

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

Département Génie Minier

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Thèse de Magister

Présentée par : Ahcène BENAMGHAR

Ingénieur d'état, diplômé de l'ENPA.

CONTRIBUTION A L'ETUDE GEOSTATISTIQUE DU GISEMENT DE ZINC ET DE SOUFRE PYRITEUX DE CHABET EL HAMRA (SETIF)

Soutenue le 06 juillet 1995. devant le jury composé de MM :

S. GUERRAK

Docteur d'état (Ministère des Mines).

Président

A. OUABDESSELAM

Chargé de cours ENPA.

Co-Rapporteur.

Ph. SONNET

Professeur, UCL (Belgique).

Rapporteur.

A. BOUFASSA

Dr es Sc. ORGM.

Examineur

LAMRAOUI

Chargé de cours, ENPA.

Examineur.

CHABOU

Dr en géologie ENPA

Examineur

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE GÉOSTATISTIQUE DU GISEMENT DE CHABET EL HAMRA (SETIF).

Résumé.
A. BENAMGHAR

خدا هبة :
لقد تم استكشاف منجم شعبة الحمراء (سليق) للزنك (Zn) والكبريت البيريتي
عن طريق أسبار سطحية عمودية.
فتعرفنا من خلال هذه الدراسة لتحليل نتائج هذه العملية وذلك بإحصاء لبيحة
وسلوك تغير نسبة الزنك والكبريت بتغير مواقعها في مساحة المنجم.
لقد أسفر هذا التطبيق في الأخير عن حساب لكمية الموارد الضام المحتملة وكذا
توزيعها ومقاديرها كلما حددت نسبة المعدن ذات المرادود الموجب.

Abstract :

The Chabet El Hamra ore body (Setif) has been explored for Zinc and pyrite Sulphur by mean of vertical drill holes. The mining industries made a habit to evaluate the in situ reserves using classical methods. But in this study we have dealt by a more efficient one, the geostatistical process, where the spatial variability of parameters is widely considered.

The results obtained at last are the quantity of reserves estimated, their spatial distribution and the grade tonnage curves.

Résumé :

Le gisement de Chabet El Hamra (Setif) a fait l'objet d'une exploration minière du Zinc et du Soufre pyriteux par sondages verticaux.

Dans le présent travail on a procédé à la modélisation de la variabilité spatiale de la teneur par le moyen d'une étude géostatistique. A partir de cette modélisation on a procédé à l'estimation des réserves in situ et de leur répartition dans le gisement. Ceci nous a permis de calculer les courbes tonnage teneur correspondantes.

Remerciements

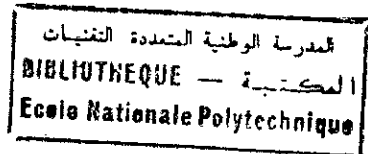
Je voudrais, tout d'abord, remercier vivement le Professeur Ph. SONNET pour avoir dirigé mon travail. Qu'il me soit permis de lui exprimer ma très sincère reconnaissance pour les conseils qu'il a bien voulu me prodiguer.

Je tiens également à remercier Monsieur le Professeur S. GUERRAK pour avoir accepté la présidence du jury.

Je n'oublierai pas d'exprimer mes vifs remerciements à l'ensemble des enseignants du département Génie minier, en particulier à MM A. Ait YAHIAÏTEN, A. OUABDESSELAM et Melle BOUMBAR.

Je présente également ma gratitude à tous les fonctionnaires de l'ENP qui ont contribué à nous faciliter le travail, précisément Salah, Karim, Abdelkrim de la bibliothèque, ainsi que Hassen et Abdelhadi du centre de calcul.

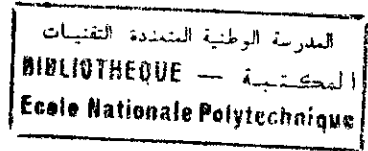
SOMMAIRE



BIBLIOGRAPHIE	1
1. INTRODUCTION	3
2. GEOLOGIE DU GISEMENT	5
2. 1. HISTORIQUE.....	5
2. 2. CONTEXTE GEOLOGIQUE GENERAL.....	6
2. 3. STRUCTURE DU GISEMENT.....	7
2. 4. LES ACCIDENTS CASSANTS.....	7
2. 5. MORPHOLOGIE ET MODE DE GISEMENT DES CORPS DE MINERAL.....	9
2. 6. COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MINERAIS.....	12
3. GEOSTATISTIQUE - APPROCHE THEORIQUE	13
3. 1. ETUDE D'UN EXEMPLE.....	13
3. 2. LA GEOSTATISTIQUE.....	14
3. 2. 1. HYPOTHESE DE STATIONNARITE.....	15
3. 2. 2. MOMENTS ET STATIONNARITE.....	16
3. 2. 2. 1. Moment d'ordre 1 ou espérance mathématique.....	16
3. 2. 2. 2. Moment d'ordre 2.....	17
3. 2. 3. HYPOTHESE INTRINSEQUE.....	18
3. 2. 4. LA GEOSTATISTIQUE EN PRATIQUE.....	19
3. 2. 4. 1. PROPRIETES DU VARIOGRAMME.....	20
3. 2. 4. 2. COMPORTEMENT DE $\gamma(h)$ A L'ORIGINE.....	21
3. 2. 4. 3. COMPORTEMENTS DE $\gamma(h)$ AUX GRANDES DISTANCES.....	21
3. 2. 4. 4. Variogrammes théoriques.....	22
3. 2. 4. 5. Aspect quantitatif du variogramme.....	23
3. 2. 4. 6. Les grandes lignes d'une étude géostatistique.....	26
4. CRITIQUE DES DONNEES ET ETUDE STATISTIQUE	28
4. 1. CRITIQUE DE DONNEES.....	28
4. 2. PROBLEME DE L'AIRES DE TRAVAIL ET CHOIX DES VARIABLES.....	30
4. 3. ETUDE STATISTIQUE DES VARIABLES REGIONALISEES.....	33

4. 3. 1. ESQUISSE ET APPRECIATION GRAPHIQUE DES DONNEES.....	33
4. 3. 1. 1. Distribution géographique de la Puissance de la couche C1.....	34
4. 3. 1. 2 Distribution géographique de la teneur en Zinc.....	35
4. 3. 1. 3. Distribution géographique de la teneur en Soufre Pyriteux.....	35
4. 3. 2. ETUDE STATISTIQUE DES VARIABLES DE TRAVAIL.....	36
4. 3. 2. 1. Variabilité de la Puissance de la couche C1.....	36
4. 3. 2. 2. Variabilité de l'accumulation en Zinc dans C1.....	39
4.3.2.3 Variabilité de l'accumulation en Soufre dans C1.....	41
5. <i>ETUDE VARIOGRAPHIQUE DES VARIABLES</i>	43
5. 1. VARIOGRAMME DE LA VARIABLE PUISSANCE.....	44
5. 2. VARIOGRAMME DE LA VARIABLE AccZn.....	50
5. 3. VARIOGRAMME DE LA VARIABLE AccS.....	52
6. <i>KRIGEAGE ET ESTIMATION GLOBAL DES RESERVES</i>	54
6. 1. KRIGEAGE D'UNITES MINIERES.....	54
6. 1. 1. KRIGEAGE DE LA PUISSANCE MINERALISEE.....	57
6. 1. 2. KRIGEAGE DE L'ACCUMULATION EN ZINC.....	59
6. 1. 3. KRIGEAGE DE L'ACCUMULATION EN SOUFRE.....	59
6. 2. <i>ESTIMATION DES RESERVES</i>	67
6. 2. 1. ESTIMATION DE LA SURFACE MINERALISEE S*.....	67
6. 2. 2. ESTIMATION DE LA PUISSANCE MINERALISEE.....	68
6. 2. 3. ESTIMATION DU TONNAGE DE MINERAI T.....	69
6. 2. 4. ESTIMATION DE LA TENEUR MINERALISEE t.....	70
6. 2. 5. ESTIMATION DE LA QUANTITE DE METAL Q.....	71
6. 2. 6. PRECISION D'ESTIMATION.....	72
6. 2. 7. COURBE TONNAGE TENEUR.....	73
7. <i>CONCLUSION</i>	79
NOTATIONS.....	81
LISTE DES FIGURES.....	82
LISTE DES TABLEAUX.....	83

Bibliographie.



- [1] **A. CHENNAF et al, 1992.**
Rapport ORGM, Rapport final sur les travaux d'évaluation du gisement de Chabet el Hamra avec calcul des réserves au 01 / 01 / 92.
- [2] **M. DAVID, 1977.**
Geostatistical ore reserve estimation (364p). édition: Esevier Scientific Publishing Company.
- [3] **A.G. JOURNEL et CH. J. HUIJBREGTS, 1978.**
Mining geostatistics.(600 p). édition Academic Press, Inc.
- [4] **Abwyn. E. ANNELS, 1991.**
Mineral deposit evaluation, a practical approach. fst ed. 1991(436 p). édition Chapman & Hall.
- [5] **E. H. ISSAKS et R.M. SRIVASTAVA, 1989.**
Applied geostatistics. (561 p) édition Oxford University Press.
- [6] **M DAVID, 1988.**
Hand book of applied advanced geostatistical ore reserve estimation. (216 p). édition: Esevier Scientific Publishing Company.
- [7] **P. DELFINER, 1979.**
Basic introduction to geostatistics (150 p).
- [8] **G. MATHERON et M. ARMSTRONG, 1987.**
Geostatistical case studies (248 p). édition D. Reidel Publishing Company.
- [9] **M. DAVID.**
Geostatistical ore estimation. A step by step case study. CIM special volume N°12. p 42- 48.
- [10] Etude geostatistique du gisement KEF ES SENNOUN, 2° partie.
- [11] **I. CLARK, 1979.**
Practical geostatistics, (129 p). édition Applied Science Publishers Ltd.
- [12] **P. A. DOWD, 1988.**
Practical aspects of applying geostatistics in stratigraphic ore bodies.
- [13] **M.DEVENCHEZE, J.LRIZZOLI, 1976.**
Valorisation des données issues de la reconnaissance détaillée des gisements de sables et graviers alluvionnaires. Thèse de Docteur ingénieur, Ecole des Mines de Paris.

- [14] **M DEVEUGHELE, J.M. USSEGLIO POLATERA. ENSMP.**

Utilisation de la théorie des variables régionalisées pour l'interprétation cartographique des données géotechniques dispersées. Bulletin de l'AIGI, n°19 pp49-55.

- [15] **D.E. MYERS, 1989**

To be or not to be... Stationary? That is the question. *Mathematical geology*, vol 21, n°3.

- [16] **A.G. JOURNEL, M.E. ROSSI.**

When do we need a trend model?

- [17] **R. MOHAN SRIVASTAVA, H.M. PARKER, 1989.**

Robust measures of spatial continuity. M. Armstrong(ed), *Geostatistics*, vol. 1, pp295-308.

- [18] **B.E. BUXTON.**

An application of the construction of confidence intervals for global recoverable reserve estimates.

- [19] **D.E. MYERS.**

On variogram estimation.

- [20] **R.M. SRIVASTAVA, 1987.**

Minimum variance or maximum profitability?. *CIM Bulletin*, Mai 1987 pp 63-68.

- [21] **A. BOUFASSA, M. ARMSTRONG, 1989.**

Comparison between different kriging estimators. *Mathematical Geology*, vol 21, n°3, 1989.

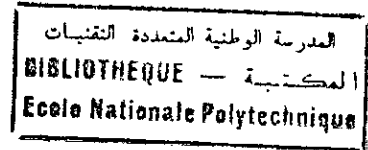
- [23] **G. MATHERON, 1965.**

Les variables régionalisées et leur estimation. édition Masson, Paris.

Programmes informatiques.

- [22] **GEO-EAS**. v 1.2.1(Geostatistical Environmental Assessment Software).
- [24] **Geostatistical TOOLBOX**. v 1.3.
- [25] **GSLIB** 1992, (Geostatistical Software Library).
- [26] **SURFER**. v 4.
- [27] **GRAPHER**.
- [28] **COREL DRAW**.
- [29] **LAHEY FORTRAN**.
- [30] **EXCEL**

1 INTRODUCTION



Durant ces dernières décennies, l'industrie a connu une forte augmentation de la demande en produits finis. Plusieurs facteurs sont à l'origine de ce phénomène.

Effectivement depuis la fin de la seconde guerre, le Monde a connu une détente sur tous les plans. Il en est résulté une croissance démographique considérable, et par suite, une augmentation de la consommation; l'évolution spectaculaire de la science a pour sa part aboutit à la découverte de processus de fabrication originaux qui ont, par conséquent, ouvert de nouveaux horizons de production. Les secteurs de base de l'industrie de la matière première, en particulier l'industrie minérale, ont du faire recours à de nouveaux processus de production, en somme à une politique plus réaliste.

Ainsi les matières premières minérales, en particulier, sont devenues de plus en plus précieuses. Ce qui a fait que la teneur payante, ou teneur de coupure, a constamment changé. Ainsi des gisement jugés autrefois inexploitable car non rentable, sont devenus payants.

La théorie de la variable régionalisée, communément appelée géostatistique, est apparue durant les années soixante. Elle a été, progressivement, très bien adaptée à l'étude et à la recherche dans le secteur minier.

De nombreux cas pratiques ont démontré sa grande souplesse et son utilité dans le contexte général décrit ci dessus.

En effet, à partir des seuls prélèvements effectués sur un gisement donné, cette méthode mathématique arrive à déterminer la structure de variabilité du phénomène, résumée dans l'outil variogramme.

Au moyen de cette représentation numérique, la géostatistique nous procure la possibilité d'avoir une vue générale sur le gisement, c'est à dire nous donne un ordre de grandeur du phénomène en chaque point ou en ensemble de points qui n'ont pas été nécessairement échantillonnés.

Cette évaluation se fait au moyen du krigeage, qui n'est autre qu'une méthode d'estimation optimale, dont l'erreur est à la fois de moyenne nulle et de variance minimale.

Une telle approche de la distribution du phénomène dans son domaine de variabilité est bénéfique sur plus d'un plan. L'estimation des grandeurs, des différents paramètres quantitatifs du gisement (Tonnage, teneur, puissance minéralisée...), est ainsi facilement accessible.

De plus les différentes planifications de l'ouverture, de l'exploitation, de la production, du traitement du minerai... du gisement, représentent l'apport spécifique de la géostatistique. C'est en fait le fruit incontestable de cette méthode d'estimation.

Dans le présent travail nous nous sommes appliqués à étudier au moyen de cette méthodologie, le gisement de Pyrite (FeS_2) et Sphalerite (ZnS) de Chabet el Hamra (Setif).

Cette étude comportera quatre phases différentes. La première portera sur la présentation géologique du gisement et la critique des données. Après avoir rappelé quelques éléments de géostatistique, nous aborderons l'étude statistique et l'étude variographique des variables de travail. Enfin la dernière partie sera consacrée au krigeage d'unités minières et à la détermination des paramètres quantitatifs, tels que les courbe Tonnage teneur correspondantes. Ainsi, nous serons amenés à déterminer la variabilité et la répartition du zinc et du soufre dans le gisement.

Chapitre 2

2 GEOLOGIE DU GISEMENT

2 1 HISTORIQUE.

Le travail de la présente thèse repose principalement sur le rapport géologique final de janvier 1992 réalisé par l'ORGM [1].

Le gîte en question tire son nom d'un indice découvert en 1900 sur le bord Ouest de l'embouchure de oued Chabet el Hamra. Il fait partie du même district minier, HODNA, que le gisement voisin de Kherzet Youcef actuellement inexploité. La ville la plus proche est l'agglomération d'Ain Azel située à quelques kilomètres au Nord Ouest, le chef lieu de la wilaya est à environ 50Km au Nord.

Depuis sa découverte le gisement de *Chabet el Hamra* a constamment fait l'objet d'exploitations réduites et hatives. Des travaux scientifiques sérieux n'ont eu lieu qu'à partir de 1945, date à laquelle le BRMA (Bureau de Recherche minière d'Algerie) a entrepris une campagne de recherche et exploration sur une zone de minerai zincifère oxydé.

Durant les deux dernières décennies la SONAREM (Société Nationale de Recherche Minière), à son tour, a repris les recherches à l'échelle de tout le gisement sur environ 8 Km². Ces travaux se sont soldés par de nombreux rapports estimatifs tels que V.IOGOV 1971, AGASSIEV 1982, FRELOV 1989... Ces derniers constituent d'ailleurs la principale source bibliographique du rapport final de l'ORGM indiqué au début de ce paragraphe.

2 2 CONTEXTE GEOLOGIQUE GENERAL

Le gisement de *Chabet el Hamra* fait partie de la grande structure du HODNA, qui s'associe au raccordement tectonique de trois formations importantes: Le secteur Est de l'Atlas Tellien, le secteur Est de l'Atlas Saharien et le bloc d'Aïn M'lila.

La région du gisement est assez complexe elle est marquée par des structures plicatives et des accidents cassants dans plusieurs directions, les soulèvements en horst anticlinal les plus importants sont Rahbat, Hadjar Labiod et Boutaleb. Ils sont eux aussi sujets à des accidents cassants largement développés qui leur confèrent l'allure de blocs étagés.

La formation de ces fractures fût simultanée aux mouvements de plissements au cours de l'activité orogénique dans la région.

La formation des gîtes métallifères du bloc d'Ain Mlila est attribuée au stade tardif de cette orogénèse, ces mêmes accidents cassants auraient servi de structure nourricière.

Quant à la stratigraphie du gisement, elle est principalement représentée par les dépôts du crétacé inférieur, du miocène et du quaternaire.

Le crétacé revêt ici une importance particulière puisque la minéralisation se trouve logée dans l'un de ses sous étages. Il comprend en fait trois niveaux distincts:

- **Le Valanginien** : Il est représenté par une alternance d'aleurolites grises avec des grès quartzeux, de dolomies gréseuses, argileuses, de calcaire et de marnes. Les dépôts du Valanginien sont stériles, l'apparition des marnes est considérée comme le niveau repère de la fin de la minéralisation. Cette dernière est en fait logée dans l'assise supérieure reposant en concordance. Cette assise est conventionnellement rapportée à l'Hauterivien qui fait tout l'intérêt de l'étude.
- **L'Hauterivien**: Il se subdivise en Hauterivien inférieur et Hauterivien supérieur. Chacun de ces niveaux se divise à son tour en plusieurs termes, suivant la différenciation de faciès. La minéralisation se trouve, en fait, logée dans le premier terme de l'hauterivien (Hauterivien Inférieur). Elle se caractérise par deux corps distincts superposés, d'une puissance variable. Ils sont notés C1, (corps numéro un), et C2, (Corps numéro deux). La puissance totale de l'étage de l'Hauterivien

varie de 150 à 220m. qui constitue, par sa partie inférieure, le principal horizon productif en minerais pyriteux et zincifères.

- **Le Barrémien** : Les formations de cet étage sont développées dans les parties Nord-Ouest et Sud du champ minier. Cet horizon se subdivise à son tour en deux sous étages. Composés principalement de roches gréseuses et dolomitiques.

En conclusion on notera que la majorité des roches du gisement se rapportent petrochimiquement aux grès plus ou moins carbonatés et aux dolomies plus ou moins argilo-calcareuses.

2 3 STRUCTURE DU GISEMENT

Les dislocations cassantes qui marquent le gisement sont principalement représentées par les failles **Est, Ouest, Latitudinale, et Centrale (figure 2 1)**. Ces deux dernières sont d'une importance particulière pour le rôle qu'elles ont joué lors de la formation des couches minéralisées.

2 4 LES ACCIDENTS CASSANTS

Le gisement de Chabet el Hamra est marqué par des dislocations cassantes, principalement, par les failles **Est, Ouest, Latitudinale, et Centrale**. Dont les plus importantes pour la formation et la minéralisation sont les failles **Centrale** et la **Latitudinale** qui en dérive.

- **La Faille Centrale:** Elle dérive de celle régionale Nord au Sud-Est du gisement. Elle est Normale avec pendage du miroir SE 70 à 75°, et un rejet vertical de 10 à 15m.
- **La faille Latitudinale:** Elle dérive de la faille centrale entre les profils XIII et XIV, s'étend en latitude jusqu'au profil XX où elle vire à l'Ouest au delà du gisement. C'est une faille normale à pendage du miroir N275 à 280°, et à rejet vertical de 10 à 20m.

- **La faille Est** : Elle dérive de la faille centrale au profil XII, coupe la fermeture periclinale du brachyanticlinal du bloc Est et rencontre la faille Sud à 200m à l'Est du profil 0. C'est une faille normale arquée, de direction subméridienne. L'amplitude verticale de son rejet est de 80m.
- **La faille Ouest** : C'est une faille normale en escalier, le pendage de son miroir est E70 à 85°. L'amplitude totale de son rejet vertical atteint les 100m. Elle se dégage de sous les dépôts quaternaires bordant le flanc Sud-Ouest du brachyanticlinal du bloc Est.

Les failles Latitudinales et Centrale revêtent une importance particulière pour deux raisons. La première est l'interruption de la minéralisation zincifère dans le corps C1 et la baisse de la teneur en Zinc dans le corps C2, dans le bloc central formé justement par ces deux failles. La seconde est la localisation du maximum des lentilles zincifères et pyriteuses dans ce même bloc.

Ces particularités caractéristiques donnent lieu à supposer que la faille Centrale liée à celle régionale Nord avaient servi de canal nourricier lors de la formation du gisement. Le déplacement de la bande de minerai de zinc dans le bloc central vers le nord-est et la localisation de la minéralisation barytinique dans le flanc Sud-Ouest de la zone métallifère générale témoignent de la direction de la circulation des solutions minéralisantes.

L'ensemble enchevêtré de ces failles a subdivisé l'aire du champ minier en trois blocs structuraux appelés Bloc Est, Bloc Central et Bloc Ouest, chacun selon sa position.

- **Le bloc Est** : Il est délimité de trois cotés par les failles Est, Latitudinale et Ouest, il est "ouvert" du côté Sud. Sur le plan plicatif il représente un brachyanticlinal de 1200m par 800m à flancs symétriques se fermant au Nord-Ouest et au Sud-Est. Sur le plan général le pli se complique localement par des flexures, gradins, dômes, accidents cassants...

- **Le bloc Central** : Il est le plus compliqué sur le plan structural. Il a la forme d'un angle aigu formé par le raccordement de la faille Centrale et la faille Latitudinale dans sa partie Est. Sur le plan plicatif il représente une forme de graben à affaissement d'amplitude de 15 à 20m. Le tout est encore compliqué par plusieurs autres failles d'ordre secondaire.
- Enfin **le bloc Ouest** est localisé au Nord Ouest de la failles centrale, les contours de ce bloc ne sont guère très apparents à cause des épais dépôts Quaternaires.

Par conséquent l'auteur du rapport géologique, lorsqu'il traite du mode de gisement, considère la totalité du gîte de **Chabet el Hamra** composé de trois parties différentes relatives chacune à un des blocs structuraux.

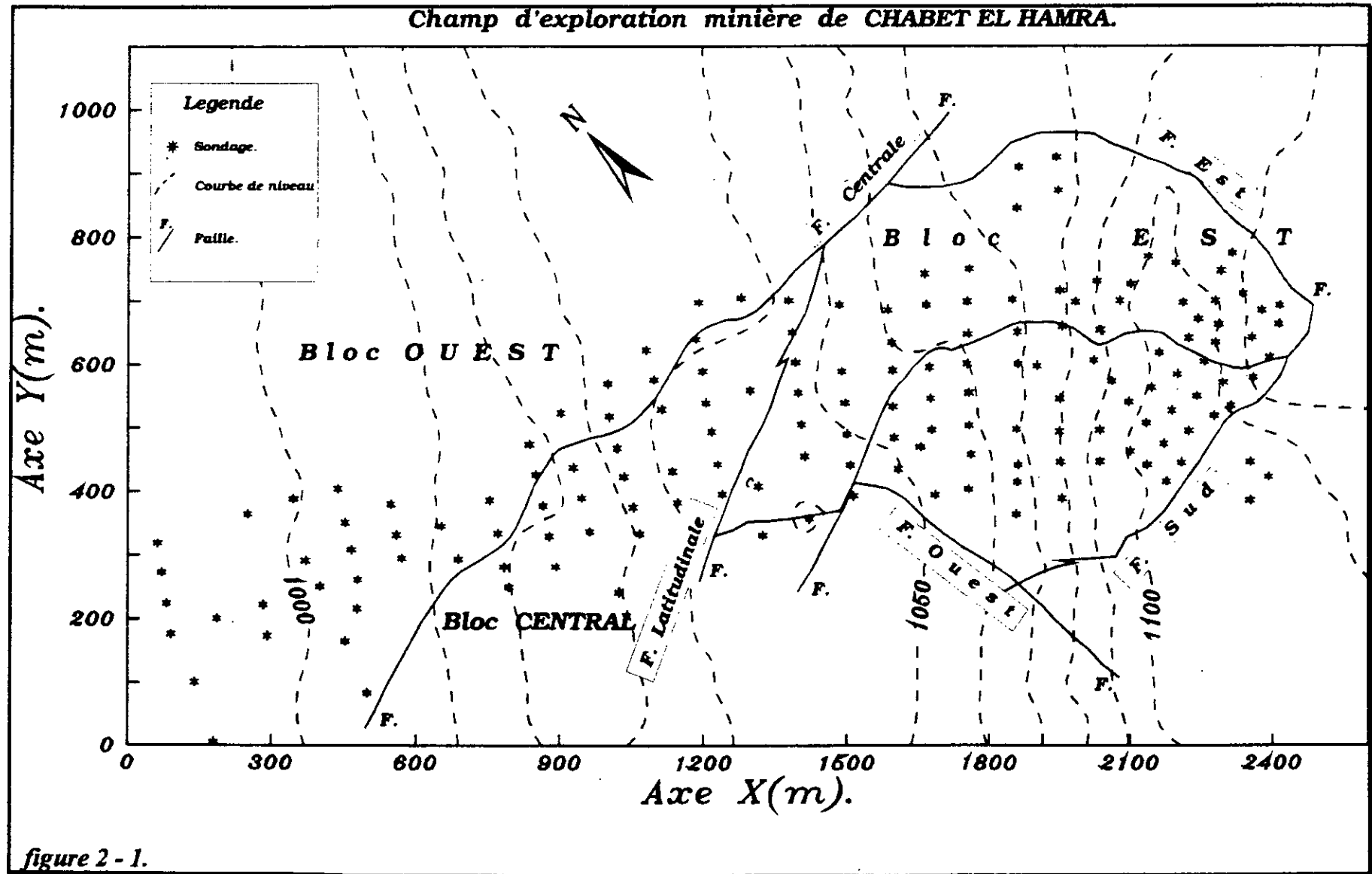
2 5 MORPHOLOGIE ET MODE DE GISEMENT DES CORPS DE MINERAI.

La minéralisation du gisement Chabet el Hamra a une structure pluriétagée, il se compose de minerais de Sphalerite (ZnS), de pyrite (FeS_2) et de blende-pyrite. Elle est observée dans tous les termes de l'Hauterivien, sous forme de corps et de lentilles.

Ces formations constituent une zone métallifère générale ayant la forme d'une bande de direction générale Nord-Ouest 300 à 320° . L'aire de cette bande dépend du niveau de prospection, sa largeur varie de 300 à $600m$, sa longueur prospectée a atteint les $2700m$. Il est cependant très probable qu'elle existe également en dehors de ces limites.

Au Nord de la faille Sud la minéralisation se trouve à une profondeur variant de 80 à $100m$, où elle épouse la croûte du brachyanticlinal du Bloc Est. En allant vers le Nord-Ouest, elle plonge sous un angle de 15° conformément à la structure plicative général

De par leur continuité et leur étendue seuls les deux corps stratiformes, appelés Corps C1 et Corps C2, sont industriellement intéressants. Ils renferment à eux seuls environ 95% des réserves de minerai de zinc et 99% du minerai pyriteux.



- **Le corps de minerai 1 C1:**

Il s'associe à la partie supérieure du premier terme de l'Hauterivien inférieur, à ses variétés brechiformes. Il semble résulter du remplissage par les solutions minéralisantes des vides de décollement intra et intercouches par suite des tensions tangentielles post-orogéniques.

Ce corps est prospecté par une totalité de 242 sondages, 178 ont recoupé du minerai et dont 101 zincifères et 77 pyriteux. Sa puissance varie d'une manière irrégulière, avec des interruptions par endroits. Les teneurs en Zn et en Soufre pyriteux varient aussi largement.

Les minerais zincifères de C1 ont un caractère compliqué, en effet ils forment en son sein même de petites bandes et lentilles isolées. Par exemple dans le bloc Est on distingue une bande et deux lentilles. Cette bande représente l'intérêt principal de ce Bloc. Elle part de la faille Est avec une largeur de 200m environ, suit le flanc Sud-Ouest du pli, se rétrécit à 100m et s'étrangle jusqu'à 50m sur le profil VII. Plus loin vers le Nord-Ouest la bande s'élargit et atteint les 200m au profil X, passe par le periclinal Nord-Ouest et bute contre la faille Latitudinale.

- **Le corps de minerai deux C2:**

Il se situe dans le même terme dolomitique que C1, mais de caractère bréchiforme moins net. Parmi les 242 sondages de prospection réalisés sur le gisement 146 ont recoupé la minéralisation métallifère, dont 87 zincifères et 59 pyriteux.

Etendue du corps C2 est inférieure à celle de C1, cela est dû au fait que le premier est moins large et possède des fenêtres stériles plus vastes.

Le corps C1 est en dessous de C2, dans le même horizon géologique, séparés par un intercalaire stérile de 3 à 10m. Ils sont sub-parallèles avec un léger pendage d'environ 15°, leur puissances ainsi que leurs compositions minéralogiques varient d'une manière irrégulière.

2 6 COMPOSITION MINERALOGIQUE DES MINERAIS

La minéralisation de Chabet el Hamra est représentée donc par la Blende (ZnS) et la Pyrite marcassite (FeS_2). La galène (PbS) recoupée par quelques sondages isolés est sans importance industrielle. De ce fait les principaux minerais sont la Blende et la pyrite, les minéraux secondaires sont la Galène et l'hématite. Les minéraux de gangue sont la calcite, la barytine, la dolomie et plus rarement le quartz et le gypse. Les minéraux d'oxydation sont principalement la Smithsonite (produit d'oxydation de la Sphalerite), la cérusite, le limonite et l'hydrogoethite.

La Blende représente, avec la pyrite, les principaux minéraux dans le minerai polymétallique. Elle se présente en agrégats microcristallins de dimension 10mm, ou en cristaux clastiques isolés de dimension 0.08 à 0.3mm. elle peut être rarement associée à la galène, mais pratiquement toujours liée à la pyrite.

La Pyrite, quant à elle, se présente sous trois formes distinctes. En grains fins xénomorphes disséminés dans la dolomie, en agrégats de 0.3 à 0.5mm et en filonnets de 10 à 15cm de longueur.

Chapitre 3

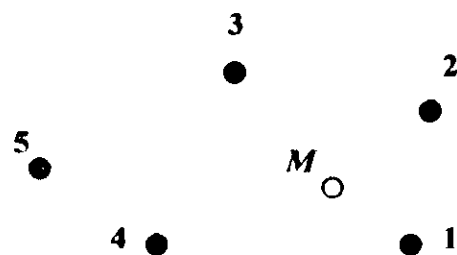
3. GEOSTATISTIQUE - APPROCHE THEORIQUE

Nous présenterons dans ce qui suit une approche théorique essentielle de la géostatistique, en guise de rappel pour ceux qui en ont déjà acquis les notions. Elle représentera en même temps une introduction aux lecteurs non spécialisés.

Le présent exposé a été largement inspiré par les nombreux manuscrits spécialisés en la matière tels que Journel 1978, David 1977 [2,3].

3. 1. ETUDE D'UN EXEMPLE :

Considérons le problème d'estimation ci contre



Si on veut estimer la valeur au point M à partir des prélèvements qui l'entourent, il paraîtra raisonnable de mettre au point une procédure d'estimation où, par exemple, le point 1 aura plus de poids que tous les autres points, le point 2 aura à son tour plus de poids que le 3 et le 4, etc...Ce qui rappelle tout simplement le principe classique de la zone d'influence. Cependant toute la question réside dans la valeur à accorder au poids en question.

De nombreuses méthodes ont tenté de le concrétiser en tenant compte de la distance de l'échantillon au point M . Par exemple à chaque échantillon on donnera comme poids l'inverse de cette distance, ou l'inverse de son carré...

En d'autres termes, tout converge vers l'idée que la relation entre la valeur connue et la valeur inconnue, dépend uniquement de la distance qui les sépare et peut être aussi de sa direction.

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

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

3. 2. LA GEOSTATISTIQUE

Le premier à définir et à utiliser ce terme fût G.Matheron (1962) " La géostatistique est l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et l'estimation des phénomènes naturels".

Un phénomène naturel est souvent caractérisé, en pratique, par la distribution d'une ou plusieurs variables dans l'espace qu'il occupe, appelées variables régionalisées. Toutes les variables des sciences de la terre peuvent être ainsi considérées. Par exemple la teneur en élément, la puissance minéralisée, la porosité...

La théorie de la géostatistique démarre de l'idée que toutes les variables régionalisées ont un aspect "aléatoire" et un aspect "structural". Aléatoire car les valeurs prises par une variable peuvent varier d'un point à un autre d'une façon très imprévisible. Son aspect structural réside dans le fait que ces valeurs varient en pratique avec une certaine apparence de continuité. Ces deux qualités qui sont à la fois contradictoires mais complémentaires sont surtout liées à la notion d'échelle. Elles interviennent longuement dans la mise en place de cette théorie.

Soit $z(x_i)$ la valeur d'une variable régionalisée z au point x_i du domaine étudié D . Le cas idéal serait de connaître la valeur exacte de z en tout point du domaine en question. Chose qui est financièrement et techniquement impossible. On doit alors faire recours à différentes formulations mathématiques qui nous permettent d'approcher le plus possible ce

exemple, approche la loi de probabilité de la variable aléatoire $Z(x)$, elle serait la même pour les n autres points translatsés de h .

On a également empreinté ce même raisonnement en statistique lorsqu'on a déterminé la loi de probabilité d'une variable aléatoire à partir de l'allure de l'histogramme de la population, ou quand on a approché l'espérance mathématique $E\{Z(x)\}$ par la moyenne arithmétique de la population.

3. 2. 2. MOMENTS ET STATIONNARITE

Soit la fonction aléatoire $Z(x)$, pour tout ensemble de k points x_1, x_2, \dots, x_k dans l'espace \mathbf{R}^k (espace à k dimensions) appelés supports.

Il leur correspond une variable vectorielle à k composantes

$\{z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_k)\}$ qui est caractérisé par la loi de distribution à k variables

$$F_{z_1, z_2, \dots, z_k}(Z_1, Z_2, \dots, Z_k) = \text{Prob}(Z(x_1) < z_1, \dots, Z(x_k) < z_k)$$

L'ensemble de toutes ces lois de distribution pour tout entier positif k et pour tous les choix possibles de k points, constitue par définition la loi spatiale de la Fonction aléatoire $Z(x)$.

En pratique minière il suffit de connaître seulement les deux premiers moments de cette loi. Ils peuvent fournir une solution approchée acceptable à la plus part des problèmes types.

En d'autres termes, pour la géostatistique linéaire, deux fonctions aléatoires $Z_1(x)$ et $Z_2(x)$ admettant les mêmes moments d'ordre 1 et 2 sont considérées comme un seul et même modèle.

3. 2. 2. 1. Moment d'ordre 1 ou espérance mathématique

Soit la variable aléatoire $Z(x)$ au point x , si la loi de distribution de $Z(x)$ admet une espérance (ce qui est supposé admis) cette espérance est en général fonction de x et s'écrit:

$$E\{Z(x)\} = m(x)$$

La stationnarité d'ordre 2 se formulerait alors:

1. Espérance mathématique $E\{Z(x)\}$ existe et ne dépend pas du point x

$$E\{Z(x)\} = m \quad \forall x.$$

2. Pour toute paire de variables aléatoires $Z(x)$ et $Z(x+h)$ leur covariance existe et ne dépend que de la distance h

$$C(h) = E\{Z(x+h)Z(x)\} - m^2 \quad \forall x$$

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

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

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

Remarquons que cette hypothèse de stationnarité est quelque peu très forte. En effet il existe des phénomènes naturels dont la dispersion est illimitée, c'est à dire qui ne présentent ni de variance ni de covariance à priori finies (Journel 1977, [3]). Par conséquent on doit affaiblir légèrement cette hypothèse, on supposera suffisante l'existence du variogramme. Ceci nous amène à contourner le problème et aborder la variable par l'étude de ses accroissements, d'où l'hypothèse intrinsèque suivante.

3. 2. 3. HYPOTHESE INTRINSEQUE

La fonction $Z(x)$ vérifie l'hypothèse intrinsèque, si pour toute translation h , l'accroissement $\{Z(x+h) - Z(x)\}$ admet une moyenne et une variance indépendants du point d'appui x mais dépendant de h .

- $E\{Z(x_i)\} = m \quad \forall x.$
- $\text{Var}\{Z(x+h) - Z(x)\} = E\{(Z(x+h) - Z(x))^2\} = 2\gamma(h) \quad \forall x.$

3. 2. 2. 2. Moment d'ordre 2

Les trois moments d'ordre 2 considérés en géostatistique sont les suivants:

1. **La variance à priori**, qui se distingue des variances d'estimation et de dispersion. Quand elle existe, elle est définie comme le moment d'ordre 2 centré autour de l'espérance $m(x)$ de la variable aléatoire $Z(x)$:

$$\text{Var}(Z(x)) = E\{(Z(x) - m(x))^2\}$$

2. **La Covariance** : On peut démontrer que si deux variables aléatoires $Z(x_1)$ et $Z(x_2)$ ont des variances aux points x_1 et x_2 , elles ont nécessairement une covariance qui est fonction des deux emplacements x_1 et x_2 .

$$C(x_1, x_2) = E\{(Z(x_1) - m(x_1)) (Z(x_2) - m(x_2))\}$$

3. Le Variogramme:

La fonction Variogramme est définie comme étant la variance des incréments $\{Z(x_1) - Z(x_2)\}$ et s'écrit

$$2\gamma(x_1, x_2) = \text{Var}\{Z(x_1) - Z(x_2)\}$$

La fonction $\gamma(x_1, x_2)$ est appelée semi variogramme.

La covariance et le variogramme, définis ci dessus, dépendent des implantations x_1 et x_2 . Donc le problème d'inférence statistique se pose encore une fois, en effet nous ne disposons que d'une seule réalisation des variables aléatoires $Z(x_1)$ et $Z(x_2)$, ce qui est bien sûr insuffisant pour définir leurs lois.

L'hypothèse de stationnarité intervient alors pour supposer que dans les gisements homogènes, la corrélation qui existe entre les valeurs $z(x_1)$ et $z(x_2)$ ne dépend pas des points x_1 et x_2 mais du vecteur $h = x_1 - x_2$ qui les sépare. A partir de cela tous les couples $(Z(x_i) : Z(x_j))$ dont les points x_i et x_j sont distants de h constituent autant de réalisations des variables aléatoires $Z(x_i)$ et $Z(x_j)$.

cas idéal. C'est l'estimation des points inconnus à partir des prélèvements effectués, au moyen d'une représentation numérique qui reproduit la variabilité de $z(x_i)$.

La solution géostatistique à ce problème de représentation repose sur l'hypothèse que chacune des valeurs $z(x_i)$ est supposée représenter une réalisation unique d'une variable aléatoire $Z(x_i)$ au point x_i . L'ensemble de ces variables corrélées $\{Z(x); x \in D\}$ constitue à son tour une fonction aléatoire.

Le problème de caractérisation de la variabilité de $z(x)$ se réduit donc à celui de modéliser la corrélation entre les différentes variables aléatoires $Z(x_i)$ constituant la fonction aléatoire $\{Z(x); x \in D\}$.

L'interprétation probabiliste de la variable régionalisée $z(x)$ (variable aléatoire) comme une réalisation particulière d'une certaine fonction régionalisée (fonction aléatoire) a un sens seulement quand il est possible de connaître "entièrement" la loi de probabilité qui la définit. Or d'une manière rigoureuse ceci n'est, en pratique, pas possible car nous ne disposons alors que d'une seule réalisation de celle-ci.

On est donc amené à poser certaines hypothèses afin de pouvoir avancer dans notre raisonnement. Hypothèses qui supposent certains degrés d'homogénéité du phénomène étudié. Elles sont introduites sous la notion générale de l'hypothèse de stationnarité.

3. 2. 1. HYPOTHESE DE STATIONNARITE

En pratique le phénomène étudié peut être souvent considéré homogène, c'est à dire que la variable régionalisée se répète dans l'espace étudié. En termes probabilistes, la probabilité d'avoir aux n points $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ les n valeurs $z(x_1) z(x_2) z(x_3) \dots z(x_n)$ est la même pour qu'aux n points $x_1+h, x_2+h, x_3+h, \dots, x_n+h$ on obtient les mêmes valeurs $z(x_1) z(x_2) z(x_3) \dots z(x_n)$.

Cela nous permet donc de considérer chacun des prélèvements $z(x_i)$ comme autant de réalisations de la même fonction aléatoire. Par exemple les échantillons $z(x_i)$ et $z(x_i+h)$ aux points x_i et x_i+h représentent deux réalisations différentes, de même probabilité, de la variable aléatoire $Z(x_i)$. Par conséquent le diagramme des fréquences, des teneurs par

Chapitre 3

Conclusion

Nous avons dû interpréter notre variable régionalisée, comme la réalisation d'une fonction aléatoire vérifiant l'hypothèse intrinsèque. Son étude se fera alors au moyen de sa dérive linéaire $m(h)$ et du variogramme $\gamma(h)$, définis ci dessus.

3. 2. 4. LA GEOSTATISTIQUE EN PRATIQUE

Le variogramme représente la variance des accroissements de la variable régionalisée $Z(x)$, quand x se déplace à travers tout le domaine, le vecteur de translation h restant fixe en module et en direction.

$$2\gamma(h) = E\{(Z(x) - Z(x+h))^2\}.$$

Dans la pratique la valeur du variogramme est approchée par l'expression:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x) - Z(x+h))^2$$

Où $N(h)$ représente le nombre de points distants de h

La représentation graphique de $\gamma(h)$ s'obtient en portant en ordonnée la variance $\gamma(h)$ et en abscisse l'accroissement h correspondant. Les points obtenus dessinent une courbe plus ou moins brisée qu'on appelle Variogramme expérimental.

Il est dès lors évident que la fonction $\gamma(h)$ nous renseigne sur la façon dont varie le phénomène étudié. C'est à dire dans quelle mesure ce que l'on prélève en un point quelconque, ressemble ou non à ce que l'on trouverait à un point distant de h . Cela rappelle en effet la notion de zone d'influence, mais sous une forme mathématique.

3. 2. 4. 1. PROPRIETES DU VARIOGRAMME

La définition même du variogramme entraîne les propriétés suivantes:

$$\gamma(0) = 0$$

$$\gamma(h) = \gamma(-h) \geq 0$$

En général le variogramme croît à partir de l'origine. A mesure que h grandit l'écart quadratique moyen entre les deux variables $Z(x)$ et $Z(x+h)$ tend à croître.

Dans la plus part des cas pratiques, cette croissance se stabilise autour d'une valeur limite $\gamma(\infty)$ pour des distances h supérieures à une certaine limite a , appelée portée. On démontre que cette valeur limite $\gamma(\infty)$ est elle même la variance à priori $C(0)$.

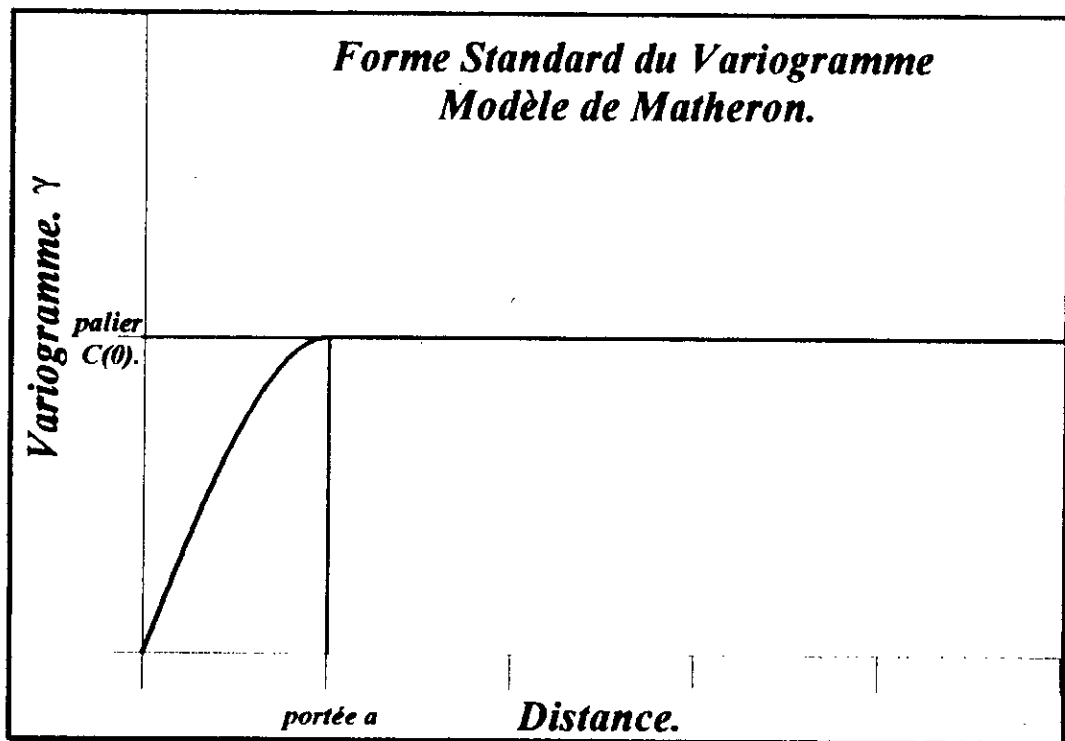


Figure 3 1 Modèle de variogramme standard, ou sphérique.

La portée a n'est donc autre que la zone d'influence, au delà de $h > a$ les variables aléatoires $Z(x)$ et $Z(x+h)$ ne sont plus corrélées.

3. 2. 4. 2. COMPORTEMENT DE $\gamma(h)$ A L'ORIGINE

Le comportement à l'origine de la courbe $\gamma(h)$ nous renseigne sur la continuité et la régularité du phénomène.

- Si ce dernier est tout à fait aléatoire, toutes les valeurs mesurées sont totalement indépendantes. La covariance dans ce cas est nulle. Le variogramme prend une valeur constante égale à la variance $C(0)$. Dans ce cas la géostatistique fait place à la statistique classique.
- Si par contre le phénomène est très régulier, l'accroissement $(Z(x) - Z(x+h))$ au voisinage de l'origine est proportionnel à h , $\gamma(h)$ prend alors la forme kh^2 comportement parabolique.
- Quand l'allure de la courbe est plutôt linéaire à l'origine alors le phénomène est moins régulier que précédemment.
- Si $\gamma(h)$ présente une discontinuité à l'origine, c'est à dire que $\gamma(h) \neq 0$, alors que théoriquement il doit l'être, on parle alors d'effet de pépite. Deux prélèvements très proches ont des valeurs très différentes. Cela révèle en général, quand ce n'est pas dû aux erreurs de mesure..., que l'échelle de travail est trop grande par rapport à celle de variabilité du phénomène (croissance très rapide de $\gamma(h)$ non détectée).

3. 2. 4. 3. COMPORTEMENTS DE $\gamma(h)$ AUX GRANDES DISTANCES

D'un point de vue général des phénomènes naturels, plus les points d'échantillonnage sont éloignés plus on risque des valeurs totalement différentes. Donc $\gamma(h)$ serait une fonction croissante.

Mais en pratique on remarque plutôt qu'au delà de la portée a , il arrive que les échantillons ne montrent aucune corrélation en raison de leurs éloignement. $\gamma(h)$ aura tendance à croître vers une limite finie. C'est la forme idéale du variogramme appelée

modèle sphérique ou modèle de Matheron. *figure 3 1* ci dessous, il représente pour la géostatistique ce que représente le distribution Normale pour la statistique.

3. 2. 4. 4. Variogrammes théoriques

Le variogramme experimental ne peut pas être directement utilisé dans les différentes tâches d'estimation auxquelles on sera appelé. Et ce pour différentes raisons:

- Notre besoin de modèle théorique réside dans le fait que nous aurons besoin de valeurs de $\gamma(h)$ pour des distances et/ou directions pour lesquelles nous n'avons pas de valeurs experimentales. Operation très fréquente lors du krigeage.
- L'utilisation du variogramme experimental ne garantit pas l'existence et l'unicité du systeme de krigeage [2;3;5].

$$\sum_{j=1}^n \omega_j C_{ij} + \mu = C_{i0} \quad \forall i = 1, \dots, n$$

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

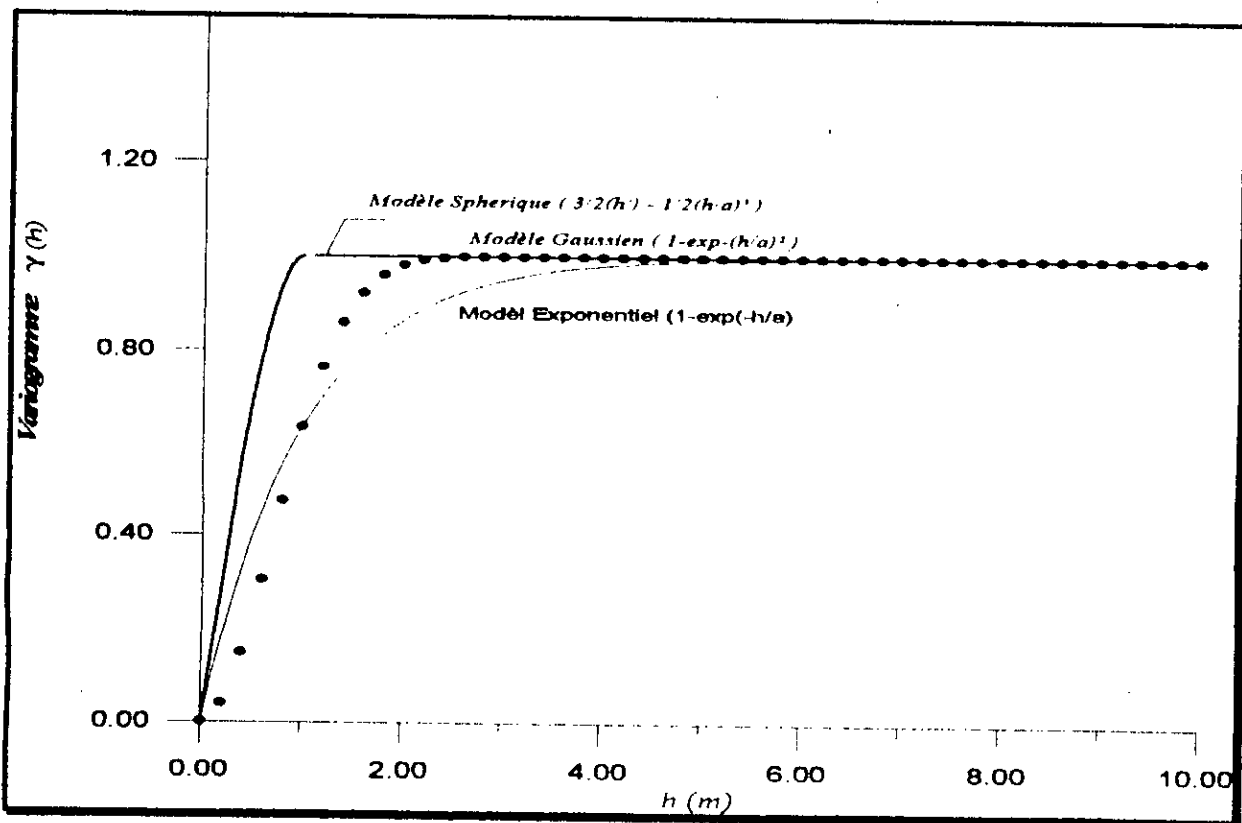


figure 3 2 Quelques modèles théorique permis.

Il existe pour cela différents modèles théoriques permis

1. Effet de pépité pur :

$$\gamma(h) = 0 \quad h=0$$

$$\gamma(h) = C(0) > 0$$

2. Puissance:

$$\gamma(h) = |h|^k \quad \text{avec } 0 < k < 2$$

ce modèle ne possède pas de palier, $C(h)$ n'existe pas.

3. Modèle sphérique:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 3/2 (h/a) - 1/2(h/a)^3 & \text{pour } h < a \\ 1 & \text{pour } h \geq a \end{cases}$$

4. Modèle exponentiel:

$$\gamma(h) = 1 - e^{-\frac{h}{a}}$$

5. Modèle Gaussien:

$$\gamma(h) = 1 - e^{-\frac{h^2}{a}}$$

3. 2. 4. 5. Aspect quantitatif du variogramme

Après avoir examiné les différentes formes liées à l'aspect structural du variogramme, nous passerons dans ce qui suit à son aspect quantitatif. Nous montrerons comment le variogramme intervient dans l'estimation des différents paramètres quantitatifs du phénomène étudié.

La valeur vraie de la variable étudiée z est à priori inconnue dans le gisement, tout ce que nous détenons ce sont des données ponctuelles. Nous sommes alors contraints de procéder à l'estimation des autres points inconnus en utilisant ces seules données.

De ce fait nous commetons certainement une erreur notée $e = z - z^*$, qui est la différence entre la valeur vraie inconnue z et son estimateur z^* . Cette erreur est également une variable régionalisée, qui peut être assimilée à une fonction aléatoire qui admettra l'hypothèse intrinsèque.

Notre tâche n'est pas de calculer cette erreur, ce qui est logiquement impossible, mais elle se résume plutôt à maîtriser la dispersion de cette erreur afin de choisir le meilleur estimateur. Il suffira alors de calculer l'espérance et la variance de sa loi.

La variance d'estimation ou d'extension

Par définition le meilleur estimateur de la valeur vraie z est celui qui donne une espérance ou erreur moyenne proche de zéro, l'estimateur est alors dit sans biais.

$$E\{e\} = 0 \quad \text{avec } e = z - z^*$$

et une variance, ou dispersion autour de cette moyenne, minimale

$$\text{Var}\{e\} = \min.$$

Connaissant ces deux paramètres de la loi de distribution de l'erreur, il reste à définir cette loi en question. Ne disposant pas de l'histogramme des erreurs il est impossible d'inférer leur loi de distribution. La seule alternative reste, cependant, d'utiliser une loi de distribution standard à deux paramètres.

En pratique minière les lois de distribution des erreurs sont généralement symétriques, comparables à la loi Normale[3]. L'intervalle de confiance $m \pm 1.96\sigma$ regroupe en définitive 95% des erreurs observées.

En géostatistique linéaire z^* est une combinaison linéaire des points connus z_i

$$z^* = \sum \lambda_i z_i$$

où λ_i sont les poids donnés par l'estimateur aux valeurs connues z_i .

2. La fonction auxiliaire $H(L,l)$ est par définition la valeur moyenne du variogramme $\gamma(h)$ quand l'une des deux extrémités du vecteur h est fixée à l'un des sommets d'un rectangle **ABCD** et l'autre décrivant, indépendamment, le même rectangle **ABCD** de cotés L et l .
3. La fonction auxiliaire $\alpha(L,l)$ est par définition la valeur moyenne du variogramme $\gamma(h)$ quand l'une des deux extrémités du vecteur h décrit un coté de longueur l et l'autre extrémité décrivant, indépendamment, le coté opposé situé à une distance L .
4. La fonction auxiliaire $\chi(L)$ est par définition la valeur moyenne du variogramme $\gamma(h)$ quand l'une des extrémités du vecteur h est fixée au point A et l'autre décrivant, indépendamment, un segment **AB** de longueur L .

En pratique les valeurs de ces fonctions sont directement lues sur des abaques et tableaux standardisés.

3. 2. 4. 6. Les grandes lignes d'une étude géostatistique

Nous présentons ici une synthèse des étapes successives à suivre en général dans une étude géostatistique :

1. Nettoyage des données:

- données compatibles?, échantillons de carottes, de saignées...
- problèmes analytiques: précision des méthodes d'analyse chimique, limite de détection des appareils de...
- aspect géométrique de l'échantillonnage.
- encodage: erreurs sur les unités, sur les coordonnées ...
- subdiviser les données suivant l'objet géologique considéré.

2. Analyse statistique, utilisation des outils habituels:

- calcul de moyennes, variances...
- carte de teneurs.
- histogrammes des valeurs naturelles et logarithmiques.

- Normalité des données?
- coefficient d'asymétrie (skewness).
- coefficient d'aplatissement (kurtosis).
- coefficient de variation.
- distribution unimodale, plurimodale.
- transformation logarithmique.
- examen des valeurs extrêmes.
- Analyse en double, comparer les premières données à d'autres des mêmes échantillons.

3. Analyse structurale, calcul des variogrammes.

- calcul de variogrammes omnidirectionnels, directionnels.
- Ajustement de modèles théoriques aux variogrammes expérimentaux.

4. Estimation et Krigeage.

- estimation des teneurs de blocs.
- calcul des variances de l'erreur commise.
- faire des cartes des valeurs estimées.

5. Estimation Globale.

- la somme de tous les blocs krigés donne l'ensemble du gisement.

6. Courbes Tonnage teneur.

- Tracé de la courbe Tonnage teneur.
- décider de l'exploitabilité ou pas du gisement.

Chapitre 4

4. CRITIQUE DES DONNEES ET ETUDE STATISTIQUE

4. 1. CRITIQUE DE DONNEES

Faisant état de toutes les opérations de reconnaissance sur l'indice de *Chabet El Hamra*, le rapport géologique[1] dénombre 242 sondages. Forés sur un champ d'environ 2700m par 500m, leur maille carrée varie de 50m à 100m de coté. Pour la période de 1967-1991 quelques 6186 tronçons de carottes ont été ainsi récoltés d'une longueur oscillant autour d'un mètre (1m).

Un tableau récapitulatif réunit les résultats de toutes les analyses chimiques portant sur les deux éléments valorisables: le Zinc et le Soufre pyriteux.

Ces valeurs, telles qu'elles, sont à l'état brut et ne peuvent être directement utilisées dans une étude scientifique. C'est pourquoi une procédure de nettoyage et de mise en forme s'avère plus que nécessaire. Elle tiendra compte, entre autres, des paramètres de l'étude envisagée (nature de l'étude, choix des variables, tolérances, limites du champ de travail...)

Le rapport en question couvre les résultats de plusieurs campagnes (1967-70 ; 1976-81 ; 1987-91). Il rassemble toutes les données sans distinction entre les diverses campagnes ou entre les sondages aux différents paramètres (diamètre, date,...), ceci rend notre situation plus embarrassante. C'est pourquoi il s'avère assez délicat d'en tirer une base de données représentative et spécifique à une éventuelle estimation géostatistique.

Parmi les problèmes qui rendent cette sélection à la fois difficile et cruciale, on peut citer dans ce cas :

- Le support (ici une carotte), bien qu'étant fixé au départ des différents projets d'exploration à 1m de longueur, il s'est avéré variable (de 0.3m à 4m, moy = 2.17m et $\sigma = 2.65m$). Par ailleurs le diamètre n'était pas constant lui aussi, le rapport indique les différentes sections utilisées sans spécifier les sondages correspondants.
- Les critères de différenciation entre les corps de minerai (C1, C2, lentilles...), le long des sondages, ne sont pas toujours clairs. Il arrive qu'on trouve dans les données, deux ensembles successifs de carottes le long d'un même sondage, classés tous deux en C1. Pourquoi ? Duquel doit-on tenir compte ?
A chaque fois que ce problème s'est posé, nous avons supposé les deux ensembles ne formant qu'un. Mais dans le cas les différences en teneur étaient trop apparentes, nous avons négligé le plus pauvre.
- Les nombreuses lacunes et erreurs de frappe... dues probablement à la mauvaise édition du rapport, n'ont fait qu'aggraver la situation.
Pour remédier à cela, nous avons essayé de les corriger soit en consultant d'autres copies du même rapport, ou alors en utilisant les différentes cartes géologiques accompagnant ce même rapport..
- Certains sondages sont d'ores et déjà sélectionnés en exploitables ou non exploitables, or rien ne nous permet d'avancer à ce stade de telles remarques même si la teneur y est inférieure à celle de coupure.
De telles observations sont plutôt réservées à qualifier des unités minières (blocs, panneaux,...).
Ce problème se pose surtout lors de la construction de la base de données.
Doit-on prendre ou laisser les informations relatives aux sondages notés inexploitables ?
Dans le présent travail, nous en avons tenu compte. Parce que d'une part, nous n'avons pas suffisamment de données pour nous permettre de telles opérations, et

d'autre part l'un des fruits de cette application sera la courbe tonnage teneur où apparaîtra toute la gamme des teneurs.

- L'aire décrite par l'ensemble des sondages est assez irrégulière avec des lacunes remarquables. Ceci est sans doute dû aux conditions topographiques difficiles et à la perte de morceaux de carottes dans certains sondages. L'idéal serait d'avoir une surface bien définie (rectangle, carrée...) régulièrement échantillonné afin de minimiser l'effet de lacunes où l'estimation manque de fiabilité.

4. 2. PROBLEME DE L'AIRE DE TRAVAIL ET CHOIX DES VARIABLES:

Notre gisement étant composé de trois parties différentes, § 2 3, nous devons donc définir la position de notre étude en conséquence. C'est à dire déterminer la partie de ce champ minier dans lequel seront étudiées nos variables régionalisées.

Tout compte fait, la zone en question s'identifie à la partie du gisement délimitée par le bloc structural Est (*figure 4 1*), pour les raisons suivantes :

- Les blocs central et Ouest ne présentent pas un nombre de données suffisantes (sondages) pour les étudier chacun de son côté (problème de représentativité) alors que le bloc Est procure à lui seul suffisamment de sondages.
- Du point de vue exploitation le bloc Est est très bien placé, vue la faible profondeur de la couche ainsi que la présence déjà d'une certaine infrastructure en surface le favorisant pour une éventuelle ouverture.
- A première vue le bloc Est témoigne d'une richesse prometteuse, c'est en fait dans cette partie qu'ont été découverts les premiers indices sous forme de zones d'oxydation de Zn...suivies par de petites exploitations des filons riches.

Le support de la variable dans une étude géostatistique doit bien entendu être constant. Mais les carottes analysées étant de longueurs variables, il n'est donc pas possible de considérer la teneur ainsi présentée comme variable d'étude.

Il est possible de procéder à une régularisation de la teneur à une carotte unifiée d'un mètre, mais cela n'est pas indiqué quand il s'agit de la majorité des sondages.

Il est plutôt recommandé dans de telles situations de considérer la variable accumulation [4;9;6], qui est le produit de la teneur de la carotte par sa longueur.

- **La variable accumulation métal** a non seulement l'avantage d'utiliser toutes les informations disponibles, quelle que soit la longueur de la carotte, mais aussi de simplifier, par ce produit, le problème de trois dimensions 3D à deux dimensions 2D (DAVID 1977 p226).

En effet si notre variable est la teneur, il faut alors compiler les coordonnées de chacune des carottes, qui ne sont pas forcément sur un même plan. Et de ce fait le calcul variographique devra se faire en 3D.

Mais en multipliant la longueur de la carotte par sa teneur, nous créons une projection de tous les sondages sur un plan à deux dimensions. Ce qui simplifie bien des calculs

Nombreux sont les cas pratiques qui ont utilisé cette transformation pour les gisements à puissance irrégulière (Annels 1991, p105). Ce sera désormais notre variable d'étude.

Ce produit est proportionnel à la variable teneur qui nous intéresse en fin de compte.

De plus nous serons ramenés à calculer le volume du minerai en place, ce qui nécessitera alors la connaissance, en plus de sa puissance, la surface qu'il occupe.

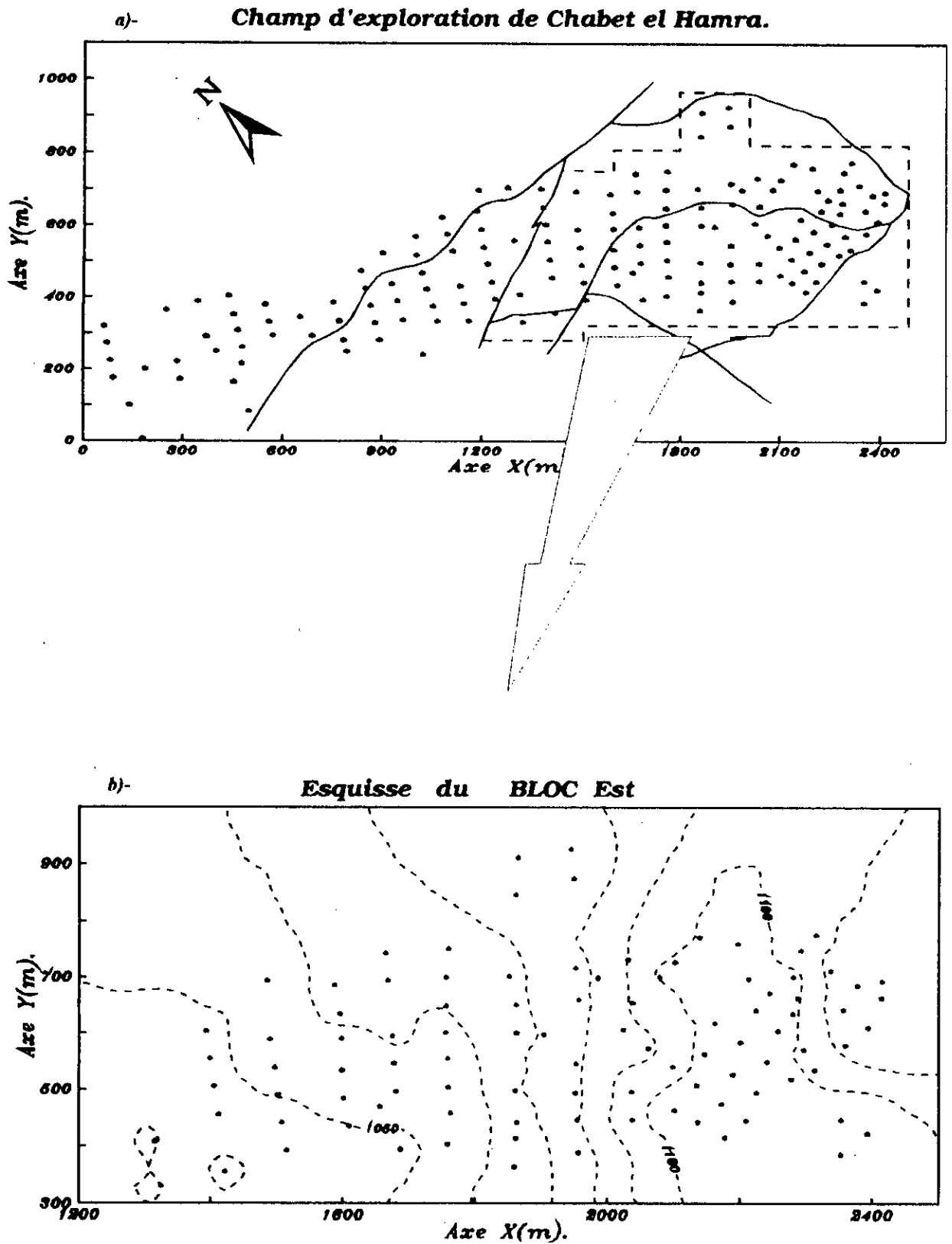


figure 4 - 1.

En **conclusion** les variables de travail seront:

1. *L'accumulation (m.%).*
2. *La puissance minéralisée (m).*
3. *La surface minéralisée (m²).*

Remarque :

La couche minéralisée étant légèrement inclinée, la puissance telle qu'elle est présentée dans le rapport n'est autre que son épaisseur apparente, c'est à dire dans la direction verticale.

Or pour l'accumulation on a besoin de connaître la puissance réelle, dont dépend entre autres la précision des calculs.

Dans le cas des couches tabulaires à pendage constant, il est facile de passer de l'une à l'autre, mais ce n'est malheureusement pas notre cas : Le corps C1 se présente sous forme d'une couche de puissance et pendage irréguliers mais d'allure général sub-horizontale. De plus nous n'avons aucune information relative aux angles de contacts sondages couche.

C'est pourquoi la seule façon de résoudre cette question c'est de s'aligner sur l'avis des auteurs du rapport géologique sus cité [1], qui lors du calcul des réserves, ont rencontré le même problème. Leur solution était de négliger le faible pendage du corps C1.

4. 3. ETUDE STATISTIQUE DES VARIABLES REGIONALISEES

Nous proposons de présenter, en premier lieu, dans cette section une appréciation graphique des teneurs en élément étudiés. Ceci afin de se faire une idée de leurs distributions géographiques et leur impact sur les résultats de l'estimation.

Nous passerons ensuite à l'étude staitisque des variables régionalisées définies précédemment.

4. 3. 1. ESQUISSE ET APPRECIATION GRAPHIQUE DES DONNEES

La *figure 4 1* ci dessus, présente l'esquisse du bloc Est et sa place dans le champ minier global. La région extrême Est présente une densité de points (sondages) plus grande, car c'était là qu'avaient commencé les premiers travaux de prospection avec une maille serrée de 50m de coté.

Cependant nous remarquons également la présence de lacunes, dues probablement à la perte des informations correspondantes.

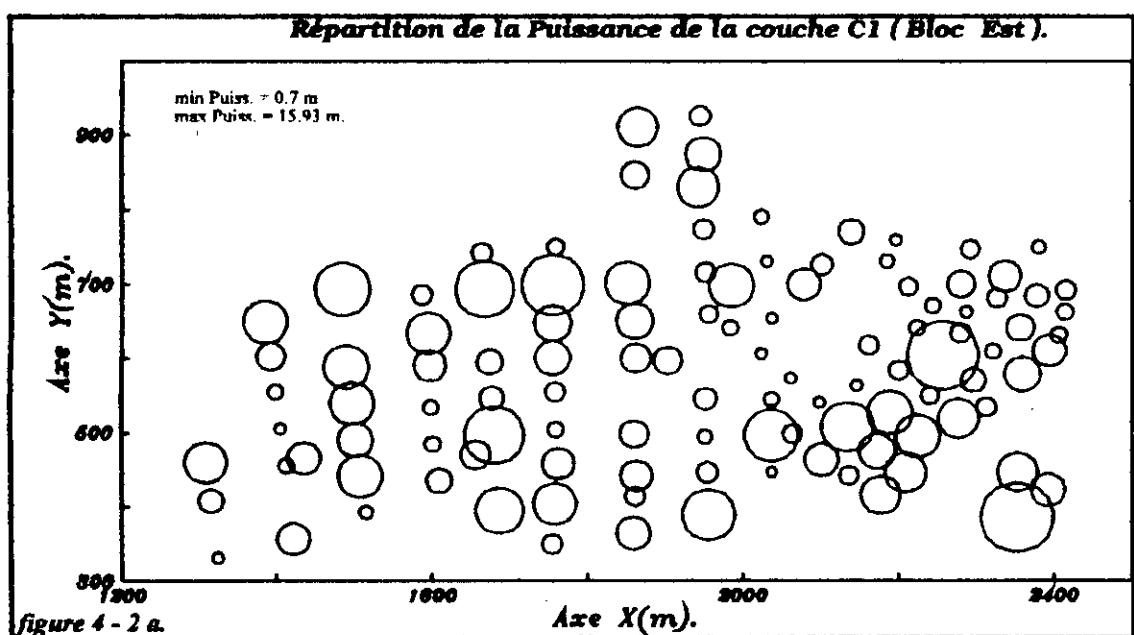
En somme, nous pouvons affirmer que la distribution spatiale des sondages est moyennement bonne. En raison d'une part du changement de maille entre les deux moitiés du champ de prospection et d'autre part à cause des lacunes ou aires non échantillonnées. Cette répartition n'est pas sans impact sur les résultats de l'estimation, en effet plus nous manquons d'informations moins notre évaluation est crédible.

4. 3. 1. 1. Distribution géographique de la Puissance de la couche C1

La puissance de la couche minéralisée est variable (*figure 4 2 a*), ceci est en accord avec l'hypothèse que la minéralisation s'était logée dans les décollements interstrates [1]. En effet le problème de grandes valeurs entourées par des petites est très apparent.

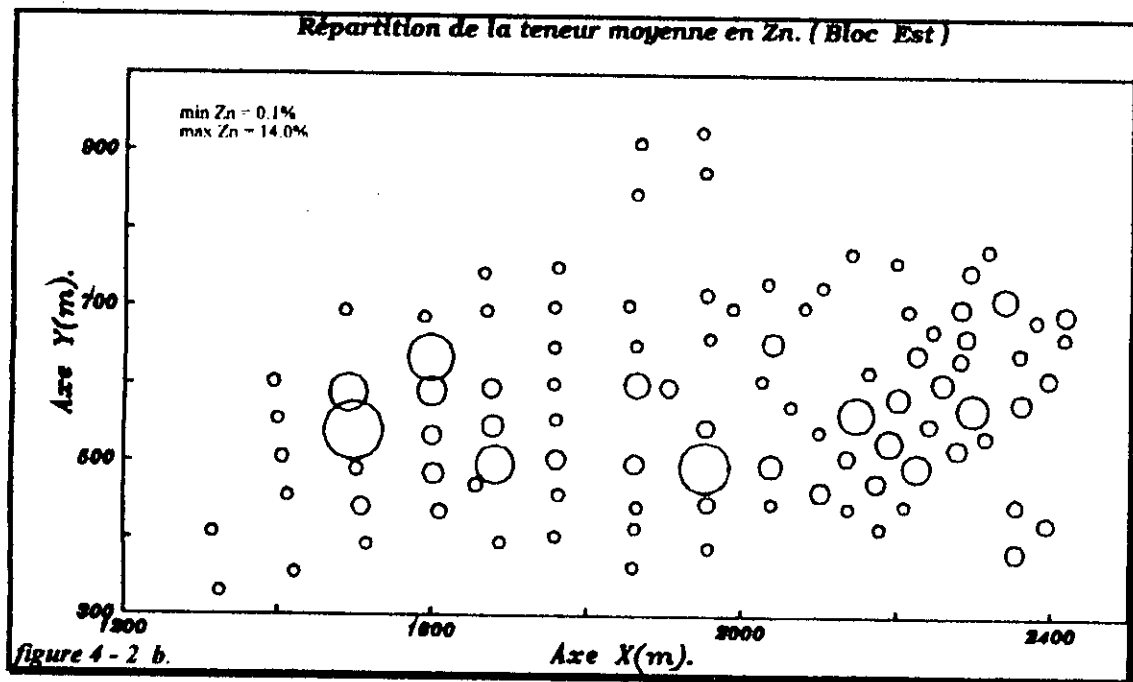
Cependant des zones de puissances moyennes à élevées semblent se détacher dans la partie extrême Sud Est et la moitié Ouest. Quant à la zone centrale elle est surtout marquée par l'absence d'échantillonnage (sondages) et des moyennes à faibles valeurs.

On peut remarquer dès à présent que cette variable a priori mal structurée spatialement, influencera le variogramme qui sera marqué par un important effet de pépite. En effet le fait d'avoir des prélèvements voisins mais dont les valeurs sont très différentes, est en contradiction avec le principe de zone d'influence ou portée en jargon géostatistique.



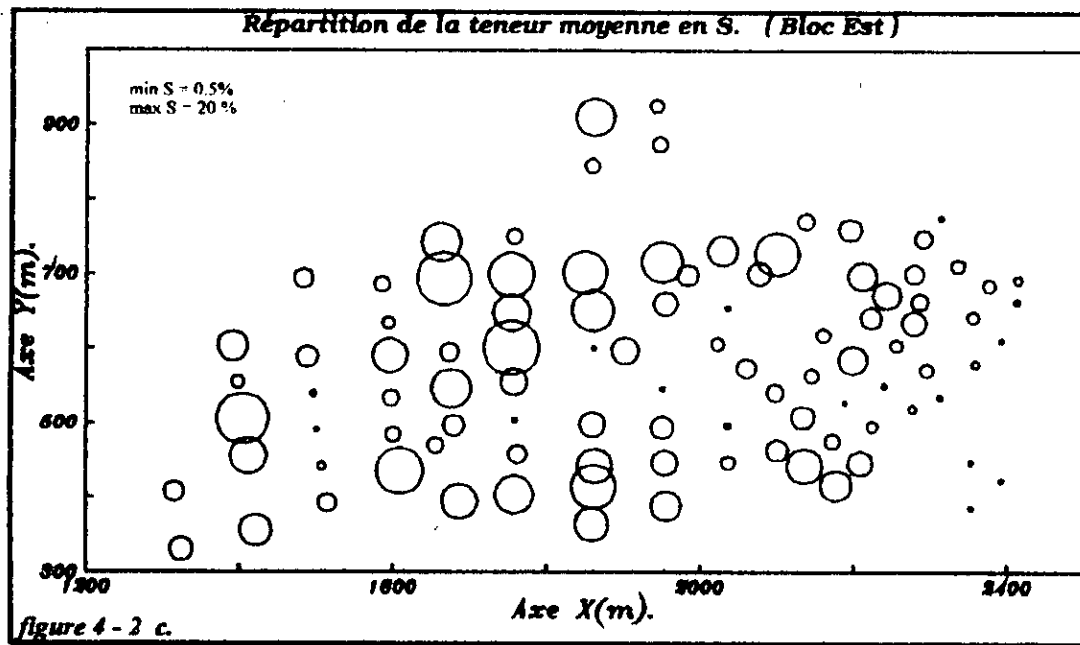
4. 3. 1. 2 Distribution géographique de la teneur en Zinc

D'après la *figure 4 2 b*, le gisement est pauvre en Zn. La plus part des sondages accusent une teneur plus ou moins faible, à l'exception des deux régions Sud Est, avec des valeurs plus ou moins moyennes, et la région Ouest avec quelques valeurs légèrement élevées. Là aussi figure le problème de grandes valeurs entourées par des petites, qui risque de compromettre le calcul variographique.



4. 3. 1. 3. Distribution géographique de la teneur en Soufre Pyriteux :

La teneur en soufre pyriteux présente ici (*figure 4 2 c*) une meilleure distribution que les précédentes variables. Une majorité des valeurs, moyennes à élevées, occupe la région centrale. Tandis qu'une proportion des valeurs moyennement faibles se localise à l'extrémité Sud Est.



4. 3. 2. ETUDE STATISTIQUE DES VARIABLES DE TRAVAIL

Après l'idée que nous nous sommes faite de la distribution géographique des teneurs des échantillons, nous passons à l'étude statistique des variables de travail.

4. 3. 2. 1. Variabilité de la Puissance de la couche C1

Les histogrammes et les courbes des fréquences cumulées des valeurs naturelles et logarithmiques de la variable Puissance sont données dans la *figure 4 3*.

Nous pouvons aisément constater la grande variabilité de la puissance (*figure 4 3 a*). Il y a présence de toute la gamme des valeurs avec une proportion assez élevée des moyennes à faibles valeurs (75% des valeurs sont au dessous de 7.2m avec un max = 15.93m). La courbes des fréquences cumulées dessine en même temps une droite plus ou moins brisée à ses extrémités en particulier.

La distribution des fréquences n'a pas de forme particulière, sa queue peu prononcée vers les grandes valeurs la rapproche de la forme Lognormale.

En effet si on observe les valeurs logarithmiques (*figure 4 3 b*) on constate nette évolution vers une courbe Normale, mais toujours perturbée par les fréquences en pic isolés. Cependant la moyenne est assez proche de la médiane, la courbe des fréquences cumulées

confirme ces remarques par une "droite" meilleure qu'en valeurs naturelles, mais avec des coudes apparents.

Tout compte fait la distribution des valeurs de la puissance de la couche mineralisée n'est ni Normale ni Lognormale. L'addition d'une constante aux valeurs naturelles[4] peut rapprocher la distribution de leurs valeurs logarithmiques de la loi Normale.

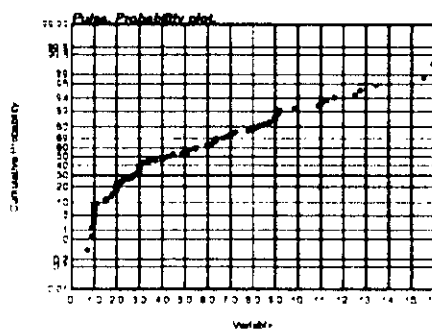
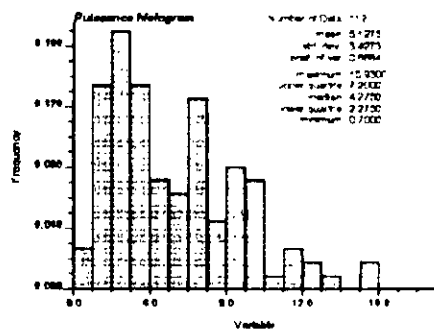
Cette constante s'exprime en fonction des différents quartiles de la population même:

$$k = \frac{x_{50} - x_{75}x_{25}}{x_{25} + x_{75} - 2x_{50}}$$

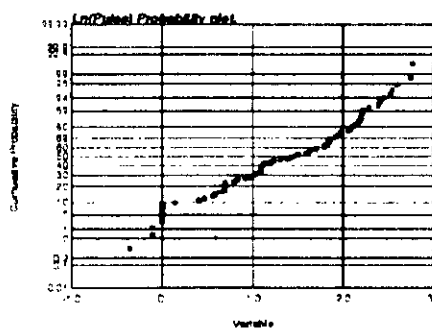
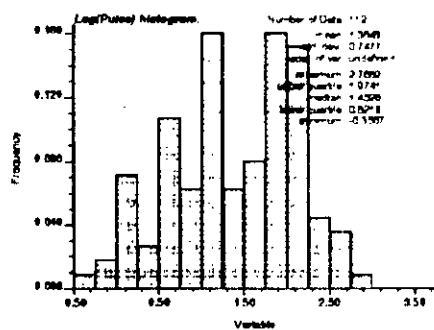
Où : les x_i représentent les valeurs des quartiles i

Une application numérique, dans notre cas, donne :

$$k = -13.1m$$



a)-



b)-

Figure 4 3 a, b.

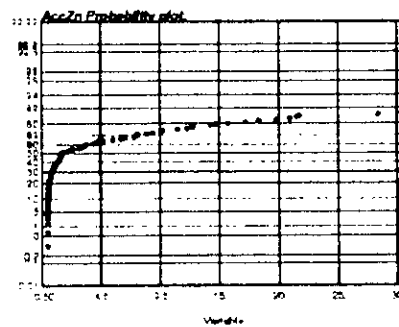
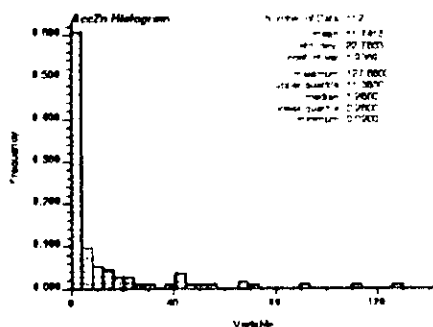
4. 3. 2. 2. Variabilité de l'accumulation en Zinc dans C1

Là aussi la traduction statistique de l'accumulation en Zn (*figure 4 4 a*) révèle une importante proportion de faibles valeurs (50% des valeurs sont inférieures à 1.26 m.%, avec une valeur $\text{maxAccZn} = 127.66\text{m.}\%$) avec un histogramme de longue queue vers la droite (distribution typique des éléments rares).

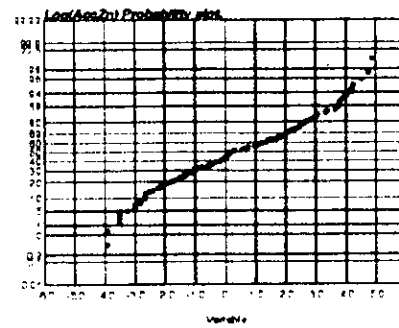
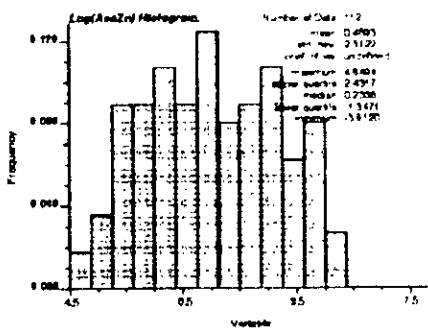
La courbe des fréquences cumulées dessine en effet une droite en forme de L. ce qui révèle bien l'existence de deux populations dissemblables, les basses et hautes valeurs, en l'occurrence.

Nous constatons que la distribution se rapproche assez bien de la loi logNormale. Néanmoins elle a une étendue assez rétrécit, la courbe des fréquences cumulées est alors presque rectiligne sauf à ses extrémités où elle est légèrement "brisée". C'est pourquoi, considérer la variable logarithmique est plus intéressant (*figure 4 4 b*).

Ceci nous permet d'affirmer que les valeurs de l'accumulation en Zn (AccZn), dans le bloc Est du gisement Chabet el Hamra, sont distribuées suivant une loi Lognormale, aux erreurs expérimentales près. Avec une moyenne et un écart type logarithmiques de $\alpha = 0.489$ et $\beta = 2.312$ respectivement.



a)-



b)-

Figure 4 a. b.

Variabilité de l'accumulation en Soufre dans C1:

La distribution des valeurs de l'accumulation en Soufre (*figure 4 5 a, b*) est surtout influencée par une forte fréquence des basses valeurs et une queue vers les grandes. Elle épouse ainsi la forme d'une distribution logarithmique à queue réduite.

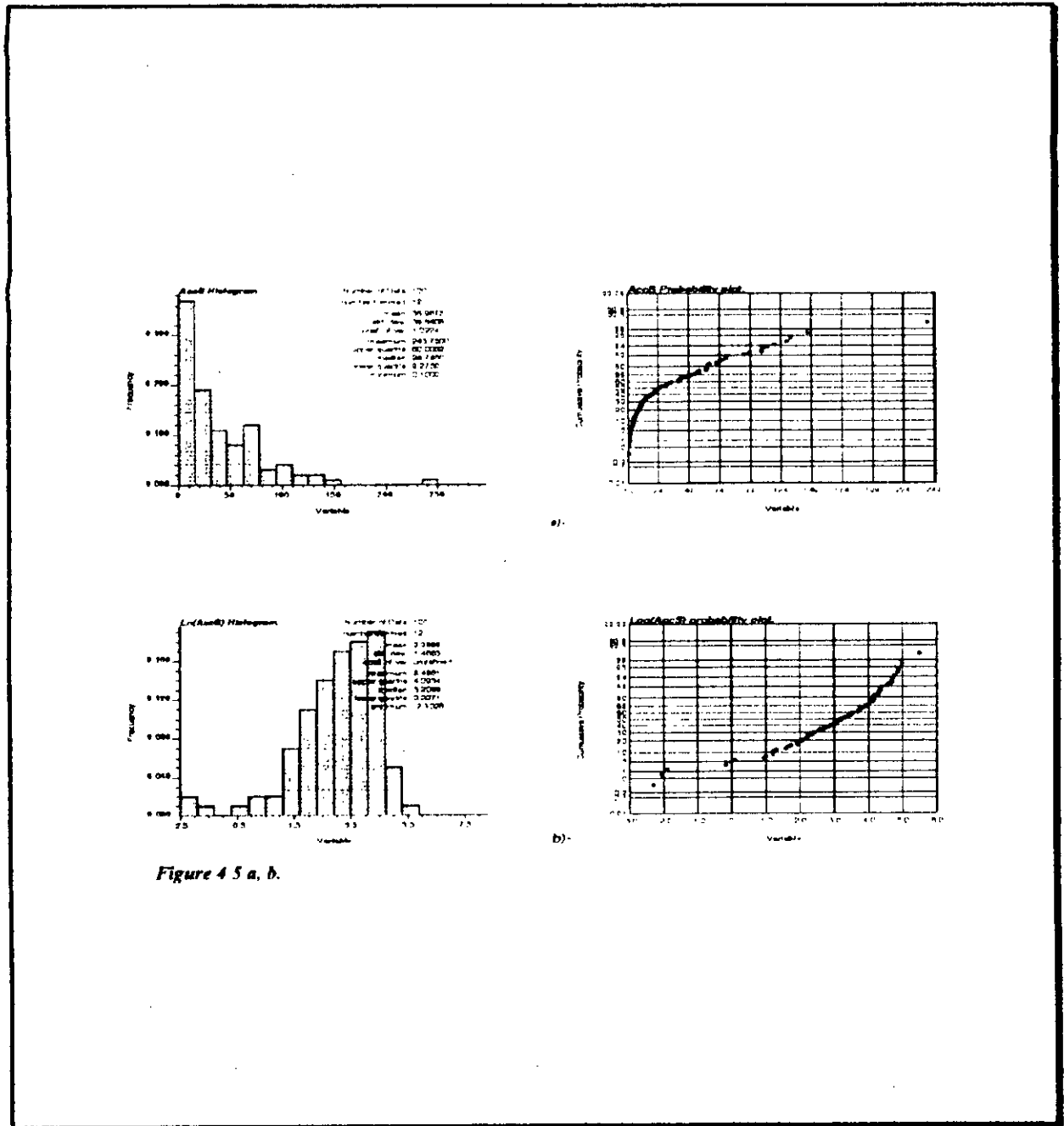


Figure 4 5 a, b.

La courbe des fréquences cumulées est marquée par un point d'inflexion apparent, qui révèle l'existence également, de deux populations distinctes. Ce sont les basses et les

moyennes valeurs. Près de 50% des valeurs sont inférieures à $24.74(m\%)^2$, le reste s'étirant entre $24.74(m\%)^2$ et $243.75(m\%)^2$.

L'histogramme des valeurs logarithmiques n'est pas fameux non plus, il prend la forme de la moitié d'une cloche avec une queue vers la gauche. La courbe des fréquences cumulées correspondante dessine une droite légèrement courbée, avec à son extrémité inférieure des valeurs nettement dissociées.

D'après ces observations, la distribution de la variable AccS n'est ni Normale ni Lognormale.

Chapitre 5

5. ETUDE VARIOGRAPHIQUE DES VARIABLES

Après avoir effectué l'analyse statistique des données, nous passons, dans ce qui suit, à l'étude variographique proprement dite. Nous essayerons de formuler mathématiquement la variabilité du paramètre étudié dans l'espace échantillonné. Une fois le modèle numérique obtenu (semi-variogramme), nous l'utiliserons pour prédire et estimer ce même paramètre en des points ou ensembles de points (aires) qui n'ont pas été échantillonnés.

La pratique de la géostatistique a conduit à la mise en place de différentes règles d'usages qui conduisent à un calcul rapide et optimal du variogramme. Ce dernier est approché par la moyenne arithmétique des écarts quadratiques entre les échantillons situés à une distance donnée.

Si les points échantillonnés sont implantés suivant une grille régulière, on fixe à chaque fois l'incrément h et on calcule le variogramme comme indiqué ci-dessus.

Si par contre les échantillons sont disposés irrégulièrement, on effectue un regroupement par classe de distance, moyennant une tolérance égale d'ordinaire à la moitié de h .

D'habitude l'étude de la continuité spatiale de la variable commence tout d'abord par un variogramme omnidirectionnel pour lequel la tolérance angulaire est tellement large ($\pm 90^\circ$) qu'il représente toutes les directions du plan. Donc il ne contrôle que la distance h .

Ce type de variogramme peut être accusé de non représentativité, car il représente la "moyenne" de toutes les directions. Cependant, en guise de point de départ, il procure beaucoup d'informations concernant certains paramètres importants dans le calcul des variogrammes directionnels, comme par exemple, le meilleur incrément h qui donne la meilleure structure, la plus claire et la plus proche de la théorie. En règle générale le calcul

se fait sur une distance L égale à la moitié, voir au quart, du domaine de variation du phénomène et pour des incréments de l'ordre du dixième de L .

En effet le variogramme omnidirectionnel regroupe le maximum de paires de points, donc en position adéquate pour produire une meilleure structure. Si ce n'est pas le cas, on ne peut pas espérer mieux dans les variogrammes directionnels.

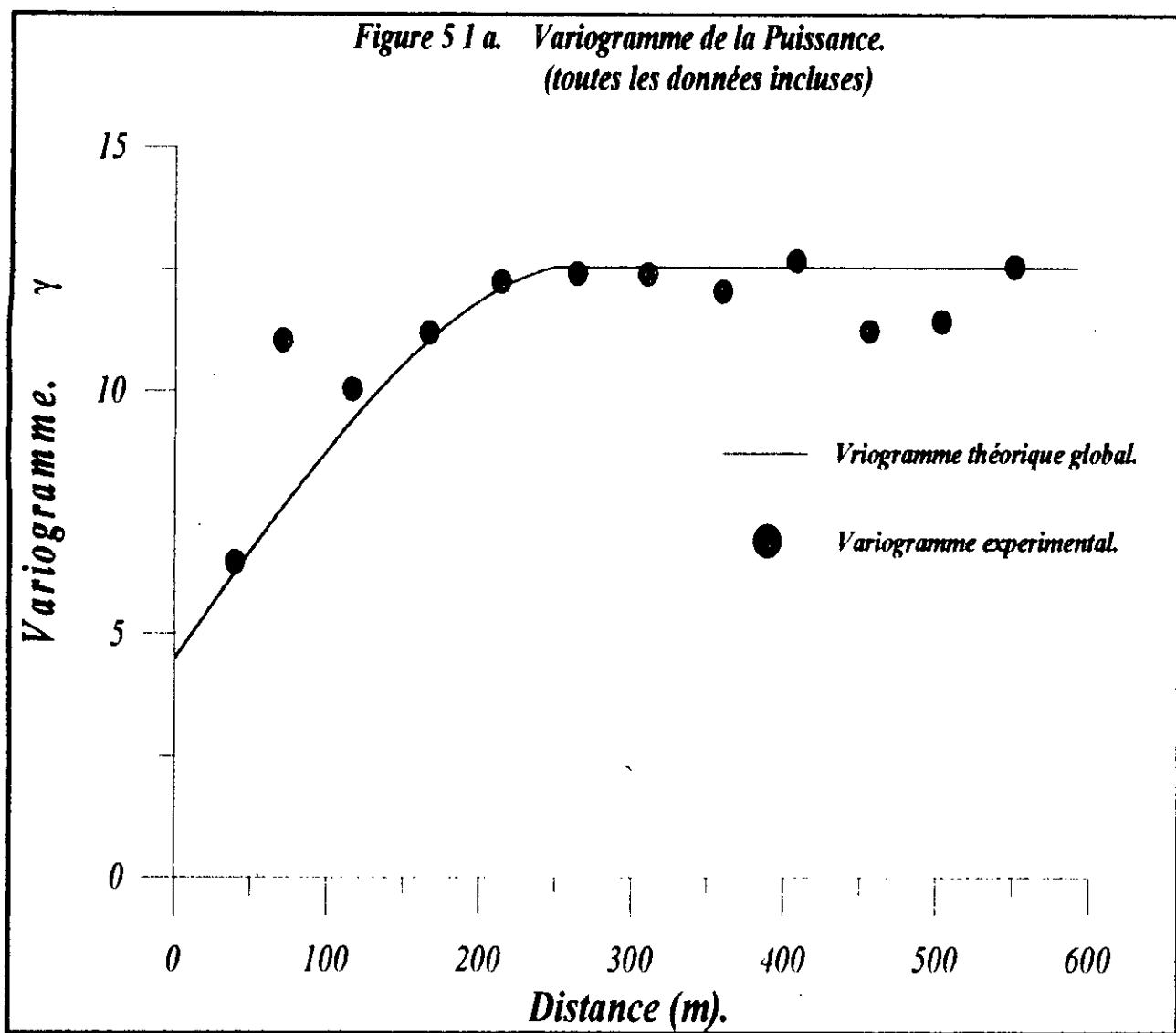
Si le variogramme omnidirectionnel s'avère bien, on entame alors l'étape suivante qui a pour but de déterminer l'anisotropie (Axes de maximum et de minimum continuité). Une bonne approche, pour découvrir ces axes, c'est de calculer les variogrammes dans plusieurs directions et de les utiliser pour tracer un diagramme en rosace.

Parfois, les variogrammes présentent une allure anormale qui est souvent due aux valeurs extrêmes. Il est souvent utile d'étudier leur séparation du reste des données.

Dans notre cas, le champs minier du bloc Est long de quelque 1200m, par conséquent nous avons limité les calculs du variogramme à la moitié de cette grandeur (600m) avec des incréments aux environs de 60m.

5. 1. VARIOGRAMME DE LA VARIABLE PUISSANCE

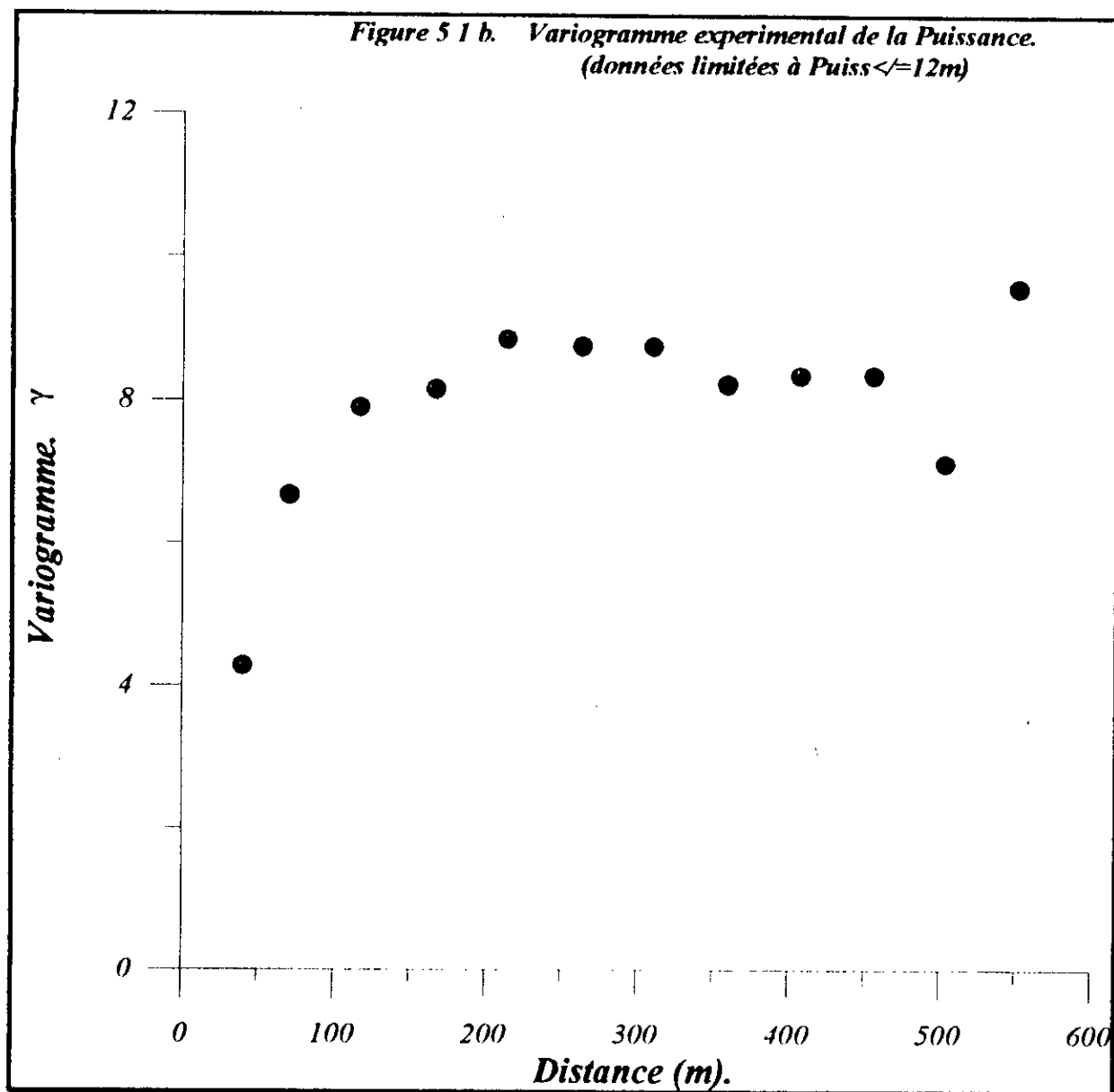
Le variogramme expérimental (points) de la Puissance minéralisée est représenté dans la *figure 5.1 a* ci-dessous. Il présente une très bonne allure générale dans la mesure où les points expérimentaux décrivent plus ou moins un modèle sphérique. Cependant l'effet de pépité d'environ $4.5(m.\%)^2$ s'impose fortement devant un palier d'environ $8(m.\%)^2$, la portée étant de 250m.



La pente relativement rapide du variogramme, aux environs de l'origine, suggère une variabilité peu corrélée du phénomène aux petites distances. On remarque également que le second point se détache de l'allure que semblent dessiner les autres.

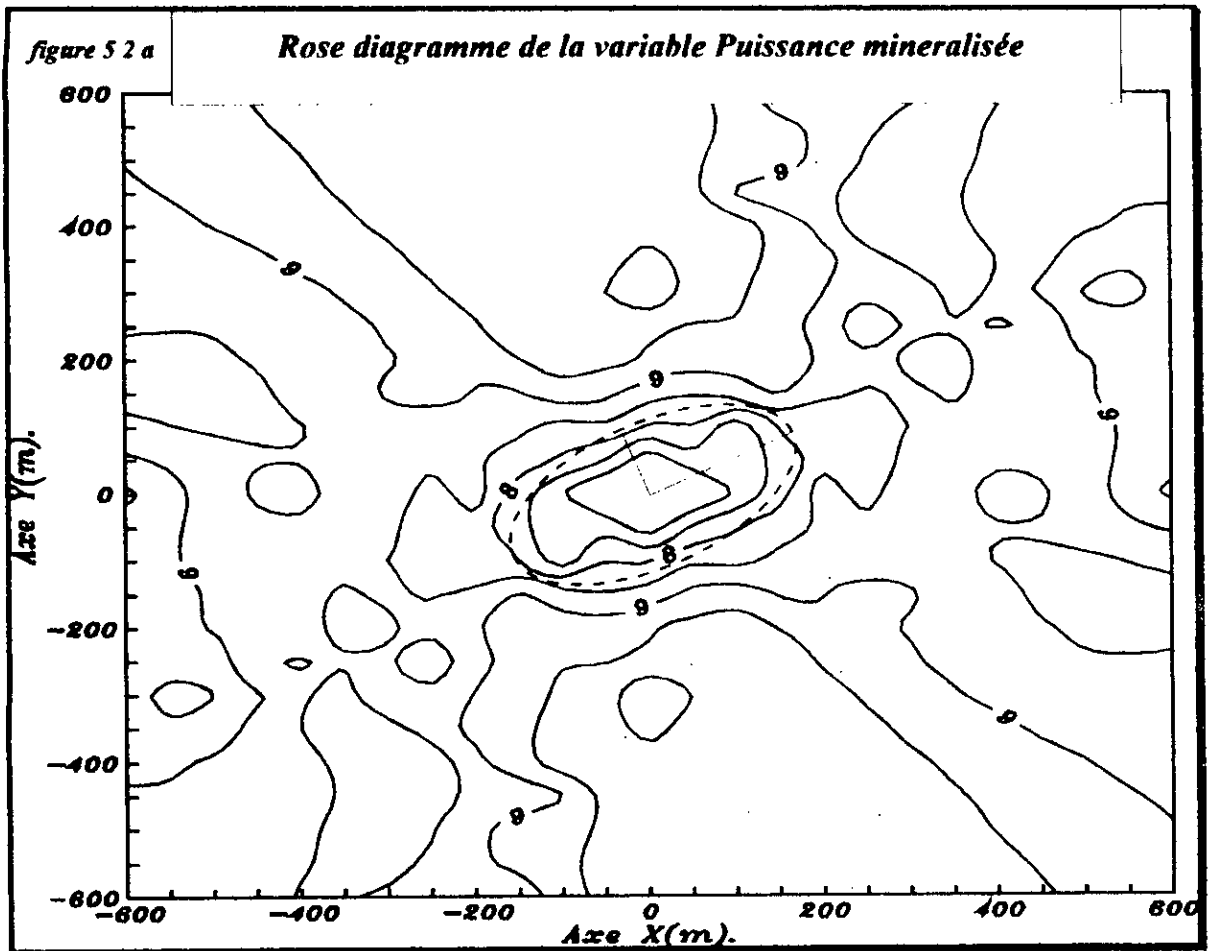
Ceci est en fait dû à la présence de la valeur extrême 15.93m dans l'ensemble de ses paires de points. L'écart de celle-ci de la base de données a été envisagée, le résultat est en effet nettement meilleur (*figure 5 1 b* ci dessous). C'est pourquoi nous avons décidé de faire la même chose pour le calcul des variogrammes directionnels, c'est à dire écarter la valeur extrême sus indiquée. Nous la ferons cependant intervenir lors du krigeage.

Aux environs de la distance 400 à 500m on remarque une légère dépression de la courbe, elle suggère en fait que les point distants d'environ 400 à 500m sont plus corrélés que les points distants, par exemple, de 300m ou de 600m



Afin d'examiner l'isotropie de cette variable, nous avons tracé un rose diagramme, où sont portés les variogrammes de toutes les directions du plan à intervalles réguliers de 15° , *figure 5.2 a*. L'allure allongée des courbes concentriques au centre de la figure suggère la présence de directions de continuité préférentielles du phénomène. C'est à dire présence d'une anisotropie, dont le grand axe mesuré d'angle 24° et de petit axe mesuré d'angle 114° .

A ce stade on ne peut pas savoir s'il s'agit d'une anisotropie géométrique, c'est à dire que la portée de la variable change d'amplitude suivant la direction, mais son palier reste constant, ou alors il s'agit d'une anisotropie zonale, où et la portée et le palier varient en fonction de la direction.



Afin de résoudre cette question nous devons tracer les variogramme dans les deux directions, supposées de grande et petite continuité, leur superposition montrera s'il s'agit d'une anisotropie zonale ou géométrique *figure 5.2 b*. Effectivement cette figure montre qu'il s'agit bien d'une anisotropie zonale, puisque les paliers des deux directions sont nettement différents. Cependant leurs effets de pépite sont sensiblement les mêmes, et leur portées assez comparables, 250m pour l'un et 300m pour l'autre.

Par conséquent la continuité de la puissance minéralisée est meilleur suivant la direction 24° , par rapport à la direction 114° , c'est à dire que les échantillons sont plus

corrélés dans cette direction du plan. Cependant on remarque la présence d'un effet de pépite de $4.5m^2$ assez important devant un palier de $8m^2$.

Suivant la direction 114° la continuité de la variable est moins bonne, l'effet de pépite est ici moins important par rapport au palier. Cependant on remarque qu'au delà de 300m la courbe expérimentale suit une pente négative. Ce qui révèle qu'au delà de 300 à 350m la variable a tendance à redevenir de plus en plus corrélée.

Les variogrammes dans ces deux directions sont contrôlés par les paramètres suivants :

Grand axe direction 24° :

modèle Sphérique.

pépite $C_0 = 4.5 (m. \%)^2$

palier $C_0+C = 3.5+4.5 = 8(m. \%)^2$

portée $a = 250 m$.

Petit axe direction 114° :

modèle Sphérique.

pépite $C_0 = 4.5 (m. \%)^2$

palier $C_0+C = 4.5+6.00 = 10.5(m. \%)^2$

portée $a = 300 m$

En présence d'une anisotropie zonale, qui est plus compliquée à modéliser qu'une anisotropie géométrique, il n'existe pas de formule précise pour la modélisation du variogramme global.

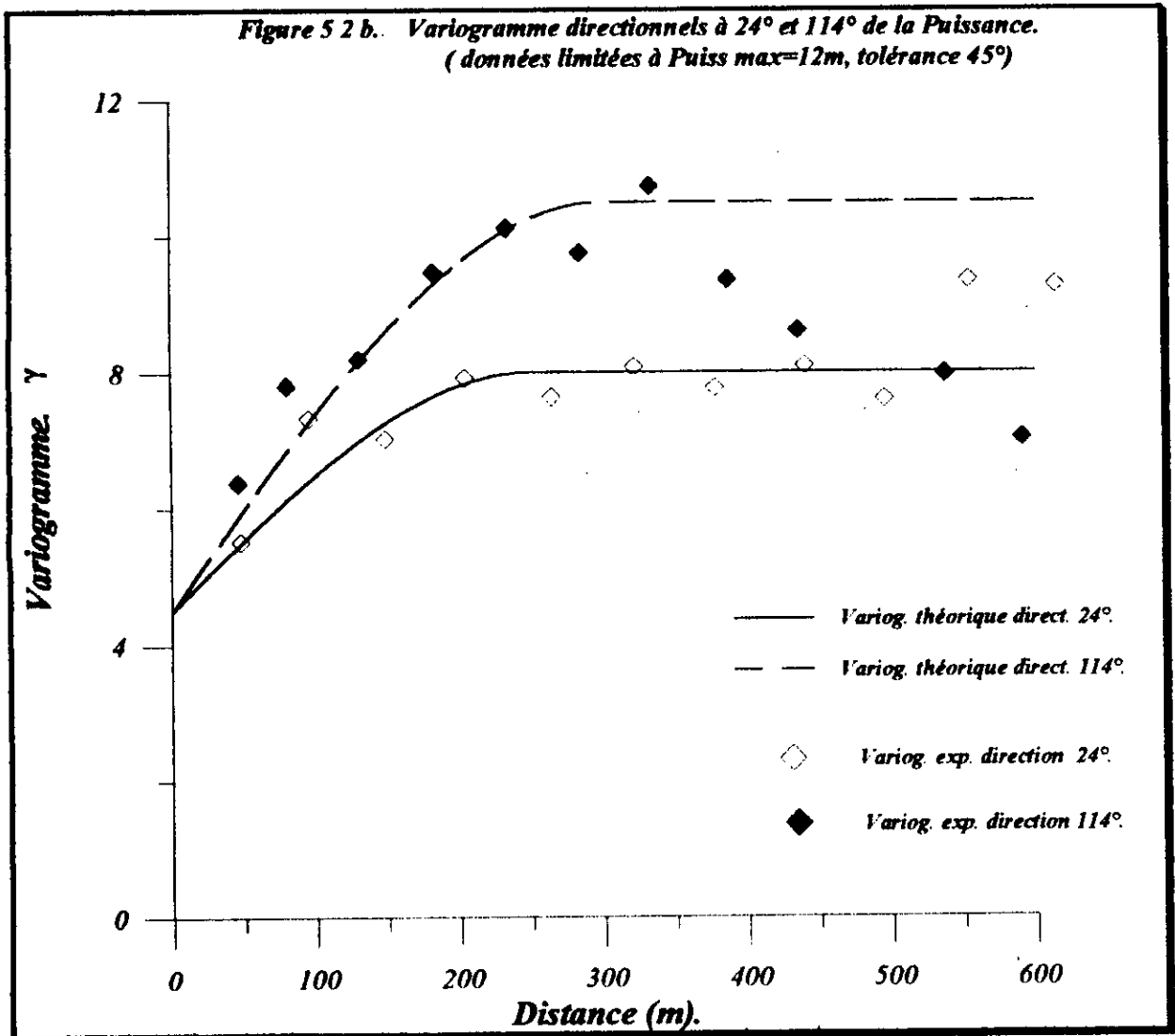
On considère qu'on est en présence d'un type de structure gigogne [3;4], c'est à dire superposition de structures différentes.

Le semi variogramme global est alors approché dans ce cas par la somme de deux modèles. L'un isotrope, que l'on prendra ici égale au modèle à 24°, et que l'on complétera par un modèle anisotrope de façon à l'ajuster à la courbe expérimentale de la figure 5. 1. a. précédente.

$$\gamma = C_0 + C_1 \gamma_{24} + C_2 \gamma_{114}$$

$$\gamma = 4.5 + 3.5 \text{ Sph}_{250} + 4.75 \text{ Sph}_{300}$$

Ce dernier sera utilisé pour le krigeage de la puissance minéralisée pour des unités minières (blocs).



5. 2. VARIOGRAMME DE LA VARIABLE ACCZN

Le variogramme de la variable AccZn est porté sur la *figure 5.3*. Les points expérimentaux montrent une allure très perturbée, qui dessine difficilement une courbe en sphérique. Ceci est en fait prévisible si on observe l'histogramme des valeurs (*fig 4 3*), qui est proche d'une courbe en logNormale. C'est à dire grande fréquence de basses valeurs avec, en même temps, une bonne proportion de valeurs en pic. Ceci influera sur le variogramme à condition que leur distribution spatiale soit aussi mal structurée. Chose qu'on voit clairement sur la *figure 4 2 a*.

On remarque qu'aux environs de l'origine les points ont tendance à dessiner une pente douce qui confère à la courbe l'allure d'un pur effet de pépité. Ce qui est en accord avec l'histogramme tracé en *figure 4 4*.

C'est pourquoi nous recommandons de nouveaux prélèvements concernant cette variable, mais cette fois ci avec une maille plus réduite (inférieure à 50m), ceci afin de voir si cette absence de structure n'est pas due à l'échelle d'observation.

On constate également que les points expérimentaux n°6 et n°8 se "détachent" du palier suggérant une reprise de la corrélation entre les couples de points distants d'environ 300m et 400m. Mais ce n'est probablement pas le cas, ce serait plutôt du, encore une fois, aux valeurs extrêmes.

En résumé nous avons quand même ajusté un modèle théorique sphérique dont les paramètres sont:

Modèle Sphérique.

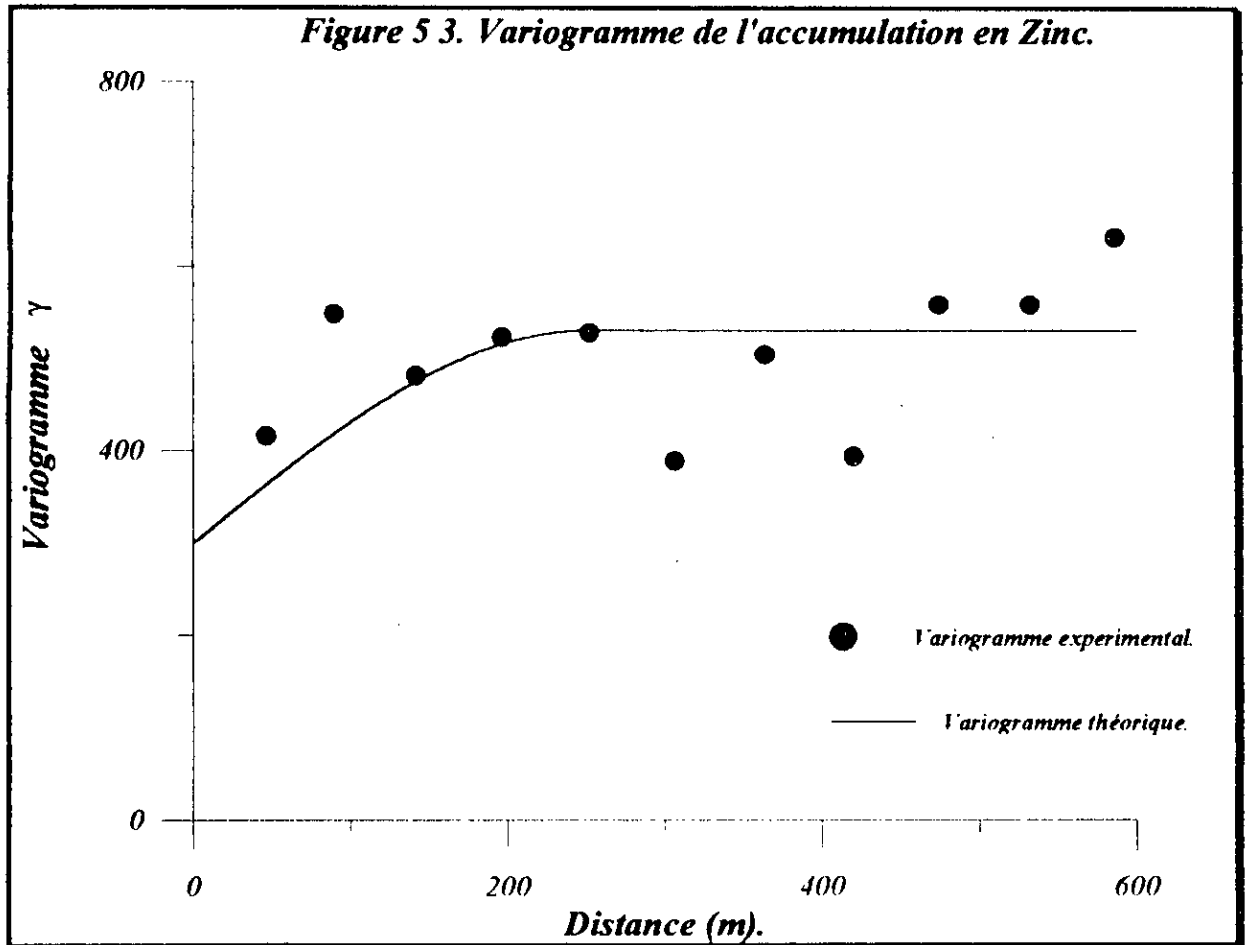
effet de pépité $C_0 = 300 (m. \%)^2$

palier $= C_0 + C = 300 + 230 = 530 (m. \%)^2$

portée $a = 250 m.$

$$\text{Donc} \quad \gamma(h) = 300 + 530 \text{ Sph}_{250}$$

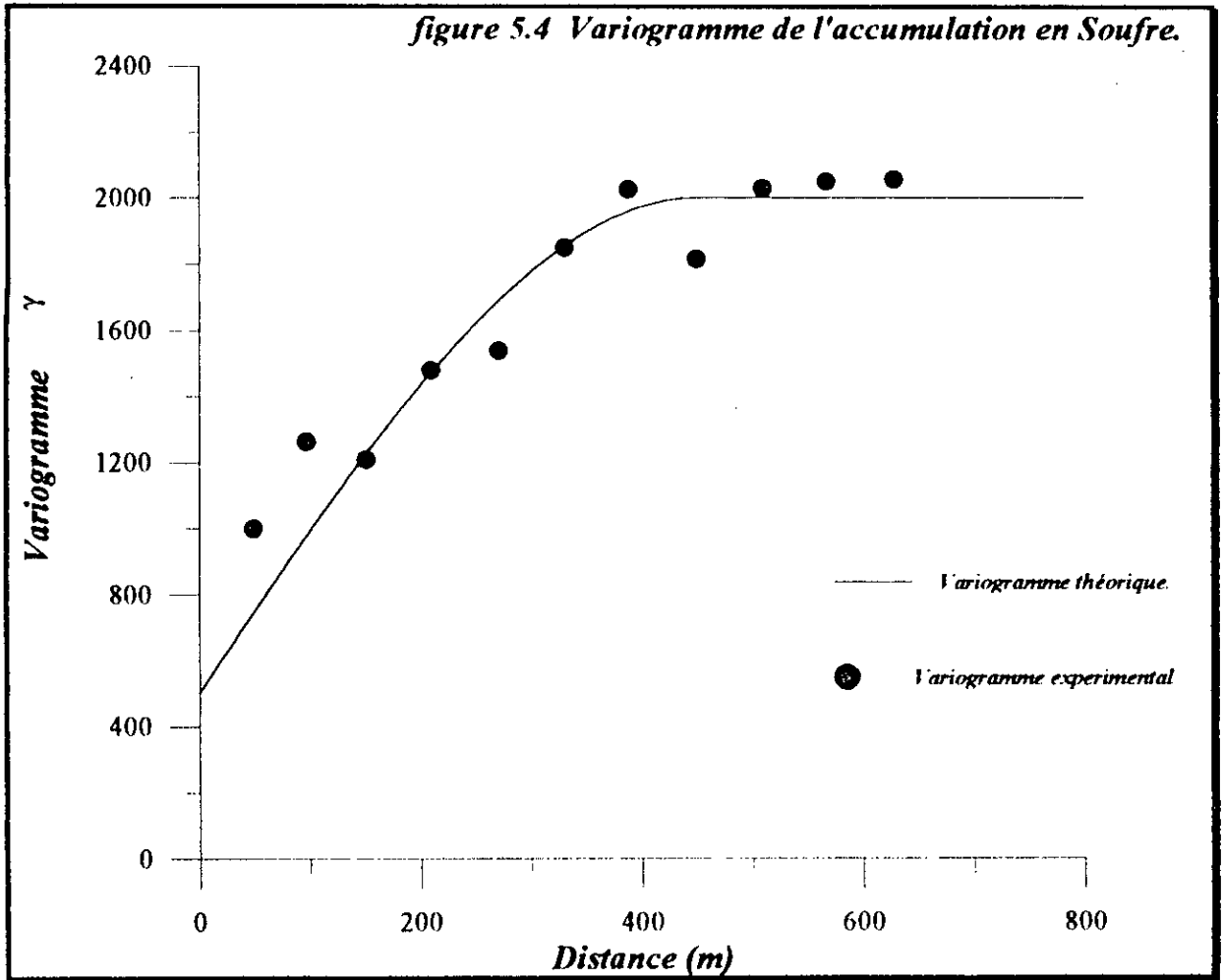
L'examen de l'anisotropie de cette variable n'a montré aucune tendance. La variable *AccZn* est considérée isotrope et sera donc représentée par le modèle omnidirectionnel décrit ci dessus.



5.3. Variogramme de la variable AccS :

La *figure 5.4* présente le variogramme expérimental et théorique de l'accumulation en Soufre. Contrairement à la variable AccZn précédente, on constate que ce paramètre présente une variabilité mieux structurée. C'est une déduction logique des données initiales, qui sont, elles mêmes, distribuées suivant une certaine harmonie (fig. 3 2 c).

En effet on remarque qu'aux environs de l'origine, de nombreux points expérimentaux dessinent une courbe à pente moyenne, ce qui révèle une bonne continuité de la variable dans le domaine de variation. De même la portée d'environ **450m** est assez conséquente par rapport aux variables précédentes. L'effet de pépite de $500(m\%)^2$ est également acceptable par rapport au plier de $2000(m\%)^2$



Il est évident que l'ajustement théorique qui convient dans ce cas est le modèle sphérique de paramètres:

modèle Sphérique.

effet de pépité $C_0 = 500(m. \%)^2$

palier = $C_0 + C = 500 + 1500 = 2000(m. \%)^2$

portée $a = 450m.$

Quant à l'anisotropie, là aussi l'examen du diagramme en rose du variogramme n'a montré a priori aucune tendance.

Chapitre 6

6. KRIGEAGE ET ESTIMATION GLOBAL DES RESERVES

6. 1. KRIGEAGE D'UNITES MINIERES

Le krigeage est une technique d'estimation propre à la géostatistique, elle consiste à procurer le meilleur estimateur linéaire possible de la teneur, d'un panneau par exemple, au moyen des informations disponibles (échantillons).

L'estimateur Z^* de la valeur vraie Z s'exprime en fonction des N valeurs connues:

$$Z^* = \sum_{i=1}^N \omega_i Z_i$$

Les poids ω_i sont calculés de façon à avoir un estimateur sans biais, c'est à dire que l'espérance (moyenne) des erreurs commises est nulle, et d'autre part que leur variance soit minimale :

$$E\{Z - Z^*\} = 0$$

$$E\{(Z - Z^*)^2\} \text{ minimale.}$$

On démontre que ces deux conditions sont équivalentes à résoudre un système d'équations qui fait intervenir les échantillons connus par leur modèle variographique.

Dans le cas de krigeage de blocs, il s'écrit :

$$\sum_{j=1}^n \omega_j C_{ij} + \mu = C_{iB} \quad \forall i = 1 \dots n$$

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

Où: C_{ij} représentent les covariances entre les variables aléatoires V_i et V_j

C_{iB} représentent les covariances moyennes entre les V_i et les points du bloc B

μ multiplicateur de Lagrange.

Chaque bloc à kriger doit être discretisé par un nombre de points, leur valeur moyenne estimée (par krigeage ponctuel) représentera alors celle du bloc en question. La meilleure façon de discretiser les blocs est la suivante [5]:

- Les points de discretisation doivent être disposés suivant une grille régulière, afin d'assurer que chacun des points compte pour la même portion de surface.
- L'interdistance entre les points doit être plus large dans la direction de grande continuité, par rapport à celle de faible continuité, si le phénomène est anisotrope.
- Plus le nombre de points de discretisation augmente plus la fiabilité de l'estimation est meilleure, cependant le temps de calcul se trouve lui aussi multiplié.
- En pratique il a été vérifié qu'une grille de 4x4 (16 points), pour les blocs à deux dimensions, donne des résultats satisfaisants.
- Chacun des points de discretisation est estimé au moyen du krigeage ponctuel. Leur valeur moyenne sera celle du bloc. Lors de l'estimation de ces points, on définit un cercle de recherche, centré au point à considérer, et le nombre d'échantillons minimum et maximum à introduire dans le calcul.

Le cercle de recherche est fonction de l'ellipse des portées. En pratique on le prend légèrement plus petit. Quant au nombre d'échantillons à considérer, il est en moyenne de huit points.

L'intérêt pratique du krigeage réside dans l'outil qu'il procure au mineur. En effet il résulte de cette opération une carte de la répartition spatiale des blocs avec la teneur krigée et la variance d'estimation correspondante.

Cela est bénéfique sur plusieurs plans:

1. L'étude de faisabilité sera désormais plus fiable. On peut en effet fournir de solides prévisions en matière de frais d'ouverture, de méthode d'exploitation, de coût de production...en somme on peut calculer la plupart des charges avec une bonne précision et de là le prix de revient.
2. Il procure au mineur un outil de planification de l'exploitation. Connaissant la répartition des panneaux, il est plus facile de tracer le découpage de la mine et de prévoir dès lors la date d'entrée en production et les paramètres qualitatifs et quantitatifs correspondants. Aussi pourra t-il, en fonction de la teneur de coupure, déterminer quels sont les panneaux exploitables.
3. Cela donnera également à l'usine de traitement l'occasion de prévoir le réglage des appareils en conséquence pour toute la durée nécessaire.
4. Connaissant la répartition des blocs en fonction de la teneur, l'exploitation sélective est ainsi rendue une opération très aisée.

Tous ces facteurs, et bien d'autres, sont une conséquence de l'étude géostatistique. Ils contribuent pleinement à la rentabilité de l'entreprise minière et à son développement.

Dans le présent travail nous avons considéré des unités minières en forme de blocs carrés de 50m de coté. Cette grandeur correspond en moyenne à la dimension d'un panneau

d'exploitation dans les mines souterraines Algériennes de Plomb Zinc (El Abed, Kherzet Youcef).

Chaque bloc a été discretisé au moyen d'une grille de 4x4 points. Le cercle de recherche a été pris légèrement inférieur au cercle des portées.

6. 1. 1. KRIGEAGE DE LA PUISSANCE MINERALISEE

Le modèle global qui décrit la variabilité de la puissance minéralisée est le suivant:

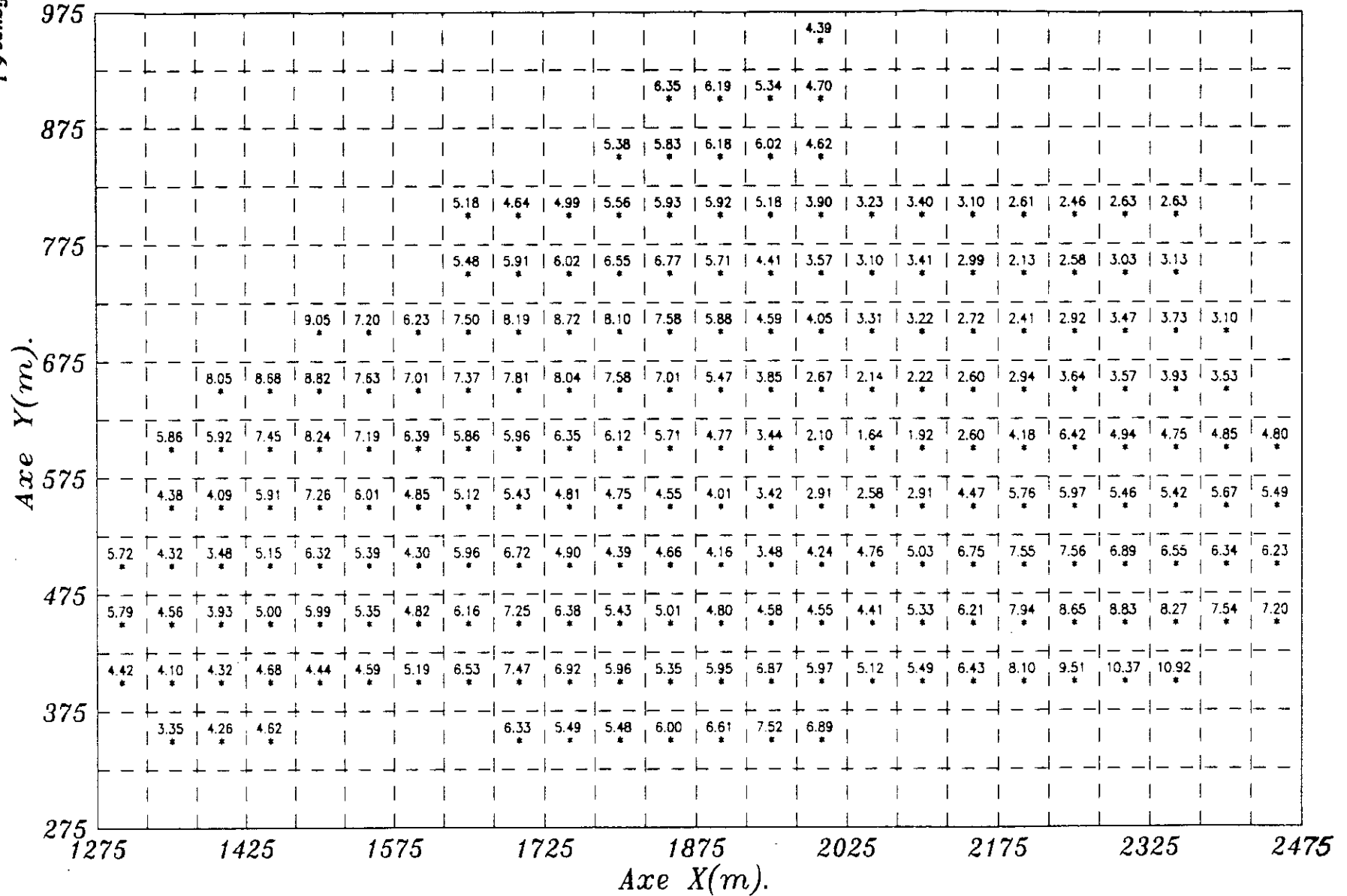
$$\gamma = 4.5 + 3.5 Sph_{250} + 4.75 Sph_{300}$$

Nous avons conduit le krigeage sur des blocs carrés de 50m de côté. Le cercle de recherche prend la forme d'une ellipse, à cause de l'anisotropie, de petit axe de 230m et de grand axe de 270m. Cette ellipse a été ensuite sectionnée en quatre secteurs en raison des échantillons de bordure. Chaque secteur devant comporter au maximum 8 échantillons. L'ensemble des quatre secteurs doit admettre un minimum de 8 échantillons. Enfin deux secteur vides sont tolérés à la fois, en raison des blocs périphériques.

Nous avons introduit tous ces paramètres dans le programme Krige de GEOEAS [22]. Le résultat de la répartition de la puissance des blocs est donné dans la *figure 6 1*. ci dessous. Chacun des petits carrés représente un bloc au centre duquel est portée la puissance minéralisée krigée correspondante.

Blocs (50m.50m) Krigés pour Puiss.

Figure 6 1



6. 1. 2. KRIGEAGE DE L'ACCUMULATION EN Zinc

Le variogramme qui décrit la variabilité de l'accumulation en Zinc dans la minéralisation suit un modèle isotrope qui s'écrit :

$$\gamma(h) = 300 + 530 Sph_{250}$$

Nous avons procédé au krigeage des mêmes unités minières que les précédentes (blocs de 50m de côté). Le cercle de voisinage a un rayon de 230m, divisé en quatre secteurs. Chaque secteur doit comporter un maximum de 8 points et un minimum total de 8 points. Un seul secteur vide est toléré à la fois. La *figure 6 2* présente la répartition des blocs et leurs valeurs en AccZn estimées correspondantes.

Afin d'apprécier les résultats de ce de krigeage, nous avons tracé la répartition de l'accumulation krigée des blocs (*figure 6 6*) et des variances correspondantes (*figure 6 4*).

Ces deux figures montrent, encore une fois, que le gisement est relativement pauvre en zinc, et qu'il se dégage deux zones de fortes valeurs. La zone extrême Sud (à droite de la figure), où les sondages avaient montré une certaine richesse, et la zone Nord (à gauche de la figure), qui elle est due aux quelques sondages aux valeurs en pic.

La *figure 6 4* montre de son côté la répartition de la variance des estimations des blocs, qui est de basse valeur à la partie Sud en question, donc l'estimation dans cette localité est la meilleur. En s'éloignant vers le Nord cette variance a tendance à augmenter.

6. 1. 3. KRIGEAGE DE L'ACCUMULATION EN Soufre

Le variogramme qui décrit la variabilité de l'accumulation en Soufre dans la minéralisation est également isotrope et s'écrit :

$$\gamma = 500 + 1500 Sph_{450}$$

L'aire de recherche est donc circulaire de rayon 430m, divisé en quatre secteurs chacun devant comporter un maximum de 8 points et un minimum total de 8 points.

Un seul secteur vide est toléré à la fois. Les blocs krigés avec les valeurs correspondantes sont donnés dans la *figure 6 3* ci dessous.

Blocs (50m.50m) Krigés pour AccZn.

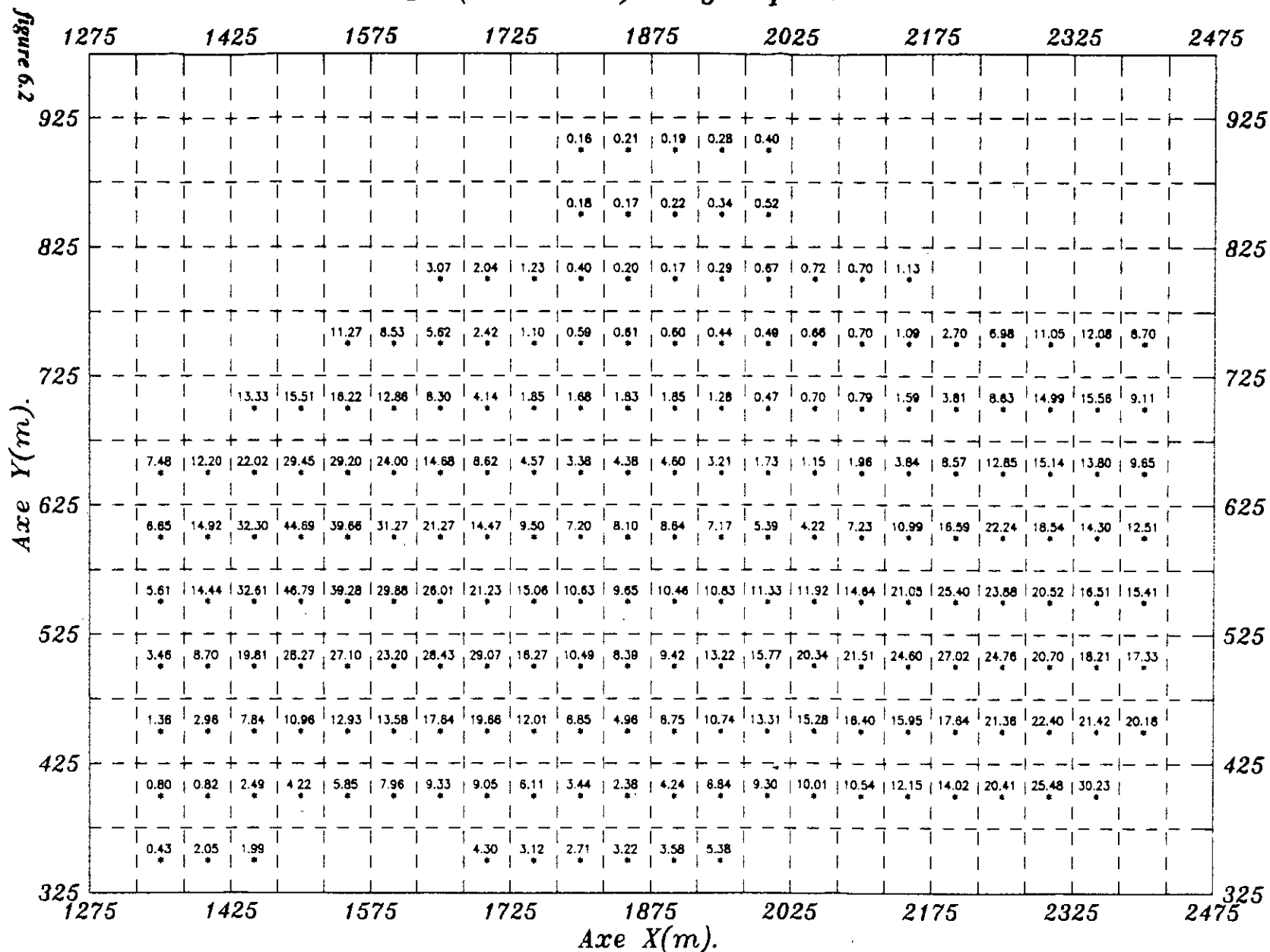


figure 6. 4. Repartition de la variance d'estimation des blocs kriges en AccZn.

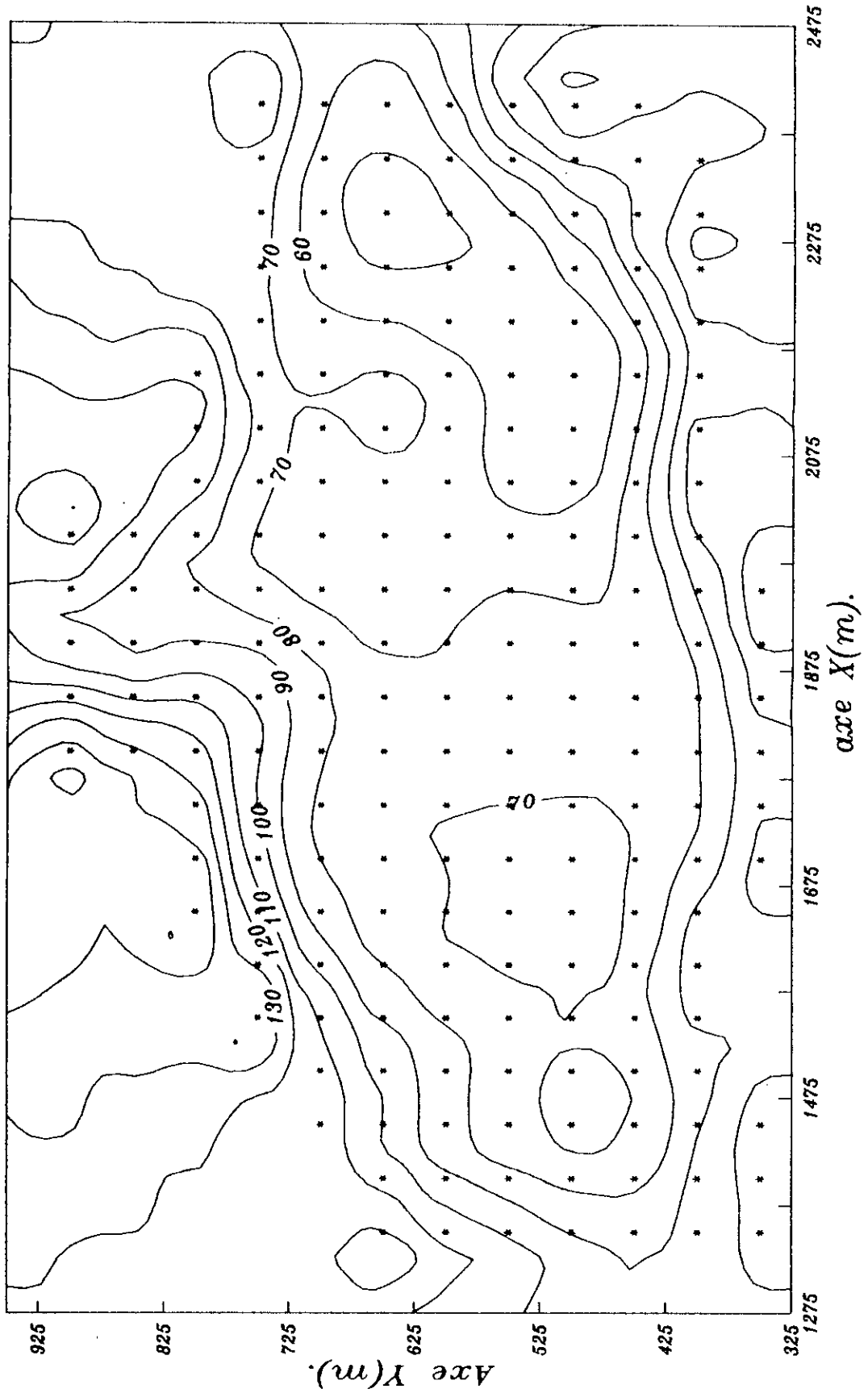
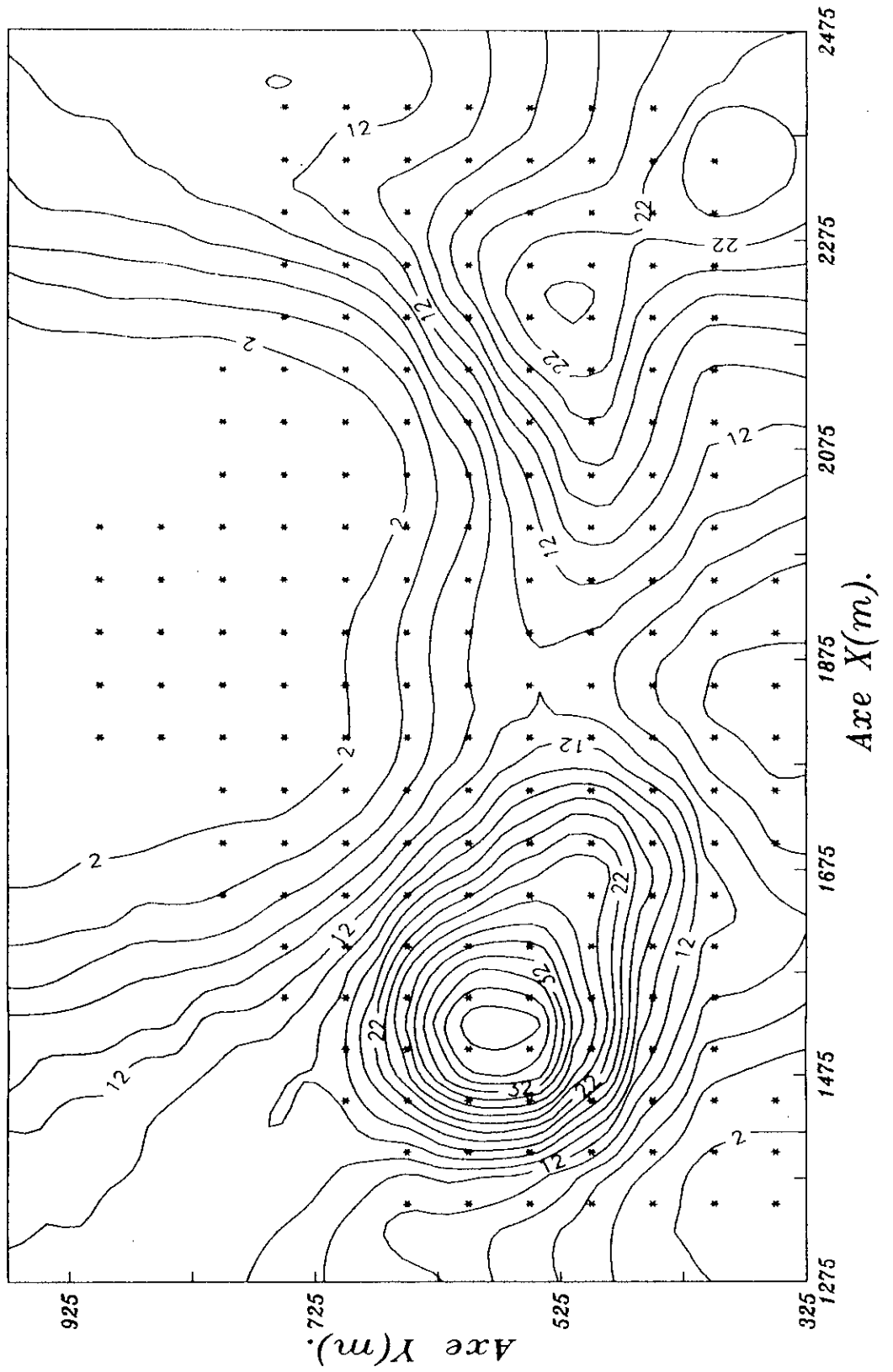


figure 66 . Répartition de l'AccZn krigée des blocs.



La répartition de l'accumulation krigée des blocs *figure 6 7* montre une variabilité assez élevée au centre du gisement, où il se dégage deux zones de hautes et basses valeurs voisines, reste cependant de valeur moyenne.

La répartition des variances correspondantes (*figure 6 5*) montre quant à elle une bonne continuité, qui est relativement constante dans la partie centrale, où l'estimation est donc la plus fiable. Aux limites du gisement elle est variable, en raison de l'effet de bordure.

figure 6 3. Blocs (50m.50m) Kriges pour AccS.

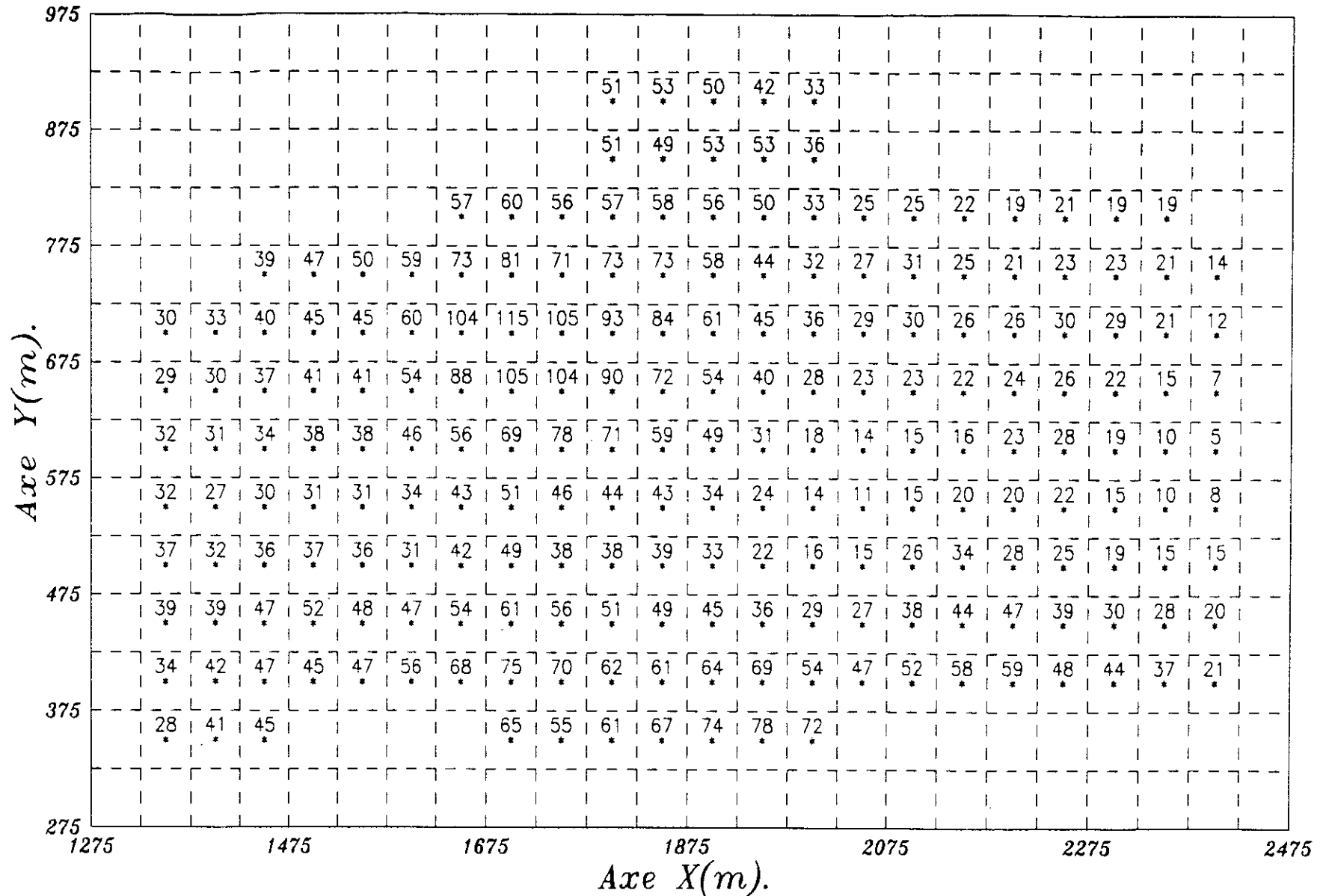


figure 6 7. Répartition de l'AccS krigée des blocs.

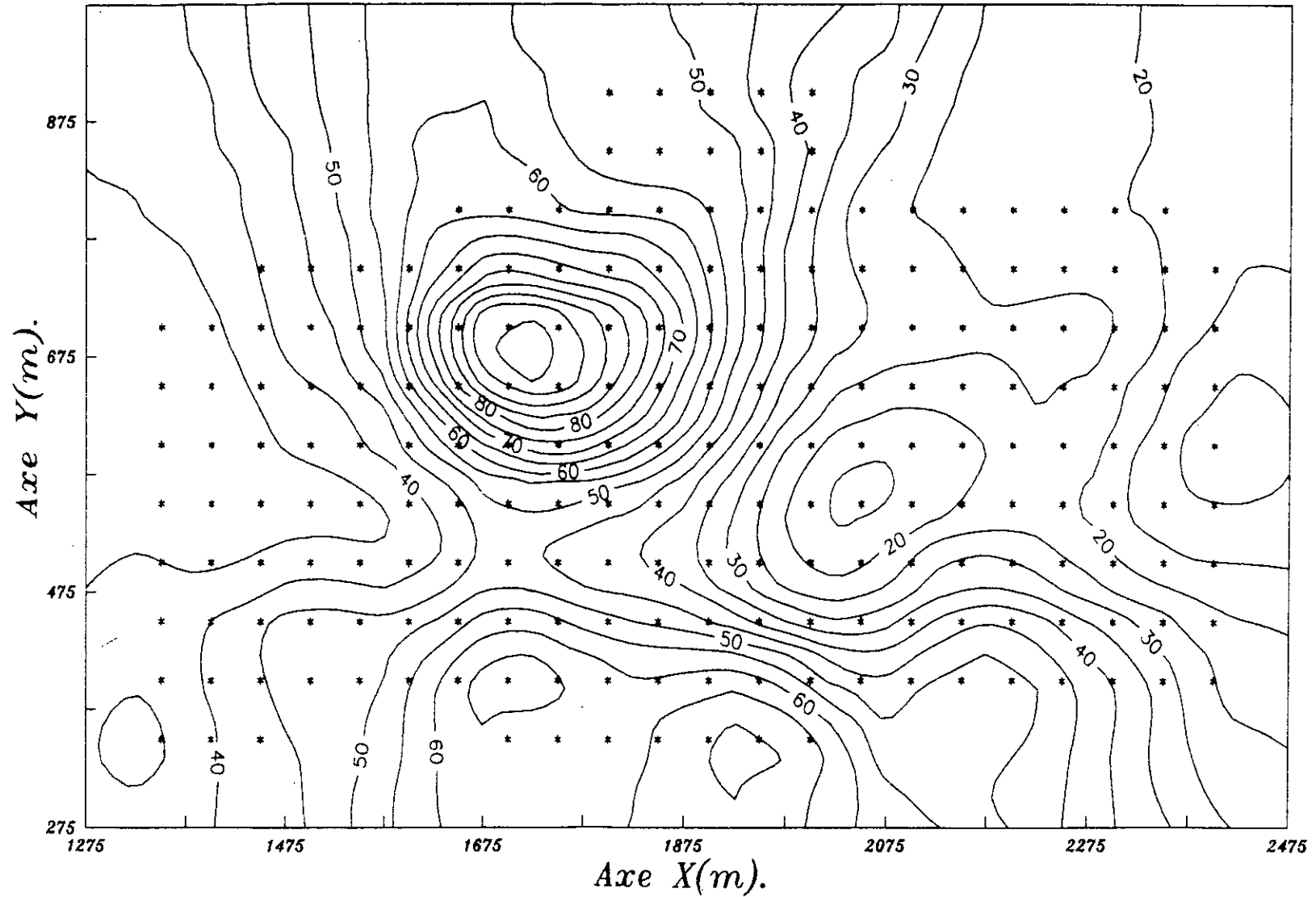
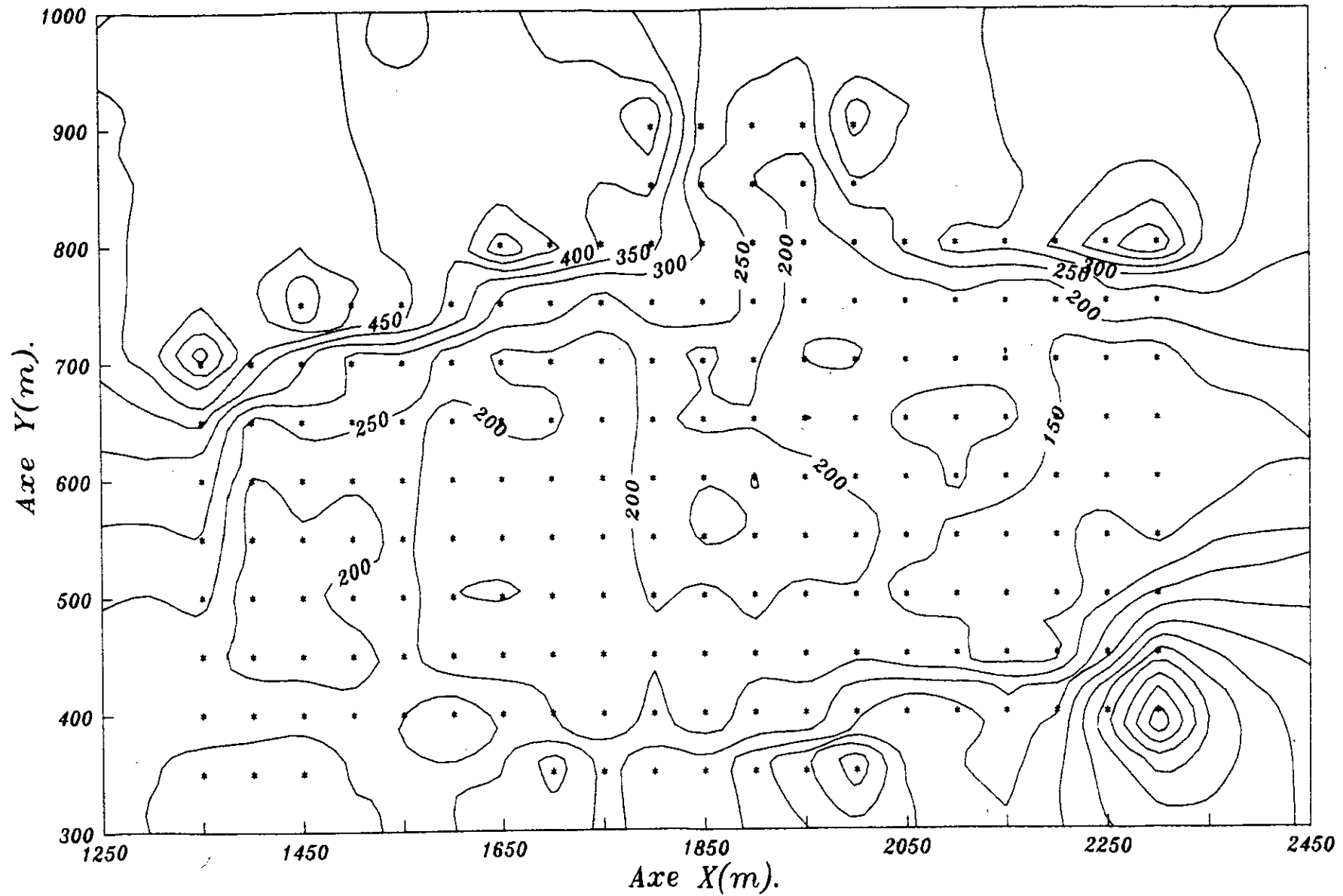


Figure 6. 5. *Repartition de la variance de krigage des blocs en AccS.*



6. 2. ESTIMATION DES RESERVES

Cette section représente le fruit des chapitres précédents. Nous Calculerons ici tous les paramètres relatifs à l'évaluation qualitative et quantitative du gisement. C'est à dire l'aire et la puissance mineralisées, le tonnage de minerai, la quantité de métal et la teneur correspondantes, les teneurs en substances utiles et enfin les courbes tonnage teneur qui en découlent. Nous déterminerons en parallèle les variances d'estimation relatives de chacun de ces facteurs.

Remarquons dès à présent que la maille de prospection est irrégulière. Il est alors indispensable de considerer chacune d'elles comme un cas particulier lors du calcul des différentes variances d'extension sondage bloc[2,3], ce qui est difficilement accessible. De ce fait les calculs ci dessous porterons sur le gisement tel que défini par le krigage des blocs.

Nous presenterons donc la méthodologie de calcul de chacun des paramètres sus indiqués, après quoi nous porterons les résultats de l'application numerique dans un tableau récapitulatif en fin de section.

6. 2. 1. ESTIMATION DE LA SURFACE MINERALISEE S*

Elle est estimée par la somme de toutes les surfaces des blocs krigés

$$S^* = n . a_1 . a_2 \quad (2-1)$$

Où :

n : Nombre total de blocs Krigés.

a₁ , a₂ : Cotés du bloc (m).

Sa variance d'estimation relative est approchée par l'équation de Matheron :

$$\frac{\sigma_s^2}{S^{*2}} = \frac{1}{n^2} \left[N_y/6 + 0.0609 N_x^2/N_y \right] \quad (2-2)$$

Où :

n : Nombre totale de blocs.

N_x, N_y : Représente le nombre des cotés (des blocs)

parallèles à la direction x, y respectivement, divisés par 2, avec $N_x \geq N_y$.

• Pour AccZn (*figure 6 2*) on a :

$n = 199$ blocs,

$N_x = 44/2 = 22$

et $N_y = 26/2 = 13$.

• Et pour AccS :

$n = 209$ blocs,

$N_x = 43/2 = 21.5$

et $N_y = 26/2 = 13$.

6. 2. 2. ESTIMATION DE LA PUISSANCE MINERALISEE

Après la délimitation de la surface minéralisée, nous avons besoin de déterminer la puissance moyenne correspondante, notée aussi h . D'après Journel [3], si la distribution de celle ci est Normale ou quasi Normale, alors on prendra comme estimateur de cette puissance moyenne, la moyenne de sa distribution. Si cette dernière est, par contre, Lognormale ou quasi LogNormale, alors un meilleur estimateur est la moyenne logarithmique.

Dans notre cas on peut considerer la distribution de h proche de la distribution Normale (*figure 4.3*) alors sa moyenne de 5.32 m sera l'estimateur de la puissance de la couche minéralisée dans tout le gisement.

La variance d'estimation de cette puissance s'écrit en fonction de sa variance d'extension :

$$\sigma_h^2 = \frac{1}{n} [C_0 + C (\sigma_e^2)] \quad (2-3)$$

Où :

n : nombre de blocs minéralisés.

C_0 et C : l'effet de pepite et le palier du variogramme de la puissance, respectivement.

σ_e^2 : Variance d'extension de la puissance du centre du bloc à toute sa surface

Quand le variogramme global de la variable est une structure gîgogne, comme c'est le cas ici, le deuxième terme de la somme entre crochet comprendra les produits des paliers de chacun des variogrammes par leurs variances d'extensions respectives[3;4].

La variance d'extension est approchée par les fonctions auxiliaires, dans ce cas par exemple, où les blocs krigés sont tous de même dimension carrée (50mx50m), elle s'écrit [3]

$$\sigma_e^2 = 2H(1/2, 1/2) - F(1, 1). \text{ avec } l \text{ coté du bloc.}$$

Le résultat du calcul pour la variance d'estimation de la Puissance a donné:

$$\sigma_h^2 = 0.038 \text{ m}^2.$$

6. 2. 3. ESTIMATION DU TONNAGE DE MINERAI T

Le tonnage T est la quantité, en tonnes de minerai in situ. Elle s'exprime en fonction de la surface minéralisée, de sa puissance moyenne et de la densité du minerai considéré :

$$T = S^* . h . d$$

Sa variance d'estimation relative s'exprime alors par :

$$\frac{\sigma_T^2}{T^2} = \frac{\sigma_{S^*}^2}{S^{*2}} + \frac{\sigma_h^2}{h^2} + \frac{\sigma_d^2}{d^2}$$

La densité du minerai étant considérée constante, le rapport de l'ORGSM [1] donne approximativement $d = 3 \text{ t/m}^3$ pour les deux minerais de Zinc et de Soufre, alors la variance d'estimation relative du tonnage se réduit à :

$$\frac{\sigma_T^2}{T^2} = \frac{\sigma_{S^*}^2}{S^{*2}} + \frac{\sigma_h^2}{h^2}$$

6. 2. 4. ESTIMATION DE LA TENEUR

La teneur moyenne du gisement s'exprime en fonction de la somme des accumulations et de la somme des puissances minéralisées [4] :

$$t = \frac{\sum Acc}{\sum h}$$

Où : $\sum Acc$ représente la somme de toutes les accumulations de tous les sondages.

$\sum h$ la somme des puissances minéralisées des sondages.

D'après les résultats des krigeages de l'accumulation en Zinc, en Soufre et des Puissances nous avons

$$\sum h = 1096.37 \text{ m.}$$

$$\sum AccS = 8.72 \cdot 10^3 \text{ (m.\%)^2.}$$

$$\sum AccZn = 2181.59 \text{ (m.\%)^2.}$$

Etant donné que les variables Accumulation et Puissance minéralisée sont corrélées, alors la variance d'estimation relative de la teneur doit en tenir compte et elle s'exprime par :

$$\frac{\sigma_t^2}{t^2} = \frac{\sigma_{Acc}^2}{Acc^2} + \frac{\sigma_h^2}{h^2} - 2 \cdot r \cdot \frac{\sigma_{Acc} \cdot \sigma_h}{Acc \cdot h}$$

Où : r : Coefficient de corrélation entre l'accumulation et la puissance h , obtenu à partir du graphique en scatterplot des valeurs expérimentales des deux variables.

$$r = 0.473 \text{ pour } AccZn \text{ et } h,$$

$$r = 0.676 \text{ pour } AccS \text{ et } h.$$

Quant à la variance d'estimation de l'accumulation σ_{Acc}^2 , elle est calculée en utilisant les fonctions auxiliaires, suivant le même principe que pour la variance d'estimation de la puissance minéralisée h ci-dessus

Les résultats de ces calculs sont :

$$\sigma_{AccZn}^2 = 1.64 \text{ (m. \%)}^4 \text{ pour l'AccZn,}$$

$$\sigma_{AccS}^2 = 2.636 \text{ (m. \%)}^4 \text{ pour l'AccS.}$$

6. 2. 5. ESTIMATION DE LA QUANTITE DE METAL Q

La quantité de métal s'écrit en fonction du tonnage T :

$$Q = T \frac{t}{100} \text{ quand la teneur } t \text{ s'exprime en \%}$$

Sa variance d'estimation est :

$$\frac{\sigma_Q^2}{Q^2} = \frac{\sigma_T^2}{T^2} + \frac{\sigma_t^2}{t^2}$$

6. 2. 6. PRECISION D'ESTIMATION

En supposant les erreurs commises, lors des différentes estimations, distribuées suivant une loi Normale, alors il est possible d'avoir un ordre de grandeur de l'erreur commise en fonction de son écart type et de sa moyenne, d'après les propriétés de la loi Normale centrée réduite.

Dans un intervalle de confiance de 95% l'erreur s'exprime par

$$e = \pm 1.96 \frac{\sigma}{m}$$

Ainsi la précision s'écrira

$$p = \left(1.96 \frac{\sigma}{m} \right) \cdot 100$$

Où :

σ : est l'écart type de la variable considérée.

m : Sa valeur moyenne.

Les résultats de la méthodologie de précédemment exposée sont portés dans le tableau ci dessus

Tableau 6 1. Tableau récapitulatif de calcul des paramètres des réserves du gisement

<i>Variables</i>	<i>Soufre</i>	<i>Zinc</i>
<i>Surface minéralisée S (m²)</i>	522500	497500
<i>Variance d'estimation. σ^2_s / S^2</i>	0.0001	0.0001
<i>Erreur Relative $\pm 2\sigma_s / S$ (%)</i>	10450	9600
<i>Tonnage de minerai. T (t)</i>	8339100	7940100
<i>Variance d'est. de T. σ^2_T / T^2</i>	0.00095	0.00096
<i>Erreur Relative $\pm 2\sigma_T / T$ (%)</i>	500346	476400
<i>Quantité de Métal Q(t)</i>	662958	158802
<i>Variance d'esti. de Q σ^2_Q / Q^2</i>	0.002	0.005
<i>Erreur Relative $\pm 2\sigma_Q / Q$ (%)</i>	55688	23200
<i>Teneur t (%)</i>	7.95	2.00
<i>Variance d'esti. de t σ^2_t / t^2</i>	0.0008	0.04
<i>Erreur Relative $\pm 2\sigma_t / t$ (%)</i>	0.056	0.26

6. 2. 7. COURBE TONNAGE TENEUR

La courbe tonnage teneur est mieux calculée à l'aide des techniques de la géostatistique non linéaire. Mais nous en proposons quand même une approche linéaire que nous avons largement inspirée du raisonnement de I. CLARK [11].

Nous proposons de donner ici un outil qui nous permettra, à partir d'une teneur de coupure t_c donnée, d'avoir la proportion de blocs de minerai (tonnage) correspondante.

Connaissant la variance des points échantillonnés et des blocs krigés, on ne peut pas à ce stade calculer ce paramètre quantitatif sans avoir à recourir à certaines hypothèses concernant la loi de distribution de ces échantillons.

En effet on supposera que la distribution des échantillons (points) et celle des blocs suivent la même loi de distribution statistique.

1. Dans le cas où il s'agit de la loi Normale $N(m, \sigma)$, alors la proportion de la population des teneurs t au delà d'un seuil donné t_c s'écrit en termes probabilistiques :

$$p = \Pr\{t > t_c\}$$

En passant à la loi Normale centrée réduite $N(0, 1)$, cette probabilité s'écrit :

$$p = 1 - \Phi(z)$$

$$\text{où } z = \frac{t - \bar{t}}{\sigma_t}$$

Où: $\Phi(z)$ est la fonction de répartition de la loi Normale

La teneur moyenne \bar{t}_c de cette proportion de la population s'exprime ainsi :

$$\bar{t}_c = \bar{t} + \frac{\sigma_t}{p} \Phi(z).$$

2. Si par contre la distribution est LogNormale, c'est à dire que le logarithme de la variable considérée, est distribué suivant une loi Normale, alors il faudra d'abord calculer les moyenne m et variance s de cette dernière. Ils s'écrivent [11]:

$$s^2 = \text{Log} \left(\frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} + 1 \right)$$

$$m = \text{Log } \bar{t} - \frac{s^2}{2}$$

Alors la proportion de la population se trouvant au delà du seuil t_c s'écrit :

$$p = 1 - \Phi(z_1).$$

où

$$z_1 = \frac{\text{Log } t_c - m}{s}$$

La teneur moyenne de cette proportion s'exprime à son tour ainsi :

$$\bar{t}_c = \frac{1 - \Phi(z_1 - s)}{p}$$

A partir de ces équations on pourra calculer pour chaque valeur du seuil t_c (ici teneur de coupure), les valeurs de la proportion de la population p , et de sa moyenne t_c , (*tableau 6 2 et 6 3*).

En portant ces valeurs sur un graphique on obtiendra une courbe qui décrira l'évolution de la proportion de minerai (blocs) en fonction de sa moyenne et de la teneur de coupure (*figure 6 8 et figure 6 9*) ci-dessous

tableau 6 2 proportion des blocs en fonction de la teneur de coupure

t coup Zn %	Proport de blocks.	tmoy proport. Zn %
0,38	0,93	2,36
0,75	0,76	2,76
1,13	0,60	3,23
1,50	0,48	3,73
1,88	0,38	4,23
2,26	0,31	4,73
2,63	0,26	5,23
3,01	0,21	5,74
3,38	0,18	6,24
3,76	0,15	6,74
4,14	0,13	7,24
4,51	0,11	7,73

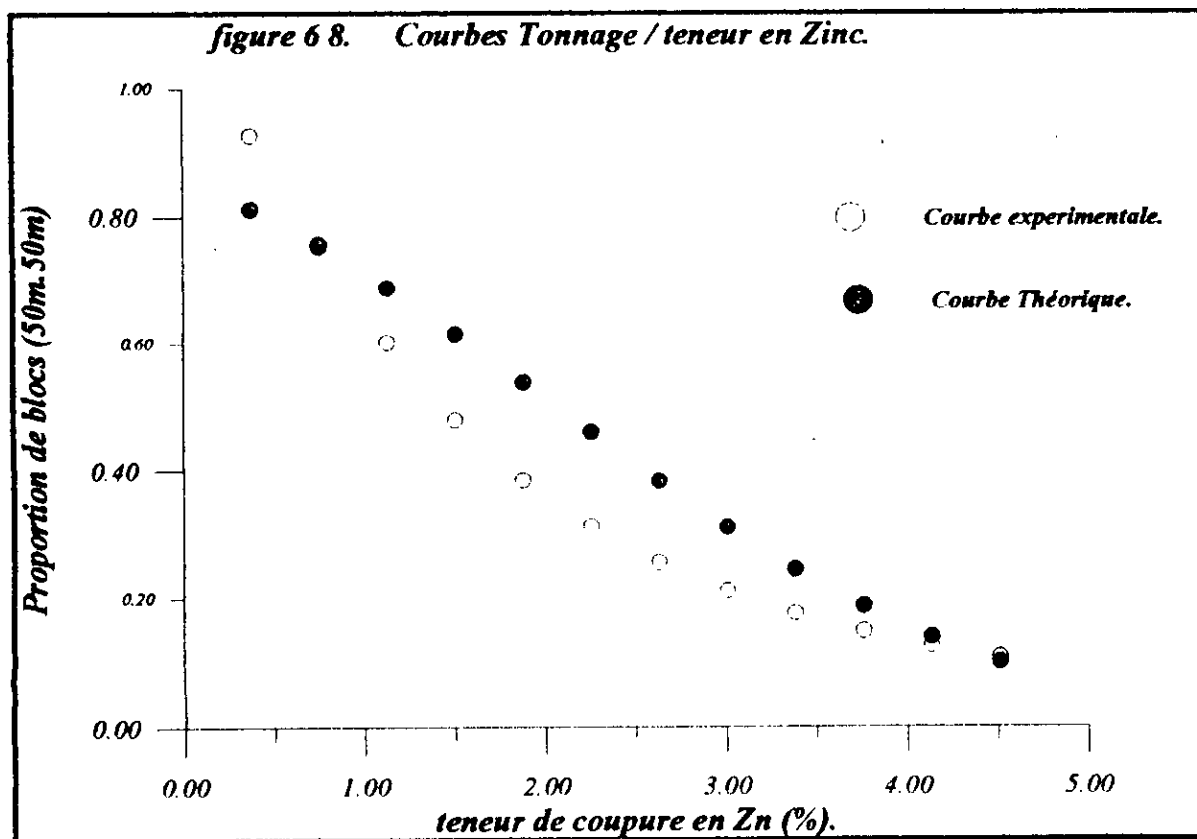
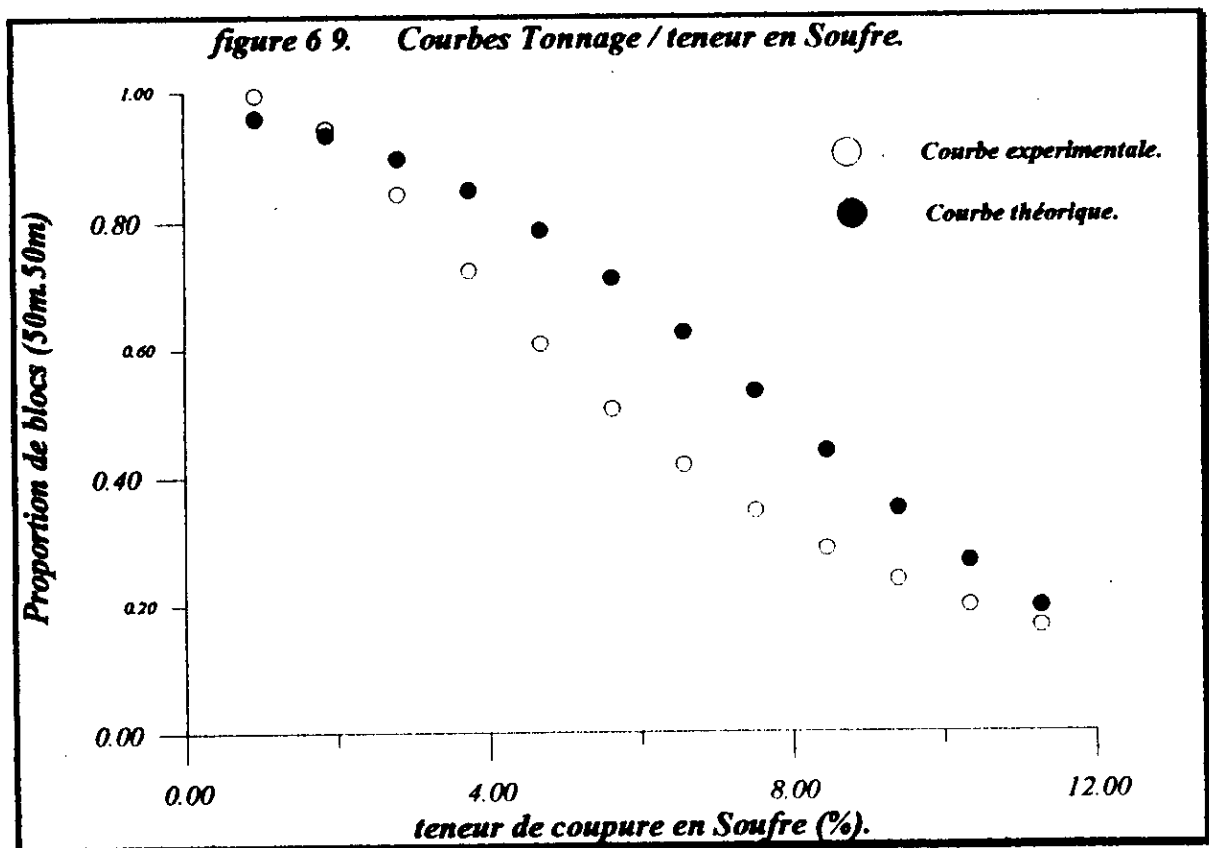


tableau 6 3 Proportion de blocs en fonction de la teneur de coupure.

t coup S %	Proport.de blocs (%)	tmoy de proport. (%)
0,94	0,99	7,36
1,88	0,94	7,65
2,82	0,84	8,21
3,76	0,72	8,93
4,70	0,61	9,71
5,64	0,51	10,53
6,58	0,42	11,37
7,52	0,35	12,21
8,46	0,29	13,05
9,40	0,24	13,89
10,34	0,20	14,72
11,28	0,16	15,55



Ces graphiques présentent l'allure type des courbes Tonnage teneur.

Nous pouvons constater donc que les courbes expérimentales et les courbes théoriques sont relativement proches. Cependant ces deux dernières sous estiment, dans les deux cas, la quantité des réserves.

Mais il ne faut pas perdre de vue que ces courbes théoriques ont été tracé en considérant les variances des blocs krigés d'après l'expression [4].

$$\sigma_B^2 = \sigma_{B^*}^2 + \sigma_{mk}^2$$

où σ_B^2 : variance de distribution des "vraies" teneur des blocs.

$\sigma_{B^*}^2$: Variance des estimations des blocs krigés.

et σ_{mk}^2 moyenne des variances krigées.

7. CONCLUSION

Nous pouvons estimer que le travail que nous venons de réaliser a atteint les objectifs fixés au départ et ce malgré les différentes difficultés auxquelles nous avons dû faire face. A commencer par les données dont la mauvaise édition a rendu difficile la synthèse d'une base numérique représentative. De tels entraves ne font en réalité qu'affaiblir la crédibilité des résultats de l'estimation.

Ainsi sommes nous arrivés à mettre en évidence que le gisement ne se prête pas, tout à la fois, à une étude géostatistique pour raison d'hétérogénéité. Il présente en fait trois parties géologiquement distinctes.

Par la suite, notre travail a dû se restreindre à la seule portion délimitée par le bloc structural Est, les deux autres parties du bloc Central et Ouest ont été omises pour raison d'insuffisance de données.

Les analyses chimiques sont rapportées à des longueurs de carottes variables, ce qui contraint à considérer, au lieu de la teneur, l'accumulation comme variable de travail.

Avant toute analyse statistique, une vue d'ensemble sur la répartition géographique des teneurs des sondages, a révélé que le gisement est relativement de puissance considérable, avec une teneur en zinc assez faible. Ce dernier forme en fait une zone de concentration dans la partie Sud, où ont commencé les travaux de prospection. Quant au soufre, la minéralisation semble détenir de meilleures capacités.

L'examen statistique des variables a montré une Lognormalité de la distribution de l'accumulation en zinc. L'accumulation en soufre présente aussi, pour sa part, une répartition proche de la distribution Lognormale.

L'étude variographique a montré que la puissance minéralisée varie dans le gisement d'une manière anisotrope. Avec une bonne continuité dans la direction Est Ouest, et une faible continuité dans la direction Nord Sud.

La continuité de l'accumulation en zinc est difficilement appréciable à cause d'un variogramme proche d'un pur effet de pépite, donc mal structuré. Il serait alors souhaitable d'effectuer d'autres prélèvements, concernant cette variable, avec une maille plus réduite, ceci

afin de voir si cette structure n'est pas seulement due à l'échelle d'observation. La structure de l'accumulation en soufre est, cependant, meilleure.

En passant au krigeage de blocs de 50m de coté, nous avons voulu procurer un outil pratique au mineur. Ceci nous a conduit à tracer des graphiques où sont indiquées les répartitions des différents blocs et leurs valeurs krigées.

Ces résultats ont montré que le gisement présente une richesse en soufre qui apparaît à la partie Nord, elle s'affaiblit en allant vers le Sud. De plus la variance d'estimation de ces blocs est très peu variable dans la partie centrale, ce qui est un signe de bonne estimation, elle est en outre très variable au contour du gisement à cause bien entendu de l'effet de bordure.

Quant à l'accumulation en zinc, les blocs témoignent d'une présence relativement faible, sa concentration se résume aux seules parties extrêmes Sud, où la répartition de la variance a montré une bonne estimation, ainsi que la partie Sud. On ne doit pas cependant perdre de vue que la répartition de la variance d'estimation a montré en cet localité une forte valeur, donc estimation de fiabilité réduite. Ce qui est sûrement du aux valeurs en pic isolés, en cet endroit du gisement.

Nous avons également procédé à l'appréciation des réserves en minerai du gisement, dont nous avons présenté les résultats sous forme de courbes Tonnage-teneur. Le rapport de l'ORGM [1], a également donné une évaluation des réserves, par la méthodes classique. Une comparaison entre ces deux aboutissements, ne peut servir qu'à titre indicatif. Ceci est du, d'une part, à la différence en nature des deux études, et d'autres part, aux différents points de départ tels que la partie du gisement concernée, critères de sélection des sondages...

Les résultats de ce travail constituent une première approche de la minéralisation complexe qui marque le district minier de Chabet El Hamra. Effectivement, notre analyse s'est limitée, pour des raisons techniques, au seul corps C1 du Bloc Est.

Nous espérons ainsi avoir contribué à l'initiation d'une étude de recherche plus généralisée, qui sera alimentée par de nouvelles données.

Enfin cette application nous a été bénéfique pour plus d'un titre. Outre la compréhension, encore plus, de l'outil géostatistique, elle nous a donné l'occasion de l'exercice d'un cas pratique réel.

NOTATIONS

<i>AccZn</i>	<i>Accumulation en Zinc</i>
<i>AccS</i>	<i>Accumulation en Soufre.</i>
<i>Puiss.</i>	<i>Puissance minéralisée</i>
<i>m</i>	<i>Moyenne de la population</i>
σ	<i>Ecart type.</i>
<i>Z(x)</i>	<i>Variable aléatoire.</i>
$\gamma(h)$	<i>Semi variogramme.</i>
<i>h</i>	<i>Incrément du variogramme.</i>
<i>a</i>	<i>Portée du variogramme.</i>
<i>p ou C</i>	<i>Palier du variogramme.</i>
<i>C₀</i>	<i>Effet de pépite.</i>
<i>Sph</i>	<i>Modèle de variogramme sphérique.</i>
<i>H, F</i>	<i>Fonctions auxiliaires</i>
$\Phi(z)$	<i>Fonction de densité.</i>
σ^2	<i>Variance d'extension.</i>
<i>t</i>	<i>teneur</i>
<i>t_c</i>	<i>teneur de coupure</i>
<i>S*</i>	<i>Surface estimée du gisement.</i>
<i>T</i>	<i>Tonnage de minerai.</i>
<i>Q</i>	<i>Quantité de métal.</i>
<i>[n]</i>	<i>Numéro qui fait référence au support bibliographique.</i>

LISTE DES FIGURES

N°	Nom de la figure	page
2. 1.	<i>Champ d'exploration minière de Chabet el Hamra</i>	10
4. 1.	<i>Champ d'exploration de Chabet el Hamra - Esquisse du bloc Est.</i>	32
4. 2. a	<i>Répartition de la puissance de la couche C1 (Bloc Est).</i>	34
4. 2. b	<i>Répartition de la teneur moyenne en Zinc (bloc Est).</i>	35
4. 2. c	<i>Répartition de la teneur moyenne en soufre pyriteux (bloc Est).</i>	36
4. 3.a,b	<i>Histogramme et p-p plot de la puissance minéralisée.</i>	38
4. 4.a,b	<i>Histogramme et p-p plot de l'Accumulation en zinc.</i>	40
4. 5.a,b	<i>Histogramme et p-p plot de l'Accumulation en Soufre pyriteux.</i>	41
5. 1. a	<i>Variogramme moyen de Puissance.</i>	45
5. 1. b	<i>Variogramme expérimental de la puissance.</i>	46
5. 2. a	<i>Rose diagramme du variogramme de la puissance.</i>	47
5. 3.	<i>Variogramme de l'AccZn.</i>	52
5. 4.	<i>Variogramme de l'AccS.</i>	53
6. 1.	<i>Répartition des blocs krigés pour la puissance.</i>	58
6. 2.	<i>Répartition des blocs krigés pour l'Accumulation en Zinc.</i>	60
6. 4.	<i>Répartition des variances des blocs krigés pour l'AccZn.</i>	61
6. 6.	<i>Répartition de l'AccZn krigée des blocs.</i>	62
6. 3.	<i>Répartition des blocs krigés pour l'AccS.</i>	64
6. 7.	<i>Répartition de l'AccS krigée des blocs.</i>	65
6. 5.	<i>Répartition des variances des blocs krigés pour l'AccS.</i>	66
6. 8.	<i>Courbe Tonnage teneur en Zinc.</i>	76
6. 9.	<i>Courbe Tonnage teneur en Soufre.</i>	77

LISTE DES TABLEAUX.

<i>N°</i>	<i>Nom du tableau</i>	<i>Page</i>
<i>tab 6.1</i>	<i>Tableau récapitulatif de calcul des réserves.</i>	<i>73</i>
<i>tab 6. 2.</i>	<i>Proportion des blocs en fonction de la teneur en Zn.</i>	<i>76</i>
<i>tab 6. 3.</i>	<i>Proportion des blocs en fonction de la teneur en Soufre pyriteux.</i>	<i>77</i>