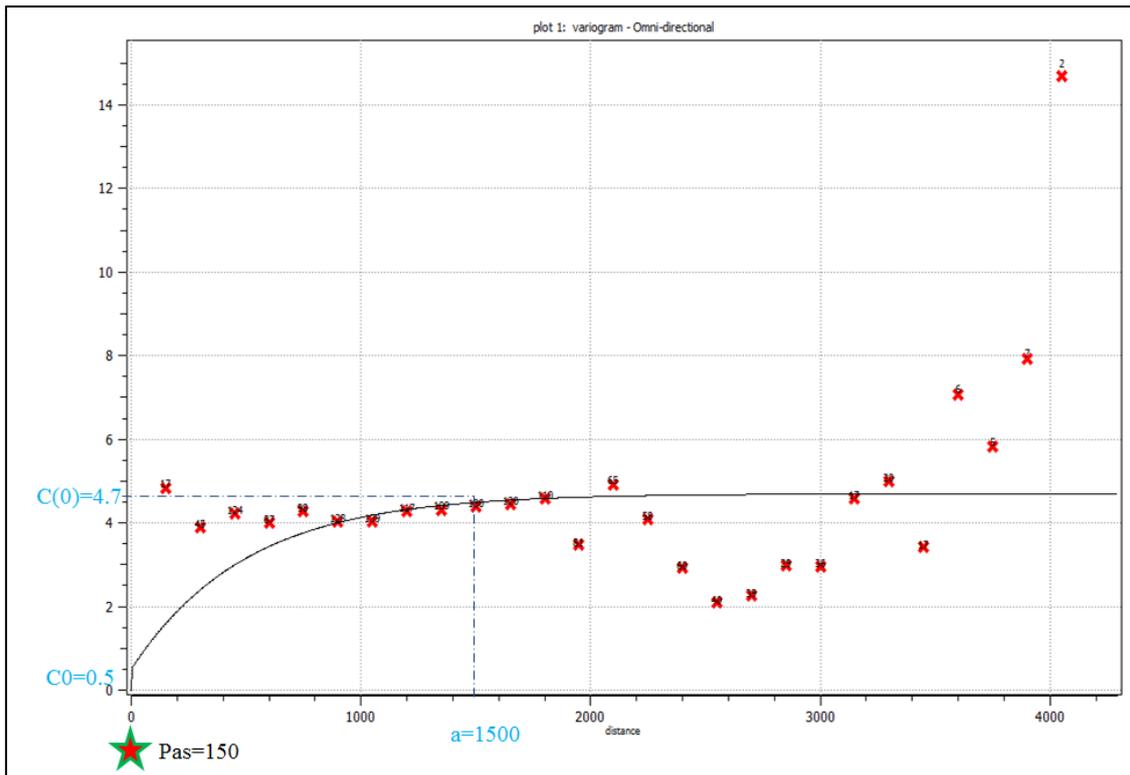


Figure III.15. Variogramme omnidirectionnel de la couche médiane.

Remarque :

Il ressort de ces résultats que, les variogrammes sont anisotrope. En effet, pour un même palier ($C = 4.7$) ; on observe des différentes portées pour les différentes directions du plan, ce qui traduit 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 90° dont la portée est de 1000 m.

Tableau III.6. Directions d'anisotropie des variogrammes des teneurs.

Direction ($^\circ$)	Portée (m)	Palier (seuil)	Effet de pépité
omni directionnel	1500	4.7	0.5
0°	1450	4.7	0.5
45°	1300	4.7	0.5
90°	1000	4.7	0.5
135°	1400	4.7	0.5

III.6.2.2 Etude variographique des couches : yprésien, sommitale, basale et thanétien inférieur

Les variogrammes omnidirectionnels des teneurs en P_2O_5 dans le plan de ces différentes couches ont été construits et ajustés par : un modèle sphérique (couche : yprésien et Thanétien inférieur), et un modèle exponentiel (couche : sommitale et basale).

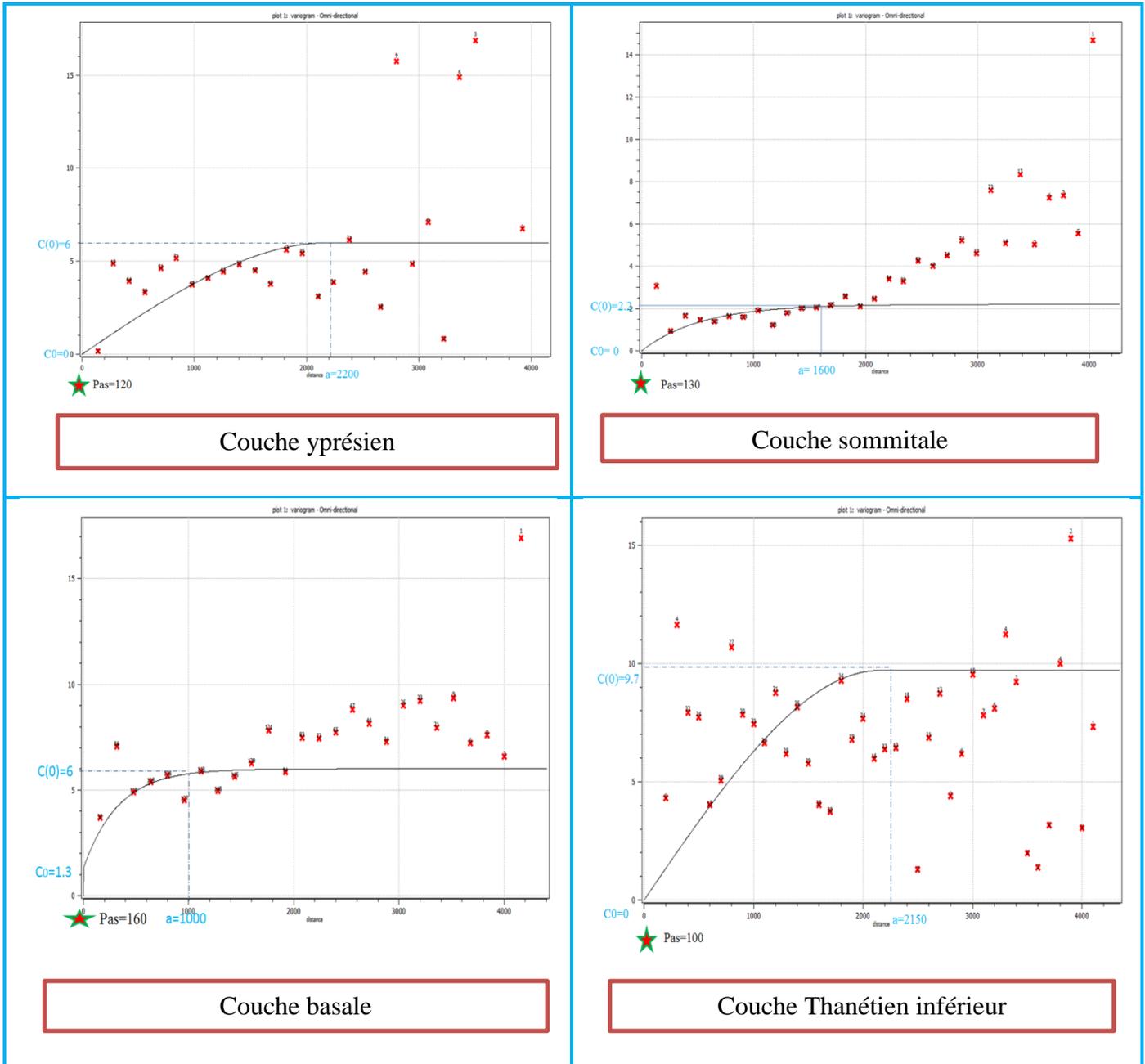


Figure III.16. Variogrammes omnidirectionnels des teneurs en P_2O_5 des différentes couches.

Les principaux paramètres relevant de ces variogrammes sont présentés dans le tableau III.7, ci-dessous :

Tableau III.7. Paramètres intrinsèques des variogrammes des teneurs.

La couche phosphatée	Variabes	Pas (h) (m)	Tolérance	Effet de pépité	Palier	Portée (m)	Variogramme ajusté
Yprésien	t.P ₂ O ₅ (%)	120	60	0	6	2200	sphérique
Sommitale	t.P ₂ O ₅ (%)	130	65	0	2.2	1600	exponentiel
Médiane	t.P ₂ O ₅ (%)	150	75	0.5	4.2	1500	exponentiel
Basale	t.P ₂ O ₅ (%)	160	80	1.3	4.7	1000	exponentiel
Thanétien Inférieur	t.P ₂ O ₅ (%)	100	50	0	9.7	1000	sphérique

Dans le cas d'étude de la répartition des teneurs en P₂O₅ dans les différentes couches minéralisées, deux modèles de variogrammes ont été ajustés ; un modèle sphérique (yprésien et thanétien inférieur) et un modèle exponentiel (sommitale, médiane et basale), et dont les propriétés caractéristiques varient d'une structure à l'autre.

Le modèle exponentiel :

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

D'où

$$\gamma(h) = 0.5 + 4.2^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) \right]$$

Conclusion

En conclusion, l'analyse variographique fait appel à la fois à l'information disponible sur le phénomène étudié, à un certain savoir-faire dans le choix et l'utilisation des outils et à un sens de l'approximation. C'est l'étape essentielle de toute étude géostatistique et certainement celle qui se prête le moins à l'automatisation.

Dans ce chapitre nous avons présenté les paramètres qu'on va utiliser par la suite, pour l'estimation par krigeage des variables étudiées, suivant les différentes couches phosphatées.



Chapitre IV
*Krigeage 2D, Résultats
et Interprétations*

Chapitre IV : Krigeage 2D, résultats et interprétations

Introduction

Le krigeage s'appuie sur l'interprétation de la variable régionalisée comme la réalisation d'une fonction aléatoire, dont on a modélisé la fonction de variogramme. Il s'agit de rechercher, parmi les estimations formées par les combinaisons linéaires pondérées des données, celui qui présente les « meilleures » propriétés (en l'occurrence absence de biais et variance d'erreur minimale, qui constitue le critère de précision choisi) [14].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les cartes résultantes du krigeage ainsi que les cartes de variance d'estimation correspondantes seulement pour la couche principale (couche médiane). Les cartes des estimés pour les autres sous-couches sont présentées en (Annexe II).

Les réserves estimées lors de krigeage font l'objet d'une présentation sous forme d'un tableau dans lequel elles sont présentées suivant la norme « JORC ».

Les cinq couches phosphatées, ont été retenues pour l'estimation des réserves en phosphate du gisement de Bled El Hadba.

IV.1. Méthodologie de krigeage

Etant donné que la couche phosphatée est subdivisée en Cinq (5) sous-couches « l'Yprésien, Sommitale, Médiane, Basale et thanétien inférieure ».

L'estimation consiste à kriger les épaisseurs et les teneurs de chaque sous-couche séparément. Il est à rappeler que l'épaisseur des couches minéralisées est répartie d'une façon plus ou moins régulière dans le gisement.

Les résultats variographiques « les modèles des variogrammes » de l'ensemble des couches phosphatées ont été utilisés pour le krigeage ordinaire à deux dimensions (2D) des épaisseurs et des teneurs en P_2O_5 .

Dans notre cas, le krigeage est effectué en voisinage glissant « il n'utilise que les points de données voisins » du site à estimer et on cherche à estimer la variable régionalisée aux nœuds d'une grille régulière qui couvre la zone étudiée.

IV.2. Grille de krigage

Une fois la modélisation variographique terminée, l'étape suivante consiste à déterminer le support géométrique sur lequel le krigage sera effectué. La précision voulue est due non seulement à la qualité du matériel à utiliser pour la modélisation, mais aussi au nombre de points à estimer.

Dans notre cas, nous avons considéré une grille régulière horizontale (2D) qui s'étend sur toute la superficie de site de Bled El Hadba, avec une maille unitaire de $5 \times 5 \text{ m}^2$. La grille ainsi construite comprend au totale 578×810 points, il y aura en tout 468180 points à kriger dans une superficie de 11.66 Km^2 .

IV.3. Résultats obtenus par krigage ordinaire

Après avoir établi les modèles expérimentaux des variogrammes, nous avons utilisé leurs propriétés (la portée (a), le palier $C(0)$ et l'effet de pépité C_0), afin de procéder au krigage ordinaire sur les données de terrain, et d'obtenir par la suite une estimation globale du site accompagnée de la carte de la variance d'estimation.

IV.3.1. Carte des épaisseurs de la couche médiane

La carte présentée ci-dessous (figure IV.1) présente la répartition des épaisseurs de la couche médiane du gisement de Bled El Hadba. Elles variaient de (10 à 17 m) au Sud-Est et de (22 à 29,75 m) dans la direction Nord-Ouest. Au centre, l'épaisseur est de (5.8 à 13 m).

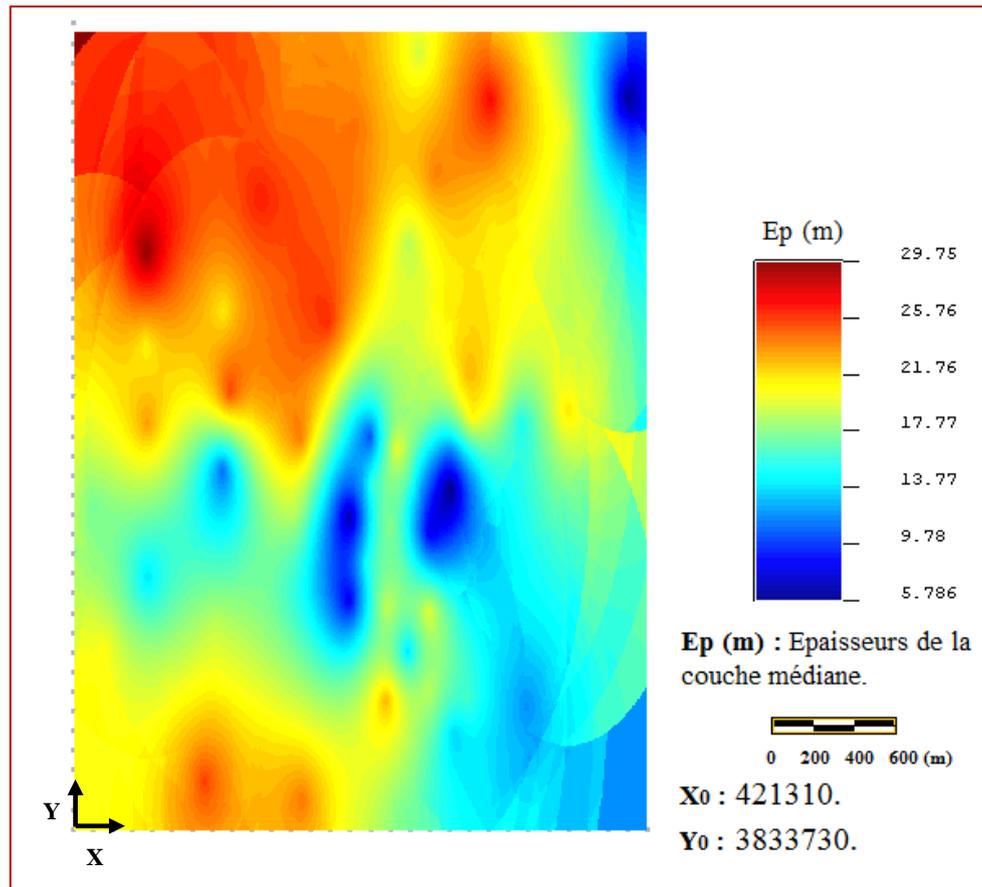


Figure IV.1. Carte représentative du krigeage des épaisseurs de la couche médiane.

IV.3.2. Variance de krigeage pour les épaisseurs de la couche médiane

Rappelons que la variance maximale du variogramme des épaisseurs est de 35.

La carte de la variance de krigeage (Figure IV.2) montre une variance de krigeage maximale de 64.45 aux extrémités des directions Nord-Ouest et Sud-Est.

Dans presque toute la zone prospectée, on remarque une variance d'environ de 23, donc inférieur à 35 ; là on a des épaisseurs acceptables pour l'exploitation, ce qui donne des éclaircissements sur la qualité de la carte estimée par krigeage.

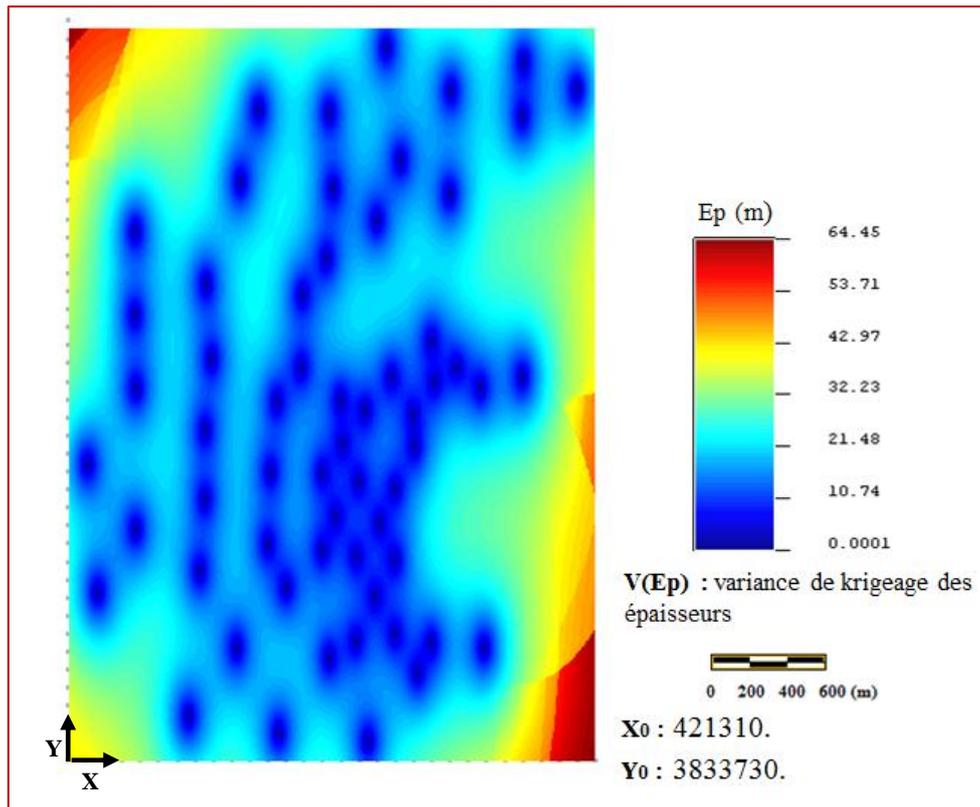


Figure IV.2. Carte de la variance de krigage des épaisseurs de la couche médiane.

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

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 (24 à 27.59 % max) dans la direction Nord-Ouest et presque dans tout le Sud, et dans la direction Nord-Est les teneurs sont d'environ de 23 %.

Dans une petite zone centrale, on observe des teneurs qui varient de 19.29 jusqu'à 23%.

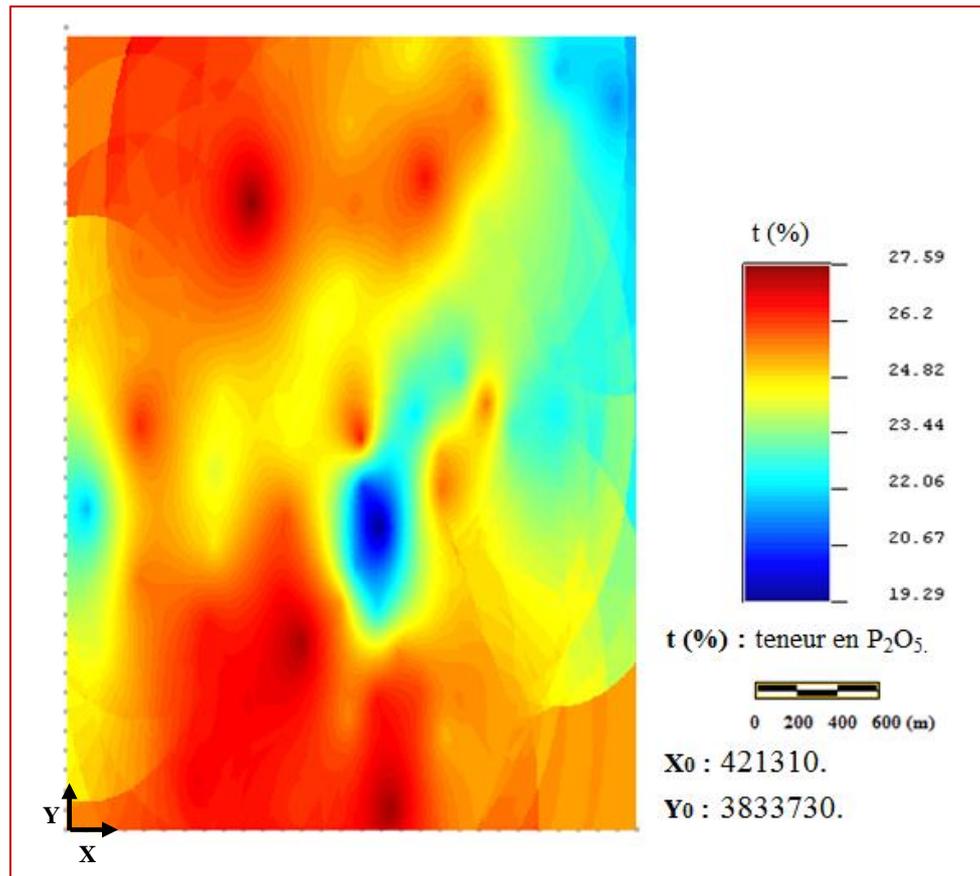


Figure IV.3. Carte représentative du krigage final des teneurs en P_2O_5 , montrant la répartition de la minéralisation.

IV. 3. 4. Variance de krigage pour les teneurs

Rappelons que la variance maximale de variogramme des teneurs est de 4.7.

La (Figure IV.4) montre une variance de krigage maximale de 8.86 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 3, donc inférieur à 4.7, ce qui montre une très bonne estimation. Cette zone montre des teneurs acceptables qui justifient la possibilité d'exploitation de cette couche.

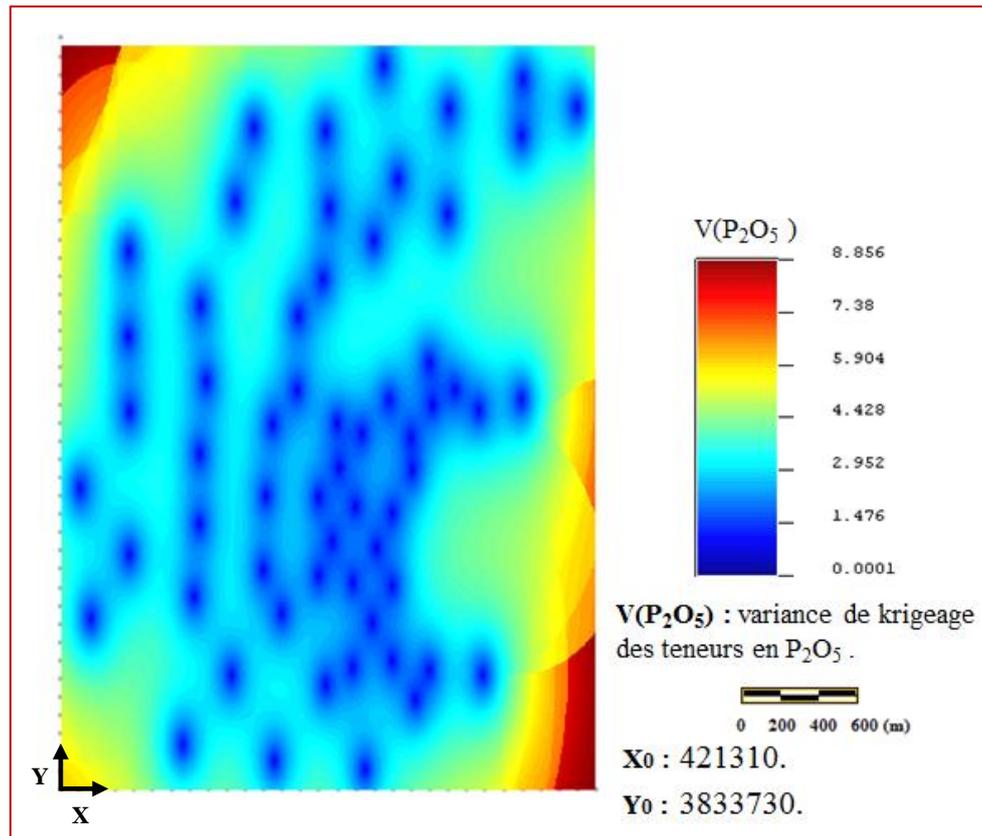


Figure IV.4. Carte représentative de la variance de krigage des teneurs en P_2O_5 .

IV.4. 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 ordinaire sont utilisés pour le calcul du tonnage des réserves de chaque sous-couche au niveau du gisement de Bled El Hadba (Tableau IV.1), en basant sur la formule suivante :

$$q_m = \sum V_i * \rho$$

$$V_i = S * E_{p_i}$$

Où

q_m : Quantité de minerai dans chaque sous-couche ;

V_i : Volume du bloc unitaire ;

ρ : Poids volumique du minerai des phosphates = (2.1 t/m^3) , pour la couche médiane et (2.2 t/m^3) pour les couches restantes [1].

$S = 25 \text{ m}^2$. E_{p_i} : Epaisseur élémentaire.

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

Couche	Paramètres	Prouvés (JORC)		Probables (JORC)	Possibles (JORC)	Réserves totale de la couche (t)	t. moyenne (P ₂ O ₅ %)
		A	B	C1	C2		
Yprésien	Volume (m ³)	2 309 870	27 384 668	24 129 633	9 149 697	138 542 512	17.54
	Tonnage (t)	5 081 714	60 246 269	53 085 193	20 129 334		
	Totale (t)	65 327 984		53 085 193	20 129 334		
Sommitale	Volume (m ³)	397 261	5 752 377	15 729 466	34 190 774	123 353 738	18.1
	Tonnage (t)	873 976	12 655 230	34 604 826	75 219 704		
	Totale (t)	13 529 206		34 604 826	75 219 704		
Médiane	Volume (m ³)	400	2 675 555	39 257 349	153 834 843	411 113 111	24.9
	Tonnage (t)	840	5 618 666	82 440 434	323 053 170		
	Totale (t)	5 619 506		82 440 434	323 053 170		
Basale	Volume (m ³)	487	0	2 245 902	56 425 509	129 078 178	19.50
	Tonnage (t)	1072	0	4 940 986	124 136 120		
	Totale (t)	1 072		4 940 986	124 136 120		
Thanétien inférieur	Volume (m ³)	1 585 646	20 280 332	10 707 480	1 782 610	75 583 353	22.26
	Tonnage (t)	3 488 422	44 616 730	23 556 457	3 921 743		
	Totale (t)	48 105 152		23 556 457	3 921 743		
Réserves de gisement "JORC" (t)		132 582 922		198 627 897	546 460 073	877 670 893	20.54

A partir du (tableau.IV.1), les réserves du gisement de Bled El Hadba en prenant en considération le krigeage des cinq sous-couches phosphatées totalisent 877.670 millions de tonnes.

IV.5. Présentation graphique de la répartition des réserves en phosphate dans les sous-couches

Dans le but d'avoir une information complète et claire sur la répartition des réserves dans le gisement, nous avons tracés des graphes (figure IV.5), pour évaluer les réserves en phosphate en fonction de la teneur moyenne.

Les réserves minérales de la couche médiane, dont la teneur en P_2O_5 est de 24.9 %, sont de l'ordre de 411.113 millions de tonnes, soit 46.84 % de l'ensemble des réserves de gisement.

Les réserves minérales restantes dont la teneur en P_2O_5 est inférieure à 22.26 %, sont de l'ordre de 466.557 millions de tonnes, soit 53.15 % de l'ensemble des réserves.

Les réserves par sous-couche sont détaillées dans la figure suivante :

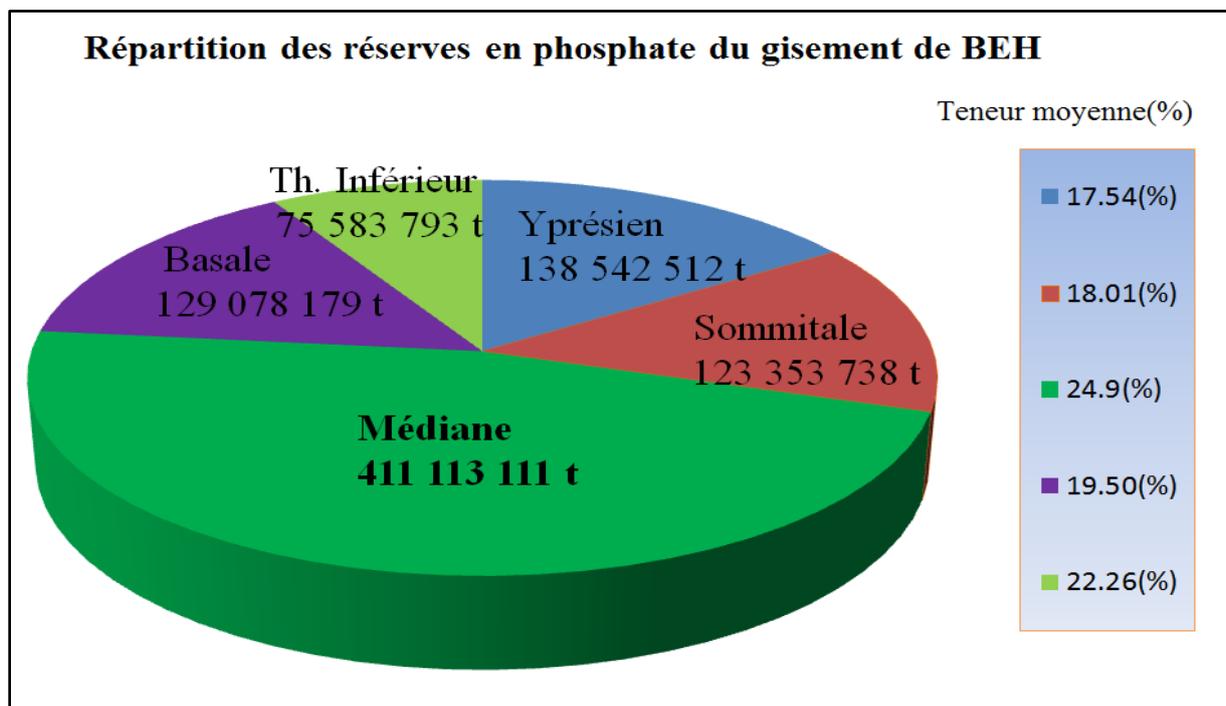


Figure IV.5. Représentation graphique de répartition des réserves en phosphate dans le gisement de Bled El Hadba.

IV.6. Estimation des réserves en phosphate en fonction de la teneur de coupure

A partir du tableau ci-dessous, on remarque que les tonnages en P_2O_5 diminuent au fur et à mesure que la teneur de coupure augmente, elles sont de l'ordre de 856 Mt pour une teneur de coupure de 16 %, ils diminuent jusqu'à 340 Mt pour la teneur de coupure de 24 %. Cependant, si la teneur de coupure est trop élevée, une grande partie des matériaux extraits ira

en décharge. Si la teneur de coupure est trop faible, la capacité d'entrée de toutes les activités minières et de traitement des minéraux sera utilisée au maximum de son potentiel, tandis que les recettes n'augmenteront pas nécessairement. La stratégie optimale est donc celle qui atteint le juste équilibre entre ces deux limites [1].

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

Couche	Teneur de coupure (%)								
	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Yprésien	120	106	71	29	4	0.10	0	0	0
Sommitale	121	103	52	18	6	3	0.081	0	0
Médiane	411	4111	411	411	410	408	404	379	328
Basale	128	122	102	79	49	19	1.17	0	0
Thanétien inférieure	75	74	73	71	66	57	48	30	12
Réserves géologiques totales (Mt)	856	817	711	610	538	489	453	409	340

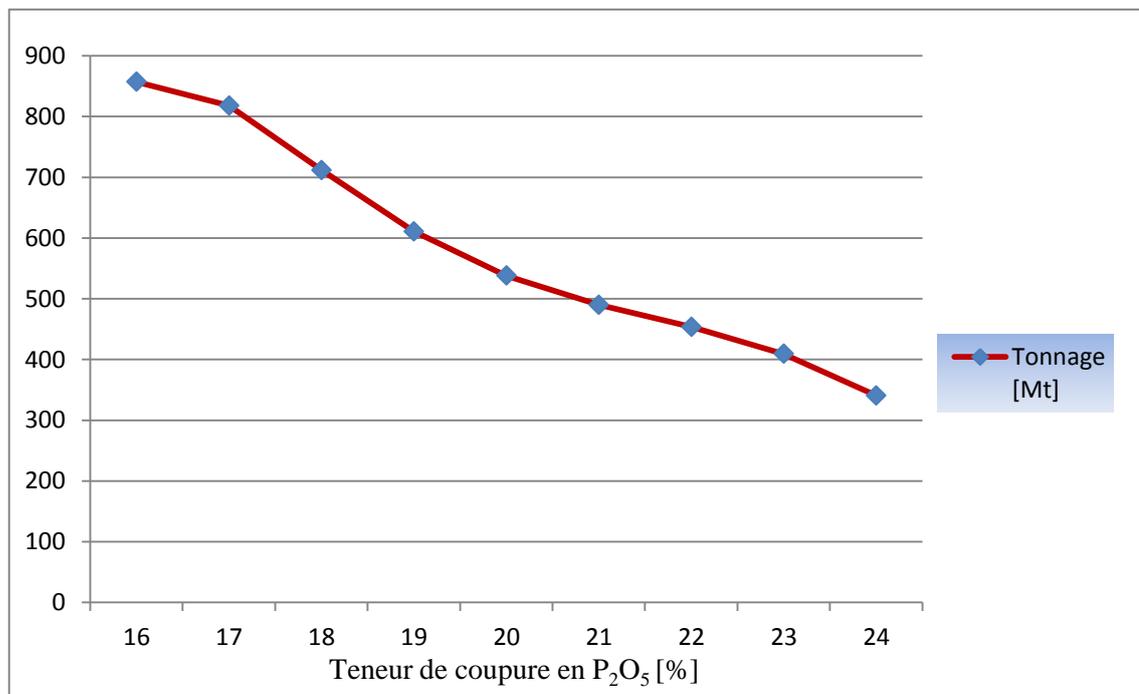


Figure IV.6. Tonnage des réserves en P₂O₅ en fonction de la teneur de coupure.

IV.7. Classification des réserves en P₂O₅ par catégories

Tableau IV.3. Tableau récapitulatif des réserves par catégorie.

JORC	Catégorie des réserves	Sous-couches	Tonnages (Mt)	P ₂ O ₅ (%)	
Prouvés	A	Yprésien	5.08	17.61	
		Sommitale	0.87	17.76	
		Médiane	0.00048	24.75	
		Basale	0.001	19.26	
		thanétien inférieur	3.48	22.33	
	Totale (Mt)		9.45		
	B	Yprésien	60.24	17.71	
		Sommitale	12.65	17.62	
		Médiane	5.61	24.53	
		Basale	0	0	
		thanétien inférieur	44.61	22.38	
Totale (Mt)		123.14			
Probables	C1	Yprésien	53.08	17.5	
		Sommitale	34.6	17.86	
		Médiane	82.44	24.59	
		Basale	4.94	19.29	
		thanétien inférieur	23.55	22.11	
	Totale (Mt)		198.63		
Possibles	C2	Yprésien	20.19	17.19	
		Sommitale	75.21	18.13	
		Médiane	323.05	24.99	
		Basale	124.14	19.5	
		thanétien inférieur	3.92	21.66	
	Totale (Mt)		546.46		

Les cartes suivantes représentent les réserves géologiques par catégorie de la couche médiane. Les autres couches sont présentés en (Annexe II).

IV.7.1. Répartition des teneurs par catégorie

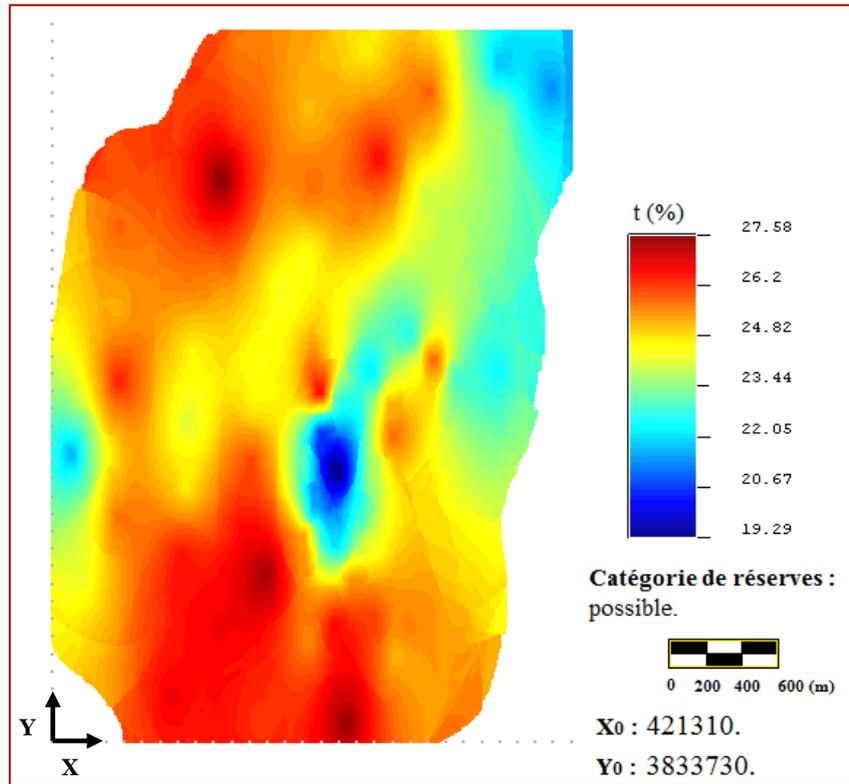


Figure IV.7. Réserves possibles (C₂) de la couche médiane.

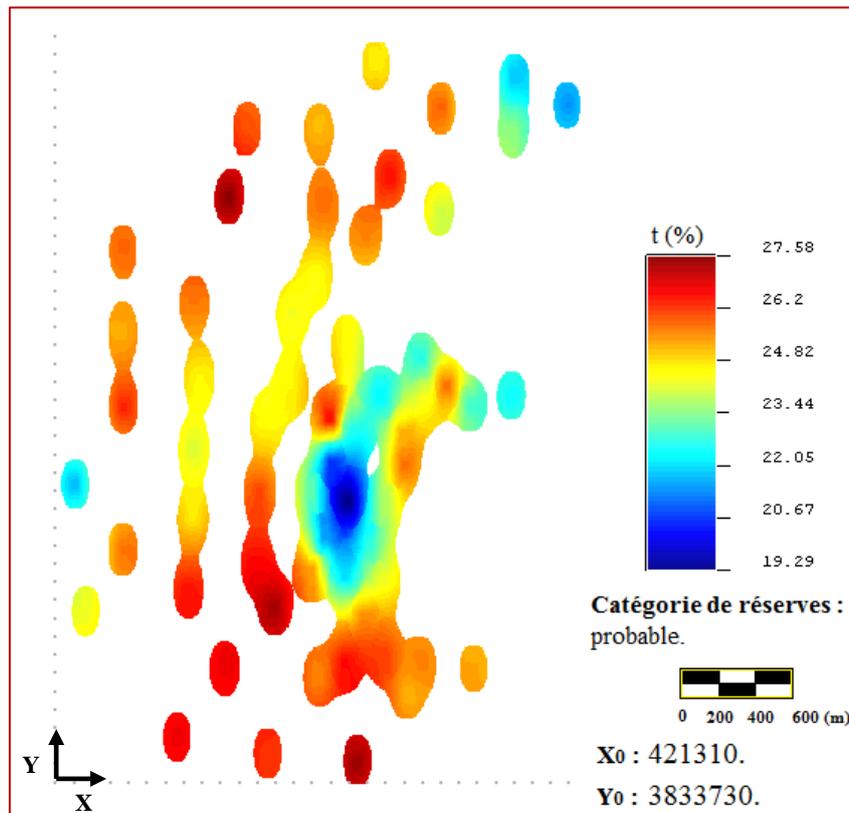


Figure IV.8. Réserves probables (C₁) de la couche médiane.

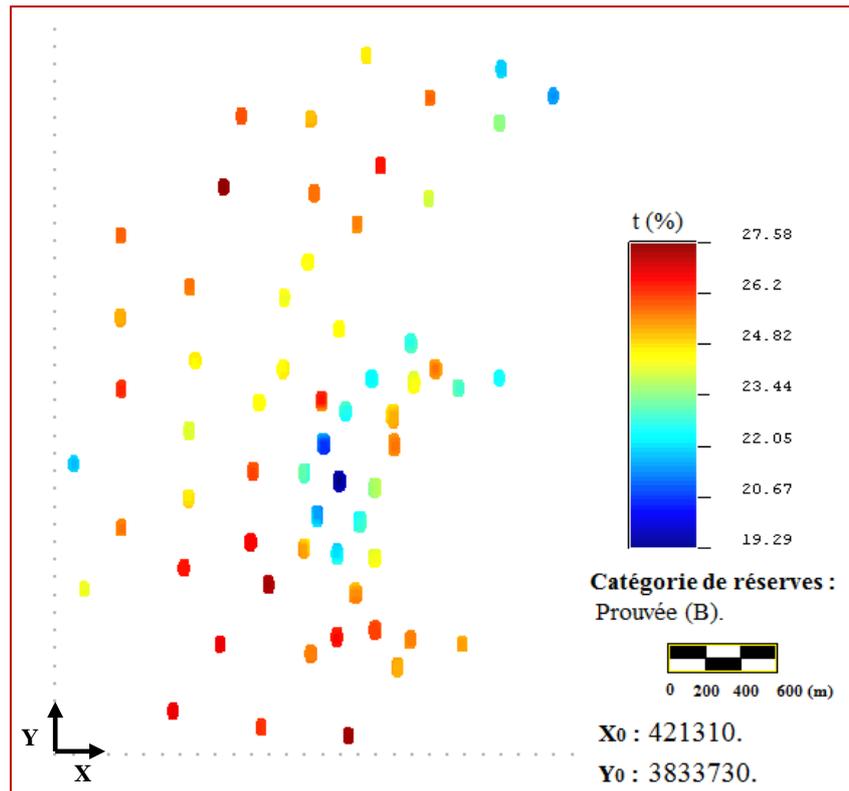


Figure IV.9. Réserves prouvées (B) de la couche médiane.

Ces cartes sont estimées à partir de la variance des teneurs en P_2O_5 :. Au fur et à mesure qu'on se rapproche du point à estimer, la variance diminue, l'estimation devient donc plus fiable et les réserves s'augmentent vers des catégories supérieures.

IV.8. Travaux antérieurs effectués sur le gisement de Bled El Hadba

Les phosphates de Bled El Hadba sont reconnus depuis une longue période (Thomas, 1888), et ont fait l'objet d'une reconnaissance par puits et galeries dès le début du siècle. Ce gisement a été prospecté et évalué par six principales campagnes :

IIV.8.1. Evaluation de SONAREM (1978)

En 1978, la SONAREM, avait réalisé (09) sondages notés S-27K, S-51K à S-58K, suivant une maille de 400 x 900 m, et une série de tranchées au niveau des affleurements (Tr.43K à Tr.55K).

Les réserves géologiques estimées par cette campagne de recherche sont de :

- Réserves probables (C1) 113 Mt titrant à 19.58 % en P_2O_5 , pour une épaisseur moyenne de 31 m.
- Réserves possibles (C2) 129 Mt avec 20.3 % en P_2O_5 .

Soit un total de 242 Mt dont 60 Mt seulement titrent de 23 % en P_2O_5 .

IV.8.2. Evaluation de L'EREM (1987)

En 1987, l'EREM avait réalisé (11) sondages, notés de S-1 H à S-11 H, en resserrant la maille de reconnaissance à 400 x 600 m, sur une superficie de 4.6 Km² et sept tranchées notées Tr-1 H à Tr-7 H.

Les réserves géologiques estimées par cette campagne de recherche sont de 324 Mt en toute catégorie confondue.

- Pour la couche principale les réserves sont de 204 Mt réserves probables et possibles avec des teneurs moyennes en P_2O_5 variant entre 22.3 % et 25.50 %.
- Les réserves des couches sommitale et basale sont de l'ordre de 120 Mt avec des teneurs en P_2O_5 inférieur à 20 %.

IV.8.3. Evaluation de BRGM (1992)

En 1992, le BRGM avait expertisé tout le gisement en utilisant les données déjà existantes (sondages, levés géologiques...) tout en considérant de nouveaux paramètres pour l'estimation des réserves, comme la division du faisceau phosphaté en trois couches (sommitale, principale, et basale), qui se distinguent principalement, par leurs teneurs en P_2O_5 , par leur texture, et structure.

Les réserves géologiques trouvées par cette expertise sont d'environ 300 Mt toute catégorie confondue avec une teneur en P_2O_5 de 21.32 %. Elles sont réparties suivant les différentes couches comme suit :

- La Couche principale : 165.6 Mt avec une teneur en P_2O_5 de 24.85 %.
- La couche sommitale : 72.4 Mt titrant de 15.90 % en P_2O_5 .
- La couche basale : 62 Mt titrant de 18.25 % en P_2O_5 .

Par catégorie de ressources, le BRGM a estimé les ressources probables du gisement à 148 Mt et possibles à 152 Mt.

IV.8.4. Evaluation FERPHOS (1999)

En 1999 FERPHOS a lancé une campagne de prospection, en partenariat avec FERTIBERIA, plus détaillée de la partie Nord du gisement dans le but de certifier 100 Mt de phosphate en réserves prouvées (catégorie B) sur une surface de 2.61 Km²

Dix sondages ont été réalisés suivant une maille plus serrée de 400 x 250 m.

L'évaluation des réserves géologiques a été effectuée sur une superficie de 4.85 Km² environ.

Les réserves géologiques globales du gisement sont de 319.7 Mt avec une teneur moyenne en P₂O₅ de 21.65 %.

Ces réserves sont réparties par catégorie comme suit :

- Les réserves prouvées (B) sont de 103.1 Mt avec une teneur moyenne en P₂O₅ de 22.19 %.
- Les réserves probables (C1) sont estimées à 156.6 Mt avec une teneur moyenne en P₂O₅ de 21.43 %.
- Les réserves possibles (C2) sont estimées à 60 Mt avec une teneur moyenne en P₂O₅ de 21.32 %.

IV.8.5. Evaluation d'ORGM

Le programme de recherche (2012/2014) de phosphate du gisement de Bled El Hadba, entrepris par l'ORGM, a pour objectif la précision et l'augmentation des réserves de minerais de phosphates vers les catégories supérieures, ainsi que la recherche de nouvelles ressources.

Dans cette perspective, l'ORGM a réalisé 45 sondages notés (SPH-01 à SPH-45), couvrants une superficie de 6604300 m² (660.43 ha).

Les réserves géologiques globales du gisement, toutes catégories confondues sont évaluées à environ 889 171 946.99 Mt. avec une teneur moyenne en P₂O₅ de 21.05 %.

La couche sommitale, renferme 102 858 948.61 Mt, tandis que la couche basale, ses réserves sont de 115 478 700.76 Mt, la couche médiane recèle 367 401 446.55 Mt [1].

Les cinq évaluations historiques (SONAREM, EREM, BRGM, FERPHOS et ORGM) des ressources ont été préparées d'après des niveaux d'exploration différents. Cependant, toutes les déclarations de ressources historiques reposaient sur des estimations de ressources par bloc « coupe géologique » qui est fonction des épaisseurs de la minéralisation, des teneurs moyennes interceptées par les trous de forage et des zones d'influence correspondantes. En combinaison avec une densité moyenne globale, un tonnage total par bloc avec des teneurs moyennes a été calculé. La classification des ressources se conformait aux lignes directrices soviétiques basées principalement sur le maillage des forages.

IV.8.6. Evaluation de DMT (2013)

La déclaration des ressources de DMT pour BEH repose sur les mêmes données de base que celles dont disposait le BRGM en 1992, tandis que le nombre de forage a augmenté de 32 à 61 trous de forage.

La déclaration des ressources de DMT correspond aux teneurs moyennes déclarées par l'ORGM, «21.3%» seul le tonnage a augmenté passant de 300 à 573.3 Mt pour les trois sous-couches (I, II, III) et de 714.9 Mt avec la considération des réserves de la couche yprésien du fait de l'extension des forages réalisés par l'ORGM à des fins de modélisation géologique en 2013 [1].

Contrairement aux estimations historiques des ressources, la déclaration des ressources de DMT ne se fonde pas sur une estimation par bloc, mais sur l'interprétation et la modélisation géologiques en 3D des couches de phosphorite et des couches hôtes. En outre, l'estimation de DMT se fonde sur des analyses statistiques et géostatistique ainsi que sur une interpolation des teneurs et d'épaisseurs d'après un krigeage ordinaire, qui est accepté à l'échelle internationale comme étant la norme de meilleure pratique pour les déclarations des ressources.

Toutefois, ainsi qu'il est indiqué dans les paragraphes précédents, les tonnages des ressources, les teneurs en P_2O_5 indiquées dans plusieurs études sont comparables compte tenu des différentes entrées. Alors que les teneurs en P_2O_5 ne présentent que de légères variations d'une étude à l'autre.

IV.8.7. Présente étude (2016)

En comparaison notre évaluation avec les autres évaluations effectuées par les autres compagnes de prospection et d'étude telle que l'ORGM et DMT, qu'elles ont utilisées les mêmes données que celles utilisées dans notre étude, avec une approche de modélisation géostatistique linéaire en 2D. Le krigeage ordinaire a donné une totalité de réserve de 877.670 Mt avec une teneur moyenne de 20.54 % sans tenir compte de la teneur de coupure et l'élimination des parties qui sont caractérisées par une faible teneur en P_2O_5 . La quantité des réserves est plus élevée parce qu'une autre couche de phosphorite (Thanétien inférieur) a une teneur moyenne de 22.26 % en P_2O_5 , qui n'a pas été prise en compte dans les quatre études historiques, et même celle de DMT.

Il est à signaler que le calcul de réserves de l'ORGM a été effectué pour l'ensemble des niveaux phosphatés de l'yprésien, Thanétien supérieur (couche sommitale, médiane et basale) et du thanétien inférieur.

Les réserves estimées par la présente étude pour les trois sous-couches du thanétien supérieur sont de l'ordre de 663.5 Mt avec une teneur moyenne de 20.90 %.

L'histogramme (Figure IV.10) présente une comparaison entre les réserves estimées par notre étude et, les études de (SONAREM, EREM, BRGM, FERPHOS, ORGM et DMT).

Nos résultats semblent proches des résultats obtenus par l'évaluation de DMT avec une différence notable parce qu'il y a une autre couche de phosphorite (thanétien inférieur) à une teneur moyenne de 22.26 % en P_2O_5 , qui a été prise en compte pour notre étude.

En considérons les cinq couches phosphatées, nos résultats sont plus proches de l'évaluation de l'ORGM avec une différence de 11 Mt.

Une comparaison détaillée des études est présentée en (Annexe II).

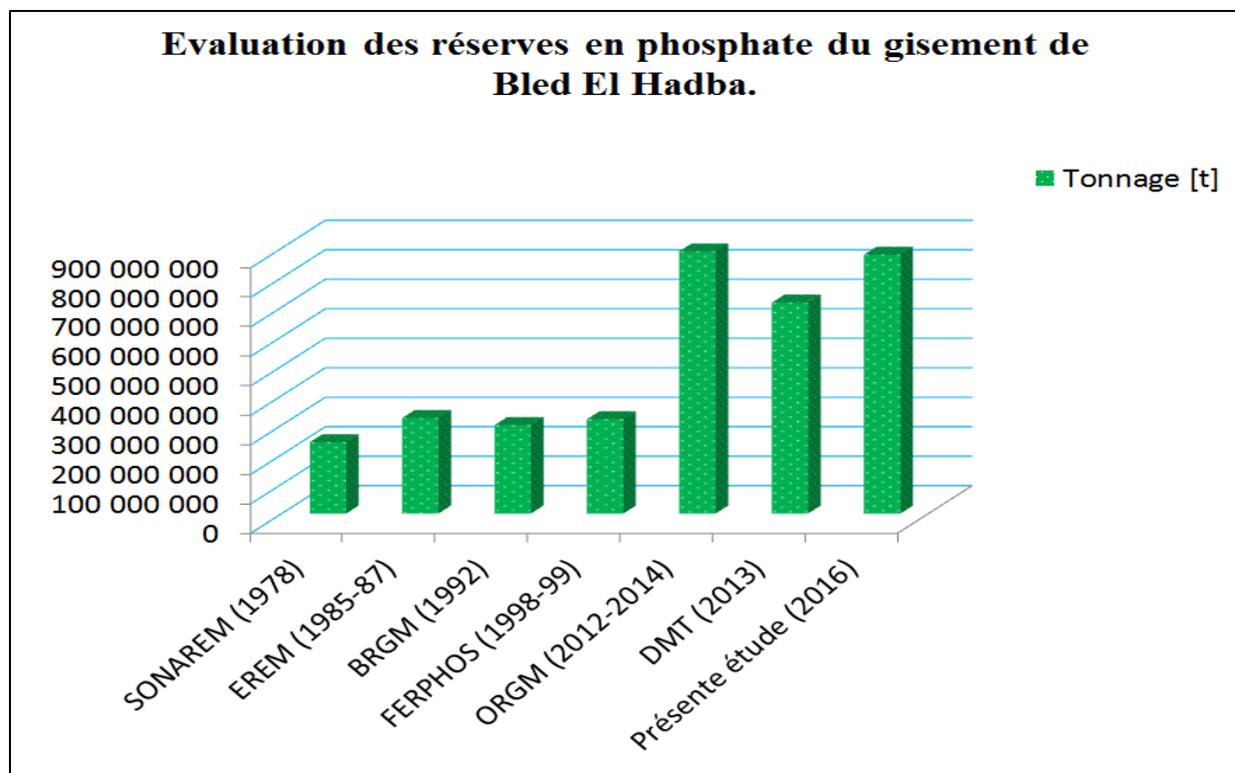


Figure IV.10. Représentation graphique des réserves en phosphate estimées par les différentes études effectuées sur le gisement de Bled El Hadba.

Conclusion

L'utilisation des méthodes classiques (interpolation linéaires entre les sondages) pour l'évaluation des réserves génère des résultats plus au moins discutables. Néanmoins, une estimation basée sur la corrélation entre les données des sondages, en plus des cartes de variance de krigeage, illustrant la qualité d'estimation, peut remédier à ce problème.

Cependant, les méthodes d'interpolation classiques (estimation par partitionnement de l'espace) ne permettent pas de juger de la qualité des valeurs estimées.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le problème auquel nous nous sommes intéressés, s'inscrit dans le cadre de l'évaluation des réserves en phosphate du gisement de Bled El Hadba, par la méthode géostatistique.

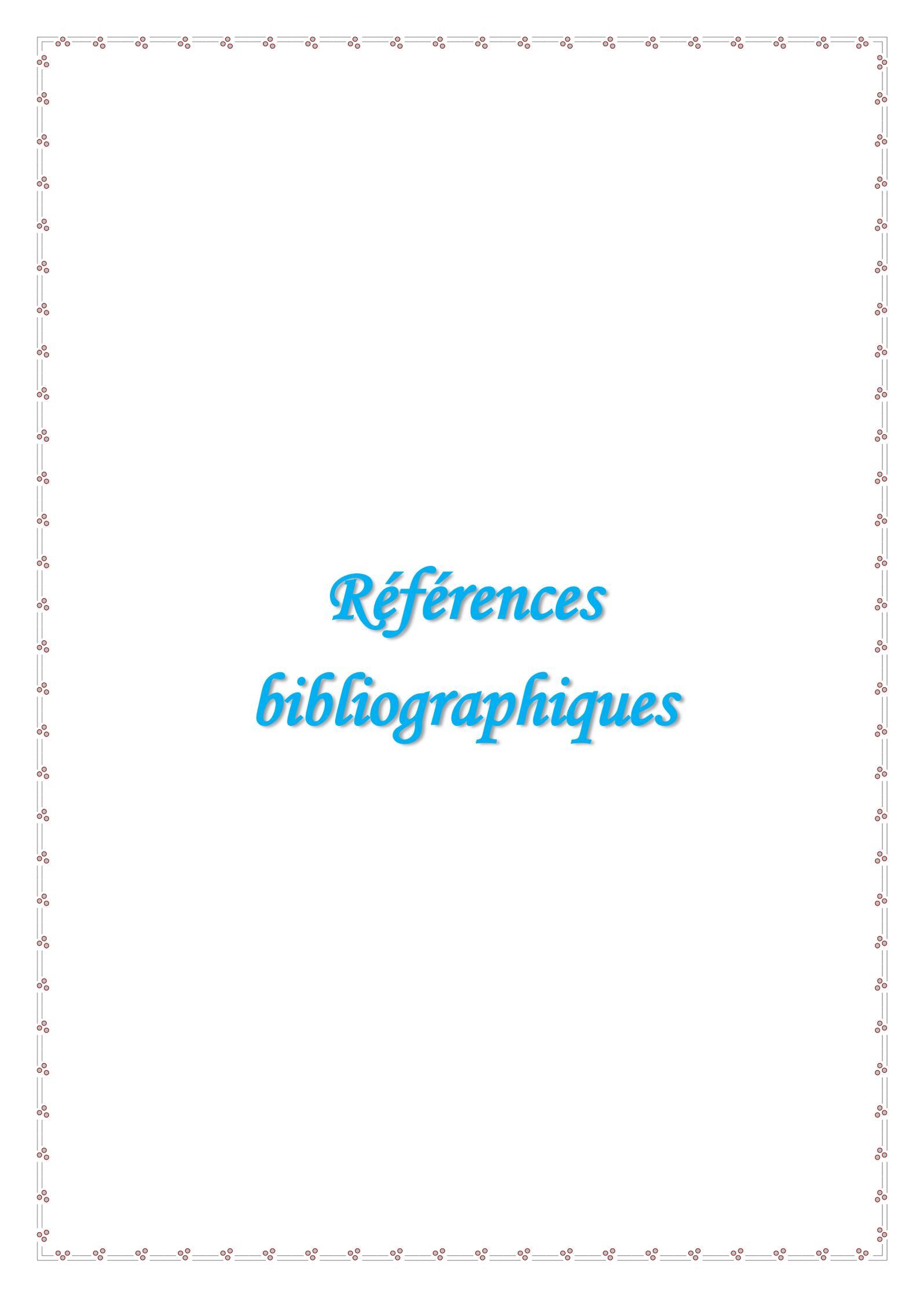
Notre mémoire s'est articulé autour de deux objectifs essentiels. Le premier est de chercher une corrélation entre les données de terrains, ce qu'on appelle étude variographique qui est utilisée par la suite pour le krigeage ordinaire.

Le second centre d'intérêt c'est l'estimation des réserves à travers les cartes de krigeage obtenues.

Une recherche bibliographique a permis d'étudier les bases des techniques d'interpolation spatiale et notamment celle du krigeage ordinaire. Ce dernier a été présenté d'un point de vue théorique et appliquée. L'analyse variographique a été examinée et discutée. Le choix de cette méthode a été motivé par la nouvelle norme concernant la présentation des rapports des réserves pour les projets miniers.

Au fil des chapitres III et IV, la pratique du krigeage a finalement été traitée en détaillant une méthodologie de mise en œuvre du krigeage et en utilisant le krigeage ordinaire pour résoudre une problématique d'interpolation spatiale pour les teneurs et les épaisseurs des couches phosphatées avec l'estimation des réserves existantes.

Les cartes obtenues par krigeage ordinaire en 2D sont simples à manipuler, ce qui permet une meilleure présentation du gisement. Le krigeage assure la valorisation et l'implantation des cartes selon les méthodes adaptées, ainsi que le contrôle des teneurs et des épaisseurs, ce qui oriente les travaux d'exploitation pour une gestion rationnelle.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1]: Documents internes de l'entreprise :

BRGM : “Phosphates du Djebel Onk (Algérie) : Gisement de Bled El Hadba- données prises en compte”.

CERAD : “Rapport Bled El Hadba : Partie géologie et Exploitation minière”.

DMT : “Exploitation pluriannuelle des gisements de Bled El Hadba et Djebel Onk Sud”.

ORGM : “Rapport final sur les résultats des travaux d'exploitation des phosphates du gisement de Bled El Hadba 2012-2014”.

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

[3]: **AZOUZ RACHED, H.**, “Contrôle de la qualité des processus utilisés dans la mine de Djebel Onk”, Mémoire de fin d'étude, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.

[4]: **KECHICHED, R.**, “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, 2011.

[5]: **DASSAMIOUR, M.**, “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, 2012.

[6]: **BOUCIF, R., TAMOURT, M.**, “Etude de stabilité de flanc Nord de la mine de Kef Essenoun-Tébessa”, Mémoire de fin d'étude, Université de Bejaïa, 2015.

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

[8]: **MAZGHACHE, H.**, “La géostatistique linéaire appliquée”, 26 p, 2008.

[9]: **MOURAH, N.**, “Interpolation Géostatistique le krigeage”, Mémoire de Magister, Université 20 Aout 1955 Skikda, 2011.

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

[11]: **ISOBEL, C.**, “Practical geostatistics, applied science publishers”, 127 p, 1979.

[12]: **MEBARKI, W.**, “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, Juillet 2010.

[13]: **BOUDRIES, A.**, “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, 2008.

- [14]: **XAVIER, E.**, “géostatistique linéaire”, Centre de géostatistique, Ecole des Mines de Paris, p 403, 2001.
- [15]: **MAZARI, M.**, “Etude géostatistique des ressources minières : exemple d’une mine en cours d’évaluation”, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2012.
- [16]: **BAILY, J.S.**, “Géostatistique appliquée”, 22 p. 1999.
- [17]: **GRATTON, Y.**, “Le krigeage : la méthode optimale d’interpolation spatiale”, INRS-Eau-Terre-Environnement. Institut national de la recherche scientifique, 2002.
- [18]: **BAILLARGEON, S.**, “Le krigeage : revue de la théorie et application à l’interpolation spatiale de données de précipitations”, Mémoire de maître ès sciences, Université Laval-Québec, 2005.
- [19]: **LAURENT, A.**, “Acquisition, Traitement et restitution des données d’une reconnaissance archéologique : La ville gallo-romaine du vieil-Evreux”, thèse de doctorat, Université Paris 6, 2003.

Annexes

Annexe I :

I. Histogrammes des épaisseurs :

I.1. Couche yprésien

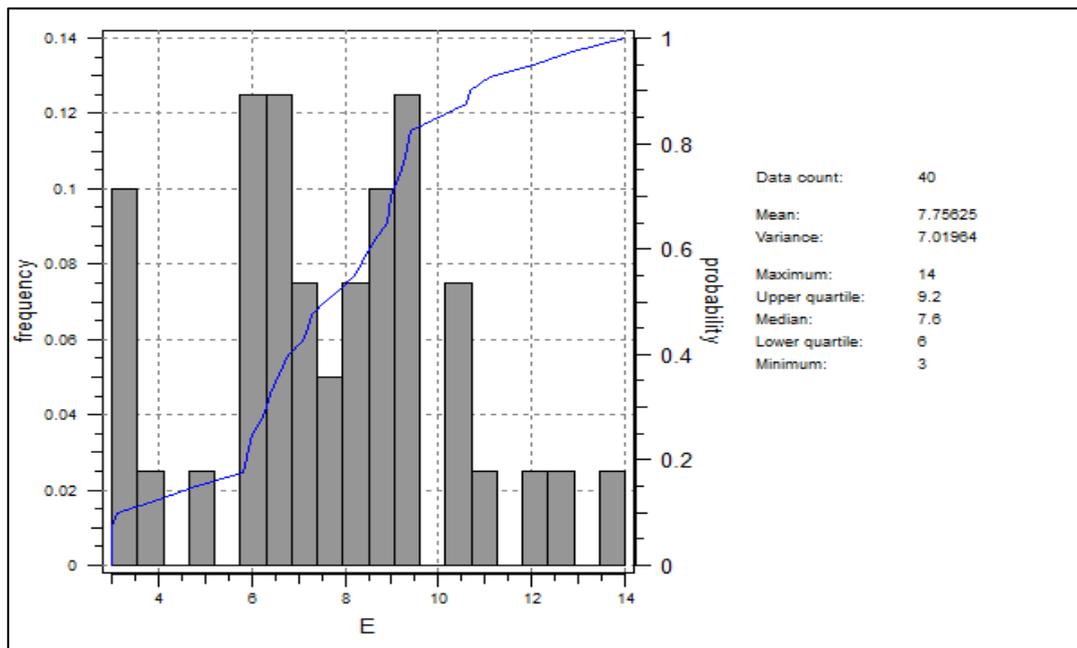


Figure 1. Histogramme d'épaisseurs de la couche yprésien.

I.2. Couche sommitale

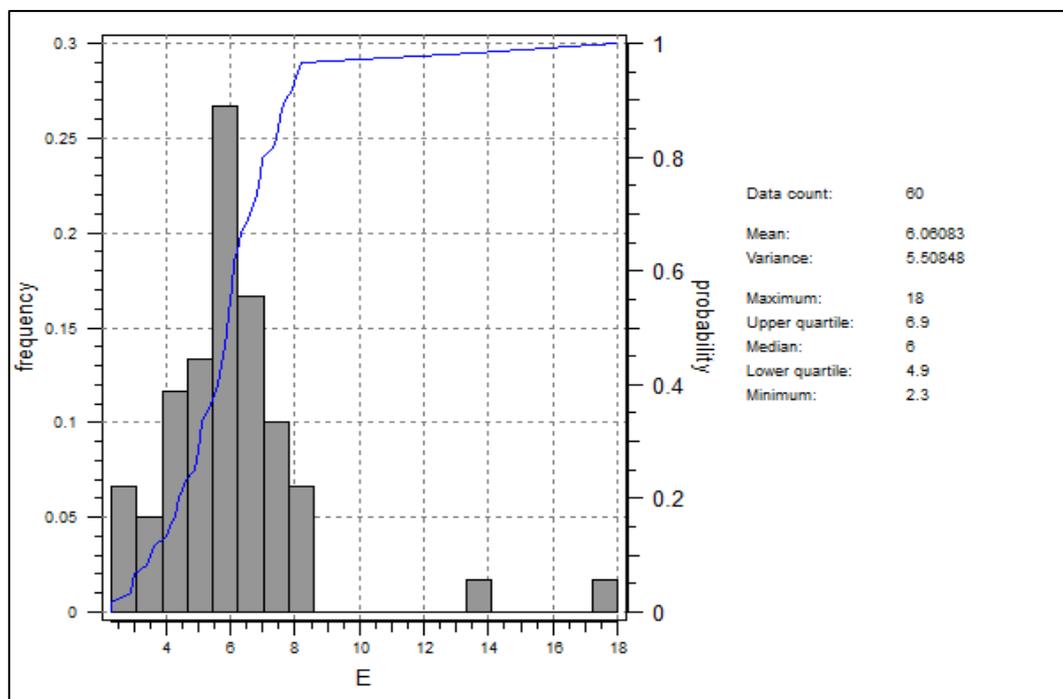


Figure 2. Histogramme d'épaisseurs de la couche sommitale.

I.3. Couche basale

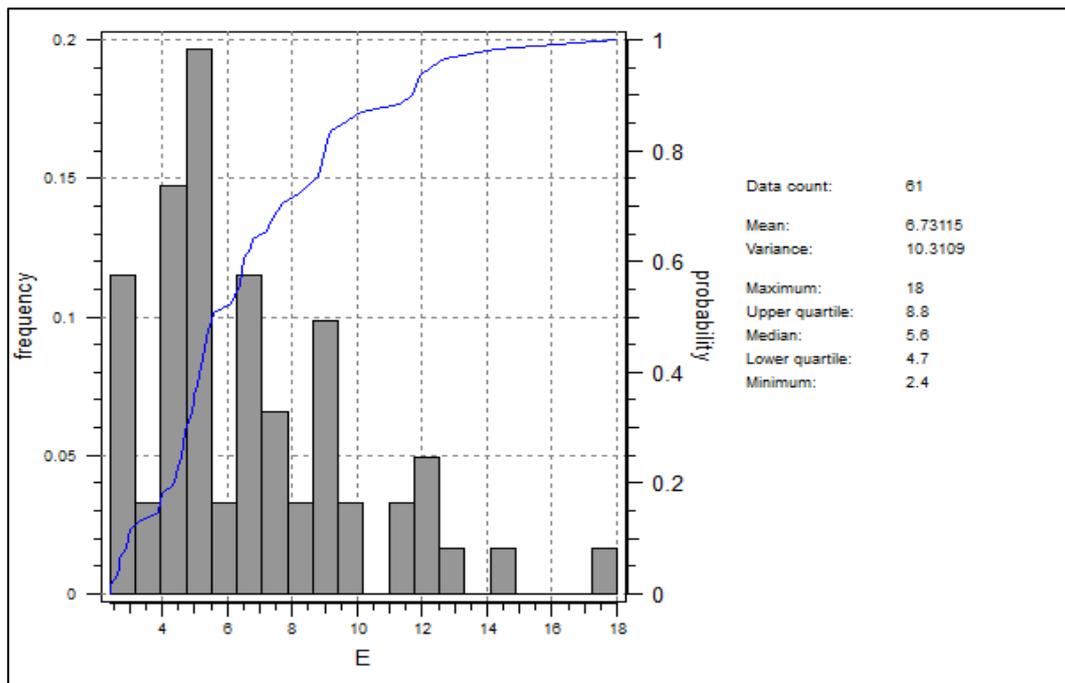


Figure 3. Histogramme d'épaisseurs de la couche basale.

I.4. Couche du thanétien inférieur

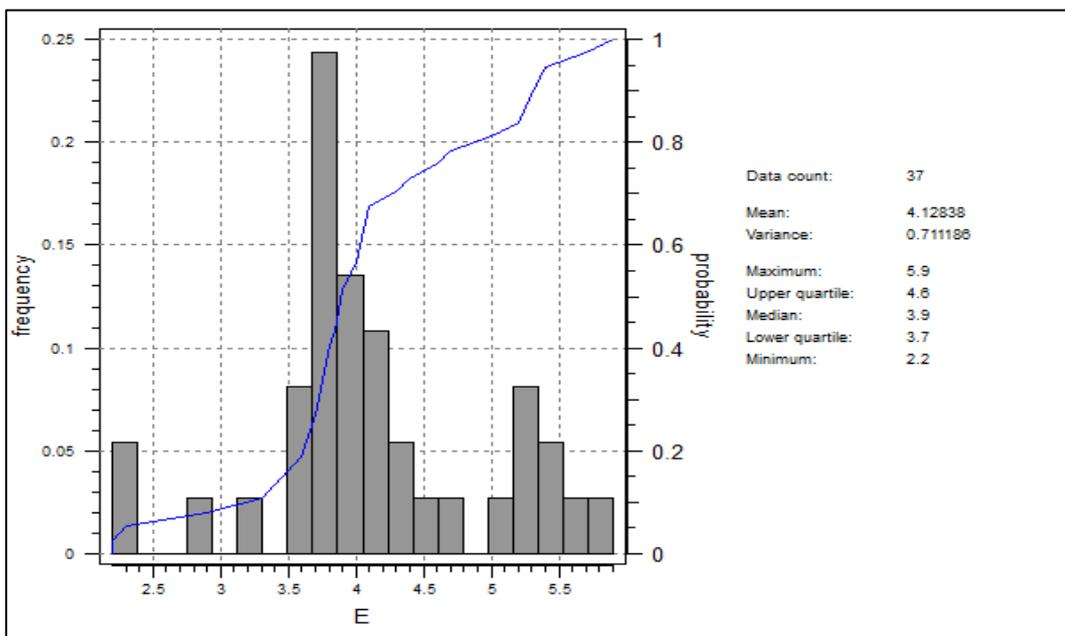


Figure 4. Histogramme d'épaisseurs de la couche thanétien inférieur.

II. Histogramme des teneurs

II.1. Couche yprésien

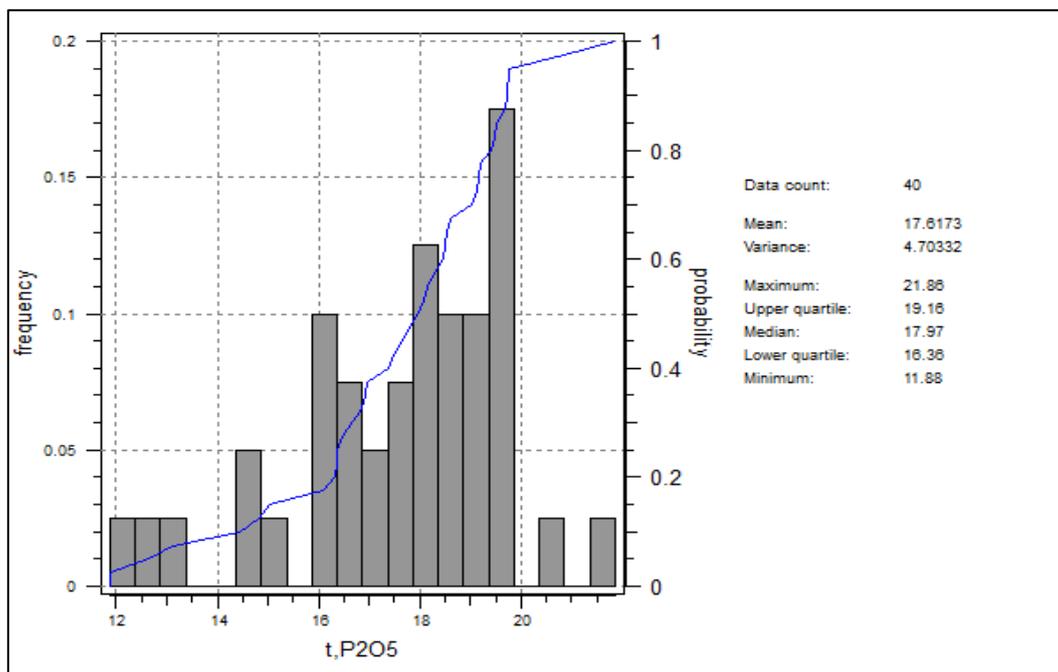


Figure 5. Histogramme de teneur de la couche yprésien.

II.2. Couche sommitale

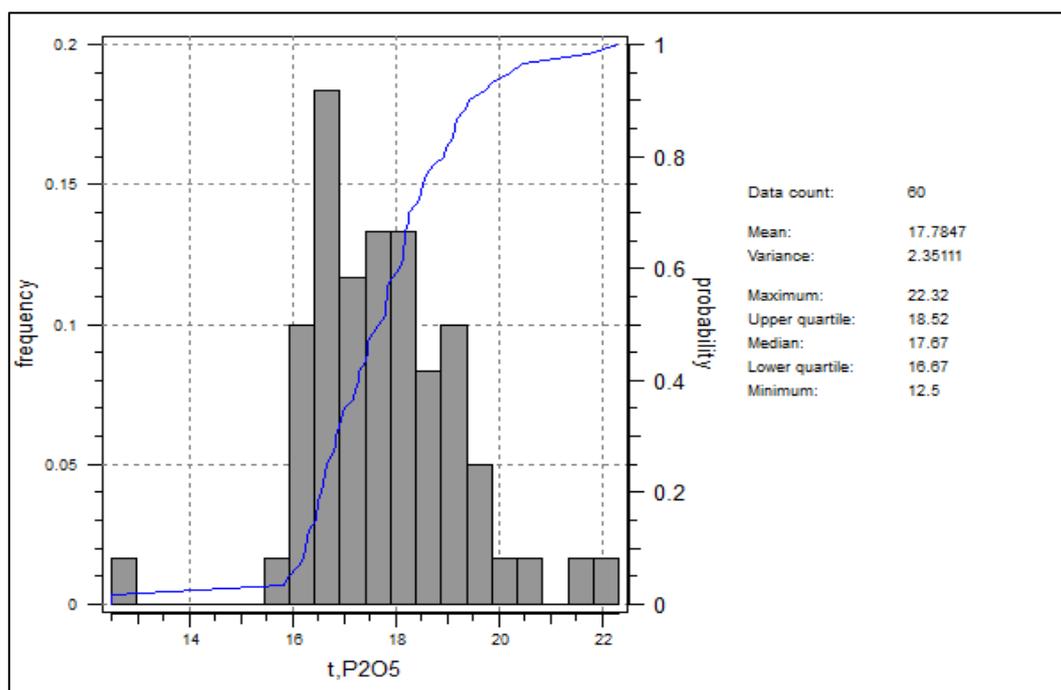


Figure 6. Histogramme de teneur de la couche sommitale.

II.3. Couche basale

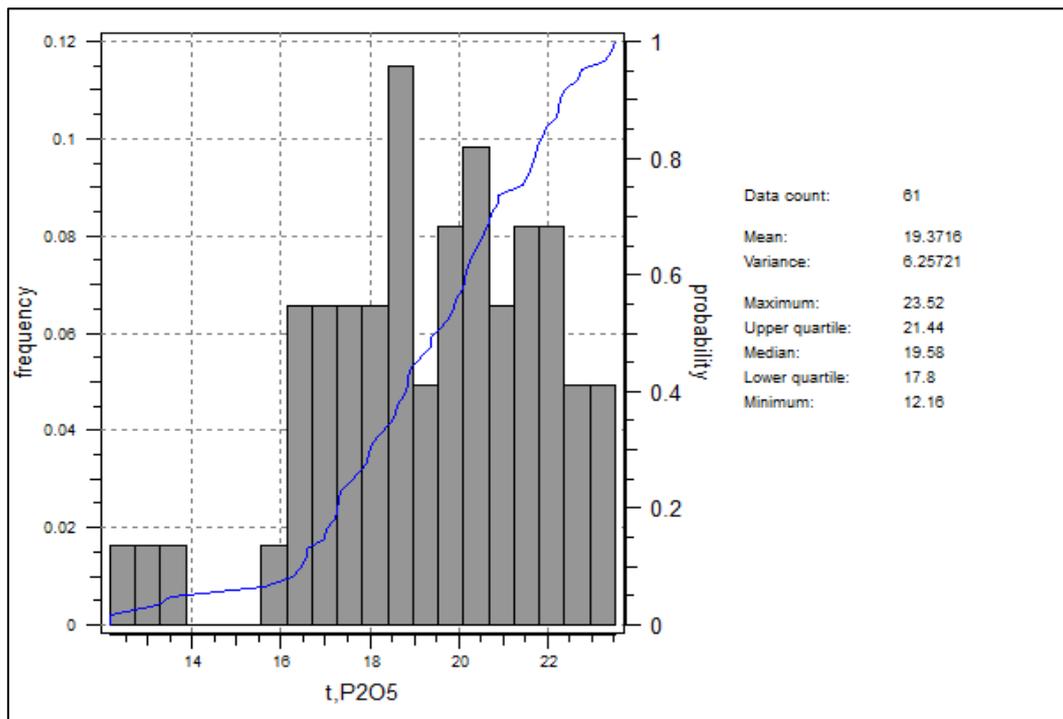


Figure 7. Histogramme de teneur de la couche basale.

II.4. Couche du thanétien inférieur

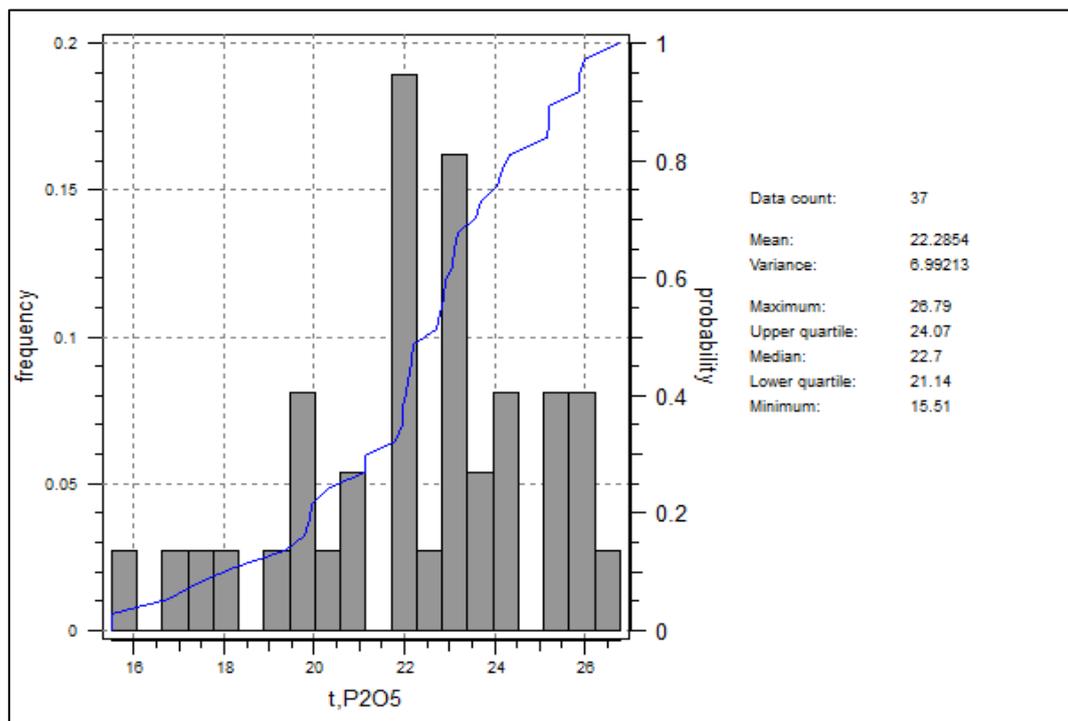
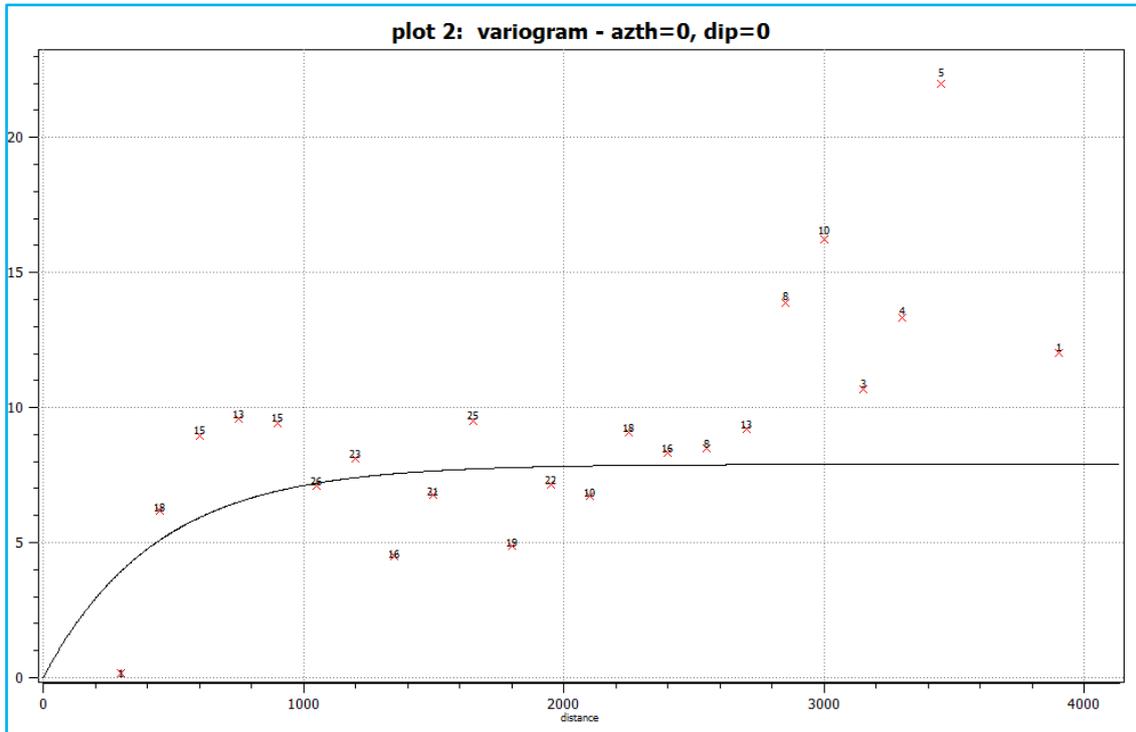


Figure 8. Histogramme de teneur de la couche thanétien inférieur.

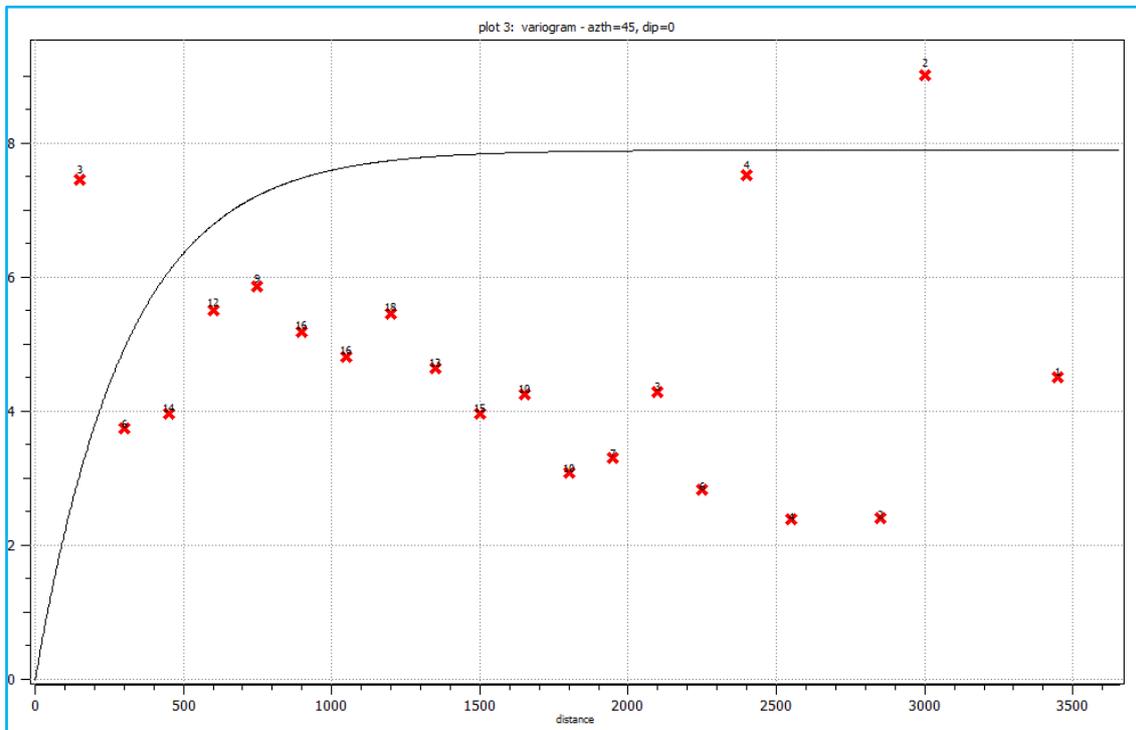
III. Variogrammes directionnelles des épaisseurs

III.1. Couche yprésien

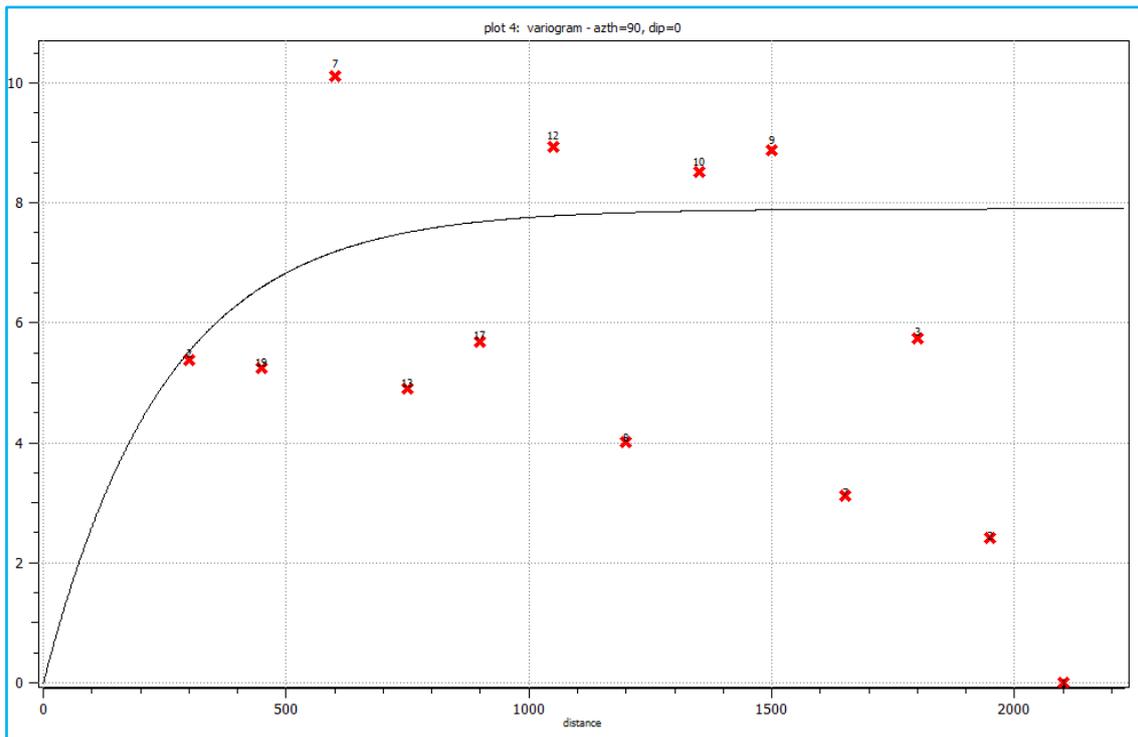
a) 0° par rapport à l'axe azimutal :



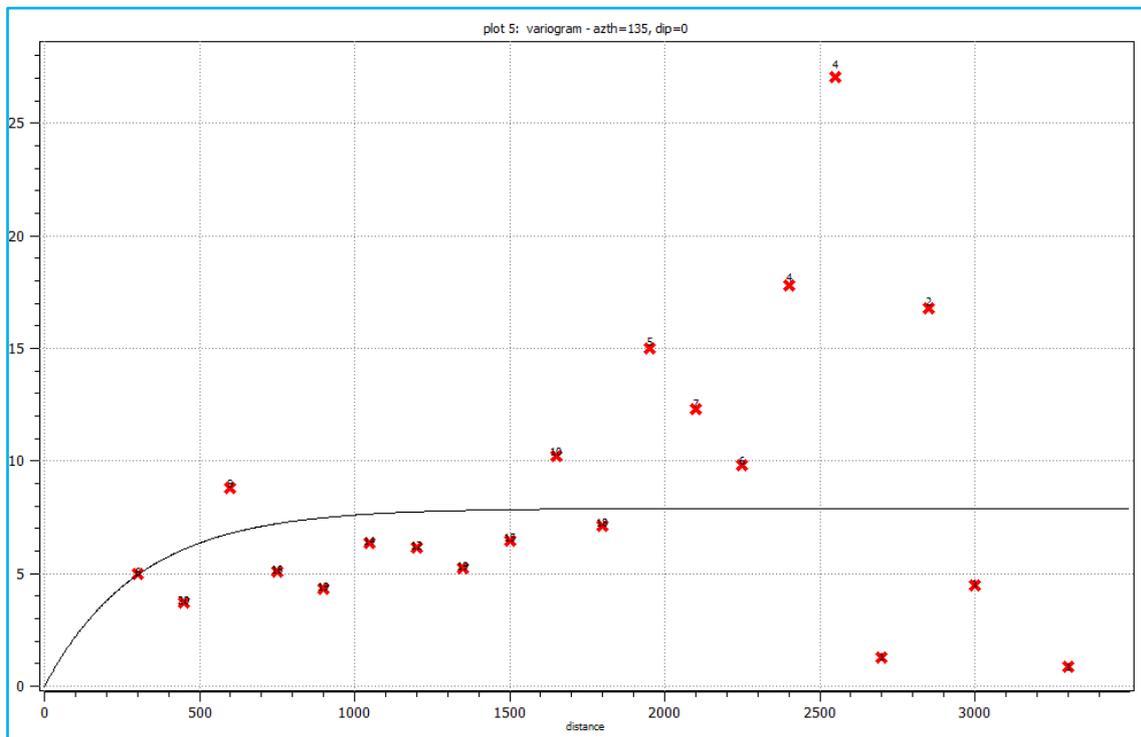
b) 45° par rapport à l'axe azimutal :



c) 90° par rapport à l'axe azimutal :

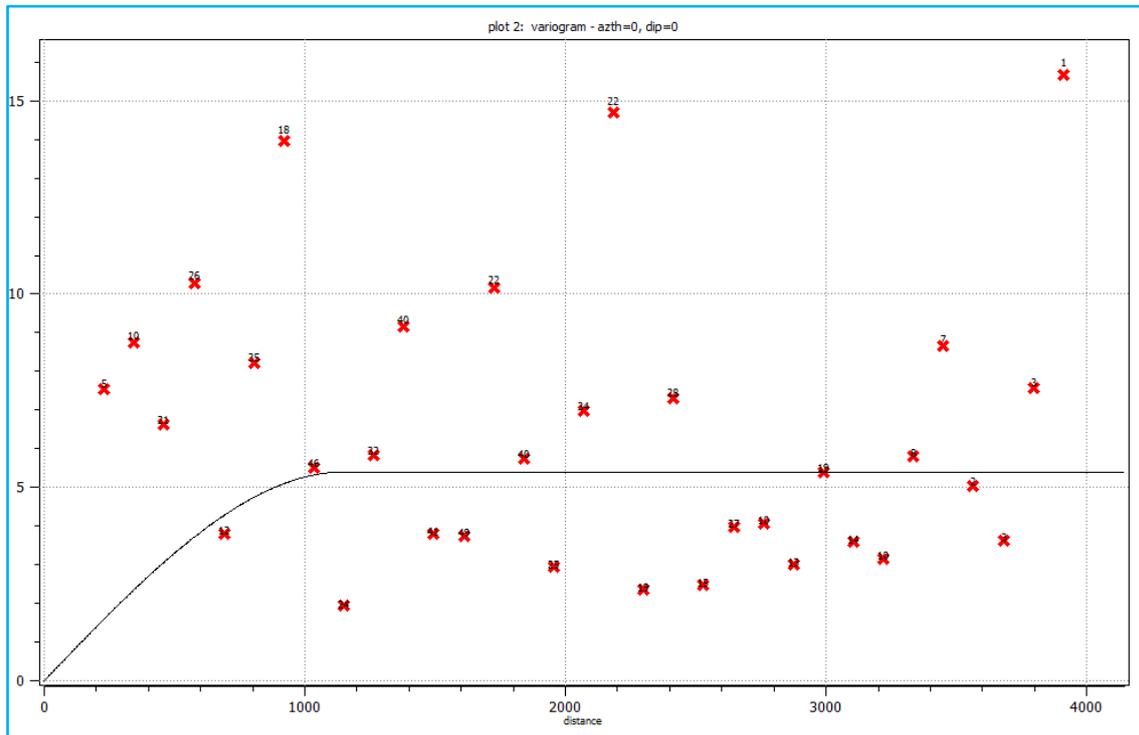


d) 135° par rapport à l'axe azimutal :

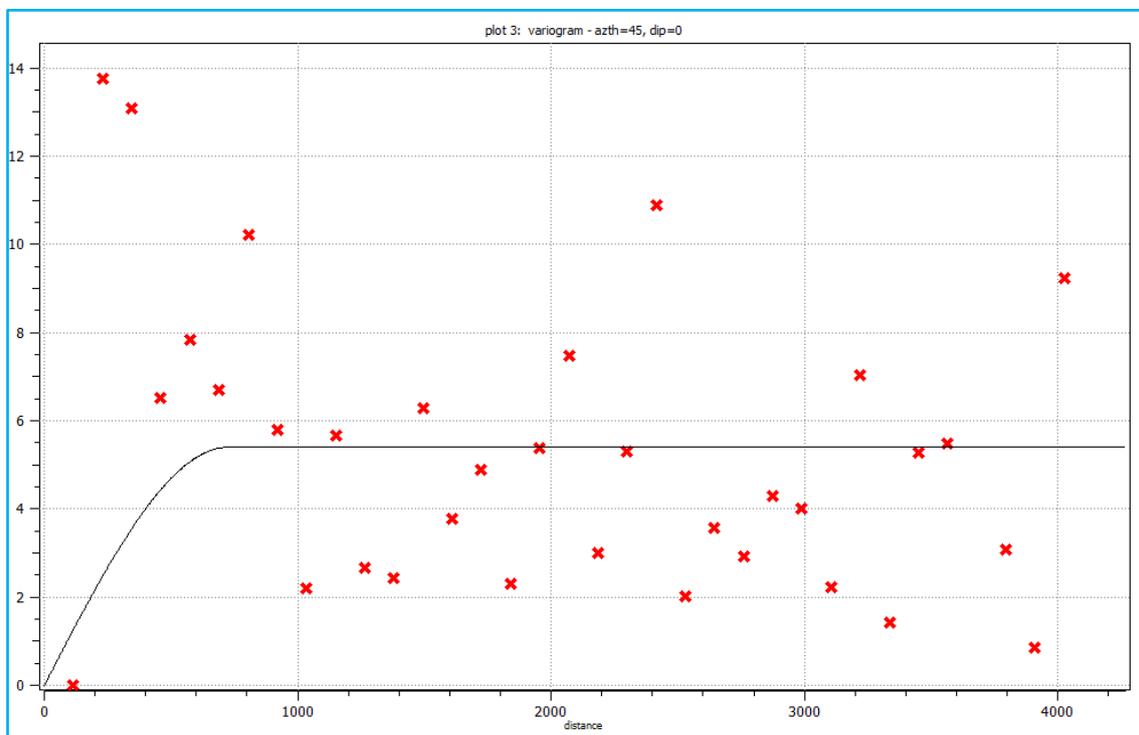


III.2. Couche sommitale

a) 0° par rapport à l'axe azimutal :

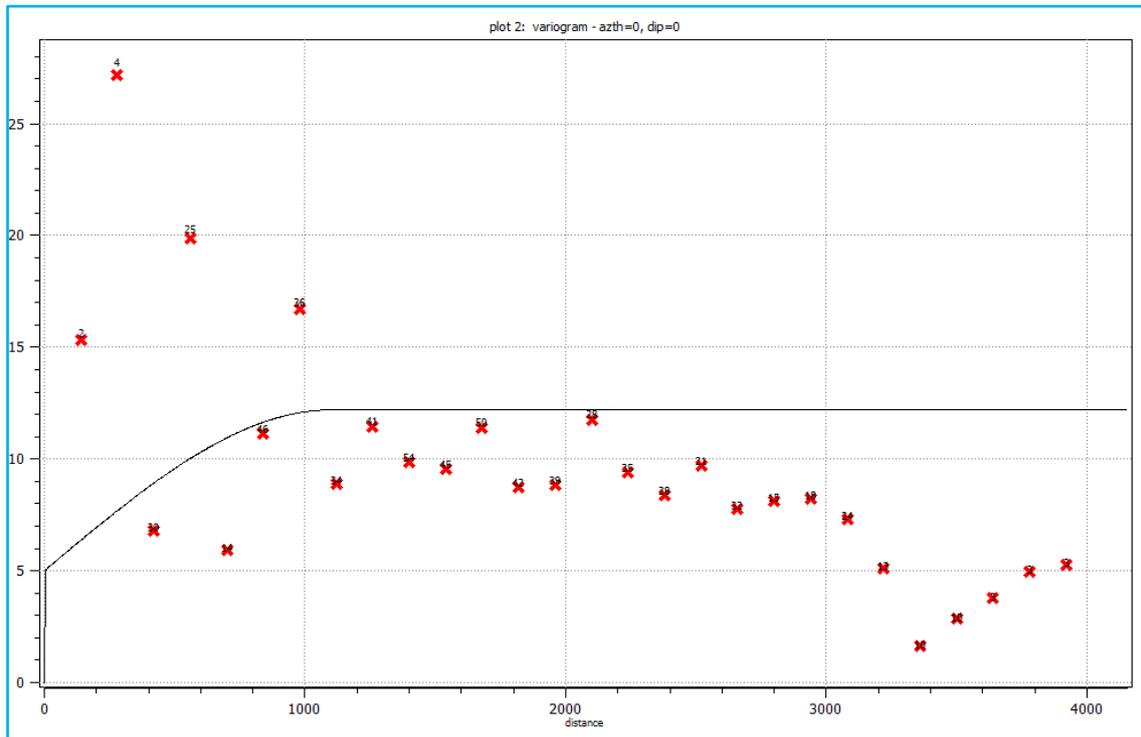


b) 45° par rapport à l'axe azimutal :

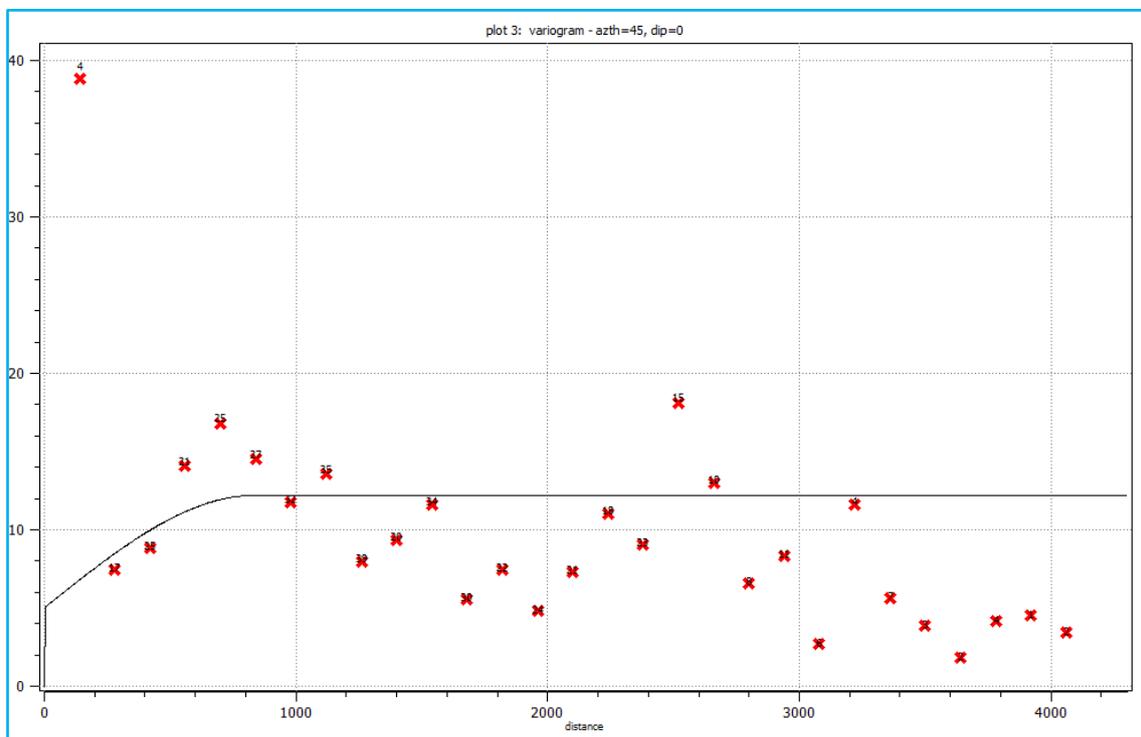


III.3. Couche basale

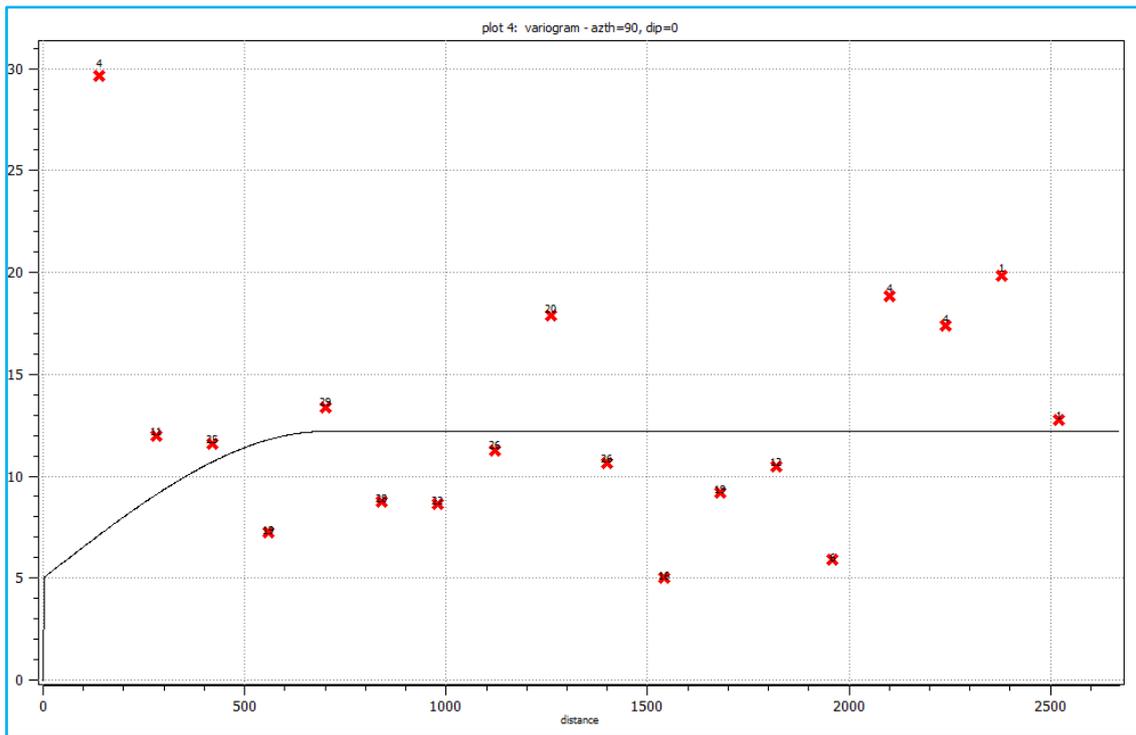
a) 0° par rapport à l'axe azimutal :



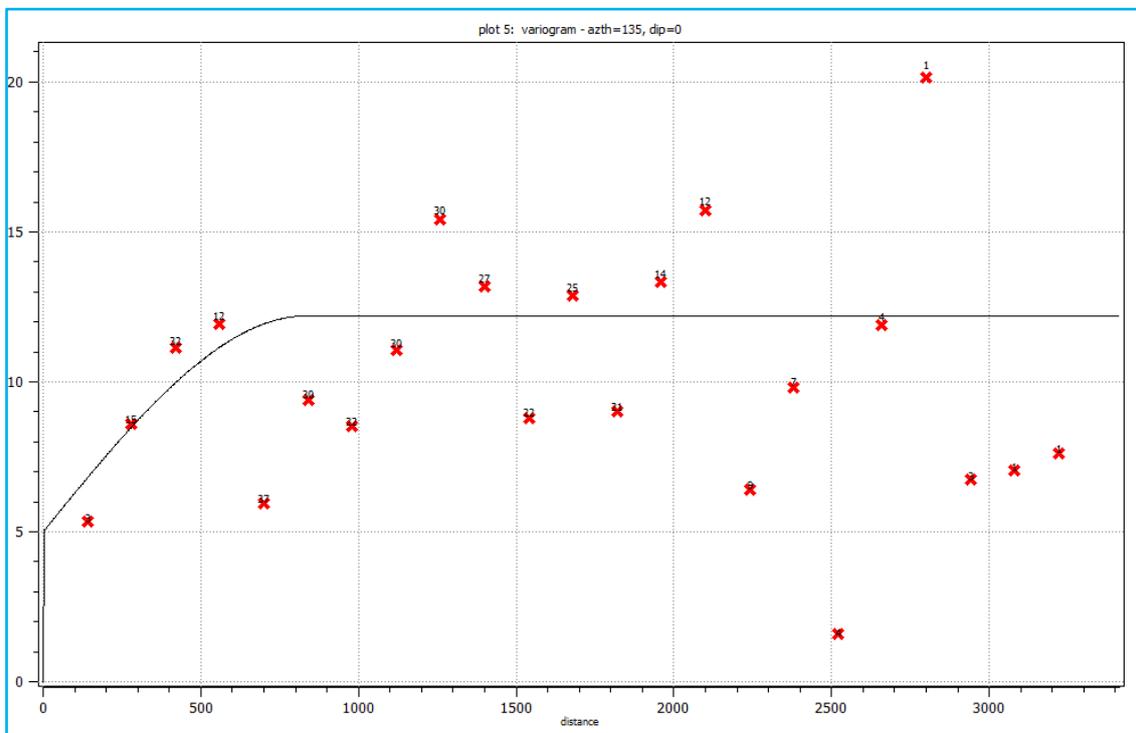
b) 45° par rapport à l'axe azimutal :



c) 90° par rapport à l'axe azimutal :

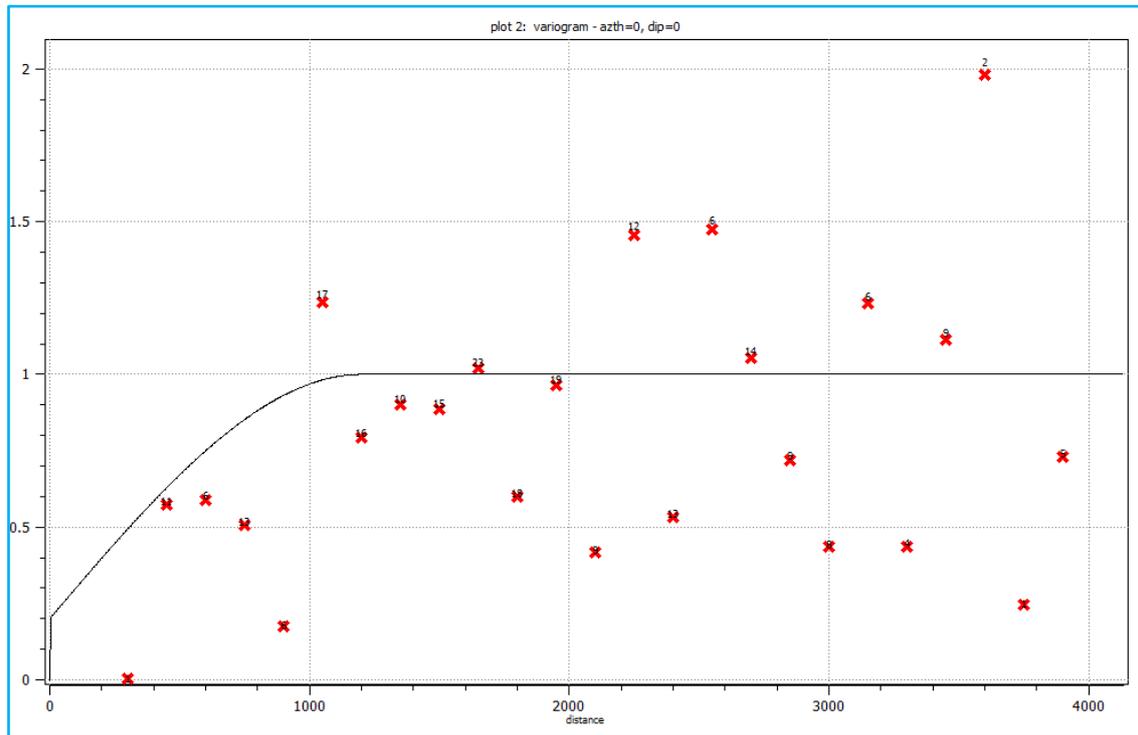


d) 135° par rapport à l'axe azimutal :

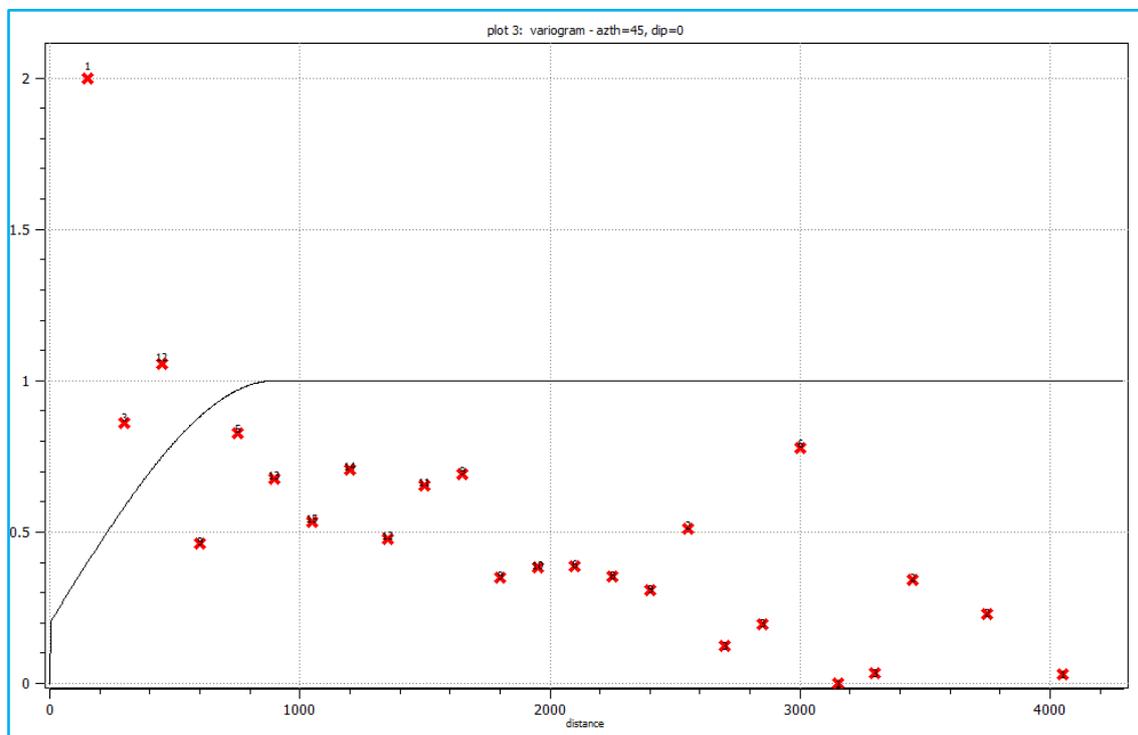


III.4. Couche du thanétien inférieur

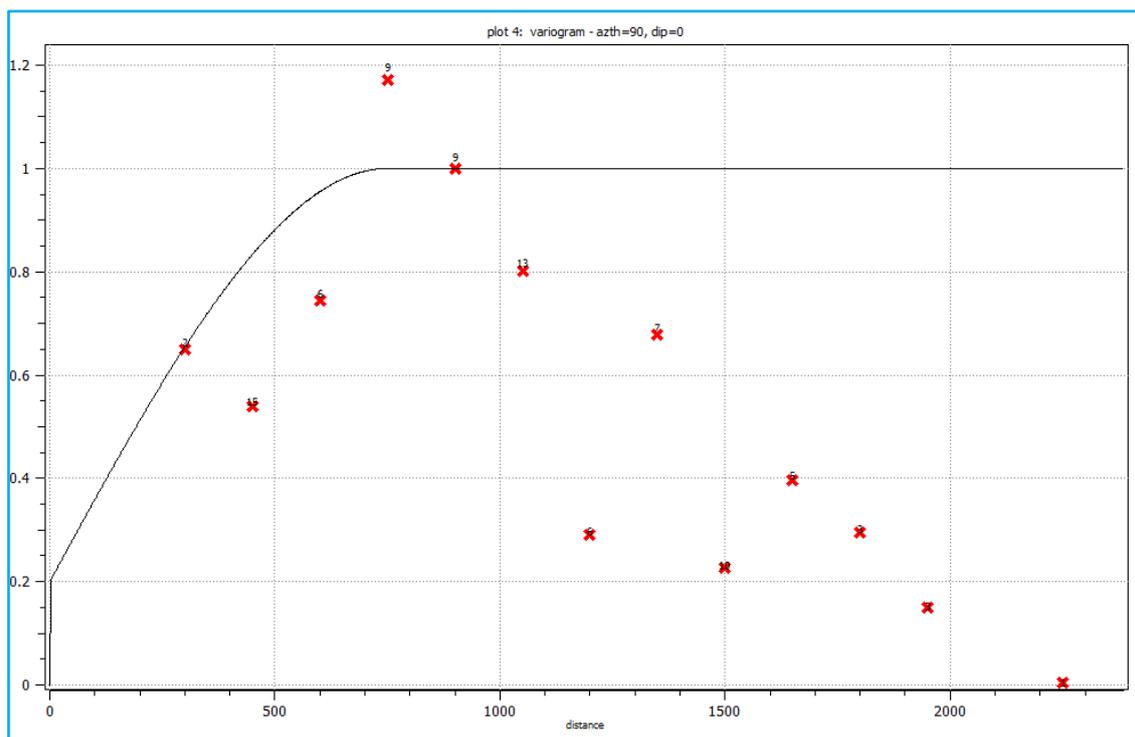
a) 0° par rapport à l'axe azimutal :



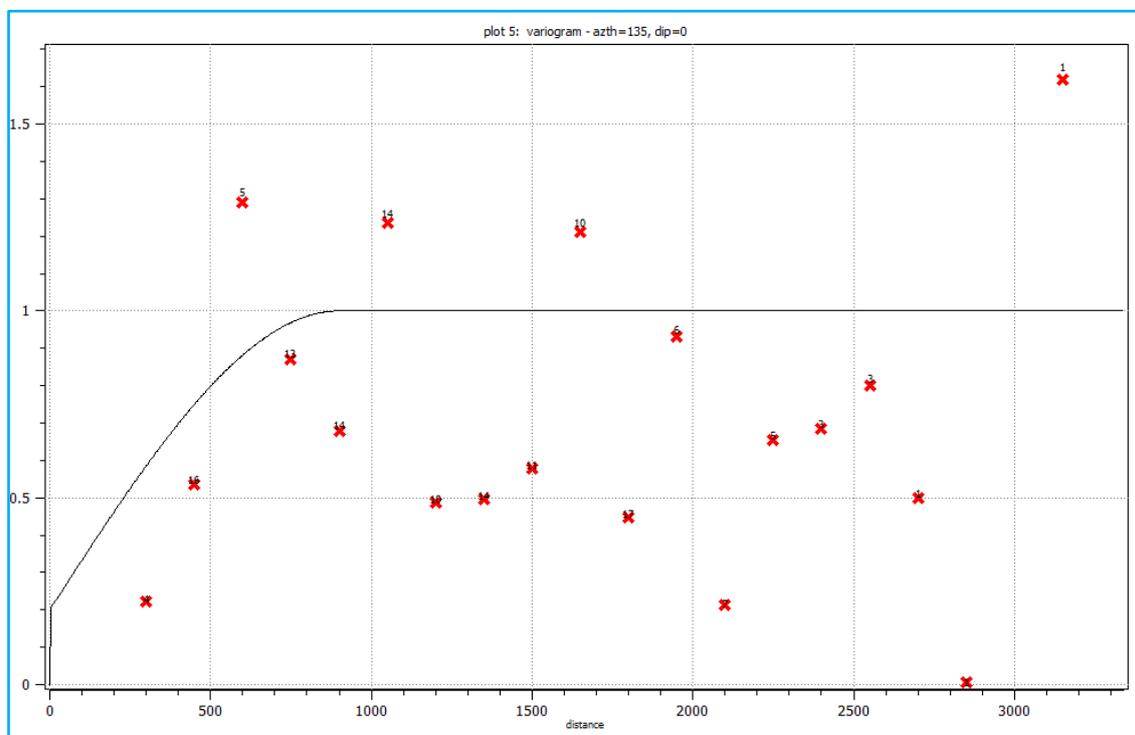
b) 45° par rapport à l'axe azimutal :



c) 90° par rapport à l'axe azimutal :



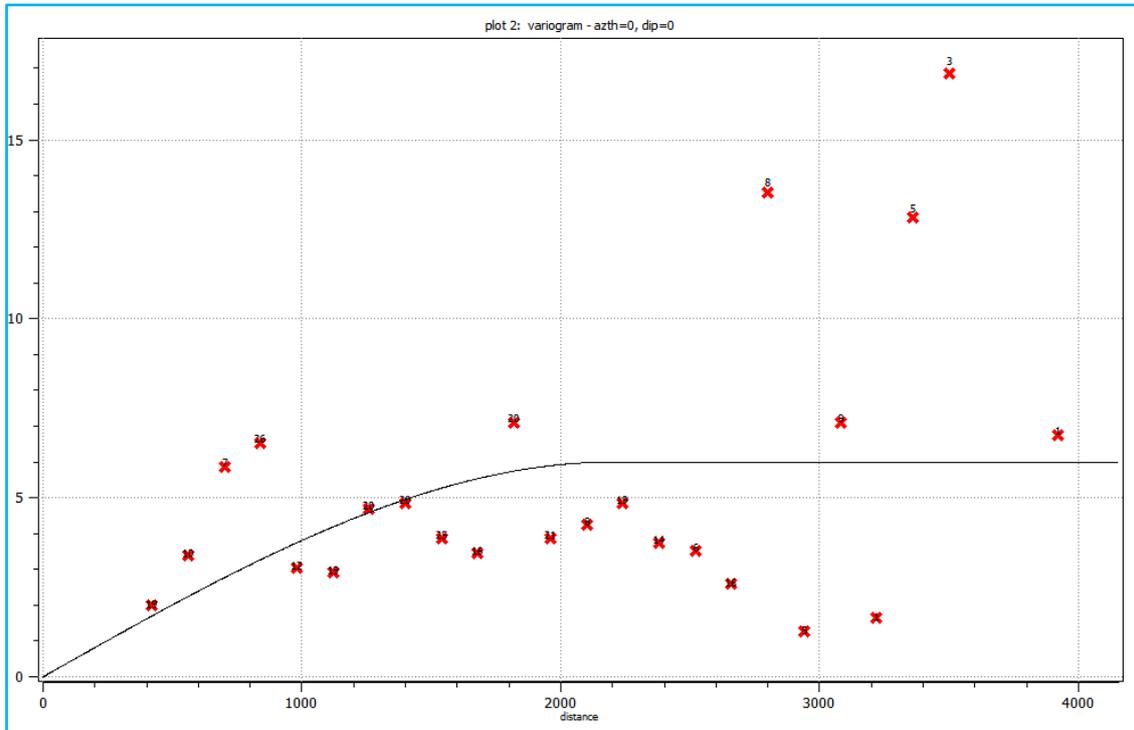
d) 135° par rapport à l'axe azimutal :



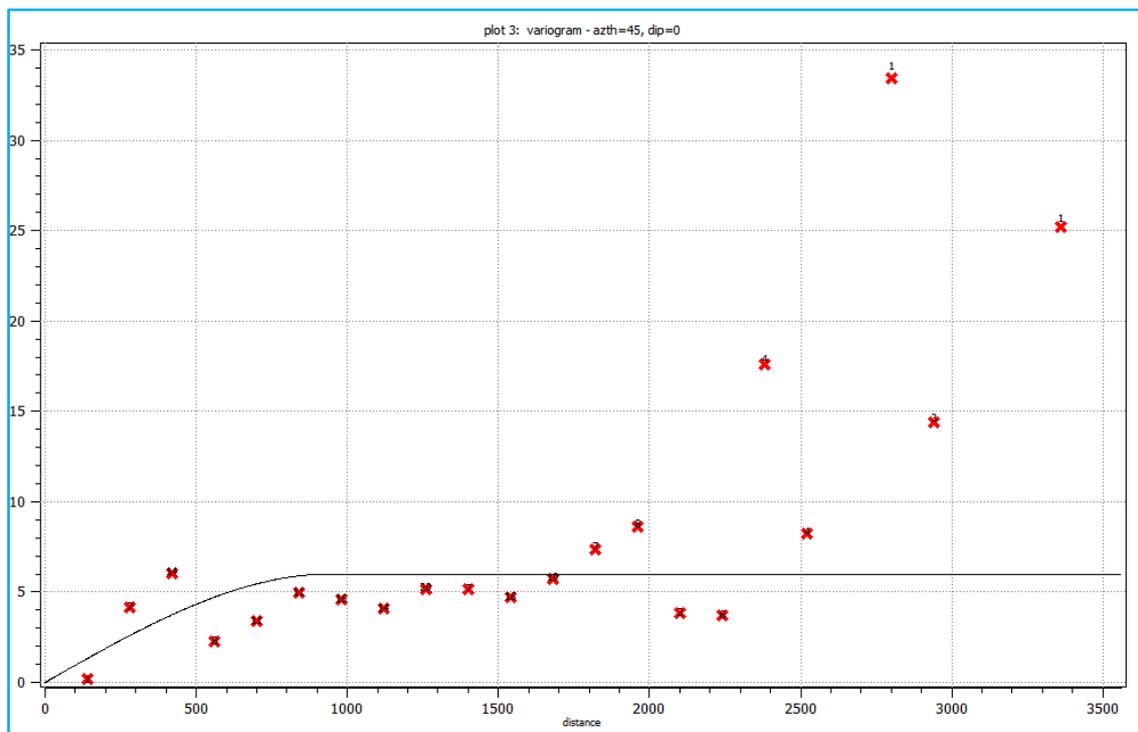
IV. Variogrammes directionnelles des teneurs

IV.1. Couche yprésien

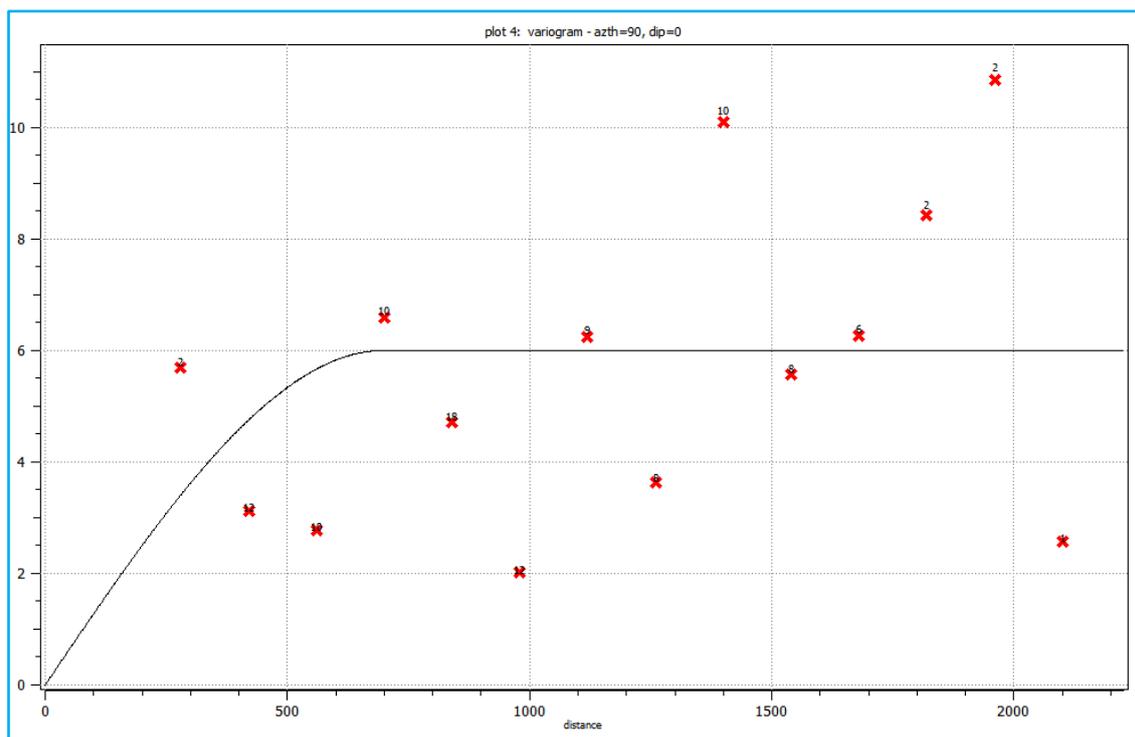
a) 0° par rapport à l'axe azimutal :



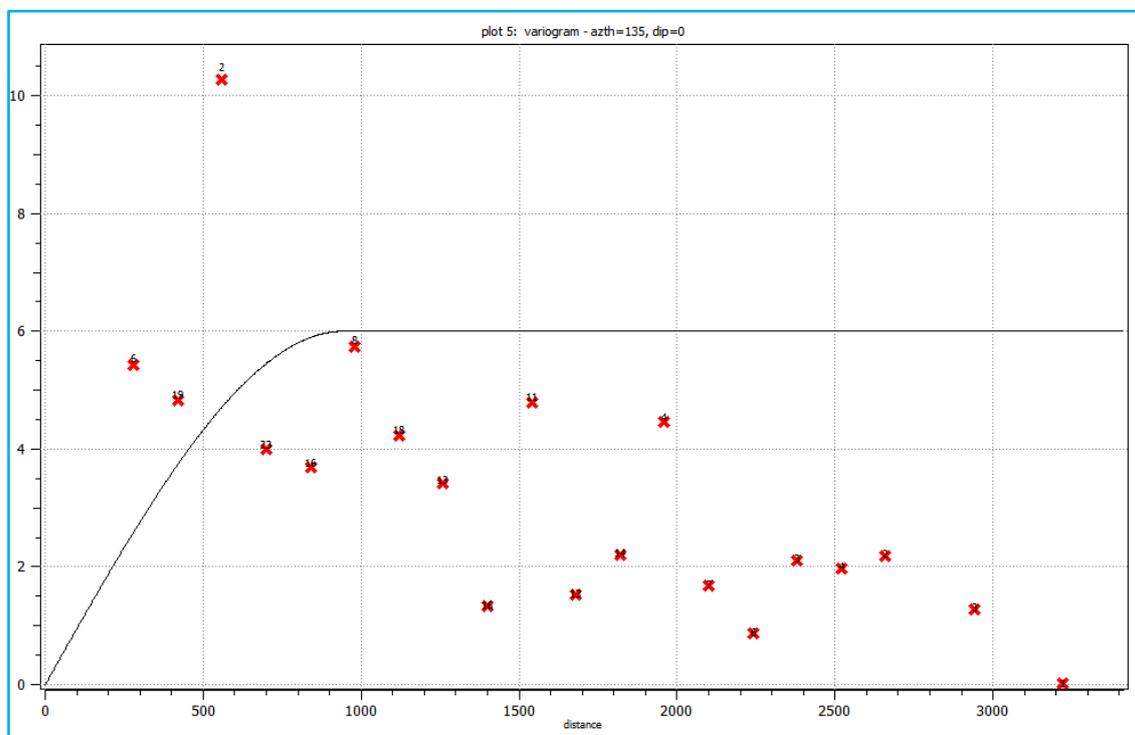
b) 45° par rapport à l'axe azimutal :



c) 90° par rapport à l'axe azimutal :

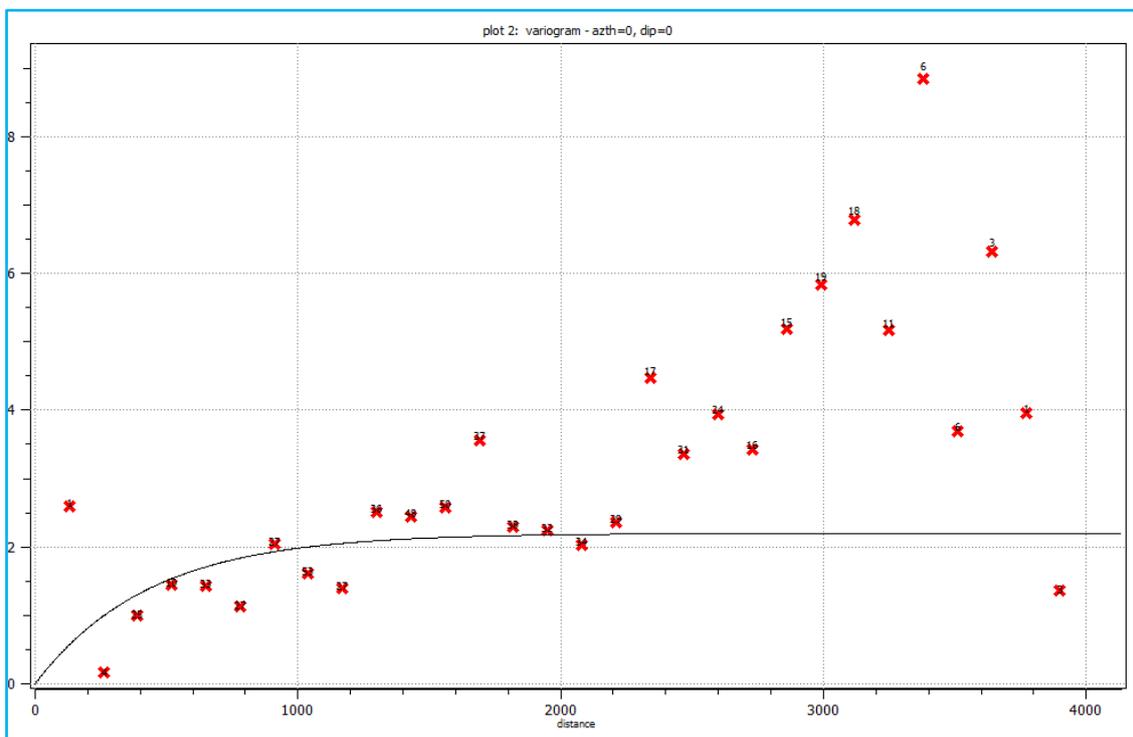


d) 135° par rapport à l'axe azimutal :

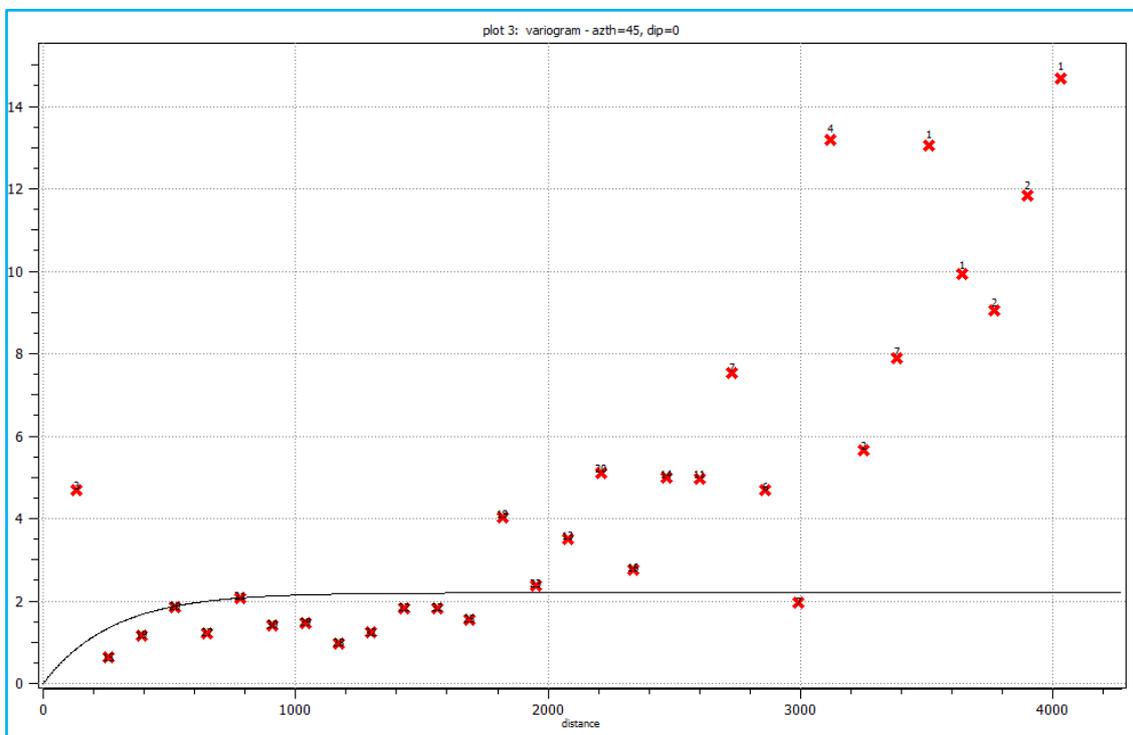


IV.2. Couche sommitale

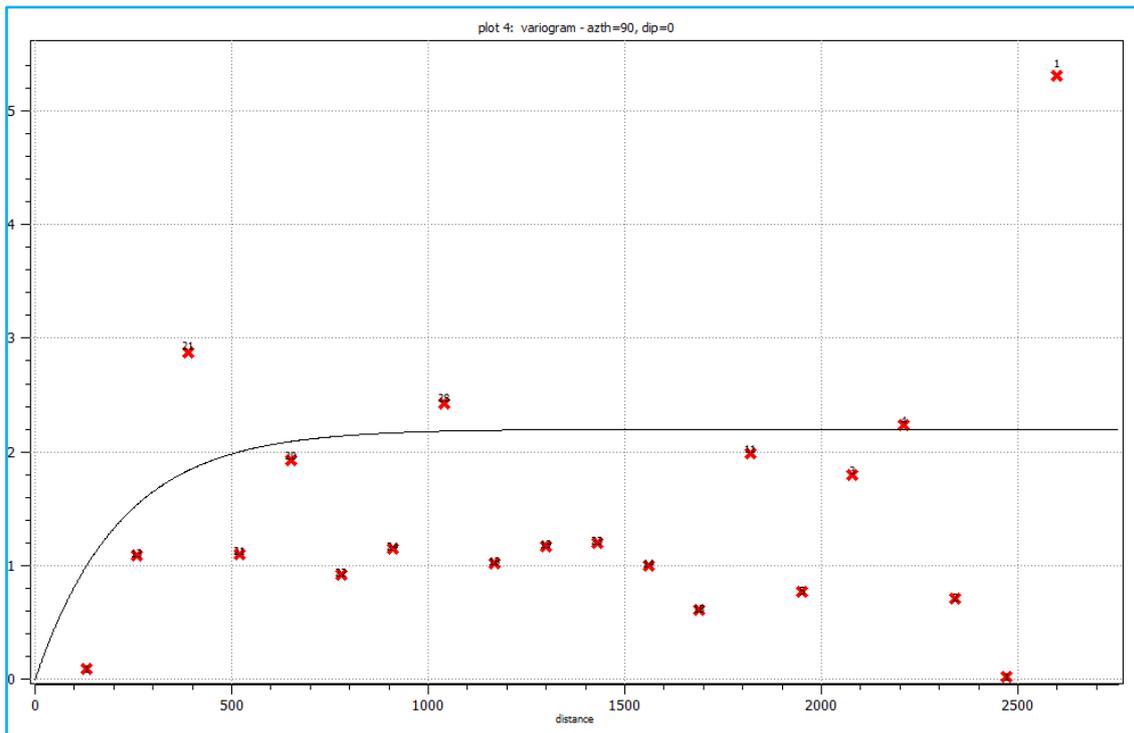
a) 0° par rapport à l'axe azimutal :



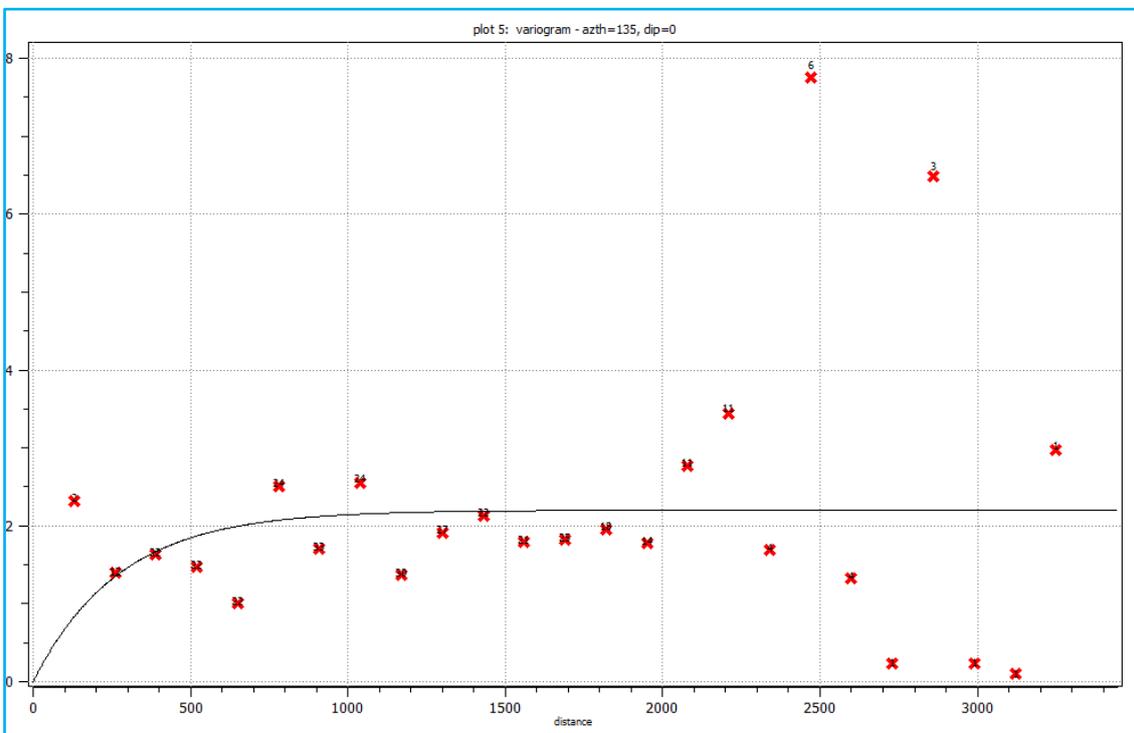
b) 45° par rapport à l'axe azimutal :



c) 90° par rapport à l'axe azimutal :

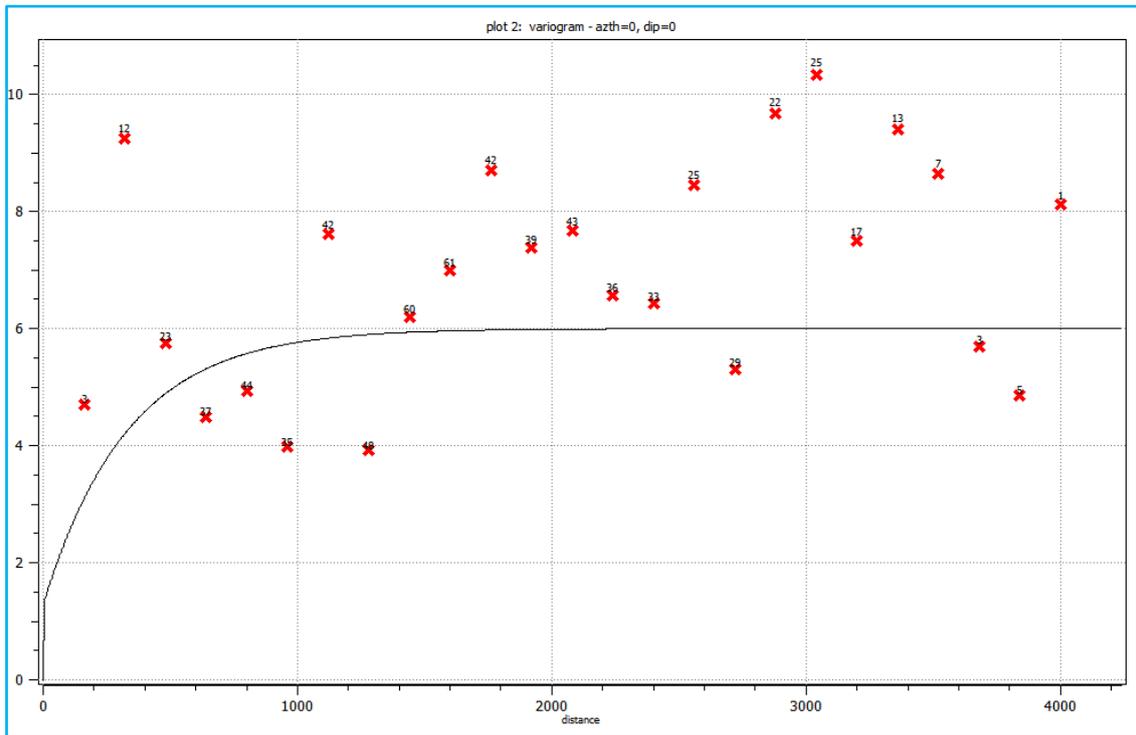


d) 135° par rapport à l'axe azimutal :

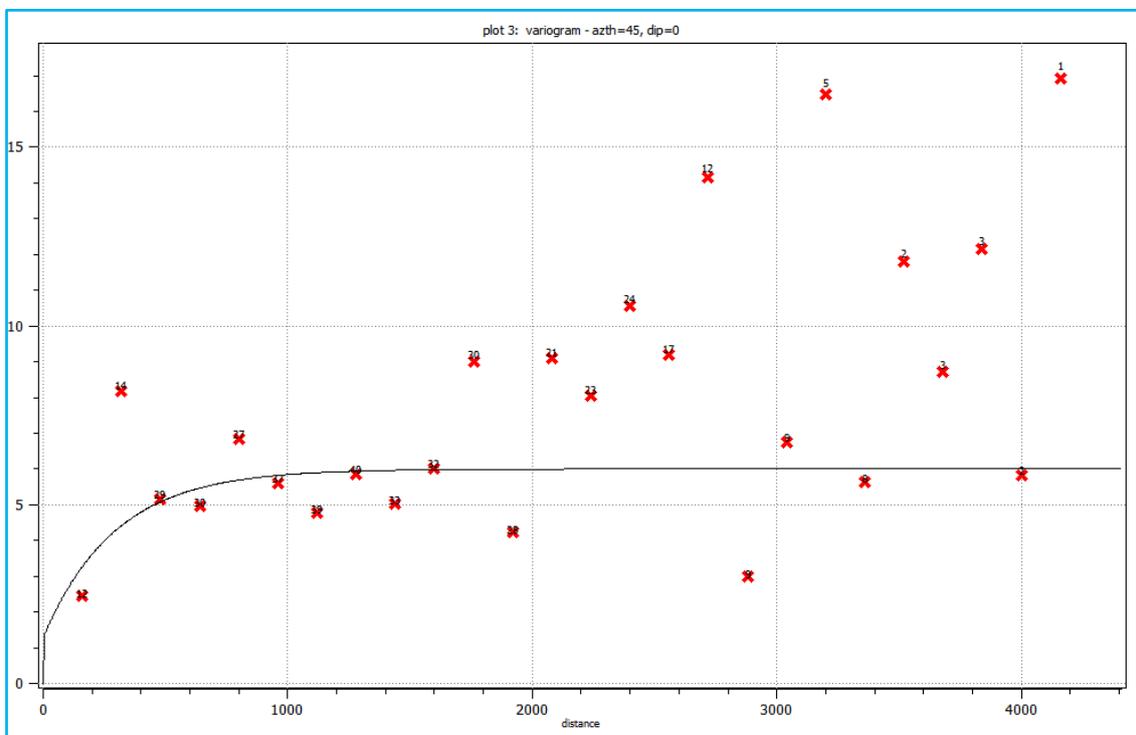


IV.3. Couche basale

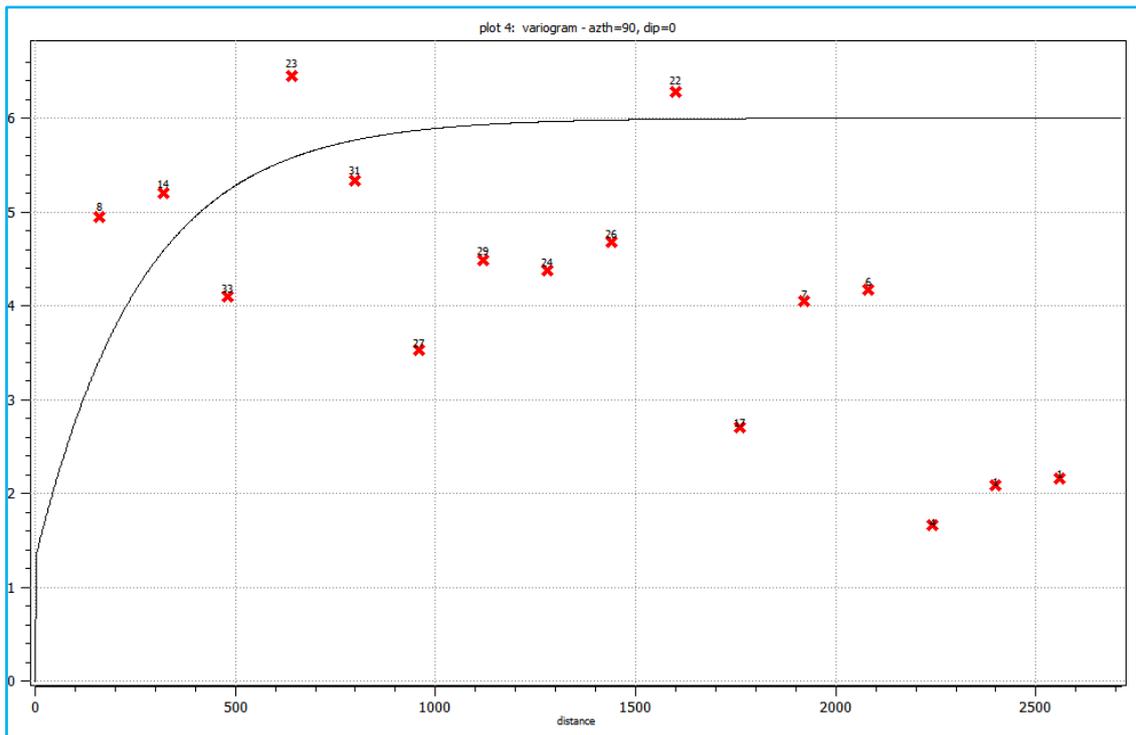
a) 0° par rapport à l'axe azimutal :



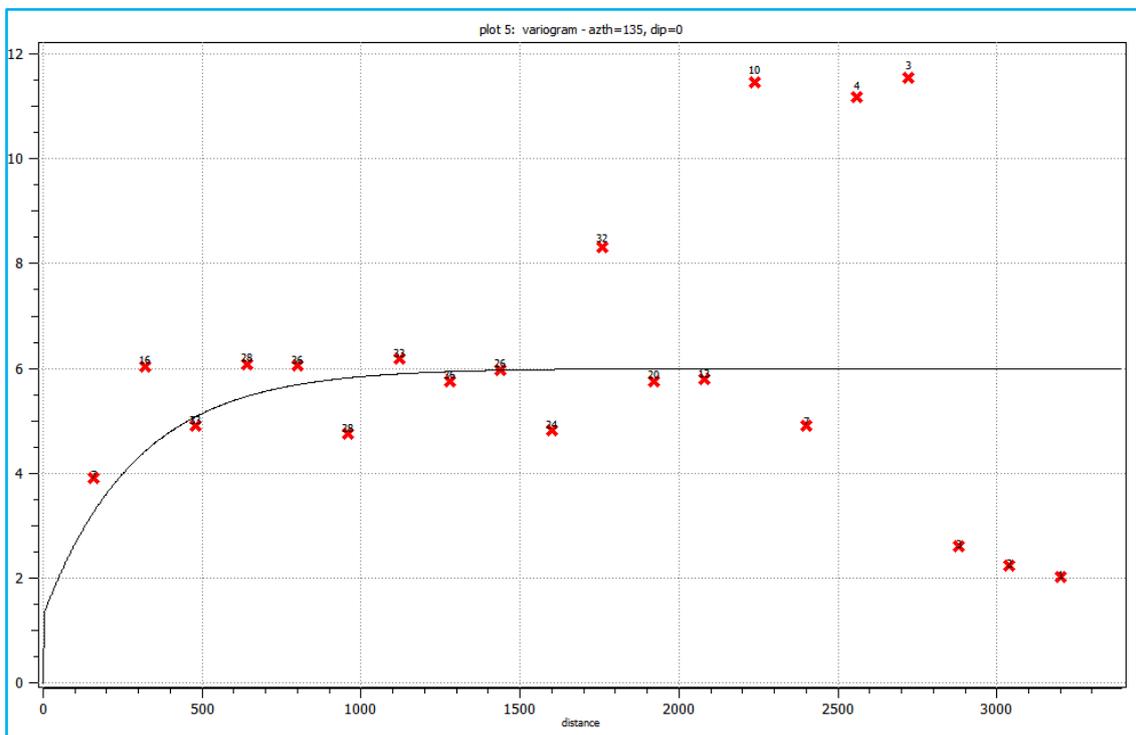
b) 45° par rapport à l'axe azimutal :



c) 90° par rapport à l'axe azimutal :

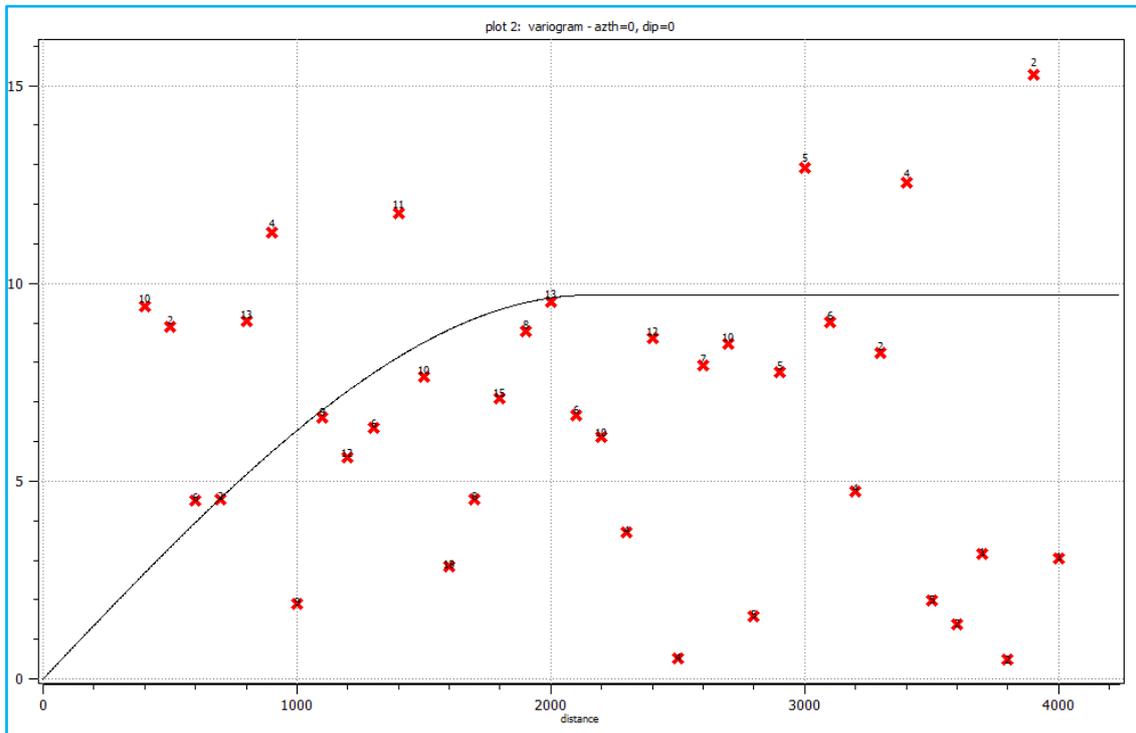


d) 135° par rapport à l'axe azimutal :

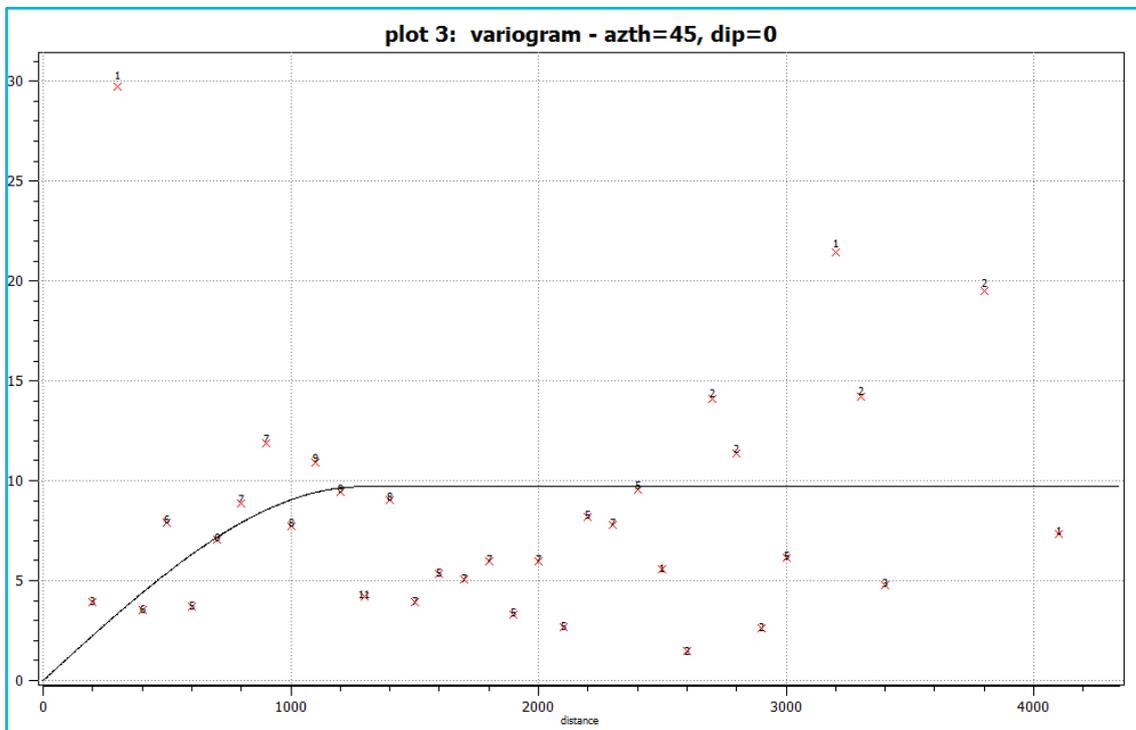


IV.4. Couche du thanétien inférieur

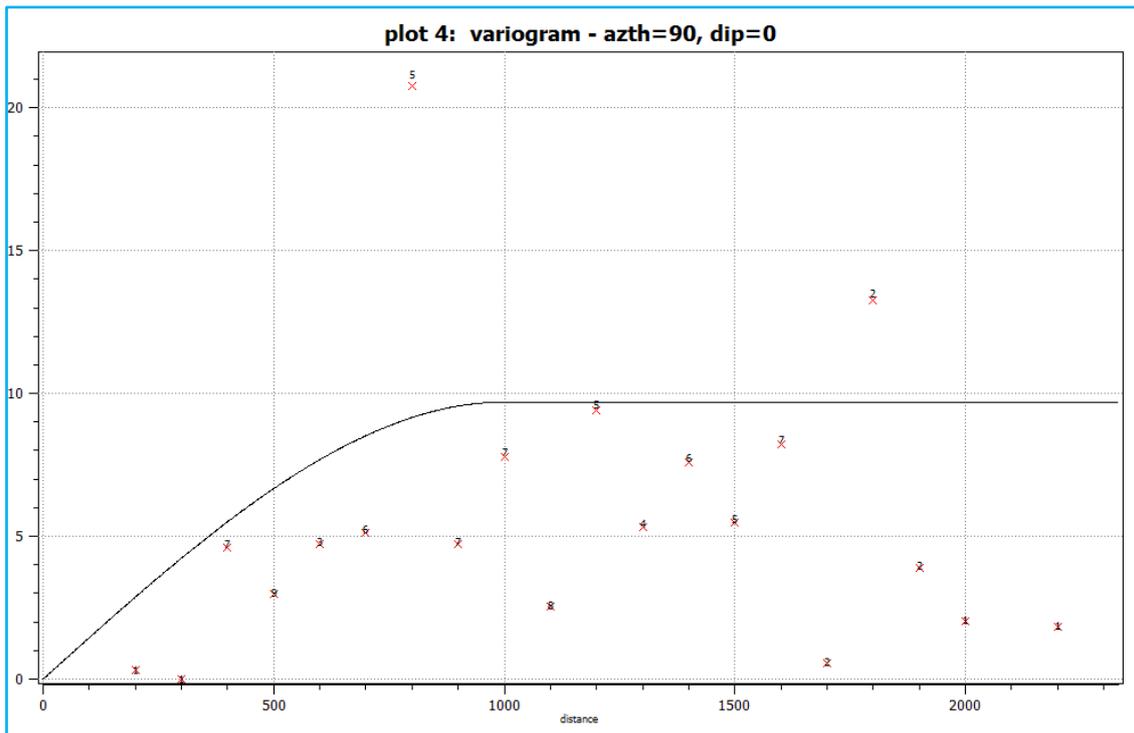
a) 0° par rapport à l'axe azimutal :



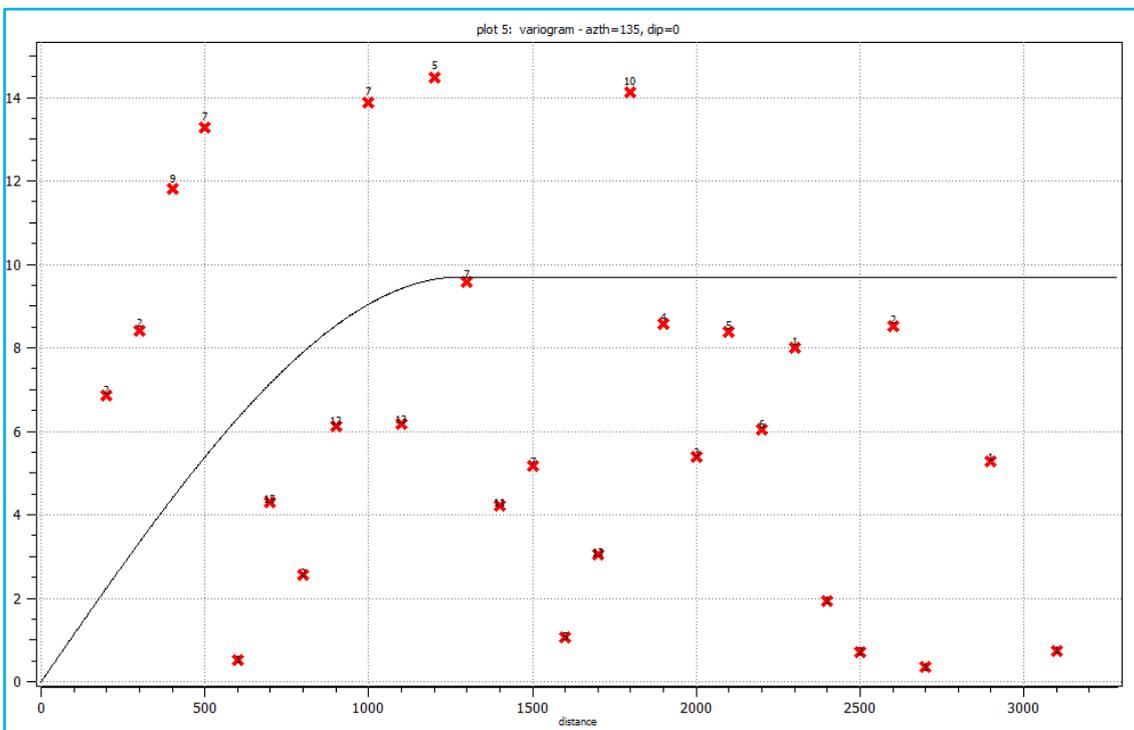
b) 45° par rapport à l'axe azimutal :



c) 90° par rapport à l'axe azimutal :

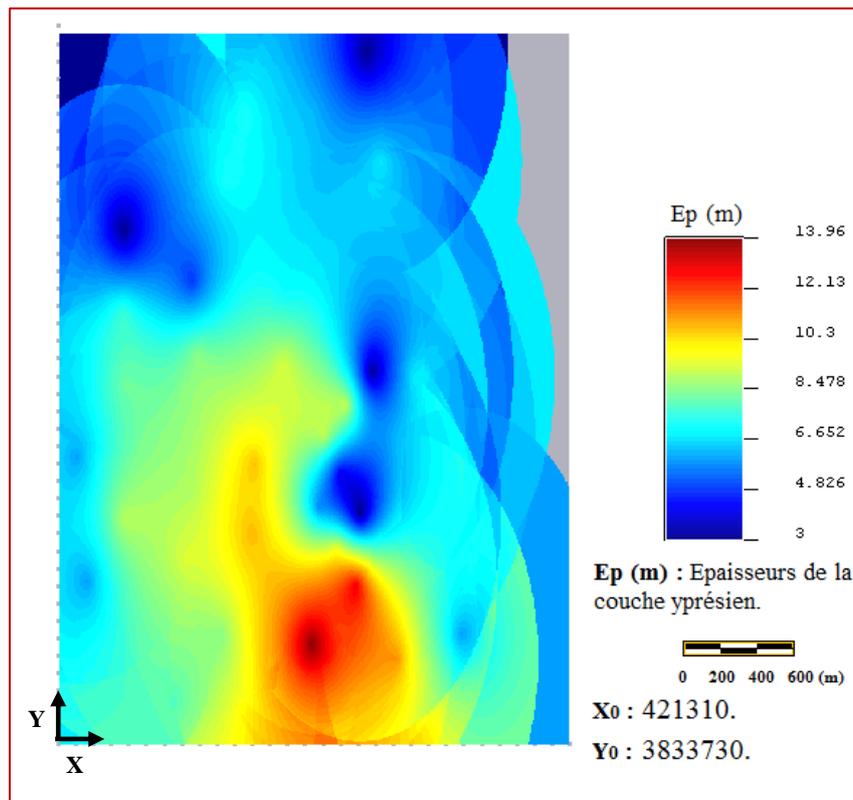
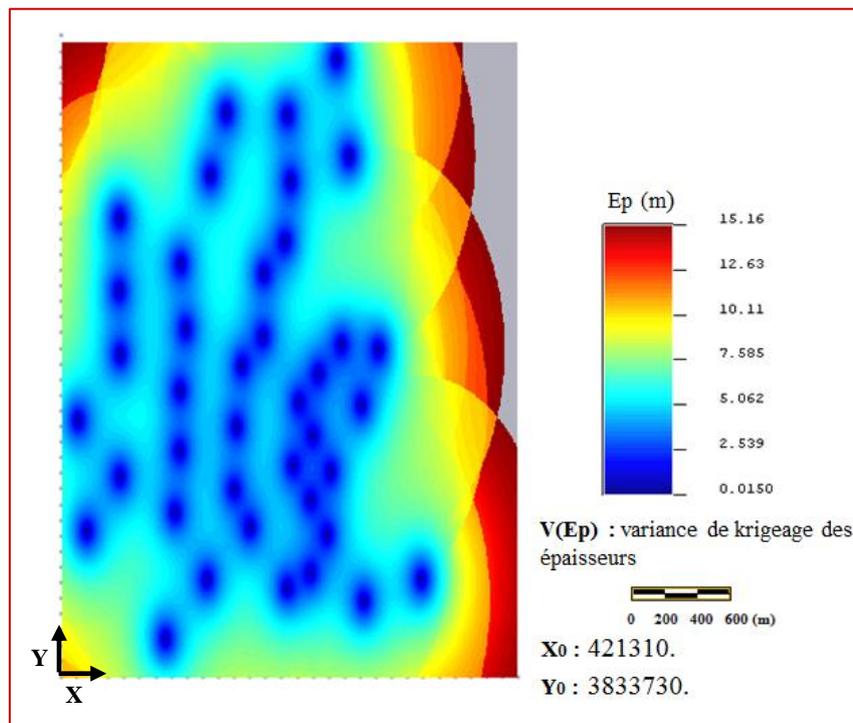


d) 135° par rapport à l'axe azimutal :



Annexe II :**I. Cartes du krigeage des épaisseurs des différentes couches minéralisées**

❖ Couche yprésien

**Figure 1.** Carte représentative du krigeage des épaisseurs de la couche yprésien.**Figure 2.** Carte de la variance de krigeage des épaisseurs de la couche yprésien.

❖ Couche sommitale

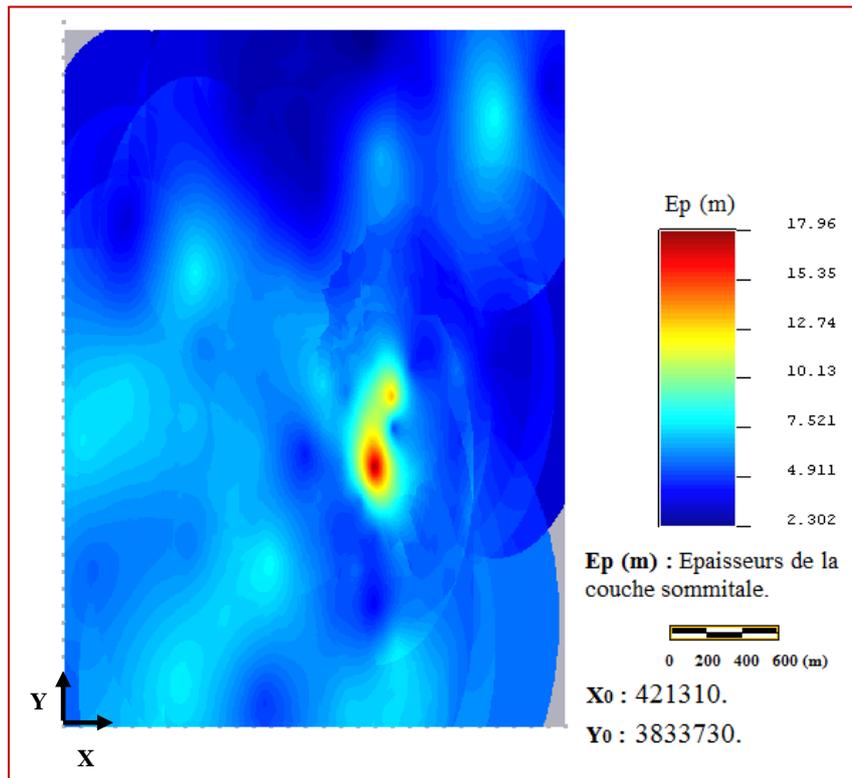


Figure 3. Carte représentative du krigeage des épaisseurs de la couche sommitale.

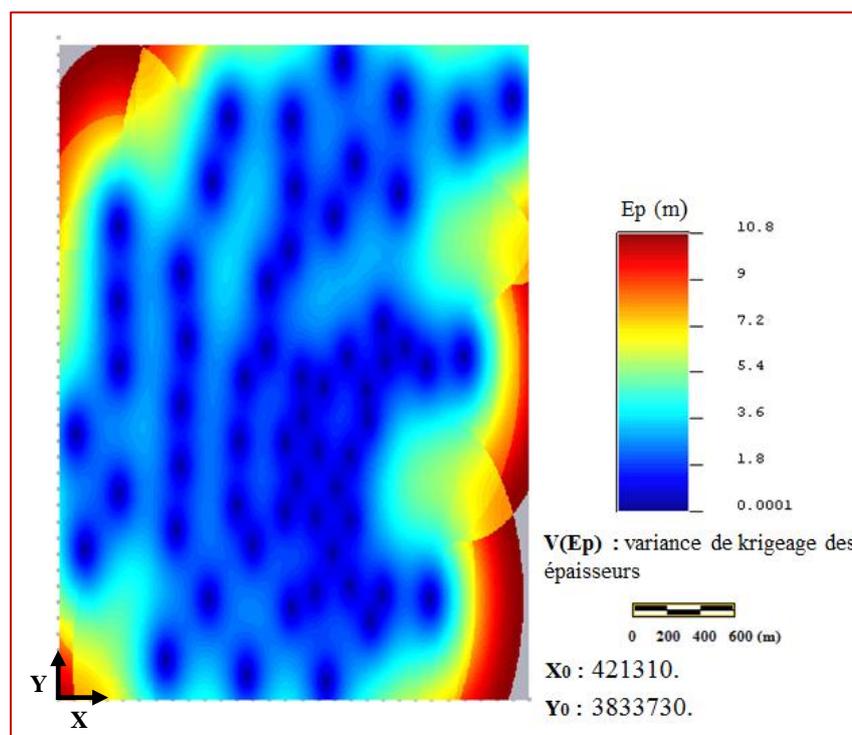


Figure 4. Carte de la variance de krigeage des épaisseurs de la couche sommitale.

❖ Couche basale

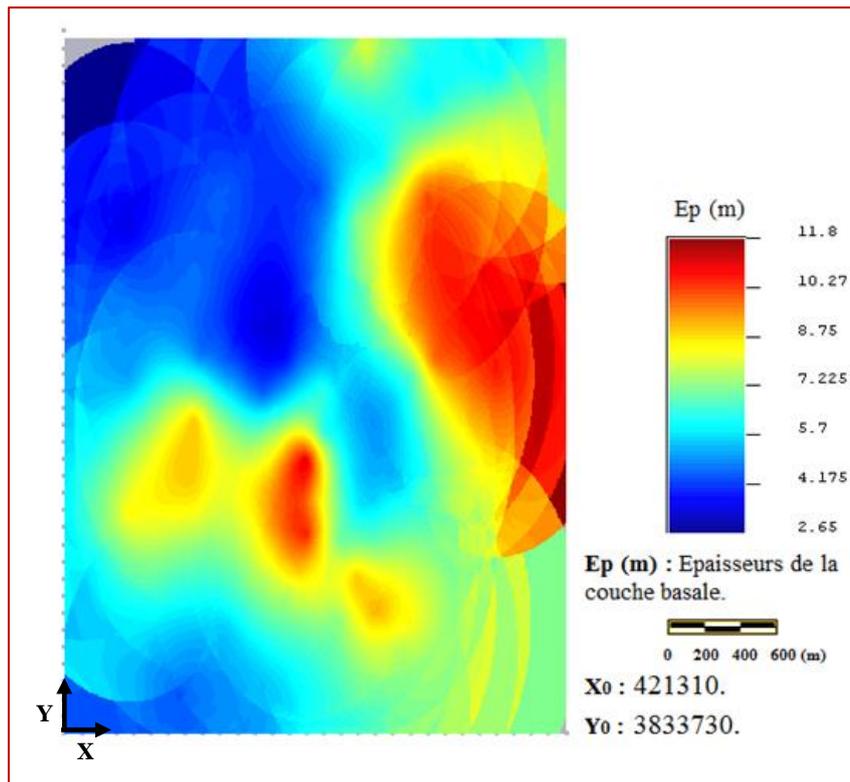


Figure 5. Carte représentative du krigeage des épaisseurs de la couche basale.

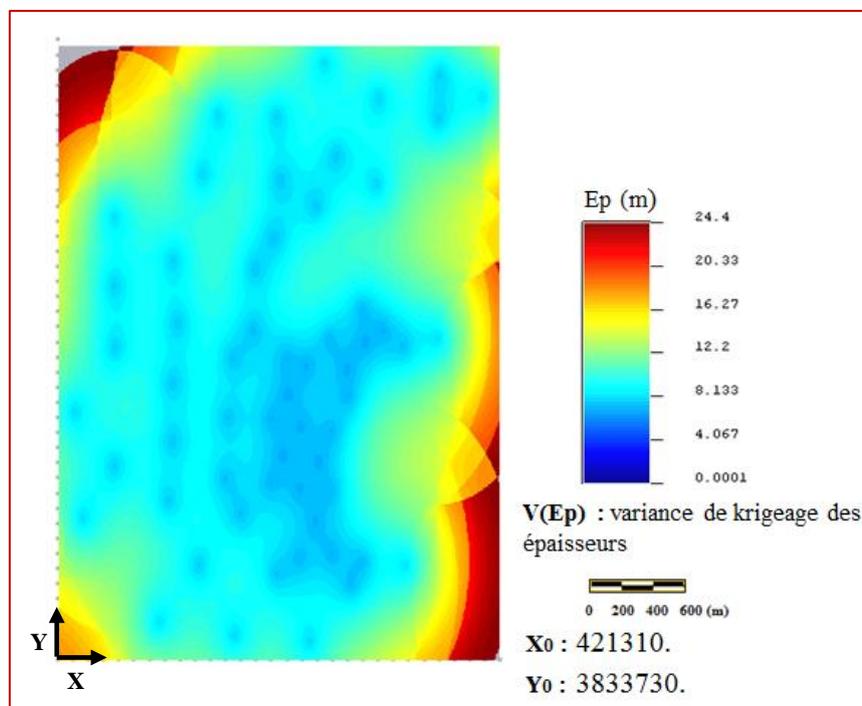


Figure 6. Carte de la variance de krigeage des épaisseurs de la couche basale.

❖ Couche Thanétien inférieur

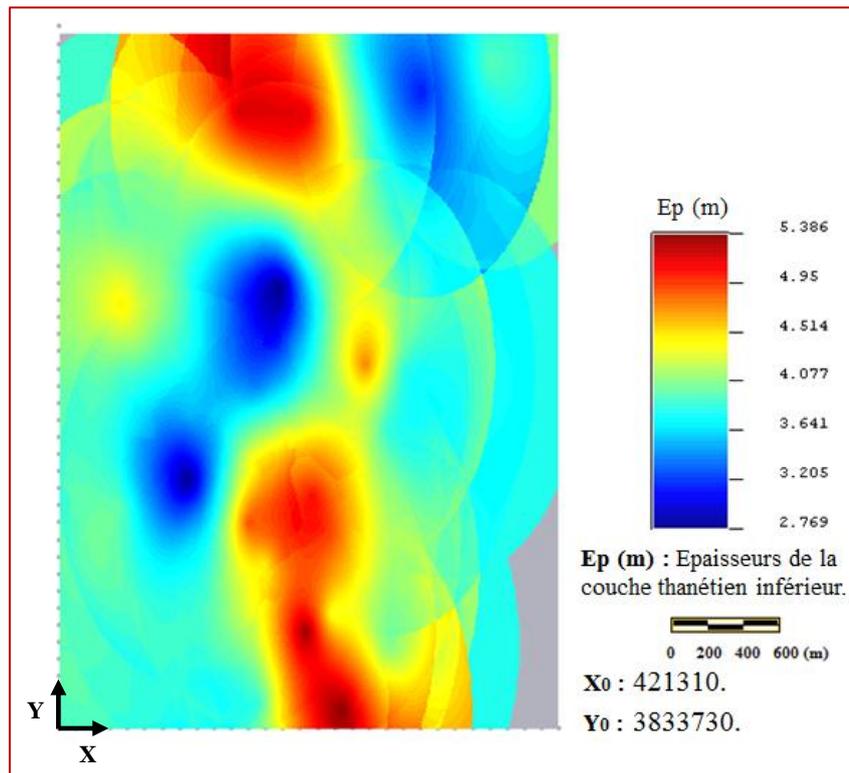


Figure 7. Carte représentative du krigeage des épaisseurs de la couche thanétien inférieur.

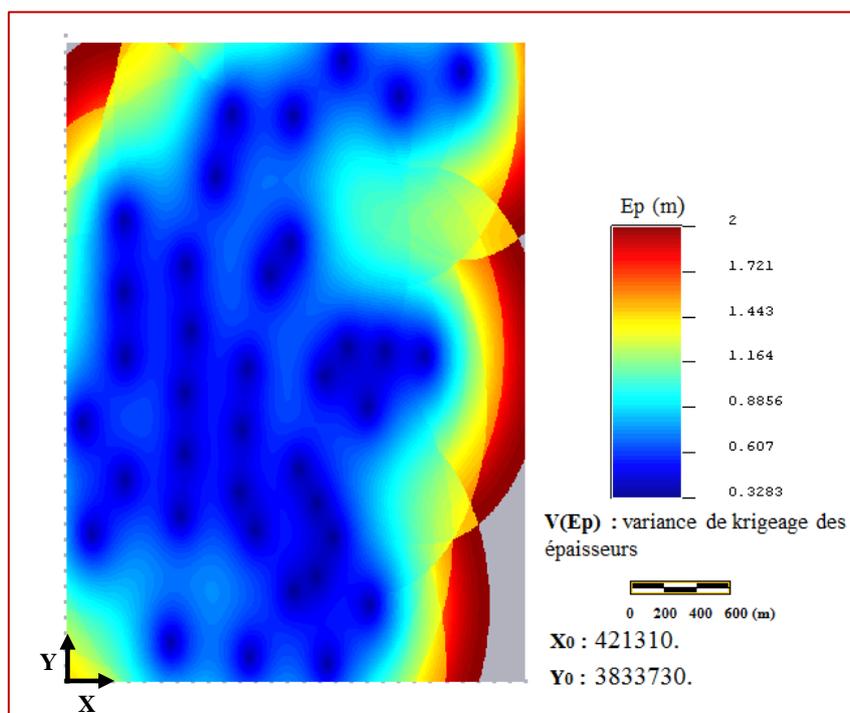


Figure 8. Carte de la variance de krigeage des épaisseurs de la couche thanétien inférieur.

II. Cartes du krigage final des teneurs en P_2O_5 , montrant la répartition de la minéralisation

❖ Couche yprésien

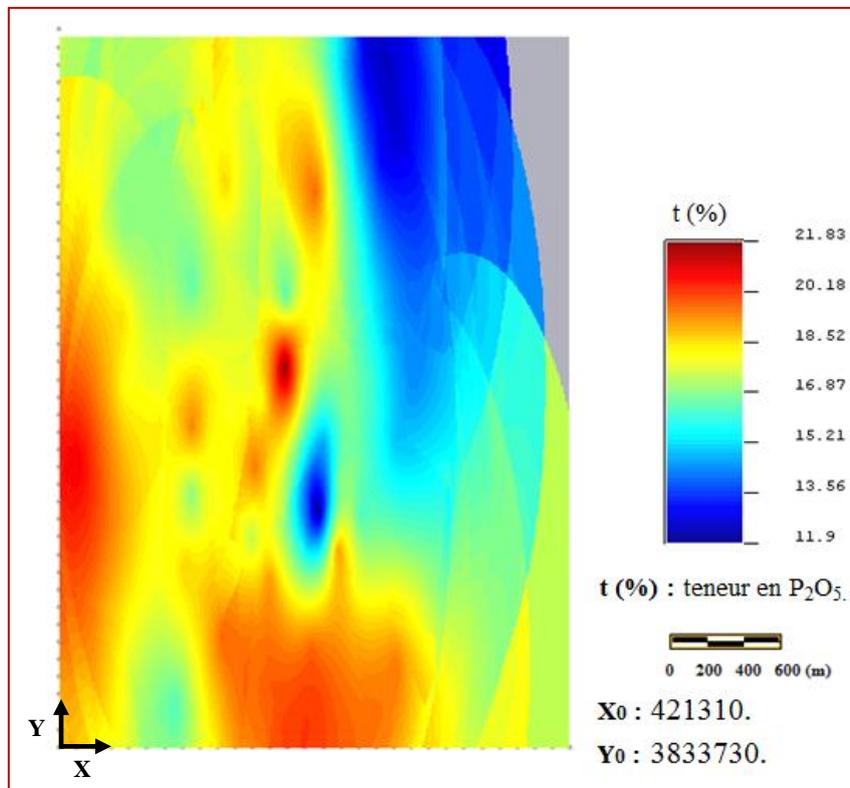


Figure 9. Carte représentative du krigage final des teneurs en P_2O_5 .

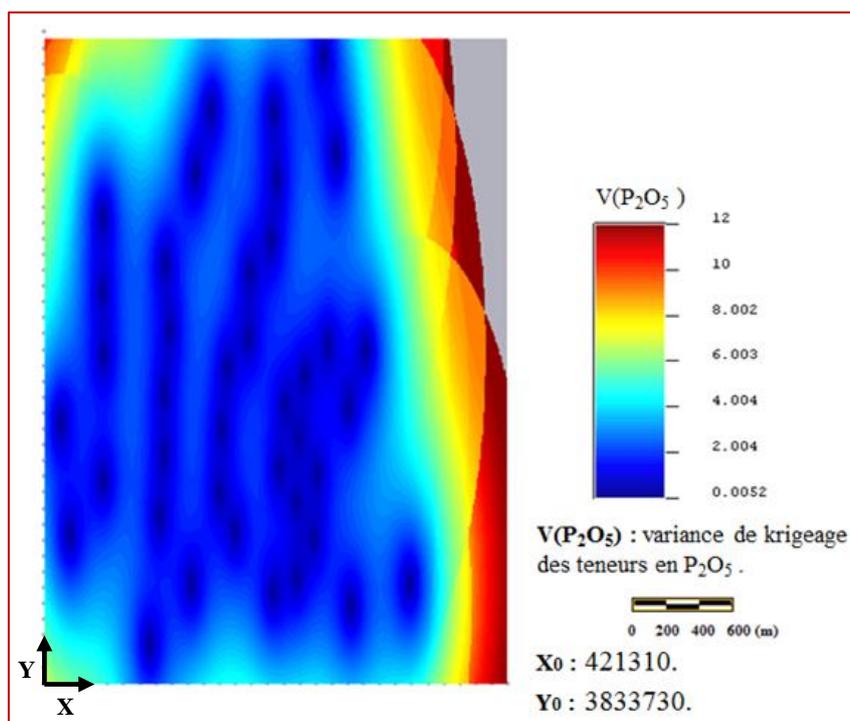


Figure 10. Carte représentative de la variance de krigage des teneurs en P_2O_5 .

❖ Couche sommitale

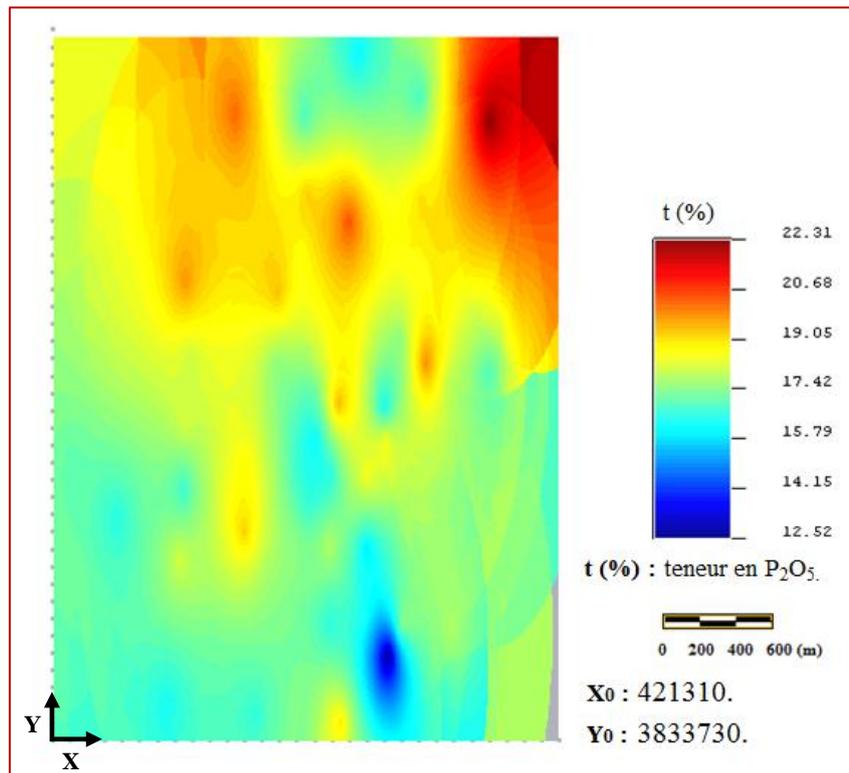


Figure 11. Carte représentative du krigeage final des teneurs en P_2O_5 .

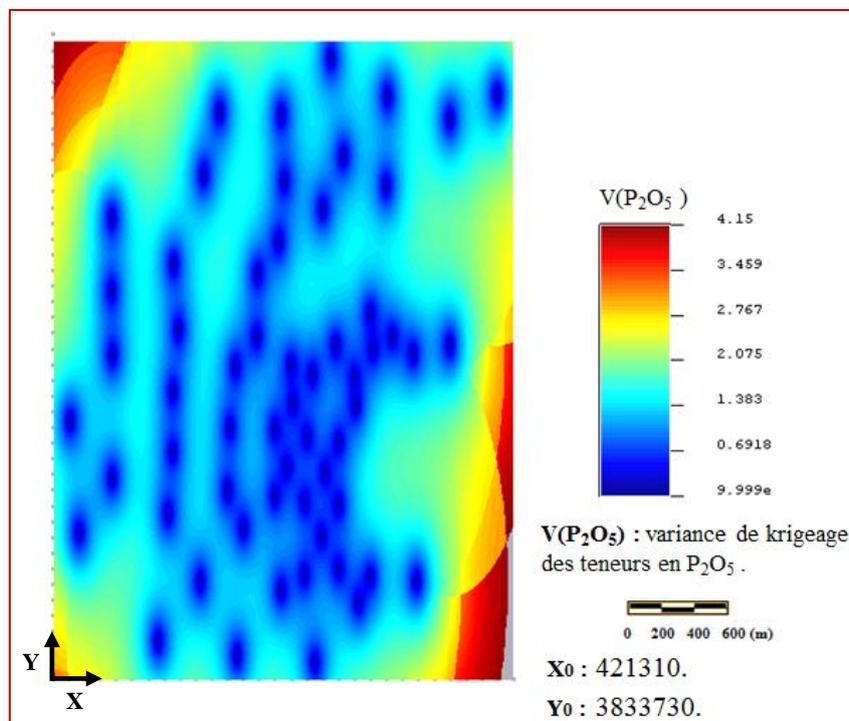


Figure 12. Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en P_2O_5 .

❖ Couche basale

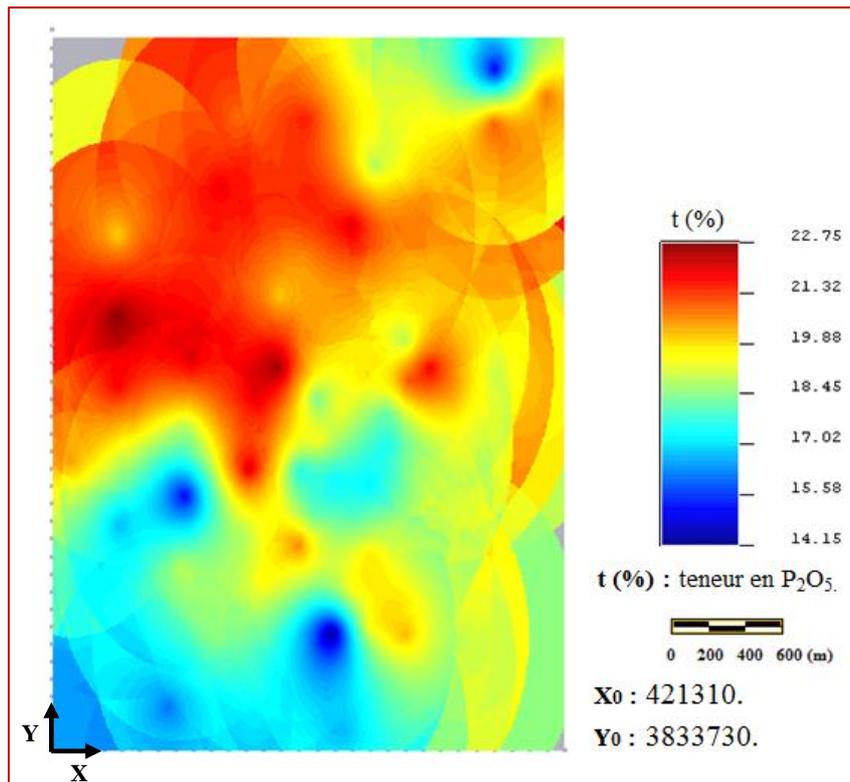


Figure 13. Carte représentative du krigeage final des teneurs en P_2O_5 .

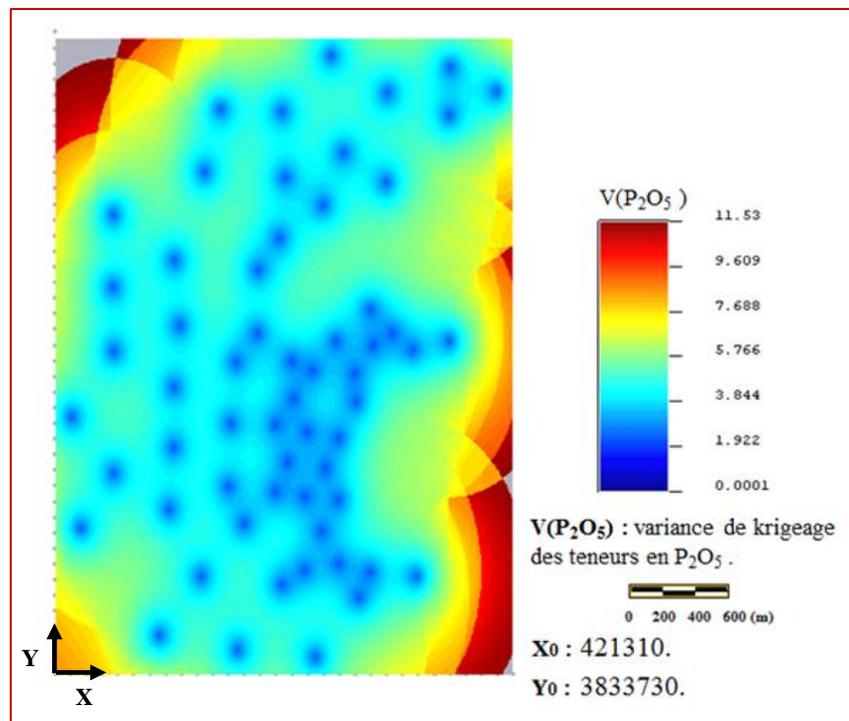


Figure 14. Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en P_2O_5 .

❖ Couche du thanétien inférieur

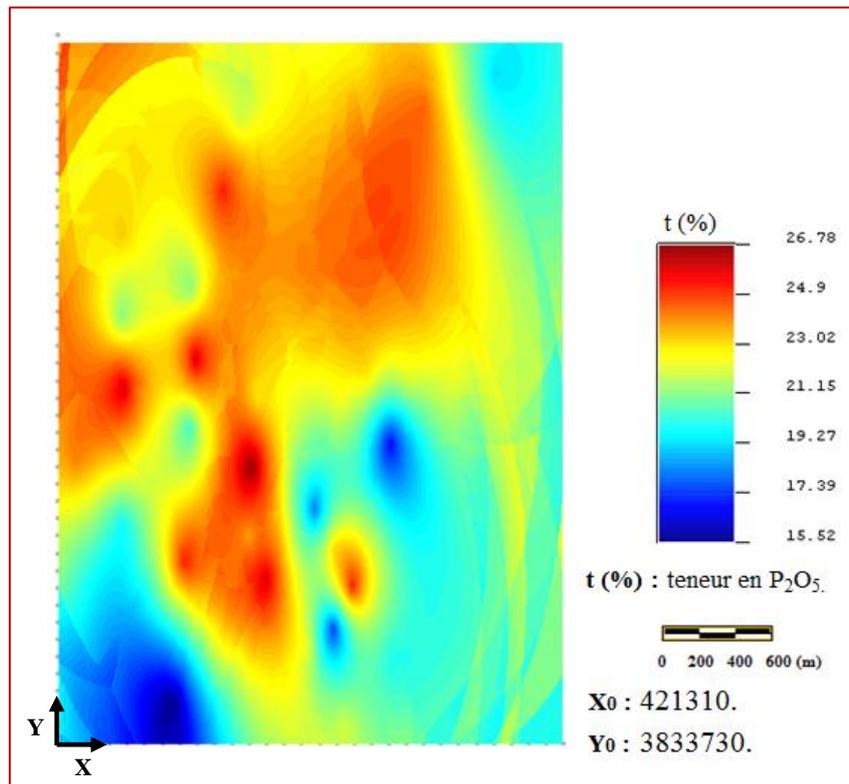


Figure 15. Carte représentative du krigeage final des teneurs en P_2O_5 .

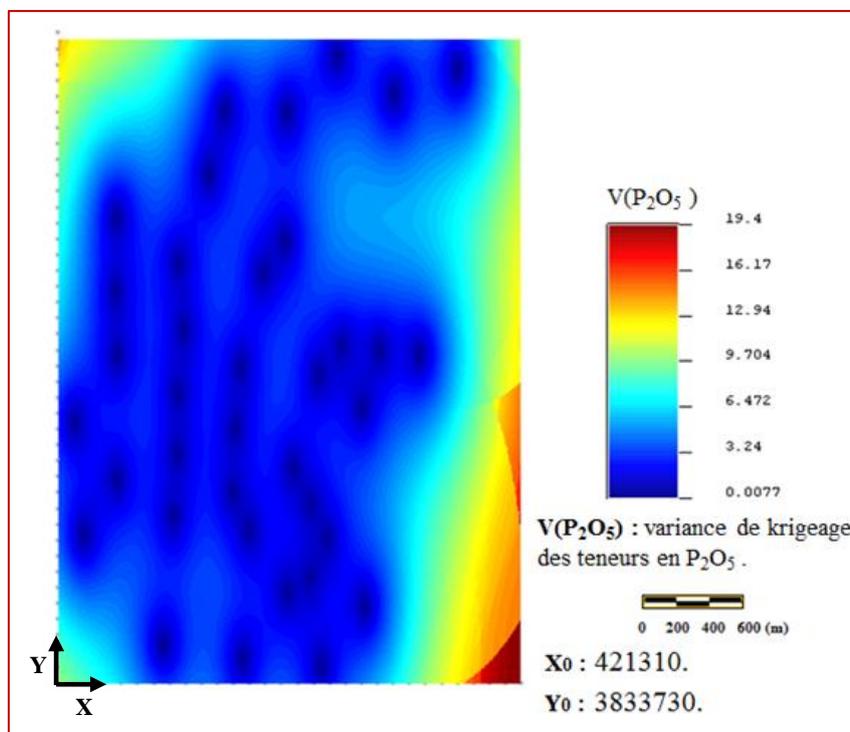


Figure 16. Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en P_2O_5 .

III. Catégories des réserves

III.1. Teneurs

❖ Couche yprésien

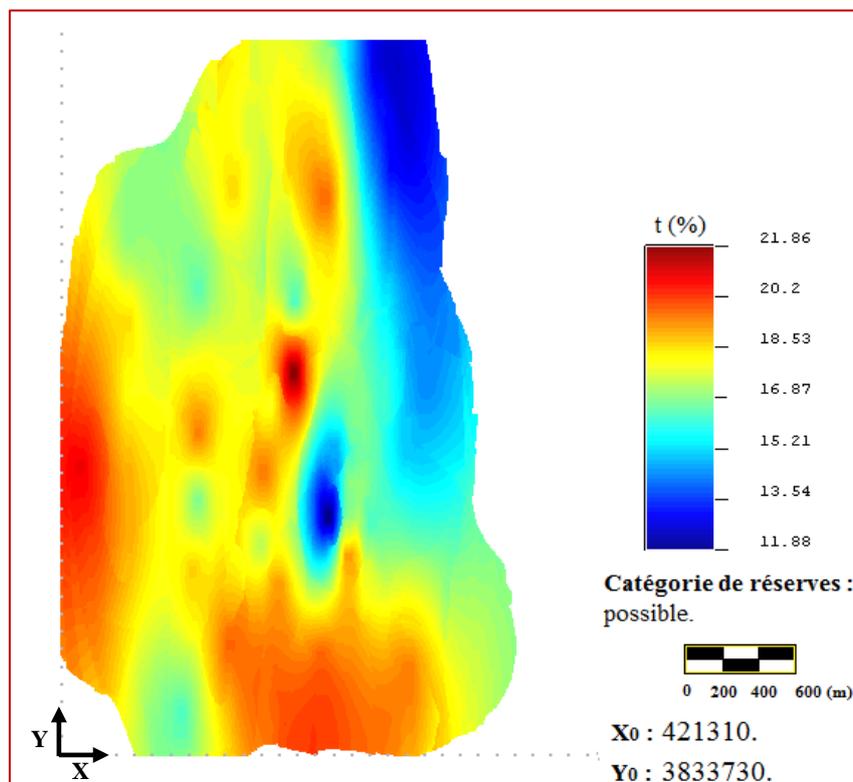


Figure 17. Réserves possibles (C₂) de la couche yprésien.

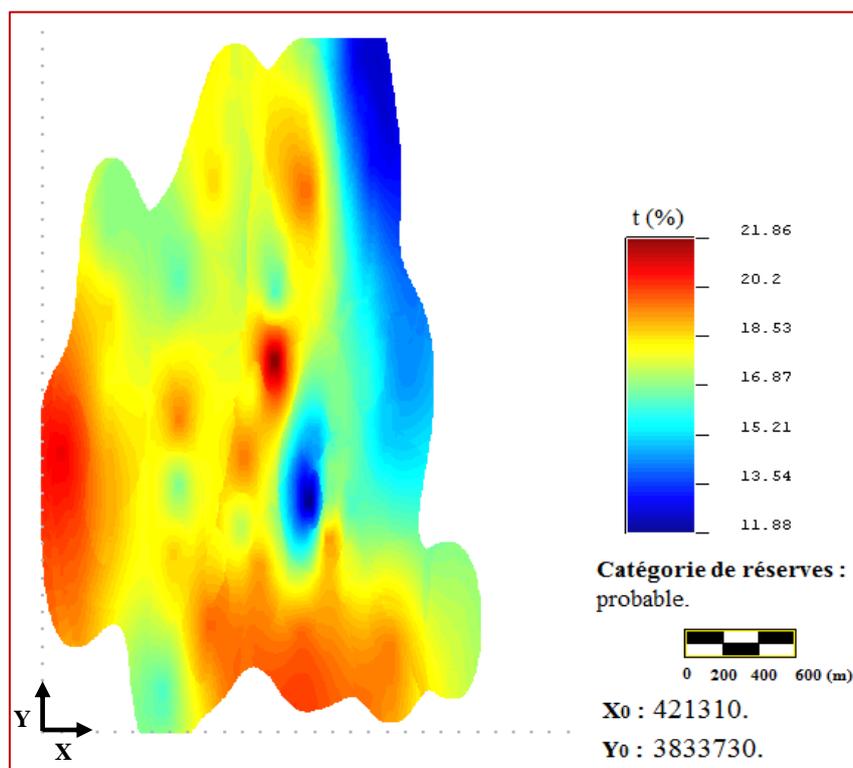


Figure 18. Réserves probables (C₁) de la couche yprésien.

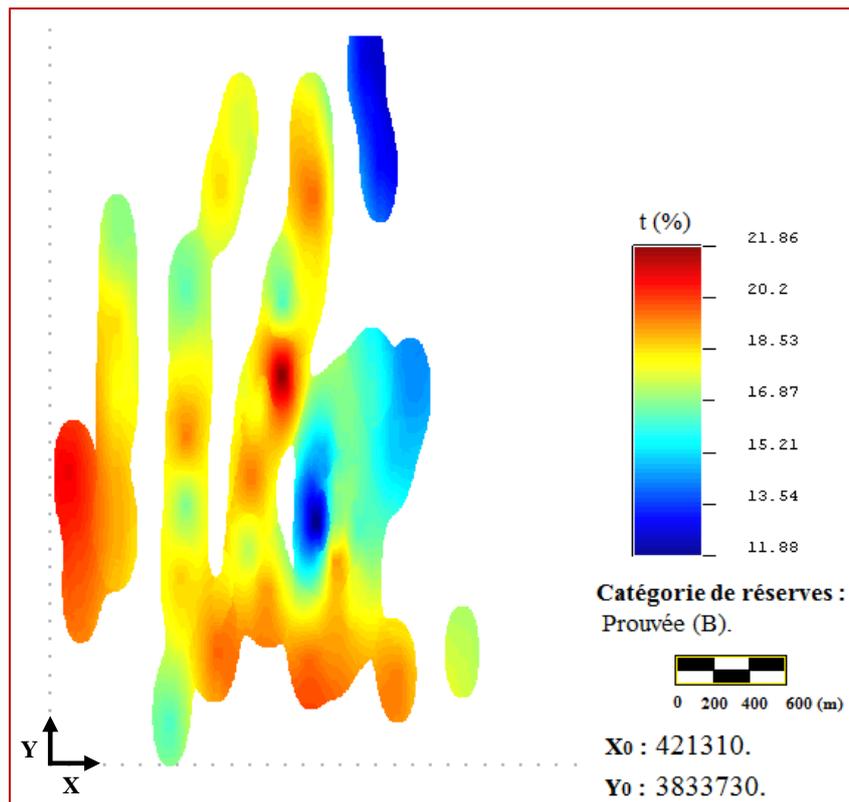


Figure 19. Réerves prouvées (B) de la couche yprésien.

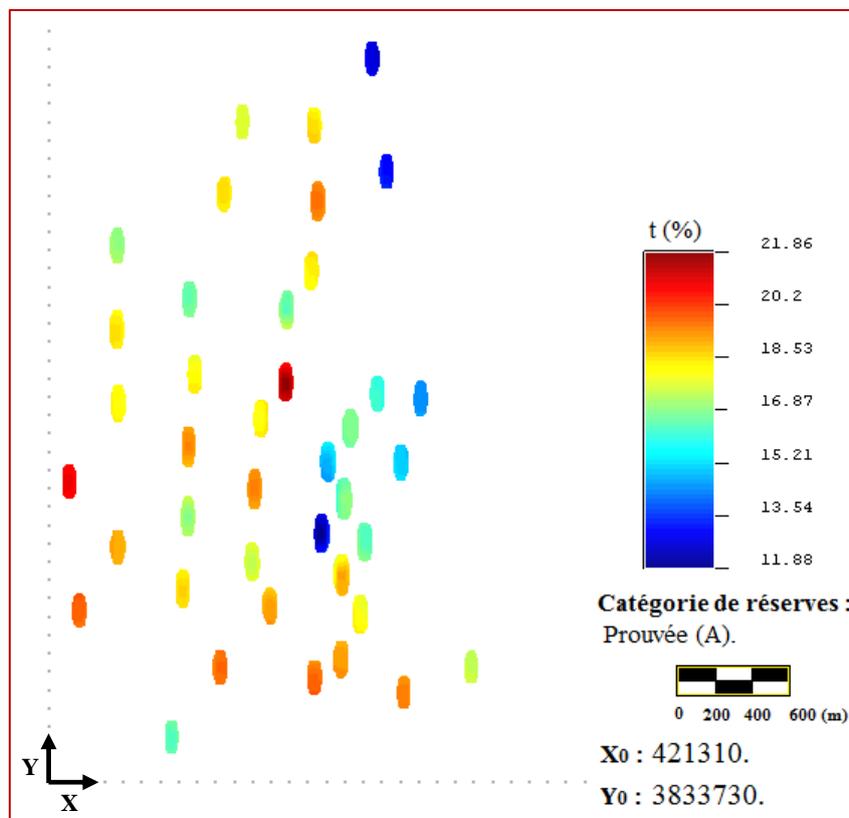


Figure 20. Réerves prouvées (A) de la couche yprésien.

❖ Couche sommitale

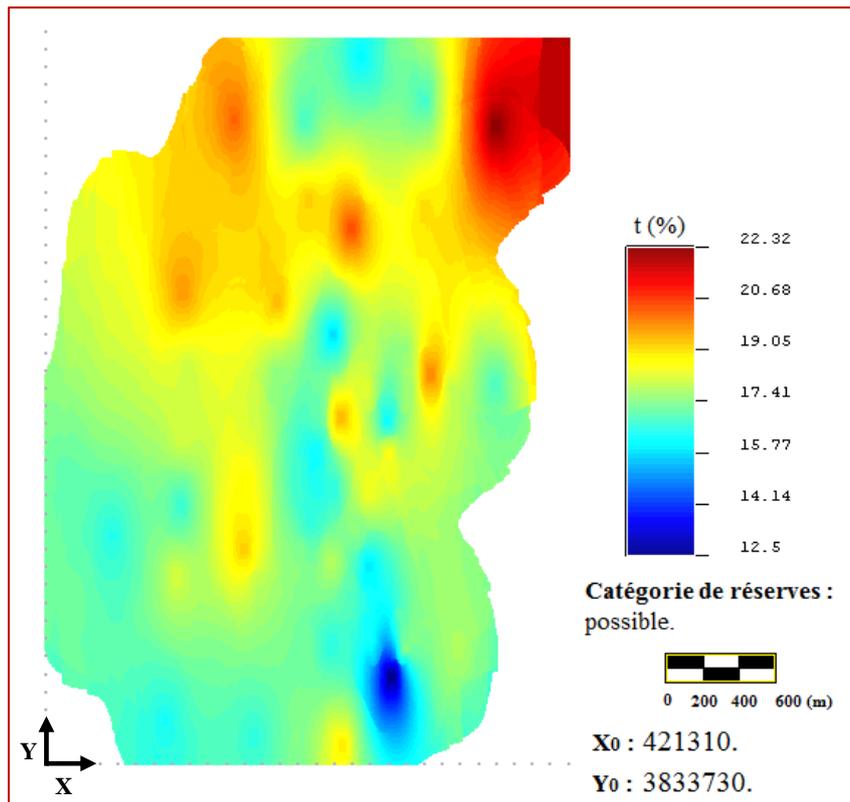


Figure 21. Réerves possibles (C_2) de la couche sommitale.

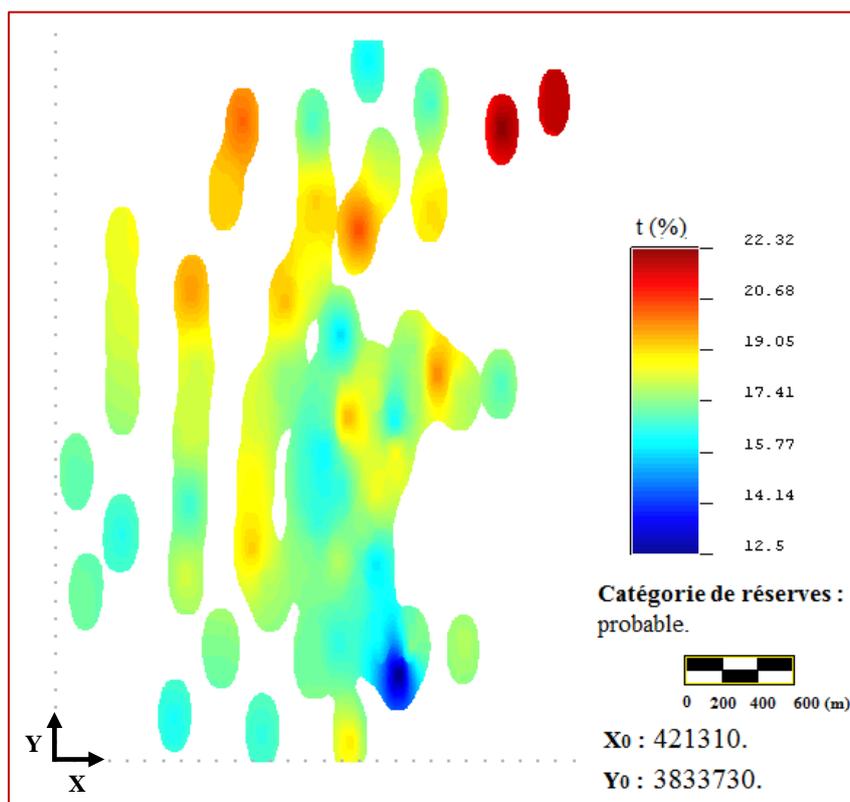


Figure 22. Réerves probables (C_1) de la couche sommitale.

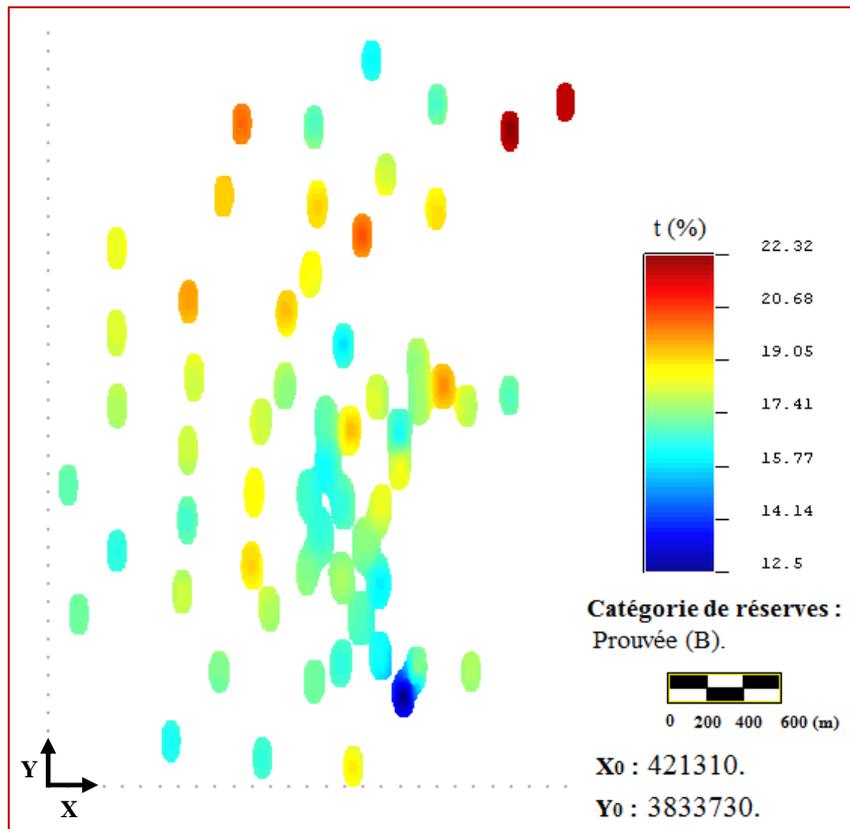


Figure 23. Réerves prouvées (B) de la couche sommitale.

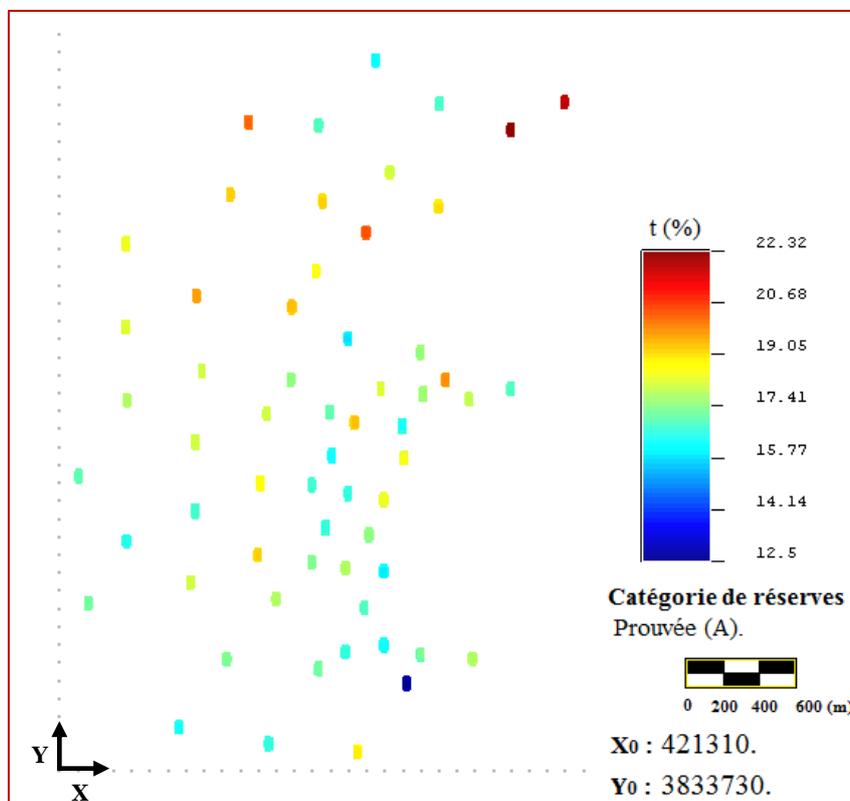
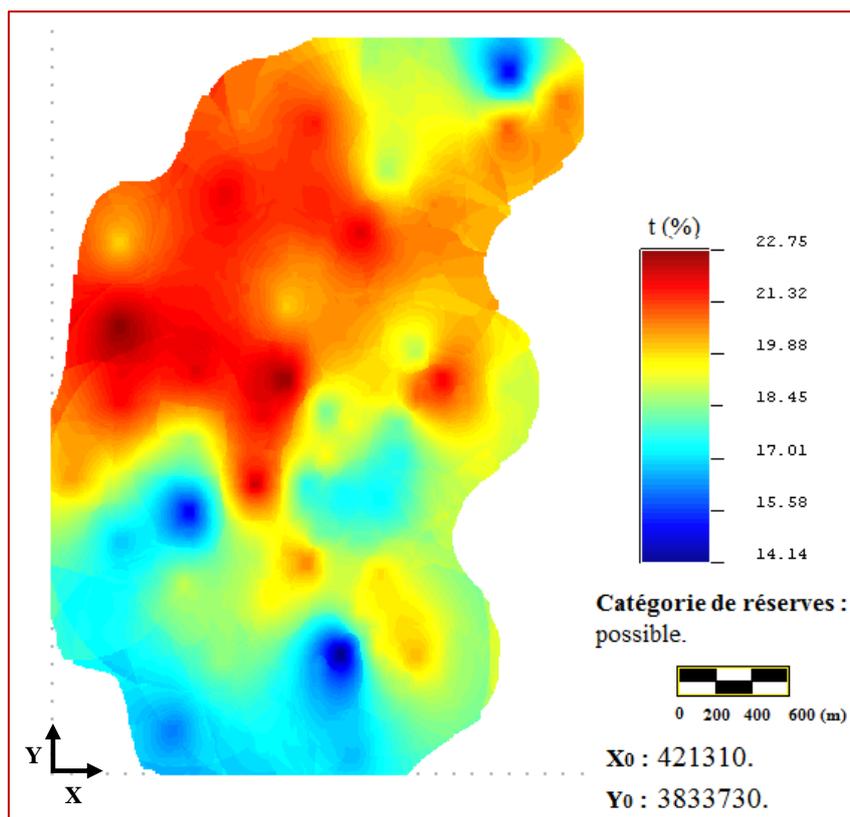
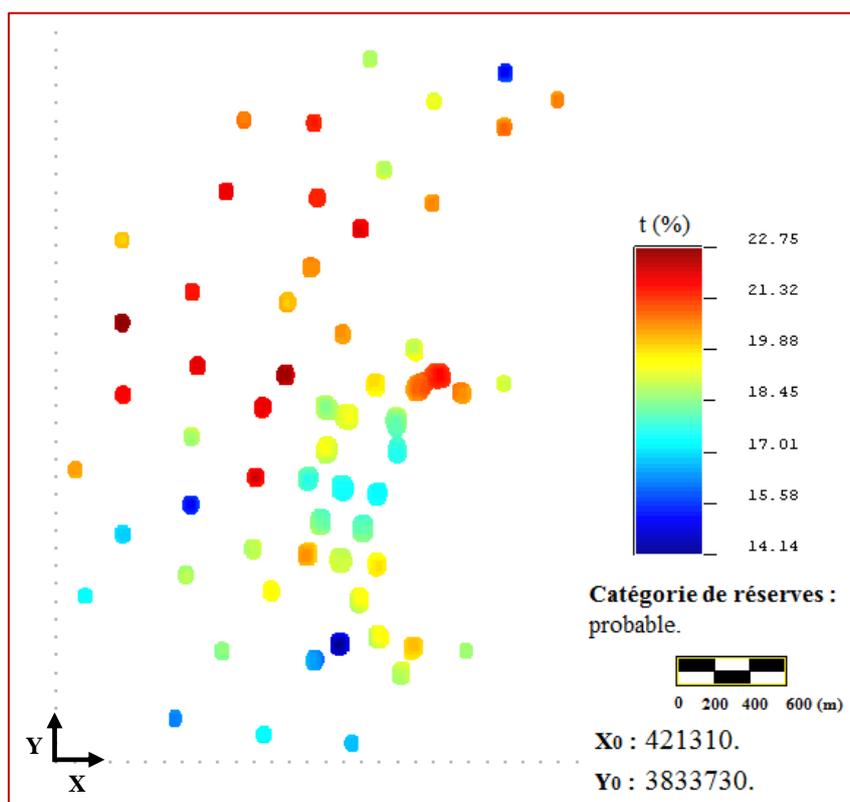


Figure 24. Réerves prouvées (A) de la couche sommitale.

❖ Couche basale

Figure 25. Réerves possibles (C₂) de la couche basale.Figure 26. Réerves probables (C₁) de la couche basale.

❖ Couche du thanétien inférieur

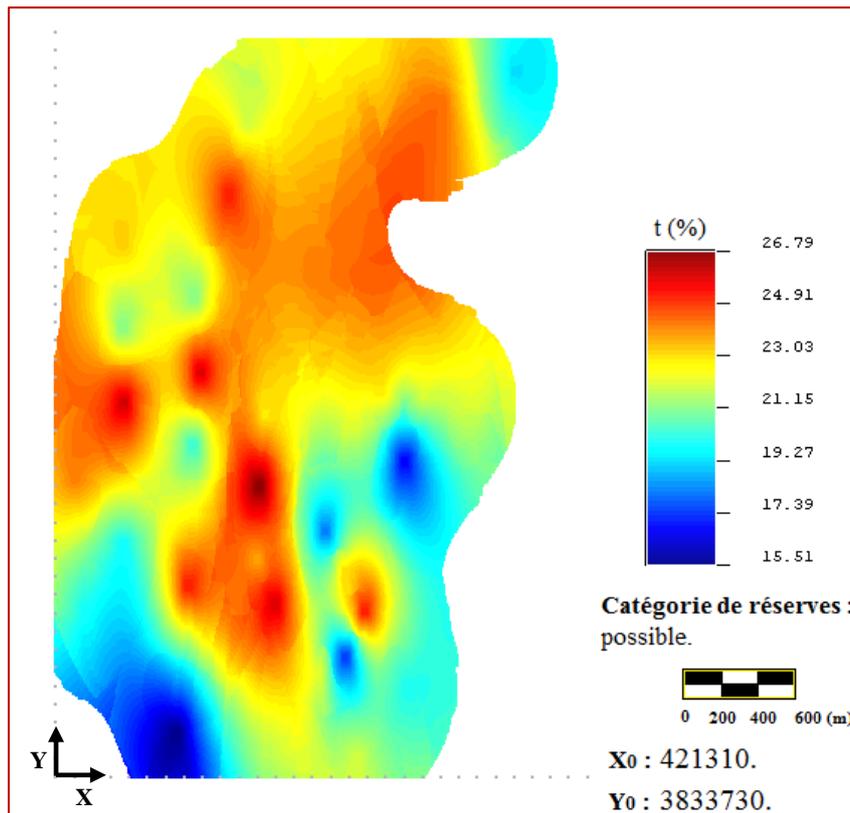


Figure 27. Réserves possibles (C_2) de la couche thanétien inférieur.

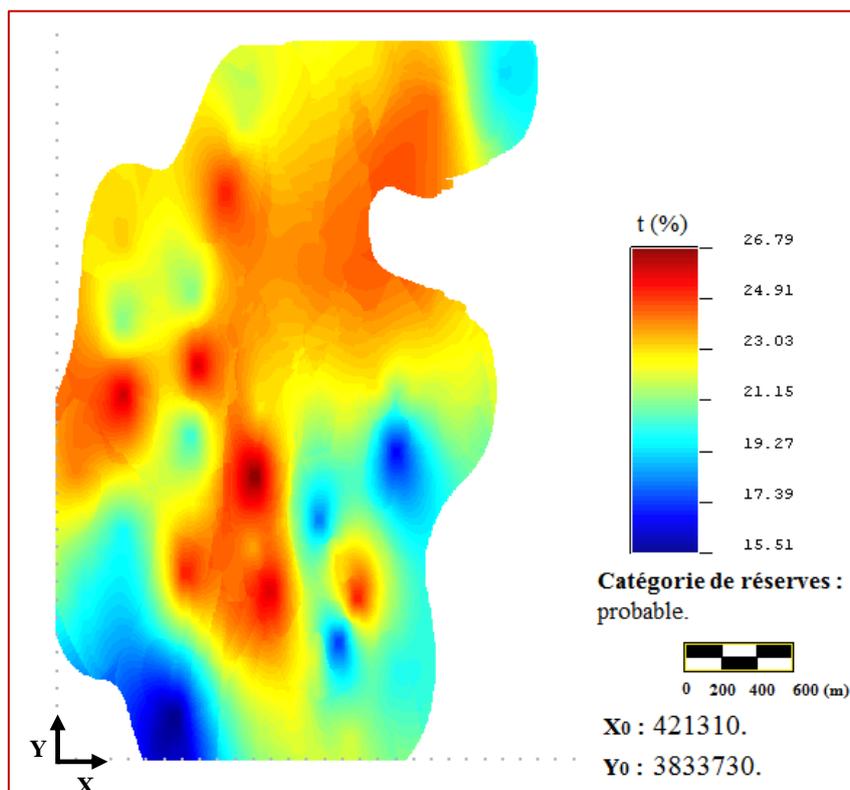


Figure 28. Réserves probables (C_1) de la couche thanétien inférieur.

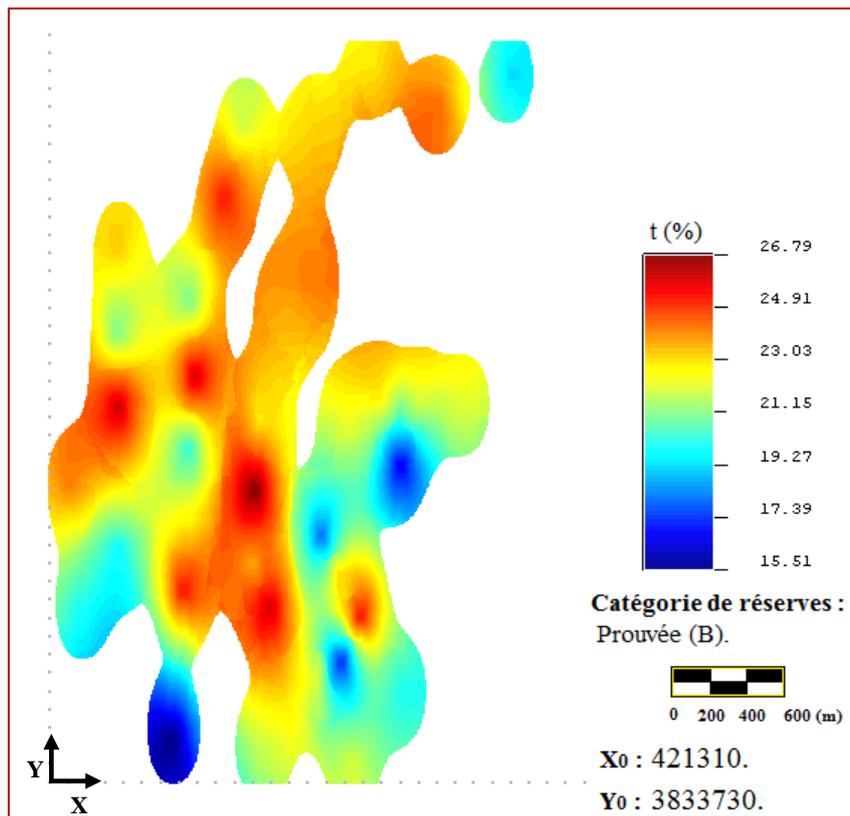


Figure 29. Réserves prouvées (B) de la couche thanétien inférieur.

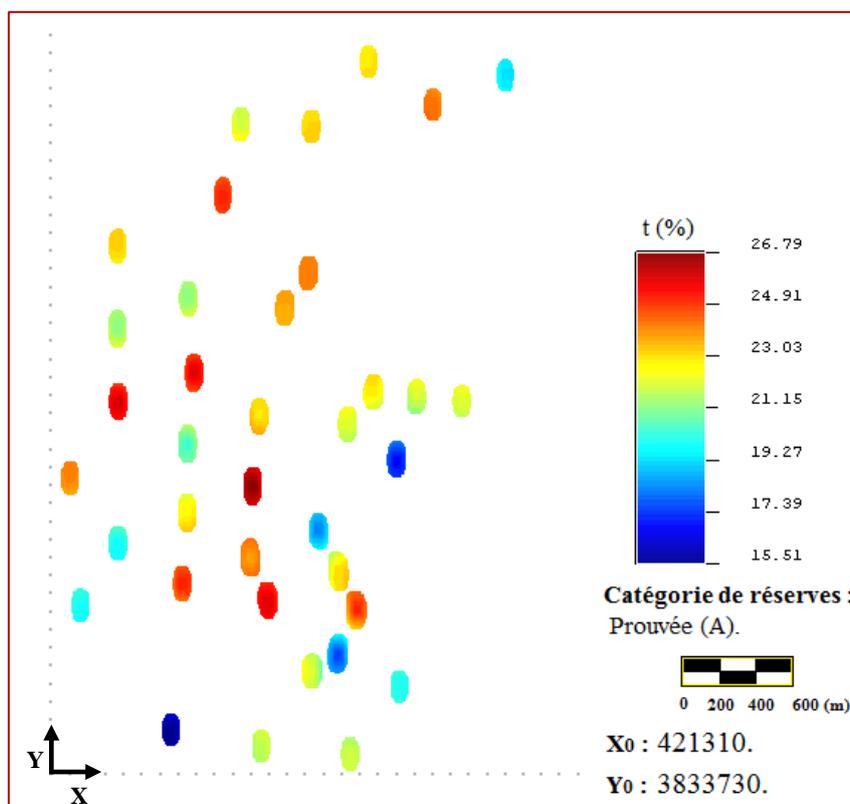


Figure 30. Réserves prouvées (A) de la couche thanétien inférieur.

IV. Résumé des travaux d'évaluations précédentes et actuelles du gisement de Bled El Hadba

Dans les tableaux suivants nous avons récapitulé les résultats quantitatifs des trois essentielles expertises à savoir l'EREM (1987), le BRGM/SOFREMINE (1993) et DMT (2013), et celle de notre étude.

Tableau IV.1. Réserves estimées par EREM.

La couche	Classe de ressource	Tonnage (Mt)	P ₂ O ₅ (%)	MgO (%)
Yprésien	/	/	/	/
Sommitale et basale (I+III)	C1+C2	120	16.4	7.4
Médiane (II)	C1+C2	204	23.8	3.4
Thanétien inférieur	/	/	/	/
(I+II+III)	C1+C2	324	21	5.1
Totale	C1+C2	324	21	5.1

Tableau IV.2. Réserves estimées par BRGM.

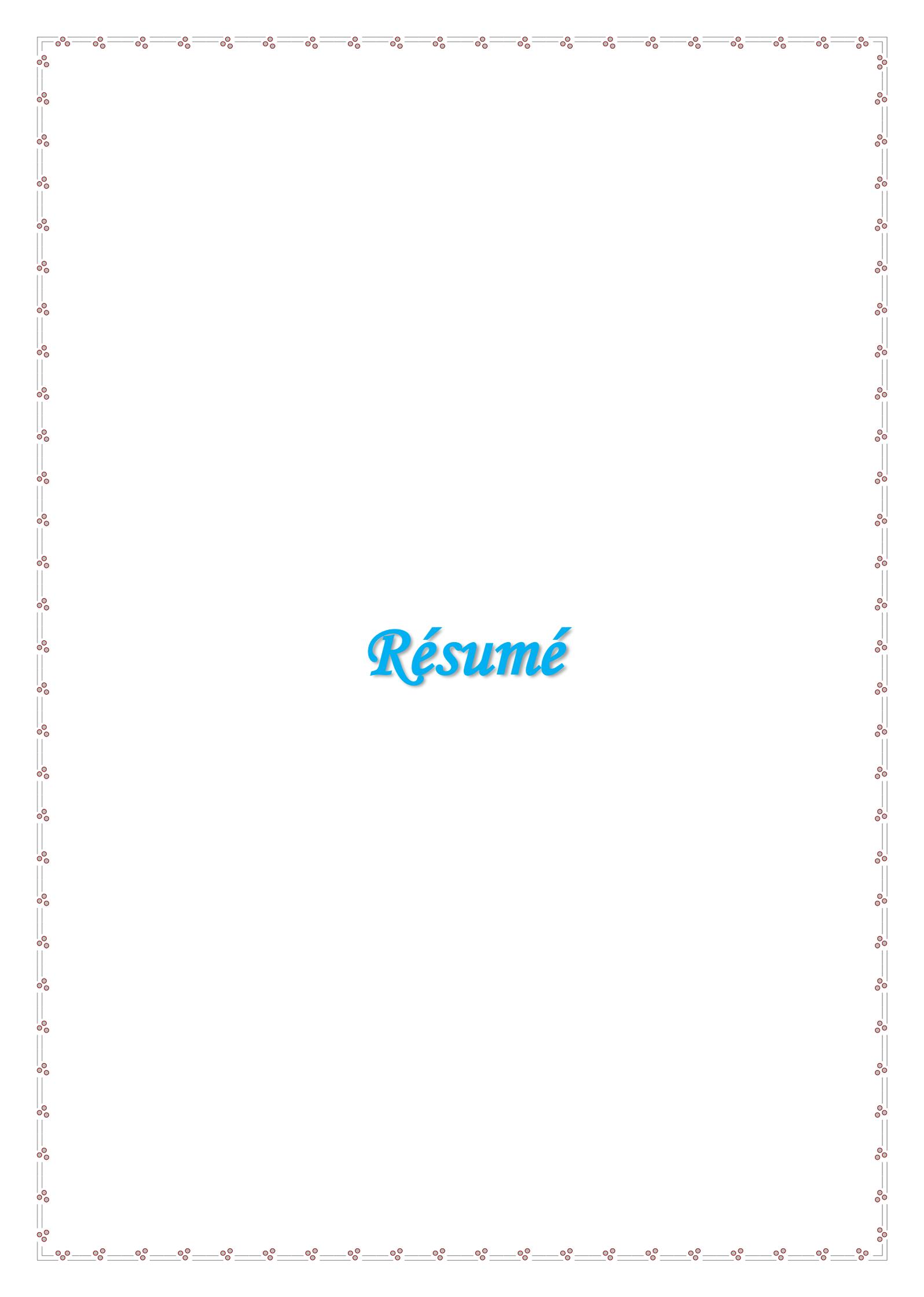
La couche	Classe de ressource	Tonnage (Mt)	P ₂ O ₅ (%)	MgO (%)
Yprésien	/	/	/	/
Sommitale (I)	C1+C2	72.4	15.90	7 à 9
Médiane (II)	C1+C2	165.6	24.85	3.4
Basale (III)	C1+C2	62	18.25	7 à 9
Thanétien inférieur	/	/	/	/
(I+II+III)	C1+C2	300	21.5	5.4
Totale	C1+C2	300	21.32	5.4

Tableau IV.3. Réserves estimées par DMT.

La couche	Classe de ressource	Tonnage (Mt)	P ₂ O ₅ (%)	MgO (%)
Yprésien	mesurées +indiquées	141.6	16.9	7.7
Sommitale (I)	mesurées +indiquées	48.4	15.5	8.4
Médiane (II)	mesurées +indiquées	409	24.1	4.1
Basale (III)	mesurées +indiquées	115.9	19.5	5.9
Thanétien inférieur	mesurées +indiquées	/	/	/
(I+II+III)	mesurées +indiquées	573.3	22.5	4.8
Totale	mesurées +indiquées	714.9	21.3	5.4

Tableau IV.4. Réserves estimées par la présente étude.

La couche	Classe de ressource	Tonnage (Mt)	P ₂ O ₅ (%)	MgO (%)
Yprésien	A+B+C1+C2	138.5	17.54	/
Sommitale (I)	A+B+C1+C2	123.3	18.01	/
Médiane (II)	B+C1+C2	411	24.9	/
Basale (III)	C1+C2	129	19.5	/
Thanétien inférieur	A+B+C1+C2	75.6	22.26	/
(I+II+III)	A+B+C1+C2	663.5	20.9	/
Totale	A+B+C1+C2	877.67	20.54	/



Résumé

المخلص

نهدف من خلال هذه المذكرة، إلى تقييم المخزون الفوسفاتي لمنجم بلاد الهدبة الذي يقع على بعد 14 كيلومتر جنوب شرق بئر العاتر- تبسة، في حوض جبل العنق، بطريقة الجيو- إحصائية الخطية. في هذا المنجم، الأفق الفوسفاتي يتكون من تراكب خمسة طبقات فرعية رسوبية ذات أعمار طانيسيا و لبيريزيا، حيث أظهرت الدراسة البنيوية لطبقة الفوسفات، أن هذه الأخيرة تميل بزواوية قدرها 8 درجات في اتجاه 320 درجة جهة الشمال الغربي.

دوال الفارايوغرام الموجهة التجريبية في المستوي لسمك الطبقات ونسب P_2O_5 ، أعدت لكل طبقة فوسفاتية فرعية، حيث استخدمت هذه الفارايوغرامات للقيام بعملية الكريجاج العادي.

الكريجاج، هي إحدى طرق الإستقطاب العشوائي الحيزي التي تتوقع قيمة الحادثة الطبيعية في بقع تأخذ عينة من قبل تنسيق خطي بلا منحرف وذو انحراف معياري صغير الحد لمراقبة الحادثة في مواقع مجاورة.

الكلمات المفتاحية : جيو-إحصاء، الاستقطاب الحيزي، المتغير الاقليمي، الكريجاج العادي، الفارايوغرام- فوسفات.

Résumé

Dans ce mémoire nous avons proposé l'évaluation des réserves de phosphate du gisement de Bled El Hadba dans le bassin de Djebel Onk par la méthode géostatistique linéaire. Ce gisement se situe à 14 km au Sud-Est de Bir-El-Ater Tébessa.

Dans ce gisement, l'horizon phosphaté est constitué de la superposition de cinq sous-couches sédimentaires d'âge Thanétien et Yprésien. L'étude structurale de la couche phosphatée, a montré que, cette dernière plonge sous un pendage moyen de 8° et une direction de N320°W.

Les variogrammes directionnels expérimentaux des épaisseurs et teneurs en P_2O_5 , dans le plan de la couche, ont été calculés et ajustés pour chacune des sous-couches phosphatées. Ces variogrammes ont été utilisés pour le krigeage ordinaire.

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.