

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira de Bejaia Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Filière : Génie Minier

Option : Exploitation des Mines

Contrôle de la qualité de kaolin par approche géostatistique le cas de gisement de Tamazert (W. Jijel)

Présenté par :

Mr : Titah Anis Abdelhakim

Mr : Abdelbost Mohamed Amine

Soutenu le 19 /09 /2024 devant le jury composé de :

Président	Mr AIT HABIB Zakari	M.A.A	U.A.M.B
Promoteur	Mr. MAZARI Messaoud	M.C.B	U.A.M.B
Examineur	Mr. AYADEN Brahim	M.C.B	U.A.M.B

Année Universitaire :2023-2024

REMERCIEMENTS

On remercie ALLAH qui nous a donné le courage et la force pour

Compléter ce Modest travail ;

J'exprime notre gratitude et notre reconnaissance envers notre encadrant MR MAZARI
MESSAOUD de nous avoir encadré.

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

J'exprime ma gratitude à MR AYADEN qui a accepté la tâche d'examiner ce travail.

Nos remerciements vont également à tous les membres du département des mines géologie ;

Je remercie tous les cadres et les travailleurs du complexe minier de SOALKA

Je voudrais présenter mes sincères remerciements à nos parents et Familles

Pour leurs aides précieuses et leurs encouragements durant la période de stage.

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

DEDICACE

**Je dédie ce modeste travail en première lieu La femme la
Plus affectueuse et la plus douce au monde l'ange le plus
Tender qui a été toujours pour moi une source d'amour, de
Pitié et d'espoir, ma chère mère
A celui qui m'a toujours encouragée et soutenue
Moralelement, mon très cher père
A mon frère Younes
A mes sœurs et leurs enfants
A ma très chère et adorable sœur Hadjer
A tous mes Amis qui m'ont aidé dans ce mémoire
Et qu'ils ont fait partie dans ma réussite
A toute la promotion de mine.**

AMINE

Dédicace

A mes parents : Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent

De me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A toute ma grande famille

A mes très chères sœurs

A mon cher frère : Amine

A tous ceux qui me sont chers, proches de mon cœur et à tous ceux qui m'aiment et qui Partagent ma joie.

ANIS

REMERCIEMENTS

On remercie ALLAH qui nous a donné le courage et la force pour

Compléter ce modeste travail ;

J'exprime notre gratitude et notre reconnaissance envers

Mon encadreur MR MAZARI MESSAOUD de nous avoir encadré.

Un grand merci à AIT HABIB Z qui a accepté de présider la

Soutenance de ce projet de fin d'étude.

J'exprime ma gratitude à MR AYADEN qui a accepté la tâche

D'examiner ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les membres du

Département des mines et géologie ;

Je remercie tous les cadres et les travailleurs du complexe minier de

SOALKA

Je voudrais présenter mes sincères remerciements à

Nos parents et Familles

Pour leurs aides précieuses et leurs encouragements durant la période

De stage.

Vers la fin, Je tiens à remercier toute personne qui a participé de

Près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACE

**Je dédie ce modeste travail en première lieu La femme la
Plus affectueuse et la plus douce au monde l'ange le plus
Tender qui a été toujours pour moi une source d'amour, de
Pitié et d'espoir, ma chère mère
A celui qui m'a toujours encouragée et soutenue
Moralelement, mon très cher père
A mon frère Younes
A mes sœurs et leurs enfants
A ma très chère et adorable sœur Hadjer
A tous mes Amis qui m'ont aidé dans ce mémoire
Et qu'ils ont fait partie dans ma réussite
A toute la promotion de mine.**

Liste des abréviations

BET : Brunauer. Emmet. Teller.

TMSM : Taux. Mises-en. Suspension. Maximale

KT2 - Kaolin pour l'industrie céramiques, plastique et caoutchouc

KT3B - Kaolin pour charge papier

KT1 - Kaolin pour industries céramiques, insecticides et autres

G0, GW1, GW2- des sables

Liste des figures

Figure 1: Situation géographique de la mine de Tamazert.....	2
Figure 2: Carte géologique représentatif de la petite Kabylie [4]	4
Figure 3: Carte géologique du gisement de Tamazert El-Milia [2]	7
Figure 4: Lithostrathigraphie du gisement de tamazert [3]	9
Figure 5: front d'attaque de la carrière	10
Figure 6: Etape de Traitement du kaolin de Tamazert, El Milia.....	12
Figure 7: Trémie mobile	13
Figure 8: convoyeur à bande	13
Figure 9: Débourbeur	14
Figure 10: Crible vibrant	14
Figure 11: Batterie hydrocyclone	15
Figure 12: Panneaux tamiseurs	15
Figure 13: Bassin de décantation	15
Figure 14: Réservoirs d'agitation de kaolin	16
Figure 15: Filtre à presse	17
Figure 16: Répartition des données [11]	20
Figure 17: Nuée variographique en fonction de la distance	24
Figure 18: Représentation schématique des points de mesure de la variable	24
Figure 19: schéma type d'un variogramme[20]	25
Figure 20: schéma de calcule du variogramme expérimentale [10].....	26
Figure 21: Exemple de variogramme multidirectionnelle [19].....	27
Figure 22: schéma type d'un semi-variogramme (effet d'un pépite) [21]	27
Figure 23 :Schéma type d'un modèle de semi-variogramme sphérique [21]	28
Figure 24:Schéma type d'un modèle de semi-variogramme exponentiel [21]	28
Figure 25: Schéma type d'un modèle de semi-variogramme gaussien [21].	29
Figure 26:Ajustement d'un modèle théorique (courbe) de semi-variogramme à un semi-variogramme expérimental [21].	29
Figure 27:Schéma des variogrammes représentants une anisotropie géométrique et zonale [23]	30
Figure 28: Fichier représentatif de la forme de la base des données, préparé pour l'analyse. .	37
Figure 29: Histogramme de niveau 540	39
Figure 30: Histogramme de niveau 550	39
Figure 31: Histogramme de niveau 560	40
Figure 32: Histogramme de niveau 570	40

Figure 33: Tolérance linéaire (a) et angulaire (b) [12].	41
Figure 34: Ensembles des variogrammes directionnels et omnidirectionnels des teneurs du niveau 540 m.	43
Figure 35: Variogrammes directionnels des teneurs du niveau 540m.	44
Figure 36: Variogramme omnidirectionnelle des teneurs niveau 540 m.	45
Figure 37: Variogramme directionnel et omnidirectionnel des teneurs du niveau 550 m.	46
Figure 38: Variogrammes directionnels des épaisseurs du niveau 550 m.	47
Figure 39: variogramme Omni-directionnel des teneurs du niveau 550 m.	48
Figure 40: Variogramme directionnel et omnidirectionnel des teneurs du niveau 560 m.	49
Figure 41: Variogramme directionnel (90°,135°) des teneurs du niveau 560 m.	49
Figure 42: Variogrammes directionnels(0°,45°) des teneurs du niveau 560 m.	50
Figure 43: Variogramme Omni-directionnel des teneurs du niveau 560 m.	50
Figure 44: Variogramme directionnel et omnidirectionnel des teneurs du niveau 570 m.	51
Figure 45: Variogrammes directionnels des teneurs du niveau 570 m	52
Figure 46: Variogramme Omni-directionnel des teneurs du niveau 570	52
Figure 47: Carte représentative du krigeage final des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 540 m.	56
Figure 48: Carte représentative du krigeage final des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 550 m	57
Figure 49: Carte représentative du krigeage final des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 560 m	58
Figure 50: Carte représentative du krigeage final des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 570 m	59
Figure 51: Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs (de 0 à 8) en Al_2O_3 (niveau 540 m).	60
Figure 52: Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en Al_2O_3 (niveau 550 m)	61
Figure 53: Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en Al_2O_3 (niveau 560 m)	62
Figure 54 : Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en Al_2O_3 (niveau 570 m)	63

Liste des tableaux

Tableau 1:Représentation des niveaux	39
Tableau 2:Directions d'anisotropie des variogrammes des épaisseurs.	45
Tableau 3:Directions d'anisotropie des variogrammes des teneurs du niveau 550 m :	48
Tableau 4 : Directions d'anisotropie des variogrammes des teneurs du niveau 560	51
Tableau 5 : Directions d'anisotropie des variogrammes des teneurs du niveau 570	53
Tableau 6: Réserves en kaolinite du gisement de tamazert.....	64
Tableau 7: Volume des réserves en fonction de la teneur de coupure.	64

Table des matières

Table des matières

Remerciement

Dédicaces

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I: Présentation de gisement de kaolin de tamazert

I.1 Situation géographique..... 2

I.2 Historique du gisement [1]..... 2

I.3 Géologie du gisement [2] 3

I.3.1 Géologie régional 3

I.3.2 Les ensembles géologiques de la petite Kabylie 3

I.3.3 Géologie locale [2] 5

I.3.4 Description des affleurements [3]..... 8

I.3.5 Description pétrographique [4]..... 8

I.3.6 Tectonique du gisement de tamazert [5]..... 9

I.4 L'exploitation [6] 9

1.4.1 Abattage 10

1.4.2 Chargement 11

1.4.3 Transport..... 11

1.5 Traitement du minerai [7]..... 11

1.5.1 Homogénéisation [8]..... 12

1.5.2 Traitement par voie humide [8] 12

Chapitre II: Théorie de la variable régionalisée

II.1. Objectif du chapitre..... 20

II.2. Objets et modèles de Géostatistique 20

II.3. Domaines d'application de la géostatistique [13]	21
II .4. Exemple d'étude	23
II.4.1. Hypothèse de stationnarité	23
II.4.2. Hypothèse intrinsèque	24
II.5. Introduction à la notion de variogramme	24
II.5.1. Le semi-variogramme théorique	25
II.6. Schémas théoriques et ajustement des variogrammes	27
II.6.1. Le modèle sphérique	28
II.6.2. Le modèle exponentiel	28
II.6.3. Le modèle gaussien	29
II.7. Isotropie et anisotropie.....	30
II.8. Le krigeage.....	31
II.8.1. Krigeage ordinaire : (ou à moyenne inconnue)	33
II.8.2. Propriétés du krigeage	34

Chapitre III: Etude statique et variographique

I. Introduction.....	37
II. Histogrammes des teneurs	38
III. Analyse variographique.....	40
IV. Variogramme expérimental.....	41
V. Paramètres pour le calcul du variogramme expérimental	42
VI. Conclusion	53

Chapitre IV: Krigeage 2D, résultats et interprétations

IV. 1. Méthodologie du krigeage.....	54
IV. 2. Grille de krigeage	54
IV.3. Résultats obtenus par krigeage ordinaire.....	55
IV. 3.1. Carte de répartition des teneurs de Al_2O_3	55
IV. 3 .2 Variance de krigeage pour les teneurs	59

IV.4 Estimation des réserves du gisement de tamazert	63
Conclusion générale	66
Annexes	
Résumé	

Introduction générale

Le kaolin est une argile blanche, douce et plastique composée principalement de fines particules sous forme de plaquettes. Cette argile dite de Chine, doit son nom à l'endroit de sa première découverte à Kao-Lin, en Chine. Le terme kaolin regroupe des minéraux argileux relativement communs, dominés par la kaolinite et dérivés essentiellement de l'altération du feldspath alcalin et des micas.

Le kaolin est le résultat de l'altération des aluminosilicates anhydres que l'on retrouve dans les roches riches en feldspaths, comme le granite.

Le kaolin est l'une des matières premières les plus répandues dans le monde. Ses utilisations sont multiples. Sa blancheur et sa plasticité le rendent particulièrement approprié pour un usage extensif comme charge, agent d'allongement, matière première pour la céramique et comme pigment. C'est également une matière première importante pour les réfractaires, et un catalyseur dans les industries du ciment et des fibres de verre.

En Algérie on trouve le kaolin dans plusieurs gisements comme celui d'EL Milia (W.Jijel) et Djebel Debbagh (W.Guelma) qui sont en cours d'exploitation et qui assurent 30% de la demande locale. L'objectif primordial de ce travail est l'estimation des réserves en kaolin du gisement de tamazert 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 (1000)

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

- L'étude de la géologie régionale et locale de El-milia et du gisement de Tamazert;
- 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

Présentation de gisement de kaolin de tamazert

Introduction

Le marché national du kaolin est alimenté par deux mines (tamazert, et guelma), Ces gisement sont exploite par la meme entreprise l'ENOF depuis les anne 70

Au cours de ce chapitre, nous allons présentez, la géologie régionale d'El-Milia puis locale du gisement de tamazert.

I.1 Situation géographique

Le gisement de Tamazert est situé au Nord-est de l'Algérie, a 45km vers l'est du chef-lieu de la wilaya de Jijel, 17km au nord de la ville de El-Milia ,, limite au N-W par Djbel adjar, par les collines d'Azrar a l'Est, au sud par le douar de Chirfa etal'Ouest par le douar OuledBoufaa

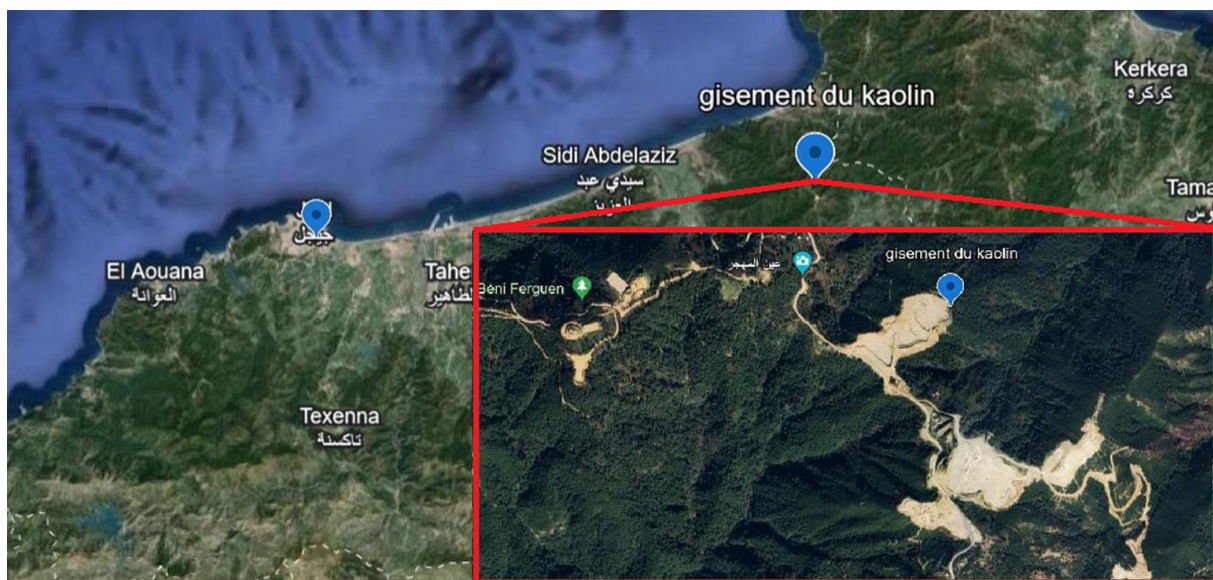


Figure 1: Situation géographique de la mine de Tamazert

I.2 Historique du gisement [1]

L'exploitation du gisement de la mine de Tamazert a débuté en 1927 par une compagnie franco-africaine, mais elle n'a duré que cinq ans, se terminant en 1932. Cette exploitation avait installé une station de traitement au bord de la mine, équipée d'un téléphérique de 10 km et d'une station d'embarquement sur la côte, à l'embouchure de l'Oued Zhor. L'exploitation a connu un abonde en 1933 vue l'apparition du kaolin de la meilleure qualité sur le marché international

Afin d'alimenté l'usine de céramique de Guelma en 1967une mission chinoise été chargé de prospecte le gisement « El Biad » qui actuellement en exploitation.

En 1969, le BRGM été chargé d'une étude pour les mêmes objectifs précédent.

En 1972, d'après que l'usine de céramique de Guelma a entamé la production, une décision d'exploitation du gisement a été prise.

La SONAREM durant l'année 1976 a fait l'étude sur cinq gisements pour l'estimation des réserves.

Actuellement cette l'unitéalimente les usines de céramique de Guelma, Mila, Maghnia et les unités pesticides d'Alger et d'Oran, ainsi que les artisans privés.

I.3 Géologie du gisement [2]

I.3.1 Géologie régional

L'Algérie du nord fait partie du vaste système alpin qui va de Gibraltar jusqu'à l'Himalaya les nappes charriées sur la plateforme africaine constitues les maghrébines dans leur partie orientale au niveau de la chaine tellienne et transversalement on distingue de l'intérieur vers l'extérieur : le domaine kabyle celui de flysch et le domaine tellien ces derniers sont recouvert par des ensembles détritiques

I.3.2 Les ensembles géologiques de la petite Kabylie

La superposition de plusieurs ensembles géologiques formes la petite Kabylie ces ensembles sont séparés par des contacts anormaux qui peuvent être considérés par le découpage suivant :

I.3.2.1 Socle kabyle

Il apparait sous forme de trois épointements en Algérie du nord qui sont insérer au sein de vaste nappes matériel de flysch nous avons les massifs de chenoua à l'ouest de grande Kabylie au centre et de petite Kabylie à l'EST c'est là que nous allons nous baser pour notre recherche car ce dernier comporte deux grands ensembles :

a) Un ensemble de roches non métamorphiques

Un ensemble de roches métamorphiques sur le plan structurale la constitution de l'ensemble métamorphique et faite par la superposition de trois édifices tectoniques ainsi nous avons de bas en haut l'édifice de Bougaroun l'édifice des Beni-ferguene et l'édifice supérieur

Ces terrains issus de la particularité cristallophyllienne ainsi que leur couverture de sédiments mésozoïque (chaîne de calcaire) sur une trentaine de kilomètres vers le Sud et recouvrent de formations mésozoïque et paléogène comme en témoigne les fenetres de Filfila, Safia et Benitouffout

b) L'ensemble métamorphique :

On distingue dans l'ensemble de bas en haut :

- Des schistes noirâtres
- Des psammites rouge
- Des grés calcaires
- Des calcaires aorthoceras

●L'édifice des Beni-ferguene

Cette unité dont fait partie notre gisement est chevauchée au sud par l'édifice supérieur recouvert au nord par des formations numidiennes ainsi que de formation oligo-miocène Kabyle

Cet édifice constituer d'une sous unité inférieure formée par l'alternance de metapelite claires et sombre des lentilles de pyroxenites et des granites a grains fins et a couronné de grenats d'une sous unité intermédiaire para gneissique recoupée par des sils d'amphibolite et aussi d'une autre sous unité supérieure metapeliptique dans laquelle s'intercalent des dalles d'ortho gneiss

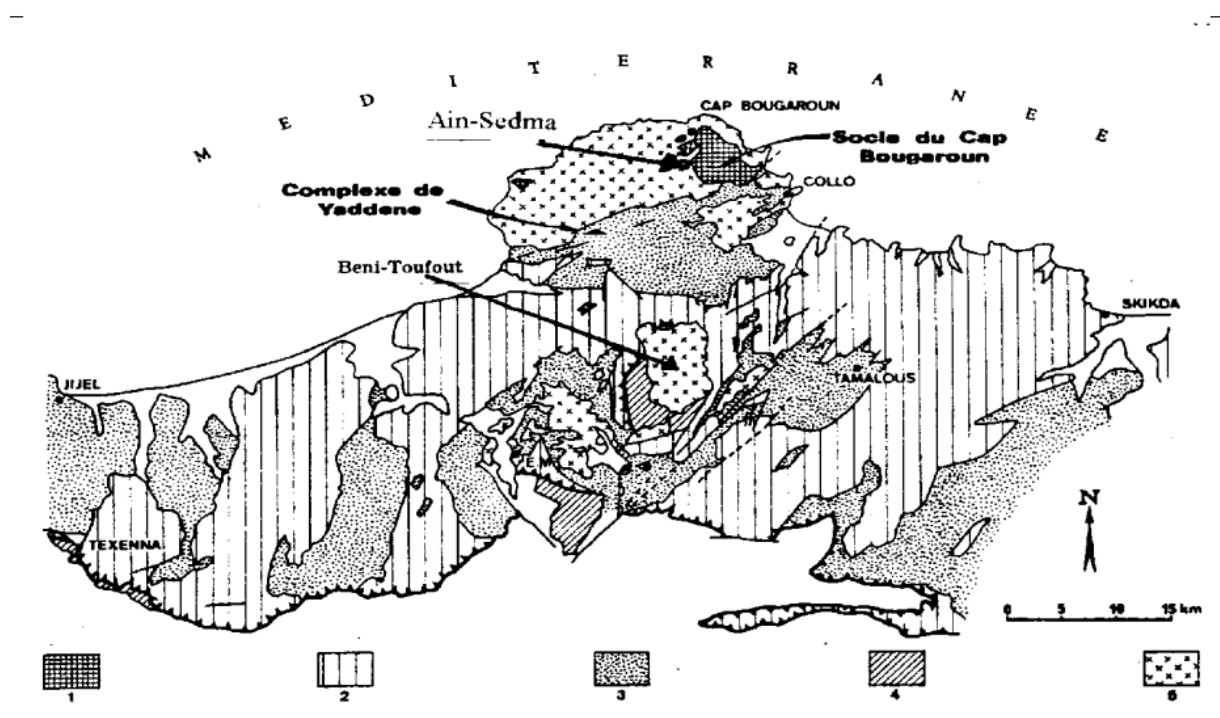


Figure 2: Carte géologique représentatif de la petite Kabylie [4]

I.3.3 Géologie locale [2]

Le gisement fait partie intégrante de la Kabylie de Collo elle appartient plus précisément à l'édifice des Beni Ferguene son dispositif structural se montre en apparence simple mais présente des caractères structuraux métamorphique complexe un socle cristallo-phylinne apparait dans le secteur de notre étude qui est affecter par la tectonique

Les roches encaissant le gite de tamazer sont constituer essentiellement à partir de gneiss de micaschiste et accessoirement de granites plus ou moins gneissique ce gisement se présente sous forme de lentilles affleurant avec une épaisseur qui varie par rapport à l'altération intensifier des gneiss le gisement est anticlinal a flancs doux subdivisé en quatre corps (central, nord, oriental, et sidi Kader) on associe le kaolin a la zone d'altération ou se forme une couche ariainisé et kaolnisé

Les formations non affectées par l'érosion ont une forme irrégulière et forment des bandes allongées avec des côtes à pentes douces vers le NE. Elles sont recouvertes par des graviers et des sables argileux puissants de 0.2 m à 8.6 m. Ce gisement se trouve dans une région où les formations géologiques sont généralement composées de roches sédimentaires et métamorphiques. Le kaolin y est principalement formé par l'altération des feldspaths contenus dans les roches granitiques ou d'autres roches riches en silicates. Cette altération est souvent influencée par des conditions climatiques spécifiques et la présence d'eau.

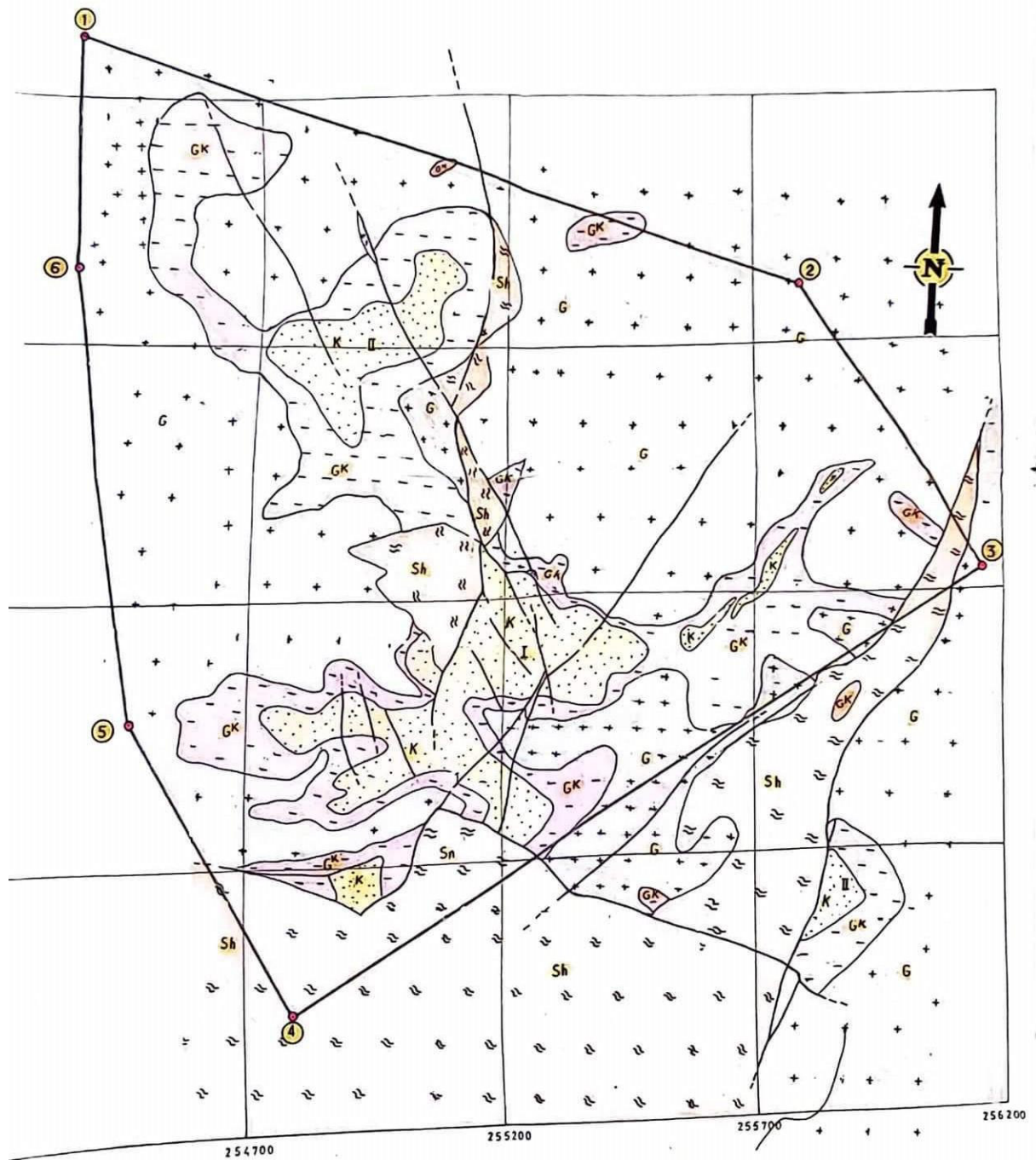
Le kaolin de Tamazert est typiquement du kaolin primaire, formé directement sur place par altération des roches mères granitiques. Ce type de kaolin est généralement pur et de haute qualité, mais peut varier en composition et en pureté selon les zones du gisement.

Les conditions géologiques du gisement influencent directement les méthodes d'extraction. Étant donné que le kaolin est souvent trouvé en couches relativement peu profondes, l'extraction est généralement plus simple comparée à d'autres types de gisements minéraux. Cependant, les conditions locales, telles que la présence d'eau souterraine et la stabilité des couches de kaolin, doivent être prises en compte pour assurer une extraction efficace et sécurisée.

Les quatre corps sont étendus sur des surface importante sont :

- **Corps Central** : c'est le plus important et le mieux affleurant. Il est étudié sur une longueur de 600 m du SW au NE et sur une largeur de 130 à 480 m.
- **Corps Nord et Oriental** : Ils font suite au corps central, et se caractérisent par une même orientation de leur axe.

- **Corps Nord** : Il est étalé sur une superficie de 420 x 240 m.
- **Corps Oriental** : Il est étalé sur une superficie de 440 m x (10 à 50 m).
- **Corps de Sidi Kader** : Il a une position spécifique, et est encaissé dans les schistes dans un bloc tectonique. Il est de forme ovale (100 m x 80 m). Ses limites à l'Ouest sont presque linéaires



LEGENDE

- gneiss
- gneiss kaolinisé
- kaolin sableux
- schist
- faillies
- transformation des cordonnées en UTM
- délimitation des périmètre minier par les cordonnées 1-2-3-4-5-6 dont la superficie est de 202,2496 (ha) par décision d'assimilation N° 84/01/18 de 20mars 2002 du ministère de l'énergie et des mines

Figure 3: Carte géologique du gisement de Tamazert El-Milia [2]

I.3.4 Description des affleurements [3]

Les corps du kaolin sont groupés dans une aire carrée de 2000m de côté ils se trouvent dans puissante formation gneissique d'orientation général NE.SW avec pendage moyen dirigé vers NW cette formation est flanquée sur son versant sud par une série de micaschistes à deux micas et à grenats c'est-à-dire que la composition géologique d'un affleurement rocheux il est constitué 'une série de micaschistes à deux micas et à deux grenats (roches métamorphiques cristallines, riches en micas et en grenats) qui se situent sur le côté sud d'une formation plus large. Le terme flanqué signifie que les micaschistes bordent ou encadrent cette autre formation autrement dit qu'ils se trouvent à ses côtés sur le versant sud

Tous les corps du gisement en question résulteraient de l'altération in situ d'un faciès gneissique qui se localise dans la partie supérieure du relief. Les gneiss kaolinifères ainsi engendrés peuvent contenir des intercalations de quartzites ces dernières constituent généralement l'ossature des collines.

Dans le secteur situé à l'est du Sidi Kader le gneiss plonge vers le sud contrairement à ceux observés à l'ouest

Il est possible qu'on ait affaire à deux compartiments séparés par une faille ainsi que peut le laisser supposer des roches mylonitiques observées sur le flanc sud du Sidi Kader

I.3.5 Description pétrographique [4]

Cette étude nous permet d'observer trois formations minéralogiques :

Formation micaschistes ; l'étude pétrographique de cette formation a permis de distinguer deux types de faciès qui sont les micaschistes à deux micas et les micaschistes à grenat.

Formation gneissique : on remarque trois types de gneiss pour cette formation qui sont comme suit les gneiss à tourmaline les gneiss oreilles et les gneiss à deux micas.

Formation quartzites : les termes quartzitiques viennent s'intercaler au sein des gneiss et des micaschistes en bancs.

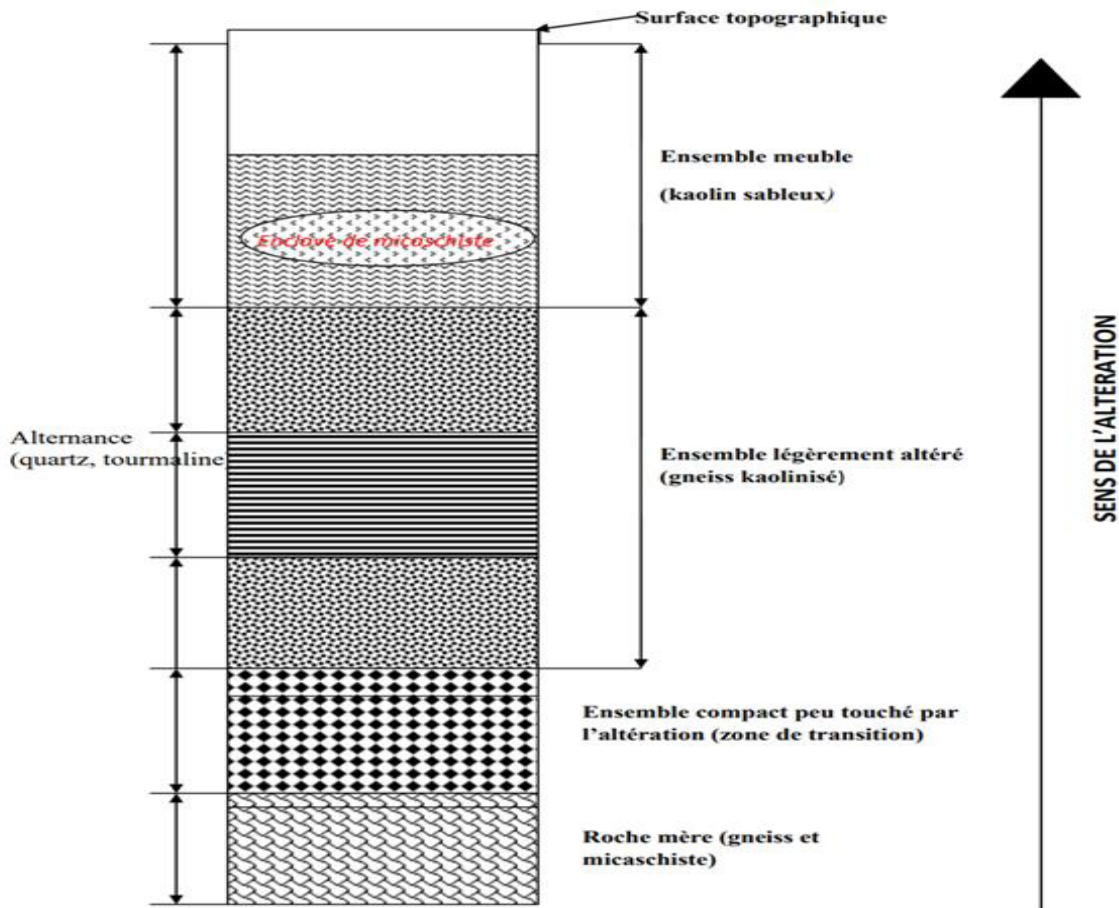


Figure 4: Lithostratigraphie du gisement de tamazert [3]

I.3.6 Tectonique du gisement de tamazert [5]

Une succession d'événements tectonique qui sont succédé qui ont engendré la structure du gisement comme l'ensemble de la petite Kabylie on a pu indiquer la présence de quatre groupes de failles qui se distingue par leur orientation et leur âge.

Les fissurations du quatrième groupe sont les plus grandes. Chaque groupe de fissuration est étroitement liées à une faille correspondante il faut aussi noter qu'au voisinage immédiat des failles le nombre des fissures est toujours plus important qu'ailleurs

L'activité tectonique a été suivie par des processus hydrothermaux localisée le long des failles et des fissures.

I.4 L'exploitation [6]

Le mode d'exploitation utilise dans la carrière est à ciel ouvert avec une méthode d'exploitation continue de système transversal avec un seul bord

La carrière est devise en 2 types de chantier à connaitre chantier d'hiver est chantier d'été car notre gisement est constitué du kaolin sableux et le gneiss kaolinisé qui sont glissante à cause de leur composition d'argile

On a quelques paramètres utilisés dans la carrière

La plateforme de travail qui est utilisé pour le stationnement des engins de travail, avec une largeur qui varie de 15 à 20 m et une longueur entre 100 et 180 m, la hauteur des gradins est $H_g \leq 5m$, l'angle d'inclinaison du gradin 75° , est pour assure la sécurité du chantier et évitées les glissements des terrains l'angle du bord est 45° .

La pente des pistes ne dépasse pas les 14% pour facilite l'accès et le déplacement des engins

L'évacuation des eaux se fait par gravite en forment une douce pente sur la plateforme



Figure 5: front d'attaque de la carrière

1.4.1 Abattage

L'abattage se fait mécaniquement à l'aide de deux pelles excavatrice de la marque (DOOSAN)

L'une est de type DX225 et l'autre est de type DX340

Le pelleteur élabore l'abattage selon le degré de qualité qui doit répondre à cinq critères : la blancheur, la teneur, la viscosité (TMSM), la surface spécifique (BET) et l'abrasivité, mais parmi eux ya deux qui sont les plus important sont la blancheur et la viscosité

Selon ces critères on distingue 3 destinations du kaolin

- kaolin destine à l'usine de traitement

- kaolin destine au cramique vaisselle
- kaolin destine aux carreaux sol et faïence

1.4.2 Chargement

Le chargement dépend de plusieurs facteurs qui sont relie directement avec cette opération comme la productivité exige par l'Entreprise, le chargement sélectif des roche, paramètre de la carrière et ses élément géométrique et les conditions climatique et selon les exigences clientèle l'étape de chargement se fait par une pelle chargeuse a pneu et parfois se fait avec la pelle excavatrice à partir des près stock identifier

La capacité de godet et la dure de cycle (qui dépend de conducteur) qui estime dans notre carrière de 30(s) pour la pelle et 45(s) pour la chargeuse sont des facteurs principaux qui influent sur la productivité de la chargeuse

1.4.3 Transport

L'Entreprise mis en disposition 2 camion de 15tonnes chacun de la marque Mercedes pour assure l'opération de transport de la carrière vers la station de traitement ou pour d'autre petite tache comme l'homogénéisation au niveau de la carrière, mais le kaolin distribue directement vers la clientèle se transporte par des camions prive

1.5 Traitement du minerai [7]

Le traitement du minerai est une phase indispensable pour améliorer est enrichir la qualité du minerai, ou plus précisément est d'augmente la teneur du kaolin qui est 13% dans le tout-venant et pour obtenir le produit il faut passe par plusieurs opérations chaque une à son rôle et son fonctionnement Ce schéma représente brièvement ces opérations

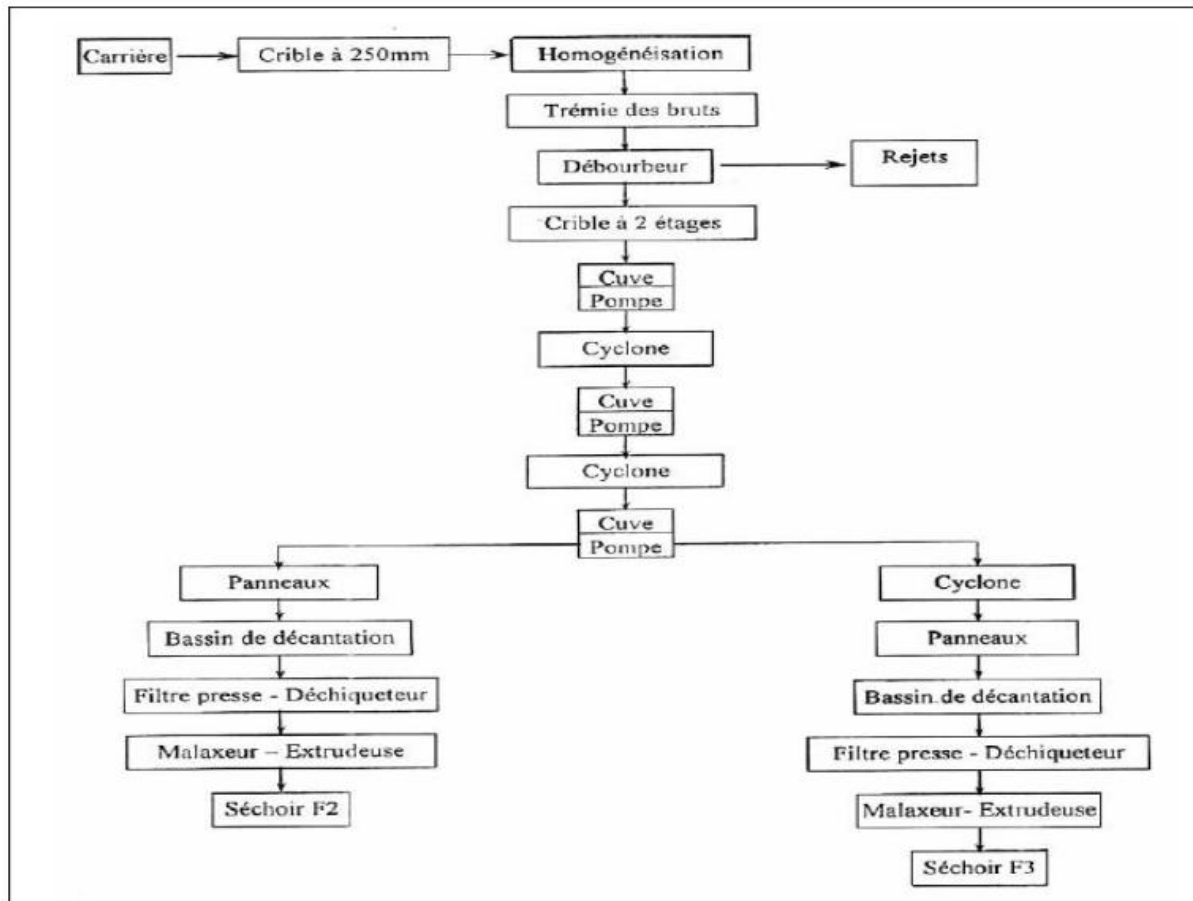


Figure 6: Etape de Traitement du kaolin de Tamazert, El Milia

Source (ENOF, SOALKA EL Milia) [7]

1.5.1 Homogénéisation [8]

Le processus d'homogénéisation implique le mélange et le brassage de la boue afin d'assurer une uniformité et une cohérence des particules de kaolin. Cette étape est essentielle pour garantir la qualité et les caractéristiques recherchées du produit final de kaolin. La boue de kaolin, composée d'eau et de particules de kaolin, est continuellement agitée et brassée pendant le processus d'homogénéisation afin d'assurer une dispersion optimale des particules. Habituellement réalisée dans un réservoir ou un récipient dédié équipé de dispositifs de mélange tels que des palettes ou des agitateurs, l'homogénéisation vise à éliminer les incohérences ou les anomalies dans la composition de la boue, la distribution granulométrique ou la teneur en humidité. Elle contribue également à la dissolution des agglomérats ou des grumeaux, assurant ainsi une répartition uniforme des particules de kaolin.

1.5.2 Traitement par voie humide [8]

Après le traitement, on parvient par obtenir les produits de concentré suivants :

1. K.T.2 : (Ou F2 Ou K.F., Kaolin Ferrifère) : kaolin enrichi après un cyclonage normal, sa Concentration en kaolinite est. Comprise entre 65 et 70 %.
2. 2- K.T.3: kaolin enrichi après un cyclonage plus élevé, sa concentration en kaolinite est supérieure à 75 %.
3. 3- K.T.3B : kaolin enrichi K.T.3 qui a subi un traitement chimique de déferrisation, c'est-à-dire réduction des oxydes et hydroxydes de fer libres.

Elle comporte plusieurs ateliers correspondants chacun à une fonction précise. Dans le sens de l'écoulement du minerai on distingue :

- l'alimentation en minerai brut depuis une trémie mobile jusqu'à l'entrée du débourbeur



Figure 7: Trémie mobile



Figure 8: convoyeur à bande

●le débourbage pour l'obtention de granulométrie inférieure à 80 mm constituée d'un mélange de sable et d'argile kaolinique



Figure 9: Débourbeur

. Le produit récupéré est amené jusqu'à **un crible** vibrant ou s'effectuera la deuxième séparation à une maille égale à 2 mm



Figure 10: Crible vibrant

. Le passant de ces cribles doit subir une troisième séparation dans les hydro cyclones à une coupure de 70 μm . La surverse alimente les hydrocyclones secondaires à une coupure 30 μm
La surverse de l'hydrocyclone secondaire constitué de 0 – 20 μm



Figure 11: Batterie hydrocyclone

Produit de base de toute la production de kaolin et s'effectuent la quatrième séparation par des panneaux tamiseurs, le passant obtenue sera déversé dans un bassin de décantation. La sous verse du hydro cyclone secondaire constituée des micas et quartz fins et de kaolin grossier. Le dessablage qui fournit d'une part un sable d'une granulométrie de 0.07 à 2 mm L'essorage et l'hydro cyclonage de plus en plus fin de la pulpe 0 - 0.07 mm jusqu' à l'obtention des deux granulométries kT2 et kT3 et des rejets GW1 et GW2 de 20 à 70 μm , le traitement de ces rejets pour la récupération des kaolins. L'évacuation des rejets sableux vers les filtres Philippe et de la fraction kaolinique vers les bassins de décantation, classification pour obtention une pulpe à 220g/L.

- **Les panneaux tamiseurs** munis des toiles 40×40 μm lavées par un essorage mobile permettent d'éliminer les dernières particules grossières contenues dans la pulpe de kaolin.



Figure 12: Panneaux tamiseurs



Figure 13: Bassin de décantation

●Épaississement

Après le dernier étage de classement, les pulpes doivent être déshydratées pour subir les traitements suivants, tels que le blanchiment et la déshydratation afin d'obtenir la sédimentation du kaolin à grains fins. Cela nécessite deux épaississeurs, l'un circulaire et l'autre rectangulaire, dotés de grandes surfaces. Chacun d'eux est relié à un réservoir agissant comme une station de floculation, qui alimente la pulpe en substance chimique (floculant). La pulpe épaissie est extraite par pompage.

●Le hall de production [8]

Est constitué des sections suivantes : la section d'alimentation en pulpe de 220 g/l, la section de blanchiment de la pulpe KT3 visant à atteindre une blancheur de 82 points nécessaire pour le KT3B destiné à la charge papier, et la section de filtration comprenant 4 filtre-presse de 1 plateaux chacun.



Figure 14: Réservoirs d'agitation de kaolin

●blanchiment [9]

Dans le cas du kaolin destiné à être utilisé comme charge papetière, il est essentiel d'avoir un indice de blancheur élevé, car la coloration du kaolin est souvent attribuée à une teneur élevée en élément de fer. La suspension de kaolin extraite du réservoir à pulpe est d'abord dirigée dans un tube mélangeur où elle est acidifiée par l'addition de H_2SO_4 , puis traitée avec l'agent de blanchiment, qui est l'hydro sulfite de sodium $NaHSO_3$.

Le processus de blanchiment est entièrement automatisé et repose sur trois paramètres principaux : le débit, la densité et le pH

●Pressage du filtre-presse : [7]

Lors de la phase de remplissage, un mélange de particules de kaolin et d'eau forme une boue qui est introduite dans le filtre-presse. Il est important de s'assurer que lors de la distribution sur les toiles filtrantes, ce mélange se répartit uniformément sur toutes les surfaces pour une efficacité optimale. Une fois à l'intérieur, ces couches de tissu agissent comme des barrières physiques permettant à l'eau de s'infiltrer tout en retenant les particules solides à l'intérieur. En appliquant une pression dans ce processus de filtration, nous pouvons aider à séparer les éléments indésirables des solides souhaités, réduisant ainsi sa teneur en humidité. Au fur et à mesure que la filtration se produit avec le temps, il restera moins de liquide, ce qui entraînera des substances ou des « gâteaux » de plus haute densité ressemblant à de la boue composée principalement de solides de kaolin déshydratés ainsi que de résidus de matériaux redondants piégés à l'intérieur.



Figure 15: Filtre à presse

●Caisse doseuse/déchiqueteuse

Kaolin est transporté par le tapis vers un ciseau déchiqueteur qui découpe les gâteaux en morceaux.

La malaxeur-extruder traite les pâtes à sécher en formant des nouilles uniformes. Les bras malaxeurs pressent la pâte à travers des grilles tamisâtes perforées de trous de 11 ou 12 mm de diamètre. Les nouilles sont uniformément réparties sur la bande sécheuse. La cuve est constituée de deux parois latérales logeant les paliers des bras malaxeurs et leurs étoupages,

ainsi que d'un caisson renforcé à deux auges sur lequel sont fixées les grilles tamisantes échangeables. L'intérieur de la cuve est protégé par des tôles d'usure.

Les grilles tamisantes sont perforées sur une longueur d'environ 1200 mm pour une répartition uniforme des nouilles sur une bande de même largeur. Les bras malaxeurs sont équipés de racleurs à leurs extrémités ainsi que de tôles d'usure ajustables. Le réglage du débit s'effectue en variant le jeu des tôles d'usure des bras et des grilles tamisantes.

●Séchage

Le séchage est pour le but de réduire humidité du kaolin de 35% à 12%, Le processus de séchage fait appel à un séchoir à trois niveaux comprenant sept cellules de séchage et une cellule de refroidissement. Ce séchoir est équipé de plusieurs ventilateurs : deux pour l'extraction et le séchage, sept pour le mélange et le séchage, un pour l'extraction et le refroidissement, un pour le soufflage et le refroidissement, et un pour le soufflage et le séchage. L'équipement de ventilation et de chauffage des cellules de séchage comprend un brûleur à gaz, un panneau de distribution de gaz, un ventilateur de soufflage d'air de dilution et plusieurs ventilateurs pour la ventilation

Conclusion

Le gisement de kaolin de Tamazert, situé dans la région d'El Milia à Jijel, est un site notable pour l'extraction de kaolin, une argile utilisée principalement dans la fabrication de céramiques et de porcelaines.

- [1] Audit environnemental SOALKA 2014 / SPA El-Milia
- [2] RAPPORT GEOLOGIQUE ANNUEL ACTUALISE 2022/SPA EL-Milia
- [3] Sonarem, Travaux de prospection et d'évaluation du gisement de kaolin de Tamazert, rapport intermédiaire, 1977
- [4] (Bouillin J.P., Kornprobst A., (1974). Association ultrabasique de la petite Kabylie : Péridotite de type Alpine et complexes stratifiés ; Comparaison avec les zones internes bético rifaines. Bull. Soc. géol. France, 167, pp 183-194.)
- [5] (Boukoffa M, (2008). Thèse de Magister « Caractérisation géologique, géochimique et minéralogique du phénomène de kaolinisation du gisement de Tamazert – Jijel », Université d'annaba.)
- [6] plan d'exploitation complexe des Kaolins D'El Millia 2024
- [7] Etape de Traitement du kaolin de Tamazert, El Milia Source (ENOF, SOALKA EL Milia)
- [8] Chouafa Mohamed ; Comportement du kaolin à l'enrichissement par flottation. Cas de la mine de Tamazert-Jijel.Memoire de Doctorat université de Annaba 2016.
- [9] Zegga Amel & Tahir Lynda ; Enrichissement des sous-produits siliceux générés par le traitement du kaolin de Tamazert (Wilaya de Jijel) 2022

Chapitre II

Théorie de la variable régionalisée

II.1. Objectif du chapitre

La géostatistique est une discipline très répandue dans les mines d'or du Witwatersrand depuis près de 60 ans. La méthode traditionnelle d'estimation de la teneur d'un bloc de minéral a été corrigée statistiquement par Daniel Krige en utilisant un nombre limité d'échantillons pris autour du bloc à exploiter.

La théorie a été développée par Georges Matheron (1963) qui a introduit un outil d'analyse de la continuité spatiale des teneurs, le variogramme, et une méthode d'estimation basée sur le variogramme, le krigeage.[10]

La géostatistique est devenue, avec les expériences et les avancées des trente dernières années, la méthode la plus efficace pour l'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 standards.[11]

II.2. Objets et modèles de Géostatistique

La géostatistique se concentre sur l'analyse des phénomènes naturels répartis dans l'espace (phénomènes régionalisés) et/ou dans le temps (minéralisation, pollution, propriété physique des roches, pluviométrie). Il s'agit d'un phénomène régionalisé qui peut être mesuré dans chaque section de l'espace de définition. (Figure II.1) [11].

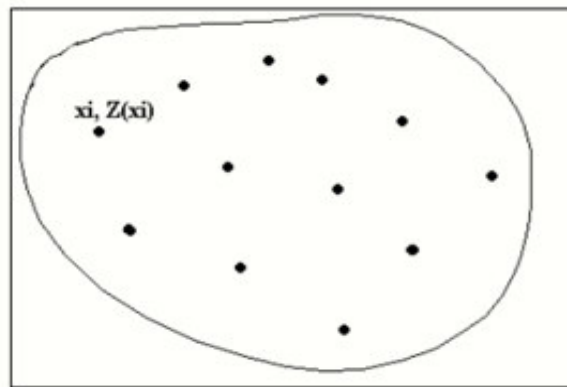


Figure 16: Répartition des données [11]

En cas de valeur unique (valeur vraie) de la variable régionalisée $Z(x_i)$ au point x_i , la géostatistique examinera la relation spatiale entre la variable régionalisée $Z(x)$ et sa structure dans l'espace, ce qui est appelé géostatistique transitive. Le modèle primaire est représenté par cette géostatistique. [12].

Prenons maintenant en compte le fait que $Z(x_i)$ est une variable aléatoire au point x_i , ce qui permet de réaliser plusieurs réalisations : Toutes les valeurs $Z(x_i)$ seraient des réalisations spécifiques de $Z(x)$. La fonction aléatoire (F.A.) $Z(X)$ serait composée de toutes les variables aléatoires. On appelle géostatistique intrinsèque ou modèle topo-probabiliste la géostatistique des F.A. C'est celle-ci qui est la plus fréquemment employée. En outre, si les moyennes des variables aléatoires aux différents points x_i de l'espace de définition sont égales, on considère que le phénomène est équivalent. Théorie de la variable régionalisée, est immobile. – La moyenne de l'espérance mathématique est constante et égale à m : La géostatistique est une approche stationnaire, sinon si elle est variable et non égale à m donc c'est une approche non stationnaire. [12]

Dans les mathématiques, ce phénomène est une fonction dépendant du temps $z(t)$ que l'on considère comme une réalisation d'une fonction aléatoire $Z(t)$. On ne connaît la fonction aléatoire $z(t)$ qu'en un nombre donné de points t_n et les valeurs $z(t_n)$, qui servent à réaliser les variables aléatoires $z(t_n)$. On peut définir la géostatistique comme une application de méthodes mathématiques traditionnelles (comme les statistiques, l'analyse des données, le traitement du signal, l'analyse de Fourier.) à toutes les variables structurées. Cependant, la géostatistique est principalement une méthode qui implique l'analyse de données réelles. [10].

Les simulations conditionnelles permettent de générer des réalisations équiprobables d'un champ aléatoire, conditionnellement aux données expérimentales. Elles permettent d'évaluer l'incertitude spatiale. [13]

En résumé, la théorie des variables offre un cadre théorique et méthodologique rigoureux pour modéliser et prédire des phénomènes spatiaux, en s'appuyant sur des outils comme le variogramme et le krigeage. Ses applications sont nombreuses, de l'estimation des réserves minières à la prédiction de la pollution des sols.

II.3. Domaines d'application de la géostatistique [13]

La géostatistique est employée dans divers secteurs tels que l'environnement, le pétrole, la géologie et les mines, ainsi que dans le domaine de la santé.

- Étude des Sites et sols pollués : études de sites pour des pollutions métalliques ou organiques ;
- Étude 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 krigage. 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).

Géotechnique : c'est l'analyse de la simulation des incertitudes concernant le comportement de constructions de grande envergure et simulation géostatistique des paramètres géotechniques. La modélisation démographique consiste en une analyse géostatistique des données de recensement.

Géotechnique analyse de la simulation des incertitudes concernant le comportement de constructions de grande envergure et simulation géostatistique des paramètres géotechniques. La modélisation démographique consiste en une analyse géostatistique des données de recensement. La géostatistique est employée dans le domaine du pétrole, pour la modélisation géométrique implique l'interpolation des surfaces qui servent de limites ou de surfaces de référence pour les unités, en prenant en compte toutes les informations disponibles telles que les cotes des toits mesurées aux puits, les données de pendage et d'orientation, ainsi que les contraintes d'inégalités et les facteurs de forme fournis par les capteurs sismiques. Il est nécessaire de pouvoir utiliser les données issues de sondages déviés (ou horizontaux) pour interpoler ces surfaces géologiques, tout en prenant en considération la structure géologique.

La prospection et la mine sont des étapes de reconnaissance de la géostatistique tel que :

- 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) [13].

II.4. Exemple d'étude

Le problème peut être *défini de manière simple* : 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 . Soit x_0 un point de cet espace. Peut-on estimer la valeur de Y en x_0 *en fonction* des valeurs $Y(x_i)$ connues ? *Compte tenu de cela*, peut-on obtenir la carte des *différences* de la propriété dans l'espace géographique ? *En prenant en compte les* prélèvements qui l'entourent, il *serait* 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 le principe classique de la zone d'influence. *Il est donc* raisonnable d'utiliser un procédé d'estimation qui donne plus d'importance. *Plusieurs* méthodes ont été proposées pour *déterminer le* poids accordé à chaque échantillon *face à cette question classique et récurrente*. La plupart des méthodes *ont basé* sur la distance entre l'échantillon et le point à estimer. Par exemple, les poids attribués à chacun des échantillons peuvent être approchés de la distance ou de la distance au carré [14]. Bien entendu, cette approche n'est pas parfaite, certaines questions demeurent pertinentes. Quel est le poids le plus approprié ? Quelle serait la distance limite au-delà de laquelle nous ne tiendrons plus compte des échantillons ? Quelle est la fiabilité de cette méthode, l'ordre de grandeur des erreurs commises ? Pouvez-vous me dire sur quel type de gisement elle est applicable ? [15]

II.4.1. Hypothèse de stationnarité

Stationnarité d'ordre 2 et covariance spatiale :

La stationnarité d'ordre 2 d'une fonction aléatoire signe que ses deux premiers moments statistiques sont invariants par translation dans le domaine D . Pour tout couple de points x et $x+h$, on a :

$$\frac{1}{2} E[Z(x)] = m$$

$$E[Z(x) - m] E[Z(x+h) - m] = C(h).$$

La moyenne est donc constante sur le domaine et la covariance C ne dépend que de la séparation h . La fonction de covariance, comme le corrélogramme $\rho(h) = C(h)/C(0)$, montre comment la

corrélation se comporte avec la séparation h . La covariance est la fonction d'étude privilégiée des fonctions aléatoires stationnaires d'ordre 2.

II.4.2. Hypothèse intrinsèque

Une hypothèse moins stricte, et donc correspondant à une famille plus large de fonctions aléatoires, est l'hypothèse intrinsèque. Elle correspond à une stationnarité des accroissements de la fonction aléatoire Z . Une fonction aléatoire intrinsèque (FAI) est définie par les moments d'ordre 1 et 2 de ses accroissements :

$$\frac{1}{2} E [Z(x+h) - Z(x)] = 0$$

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

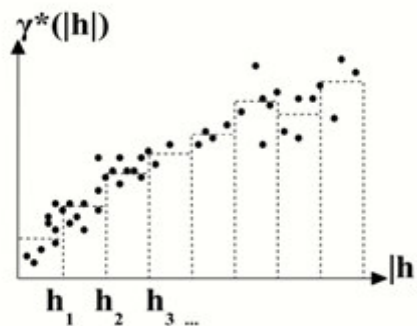


Figure 17: Nuée variographique en fonction de la distance

Où γ est appelé le variogramme de la fonction aléatoire. Le variogramme tel qu'il est défini ici est une mesure de la dissimilarité entre $Z(x+h)$ et $Z(x)$ en fonction uniquement de la distance $|h|$ [16]

II.5. Introduction à la notion de variogramme

La variabilité entre ces deux points (figure II.2) se caractérise par une fonction notée $2\gamma(x,h)$ appelée variogramme [10]

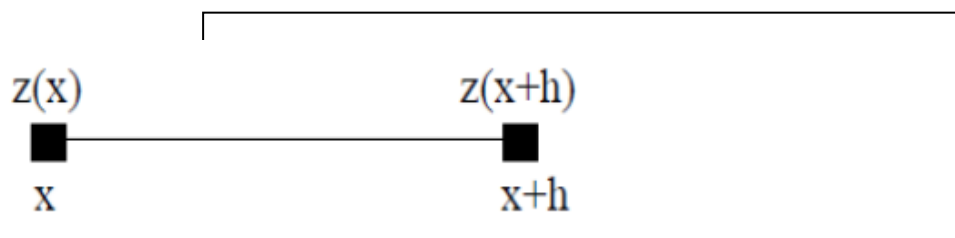


Figure 18: Représentation schématique des points de mesure de la variable

Le semi-variogramme permet de décrire la continuité spatiale d'un phénomène. En moyenne, deux observations séparées par une faible distance se ressemblent davantage que deux observations séparées par une plus grande distance. [17]

II.5.1. Le semi-variogramme théorique

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

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 [18]. 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 éléments fondamentaux : l'effet de pépité, le seuil, et la portée. Ces trois paramètres sont clairement décrits ci-dessous [19]

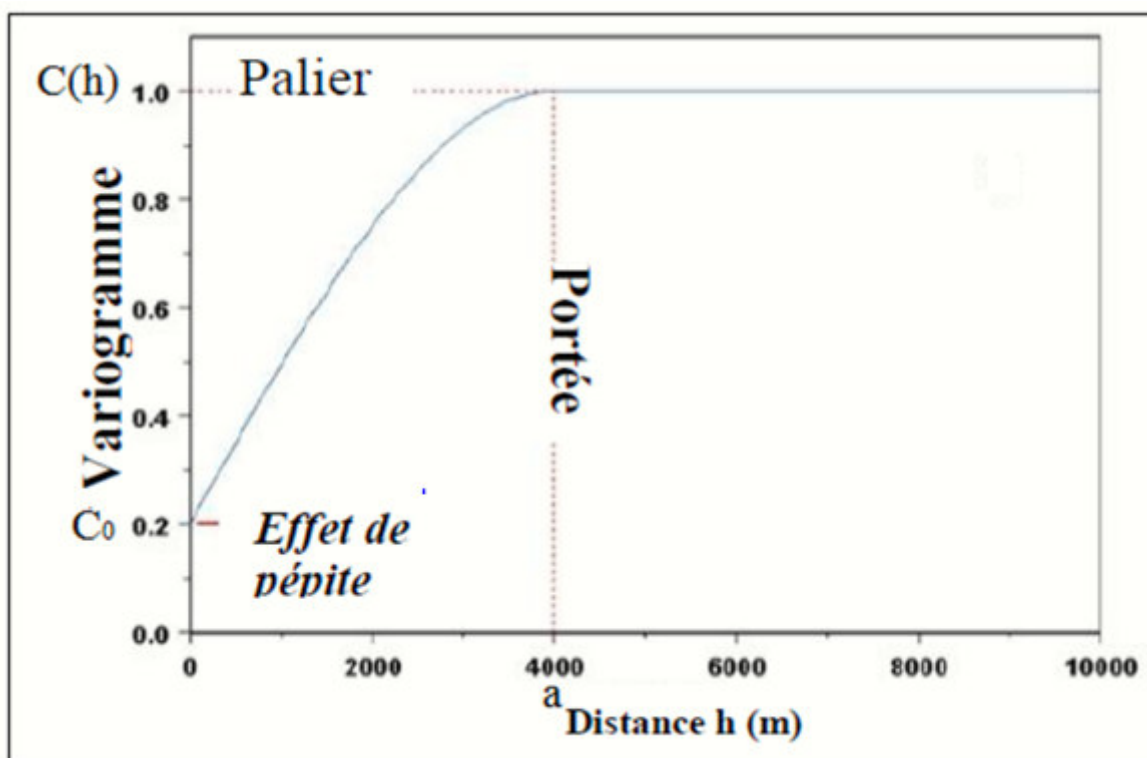


Figure 19: schéma type d'un variogramme[20]

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

L'effet de pépité est une discontinuité de variogramme à l'origine et traduit une forte irrégularité du processus des variations locales. Un effet de pépité est dû aux variations non

détectées à une échelle très faible. La portée est une 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 est représentative de l'hétérogénéité du processus. Le palier est une valeur limite du variogramme pour de grandes valeurs de h . Comme le palier n'est atteint qu'asymptotement, la portée réelle est infinie. C'est pourquoi nous désignons une portée pratique. [20]

$$\gamma_e(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [(Z(x_i) - Z(x_i+h))^2]$$

$N(h)$: nombre de paires dont les points sont séparés d'une distance h [17]

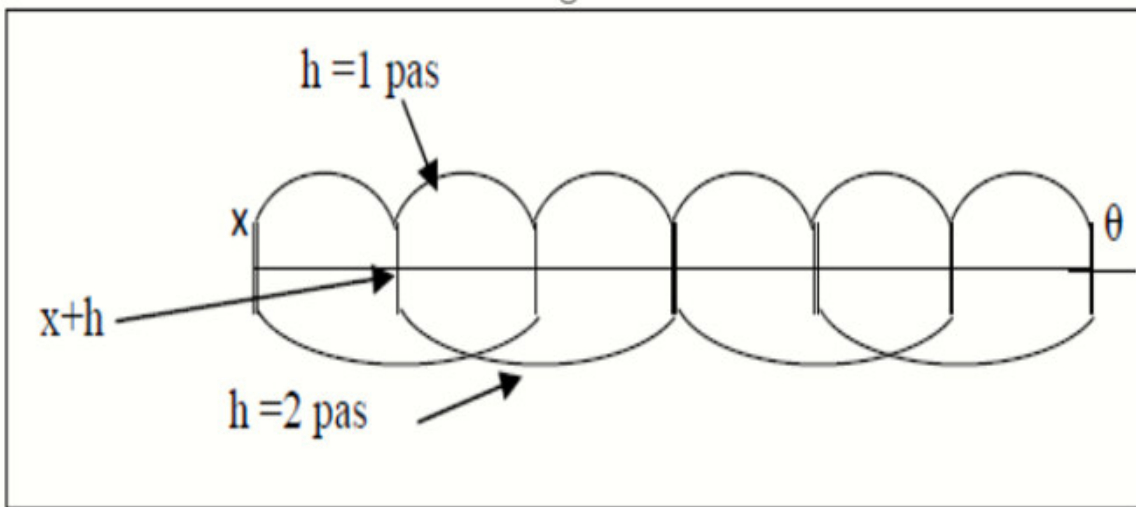


Figure 20: schéma de calcul du variogramme expérimentale [10]

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

$$\gamma_e(h, \theta) = \frac{1}{2N(h, \theta)} \sum_{i=1}^N [(Z(x_i) - Z(x_i+h))^2]$$

Où : $N(h, \theta)$: 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 [19]

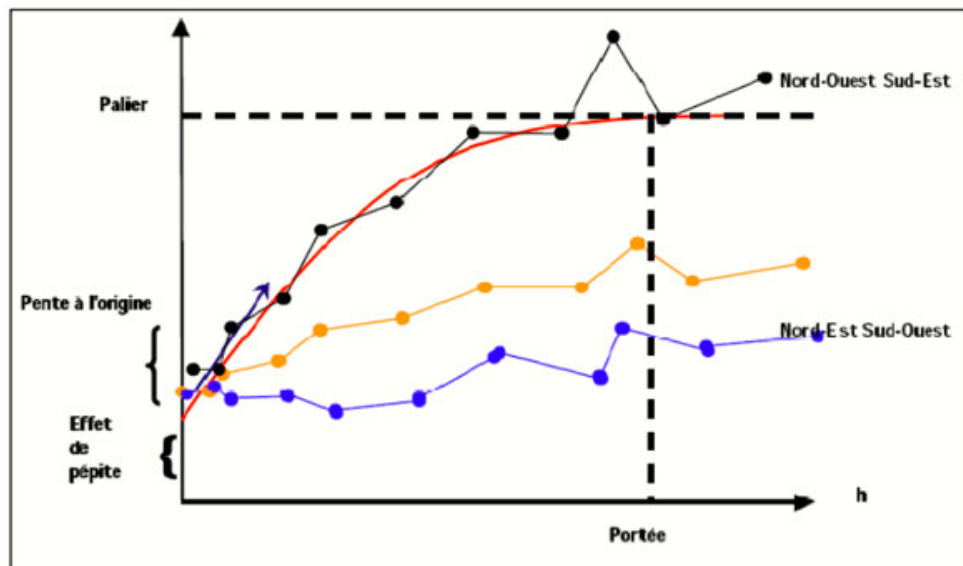


Figure 21: Exemple de variogramme multidirectionnelle [19]

II.6. Schémas théoriques et ajustement des variogrammes

Une fois le variogramme expérimental calculé, il faut 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 utilisés courant sont l'effet de pépité, le modèle linéaire, le modèle sphérique, le modèle puissance, le modèle gaussien et le modèle exponentiel. La combinaison de deux de ces modèles ou plus est également possible [21]

L'effet de pépité :

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

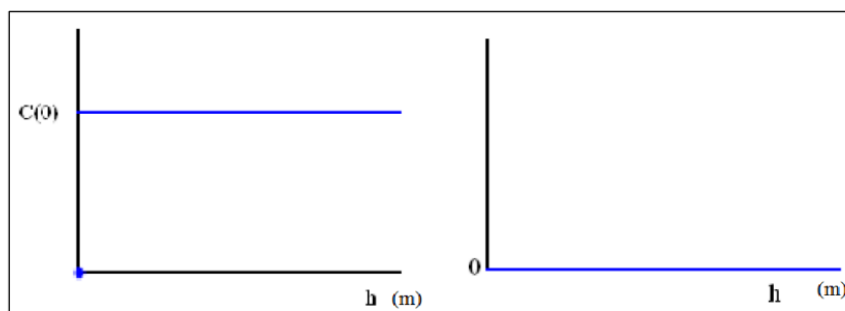


Figure 22: schéma type d'un semi-variogramme (effet d'un pépité) [21]

Ce modèle est un phénomène qui n'a pas de corrélation entre les données, quel que soit la distance qui les sépare [22]

II.6.1. Le modèle sphérique

Le modèle sphérique est probablement celui qui est le plus fréquemment employé. Il est polynomial et sa forme est en adéquation avec ce qui est souvent observé : une croissance presque linéaire jusqu'à une certaine distance, puis une stabilisation. [22]

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C(3h/2a - h^3/2a^3) & \text{pour } 0 \leq h \leq a \\ C + C_0 & \text{pour } h > a \end{cases}$$

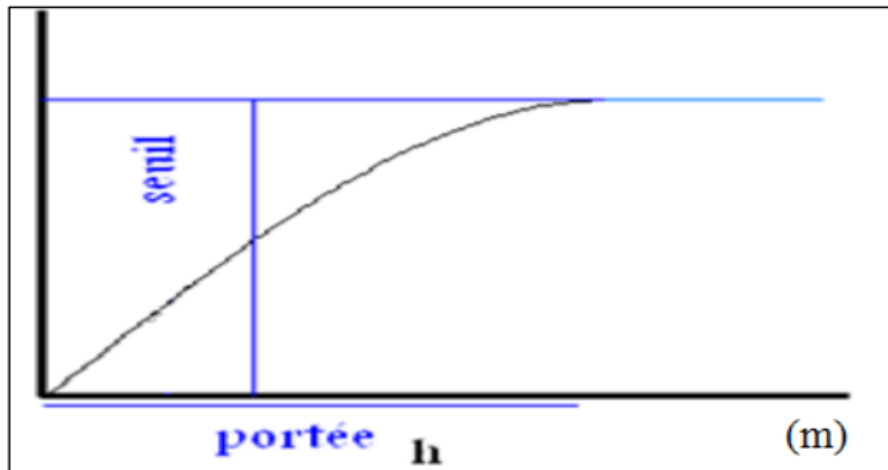


Figure 23 :Schéma type d'un modèle de semi-variogramme sphérique [21]

II.6.2. Le modèle exponentiel

Son expression mathématique est :

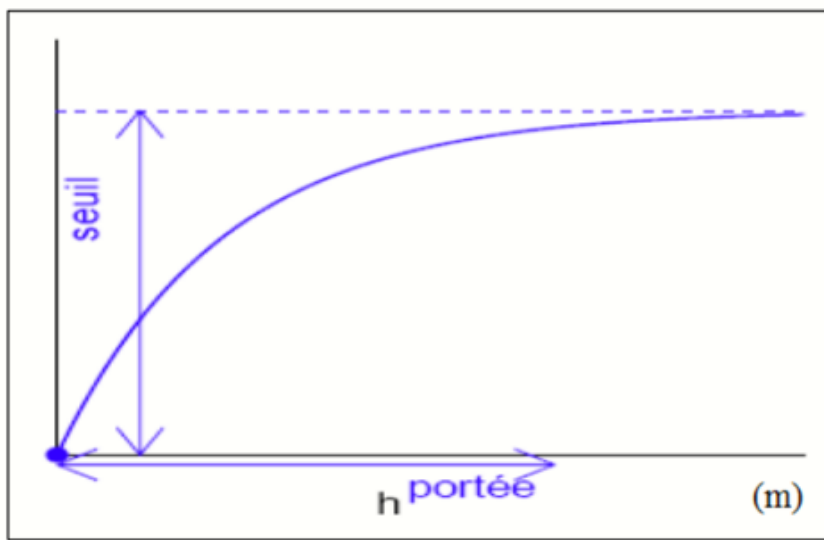


Figure 24:Schéma type d'un modèle de semi-variogramme exponentiel [21]

Le modèle exponentiel croît initialement plus rapidement, mais tend moins rapidement vers sa limite sans jamais l'atteindre réellement. [8]

II.6.3. Le modèle gaussien

Son expression mathématique est :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 [1 - \exp(- h^2 / a^2)]$$

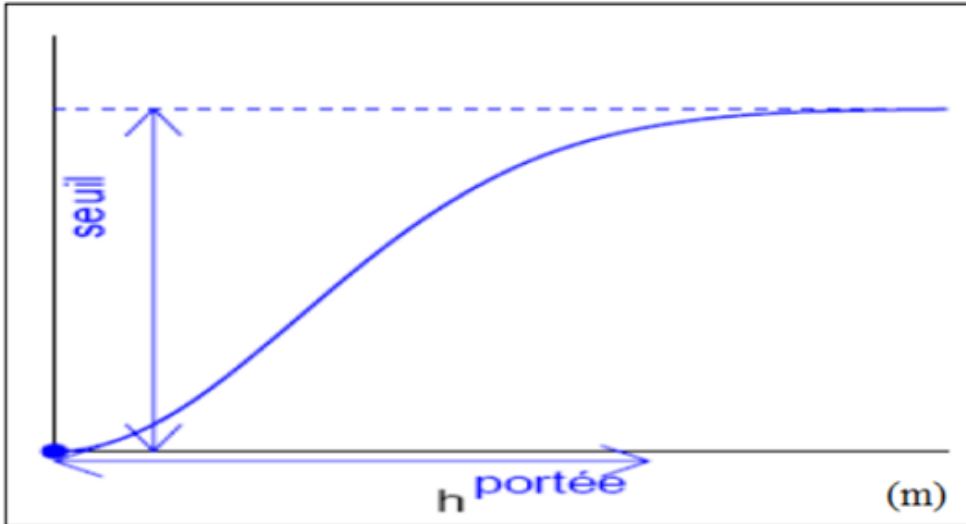


Figure 25: Schéma type d'un modèle de semi-variogramme gaussien [21].

Le modèle gaussien est un processus extrêmement continu. L'expérience suggère que des instabilités numériques se produisent souvent lorsqu'il est utilisé sans effet de pépité [22]

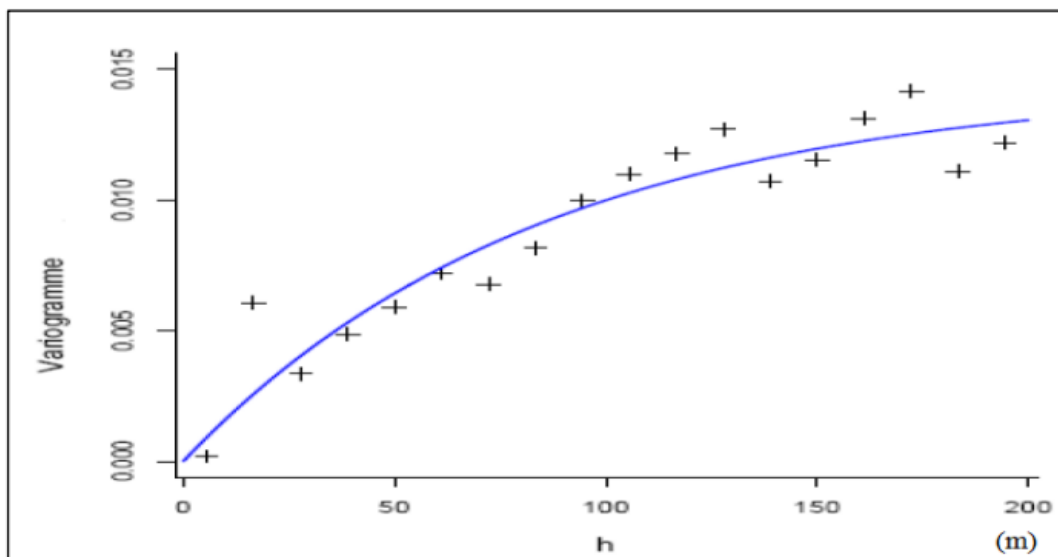


Figure 26: Ajustement d'un modèle théorique (courbe) de semi-variogramme à un semi-variogramme expérimental [21].

II.7. Isotropie et anisotropie

Le variogramme, calculé pour un couple de points dans certaines directions, comme Nord-Sud ou Est-Ouest, révèle parfois des différences de comportement (c'est-à-dire une anisotropie). Si cela ne se produit pas, le variogramme ne dépend donc que de la distance entre les points, et on parle alors d'isotropie. On distingue les deux principaux types d'anisotropie : l'anisotropie géométrique et l'anisotropie zonale [22].

II.7.1. Anisotropie géométrique :

Il y a une anisotropie géométrique chez les variogrammes qui présentent la même variabilité globale, notamment le palier, mais qui ont des portées différentes [15].

II.7.2. Anisotropie zonale :

L'anisotropie zonale, qui est le cas le plus fréquent en pratique, a un impact sur l'ensemble du variogramme ; les portées et les paliers sont différents. L'anisotropie zonale est fréquemment associée à une anisotropie génétique (exemple d'un gisement sédimentaire- direction verticale comparée aux directions horizontales) [15].

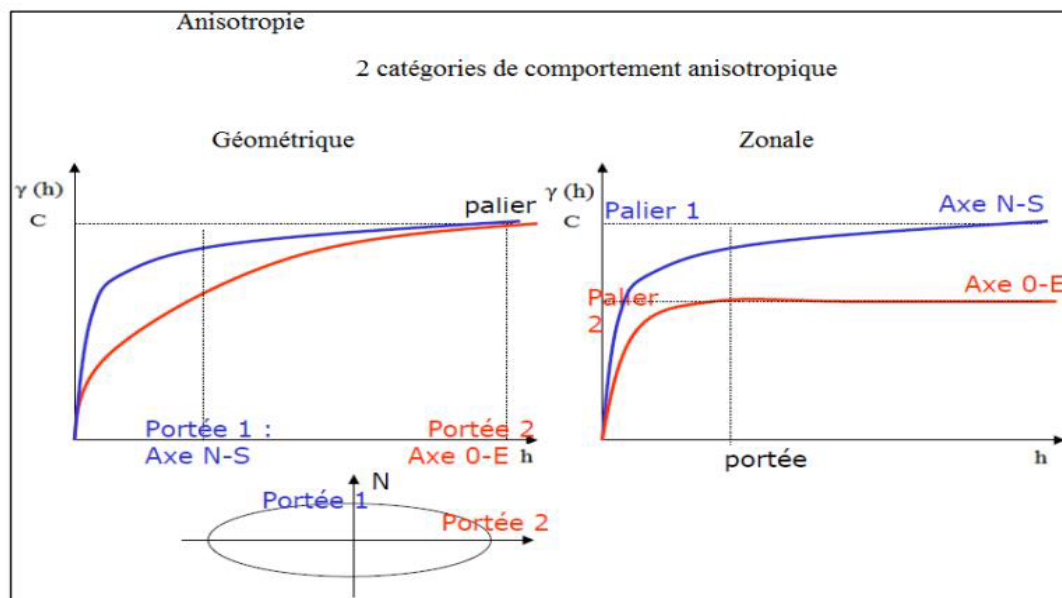


Figure 27: Schéma des variogrammes représentant une anisotropie géométrique et zonale [23]

Afin de revenir à une situation isotrope, il est important de faire une transformation linéaire des coordonnées spatiales, c'est-à-dire une rotation en suivant les directions de plus petite et plus grande continuité [21]

II.8. Le krigeage

Le krigeage est le nom du 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 amélioré et lui a donné la dénomination de krigeage [22]

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

Nous allons nous concentrer sur le krigeage ordinaire, appelé krigeage ponctuel par certains auteurs, qui est le plus fréquemment utilisé et qui répond aux besoins de notre problématique. [24]. Le problème est le suivant : nous avons N valeurs, $z(x_1) \dots z(x_N)$, et nous voulons 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 . Notez la quantité à estimer :

$$z(v) = \frac{1}{v} \int z(x) dx$$

Le volume V se réduit à un seul point en cas d'une estimation ponctuelle. Pour mener à bien cette estimation, nous prenons en compte une moyenne pondérée des données :

$$z^{*(x)} = \sum_{\{i=1\}}^n \lambda_i z(x_i)$$

Les poids λ_i ne sont pas les inconnus du problème. Le problème est le choix des facteurs de pondération les plus appropriés. Nous avons ici recours au modèle géostatistique. Considérons la fonction aléatoire $Z(x)$ qui est liée à la variable régionalisée. On définit de la même façon :

$$Z_x^* = \sum_{\{i=1\}}^n \lambda_i Z(x_i)$$

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

- Sans biais : $E [Z^*(x) - Z(x)] = 0$
- Et de variance minimum : $\text{Var} [Z^*(x) - Z(x)]$

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

$$e = Z(x) - Z^*(x)$$

Le meilleur estimateur est celui qui fournit l'erreur e le plus petit possible au point estimé. Pour l'ensemble des estimations réalisées, la variance de cette erreur doit être le plus petit possible. La variance de cette erreur est la variance d'estimation σ_e^2 .

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

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

Qui peut être réécrit en fonction du variogramme :

$$\sigma_e^2 = (\sigma^2 - \gamma(x, x)) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j (\sigma^2 - \gamma(x_i - x_j)) - \sum_i \lambda_i (\sigma^2 - \gamma(x_i, x))$$

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

$$\sigma_e^2 = 2 \sum_i \lambda_i \gamma(x_i, x) - \gamma(x, x) - \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j)$$

Comme nous l'avons vu, on peut calculer la variance d'estimation en utilisant le covariogramme (II.23), ou le variogramme (II.24). Il est important de rappeler que pour avoir une meilleure estimation, nous devons avoir la plus petite variance d'estimation possible ; c'est-à-dire qu'on doit minimiser σ_e^2 :

$$\sigma_e^2 = \text{Var}[Z - Z^*] = \text{Var}[Z] + \text{Var}[Z^*] - 2 \text{Cov}[Z, Z^*]$$

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 qui doivent être égale à zéro :

$$\frac{d\sigma_e^2}{d\lambda_i} = 0, \quad i = 1 \dots n$$

Cela représente un système d'équation à inconnues (les n poids) qui donnera la variance le plus petit possible, mais dont la somme des poids ne sera pas nécessairement égale à 1 puisqu'il n'y a aucune contrainte dans ce sens. Afin que l'estimateur soit sans biais (équilibré), il faut :

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

En effet, dans ce cas, on a :

$$E[Z^*] = \sum_{i=1}^n \lambda_i E[Z_i] = \sum_{i=1}^n \lambda_i m = m$$

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

$$\begin{cases} d\sigma_e^2 / d\lambda_i = 0, & i = 1 \dots n \end{cases}$$

}

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

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 :

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

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 [8], [15].

II.8.1. Krigeage ordinaire : (ou à moyenne inconnue)

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. [21]

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j \text{Cov}(Z_i, Z_j) + \mu &= \text{Cov}(Z_i, Z_v) \quad \forall i=1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \end{aligned}$$

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 :

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

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

$$C(h) = \sigma^2 - \gamma(h) \quad j = 1 \dots n, \lambda_j = 1.$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - \mu &= \gamma(v, x_i) \quad \forall i=1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \end{aligned}$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(v, x_i) - \gamma(v, v) - \mu$$

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

$$K \cdot \lambda = k$$

$$\sigma_k^2 = \sigma_k^2 - \lambda \cdot k \quad (\text{II.36}) \quad (\text{II.36})$$

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

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

II.8.2. Propriétés du krigeage

Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont :

- *Évaluation* linéaire sans biais, à variance minimale, par construction ;
- Interpolateur *précis* : 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. L'effet d'*écran* varie en fonction de la configuration et du modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus l'effet de pépité est important, moins il y a d'effet d'*écran*.
- *Prend note* de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux. *Le variogramme prend en compte* la continuité du phénomène étudié (effet de pépité, anisotropie, etc... ;
- Effectue généralement un lissage, les estimations ne sont généralement pas variables que les teneurs réelles (point ou bloc) que l'on cherche à estimer.
- Sans prétexte conditionnel. Cela implique que, lorsqu'on applique une teneur de coupure à des valeurs estimées, on récupérera approximativement la teneur prévue. C'est une propriété importante pour les mines. Cette propriété signifie que l'estimateur utilisé est plus lisse que la valeur qu'il cherche à estimer, ce qui est le cas pour le krigeage. [13]

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons tenté de présenter les principes de mise en œuvre d'une analyse géostatistique. La géostatistique est un outil qui permet d'analyser la structure spatiale de la variable étudiée. Ainsi, on est capable de décrire la façon dont la précision de l'information acquise en un point se détériore 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, qui est le krigeage.

[10] 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

[11] 8] : Armstrong M., Carignan J., 1997. Géostatistique linéaire : application au domaine minier”, (les presses de l'école des mines), 115 p.

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

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

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

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

[16] M. Olivier Baume. Approche géostatistique de l'influence des paramètres physiques sur la propagation acoustique à grande distance P 45 2006

[17]]: 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.

[18]]: XAVIER, E., “géostatistique linéaire”, Centre de géostatistique, Ecole des Mines de Paris, p 403, 2001

[19] 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

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

[21]: MAZARI, M., “Etude géostatistique des ressources minières : exemple d'une mine en cours d'évaluation”, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2012

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

[23]: BAILY, J.S., “Géostatistique appliquée”, 22 p. 1999.

[24]: GRATTON, Y., “Le krigeage : la méthode optimale d’interpolation spatiale”, INRSEau-Terre-Environnement. Institut national de la recherche scientifique, 20

Chapitre III

Etude statique et variographique

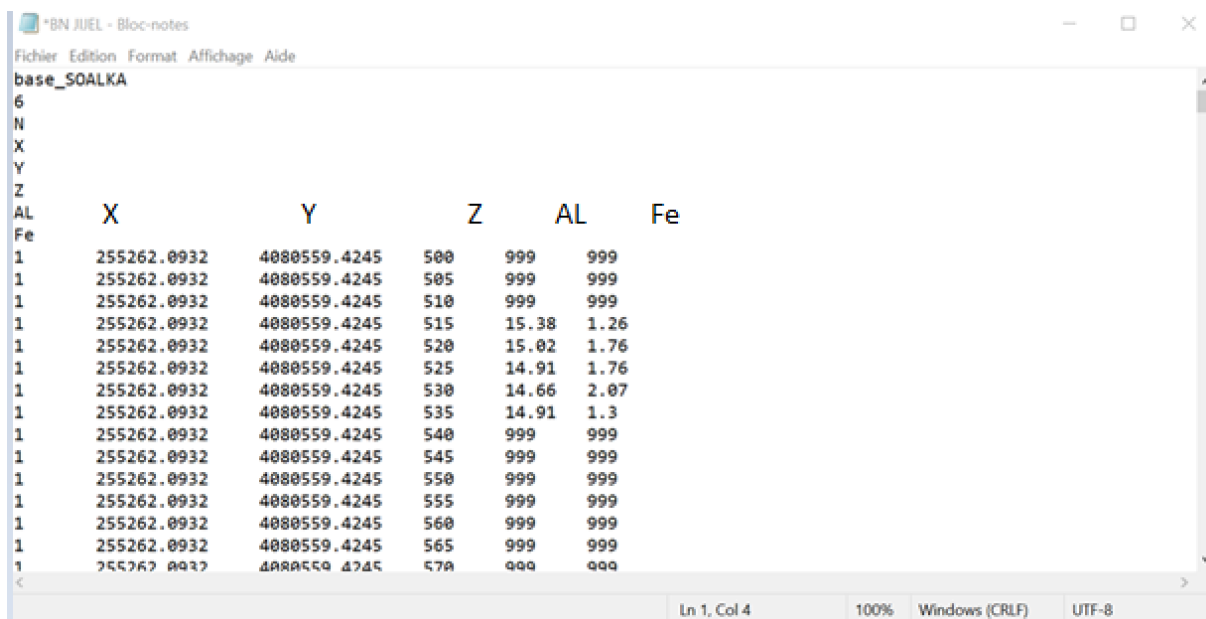
I. Introduction

Pour évaluer les réserves en (réserves en Kaolin) du gisement de Tamazert, nous avons considéré les teneurs en Al_2O_3 comme variable, pour chaque niveau d'exploitation.

Dans le cadre de l'exploration des kaolins du gisement de Tamazert, notre objectif est de préciser la dispersion des réserves en Kaolin, en les classant dans des catégories plus élevées.

Pour ce travail, les calculs variographiques, la modélisation, ainsi que l'estimation krigeage ordinaire ont été réalisés à l'aide du logiciel S-GeMS, version 2.1. Ce programme permet de générer des histogrammes, d'ajuster les modèles théoriques aux variogrammes, et d'estimer des cartes de dispersion des teneurs par krigeage ainsi que leurs variances.

Pour analyser et traiter les données à l'aide d'un outil informatique, il est nécessaire de préparer les fichiers de terrain dans un format spécifique. Une base de données sera créée en les adaptant pour le logiciel S-GeMS, comme le montre la figure, qui illustre les éléments clés pour organiser les données sous forme numérique. Les fichiers ont été sauvegardés avec l'extension « .txt ».



```

base_SOALKA
6
N
X
Y
Z
AL
Fe
1 255262.0932 4080559.4245 500 999 999
1 255262.0932 4080559.4245 505 999 999
1 255262.0932 4080559.4245 510 999 999
1 255262.0932 4080559.4245 515 15.38 1.26
1 255262.0932 4080559.4245 520 15.02 1.76
1 255262.0932 4080559.4245 525 14.91 1.76
1 255262.0932 4080559.4245 530 14.66 2.07
1 255262.0932 4080559.4245 535 14.91 1.3
1 255262.0932 4080559.4245 540 999 999
1 255262.0932 4080559.4245 545 999 999
1 255262.0932 4080559.4245 550 999 999
1 255262.0932 4080559.4245 555 999 999
1 255262.0932 4080559.4245 560 999 999
1 255262.0932 4080559.4245 565 999 999
1 255262.0932 4080559.4245 570 999 999

```

Figure 28: Fichier représentatif de la forme de la base des données, préparé pour l'analyse.

Etude statistique

En géologie, les statistiques sont couramment utilisées pour analyser divers types de données, comme les données hydrologiques, géophysiques et géochimiques. Elles aident principalement à décrire les relations entre les variables et à interpréter les observations d'une matrice de données.

À partir des données recueillies dans un sondage, il est important de commencer par avoir une vue d'ensemble sur la façon dont ces données sont réparties. En effet, analyser la distribution statistique de la variable étudiée est essentiel pour évaluer la qualité et la représentativité des informations par rapport au site observé

Une méthode couramment utilisée pour représenter des ensembles de données est la table de fréquences, accompagnée de son graphique associé : l'histogramme. Les informations de l'histogramme peuvent être résumées à travers plusieurs variables statistiques, telles que :

- **La moyenne, le mode et la médiane** : Ces trois variables permettent d'avoir une idée de la position du centre de la distribution.
- **La variance, l'écart-type et ainsi l'écart interquartile** : Ces variables décrivent la variation des valeurs dans les données.

Dans les ensembles de données des Sciences de la Terre (comme les teneurs), les distributions ne suivent souvent pas une courbe normale. On observe fréquemment beaucoup de valeurs petites et quelques valeurs très grandes

La distribution normale ne convient souvent pas pour modéliser ce type de distribution asymétrique. Une alternative possible est la distribution log-normale. Une variable aléatoire (x) suit une loi log-normale si son logarithme suit une loi normale. Comme pour le tracé de probabilité normale, les fréquences cumulées forment une ligne droite si les données suivent une distribution log-normale [15].

Nous allons maintenant présenter une analyse statistique et variographique détaillée des teneurs en Kaolin pour chaque niveau d'exploitation qui a de meilleures caractéristiques d'exploitation. L'exploitation de la carrière de Kaolin se fait à ciel ouvert par niveau de 10 mètres allons de 540m au 570 m.

II. Histogrammes des teneurs

Dans le niveau 540 La teneur moyenne en Al_2O_3 des sondages est de 19.24%, avec un maximum de 24.31 % et un minimum de 16.24 %. La variance est de 5.42 ce qui traduit la non homogénéité de la distribution des teneurs dans cette couche.

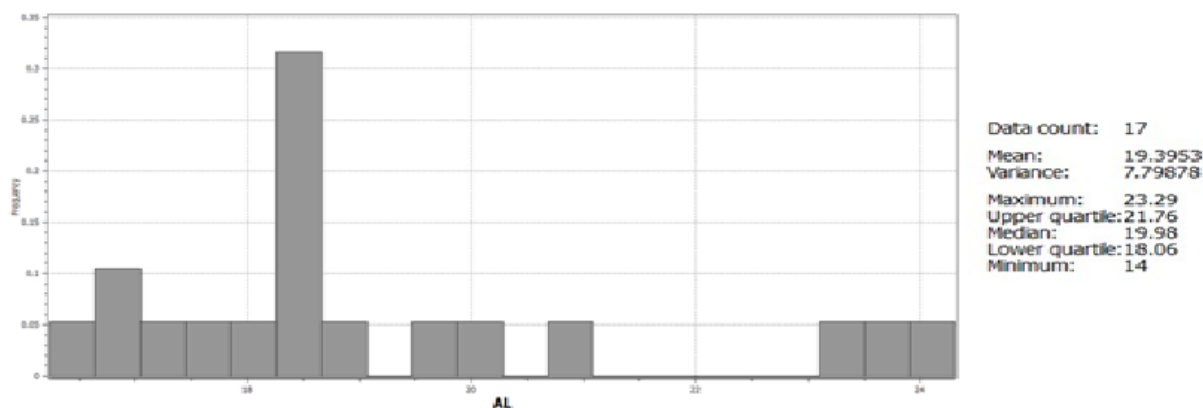


Figure 29: Histogramme de niveau 540

Les autres niveaux sont représentés dans le tableau suivant qui nous indique les mêmes paramètres :

Tableau 1:Représentation des niveaux

Niveaux	t%	t% max	t% min	variance
550	19.24	24.31	16.24	5.42
560	20.04	26.13	15.31	8.36
570	20.95	26.42	16.28	7.93
580	20.92	26.01	16.89	9.91

Les histogrammes de ces niveaux sont présentés dans les figures suivantes

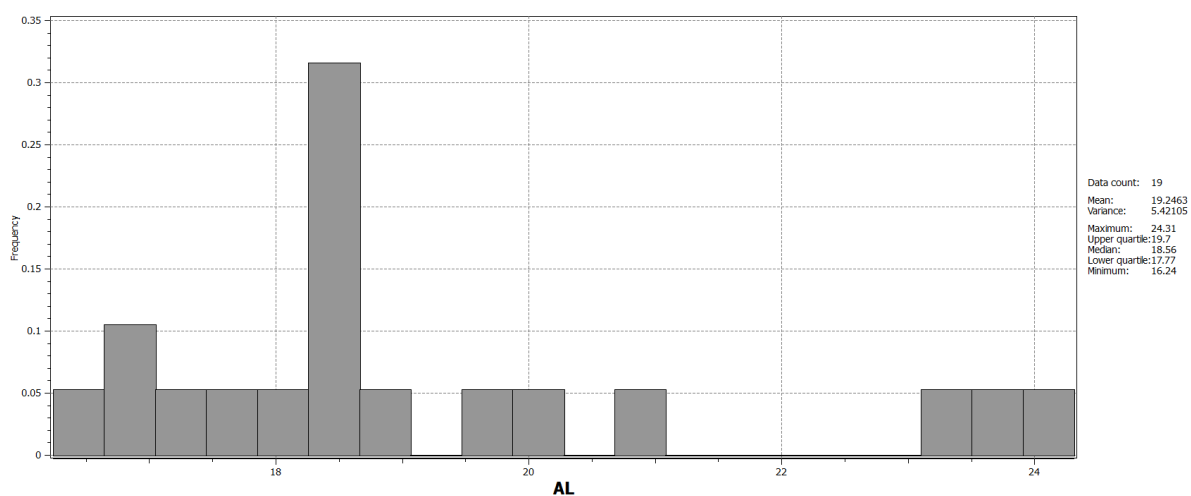


Figure 30: Histogramme de niveau 550

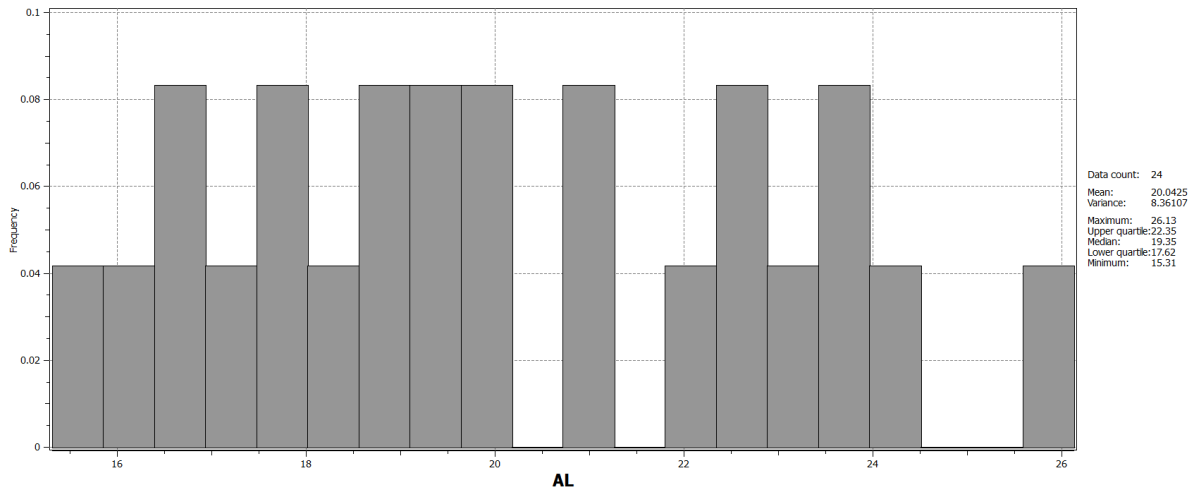


Figure 31: Histogramme de niveau 560

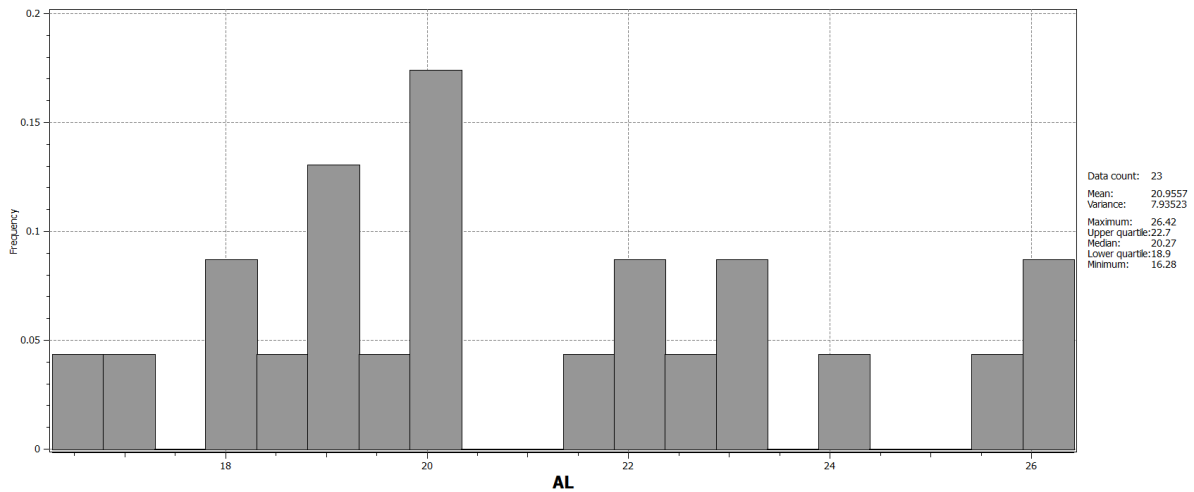


Figure 32: Histogramme de niveau 570

III. Analyse variographique

Le modèle utilisé pour le krigeage repose sur la connaissance de la structure de dépendance spatiale de la fonction aléatoire γ . Toutefois, en pratique, cette structure est rarement connue. C'est là qu'intervient l'analyse variographique, une étape préalable au krigeage, qui permet d'estimer cette dépendance. En réalité, cette analyse consiste à étudier le comportement spatial de la variable régionalisée étudiée [18].

Dans ce travail, l'analyse a été réalisée à l'aide du logiciel S-GeMS. Tout d'abord, le variogramme expérimental a été calculé, puis un modèle théorique de variogramme a été sélectionné et ajusté en fonction du variogramme expérimental.

IV. Variogramme expérimental

Le variogramme expérimental n'est pas une fonction proprement dite, mais plutôt un ensemble de points, car il ne peut être calculé que pour les valeurs de h où le nombre de paires de données, $N(h)$, est suffisamment grand. Lorsque les données sont irrégulièrement espacées, le variogramme expérimental devient erratique

Pour renforcer sa robustesse, des tolérances sont appliquées sur la longueur et l'angle du vecteur h . Cela signifie que toutes les paires de données dont la séparation est approximativement égale à h . En général, la tolérance sur les distances est définie comme étant la moitié du pas, de part et d'autre de la distance considérée, afin de garantir que chaque donnée est utilisée une seule fois. Les tolérances angulaires, quant à elles, permettent d'atténuer les anisotropies présentes : elles mélangent les directions avec différentes continuités pour obtenir une direction moyenne. Avec une tolérance de 90° , on obtient les variogrammes omnidirectionnels [19] qui sont prises en compte dans le calcul.

Dans ce travail, nous serons confrontés à ce cas particulier : les mesures de sondage sont réparties de manière irrégulière sur le champ.

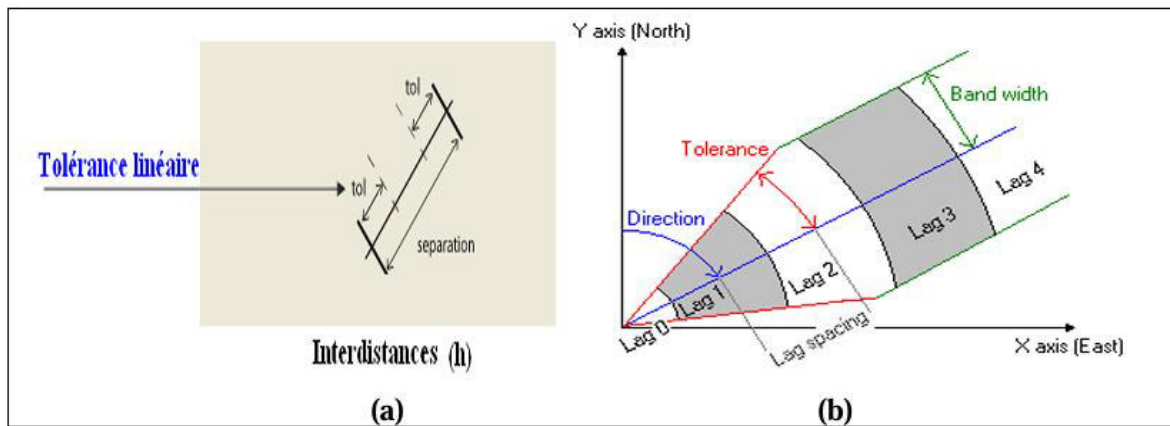


Figure 33: Tolérance linéaire (a) et angulaire (b) [12].

V. Paramètres pour le calcul du variogramme expérimental

Interdistances				
Nombre de lag		Interdistance h		Tolérance lineaire (m)
500		10		5
Direction				
Nombre de direction 5				
N°	Azimut(°)	Pendage(°)	Tolérance angulaire(°)	Largeur de la bande (m)
Omnidirectionnel	0	0	90	2000
1	0	0	22,5	1000
2	45	0	22,5	1000
3	90	0	22,5	1000
4	135	0	22,5	1000

Le calcul du variogramme expérimental implique plusieurs paramètres qui dépendent du choix de l'utilisateur : la direction de calcul, le pas et la tolérance. Une mauvaise modélisation de ces paramètres peut engendrer des artefacts sans rapport avec le phénomène régionalisé, ce qui pourrait avoir des conséquences regrettables sur la modélisation et les résultats ultérieurs [14]

Le variogramme expérimental ne se présente pas vraiment comme une fonction, mais plutôt comme un ensemble de points dispersés. En effet, il ne peut être calculé que pour les valeurs de h où N(h) est suffisamment élevé. Lorsque les données sont espacées de manière irrégulière, le variogramme expérimental peut apparaître irrégulier, car il repose sur un nombre réduit de paires de données pour son calcul.

Pour rendre le variogramme plus fiable, on introduit des tolérances sur la longueur et l'angle du vecteur h. Cela signifie qu'on inclut dans le calcul toutes les paires de données dont la séparation est approximativement égale à h. En général, la tolérance sur les distances est fixée à la moitié de l'écart autour de la distance considérée, afin d'utiliser chaque paire de données une seule fois.

Les tolérances angulaires permettent de réduire les effets des anisotropies en combinant des directions de continuité variées pour obtenir une direction moyenne. Par exemple, avec une tolérance de 90°, on obtient un variogramme qui ne dépend pas de la direction, offrant ainsi une vue globale omnidirectionnelle.

a) Etude variographique du niveau 540 m

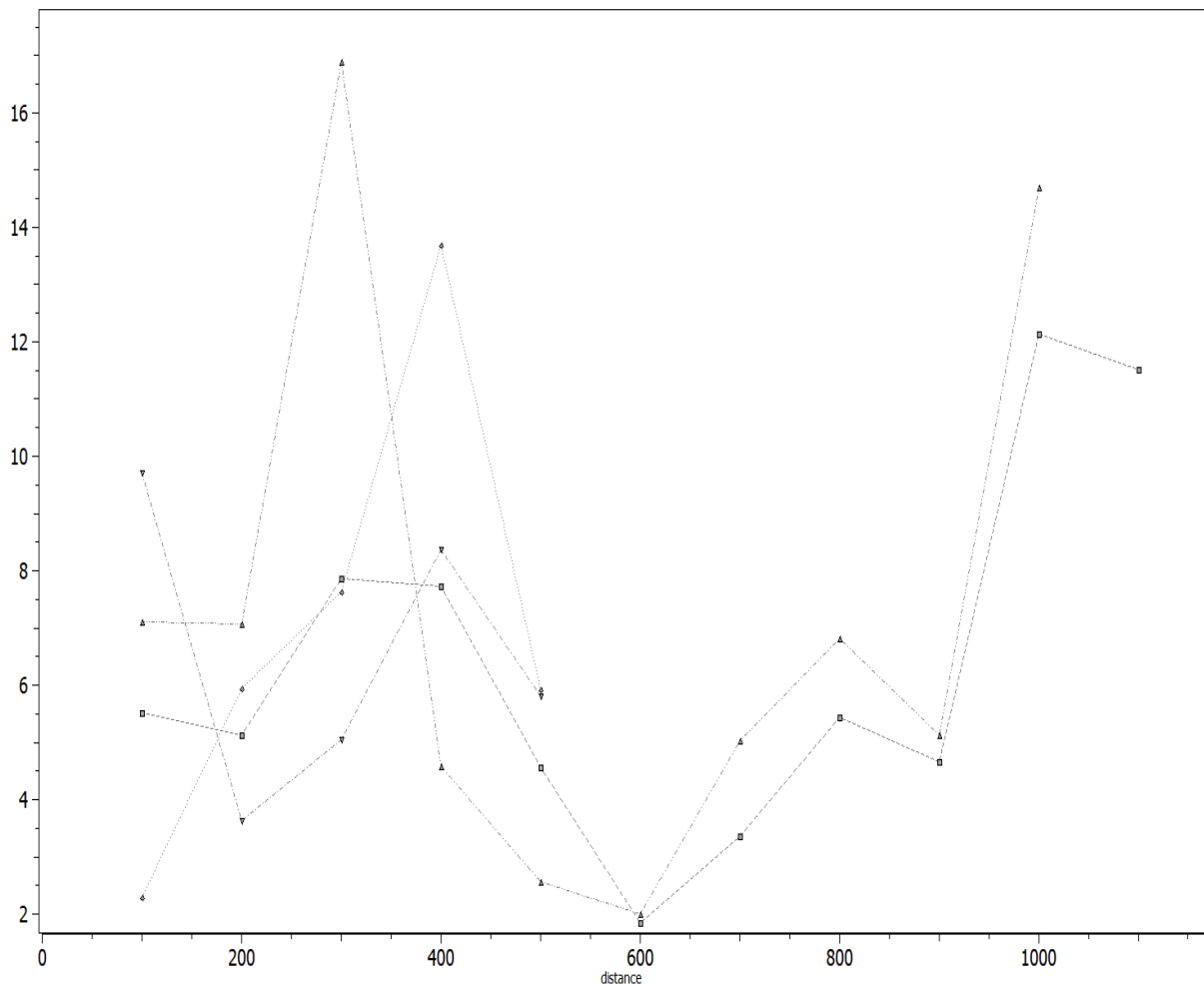


Figure 34: Ensembles des variogrammes directionnels et omnidirectionnels des teneurs du niveau 540 m.

La figure présente les variogrammes directionnels des teneurs en Al_2O_3 selon les quatre directions principales du plan, orientées à 0° , 45° , 90° , et 135° par rapport à l'axe azimutal. Ces variogrammes ont été construits et ajustés en utilisant un modèle exponentiel, avec un palier fixé à 8.

A) Variogramme directionnel :

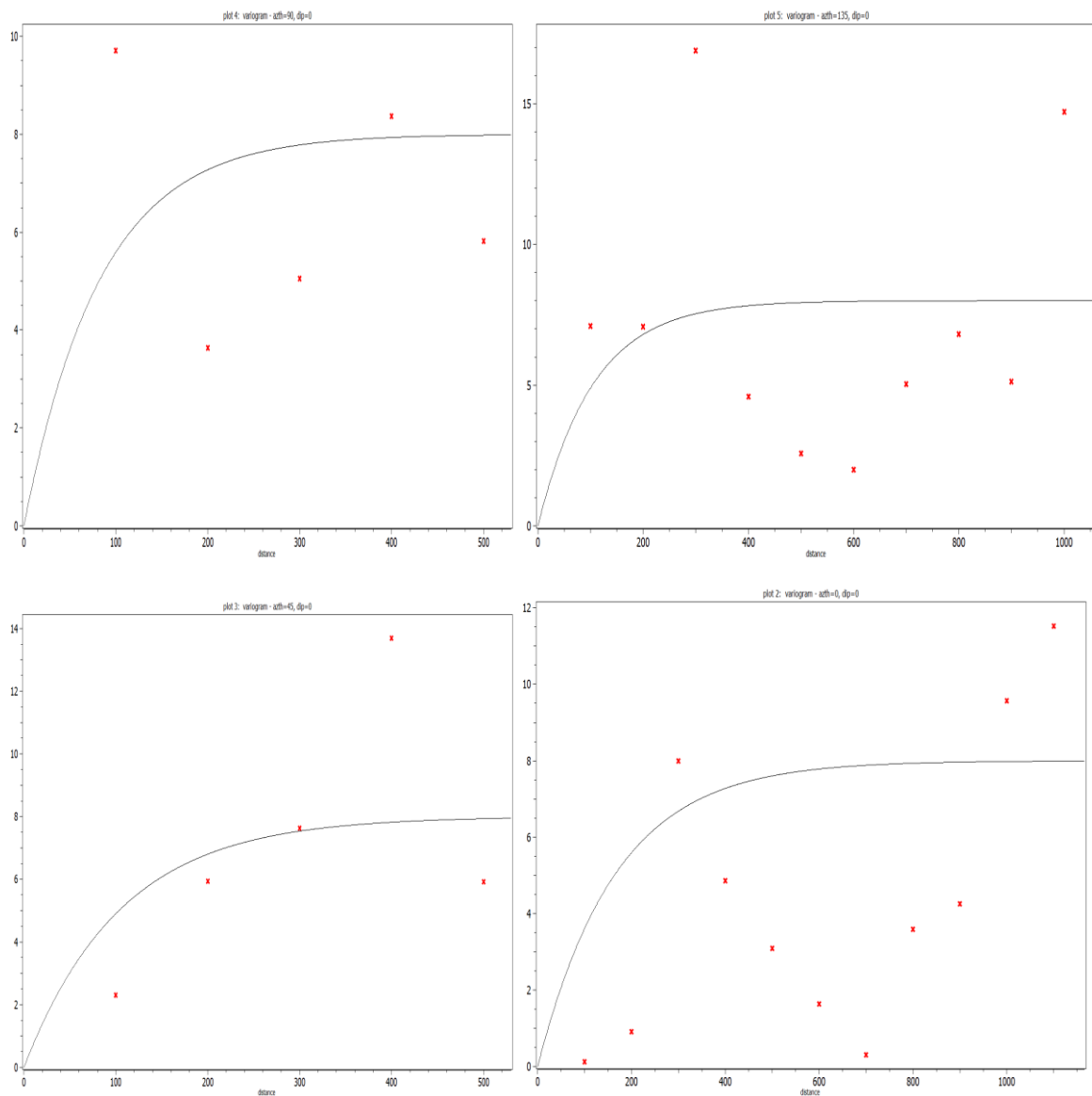


Figure 35: Variogrammes directionnels des teneurs du niveau 540m.

b) Variogramme omnidirectionnel

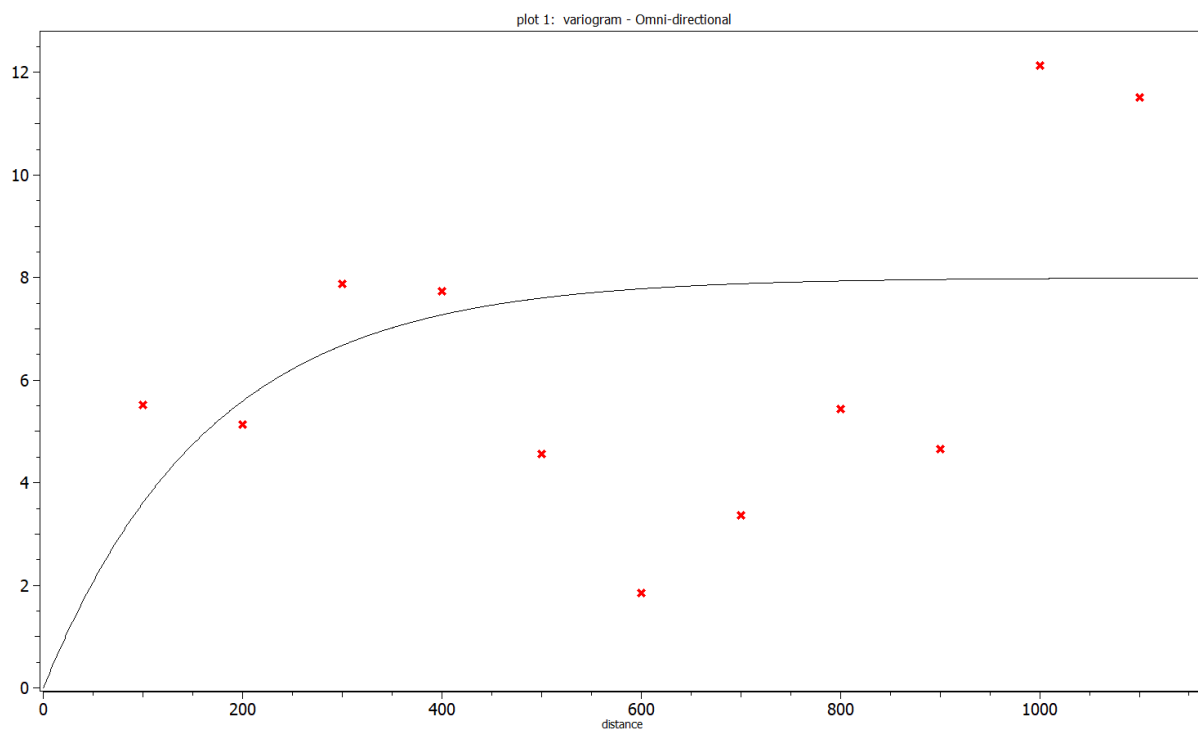


Figure 36: Variogramme omnidirectionnelle des teneurs niveau 540 m.

Ces résultats mettent en évidence que les variogrammes présentent une anisotropie. En effet, bien que le palier reste constant à $C=8$, les portées varient selon les différentes directions du plan, ce qui indique la présence d'une anisotropie géométrique. La direction de la plus grande continuité correspond à la direction omnidirectionnelle, avec une portée maximale de 800 m. En revanche, la continuité la plus faible est observée dans la direction à 90° , avec une portée de 350 m.

Tableau 2: Directions d'anisotropie des variogrammes des épaisseurs.

Direction	Portée (m)	Palier (seuil)	Effet de pépité
Omnidirectionnel	800	8	0
0°	800	8	0
45°	400	8	0
90°	350	8	0
135°	400	8	0

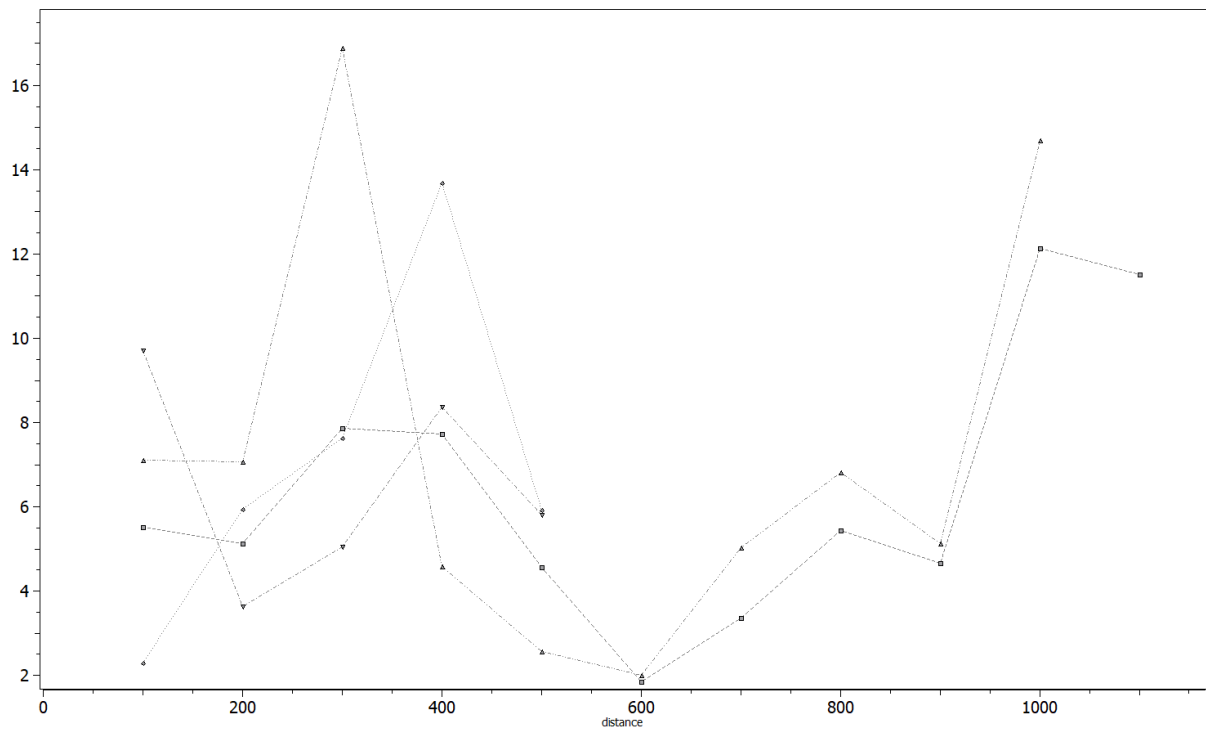
a) Etude variographique du niveau 550 m

Figure 37: Variogramme directionnel et omnidirectionnel des teneurs du niveau 550 m.

La figure présente les variogrammes directionnels des teneurs en Al_2O_3 le long des quatre directions principales du plan, à savoir 0° , 45° , 90° et 135° par rapport à la direction azimutale. Ces variogrammes directionnels ont été construits et ajustés à l'aide d'un modèle exponentiel, intégrant un effet de pépite de 1 et un palier fixé à 8.

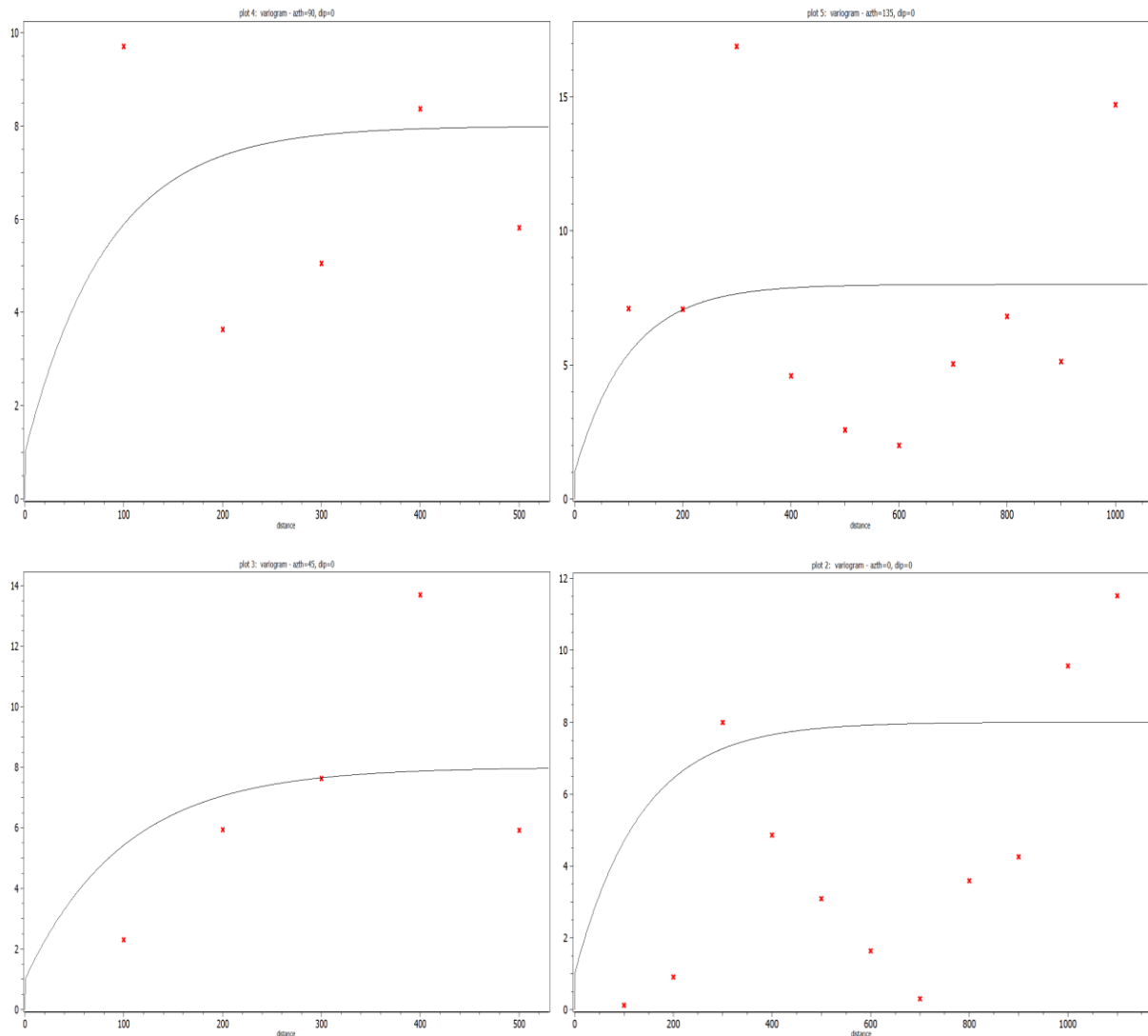


Figure 38: Variogrammes directionnels des épaisseurs du niveau 550 m.

a) Le variogramme omnidirectionnel :

Les variogrammes des teneurs en Al_2O_3 du niveau 550a été construit et ajusté en utilisant un modèle exponentiel. Ce modèle présente une portée de 1200 m, un effet de pépité $C_0=1$ et un palier $C=8$.

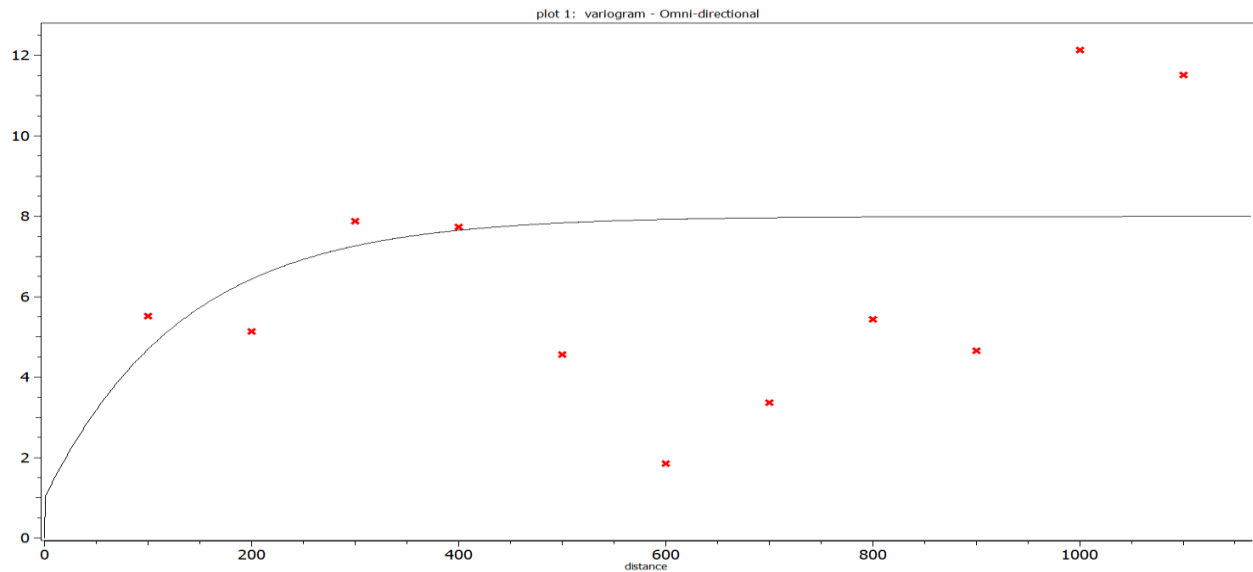


Figure 39: variogramme Omni-directionnel des teneurs du niveau 550 m.

Sur les figures, on observe que les portées varient selon les directions de calcul, en ajoutant un effet de pépité égale à 1 bien que le palier reste constant ($C = 8$). Cela met en évidence une anisotropie géométrique. La portée maximale, estimée à 600 m, apparaît dans le variogramme omnidirectionnel en relation avec l'axe azimutal, tandis que la portée minimale est observée dans le variogramme correspondant à la direction de 45° .

Tableau 3: Directions d'anisotropie des variogrammes des teneurs du niveau 550 m :

Direction	Portée (m)	Palier (seuil)	Effet de pépité
Omnidirectionnel	600	8	1
0°	600	8	1
45°	350	8	1
90°	400	8	1
135°	400	8	1

b) Etude variographique du niveau 560 m:

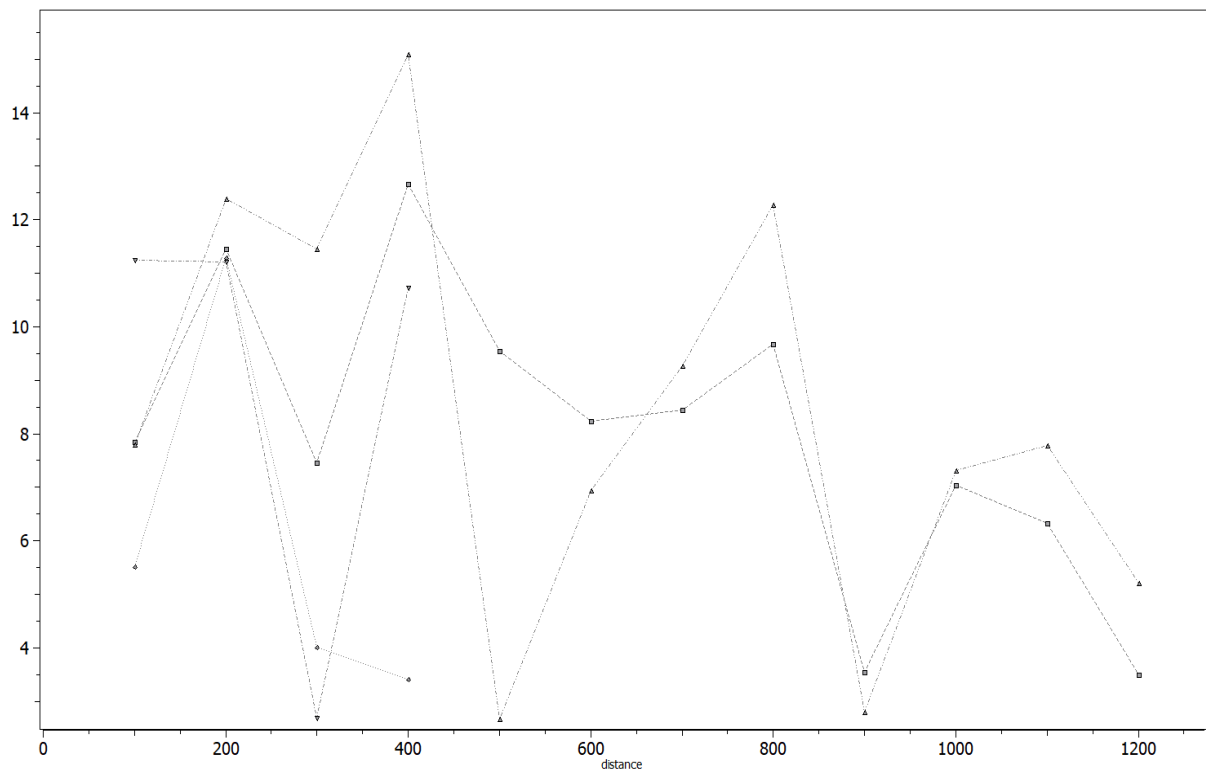


Figure 40: Variogramme directionnel et omnidirectionnel des teneurs du niveau 560 m.

La figure montre les variogrammes directionnels des concentrations en Al_2O_3 pour les quatre principales directions du plan, à savoir 0° , 45° , 90° et 135° par rapport à l'axe azimutal. Ces variogrammes ont été élaborés et ajustés à l'aide d'un modèle exponentiel, avec un seuil fixé à 12,5

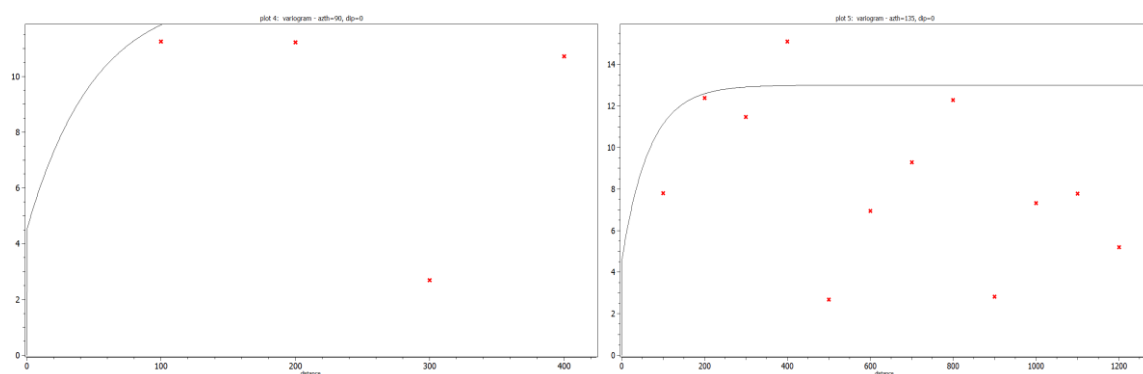


Figure 41: Variogramme directionnel (90° , 135°) des teneurs du niveau 560 m.

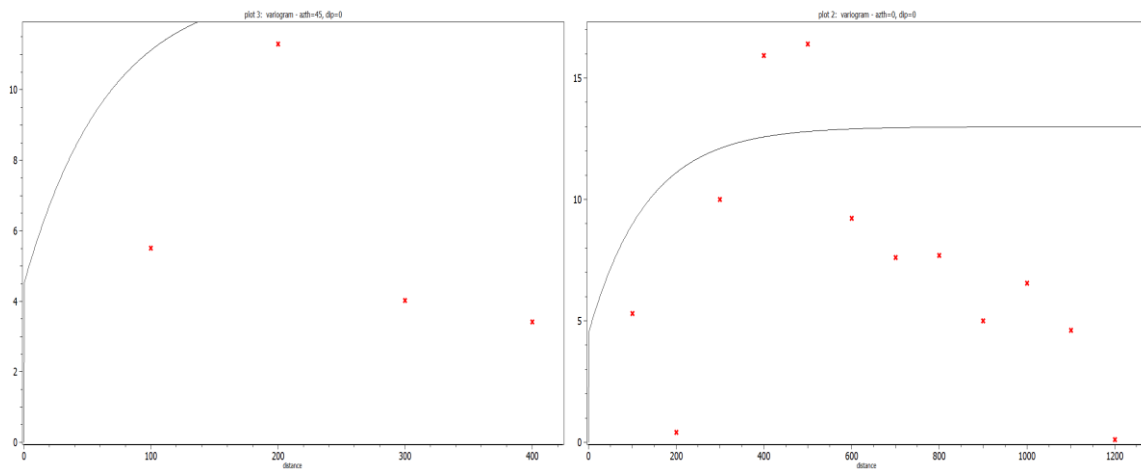


Figure 42: Variogrammes directionnels(0°,45°) des teneurs du niveau 560 m.

a) Le variogramme omnidirectionnel :

Les variogrammes des teneurs en Al_2O_3 du niveau 560 m ont été construits et ajustés en utilisant un modèle exponentiel. Ce modèle présente une portée de 600 m, un effet de pépité $C_0 = 4,5$ et un palier $C = 13$.

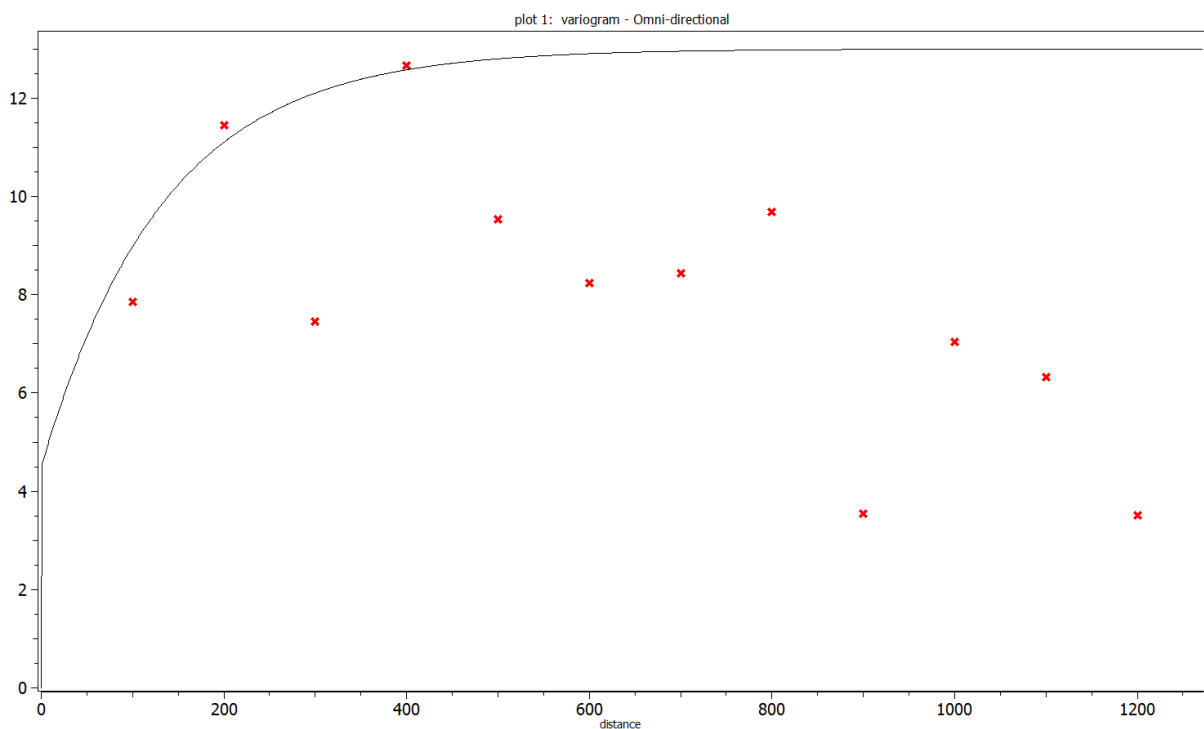


Figure 43: Variogramme Omni-directionnel des teneurs du niveau 560 m.

Les figures révèlent que les portées varient en fonction des directions de calcul, tout en intégrant un effet de pépité de 4.5, alors que le palier reste constant ($C = 13$). Cela souligne la présence d'une anisotropie géométrique. La portée maximale, estimée à 600 m, est visible dans le

variogramme omnidirectionnel aligné sur l'axe azimutal, tandis que la portée minimale est observée dans le variogramme correspondant à la direction de 90°.

Tableau 4 : Directions d'anisotropie des variogrammes des teneurs du niveau 560

Direction	Portée (m)	Palier (seuil)	Effet de pépité
Omnidirectionnel	600	13	4,5
0°	600	13	4,5
45°	350	13	4,5
90°	400	13	4,5
135°	400	13	4,5

b) Etude variographique du niveau 570

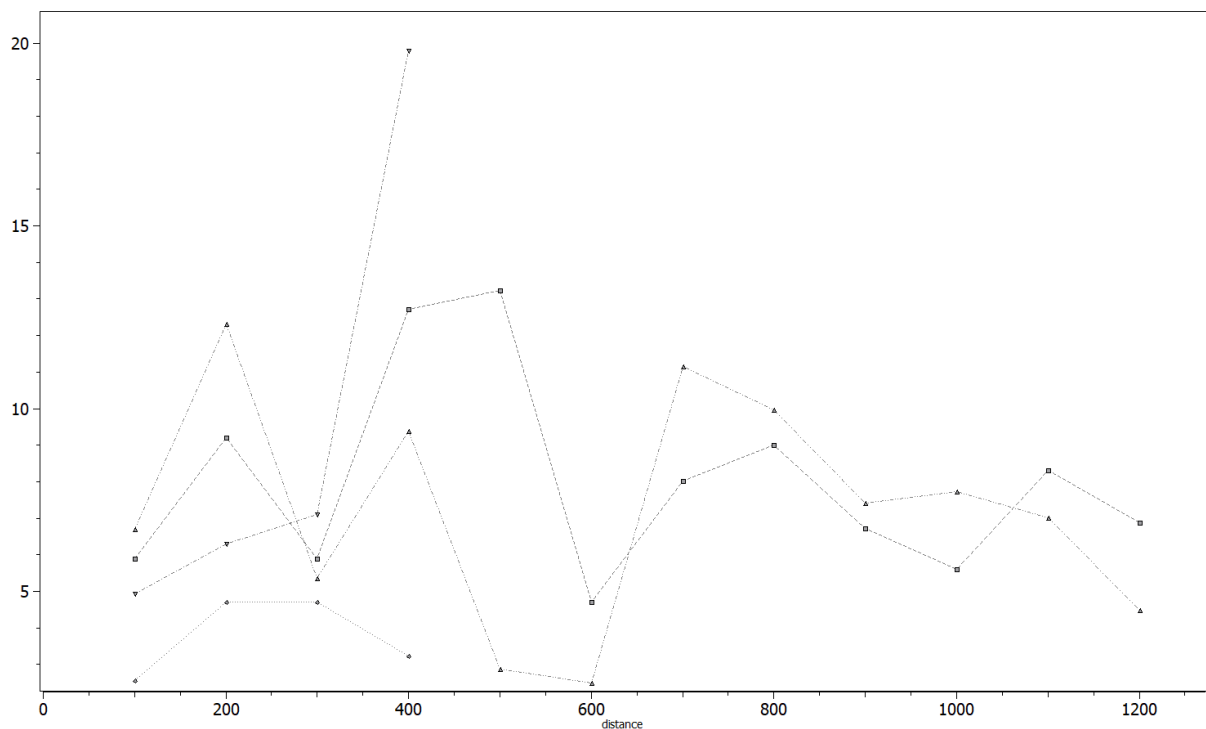


Figure 44: Variogramme directionnel et omnidirectionnel des teneurs du niveau 570 m.

La figure montre les variogrammes directionnels des concentrations en Al_2O_3 suivant les quatre principales directions du plan, à savoir 0°, 45°, 90° et 135° par rapport à l'axe azimutal. Ces variogrammes ont été élaborés et ajustés à l'aide d'un modèle exponentiel, avec un palier fixé à 8.

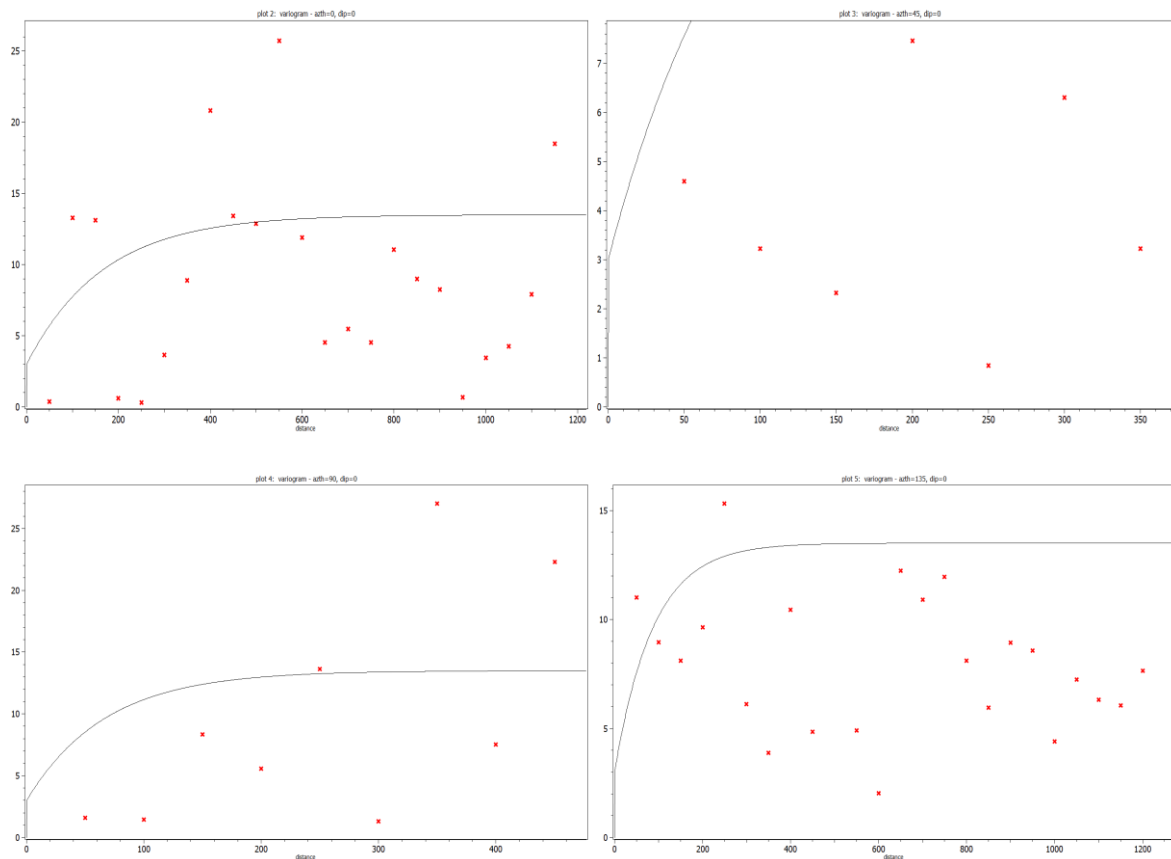


Figure 45: Variogrammes directionnels des teneurs du niveau 570 m

a) Le variogramme omnidirectionnel :

Les variogrammes des teneurs en Al_2O_3 du niveau 570 ont été construits et ajustés en utilisant un modèle exponentiel. Ce modèle présente une portée de 800 m, un effet de pépité $C_0=3$ et un palier $C=13$

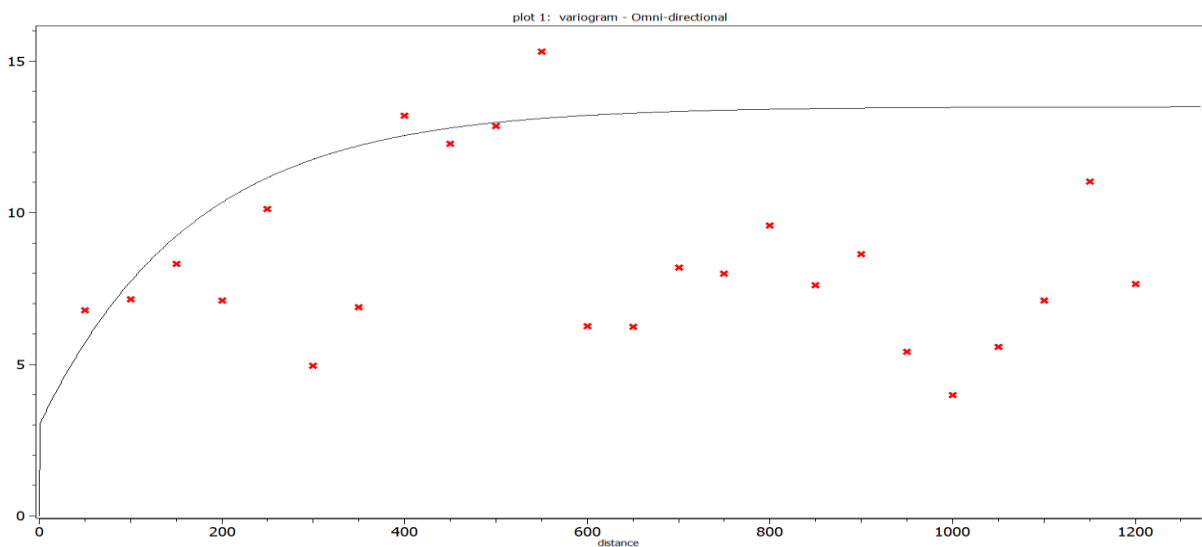


Figure 46: Variogramme Omni-directionnel des teneurs du niveau 570

Les figures révèlent que les portées varient en fonction des directions de calcul, tout en intégrant un effet de pépite de 3, alors que le palier reste constant ($C = 13$). Cela souligne la présence d'une anisotropie géométrique. La portée maximale, estimée à 800 m, est visible dans le variogramme omnidirectionnel aligné sur l'axe azimutal, tandis que la portée minimale est observée dans le variogramme correspondant à la direction de 45° .

Tableau 5 : Directions d'anisotropie des variogrammes des teneurs du niveau 570

Direction	Portée (m)	Palier (seuil)	Effet de pépite
Omnidirectionnel	800	13	3
0°	400	13	3
45°	150	13	3
90°	300	13	3
135°	400	13	3

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué les calculs des variogrammes expérimentaux, afin d'extraire les paramètres théoriques nécessaires à l'estimation par krigeage, des variables étudiées des niveaux précédant.

L'étude variographique révèle un comportement anisotrope des variogrammes, caractérisé par des portées différentes selon les directions. Cette anisotropie est généralement attribuée à l'extension du gisement et à la distribution spatiale du kaolin à l'intérieur de celui-ci.

Les portées obtenues à partir de ces variogrammes sont cohérentes avec la nature du gisement étudié, à savoir un gisement sédimentaire.

Chapitre IV

Krigeage 2D, résultats et interprétations

Introduction

Le krigeage repose sur l'idée que la variable régionalisée peut être considérée comme la réalisation d'une fonction aléatoire, pour laquelle nous avons modélisé la fonction de variogramme. L'objectif est de déterminer, parmi les estimations obtenues à partir des combinaisons linéaires pondérées des données, celle qui offre les meilleures caractéristiques, c'est-à-dire l'absence de biais et une variance d'erreur minimale, qui est le critère de précision sélectionné.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les cartes résultantes du krigeage ainsi que les cartes de variance d'estimation correspondantes aux quatre niveaux d'exploitation de la carrière de kaolin de Tamazert.

IV. 1. Méthodologie du krigeage

La couche étudiée se divise en quatre niveaux : 540, 550, 560, 570. L'estimation de ces niveaux implique l'estimation des teneurs et les variances de chaque niveau. Il est important de noter que les teneurs des niveaux minéralisées sont réparties de manière assez uniforme dans le gisement.

Les résultats variographiques des modèles des variogrammes de l'ensemble des niveaux kaolinisés ont été utilisés pour le krigeage ordinaire à deux dimensions (2D) des teneurs en Al_2O_3 .

Dans notre approche, le krigeage est réalisé en utilisant un voisinage glissant, ce qui signifie qu'il se base uniquement sur les points de données voisins du site à estimer. L'objectif est d'estimer la variable régionalisée à chaque nœud d'une grille régulière couvrant la zone étudiée.

IV. 2. Grille de krigeage

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

Dans notre cas, nous avons considéré une grille régulière horizontale (2D) qui s'étend sur toute la superficie de site de Tamazert, avec une maille unitaire de 2x2 m².

IV.3. Résultats obtenus par krigeage ordinaire

Après avoir établi les modèles expérimentaux des variogrammes, nous avons utilisé leurs caractéristiques (comme la portée (a), le palier $C(0)$ et l'effet de pépité C_0) pour réaliser le krigeage ordinaire sur les données de terrain. Cela nous a permis d'obtenir une estimation globale du site ainsi qu'une carte de la variance d'estimation.

IV. 3.1. Carte de répartition des teneurs de Al_2O_3

Les figures (de IV.1 au IV.4) nous montre la répartition des teneurs dans chaque niveau. Elle illustre les zones où les teneurs sont élevées.

a) Niveau 540 m

La Figure IV.1 On peut observer sur la carte que les teneurs varient de 16.28 % à 24.25%, principalement dans la direction Nord-Ouest elle varie de 16.28% à 21.35% et dans la direction Sud-Ouest, les teneurs sont autour de 16.28 % à 24.25%. De plus, dans une petite zone Sud-Est, les teneurs varient de 21.35 % à 24.25 %.

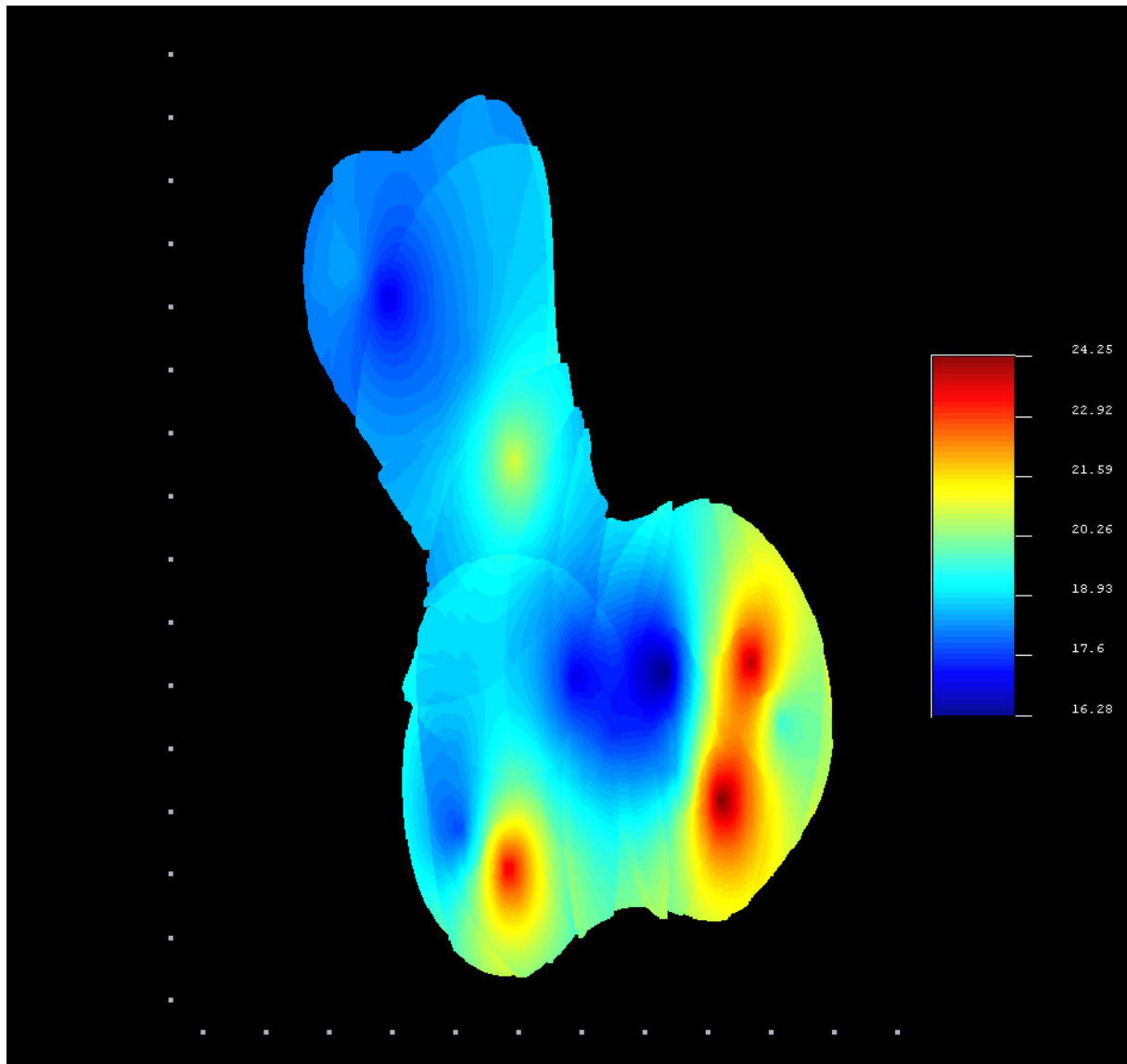


Figure 47: Carte représentative du krigeage final des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 540 m.

b) Niveau 550 m

On peut remarquer sur la carte dans la figure IV.2 que les teneurs varient de 16.74% à 23.58%. Principalement dans la direction Nord-Ouest elle varie de 16.24% à 20.27% et dans la direction Sud-Ouest, les teneurs sont autour de 17.78 % à 22.97%. De plus, dans une petite zone Sud-Sud-Est, les teneurs varient de 21.62 % à 23.58%, c'est là où se trouve la zone riche en Al_2O_3 .

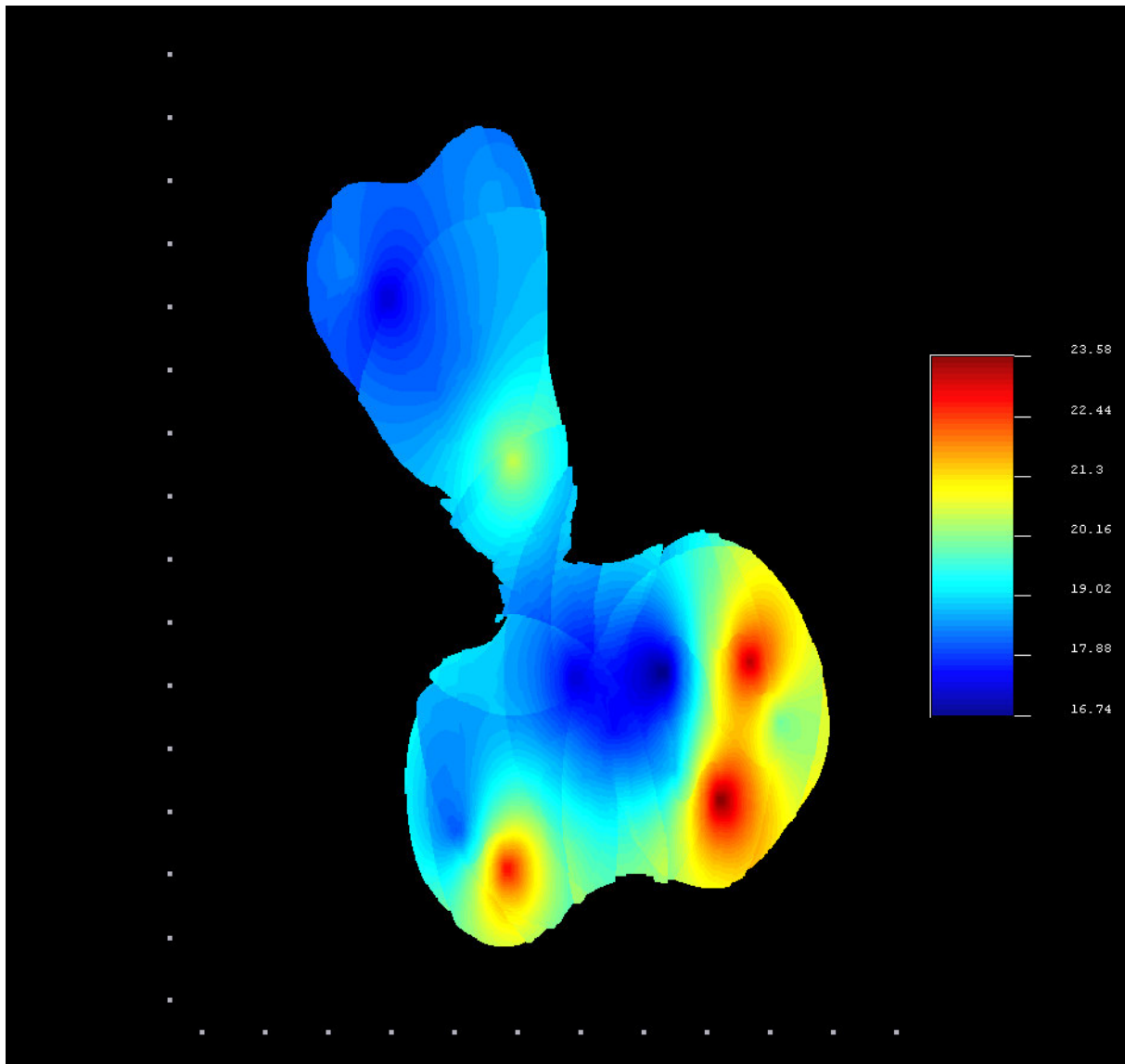


Figure 48: Carte représentative du krigage final des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 550 m

c) Niveau 560 m

On peut observer sur la carte dans la figure IV.3 que les teneurs varient de 16.89% à 24.43% dans la direction Nord-Ouest. Les teneurs peuvent attendre un maximum de 24.43 % dans la partie sud du corps nord.

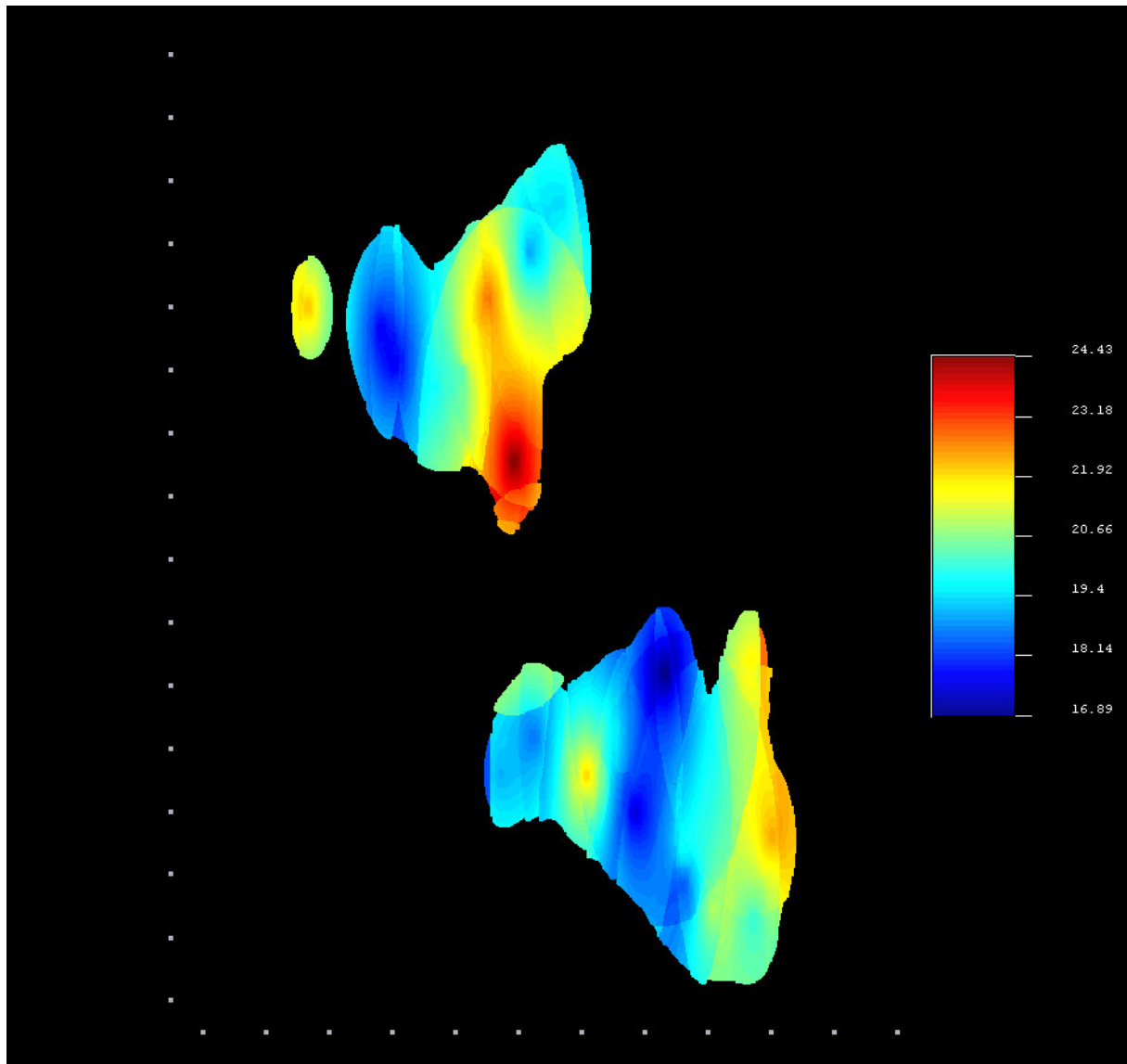


Figure 49: Carte représentative du krigeage final des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 560 m

d) Niveau 570 m

Sur la figure IV.4 on peut voir que les teneurs varient de 18.09 % à 25.21%. Les teneurs les plus élevées sont observées dans la partie sud et la partie Nord-Ouest du corps nord, elle varie de 24 à 25.21%. Dans le corps sud du niveau 570 m, les teneurs les plus élevées affichent des variations de 20 à 22%.

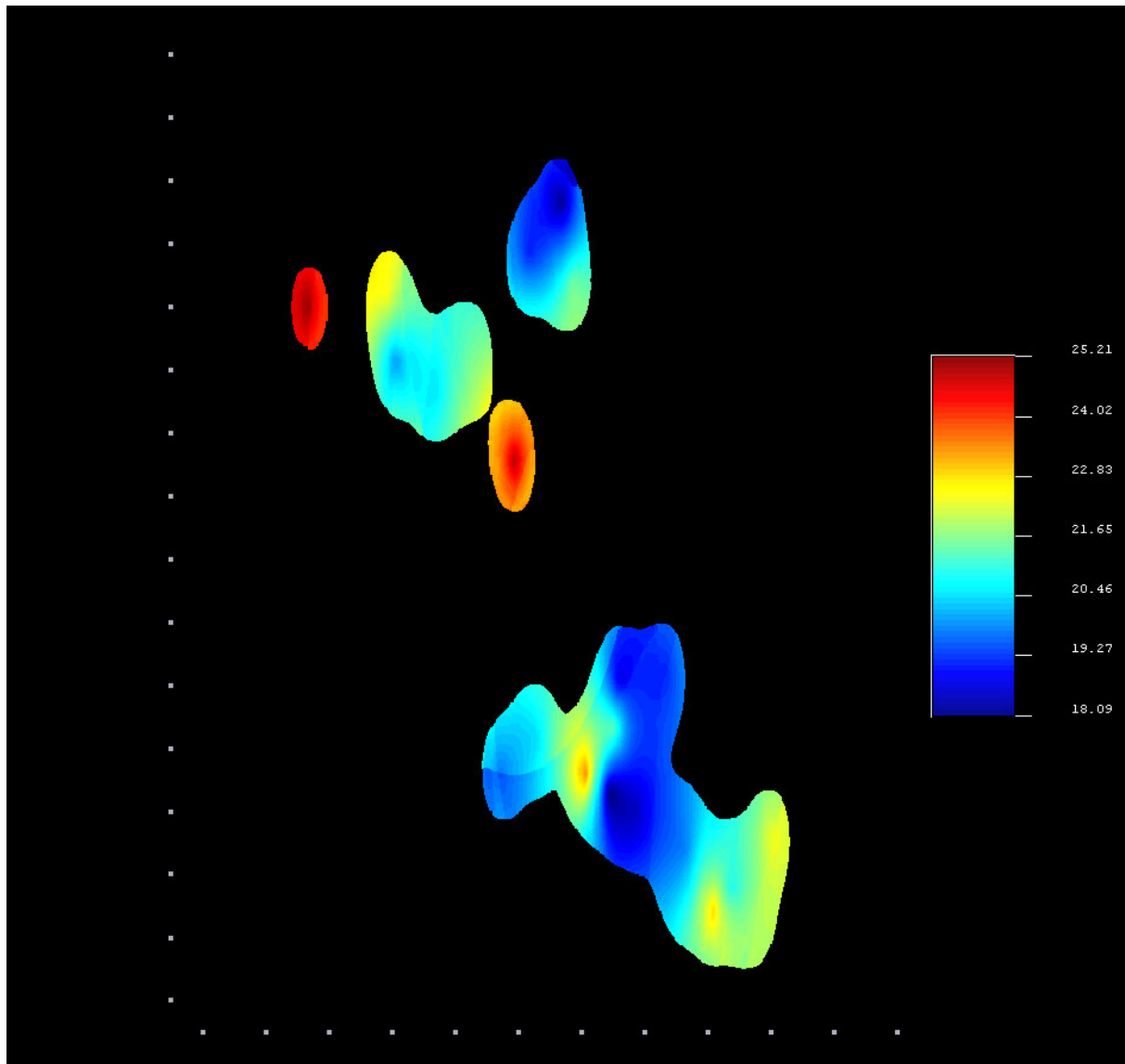


Figure 50: Carte représentative du krigage final des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 570 m

IV.3 .2 Variance de krigage pour les teneurs

a) Niveau 540 m

Rappelons que la variance maximale de variogramme des teneurs est de 8. La carte de la variance (figure IV.5) montre une variation régulière progresse de 0 jusqu'à la variance maximale aux extrémités de la zone prospecter ce qui donne une meilleure qualité des données de base dans la zone prospecter. Néanmoins, nous remarquons des zones vierges avec des variances plus élevée peut attendre les 20 dans certaines zones (voir annexes 2).

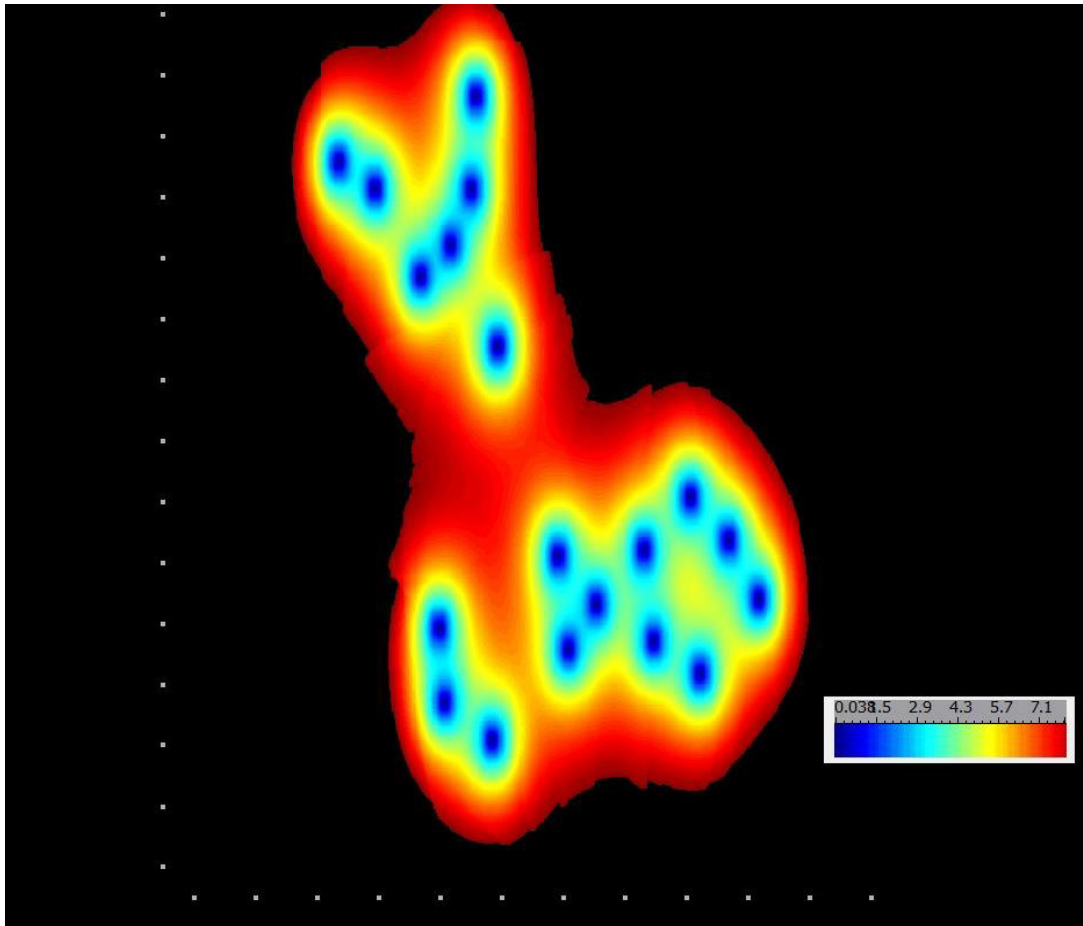


Figure 51: Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs (de 0 à 8) en Al_2O_3 (niveau 540 m).

b) Niveau 550 m

Rappelons que la variance maximale de variogramme des teneurs est de 7.9. Pour le niveau 550 m, la Figure IV.6 montre une variation acceptable dans la zone d'exploration ce qui donné une meilleure estimation de la variable étudiée.

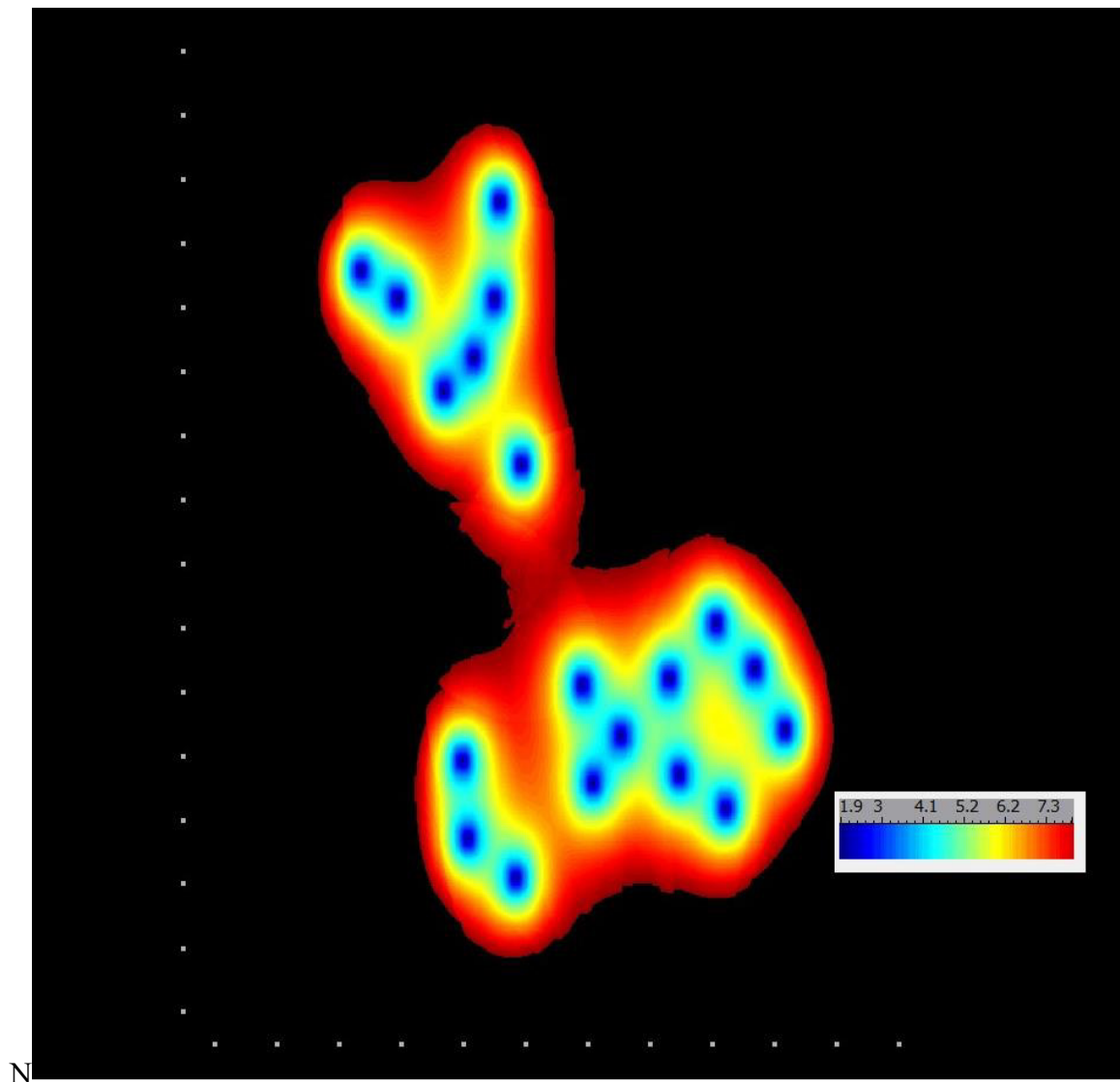


Figure 52: Carte représentative de la variance de krigage des teneurs en Al_2O_3 (niveau 550 m)

c) Niveaux 560 et 570 m

En ce qui concerne les deux niveaux de la partie supérieurs du gisement, présente une discontinuité dans leurs estimations ce qui montre le manque de la continuité spatial des données parvenue des échantillons, qui est interprété par une large hétérogénéité géologique dans la formation du Kaolin aux niveaux supérieurs du gisement.

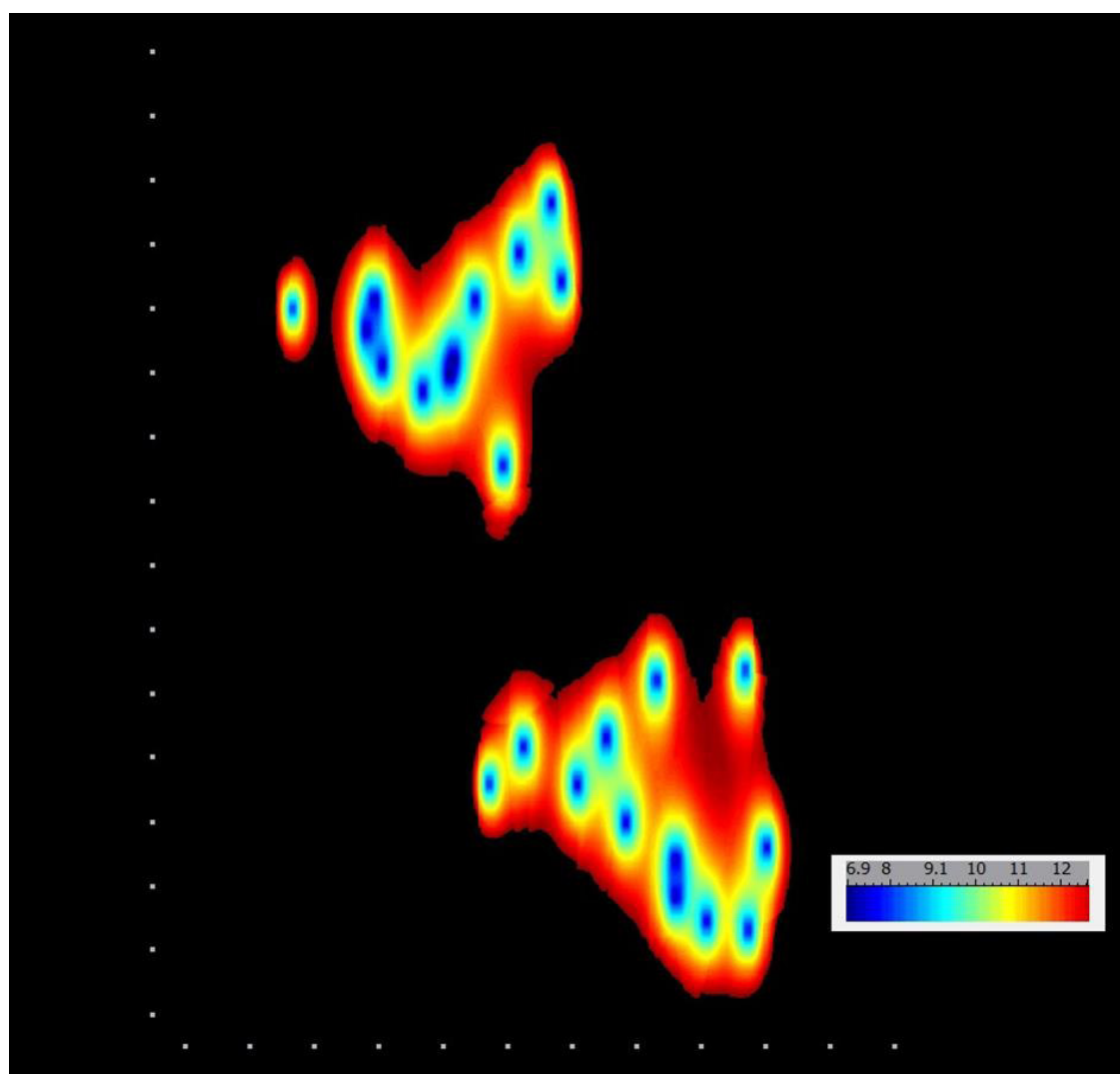


Figure 53: Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en Al_2O_3 (niveau 560 m)

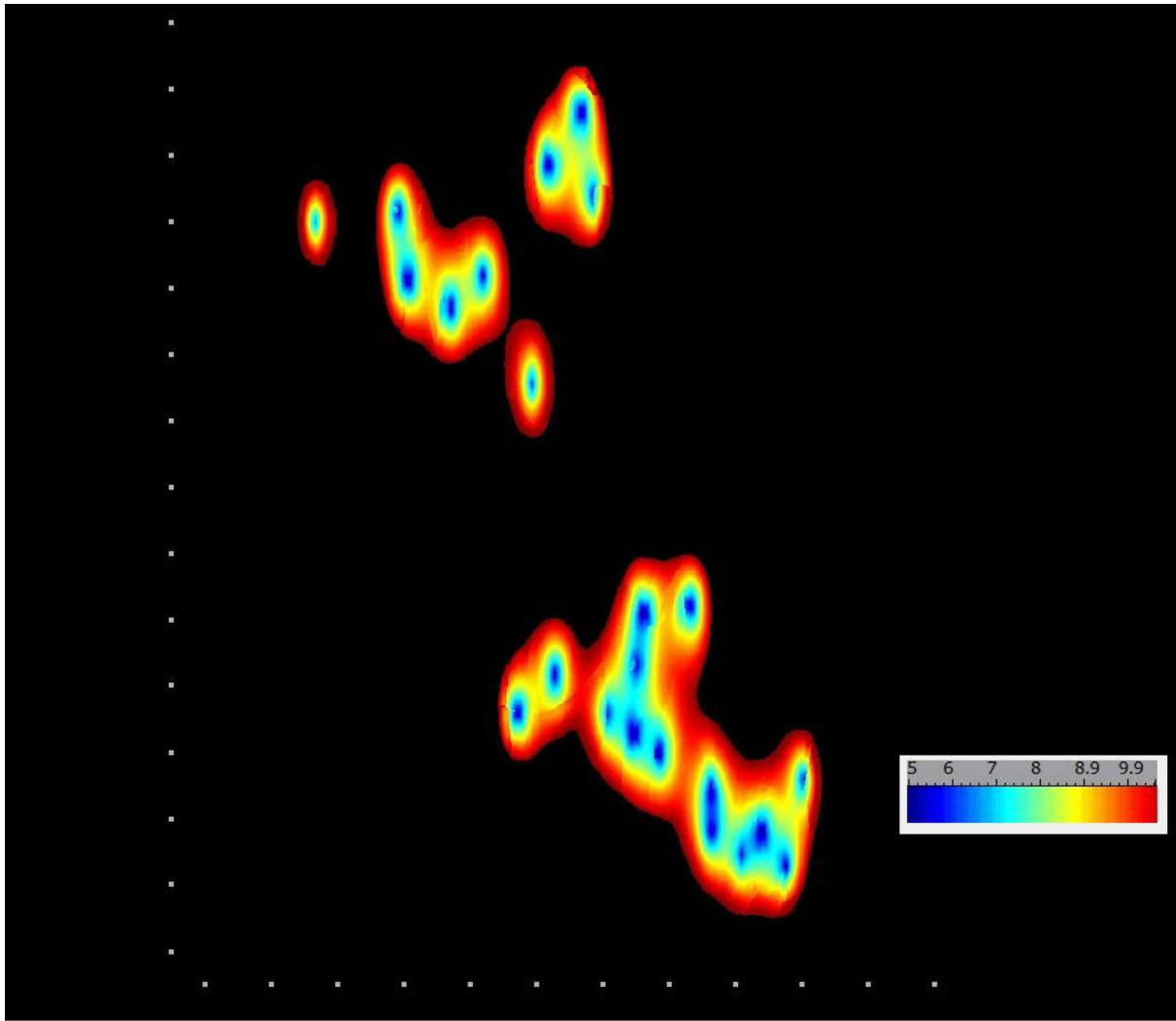


Figure 54 : Carte représentative de la variance de krigeage des teneurs en Al_2O_3 (niveau 570 m)

IV.4 Estimation des réserves du gisement de tamazert

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

Les résultats de krigeage ordinaire sont utilisés pour le calcul du volume en roches minéralisées de chaque niveau du gisement de tamazert (tableau IV.1.) en basant sur la formule suivante :

$$V_i = S \times E_{p_i}$$

V_i : Volume du bloc unitaire ;

$$S = 4 \text{ m}^2$$

E_{p_i} : Epaisseur de niveau (10 m)

Tableau 6: Réserves en kaolinite du gisement de tamazert

Niveau	Teneur moy (%)	$\sum V_i$ (m ³)	Volume (m ³)
540	19.37	13280080	2573594.41
550	19.37	12614200	2444373.74
560	20.41	10866880	2217959.28
570	20.88	1981660	413971.67
Volume Total	////	38742820	7649899.1

A partir du (tableau IV.1), les réserves du gisement de tamazert en prenant en considération le krigeage des quatre niveaux kaolinisés totalisent 7 649 899.1 m³.

A partir du tableau ci-dessous, on remarque que volumes en AL₂O₃ diminuent au fur et à mesure que la teneur de coupure augmente, elles sont de l'ordre de 2 349 410 m³ pour une teneur de coupure de 18%, ils diminuent jusqu'à 412 664 m³ pour la teneur de coupure de 24 %. Cependant, si la teneur de coupure est trop élevée, une grande partie des matériaux extraits sera considéré comme un stérile minier. Si la teneur de coupure est trop faible, la capacité 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.

Tableau 7: Volume des réserves en fonction de la teneur de coupure.

Volumes pour les niveaux	Teneur en (%)						
	18	19	20	21	22	23	24
540 (m ³)	976 210	530 440	401 175	292 462	114 004	16 903	366
550 (m ³)	977 696	448 375	335 572	340 605	87 608	7 848	14 693
560 (m ³)	374 840	489 183	399 295	340 905	80982	69 235	380211
570 (m ³)	20 664	96 223	91 526	124 116	46289	16 933	17 394
Volume totale	2 349 410	1 564 221	1 227 568	1 098 088	328 883	110 919	412 664

Conclusion

L'utilisation des méthodes classiques, telles que l'interpolation linéaire entre les sondages, pour évaluer les réserves peut donner des résultats discutables. Cependant, une estimation fondée sur la corrélation entre les données des sondages, complétée par des cartes de variance issues du krigeage, qui illustrent la qualité de l'estimation, peut aider à résoudre ce problème. En

revanche, les méthodes d'interpolation classiques, comme l'estimation par partitionnement de l'espace, ne permettent pas d'évaluer la qualité des valeurs estimées.

Conclusion générale

Le problème que nous avons examiné concerne l'évaluation des réserves kaolins du gisement de Tamazert en utilisant une approche géostatistique

Notre mémoire s'articule autour de deux objectifs principaux. Le premier consiste à établir une corrélation entre les données de terrain, en réalisant une étude variographique, qui sera ensuite utilisée pour le Krigeage ordinaire.

Une recherche bibliographique a permis d'explorer les fondamentaux des techniques d'interpolation spatiale, en mettant particulièrement l'accent sur le krigeage ordinaire. Ce dernier a été abordé tant sur le plan théorique qu'appliqué. L'analyse variographique a également été examinée et discutée en détail. Le choix de cette méthode a été motivé par les nouvelles normes relatives à la présentation des rapports de réserves pour les projets miniers.

Une revue de la littérature a permis d'examiner les principes de base des techniques d'interpolation spatiale, avec une attention particulière portée au krigeage ordinaire. Cette méthode a été étudiée à la fois d'un point de vue théorique et pratique. De plus, l'analyse variographique a été approfondie et discutée en détail. Le recours à cette méthode s'explique par les récentes normes imposées pour les cartes obtenues par le 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

Annexes

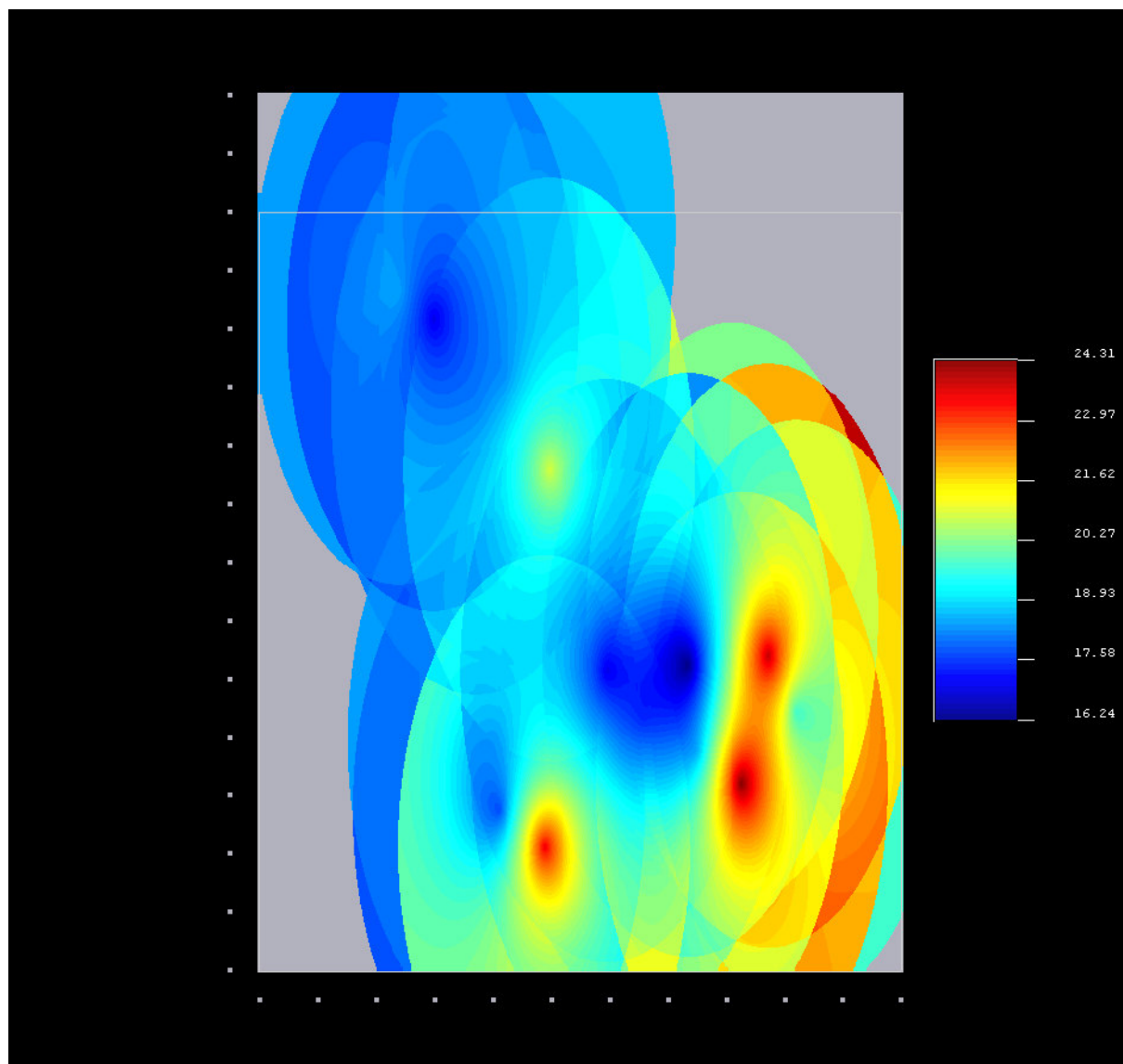


Figure 1 : Carte représentative du krigeage des teneurs en AL_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 540m

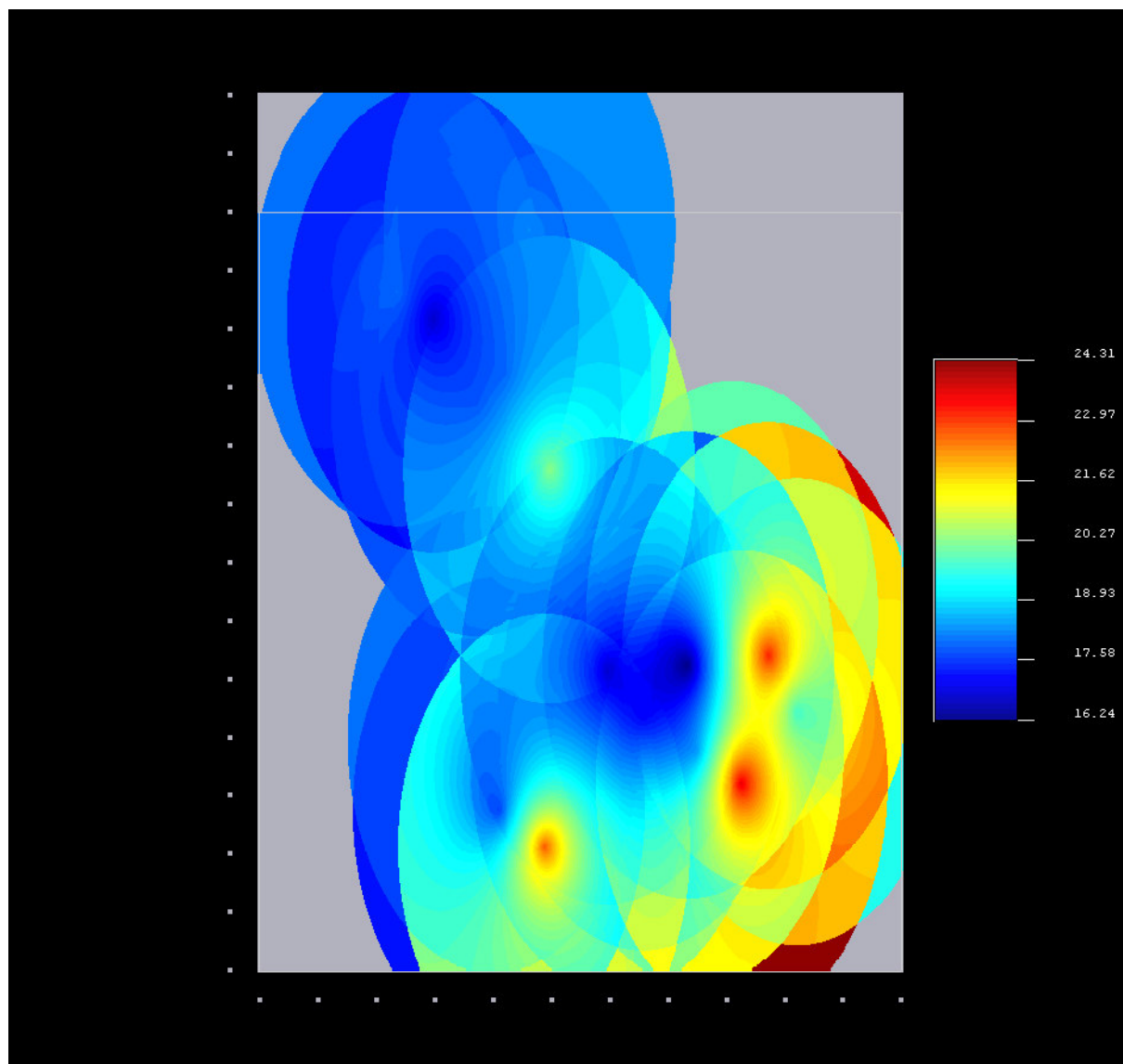


Figure 2 :Carte représentative du krigeage des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 550 m

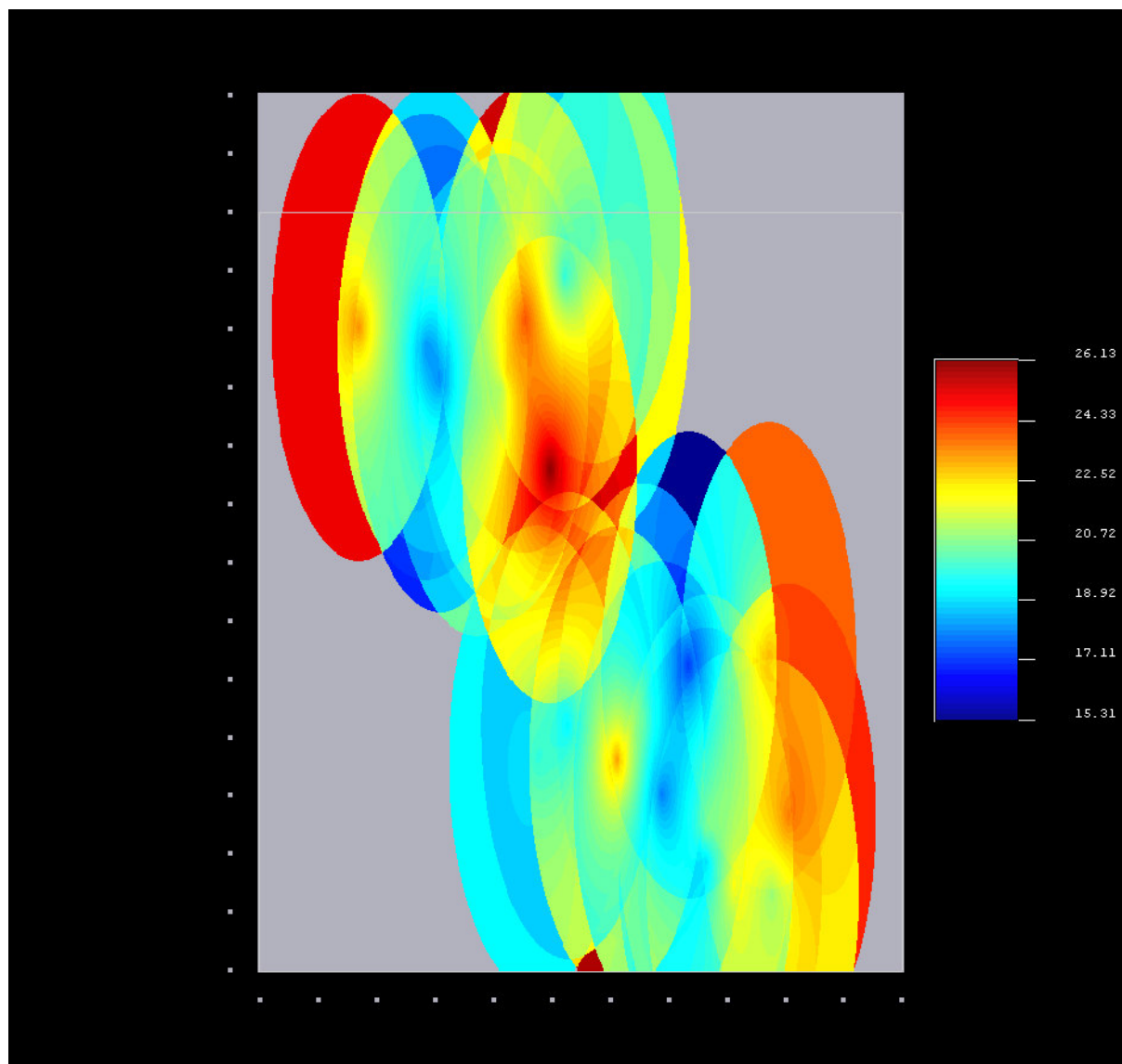


Figure 3 :Carte représentative du krigeage des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 560 m

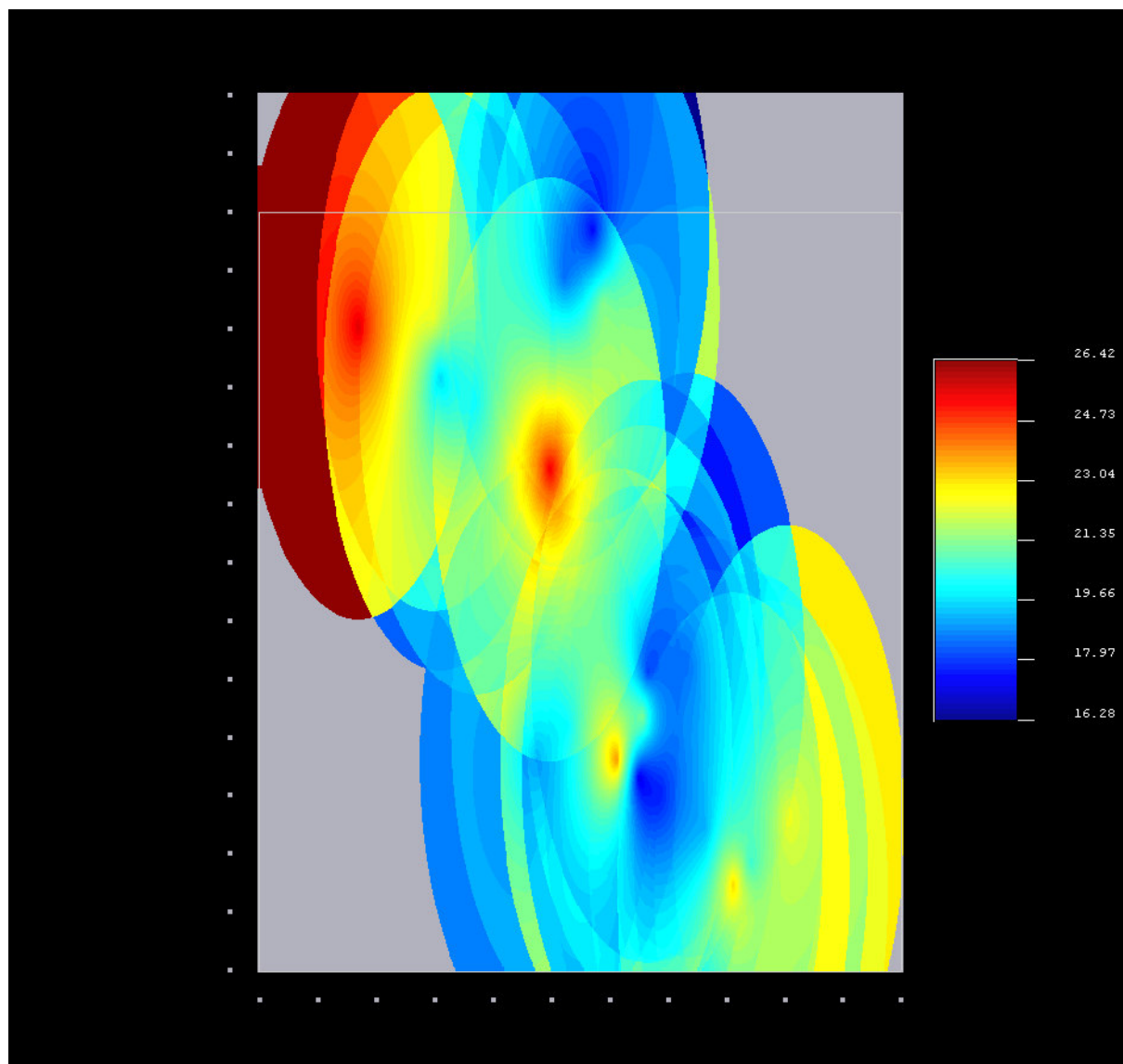


Figure 4 :Carte représentative du krigeage des teneurs en Al_2O_3 , montrant la répartition de la minéralisation au niveau 570 m

Résumé

L'objectif de notre travail est de proposer une évaluation des réserves de kaolin du gisement de Tamazert, situé à El Milia, à l'aide de la méthode géostatistique linéaire. Cette étude repose sur le contrôle des teneurs, dans le but de faciliter la gestion, l'orientation des travaux d'exploitation et le suivi des teneurs issues de l'usine de traitement.

Le travail consiste à appliquer la modélisation géostatistique, en particulier le krigeage des blocs, pour modéliser la variabilité spatiale entre les sondages réalisés dans le cadre de la cartographie, ainsi que pour évaluer les réserves du gisement de Tamazert. Les variogrammes directionnels expérimentaux des épaisseurs et des teneurs en Al_2O_3 dans le plan de la couche kaolinique ont été calculés et ajustés. Ces variogrammes ont servi à la réalisation du krigeage ordinaire et du krigeage des blocs.

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale stochastique permettant de prévoir la valeur d'un phénomène naturel dans des sites non échantillonnés, en utilisant une combinaison linéaire sans biais et à variance minimale, basée sur les observations réalisées dans des sites voisins.

Summary (English)

The objective of this work is to provide an evaluation of the kaolin reserves at the Tamazert deposit, located in El Milia, using the linear geostatistical method. This study is based on grade control to facilitate the management, direction of mining operations, and monitoring of the grades supplied to the processing plant.

The work involves applying geostatistical modeling, specifically block kriging, to model the spatial variability between the drill holes conducted as part of the mapping process, as well as to evaluate the reserves of the Tamazert deposit. Experimental directional variograms of the thickness and Al_2O_3 grades within the kaolin layer were calculated and fitted. These variograms were used for both ordinary kriging and block kriging.

Kriging is a stochastic spatial interpolation method used to predict the value of a natural phenomenon at unsampled locations by employing an unbiased linear combination with minimal variance, based on observations from neighboring sites.

الملخص

يهدف هذا العمل إلى تقديم تقييم لاحتياطات الكاولين في مكن تآمازرت، الواقع في منطقة الميلية، باستخدام الطريقة الجيوإحصائية الخطية. تستند هذه الدراسة إلى التحكم في المحتويات لتسهيل إدارة وتوجيه عمليات الاستخراج ومتابعة درجات التركيز المرسل إلى مصنع المعالجة.

يتضمن العمل تطبيق النمذجة الجيوإحصائية، وخاصة طريقة "كريغاج الكتل"، لنمذجة التغير المكاني بين الحفريات التي أُجريت في إطار عملية الخرائط، وكذلك لتقييم احتياطات مكن تآمازرت. تم حساب وتعديل الفاريوقرامات الاتجاهية التجريبية لسماكات ومحتويات Al_2O_3 في طبقة الكاولين. تم استخدام هذه الفاريوقرامات في إجراء كريغاج عادي وكريغاج الكتل.

تُعد طريقة الكريغاج أسلوبًا عشوائيًا للتنبؤ المكاني يُستخدم لتقدير قيمة ظاهرة طبيعية في مواقع غير متمثلة، باستخدام تركيبة خطية غير متحيزة وبأقل تباين، استنادًا إلى الملاحظات من المواقع المجاورة

Référence

- [1] Audit environnemental SOALKA 2014 / SPA El-Milia
- [2] RAPPORT GEOLOGIQUE ANNUEL ACTUALISE 2022/SPA EL-Milia
- [3] Sonarem, Travaux de prospection et d'évaluation du gisement de kaolin de Tamazert, rapport intermédiaire, 1977
- [4] (Bouillin J.P., Kornprobst A., (1974). Association ultrabasique de la petite Kabylie : Péridotite de type Alpine et complexes stratifiés; Comparaison avec les zones internes bético rifaines. Bull. Soc. géol. France, 167, pp 183-194.)
- [5] (Boukoffa M, (2008). thèse de Magister « Caractérisation géologique, géochimique et minéralogique du phénomène de kaolinisation du gisement de Tamazert – Jijel », Université d'annaba.)
- [6] plan d'exploitation complexe des Kaolins D'El Millia 2024
- [7] Etape de Traitement du kaolin de Tamazert, El Milia Source (ENOF, SOALKA EL Milia)
- [8] Chouafa Mohamed ; Comportement du kaolin à l'enrichissement par flottation .Cas de la mine de Tamazert-Jijel.Memoire de Doctorat université de Annaba 2016.
- [9] Zegga Amel & Tahir Lynda ; Enrichissement des sous-produits siliceux générés par le traitement du kaolin de Tamazert (Wilaya de Jijel) 2022
- [10] 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
- [11] 8 : Armstrong M., Carignan J., 1997.Géostatistique linéaire : application au domaine minier", (les presses de l'école des mines), 115 p.
- [12] Chauvet P., 1999.Aide-mémoire de géostatistique linéaire. Ecole des Mines de Paris. Edition Les presses.370p.
- [13] : Chauvet P., 2008.Aide-mémoire de géostatistique linéaire",54 p.
- [14] ISOBEL, C., "Practical geostatistics, applied science publishers", 127 p, 1979.
- [15] : MAZGHACHE, H., "La géostatistique linéaire appliquée", 26 p, 2008

- [16] M. Olivier Baume. Approche géostatistique de l'influence des paramètres physiques sur la propagation acoustique à grande distance P 45 2006
- [17]]: 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.
- [18]]: XAVIER, E., "géostatistique linéaire", Centre de géostatistique, Ecole des Mines de Paris, p 403, 2001
- [19] 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
- [20] MOURAH, N., "Interpolation Géostatistique le krigeage", Mémoire de Magister, Université 20 Aout 1955 Skikda, 2011
- [21]: MAZARI, M., "Etude géostatistique des ressources minières : exemple d'une mine en cours d'évaluation", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2012
- [22]: ARMSTRONG, M., CARIGNAN J., "Géostatistique linéaire : application au domaine minier", (les presses de l'école des mines), 115 p, 1997.
- [23]: BAILY, J.S., "Géostatistique appliquée", 22 p. 1999.
- [24]: GRATTON, Y., "Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale", INRSEau-Terre-Environnement. Institut national de la recherche scientifique, 20