

ESTIMATION DES RESSOURCES D'UN GISEMENT KARSTIQUE PAR MÉTHODES GÉOSTATISTIQUES : CAS DU GISEMENT DE FER D'ANINI (NORD-EST ALGÉRIEN)

Fahima HALIMI * et Hamid MEZGHACHE *

RÉSUMÉ

L'estimation des ressources en minerai d'un gisement se fait à l'aide de plusieurs méthodes aussi bien conventionnelle que géostatistique. Le choix de la méthode dépend du type génétique et de la géométrie du gisement. Dans le cas de gisements karstiques, l'utilisation des méthodes aussi bien conventionnelles que géostatistiques présente des inconvénients majeurs dont il faudrait tenir compte pour optimiser les estimations. Ces méthodes ont été appliquées au gisement de fer d'Anini pour lequel une approche spécifique a été proposée.

Le gisement de fer d'Anini est situé dans la partie nord-orientale de la chaîne alpine de l'Algérie au nord de la ville de Sétif. Il est constitué de corps de minerais de forme karstiques et lenticulaires de direction N135°. La minéralisation ferrifère est constituée essentiellement d'hématite, de goethite et d'argile ferrugineuse. Le gisement a été exploré par 72 sondages carottés (2009-2011) par l'Office National de la Recherche Géologique et Minière - (ORGM).

Les échantillons de carottes ont été analysés sur fer total (FeT). L'estimation des ressources en fer a été faite à l'aide de méthodes conventionnelles par l'ORGM. Ces ressources ont été réestimées par méthode géostatistique de krigeage. En plus de l'anisotropie, la variographie a montré la présence d'effets de trou dans les deux principales directions d'anisotropie N135° et N45°. Les variogrammes directionnels dans ces deux directions ont été ajustés à l'aide d'un modèle sphérique de portées respectivement égales à 288m et 100m. La direction du grand axe d'anisotropie correspond à celle de la direction de la fracturation. Le grand écart entre les ressources estimées par les méthodes conventionnelles et celles obtenues par le krigeage est sûrement dû à la discontinuité de la minéralisation qui se reflète dans le variogramme par la présence d'effets de trou. Pour y remédier, il a été nécessaire d'utiliser le coefficient de minéralisation. Ceci a permis de réduire l'écart entre les deux estimations. Ainsi, pour optimiser l'estimation des ressources de minerais karstiques par méthodes géostatistiques, il est nécessaire de tenir compte du coefficient de minéralisation qui s'apparente à un coefficient de probabilité.

Mots-clés - Gisement de fer - Karst - Estimation géostatistique - Effet de trou - Coefficient de minéralisation.

* Laboratoire de Recherche de Géologie, Université Badji Mokhtar Annaba, BP. 12- Annaba – Algérie.
E-mail: linafahima@yahoo.fr , hamid.mezghache@yahoo.fr

- Manuscrit déposé le 19 décembre 2017, accepté après révision le 25 avril 2018.

ESTIMATION OF A KARSTIC DEPOSIT RESOURCES USING GEOSTATISTIC METHOD: THE CASE OF ANINI IRON DEPOSIT (NORTH - EAST ALGERIA)

ABSTRACT

The estimation of a deposit ore resources is made by means of several methods conventional or geostatistic. The choice of the one or the other method depends on the genetic type and the geometry of the deposit. In the case of karstic deposits, the use of both conventional and geostatistical methods have major inconveniences that should be taken into account to optimize the estimates. These methods have been applied to the Anini iron deposit for which a specific approach has been proposed.

The Anini iron ore deposit is located in the Northeastern part of the Alpine chain of Algeria in the North of Sétif. It consists of karstic and lenticular ore bodies of N135° direction. The iron mineralization is essentially consisted of hematite, goethite and ferruginous clay. The deposit was explored by 72 drill holes (2009-2011) by the Office National de la Recherche Géologique et Minière (ORGM). The samples of carrots were analyzed on total iron (FeT). The estimation of the iron resources was made by conventional methods by the ORGM. These resources have been re-estimated by geostatistical method of kriging. In addition to the anisotropy, the variography showed the presence of hole effects in the two directions of anisotropy - N135° and N45°. The directional variograms in these two directions were adjusted by means of a spherical model with range equal 288m and 100m. The direction of the major axis of anisotropy corresponds to the fracturing direction. The Large gap between resources estimated by conventional methods and those obtained by kriging is certainly caused by the discontinuity of the mineralization which is reflected in the variograms by the presence of effects of holes. To remedy this, it was necessary to use the coefficient of mineralization. This allowed reducing the gap between both estimations. So to optimize the estimation of the resources of karstic ores by geostatistical methods, it is necessary to take into account the coefficient of mineralization which is similar to a coefficient of probability.

Keywords - Iron deposit - Karst - Geostatistical estimation - Hole effect - Mineralization coefficient.

1. INTRODUCTION

L'estimation des ressources minières peut être faite à l'aide de plusieurs méthodes entre autres, les méthodes conventionnelles et les méthodes géostatistiques. Pour le gisement de fer karstique d'Anini, la méthode conventionnelle de blocs géologiques a été utilisée par Ouahioune et al. (2009-2011). Cette méthode consiste à délimiter les corps de minerais à l'aide de travaux miniers qui sont coûteux.

Les ressources en fer ont été réestimées par méthodes géostatistiques. Cette dernière est basée sur l'étude de la variographie de la variable régionalisée et le krigeage. En principe, l'estimation à l'aide de cette méthode est optimale car elle donne la variance d'estimation minimale.

Cependant, en présence d'effets de trou qui sont dus à une alternance de corps de minerais avec le stérile, la méthode géostatistique ne

tient pas compte de cette discontinuité qui se reflète par l'effet de trou.

Dans le présent travail une nouvelle approche est utilisée dans l'estimation des ressources par méthodes géostatistiques : elle consiste à inclure un coefficient de correction pour remédier à la discontinuité de la minéralisation.

2. CADRE GÉOLOGIQUE

Le gisement d'Anini est situé à une quarantaine de kilomètres au nord-ouest de la ville de Sétif, à 9 km à l'est-sud-est de la ville de Bougaa et au sud d'Aïn Roua (fig.1).

2. 1. Lithologie

Le Djebel Anini fait partie des unités composant l'ensemble allochtone sud-sétifien et il se présente sous forme d'anticlinal dont l'axe est orienté est-ouest (Glaçon, 1967; Kazi Tani, 1986; Popov, 1976; Vila, 1980; Slavko, 1968; Mikrichiane, 1978; ORGM, 1991; Ouztemzabet, 1994; Ouahioune et al. 2009-2011) (fig. 2).

Le cœur est formé par des calcaires massifs turoniens à pendage de 10° à 25° vers le sud (Bendali, 1989). Les dépôts qui constituent le gisement sont des sédiments de la série néritique d'âges sénonien et quaternaire (fig. 3).

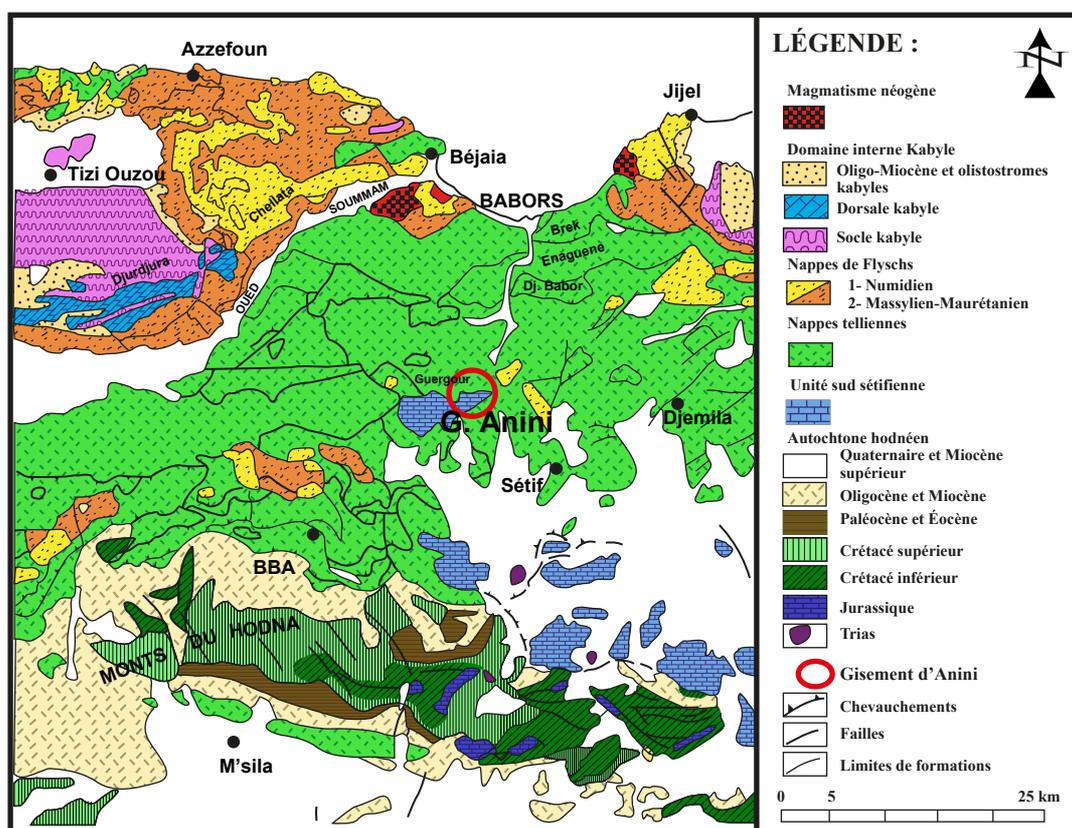
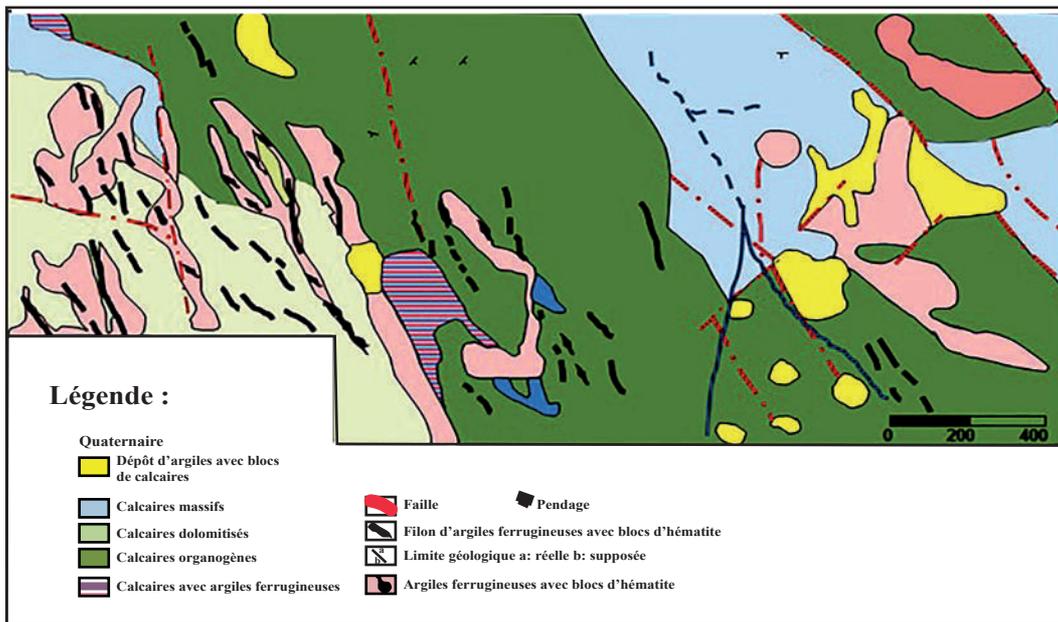
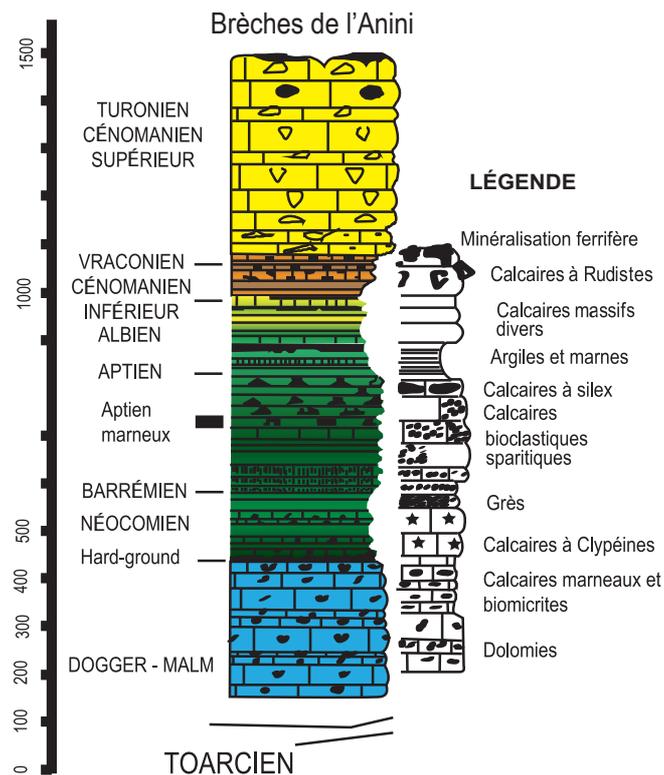


Fig. 1 - Carte structurale de la région nord orientale de la chaîne tellienne et situation du gisement d'Anini (d'après Wildi, 1983; simplifiée par Boutaleb, 2001).

Structural map of the northeastern region of the Tellian chain and location of the Anini deposit (Wildi 1983; simplified by Boutaleb, 2001).



**Fig. 2 - Carte géologique de la partie nord-est du gisement d'Anini (Ouahioune et al., 2009 et 2011).
Geological map of the Northeastern part of the Anini deposit (Ouahioune et al., 2009 and 2011).**



**Fig. 3 - Colonne lithostratigraphique de Djebel Anini et Guergour (Vila, 1980).
Lithostratigraphic column of Djebel Anini and Guergour (Vila, 1980).**

2. 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. 4) 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 (Outemzabet, 1994). 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°.

2. 3. Minéralisations

Le gisement de fer du Djebel Anini est constitué par une série de karsts de forme lenticulaire étirée dans la même direction que celle des failles NNO-SSE. Ces corps de minerais karstiques sont le résultat du remplissage des fractures et failles (figs. 5 et 6) par des solutions ferrugineuses. La minéralisation est

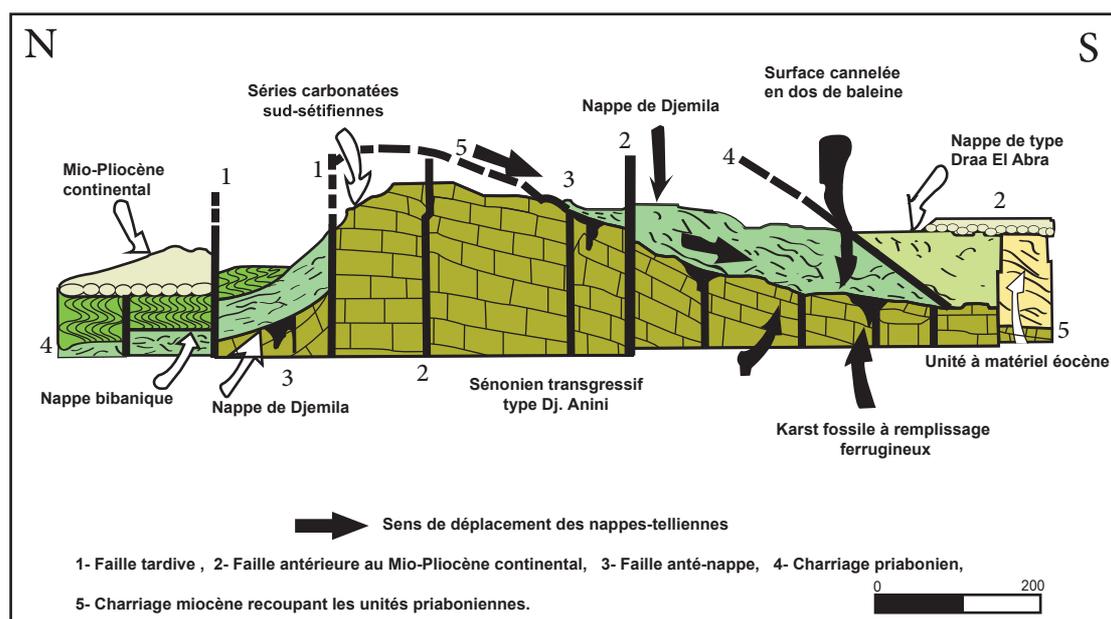


Fig. 4 - Coupe géologique simplifiée mettant en évidence les différents types d'accidents visibles dans le secteur des djebels Guergour et Anini (Vila, 1980).

Geological cross section showing major faults in Djebel Guergour and Anini sector (Vila, 1980).

encaissée dans les calcaires céno-mano-turo-niens, représentés par l'hématite, la goethite, l'hydrogoethite, les sulfures avec de la pyrite et marcasite, et les sulfates (barytine). Quant aux minéraux de gangue, ils sont constitués de calcite, dolomite et quartz. Les textures de minerai sont diverses (figs. 7, 8 et 9), parmi les plus importantes: la texture massive, col-

lomorphe (fig. 7), rubanée, alvéolaire (fig. 8), stalactites et stalagmites (fig. 9), géodique, tachetée et veinulée.

L'origine de la minéralisation est hydro-thermale (Bujakowska *et al.*, 1989). Cette minéralisation est le résultat du remplissage de fractures et de vides karstiques par les fluides



Fig. 5 - Filon de minerai de fer de direction NNO-SSE.

iron ore vein with NNW-SSE direction.



Fig. 6 - Karst de forme ovoïde à contour irrégulier.

karst with irregular shape.



Fig. 7 - Texture collomorphe.

Collomorphic texture.

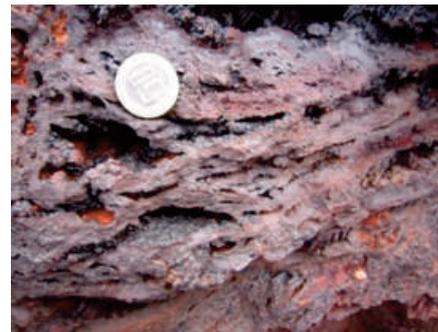


Fig. 8 - Texture alvéolaire.

Honeycomb texture.



Fig. 9 (a et b) Texture en stalactite et stalagmite.

(a and b) Stalactite and stalagmite texture.

hydrothermaux qui ont favorisé le dépôt de cette dernière.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES UTILISÉS POUR L'ESTIMATION DES RESSOURCES EN FER

La minéralisation ferrifère de Djebel Anini a été découverte au 19^{ème} siècle. Plusieurs travaux de recherche et de prospection ont été effectués dans cette région. Les premières cartes géologiques (Sétif-Bousselam) et études géologiques et minières détaillées ont été faites durant la période de 1909 à 1967 par Savornin et Glaçon. D'autres études géologiques ont été effectuées, plus tard, par Vila (1980) et Ouahioune et *al.* (2009 et 2011).

- La cartographie géologique à 1/1000 ainsi que les travaux de forage (31 forages) et d'échantillonnage ont été réalisés. Cinq zones minéralisées (I, II, III, IV et V) et 19 filons ont été localisés (fig.10). Les ressources des zones I et II ont été estimées par Ouahioune, et *al.* (2009).

- Quarante sondages carottés ont été réalisés (Ouahioune et *al.*, 2011). Un total de 264 échantillons de carottes ont été prélevés durant ces deux campagnes. Les échantillons de carottes ont été analysés par colorimétrie sur Fe_2O_3 et FeT.

Ceci a permis de localiser de nouveaux corps de minerai de fer désignés par A, B et F (fig. 10).

Les ressources de ces corps ainsi que celles des zones minéralisées III, IV et V (fig. 10) ont été estimées (Ouahioune et *al.*, 2011) (tabl. I).

4. MÉTHODES D'ESTIMATIONS UTILISÉES

Deux méthodes ont été utilisées pour l'estimation des ressources en fer : la méthode

conventionnelle de blocs géologiques et la méthode géostatistique de krigeage ordinaire. Les résultats permettront de vérifier l'efficacité de la méthode géostatistique de krigeage appliquée à ce type de gisements.

4. 1. Méthode conventionnelle - méthode des blocs géologiques

L'estimation des ressources minières consiste à donner un tonnage de minerai ou de métal à partir de la combinaison d'un certain nombre de données mesurées (sondages et échantillons). Il existe plusieurs méthodes, cependant, l'une des méthodes les plus utilisées est celle des blocs géologiques. Elle est basée sur le principe de la délimitation des blocs à partir des travaux de prospection et d'exploitation (tranchées, affleurements géologiques et sondages). Les ressources en minerai sont calculées pour chaque corps de minerai à l'aide de la formule suivante:

$$Q \text{ minerai} = SPD \quad (1) \quad \text{Où}$$

S est la surface du corps de minerai;

P est l'épaisseur du corps de minerai;

D est la masse volumique qui varie en fonction des teneurs dans le corps de minerai. Le contour du bloc doit correspondre à des limites naturelles de corps de minerai ou des lignes passant par des ouvrages miniers et/ou forages.

4. 2. Méthode géostatistique de krigeage ordinaire

Actuellement, l'estimation des ressources et réserves minières se fait essentiellement à l'aide de méthodes géostatistiques. Cette méthode est basée sur la théorie des variables régionalisées et des fonctions aléatoires (Matheron, 1971; Armstrong et Carignan, 1997;

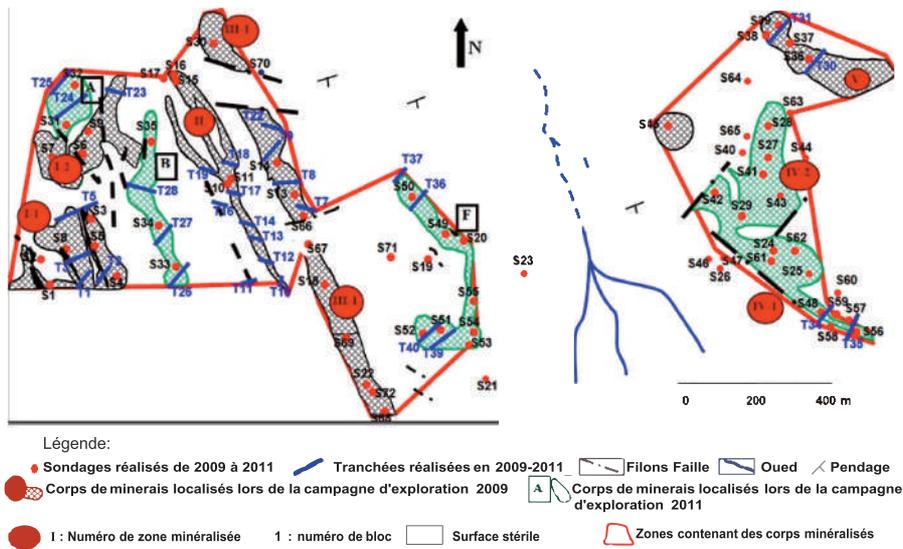


Fig. 10 - Délimitation des zones et corps de minerais établie par Ouahioune et al. (2009 et 2011).

Delimitation of ore bodies and zones established by Ouahioune and al. (2009 and 2011).

Journal et Huijbregts, 1978; Chauvet, 1999). Elle consiste à procéder à l'étude de la variabilité spatiale - variographie et l'utilisation des résultats de cette variographie pour minimiser les erreurs d'estimation.

a . Variographie

En géostatistique, toute estimation par krigeage passe par la quantification de l'auto-corrélation des variables régionalisées c'est-à-dire, par la fonction covariance ou celle du variogramme. L'expression mathématique du variogramme directionnel est :

$$\gamma(x,h) = 1/2 E [(Z(x)-Z(x+h))^2] \quad (2) \text{ où:}$$

Z (x) est la valeur au point x.

Z (x + h) est la valeur au point x + h.

Considérons que la variable régionalisée est stationnaire, on peut alors admettre que le variogramme $\gamma(x,h)$ ne dépend que du vecteur h (module et direction). Cette hypothèse rejoint en partie l'hypothèse de stationnarité et est appelée **Hypothèse intrinsèque**.

En pratique, on ne dispose que d'une seule réalisation $[Z(x+h)-Z(x)]$ mais ces hypothèses permettent d'avoir plusieurs couples et l'on peut calculer le variogramme expérimental.

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

- N(h) étant le nombre de couples expérimentaux $[Z(x)-Z(x+h)]$.

Selon l'existence ou non d'un palier et le comportement à l'origine, les variogrammes expérimentaux sont ajustés à l'aide de modèles théoriques (Chauvet, 1999), parmi lesquels les schémas à palier, schémas sans palier (fig. 11) et schémas à effet de tou (fig.12).

• Schéma à palier

Les formules mathématiques des principaux modèles théoriques à comportement linéaire à l'origine sont :

- sphérique (fig. 11a): $\gamma(h) = c [3/2 \frac{h}{a} - 1/2 (\frac{h}{a})^3]$ (4)

- exponentiel (fig. 11b): $\gamma(h) = c[1 - \exp(-\frac{h}{a})]$ (5)
- un comportement parabolique à l'origine
- gaussien (fig. 11c): $\gamma(h) = c[1 - \exp(-(\frac{h}{a})^2)]$ (6)

• Schéma sans palier

Pour les variogrammes sans paliers, on a:

$$\gamma(h) = 0 \quad \text{si } h=0$$

- Effet de pépite:

$$\gamma(h) = C_0 \quad \text{si } h>0$$

- Puissance (cas particulier : linéaire (fig.11d))

$$\gamma(h) = ch^\lambda \quad 0 < \lambda < 2 \quad \lambda = 1 \text{ linéaire (8)}$$

• Schéma à effet de trou

On dit qu'un variogramme $\gamma(h)$ présente un effet de trou si sa croissance n'est pas monotone (fig.12). Les graphes à effet de trou montrent une forme sinusoïdale au palier. L'effet de trou reflète une pseudo-périodicité de la variable régionalisée et qui est due à la présence d'alternance de zones riches et pauvres.

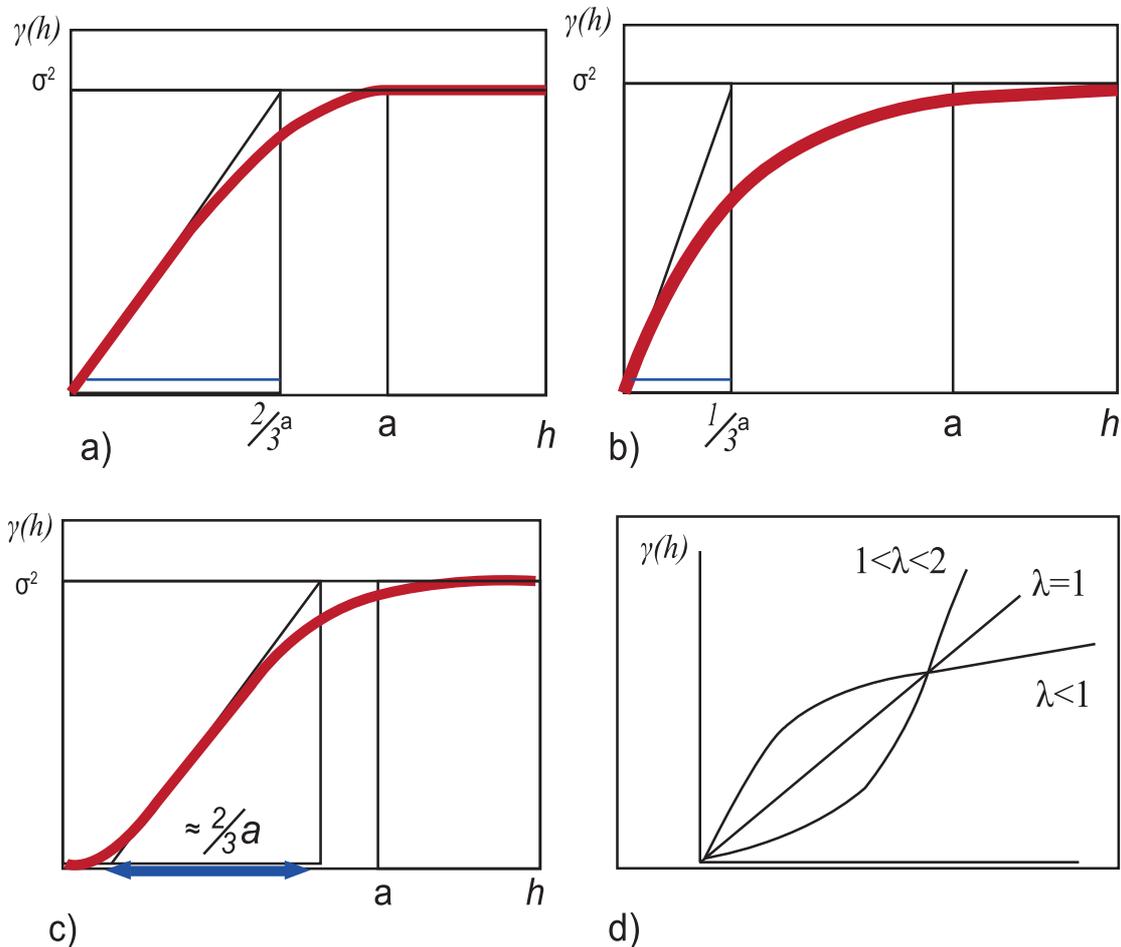


Fig.11- Schémas théoriques d'ajustement des variogrammes.

Theoretical diagrams of variograms adjustment.

Il peut être estimé par:

$$\gamma^*(h) = 1 - \frac{\sin(h)}{h}, \forall h > 0 \quad (9)$$

Dans le cas de gisement karstique, deux cas peuvent se présenter (fig.13):

- la pseudo-périodicité, en moyenne est régulière et reflète la morphologie sphérique des corps de minerais (fig. 13a);

-la pseudo-périodicité est irrégulière, elle varie selon les directions d'allongement des corps minéralisés et reflète la morphologie lenticulaire des karsts (fig. 13b).

- Variogramme de surface :

Il permet l'identification rapide d'un comportement anisotrope de la variable (Pannatier, 1996). La représentation de surface nécessite la segmentation de l'espace dans chacune des composantes h_x et h_y en un nombre d'inter-

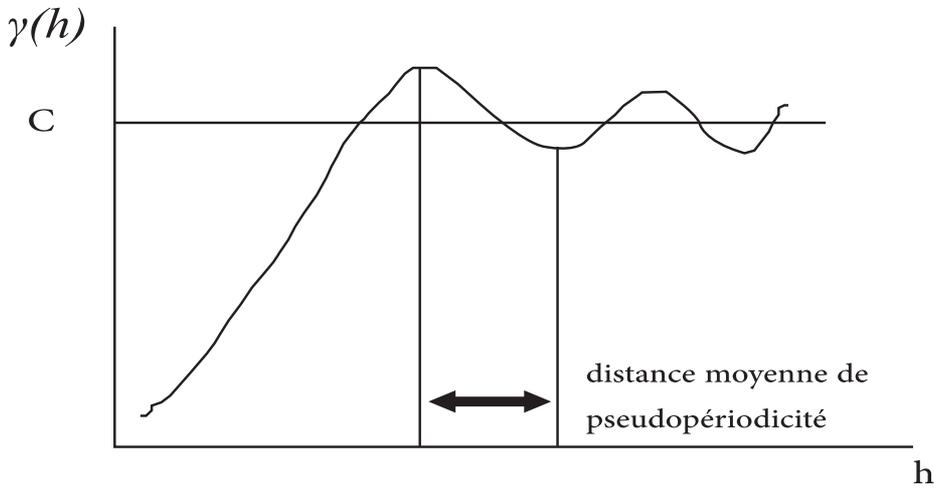


Fig. 12 - Schéma d'un variogramme à effet de trou.

Schematic of hole effect variogram.

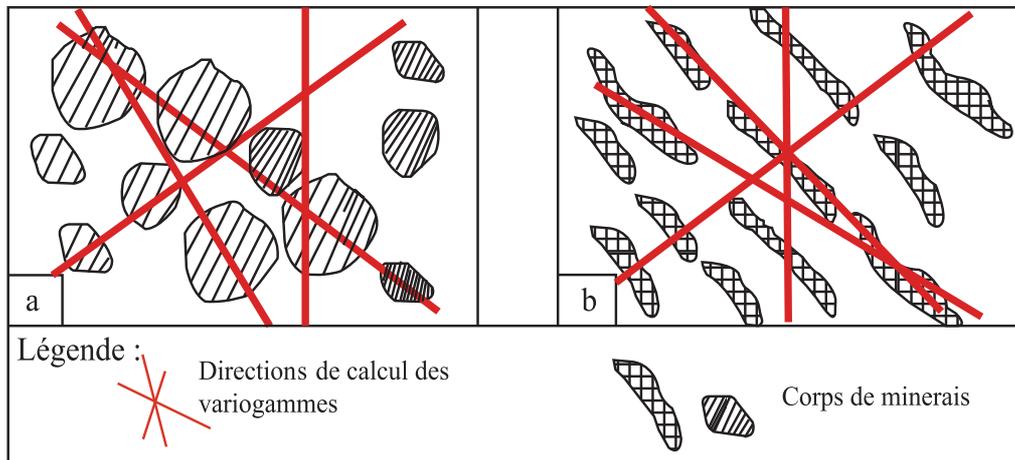


Fig. 13 – Différentes formes de minéralisation karstique.

Different forms of karst mineralization.

valles donné. Ceci aboutit à une discrétisation de la surface en un ensemble de mailles ou panneaux de couleurs différentes et qui sont fonction de la valeur du variogramme expérimental. Le nombre de couples est inscrit à l'intérieur du panneau. Étant donnée la symétrie du variogramme- $\gamma(h) = \gamma(-h)$ - la surface totale du champ ne peut être que symétrique.

b . Krigeage ordinaire

Le krigeage consiste à trouver le meilleur estimateur linéaire possible d'une variable régionalisée (V.R) d'un volume V à partir de l'information expérimentale implantée à l'intérieur ou à l'extérieur de V et d'une information structurale représentée par le variogramme (Journel et Huijbregts, 1978) (fig. 14).

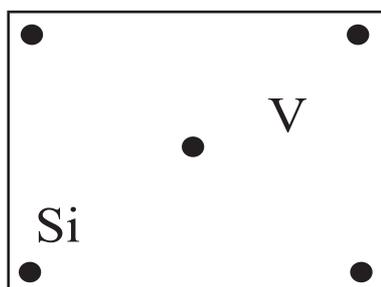


Fig. 14 – Dispositif de krigeage.
Kriging device.

Le système de krigeage est défini comme :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{\gamma}(v_i, v_j) + \mu = \bar{\gamma}(v_i, V) \quad i=1 \text{ to } n$$

$$i=1 \text{ to } n \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

Où μ : paramètre de lagrange, pondérateur de krigeage, la variance de krigeage ordinaire est donnée par :

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, V) + \mu \cdot \bar{\gamma}(V, V) \quad (11)$$

Propriétés et remarques à propos du krigeage:

1- C'est un système à N+1 équations à N+1 inconnues : Les N pondérateurs et μ paramètre de Lagrange.

2- Le krigeage est un estimateur linéaire sans biais, C'est un interpolateur exact.

3- Le système et la variance de krigeage rendent compte des 4 faits suivants :

a- de la géométrie du domaine à estimer- terme de $\bar{\gamma}(V, V)$;

b- de la géométrie entre estimant et estimateur- terme de $\bar{\gamma}(V, v_i)$.

c- de la géométrie interne de l'information- terme de $\bar{\gamma}(v_i, v_i)$

d- de la structure sous-jacente - terme de $\gamma(h)$.

5. RÉSULTATS

5.1. Estimation des ressources par méthodes conventionnelles

L'estimation des ressources par méthodes conventionnelles a été effectuée par Ouahioune et al. (2009 et 2011) à l'aide de la méthode de blocs géologiques. Les contours des blocs dégagés sont délimités en surface par les tranchées et affleurements géologiques (fig.10). En profondeur, ils ont été délimités par forages. La teneur moyenne minimale en fer total (FeT) pour l'estimation des ressources est de 25% et l'épaisseur minimale exploitable est de 3m. Les ressources en minerai ont été calculées pour chaque corps de minerai (tabl. I) à l'aide de (1) : $Q=S \times P \times D$.

Les ressources du gisement d'Anini ont été estimées à 2,5 millions de tonnes de minerai classées dans la catégorie C1 (tabl. I).

Tableau I - Récapitulatif des ressources en minerai de fer estimées par méthode conventionnelle
Ouahioune et al. (2009 et 2011).

Summary table of estimated iron ore resources using conventional method
Ouahioune and al. (2009 and 2011)

Zone m (fig.10)	Blocs (fig.10)	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 : Zone m (Fig.10) : zones minéralisées (*zone m (Fig.10): mineralized zones*), blocs (Fig.10): partie de la zone minéralisée (*Blocks (Fig.10): part of the mineralized zone*), O . M délimitant ou appartenant aux corps de minerais: Ouvrage Minier délimitant de minerais (*O . M . Delimiting or belonging to bodies of ores: Mining work delimiting the ore*), \bar{X} (%) : teneur moyenne en fer (\bar{X})% : *average iron content*), S (m²) : superficie des corps minéralisés (*S (m²): area of ore bodies*), \bar{P} (m): extension verticale moyenne (\bar{P}) (m): *mean vertical extent*, V: volumes, D (t/m³) : masse volumique (*V: volumes, D (t/m³): density*), Q Minerai (t) : quantité de minerai (*Q Ore (t): quantity of ore*).

5. 2. Estimation des ressources par méthode géostatistique

a. Choix de la variable régionalisée (PxD)

Les ressources en minerai d'un bloc V de surface S sont égales au produit $S \times P \times D$. Où S est la surface du corps de minerai (m^2), P est l'épaisseur du corps de minerai (m) et D: est la masse volumique (kg/m^3).

Dans le cas du minerai de fer d'Anini, l'épaisseur P du corps de minerai varie d'un sondage à un autre, c'est donc une variable régionalisée. Il en est de même pour la masse volumique D qui varie en fonction des teneurs, ainsi, au lieu d'utiliser les deux variables P et D séparément, il est préférable d'étudier le produit $P \times D$.

Dans le cas du gisement d'Anini, D n'a pas été mesurée systématiquement. Cependant, une étude statistique faite sur les valeurs des teneurs en fer total (FeT) et D, qui sont au nombre de 26 a permis d'établir une relation linéaire entre ces deux paramètres.

Le coefficient de corrélation linéaire simple (R) a été calculé et il est égal à 0,49, la corrélation est positive et significative. La droite de régression linéaire simple par la méthode des moindres carrés a été calculée.

$$D = 3,020 + 0,024 * FeT \quad (12)$$

Cette relation (12) a permis d'estimer D en fonction de FeT.

b. Variographie

Les variogrammes de surface et expérimentaux directionnels dans le plan horizontal de la variable régionalisée PD et des teneurs en FeT des carottes de forages ont été calculés et ajustés (tabl. II). Ils montrent une anisotropie où le grand axe a une direction N135° et le petit axe a une direction N45° (figs. 15, 16 et 17).

Les variogrammes de FeT et du produit montrent un effet de trou dans toutes les directions latérales. L'amplitude de l'effet de trou dans la direction du grand axe est de 280m

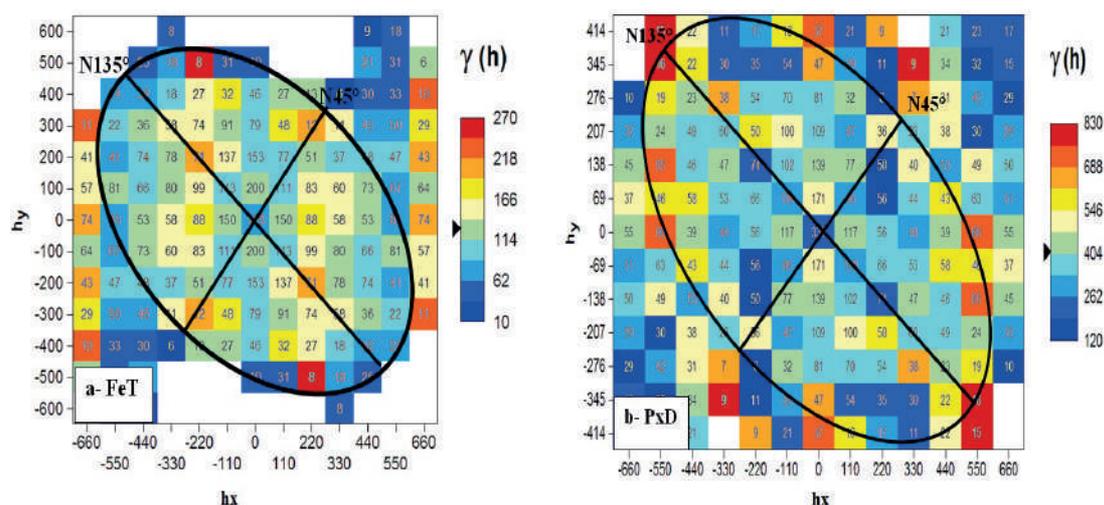


Fig. 15 - Variogrammes de surface des teneurs en FeT et de PxD.

Surface variograms of FeT and PxD contents.

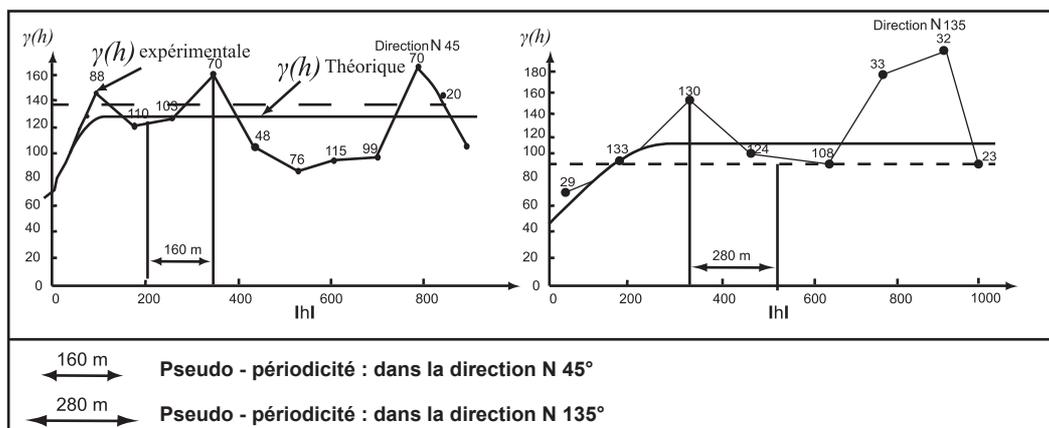


Fig. 16 - Variogrammes expérimentaux directionnels des teneurs en FeT et leurs ajustements.

Experimental directional variograms of FeT contents and their adjustments.

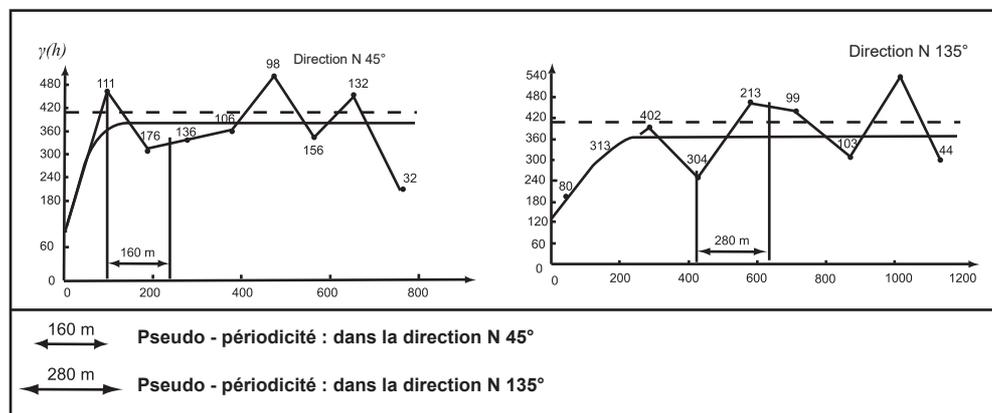


Fig. 17 - Variogrammes expérimentaux directionnels de PxD et leurs ajustements.

Experimental directional variogram of PxD and their adjustments.

Tableau II - Paramètres d'ajustement des variogrammes de FeT et de PxD.

FeT and PxD Variograms adjustment parameters.

Variable régionalisés	Direction (°)	Tolérances (°)	Portée (m)	Effet de Pépité	Palier (%) ²	Modèle
FeT	45	20	102	67,2	61	Sphérique
	135	25	286	47	61,1	Sphérique
PxD	45	20	100,3	94,3	287	Sphérique
	135	25	288	127,1	241,9	Sphérique

en moyenne et elle est de 160m en moyenne dans la direction du petit axe. Sur le plan géologique, l'effet de trou serait dû à une alternance de zone minéralisée et zone stérile. Les pseudo-périodicités ont été mesurées sur les graphes des variogrammes directionnels et de surfaces (figs. 15, 16 et 17). Elle est de 280m dans la direction N135° et égale à 160m dans la direction N45°. Les valeurs de pseudo-périodicité sont différentes suivant les directions. La forme des karsts est, donc, lenticulaire et ces valeurs de pseudo-périodicité représentent leurs longueurs et largeurs moyennes (fig. 18).

La quantité de minerai d'un bloc de surface 20x20 m est donc :

$$Q_{\text{mineral}} = (PxD)_{\text{krigé}} \times (20 \times 20)$$

Les ressources de l'ensemble des blocs krigés (tabl. IV) sont égales à 7,6 millions de tonnes de minerai.

c. Krigeage ordinaire - cartographie des résultats et estimation des ressources

Le Krigeage des teneurs en FeT et les valeurs du produit (PxD) des blocs de surface 20x20m a été effectué (tab. III). Les valeurs krigées et leurs variance ont été cartographiées (figs. 19, 20, 21 et 22).

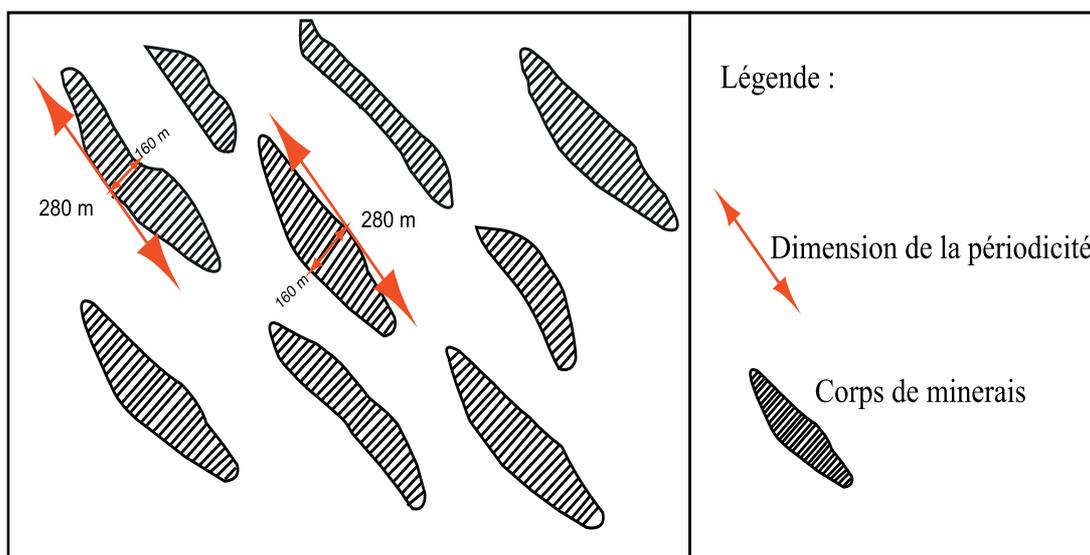


Fig. 18 – Schéma montrant la relation de l'effet de trou et la morphologie des corps de minerais.

Schema showing the relationship of the hole effect and the morphology of ore bodies.

Tableau III - Paramètre des blocs du krigeage de FeT et PxD.
FeT and PxD Kriging blocks parameters.

Axes	Minimum	Maximum	Dimension des blocs	Nombre de blocs
X	0	1300	20	65
Y	0	460	20	38

d. Validation croisée de krigeage faite. L'écart entre la valeur moyenne mesurée et la valeur moyenne estimée est égal à 0,10 t/m² (tabl. V).
 La validation croisée de krigeage a été

Tableau IV – Résultats de krigeage de FeT et PxD.

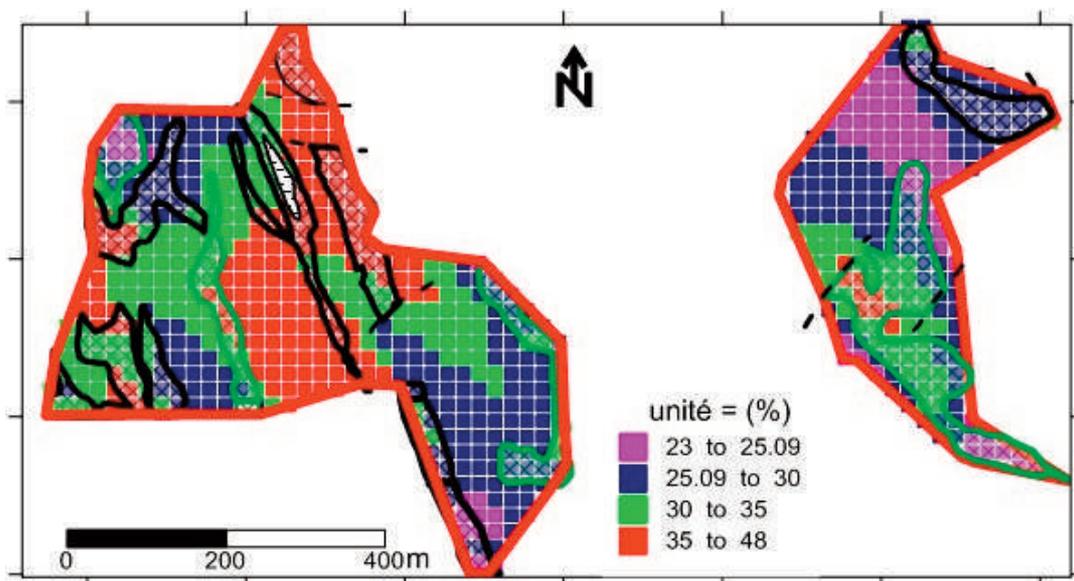
FeT and PxD Kriging results.

Teneur en FeT%			PxD t/m ²				Quantité minerais (tonnes)	
Classe de teneurs		Nombre de blocs N	Moyenne	Classe de valeurs N		Nombre de bloc N	Moyenne	
Min. M	ax			Min	Max			
23,00	25,09	75,00	23,23	4000	8000	260	17,69	1839760
25,09	30,00	290,00	27,80	8000	12000	310	23,88	2961120
30,00	35,00	208,00	32,50	12000	16000	102	33,70	1374960
35,00	48,00	174,00	39,26	16000	24400	75	47,55	1426500
		Total = 747	30,70			Total = 747	30,70	Total = 762340

Tableau V – Résultats de validation croisée de krigeage de PxD.

PxD Kriging cross validation results

Variable	Moyenne des valeurs mesurées (t/m ²)	Moyenne des valeurs estimées (t/m ²)	Erreur = (3)-(4) (t/m ²)	Nombre de données N
1	2	3	4	5
PxD	18,85	18,95	0,10	106,00



Légende :

- Corps de minerais localisés lors de la campagne d'exploration 2009
- Corps de minerais localisés lors de la campagne d'exploration 2011
- Superficie contenant des corps minéralisés Faille

Fig. 19 - Carte des teneurs krigées en FeT dans les blocs de surface 20X20 m².

Map of FeT kriged content in surface blocks of 20X20 m².

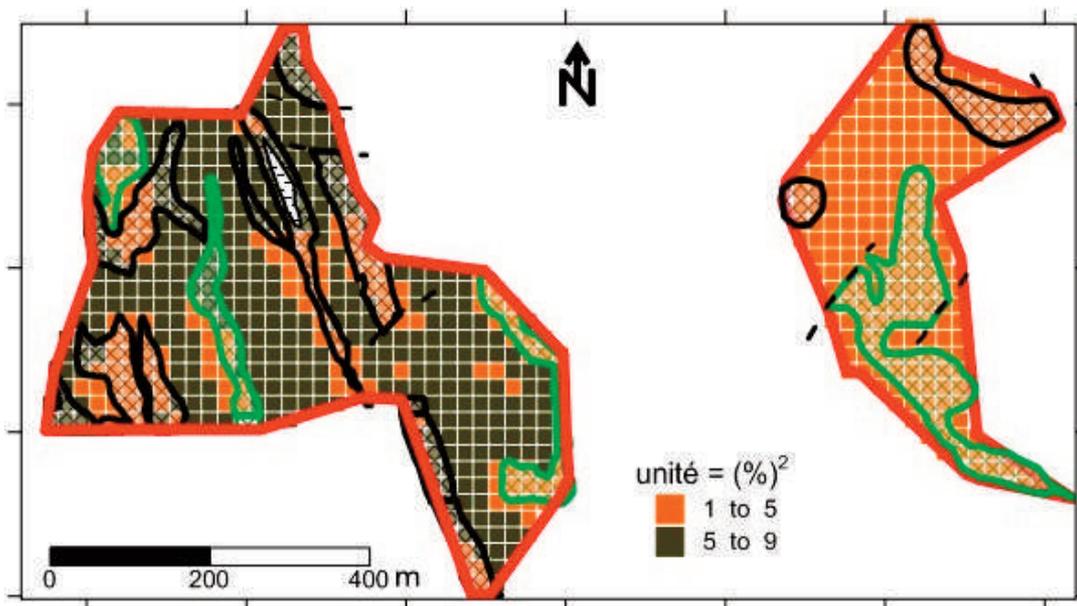


Fig. 20 - Carte des variances de krigage de FeT dans les blocs de surface 20X20 m²
(voir légende de fig.19).

Map of FeT kriging variances in surface blocks of 20X20 m² (see legend of fig.19).

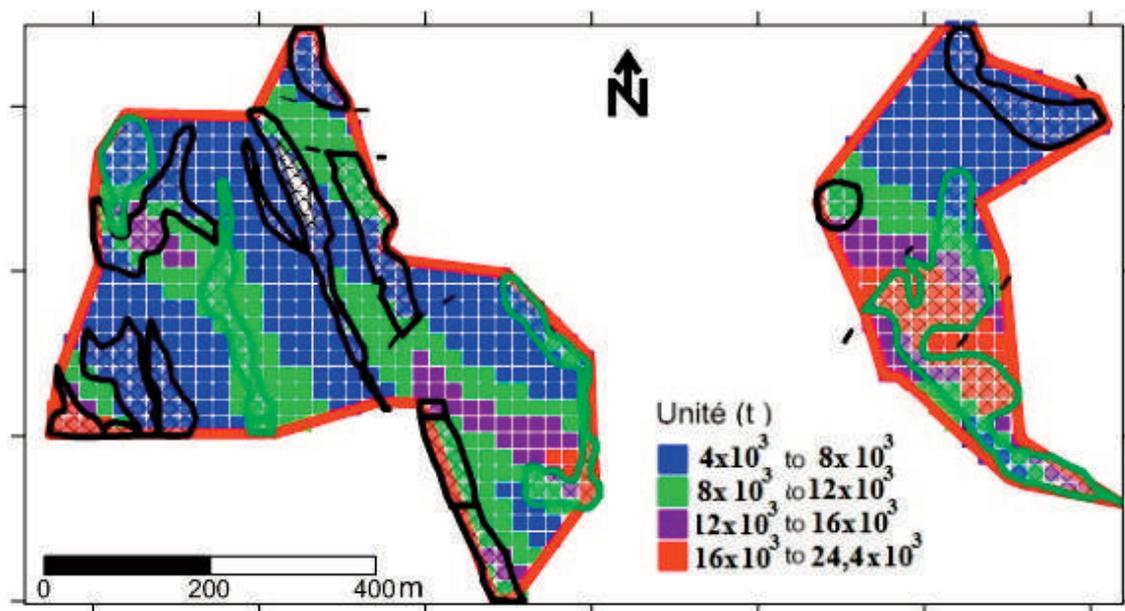


Fig. 21 - Carte du potentiel des ressources en FeT en tonne par unité de surface.
(voir légende de fig.19).

Map of the of FeT resources in potential ton per unit area (see legend of fig.19).

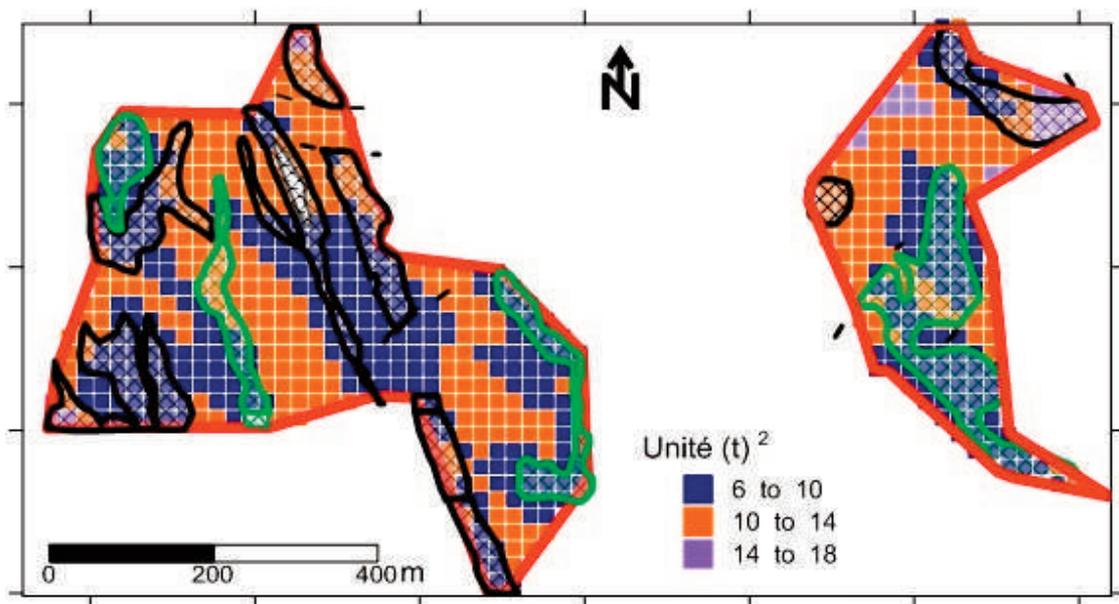


Fig. 22 - Carte des variances du potentiel en ressources dans les blocs de surface 20X20 m².
(voir légende de fig.19).

Map of resources potential variances in the blocks of 20X20 m² (see legend of fig.19)

6. DISCUSSIONS

Un grand écart a été noté entre les ressources calculées par les deux méthodes conventionnelle et géostatistique, à savoir, 2,5 millions de tonnes de minerais par la méthode de blocs géologiques contre 7,6 millions de tonnes de minerais par méthode géostatistique de krigeage.

Même en essayant de corriger par la variance d'estimation (tabl. V), il en ressort que quelle que soit la valeur de la variance d'estimation petite ou grande, il existe une surestimation. Cette dernière est due au fait que le krigeage ne tient pas compte de la discontinuité de la minéralisation qui est reflétée dans le variogramme (h) par l'effet de trou : des surfaces-volumes ont été estimés par krigeage par simple extrapolation alors qu'ils sont stériles d'après les données de prospection. Afin de préciser l'estimation des ressources par méthode géostatistique, il faut éliminer les surfaces supposées minéralisées alors qu'elles sont stériles et celles qui se trouvent entre les corps de minerais délimités par les travaux de

prospection effectués entre 2009 et 2011. Pour cela, il a été fait appel au coefficient de minéralisation. Ce coefficient est égal au rapport de la surface minéralisée sur la surface totale :

$$C_m = \frac{S_m}{S_t} \quad (13) \quad \text{Où:}$$

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 est égal en moyenne à 0,30. Les ressources de ce gisement, estimées à l'aide de la méthode géostatistique de krigeage et après correction par ce coefficient de minéralisation (tabl. VI), sont égales à 2,28 millions de tonnes de minerais. Cette quantité est très proche de celle obtenue par la méthode conventionnelle. Cependant, cette façon de faire ne corrige pas totalement cette surestimation puisque les variations de la masse volumique ne sont pas prises en considération.

Tableau VI – Comparatif de l'effet de la prise en compte des variances et du coefficient de minéralisation.

Comparative table of variances and mineralization coefficient inclusion effect.

Q. minerais (Tonnes)	Q. minimale en minerais (Tonnes)	Q. maximale en minerais (Tonnes)	$\overline{C_m}$ Coefficient de minéralisation	Q. minerais corrigée (Tonnes)
7602340	4541956	10672633	0,30	2280702

Légende: **Q. minerais** : Quantité de minerais calculée par krigeage en tonne (*Q. ores: ore quantity calculated by kriging in tons*); **Q. minimale en minerais** : Quantité de minerais calculée par krigeage en tenant compte des variances minimales en tonne (*Q. Minimal ore : ore quantity calculated by kriging taking into account minimum variances in tons*); **Q. maximale en minerais** : Quantité de minerais calculée par krigeage en tenant compte des variances maximales en tonne (*Q. Maximal ores : ore quantity calculated by kriging taking into account maximal variances in tons*); **Q. minerais corrigée** : Quantité de minerais calculée par krigeage multipliée par le coefficient de minéralisation (*Q. Corrected ore : ore quantity calculated by kriging multiplied by mineralization coefficient*).

7. CONCLUSIONS

Les ressources estimées par l'ORGM à l'aide de la méthode conventionnelle de blocs géologiques étaient de 2,5 millions de tonnes de minerai classées dans la catégorie C1. Les variogrammes expérimentaux de surface et directionnels du produit PxD et des teneurs en FeT dans les carottes de forages, ont été calculés. Ces derniers ont été ajustés à l'aide de modèles théoriques. Les variogrammes montrent une anisotropie où le grand axe a une direction N135° et le petit axe a une direction N45°. L'effet de trou est visible dans toutes les directions. La pseudopériodicité est de 280 m dans la direction N135° et de 160 m dans la direction N45°. Ces valeurs de pseudopériodicité n'étant pas les mêmes, la forme des karsts est donc lenticulaire. Ces valeurs représentent les dimensions moyennes de ces karsts.

La quantité de minerais a été estimée, dans un premier temps, par la méthode géostatistique de krigeage à 7,6 millions de tonnes. La validation croisée de krigeage a été faite. Elle a permis de déduire un écart moyen égal à 0,10 (t/m²) entre la valeur moyenne mesurée et la valeur moyenne estimée. Il est à noter une surestimation par la méthode géostatistique de krigeage qui est due principalement au fait que la discontinuité de la minéralisation reflétée par l'effet de trou sur les variogrammes, n'a pas été prise en compte. Pour y remédier au moins partiellement, il était nécessaire d'éliminer les surfaces supposées minéralisées alors qu'elles sont stériles et qui se trouvent entre les corps de minerais délimités par les travaux de prospection.

Pour cela, il a été fait appel à une correction des ressources estimées par méthodes géostatistiques à l'aide du coefficient de minéralisation. Après correction, ces ressources ont été estimées à 2,28 millions de tonnes de minerais. Cette dernière quantité est très proche de

celle obtenue par la méthode conventionnelle. Cependant, cette façon de faire ne corrige pas totalement la surestimation puisque les variations de la masse volumique ne sont pas entièrement prises en considération. Cette estimation corrigée peut être complétée par une simulation objet du gisement.

RÉFÉRENCES

- ARMSTRONG, M. ET CARIGNAN, J. 1997.** Géostatistique linéaire, application minière. *Les Presses de l'École des Mines Paris*, 115 p.
- BENDALI, M. 1989.** Rapport sur les travaux géologiques effectués au Djebel Anini en 1989. *Rapport inédit, EREM*.
- BOUTALEB, A. 2001.** Les minéralisations à Pb-Zn du domaine Sétifien-Hodna : gîtologie, pétrographie des dolomies, microthermométrie et implication métallogéniques. *Thèse de Doctorat d'État, USTHB (Alger)*, 400 p.
- BUJAKOWSKA, K., MODLINSKI, Z., KHARNENE, A. ET SOKOTOWSKI, A. 1989.** Résultats de la prospection du minerai de fer effectuée en Djebel Hellel et Djebel Anini. *Rapport inédit d'EREM*, 30 p.
- CHAUVET, P. 1999.** Aide mémoire de géostatistique linéaire application du domaine minier. *Les Presses de l'École des Mines de Paris*, 140 p.
- GLAÇON, J. 1967.** Recherche sur la géologie et gîtes métallifères du Tell sétifien. *Publ. Serv. Géol. Algérie*, bulletin n°32, 751 p.
- JOURNAL, A.-G AND HUIJBREGTS, CH.-J. 1978.** Mining geostatistics. *Academic Press, London, U. K*, 600 p.

- KAZI-TANI, N . 1986.** Évolution géodynamique de la bordure nord Africaine: Domaine intraplaque algérien: Approche méga séquentielle. *Thèse du Troisième Cycle, Université de Pau*, 881 p.
- MATHERON, G .1971.** The theory of regionalized variables and its applications. The specifications CMM5. *Paris ENSMP*, 212 p.
- MIKRICHIANE, G., VOLSKY, Z., KOUKOUCHKINE, D. ET PAKHMOURNT, J. 1977-1978.** Rapport sur les travaux de recherche au 1/50 000 réalisés par l'équipe de Sétif à la surface de la feuille « Aïn Roua » (N° 69). *Rapport inédit, SONAREM*.
- ORGM. 1991.** Rapport sur les résultats de la prospection du gisement de Fer Djebel Anini (avec calcul de réserves). *Division de Tizi Ouzou, rapport inédit*. 100 p.
- OUAHIOUNE, A.-E.-K., TOUCHAL, T. ET BOUSSAID, F. 2009.** Rapport Final sur les travaux de prospection réalisés sur le gisement de fer de Dj. Anini. *Rapport inédit, ORGM*, 76 p.
- OUAHIOUNE, A.-E.-K., TOUCHAL, T. ET BOUSSAID, F. 2011.** Sur les travaux de prospection complémentaire réalisés en 2011 pour la détermination des potentialités du gisement de fer de Djebel Anini, wilaya de Sétif. *Rapport inédit, ORGM*, 67 p.
- OUTEMZABET, L. 1994.** Rapport final sur les travaux de prospection réalisés sur les secteurs de Kef Semmah, Aïn Sedjra, Dj. Hellel, Boukhdéma, Aïn Roua et Aïn-El-Hamra. *Rapport inédit ORGM*, 110 p.
- PANNATIER, Y . 1996.** Variowin software for spatial data analysis in 2D. Springer verlag, 91p. ISBN 0-387-94679-9 Popov, A. 1976. Les gisements de fer en Algérie. *Rapport inédit, SONAREM*, pp. 83-89.
- SLAVKO, P. ET REGUIBI, A. 1968.** Rapport sur le minerai de Fer du Djebel Anini. Proposition de recherche. *Rapport inédit, SONAREM*, 56 p.
- VILA, J.- M. 1980.** La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. *Thèse de Doctorat. Es Sciences, Univ. Paris VI*, 628 p.
- WILDI, W. 1983.** Chaîne tello-rifaine (Algérie Maroc-Tunisie): structure et évolution stratigraphique du Trias au Miocène. *Rev. de Géol. Dynamique. et Géog. Phys, vol. 24, édition spéciale*, pp. 201-297.