



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGENIEUR D'ETAT

Spécialité : **Génie minier**

Présenté par

AOUF SOFIANE

ESTIMATION DES RESERVES DE MINE DE FER D'ANINI

Encadré par

Pr. Salim BENSEHAMDI

Etablissement d'affiliation

Département Génie Minier, de la Métallurgie et des Matériaux

Membres du jury :

- | | | |
|----------------------|-----------|--------------|
| ▪ Dr. Ali MESSAI | Président | Ensti-Annaba |
| ▪ Dr. Djamel NETTOUR | Examineur | Ensti-Annaba |

Remerciement

Je tiens tout d'abord et toujours à remercier Dieu tout-puissant pour son soutien tout au long de mon parcours, pour avoir facilité les choses et pour l'achèvement de ce travail durant ces cinq années de l'études.

Je remercie également mon encadrant professeur **S. Bensehamdi**, pour son suivi du travail pendant toute cette période.

Je remercie les membres jurys de m'accepte mon mémoire de projet fin d'étude c'est pour moi un grand honneur.

Je remercie tous ceux qui ont apporté leur aide, de près ou de loin, amis ou inconnus, et je remercie tous ceux qui ont été comme une pluie bienfaisante durant les années de sécheresse.

Merci, merci et mille fois vraiment merci.

Dédicace

Je dédie mon succès tout d'abord aux habitants de Gaza en Palestine, aux habitants de Khan

Younes et de Rafah, ainsi qu'à tous les martyrs bien-aimés.

Je dédie également ce succès à ma famille bien-aimée et de ses membres, ainsi qu'à tous mes

chers amis, un par un. Merci.

□ لخص:

تقدير احتياطيات موقع مثل موقع أنيني، الواقع شمال مدينة سطيف في الجزائر والمميز بطبوغرافية كارستية معقدة، يتطلب نهجاً محدداً. تظهر الأساليب التقليدية المعتادة والجيواحصائية حدوداً في هذا السياق، بسبب الطبيعة المحددة للموقع. لتحسين التقديرات، تم تطوير نهج محدد لموقع خام الحديد أنيني.

قام المكتب الوطني للبحث الجيولوجي والتعدين بأعمال استكشاف بين عامي 2009 و 2011، باستخدام الحفريات والقنوات ، لتقدير الموارد بواسطة طريقة الكتل (FeT) لجمع العينات. تم استخدام تحليل العينات، استناداً إلى محتوى الحديد الجيولوجية، وفقاً لممارسات المكتب الوطني للبحث الجيولوجي والتعدين.

في إطار هذا العمل، تم إجراء إعادة تقييم للموارد باستخدام الطريقة الجيواحصائية للكرباج. تهدف هذه النهج إلى مقارنة النتائج المحصلة باستخدام الأساليب السابقة، مما يوفر منظوراً أكثر شمولاً حول الاحتياطيات المحتملة للموقع.

Résumé :

L'estimation des réserves d'un gisement comme celui d'Anini, situé au nord de la ville de Sétif en Algérie et caractérisé par une morphologie karstique complexe, nécessite une approche adaptée. Les méthodes conventionnelles et géostatistiques traditionnellement utilisées présentent des limites dans ce contexte, en raison de la nature spécifique du gisement. Pour optimiser les estimations, une approche spécifique a été développée pour le gisement de fer Anini.

L'Office National de la Recherche Géologique et Minière a mené des travaux d'exploration entre 2009 et 2011, utilisant des sondages et des tranchées pour collecter des échantillons. L'analyse des échantillons, basée sur la teneur en fer (FeT), a été utilisée pour estimer les ressources par la méthode des blocs géologiques, conformément aux pratiques de l'ORGM.

Dans le cadre de ce travail, une réévaluation des ressources a été entreprise en utilisant la méthode géostatistique du krigeage. Cette approche vise à comparer les résultats obtenus avec les deux méthodes précédentes, offrant ainsi une perspective plus complète sur les réserves potentielles du gisement.

Abstract:

Estimating reserves of a site like Anini, located north of the city of Setif in Algeria and characterized by a complex karstic morphology, requires an adapted approach. The conventional and geostatistical methods traditionally used have limitations in this context, due to the specific nature of the site. To optimize estimations, a specific approach has been developed for the Anini iron ore deposit.

The National Office of Geological and Mining Research conducted exploration works between 2009 and 2011, using boreholes and trenches to collect samples. Sample analysis, based on iron content (FeT), was used to estimate resources using the geological block method, following the practices of the National Office of Geological and Mining Research.

As part of this work, a reevaluation of resources was undertaken using the geostatistical method of kriging. This approach aims to compare the results obtained with the previous methods, thus providing a more comprehensive perspective on the potential reserves of the site.

Liste des tableaux :

Tab IV.1 : Récapitulatif des Ressources en Minerai de Fer Estimées par Méthode Conventionnelle (Ouahioune et al., 2009 et 2011)	18
Tab IV.2: Statistique de teneur de fer totale.....	20
Tab IV.3: paramètres de variogramme de la variable régionale FeT.	20

Liste des figures :

Fig I.1 : Carte structurale de la région nord-orientale de la chaîne tellienne et situation du gisement D'Anini (d'après Wildi, 1983 ; simplifiée par Boutaleb, 2001).....	2
Fig I.2 : Colonne lithostratigraphique de Djebel Anini et Guergour.....	3
Fig I.3 : Coupe géologique simplifiée mettant en évidence les différents types d'accidents visibles dans le secteur des djebels Guergour et Anini (Vila, 1980).	4
Fig II.4 : Exemple de triangulation de Delaunay et polygones de Voronoi.	6
Fig II.5 : exemple de technique de triangle	7
Fig II.6 : Pondération inverse à la distance.....	7
Fig II.7 : Schéma de réalisation de méthode de section	8
Fig III.8 : interface d'accueil de logiciel Rockwork	12
Fig III.9 : tableaux de localisation des sondages.....	13
Fig III.10 : la situation des sondages dans le logiciel RockWork.....	13
Fig III.11: visualisation des sondages 3D en RockWork	14
Fig III.12 : implantation les trous des forages selon la FeT	15
Fig III.13: modélisation un modèle lithologique 3D par RockWork	16
Fig IV.14: Délimitation des zones et corps de minerais établie par Ouahioune et al. (2009 et 2011).....	17
Fig IV.15: histogramme de teneur en fer totale (FeT) de données des carottes d'Anini.	19
Fig IV.16 : Schéma illustrant la relation entre l'effet de trou et la morphologie des corps minéralisés	21
Fig IV.17 : estimation par krigeage les teneurs de fer totale FeT.	21

SOMMAIRE:

Introduction générale :	1
Chapitre I : Description de la mine d'ANINI	2
I. Situation géographique :	2
I.1. Lithologie :	2
I.2. Tectonique :	3
I.3. Minéralisation :	4
Chapitre II : Etude bibliographique	5
II.1. Introduction :	5
II.2. Evaluation de ressource minière :	5
II.3. Méthodes d'évaluation de ressources minières :	5
II.3.1. Méthode de polygones :	6
II.3.2. Technique de triangle (estimation ponctuelle et de blocs) :	6
II.3.3. Méthode de l'inverse de distance :	7
II.3.4. Méthode de sections :	7
II.3.5. Méthode géostatistique (Krigage) :	8
Chapitre III : Analyse des données data base sur logiciel.....	9
Introduction :	9
III.1. Travaux d'exploration sur la mine de fer Anini :	9
III.2. Méthodes d'estimations utilisées :	9
III.2.1. Méthode conventionnelle - méthode des blocs géologiques :	9
III.2.2. Méthode géostatistique de krigage ordinaire :	10
III.2.3. Principe de Krigage :	10
III.3. Logiciel utilisé :	11
III.3.1. Présentations de logiciel Rockwork :	11
III.4. Création du projet :	12
III.5. Affichage des trous du forage :	13
III.6. Affichage les logs des sondages en 3D :	14
III.7. Construire un modèle lithologique 3D :	15
III.8. Conclusion :	16
Chapitre IV : Résultats d'estimation de réserves	17
Introduction :	17
IV.1. Estimation des ressources par méthodes conventionnelles :	17

IV.2. Estimation des ressources par méthode géostatistiques :	19
IV.2.1. Analyse des données statistique :	19
IV.2.2. Variographie :	20
IV.2.3. Résultat d'estimation par krigeage ordinaire :	21
IV.3. Conclusion :	22
Conclusion générale	23
Références	24

Introduction générale :

Les mines jouent un rôle important dans l'économie mondiale en fournissant les matières premières nécessaires à diverses industries. Parmi ces matières premières, le fer est particulièrement recherché en raison de ses propriétés utilitaires, étant un composant essentiel dans la production d'acier, de ciment, et bien d'autres matériaux. Dans ce contexte, une estimation précise des réserves de minerai de fer est essentielle pour planifier l'exploitation minière et assurer la rentabilité économique des projets miniers.

Ce projet vise à appliquer une méthodologie géostatistique pour estimer les réserves de minerai de fer de la mine d'Anini. Les résultats obtenus seront comparés à de la méthode conventionnelle utilisée par l'Office des Ressources Géologiques et Minières (ORGM) entre 2009 et 2011. L'objectif est de démontrer la précision et l'efficacité de la méthode géostatistique par rapport à la méthode conventionnelle, afin de proposer des améliorations potentielles pour les futures évaluations de réserves minières.

Ce travail est reparti en 4 chapitres :

Chapitre 01 : est une description de la mine d'Anini présente la situation géographique de la mine et la lithologie et la minéralisation du gisement de fer de Djbel Anini.

Chapitre 02 : étude bibliographique sur le thème de recherche entour de définition de l'estimation des réserves et les méthodes existées pour l'évaluation de ressources miniers.

Chapitre 03 : analyse des données et la méthodologie pour faire l'estimation par logiciel RockWork a l'aide de Krigeage ordinaire.

Chapitre 04 : résultats d'estimation des réserves par les deux méthodes conventionnelles et géostatistiques et fait une comparaison entre eux.

Chapitre I : Description de la mine d'ANINI

I. Situation géographique :

Le gisement de fer d'Anini se trouve dans le nord de l'Algérie, à environ 30 km au nord-ouest de la ville de Sétif et à 3 km au sud du village d'Ain Roua, à proximité de Bougaa. Structuralement, la mine d'Anini est située sur le flanc sud du Djebel Anini.

I.1. Lithologie :

Le Djebel Anini, intégré dans l'ensemble allochtone sud-sétifien, se caractérise par sa forme en anticlinal avec un axe orienté est-ouest, comme indiqué par plusieurs références (Glaçon, 1967 ; Kazi Tani, 1986 ; Popov, 1976 ; Vila, 1980 ; Slavko, 1968 ; Mikrichiane, 1978 ; ORGM, 1991 ; Outezmabet, 1994 ; Ouahioune et al. 2009-2011).

Son noyau est constitué de calcaires massifs turoniens inclinés à un angle de 10° à 25° vers le sud (Bendali, 1989). Les dépôts formant le gisement sont des sédiments de la série néritique datant du Sénonien et du Quaternaire.

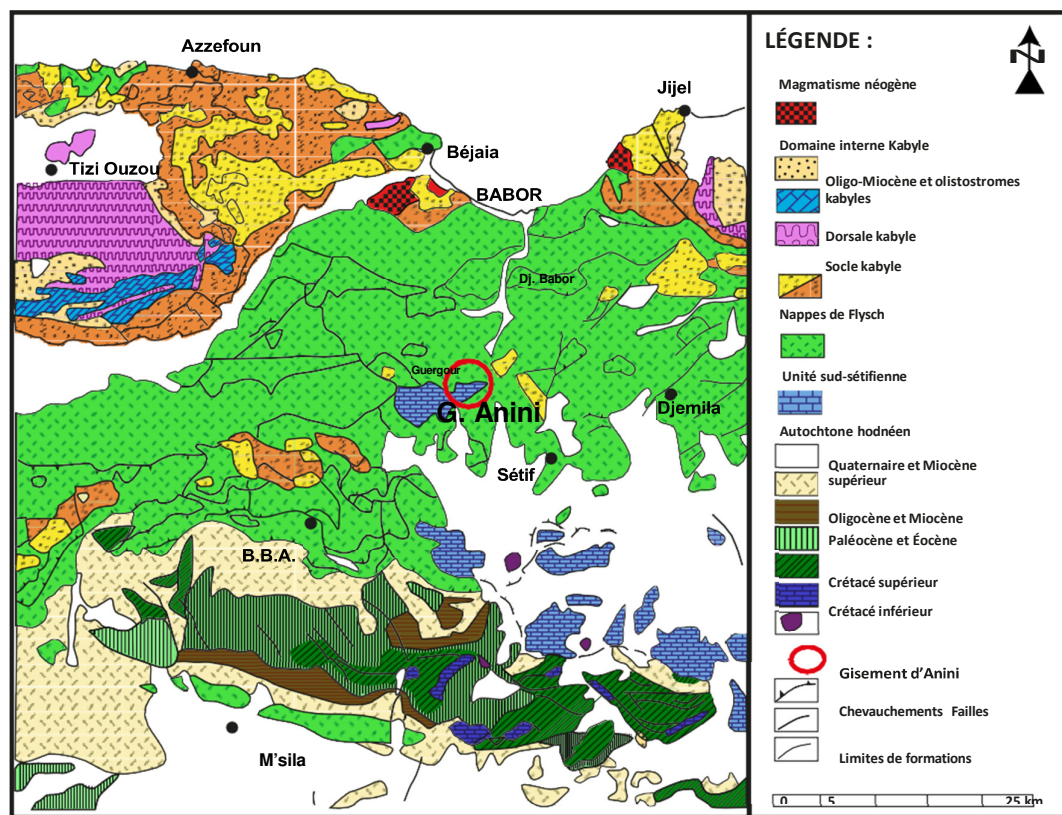


Fig I.1 : Carte structurale de la région nord-orientale de la chaîne tellienne et situation du gisement D'Anini (d'après Wildi, 1983 ; simplifiée par Boutaleb, 2001).

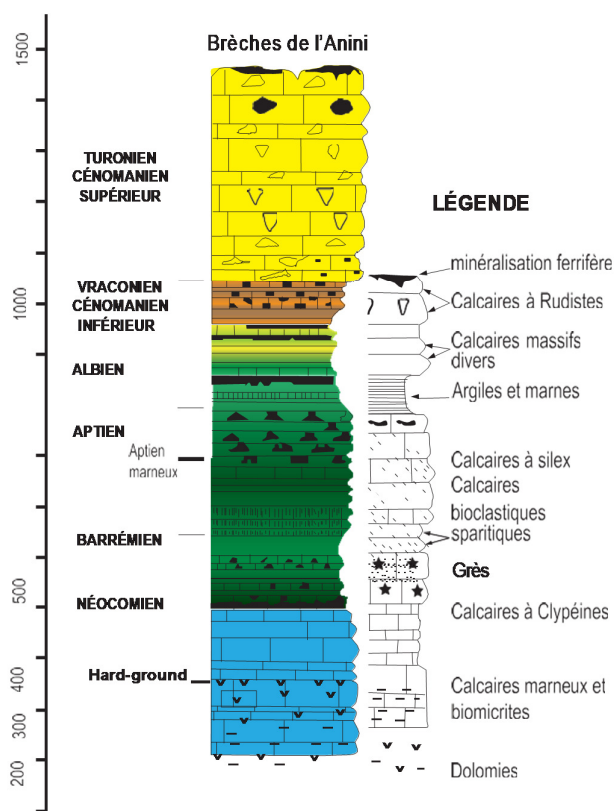


Fig I.2 : Colonne lithostratigraphique de Djebel Anini et Guergour.

I.2. Tectonique :

Le Djebel Anini affleure sous forme d'une fenêtre tectonique sous les dépôts de la nappe de Djemila (fig. 1).

Vila (1980) a défini deux types de déformations (fig. 3) qui ont affecté ce massif :

A- Contacts anormaux plats : entre les diverses nappes telliennes, qui sont purement tectoniques ;

- La limite entre les carbonates du sud-sétifien et les nappes telliennes.

B- Réseau de failles : classé en trois familles de failles subverticales :

Les plus récentes affectent toute la série, y compris le Mio-Pliocène continental de direction N135° à N165°. Ce système est le plus important car il contrôle les minéralisations ferrugineuses. Glaçon (1967) a signalé que l'édification de karsts est dirigée globalement selon la direction de ce dernier système ;

Celles qui sont contenues exclusivement dans les nappes allochtones et qui caractérisent les contacts anormaux plats de direction N095° à N105°

Enfin, celles qui n'affectent que la masse carbonatée d'Anini et qui sont de direction N065°.

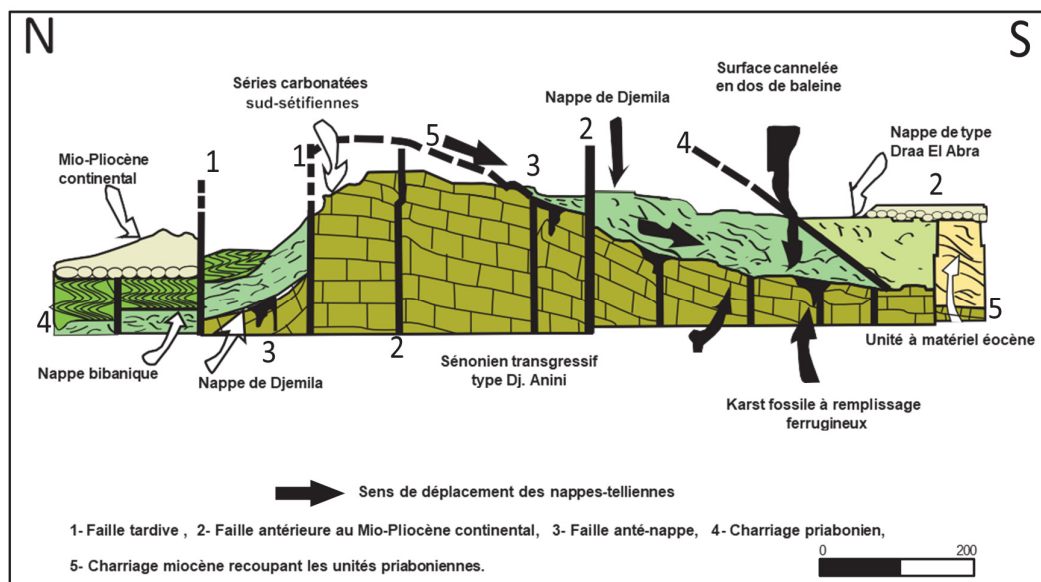


Fig I.3 : Coupe géologique simplifiée mettant en évidence les différents types d'accidents visibles dans le secteur des djebels Guergour et Anini (Vila, 1980).

I.3. Minéralisation :

Le gisement de fer du Djebel Anini se compose de formations karstiques ayant une forme lenticulaire allongée dans la même orientation que les failles NNO-SSE. Ces formations karstiques résultent du remplissage des fractures et des failles par des solutions riches en fer.

La minéralisation est contenue dans les calcaires du cénomano turonien, comprenant de l'hématite, de la goethite, de l'hydro goethite, des sulfures comme la pyrite et la marcassite, ainsi que des sulfates tels que la barytine. Les minéraux de gangue sont principalement de la calcite, de la dolomite et du quartz. Les textures de minerai sont variées, parmi lesquelles la texture massive est particulièrement notable, collomorphe, rubanée, alvéolaire, stalactites et stalagmites, géodique, tachetée et veinules.

L'origine de la minéralisation est hydro- thermique. Cette minéralisation est le résultat du remplissage de fractures et de vides karstiques par les fluides hydrothermaux qui ont favorisé le dépôt de cette dernière.

Chapitre II : Etude bibliographique

II.1. Introduction :

Le succès d'un projet minier il faut savoir comment garantir un bon rendement à une entreprise minière, pour un projet minier rentable et prendre la bonne décision pour l'exploitation cette décision commence par l'estimation des réserves minérales et méthode choisie pour l'évaluation des ressources minières.

II.2. Evaluation de ressource minière :

L'évaluation des ressources minières représente une étape essentielle dans tout projet minier, car elle fournit les données nécessaires à l'étude de faisabilité de l'exploitation minière. Cette étude détermine si l'exploitation d'un gisement sera rentable ou non. Pour assurer le succès d'une entreprise minière, il est crucial de choisir la meilleure méthode d'évaluation, tout en minimisant les risques et en optimisant les gains potentiels.

La décision d'exploiter un gisement repose principalement sur deux facteurs : la teneur moyenne du gisement et son volume. Un gisement peut présenter des concentrations de minéraux très élevées, mais si son volume ne permet pas une exploitation rentable sur le long terme, son intérêt reste limité. De même, un gisement étendu sur une grande superficie doit contenir des concentrations de minéraux significatives pour compenser les coûts d'exploitation et générer des bénéfices. En résumé, l'évaluation des ressources minières vise à évaluer la rentabilité potentielle de l'exploitation en prenant en compte à la fois la qualité et la quantité des minéraux présents dans le gisement.[1]

II.3. Méthodes d'évaluation de ressources minières :

Pour estimer la teneur moyenne d'un gisement, il est nécessaire de faire une extrapolation car la véritable teneur du gisement n'est jamais initialement connue. Elle ne devient apparente qu'à partir de quelques échantillons prélevés dans les trous de forage, qui sont ensuite analysés chimiquement pour déterminer leur composition minérale.

-Voici cinq méthodes couramment utilisées dans l'évaluation des ressources minières :

- ❖ Méthode de voisin rapproché (méthode de polygones)
- ❖ Technique de triangle (estimation ponctuelle et de blocs)
- ❖ Méthode de l'inverse de distance
- ❖ Méthode de sections
- ❖ Méthode géostatistique (Krigage)

II.3.1. Méthode de polygones :

Dans cette méthode couramment utilisée, on dessine des polygones autour de chaque point d'échantillon, englobant tous les autres points du plan pour lesquels cet échantillon est le plus proche. La technique prédominante consiste à former des triangles aussi équilatéraux que possible (triangulation de Delaunay). Une fois les triangles établis, des lignes perpendiculaires sont tracées à partir des milieux des segments des triangles. Les points d'intersection de trois de ces lignes définissent un sommet du polygone. [2]

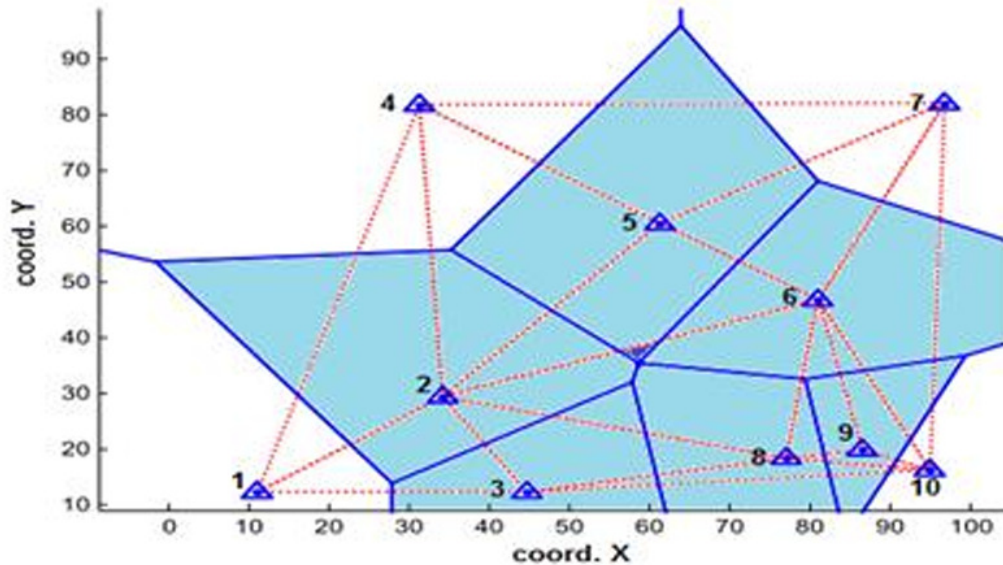


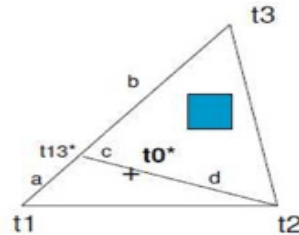
Fig II.4 : Exemple de triangulation de Delaunay et polygones de Voronoi.

Volume associé à un polygone : Surface du polygone x épaisseur de la veine mesurée au point échantillon situé dans chaque polygone.

II.3.2. Technique de triangle (estimation ponctuelle et de blocs) :

Cette approche implique la création d'un triangle en utilisant trois échantillons les plus proches possibles, suivi de l'abaissement d'une perpendiculaire à l'un de ses côtés. Cette perpendiculaire traverse l'un des sommets du triangle pour former un angle de 90 °. Les valeurs intermédiaires t_{13} et t_0 sont ensuite déterminées comme illustré dans la figure ci-dessous.[3]

Points : interpolation linéaire



$$t13^* = t1 + a/(a+b) * (t3 - t1)$$

$$t0^* = t13^* + c/(c+d) * (t2 - t13^*)$$

Blocs : moyenne des teneurs ponctuelles estimées dans le bloc

Fig II.5 : exemple de technique de triangle

Pythagore permet de déterminer toutes les distances nécessaires.

II.3.3. Méthode de l'inverse de distance :

Dans cette méthode, la valeur à estimer en un point spécifique de la zone d'étude est déterminée en utilisant une moyenne pondérée des valeurs des points les plus proches de ce point considéré. Initialement, on mesure donc la distance entre le point recherché et les points connus dans son voisinage. Ensuite, le calcul du point recherché se fait en prenant la moyenne des valeurs des points environnants. Ainsi, plus le point à interpoler est proche d'un point dont la valeur est connue, plus la valeur estimée du point à interpoler sera proche de la valeur connue. [4]

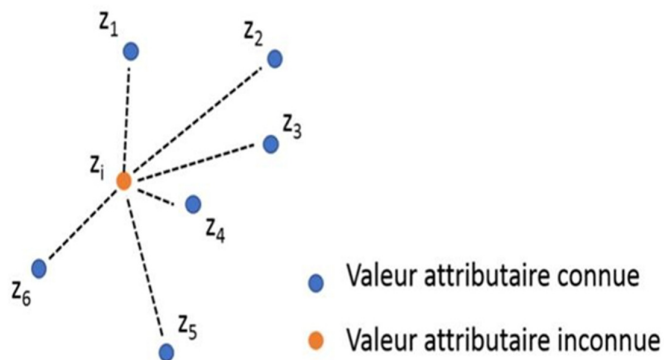


Fig II.6 : Pondération inverse à la distance.

II.3.4. Méthode de sections :

La méthode des sections implique le tracé d'une série de sections (généralement parallèles) à travers un gisement, la délimitation des zones minéralisées dans chaque section, et la compilation du volume total en utilisant les distances entre chaque section. Cette méthode est particulièrement adaptée pour les gisements ayant une forme de veines ou de lentilles. Les sections parallèles sont généralement perpendiculaires au corps minéralisé.[5]

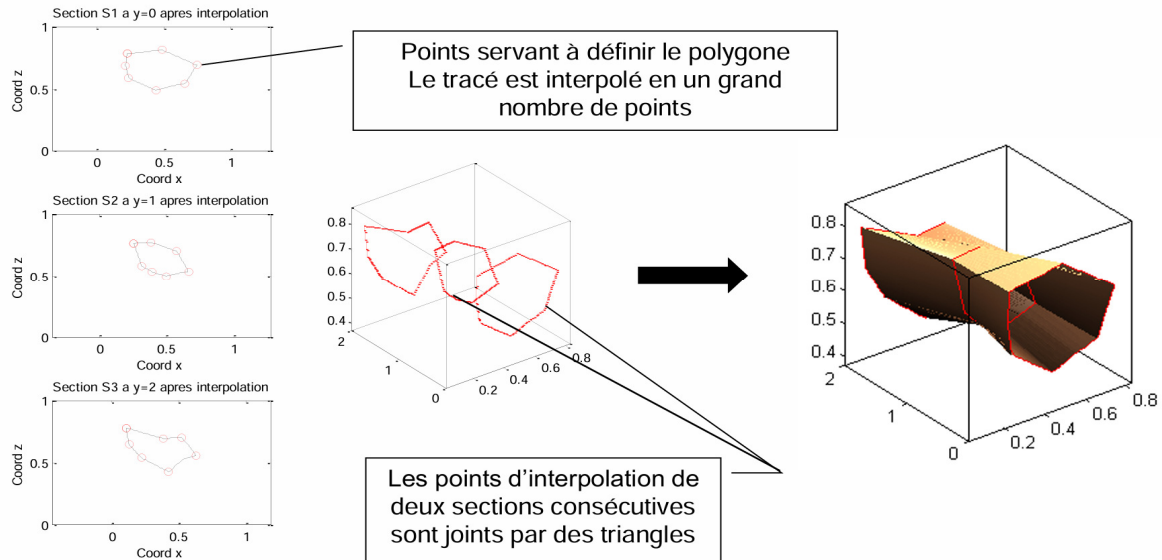


Fig II.7 : Schéma de réalisation de méthode de section

II.3.5. Méthode géostatistique (Krigage) :

Le principal objectif de la géostatistique est la prédiction spatiale, également connue sous le nom de krigage, qui consiste à prédire une variable régionalisée d'intérêt sur une zone d'étude à partir des données observées à certains points. Le krigage repose principalement sur la modélisation et l'estimation de la structure de dépendance spatiale. Cette structure est généralement décrite à l'aide d'outils statistiques tels que le variogramme ou la covariance, calculés sur l'ensemble du domaine d'intérêt et en supposant une certaine stationnarité. Seule la méthode d'interpolation par krigage repose sur une méthode statistique satisfaisante et permet d'obtenir la vraie variance d'estimation. [6]

Il y a deux types de krigage ordinaire et simple

- ❖ Parmi les méthodes évoquées précédemment, seule la méthode de Krigage permet de mieux minimiser les effets de support et d'information. Son avantage réside dans sa capacité à évaluer l'incertitude et à fournir des valeurs d'estimation plus proches de la vraie teneur moyenne, ce qui la rend plus optimale pour une exploitation minière rentable.
- ❖ Les quatre premières méthodes sont généralement classées comme des méthodes conventionnelles car elles ne tiennent pas compte de l'incertitude associée au calcul des ressources. En revanche, la cinquième méthode, le krigage, est considérée comme une méthode géostatistique en raison de sa capacité à estimer et à prendre en compte l'incertitude.

Chapitre III : Analyse des données data base sur logiciel

Introduction :

Pour faciliter le travail pour le domaine minier aux les ingénieurs il faut utilise le domaine numérique qui présente des déférences logicielles pour tous les phases d'un projet minier.

Pour faire l'estimation des réservés avec leur méthodes je besoin des besoin l'application des logiciels comme : RockWork, surpac ; surfer ; datamine Ext.

Dans ce chapitre j'utilise logiciel Rockwork pout fait l'estimation des réserves de fer Djbel Anini.

III.1. Travaux d'exploration sur la mine de fer Anini :

Il semble que vous parliez de la minéralisation ferrifère de Djebel Anini et des efforts de recherche et de prospection effectués dans la région au cours du 19e siècle jusqu'à l'époque contemporaine.

Dans les années 2009 et 2011, l'ORGM (Office de Recherche Géologique et Minière) a entrepris des activités de forage dans la région. En 2009, 30 forages ont été réalisés, suivis de 42 forages en 2011. Ces sondages étaient principalement concentrés dans la partie est-ouest de la région.

Les échantillons de carottes prélevés lors de ces forages ont été analysés par colorimétrie pour déterminer les concentrations de Fe_2O_3 (oxyde de fer) et FeT (fer total). Cette analyse a permis d'évaluer la teneur en fer dans les échantillons, ce qui est crucial pour évaluer le potentiel minier de la région.

Les sondages ont traversé différentes couches géologiques, notamment le calcaire, l'argile, les minerais et la calcite. Ces différentes couches peuvent fournir des indications sur la composition et la structure géologique de la région, ainsi que sur la distribution potentielle des minéraux ferreux.

III.2. Méthodes d'estimations utilisées :

III.2.1. Méthode conventionnelle - méthode des blocs géologiques :

L'estimation des ressources minières implique la détermination du tonnage de minerai ou de métal en combinant diverses données mesurées telles que les sondages et les échantillons. Parmi les différentes méthodes utilisées, l'une des plus courantes est celle des blocs géologiques. Cette méthode repose sur la délimitation des blocs à partir des travaux de prospection et d'exploitation tels que les tranchées, les affleurements géologiques et les sondages. Les ressources en minerai sont calculées pour chaque corps de minerai en utilisant une formule spécifique suivant :

$$Q_{\text{mineral}} = SPD(1)$$

Où : S est la surface du corps de mineral,

P est l'épaisseur de ce corps de mineral,

D est la masse volumique qui varie en fonction des teneurs dans le corps de mineral.

La méthode des blocs géologiques tient compte des teneurs en mineral dans le corps de mineral. Les contours des blocs sont définis par des limites naturelles du corps de mineral ou par des lignes tracées à partir des ouvrages minières et/ou des forages.[8]

III.2.2. Méthode géostatistique de krigeage ordinaire :

Actuellement, l'évaluation des ressources/réserves minières repose principalement sur l'utilisation de méthodes géostatistiques. Cette approche s'appuie sur la théorie des variables régionalisées et des fonctions aléatoires, telles que décrites par des chercheurs tels que Matheron (1971), Armstrong et Carignan (1997), Journel et Huijbregts (1978), et Chauvet (1999). Elle implique l'analyse de l'autocorrélation et de la variabilité spatiale, connue sous le nom de variographie. Les résultats de cette variographie sont ensuite utilisés dans divers domaines, notamment pour réduire les erreurs d'estimation des ressources/réserves.[9]

III.2.3. Principe de Krigeage :

Le krigeage ordinaire à moyenne inconnue vise à fournir une estimation locale non biaisée et la plus précise possible de la variable régionalisée, en utilisant une combinaison linéaire pondérée des données expérimentales.

Dans ce contexte :

- (Z) représente la variable régionalisée étudiée.
- (Z*) désigne l'estimateur de (Z) obtenu par krigeage.
- (Z_i) correspond aux valeurs prises par (Z) aux points de données (s_i).
- (γ) est le modèle de variogramme ajusté pour (Z).

L'objectif du krigeage ordinaire est d'estimer (Z) à un point donné, en combinant les (Z_i) de manière à minimiser l'erreur d'estimation tout en garantissant que l'estimation soit non biaisée.

Soit donc : $Z^* = a + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$ un estimateur linéaire de la variable.

L'erreur d'estimation s'écrit : $\varepsilon = Z^* - Z$

Pour que cet estimateur réponde aux exigences du krigeage, le paramètre a et les pondérateurs

λ_i Doivent respecter les contraintes suivantes : $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ cette dernière relation assure également l'absence de biais.

L'estimateur est le plus précis possible au sens où la variance de l'erreur d'estimation est minimale, soit :

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_i} \text{var}(z^* - z) = 0 \quad \forall_i \quad \text{var}(z - z^*) = 2 \sum_i \lambda_i \gamma_{xi} - \sum_{ij} \lambda_i \lambda_j \gamma_{ij} \quad (2)$$

γ_{xi} : est la valeur du variogramme entre les points s_i et le point cible x .

γ_{ij} : est la valeur du variogramme entre les points s_i et s_j .

Les poids λ_i qui remplissent ces conditions sont solutions d'un système matriciel faisant intervenir γ :

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1N} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ \gamma_{N1} & \cdots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{1x} \\ \vdots \\ \gamma_{Nx} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Le paramètre μ est un multiplicateur de Lagrange qui intervient dans la résolution du système de krigeage et dans le calcul de la variance de l'erreur.

Cette variance de l'erreur d'estimation ou variance de krigeage est donnée par la relation :

$$\sigma_k^2 = \sum_i \lambda_i \gamma_{ix} + \mu \quad (4)$$

Elle ne dépend que du modèle de variogramme et de la configuration relative du point ou du bloc à estimer et des données expérimentales.

III.3. Logiciel utilisé :

Le traitement des données exige l'utilisation systématique de techniques informatiques.

Pour analyse des données j'ai utilisé logiciel RockWork pour l'étude géostatistique.

III.3.1. Présentations de logiciel Rockwork :

Rock Works est un logiciel développé par RockWare. Qui sert à modéliser les gisements minéraux, analyser les eaux souterraines et effectuer d'autres tâches liées à la géologie et à la géotechnique. Il propose des fonctionnalités avancées comme la modélisation stratigraphique, la création de sections géologiques, l'analyse statistique des données et la visualisation des résultats à travers des graphiques et des cartes.[7]

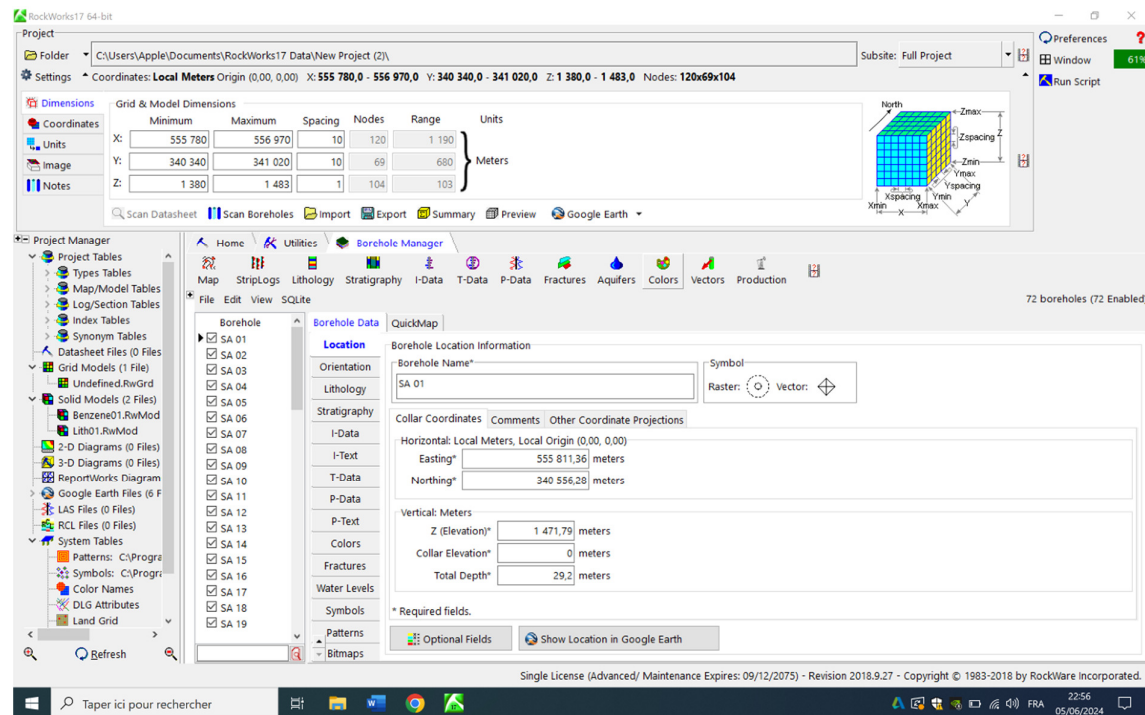


Fig III.8 : interface d'accueil de logiciel Rockwork

III.4. Création du projet :

Dans ce cadre de la création du projet pour commence l'étude géostatistique il faut créer la base des données à partir 4 tableaux Excel pour importe vers logiciel RockWork.

Ces tableaux créés partirai les sondages de l'ORGM ces tableaux sont :

- **Localisation** : contient le nom de trous et les coordonnées X, Y, Z et la profondeur totale.
- **Orientation** : contient l'inclinaison des trous des forages et l'azimut et aussi contient la profondeur totale.
- **Lithologie** : contient les déferents couche géologiques et leurs noms pour chaque sondage.
- **I Data** : contient l'analyse chimique de chaque trou par déferlante éléments chimiques.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	bore	east	north	elev	depth			
2	SA 01	722023,1	337922,4	1471,791	29,2			
3	SA 02	722008,6	337968,2	1475,197	82,5			
4	SA 03	722079,2	338049,4	1464,707	46,4			
5	SA 04	722117,5	337939,1	1457,953	52,4			
6	SA 05	722088,3	337996,1	1462,937	38,4			
7	SA 06	722068,6	338166,9	1475,933	37,5			
8	SA 07	722025,3	338157,7	1474,83	22,7			
9	SA 08	722043,4	337994,8	1468,701	21,6			
0	SA 09	722077,9	338210,7	1474,712	25,2			
1	SA 10	722276,2	338113,4	1473,003	44,4			
2	SA 11	722282,3	338117,1	1473,443	39,2			
3	SA 12	722352,7	337964,1	1459,657	43,4			
4	SA 13	722333,4	338037,5	1459,187	50			

Fig III.9 : tableaux de localisation des sondages

III.5. Affichage des trous du forage :

Dans la figure 08, chaque trou de forage est représenté un symbole sur une carte de localisation, ces 72 sondages distribués selon leurs localisations sur la carte.

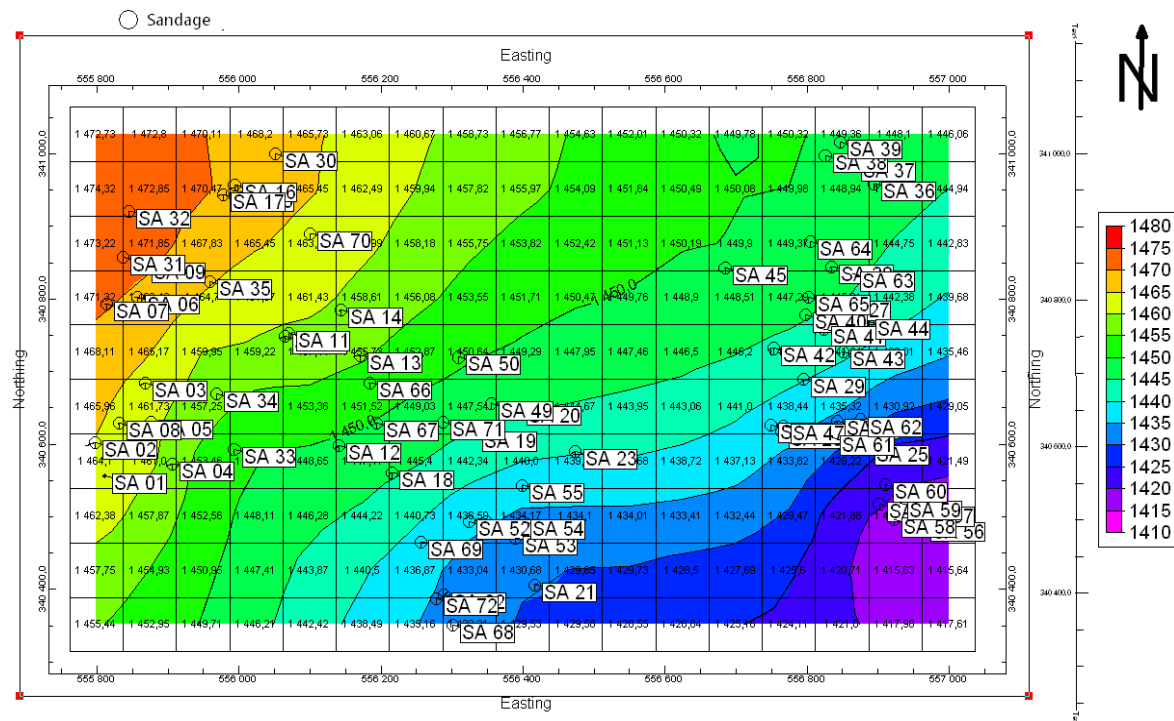


Fig III.10 : la situation des sondages dans le logiciel RockWork

Figure 10 : cette figure présent la localisation des sondages dans la carte qui divisée cette dernière par des carré contient les altitudes déférents chaque altitude a un couleure la légende dans le droit présente les couleurs des altitudes.

III.6. Affichage les logs des sondages en 3D :

L'utilisation des logs 3D dans logiciel RockWork pour analyser et interprété les données géologique ; identifier les couches, les teneurs les structures importantes dans le sous-sol.

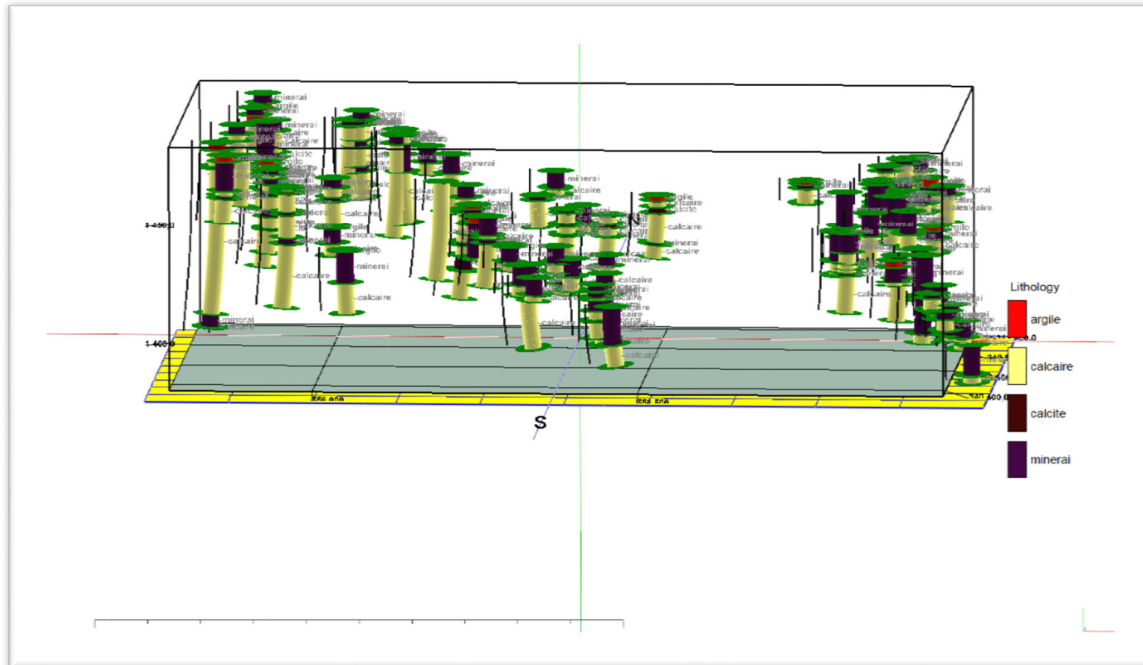


Fig III.11: visualisation des sondages 3D en RockWork

Figure 11 : représente les sondages en 3D en déférent points et chaque trous leur inclinaison les trous travers les couches géologiques de la zone étude les échantillons de ces sondages donnés des résultats de la lithologie qui présente de la légende dans la figure 11 il y a 4 couches dans la zone étude argile, mineral, calcite, mineral.

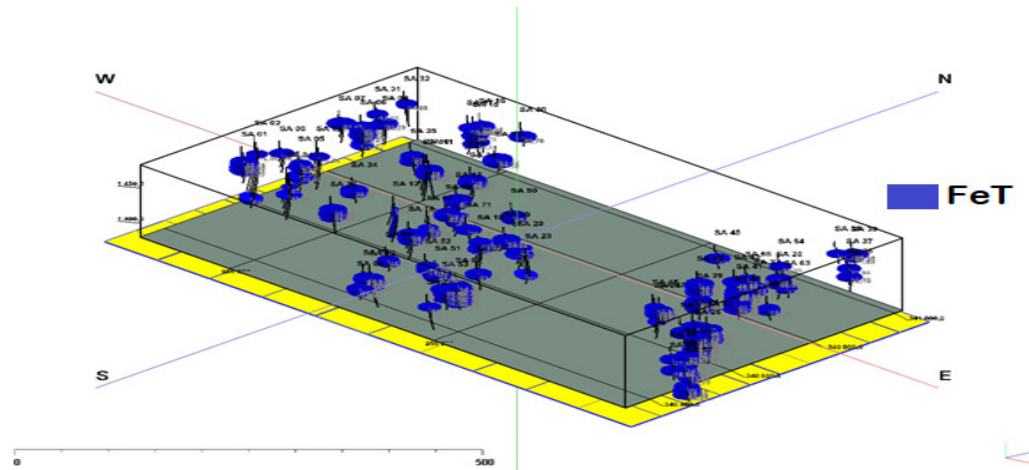


Fig III.12 : implantation les trous des forages selon la FeT

Figure 12 : cette figure présente l'implantation les trous de forages selon la présence FeT (le fer totale) dans chaque trou dans RockWork cette étape c'est important de connaitre les différents éléments chimiques présentes dans la base des données de l'analyse chimique.

III.7. Construire un modèle lithologique 3D :

L'utilisation des données de lithologie c'est pour construire un modèle 3D de la lithologie. RockWork permet de créer des modèles 3D en utilisant des voxels ou des blocs, en fonction de plusieurs méthodes de modélisation selon les données disponibles.

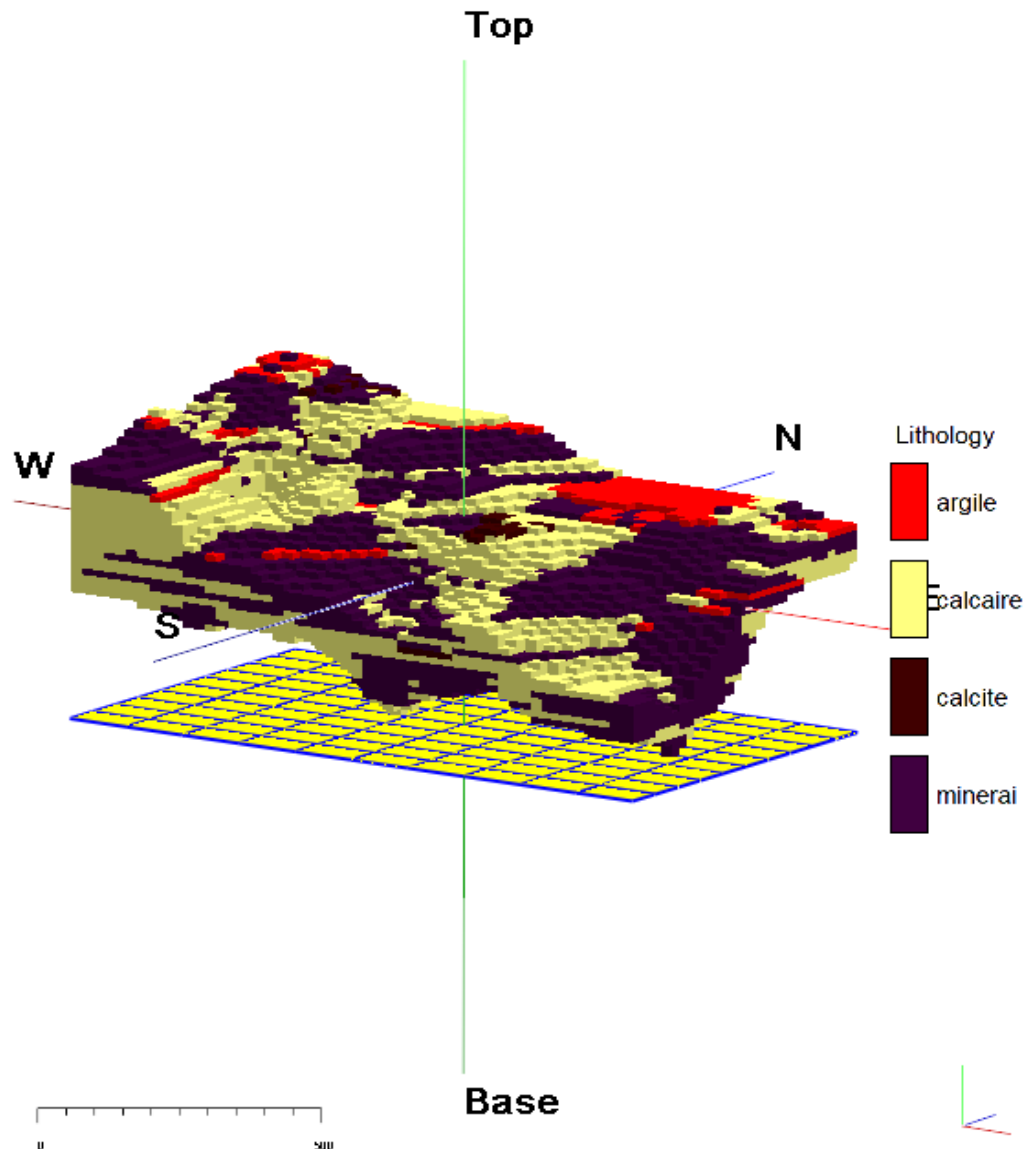


Fig III.13: modélisation un modèle lithologique 3D par RockWork

Figure 13 : dans ce modèle je remarque que le minerai est affleuré dans ce modèle d'une façon irrégulière entre les calcaires.

III.8. Conclusion :

A l'aide de la base des données des sondages de recherche comme l'orientation, localisation, lithologie et l'analyse chimique permet de créer un projet de plusieurs fonctions tel que les modèles lithologiques en 3D et aussi visualisations des trous des forages dans la carte et la distribution des teneurs de FeT dans la zone étudiée sont pour faciliter l'étude géostatistique.

Chapitre IV : Résultats d'estimation de réserves

Introduction :

Dans ce chapitre, basé sur une étude géostatistique réalisée à l'aide du logiciel RockWorks sur le petit gisement de fer d'Anini et la visualisation des modèles géologiques, une analyse approfondie des résultats de variographie est effectuée. Cette analyse vise à évaluer le tonnage de minerai de fer en comparant les résultats obtenus avec les méthodes conventionnelles.

IV.1. Estimation des ressources par méthodes conventionnelles :

Oua-hioune et ses collaborateurs (2009 et 2011) ont réalisé une évaluation des ressources par des méthodes conventionnelles en employant la méthode des blocs géologiques. Les limites des blocs ont été déterminées en surface à partir des observations des tranchées et des affleurements géologiques (consultez la Figure 14), tandis qu'en profondeur, elles ont été définies par des données de forage. Leur estimation a considéré une teneur moyenne minimale en fer total (FeT) de 25% et une épaisseur minimale exploitable de 3 mètres. Les ressources en minerai ont été calculées pour chaque corps de minerai en utilisant l'équation : $Q = S \times P \times D$. En conséquence, les ressources du gisement d'Anini ont été évaluées à 2,5 millions de tonnes de minerai, classées dans la catégorie C1 (tab1).

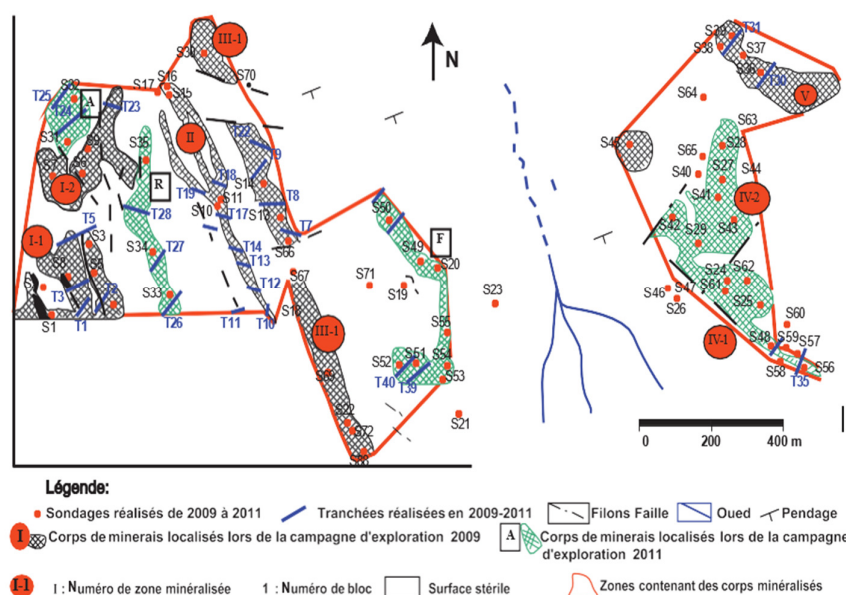


Fig IV.14: Délimitation des zones et corps de minerais établie par Ouahioune et al. (2009 et 2011).

Tab IV.1 : Récapitulatif des Ressources en Minerai de Fer Estimées par Méthode Conventionnelle (Ouahioune et al., 2009 et 2011)

Zone m (fig.16)	Blocs (fig.16)	O. M délimitant ou appartenant aux corps de minerais	$\bar{X}$ (%)	S (m ²)	$\bar{(P)}$ (m)	V (m ³)	D (t/m ³)	Q. Minerai (t)
I	I-1	S1, S3, S4, S5, S8, T1, T2, T3, T4, T5	42,85	10100	4,09	41309	2,89	119383
	I-2	S6, S7, S9, T6, T23	49,51	8600	8,89	76454	2,89	220952
II	II	S10, S11, S15, T10, T12, T13, T14, T16, T17, T18, T19	45,09	5900	7,07	41713	2,89	120551
A	A	S31, S32, T24, T25	45,62	6200	3,34	20708	3,76	77862
B	B	S33, S34, S35, T26, T27, T28, T29	31,70	6900	8,33	57477	3,63	208642
F	F	S49, S50, S51, S53, S54, S55, T36, T39, T40	30,35	8400	9,44	79296	3,99	316391
III	III-1	S13, S14, S30, S70, T8, T9, T22	47,06	11000	5,42	59620	3,29	196150
	III-2	S18, S22, S69	27,74	6600	6,75	44550	3,29	146570
IV	IV-1	S24, S25, S48, S56, S61, S62, T35	26,66	13700	12,64	173168	3,78	654575
	IV-2	S28, S29, S41, S42, S43	36,14	11400	10,57	120498	3,40	409693
V	V	S37, S39, T30, T31	27,52	8600	3,43	29498	3,69	108848
Ressources globales (C1) année 2011 à teneur de calcul de 25% en Fe-T								2579616

Légende :

- ❖ (X)% : teneur moyenne en fer
- ❖ S (m²) : superficie des corps minéralisés
- ❖ (P)(m) : extension verticale moyenne
- ❖ V(m³) : volumes

❖ D (t/m³) : masse volumique

❖ Q Minerais (t) : quantité de minerai

IV.2. Estimation des ressources par méthode géostatistiques :

IV.2.1. Analyse des données statistique :

L'analyse statistique des données dans RockWorks offre une compréhension approfondie des caractéristiques des données géochimiques. Grâce à une combinaison d'outils statistiques descriptifs, de visualisations graphiques et de techniques de modélisation géostatistique, les utilisateurs peuvent extraire des informations précieuses, essentielles pour la prise de décisions dans les projets d'exploration et d'exploitation minière.

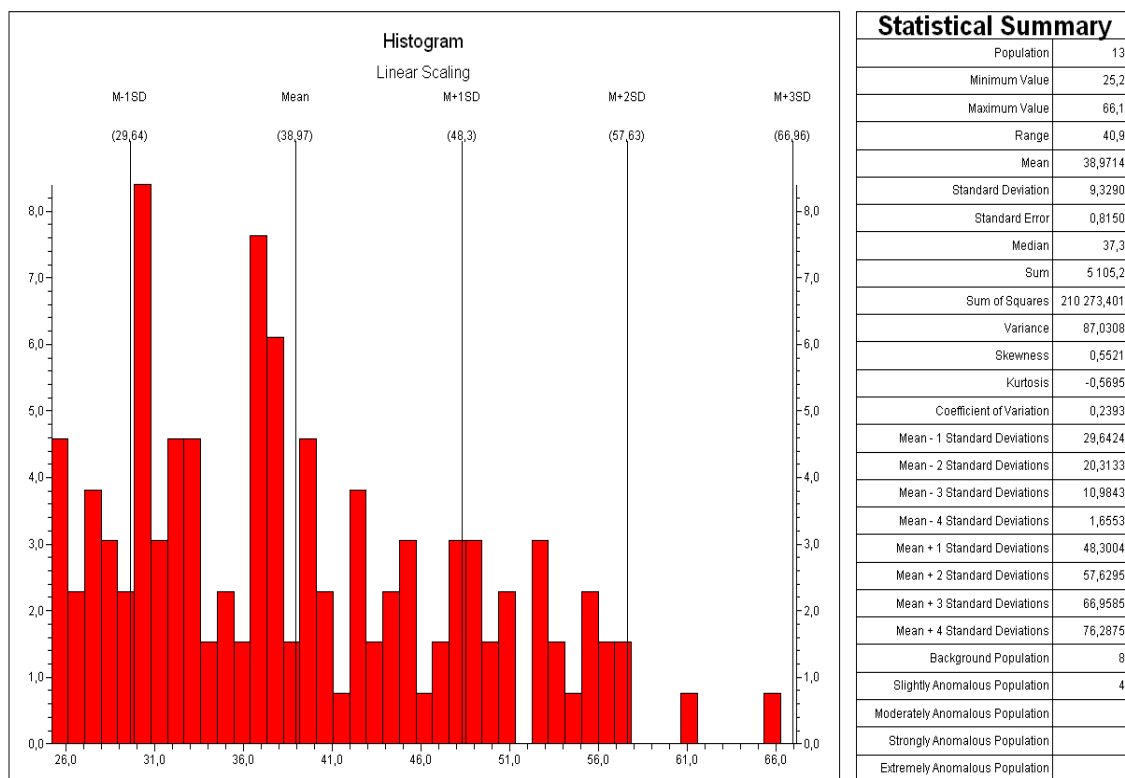


Fig IV.15: histogramme de teneur en fer totale (FeT) de données des carottes d'Anini.

Figure 15 : représente un résultat de logiciel RockWork qui applique sur les échantillons des carottes et l'analyse chimique donne un histogramme de distribution de teneur de FeT et la barre représente les déférlantes paramètres statistiques chaque barre de histogramme reprisent la valeur du teneur et la hauteur de la barre reprisent la fréquence de teneur de Fet et dans ce histogramme remarque l'intervalle de teneur le plus fraquant (29-38) , dans la barre des paramètres en résumé les importants paramètres dans le tableau 2 .

Tab IV.2: Statistique de teneur de fer totale

Élément	Moyenne	Écart type	Tmin (%)	Tmax (%)	Population
FeT	38,97	9,32	25,22	66,14	131

Tmin : teneur minimale, **Tmax** : teneur maximale,

IV.2.2. Variographie :

La variographie constitue une méthode fondamentale en géostatistique permettant de mesurer et de modéliser la variabilité spatiale des variables géologiques et géochimiques. Ces analyses sont essentielles pour obtenir des informations précieuses qui guident les décisions stratégiques et la gestion efficace des ressources naturelles.

Calcul de variogramme :

Le variogramme expérimental est calculé à partir de données, l'ajustement du modèle de variogramme aux points expérimentaux à l'aide des techniques d'interpolation géostatistique de krigeage ordinaire pour estimer les valeurs de la variable.

RockWork choisie en fonction automatiquement le meilleur modèle de variogramme selon meilleur corrélation, dans ce cas RockWork interpole par le modèle sphérique avec effet de pépité.

Le tableau suivant représente les résultats de calcul de variogramme.

Tab IV.3: paramètres de variogramme de la variable régionale FeT.

Variable régionalisés	Direction (°)	Tolérances (°)	Portée (m) (m)	Effet de Pépité (%)	Palier (%) ²	Modèle
FeT	45	20	170	2,5	61	Sphérique
	135	25	223	2,5	61	Sphérique

D'après les résultats des paramètres du variogramme, l'effet de trou semble être attribuable à une alternance entre des zones minéralisées et des zones stériles. Les pseudo-périodicités, mesurées par RockWorks, sont de 223 mètres dans la direction N135° et de 170 mètres dans la direction N45°. Cela suggère que la forme des karsts est lenticulaire figure 15.

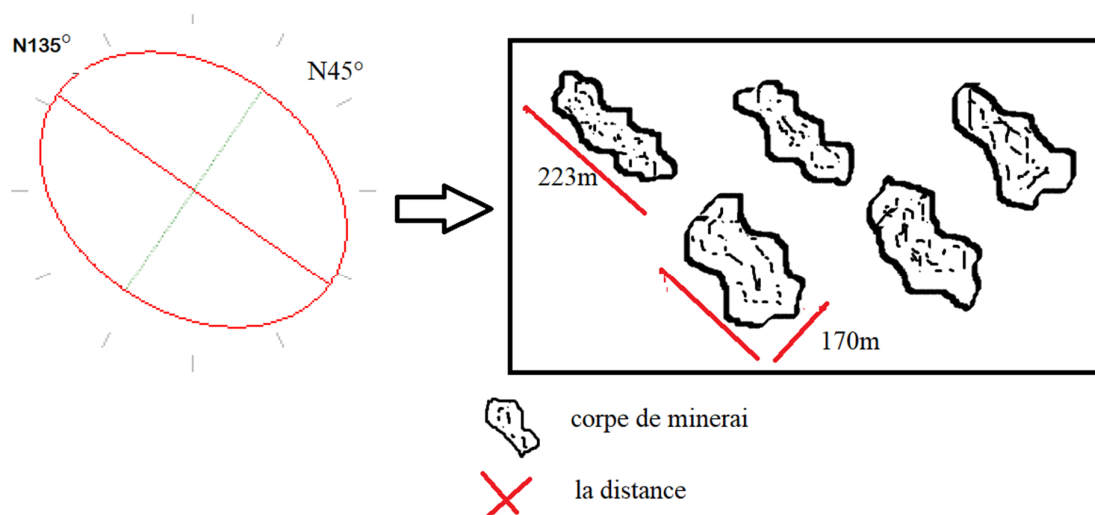


Fig IV.16 : Schéma illustrant la relation entre l'effet de trou et la morphologie des corps minéralisés

IV.2.3. Résultat d'estimation par krigeage ordinaire :

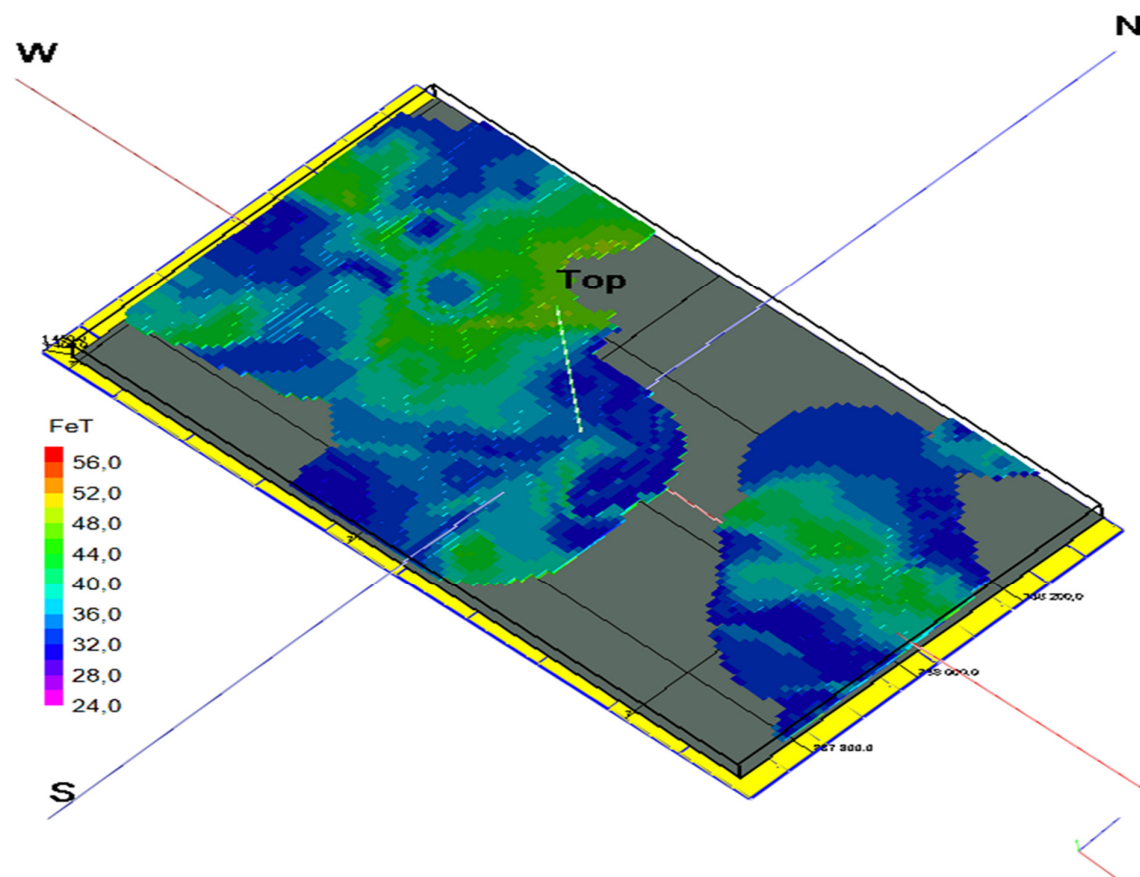


Fig IV.17 : estimation par krigeage les teneurs de fer totale FeT.

Figure 17 : représente une distribution des teneurs de fer totale par RockWork estimé par krigeage l'intervalle de (24-30) sont des argiles ferrugineuses et l'intervalle de (30-56) c'est le minerai de fer.

La quantité du minerai et calculé et donne une valeur de 7885576,6 tonnes.

Un écart significatif a été observé entre les ressources calculées par les deux méthodes, conventionnelle et géostatistique : 2,5 millions de tonnes de minerai estimées par la méthode des blocs géologiques, contre 7,8 millions de tonnes estimées par la méthode géostatistique de krigeage.

Pour corriger la surestimation due au krigeage, qui ne prend pas en compte la complexité géologique du gisement, il est nécessaire d'éliminer les volumes estimés par krigeage qui sont en réalité stériles. Afin de préciser l'estimation des ressources, il faut retirer les zones supposées minéralisées mais stériles situées entre les corps de minerai. Pour ce faire, nous utilisons le coefficient de minéralisation.

$$C_m = \frac{S_m}{S_t} \quad (5)$$

C_m : coefficient de minéralisation.

S_m : surface minéralisée.

S_t : surface totale du gisement.

- Dans le gisement d'Anini, le coefficient de minéralisation a été calculé et s'élève en moyenne à 0,30.
- La nouvelle quantité estimée après correction à l'aide de coefficient de minéralisation, sont égale 2365673 tonnes de minerai.
- Cette valeur est très proche la valeur obtenue par méthode conventionnelle.

IV.3. Conclusion :

L'estimation des réserves réalisée par l'ORGM à l'aide de la méthode conventionnelle indique 2,5 millions de tonnes de minerai. Selon l'analyse statistique des teneurs en FeT, la teneur moyenne est de 38 %. Le variogramme expérimental des teneurs en FeT dans les carottes de forages révèle que la morphologie des karsts est lenticulaire. La méthode géostatistique de krigeage estime la quantité de minerai à 7,8 millions de tonnes. Après correction de cette valeur en utilisant le coefficient de minéralisation, on obtient une estimation de 2,36 millions de tonnes, ce qui se rapproche de la valeur de l'ORGM. Cependant, cette correction n'est pas complète car les variations de la masse volumique ne sont pas prises en compte.

Conclusion générale

Le gisement d'Anini appartient à la série néritique d'âge Sénonien et quaternaire, influencé par trois systèmes de failles, notamment celui de direction N135° à N165°, important pour les minéralisations ferrugineuses. La minéralisation résulte du remplissage de fractures karstiques par des fluides hydrothermaux, comprenant principalement de l'hématite, de la goethite, et des sulfures.

L'ORGM a estimé les ressources à 2,5 millions de tonnes de minerai en utilisant la méthode conventionnelle des blocs géologiques. Les variogrammes expérimentaux ont révélé une anisotropie avec des directions principales N135° et N45°, et des pseudo-périodicités de 223 m et 170 m respectivement, suggérant une morphologie lenticulaire des karsts.

La méthode géostatistique de krigeage ordinaire a initialement estimé les ressources à 7,8 millions de tonnes, montrant un fort écart avec l'estimation conventionnelle. Cette surestimation est due à la non-prise en compte de la discontinuité de la minéralisation. Après correction avec le coefficient de minéralisation (0,30), les ressources ont été réévaluées à 2,36 millions de tonnes, une estimation proche de celle de l'ORGM. Cette estimation corrigée pourrait être encore affinée par une simulation des objets du gisement.

Références

- [1] : <https://fr.geoguy.org/blogs/5-methodes-devaluation-de-ressources-minieres-meconnues-avantages-et-inconvenients/>
- [2] : cour d'école polytechnique de Montréal chapitre 7
<https://cours.polymtl.ca/geo/marcotte/glq3401min/chapitre7.pdf>
- [3] : premier partie cours 5 : estimation des ressources par la méthodes conventionnelles / Université d'ingénierie canada
- [4] : Mémoire de projet de fin d'études Modélisation et évaluation des réserves géologiques du gisement de diatomite de Sig, Mascara. Ecole Nationale Polytechnique 2020
- [5] : <https://cours.polymtl.ca/geo/marcotte/glq3401min/chapitre7.pdf> Géostatistique et géologie minières Montréal
- [6] : https://elearn.univ-tlemcen.dz/pluginfile.php/110656/mod_resource/content/1/krigeage.pdf
- [7]: Rockware ,2021, " Manual of «Rockworks»", Manuel, 137p.
- [8] : thèse doctorat en sciences : caractérisation géologique et géostatique des petits gisements et indices ferrières du nord East algérien. Par ALIMAT-HALIMI FAHIMA 2019
- [9] : Article scientifique Janvier 2018 de professeur Mazghache Hamide /université Badji Mokhtar Annaba « estimation des ressources d'un gisement karstique par methode géostatistiques » p99