

7/97

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE MINIER



THÈME :

**APPLICATION DE LA MÉTHODE GÉOSTATISTIQUE
 A L'ESTIMATION DES RÉSERVES GEOLOGIQUES
 (EXEMPLE : DU GISEMENT AURIFÈRE D'AMESMESSA)
 (ZONE 9) HOGGAR - ALGERIE**

Proposé par :

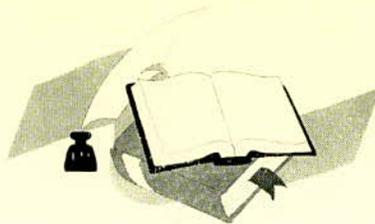
Dr. S. CHABOU

Étudié :

Mr KANTE N'FALY

Dirigé par :

Dr. D. MERIEM
Dr. S. CHABOU



Promotion 1997

E.N.P. 10, Avenue Hassan Badi El-Sarrach Alger

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE MINIER



THÈME :

APPLICATION DE LA MÉTHODE GÉOSTATISTIQUE
À L'ESTIMATION DES RÉSERVES GEOLOGIQUES
(EXEMPLE : DU GISEMENT AURIFÈRE D'AMESMESSA)
(ZONE 9) HOGGAR - ALGERIE

Proposé par :

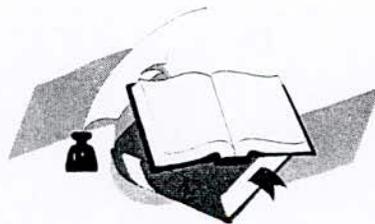
Dr. S. CHABOU

Étudié :

Mr KANTE N'FALY

Dirigé par :

Dr. D. MERIEM
Dr. S. CHABOU



Promotion 1997

E.N.P. 10, Avenue Hassen Badi El-Sarrach Alger

Dedicaces

Je dédie ce travail à :

- *mes chers parents.*
- *à ma grand-mère Feue Nassira Camara.*
- *à mon grand père adoptif Mr B.D. Dansoko.*
- *à mes frères et sœurs.*
- *Et enfin à tous ceux ou celles qui m'ont aidé de loin ou de près...*

Kante N'Faly.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements au Dr D. Meriem pour ses conseils et sa disponibilité totale durant l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements vont également au Dr A. Boufassa pour son aide et ses remarques instructives.

Je transmets aussi toute ma reconnaissance au Dr S. Chabou pour ses encouragements et son soutien.

Enfin que soit exprimée ici mon entière gratitude à tous les enseignants du département Génie Minier qui ont participé à ma formation .

Sommaire

	pages
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1. GEOLOGIE	2
I. Généralités	2
1. Situation géographique et économique.....	2
2. Historique de la découverte du gisement.....	2
3. Etat de connaissance du gisement.....	4
II. Géologie générale	4
1. Le rameau occidental.....	5
2. Le rameau oriental.....	5
3. Le mole In-ouzzal.....	5
III. Géologie régionale	5
1. Stratigraphie.....	5
2. Magmatisme.....	7
3. Tectonique.....	8
4. Minéralisation de la région.....	8
IV. Géologie du gisement	11
1. Stratigraphie.....	11
2. Formations intrusives.....	11
3. La tectonique cassante.....	11
4. Caractéristique de la zone 9.....	13
5. Conditions minières et géotechniques.....	15
6. Conditions hydrogéologiques du gisement.....	15
CHAPITRE 2. TYPE DES TRAVAUX ET STATISTIQUE DES DONNEES	16
Introduction	16
I. Type des travaux	16
1. Tranchées.....	16
2. Forages.....	16

3.Puits.....	16
4.Galerie directionnelle.....	16
5.Recoupes.....	17
6.Rainurages.....	17
7.Insuffisances notées lors des travaux d'évaluation du gisement.....	17
II. Statistique des données.....	17
1. Informations relatives aux sondages et tranchées.....	18
2. Analyse statistique.....	18
3. Calcul de la dispersion absolue des variables.....	25
Conclusion.....	26
CHAPITRE 3. ANALYSE STRUCTURALE.....	33
I. Rappels en géostatistique monovariabile.....	33
1.Introduction.....	33
2.L'outil variogramme.....	33
2.1.Definition.....	33
2.2.Construction du variogramme expérimental directionnel.....	33
2.3.Paramètres de calcul du variogramme expérimental directionnel.....	34
2.4.Propriétés du variogramme.....	35
2.5.Modelisation du variogramme.....	36
II.Variographie sur l'ensemble des données de la zone 9.....	38
1.Construction de variogrammes expérimentaux directionnels.....	38
2.Construction des variogrammes expérimentaux directionnels pour les variables d'étude.....	38
2.1. Variogrammes pour LN(teneur).....	38
2.2. Variogrammes pour LN(épaisseur).....	39
2.3. Variogrammes pour LN(Accu).....	39
3.Hypothèse d'isotropie :Construction de variogrammes moyens.....	48
CHAPITRE 4. ESTIMATION DES RESERVES.....	51
I. Introduction et définitions générales.....	51
1.Les méthodes analytiques.....	51
2.Méthode géostatistique d'estimation : le KRIGEAGE.....	51
3.Equations du krigeage.....	52

II. Krigage de la zone 9	53
1. Description de la démarche à suivre.....	53
2. Krigage des variables teneur, épaisseur, et accumulation.....	55
III. Calcul des réserves	62
Introduction.....	62
1. Estimation de la surface minéralisée (S^*).....	62
2. Estimation de la puissance minéralisée (h).....	62
3. Estimation du tonnage du minerai (T).....	63
4. Estimation de la teneur moyenne (t).....	64
5. Estimation de la quantité du métal (Q).....	64
CONCLUSION	66

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

CHAPITRE 1

GEOLOGIE

Chapitre 1

Géologie

I- Généralités

1- Situation géographique et économique :

Le gisement aurifère d'Amesmessas est situé dans le SW du Hoggar (Sahara Algérien) à environ 430 Km de Tamanrasset. Les coordonnées de son centre sont de 2°29 Est et 20°29 Nord. D'après la nomenclature topographique à l'échelle 1/200000, il se localise sur les feuilles Tirek NF 31-II (partie Nord). On y accède en empruntant la route transsaharienne sur 80 Km et des pistes de véhicules tout terrain. Le relief de la région du gisement et de ses environs est représenté par un plateau faiblement accidenté. Les altitudes maximales atteignent 600m. Les dénivelées relatives varient de 5-50m.

Les conditions climatiques sont caractéristiques pour les régions désertiques du Sahara central. Les précipitations moyennes sont de l'ordre de 5 à 10mm par an. La température est de 15 à 10°C (Décembre-Janvier) avec des rares gelées dans la nuit ; en été elle atteint 37-48°C (Juillet). La période la plus favorable pour les travaux géologiques va d'Octobre à Mai.

L'approvisionnement en eau potable est assuré à partir du puits d'Iraldiouine (débit 200m³/jour) situé à l'ouest du gisement. A 80Km vers le Nw d'importantes réserves d'eau souterraines ont été mises en évidence.

Du point de vue économique la région du gisement est faiblement développée, ne disposant ni d'infrastructures socio-économiques ni de sources d'énergie ni de gisements de matériaux de construction connus de nos jours .

2- Historique de la découverte du gisement

Entre 1969 et 1971 une première campagne pour les minéraux radioactifs et les métaux précieux dans le Sw du Hoggar fut lancée par la Société Nationale de la Recherche et d'Exploitation Minière (SONAREM). Entre 1974 et 1976 un programme de prospection plus spécialement orienté vers l'or permit de découvrir la zone minéralisée d'Amesmessas. De 1976 à 1979 cette zone fut évaluée de façon préliminaire à l'aide d'une série de tranchées et de sondages. A cette époque on croyait que l'or n'était présent que dans les veines de quartz et l'étroitesse relative des filons rendait leur potentiel économique marginale. Ainsi les travaux de recherche furent suspendus.

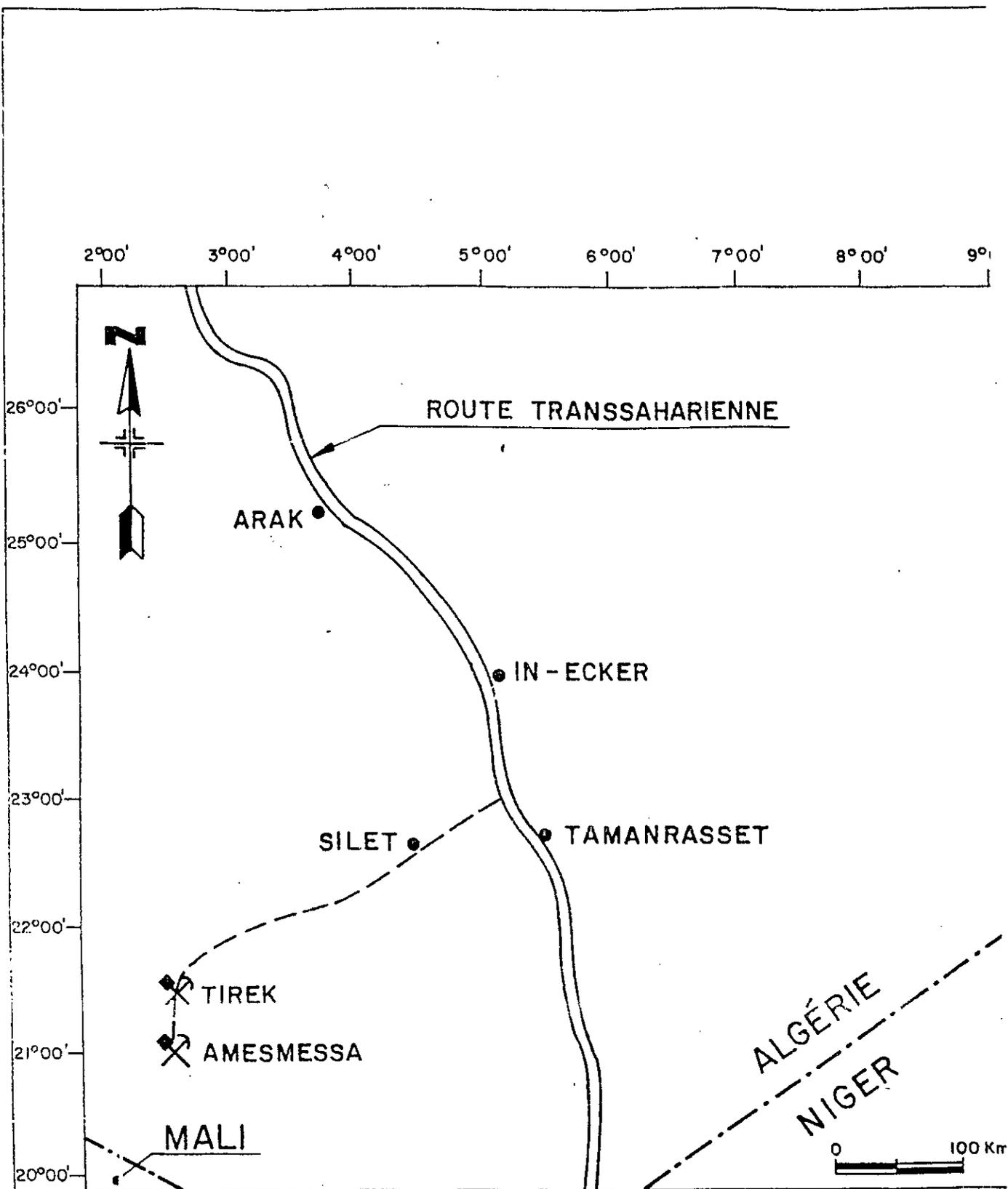


FIGURE 1

LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DES GISEMENTS
D'AMESMESSA ET DE TIREK (D'APRÈS L'EREM, 1990)

 : GISEMENT AURIFÈRE

En 1985 les géologues travaillant sur le projet réalisèrent le potentiel aurifère des éponges altérées (bérésites) des filons de quartz. La présence de teneur d'or significatives dans les bérésites sur des épaisseurs considérables (jusqu'à 10m) conféra une toute nouvelle dimension au gisement.

De 1985 à 1990 le gîte fut l'objet d'une évaluation détaillée. Plusieurs zones minéralisées furent reconnues , mais les travaux se concentrèrent sur les zones 8 et 9 qui semblent offrir le meilleur potentiel minier . Au cours de cette période 26000m de sondage furent réalisés sur ces deux zones . De plus un puits vertical de 85m de profondeur fut creusé avec 66m de travers-bancs et 516m de galerie le long de la zone à une profondeur de 80m.

De 1990 à 1992 l'exploration des zones 8 et 9 s'est poursuivie jusqu'à une profondeur de 400m au moyen de 37 nouveaux sondages totalisant 11000m de longueur .

3- Etat de connaissance du gisement

La reprise des travaux géologiques de prospection et d'évaluation en 1985 a permis de localiser les ressources les plus notables dans la partie centrale du gisement (zone 8 et 9) où sont concentrées plus de 70% des réserves totales. L'évaluation détaillée du centre du gisement entreprise par les géologues permet de suivre la minéralisation au niveau -80m à partir de la surface par des travaux souterrains (galeries et recoupes). Les mailles de sondage ont été resserrées , ramenées à 40x40. Ces opérations ont permis d'accroître les réserves en catégorie C1 calculées pour les zones minéralisées 8 et 9 jusqu'à la profondeur de 160m. A l'époque ces réserves atteignaient 1917 kg d'or pour une teneur moyenne de 19.6g/t et une épaisseur des corps minéralisés de 2.23m. L'évaluation globale des réserves pour tout le gisement en catégorie C1 et C2 a donné 4140 kg d'or pour 22846.6 tonnes de minerais à une teneur moyenne en or de 18.59 g/t et une épaisseur moyenne de 1.91m.

II -GEOLOGIE GENERALE :

Le Hoggar appartient à la zone mobile panafricaine située entre le craton Ouest africain et le bouclier Touareg. Trois grands domaines structuraux ont été définis au Hoggar sur la base de leur lithologie et de leur évolution tectono-métamorphique (Caby et Bertrand; 1978):

- le Hoggar oriental ou chaîne de Tiririne
- le Hoggar central polyclinique
- le Hoggar occidental ou chaîne pharusienne qui abrite le district aurifère d'Amesmessas.

Le Hoggar occidental est divisé en deux rameaux: le rameau occidental et le rameau oriental séparés par le mole In-ouzzal.

1- Le rameau occidental:

Il est formé de roches basiques et ultra basiques qui constituent trois épaisses séries :

- . une série de stromatolite du protérozoïque supérieur (Pr3)
- . une série volcano-sédimentaire ou série verte d'âge protérozoïque supérieur
- . une série molassique ou série pourprée d'âge éo-cambrien.

2 - Le rameau oriental:

Dans cette partie deux cycles tectono-magmatiques ont été définis (Bertrand et al;1966 puis Gravelle ;1969).Ce sont:

- .un cycle inférieur ou pharusien I composé de termes volcano- sédimentaires d'affinité calco-alkaline et recoupé par des intrusifs pré-tectoniques à post-tectoniques d'âge situé entre 839m.a et 869m.a,
- .un cycle supérieur ou pharusien formant un bassin volcano-sédimentaire qui affleure dans la partie orientale du domaine.

3 - Le mole In-ouzzal:

Il est constitué de gneiss ,de schistes cristallins, de roches basiques et ultrabasiques, de charnockites, d'endenbergites et de roches carbonatées associées à des syénites et des fénites.

III - GEOLOGIE REGIONALE

Le gisement d'Amesmessas se situe dans la zone de la faille méridienne puissante d'In-ouzzal-Est séparant deux blocs tectoniques importants: un bloc occidental composé de formations archéennes qui est une partie du mole In-ouzzal, et un bloc oriental composé de roches protérozoïques inférieures qui constitue un gradin de transition du mole In-ouzzal à la zone centrale pharusienne (R. CABY 1977). Cette faille d'In-ouzzal-Est se rattache au système des accidents tectoniques majeurs méridiens les plus importants du Hoggar occidental. La zone de la faille d'In-ouzzal-Est est non seulement un élément structural et de formation important de la région mais aussi elle présente un intérêt remarquable du point de vue métallogénique. Elle contrôle manifestement les indices aurifères ayant fourni les plus fortes concentrations en or. (Rapport final sur l'évaluation détaillée du gisement aurifère d'Amesmessas 1993)

1. Stratigraphie

Le gisement se localise à la limite Est du mole In-ouzzal.. La description stratigraphique de cette zone se limitera aux roches qui affleurent en surface sur le territoire de la région du gisement.

1.1. L'Archéen

L'archéen de la zone du gisement est composé de plusieurs termes:

1.1.1. *Les calciphyres* (cipolin, marbres siliceux): sont observés soit seuls soit en association avec les granulites basiques le plus souvent le long des grandes failles et cernent en bordure les massifs de roches basiques et ultrabasiques d'âge archéen.. L'origine des calciphyres reste problématique.

1.1.2. *Les granulites basiques*: A ce groupe sont rattachés les schistes cristallins, les gabbros, les gabbro-norites, les norites ainsi que les pyroxénites et les anorthosites qui leur sont étroitement associés. Sont aussi rattachés à ce groupe les roches à grenat-pyroxène et grenat-magnetite-pyroxène. La caractéristique principale de ces roches est l'absence totale de quartz.

1.1.3. *Les ederbites-charnockites, plagigneiss*: La plus grande partie des roches de l'In-ouzzal est constituée par ces roches. Elles sont signalées presque partout. La structure interne est très compliquée, due à une alternance de bandes et de lentilles des différentes variétés faciales de ces granulites. Les traits distinctifs des granitoides sont l'absence d'hyperstène, l'abondance d'antiperthite dans les plagioclasses et la coloration bleue du quartz.

1.1.4. *Les granulites acides et alumineuses*: Elles comprennent des gneiss leucocrates à texture rubanée et constituent des interlits et des lentilles localisés à l'intérieur de roches du groupe précédent.

1.1.5. *Les alaskites (leptinite de Lelubre)*: Ces roches correspondent en réalité à des migmatites parmi lesquels on distingue un substratum ancien (Paléosome) et une phase mobile plus récente (Néosome). C'est une partie nouvellement formée des migmatites archéennes que constituent les alaskites. Leur texture rubanée est due à la présence de substrat incomplètement assimilé. Ces roches représentent plus de 30% des roches archéennes.

1.1.6. *les mangerites*: Ce groupe comporte les syénites à pyroxènes (mangerite) et les syénites pegmatoides à aegyrine. Il est attribué au complexe In-ouzzal à titre de convention. Ces roches avec les alaskites sont d'âge panafricain.

1.2. Le protérozoïque inférieur (Série de Tékouyat)PR-1

Les formations de cette série sont cartographiées à l'Ouest du bloc archéen de l'In-ouzzal sous forme d'une bande étroite située entre le mole Eburnéen Pr1 et les formations intrusives du batholite de Tisroukam. Elles sont représentées par des quartzites, des amphibolites des gneiss avec des niveaux de marbre et des schistes à amphibole. Cette série pourrait être l'équivalent de la série de l'Aleksod décrite dans le Hoggar central par Bertrand J.M.L

2. Magmatisme:

Les formations intrusives des vieux complexes tectono-magmatiques sont incluses dans les complexes archéens de l'In-ouzzal et du socle du PR1.

2.1. Le complexe intrusif de Tisroukam:

A l'est du bloc d'In-ouzzal les roches de ce complexe forment des batholithes pluriphasées. A l'intérieur des roches archéennes elles forment une multitude de stocks et des sils plus rarement des massifs plus grands.

La composition de ce complexe va des roches ultrabasiques à acides suivant 4 phases:

Phase I: Elle regroupe des serpentinites, pyroxénites, gabbro, gabbros-amphibolites. Ces roches sont caractérisées par leur structures zonaire. Dans la partie centrale on observe des serpentinites claires avec des enclaves de dunnites serpentinisées et des pyroxènes. Vers les périphéries les serpentinites deviennent plus noires.

Phase II : Cette phase est constituée des diorites, des diorites quartzites et des tonalités à amphiboles et à biotites de texture massive à gneissique formant de grands massifs étirés en direction subméridiennes et recoupés par des dykes de pegmatites et d'aprites.

Phase III: Granite , granodiorite , plagiogranite , granosyérite, gneiss, granitoïde rubané et pegmatite. Ce sont des intrusions de formes variées: laccolites , stocks isométriques, filons couches concordantes, rarement dykes sécants, complexes ramifiés.

Phase IV: A cette phase sont rapportés des granites et des grano-syenites à biotite et biotite amphibole, des aprites et pegmatites à miscovites , grenat et tourmaline. Sont aussi rattachés à ce groupe des granitoïdes pré-tectoniques et différents dykes formant des champs à l'intérieur du complexe de Tsroukam.

2.2. . Complexe intrusif d'Echekel :

Il comporte les roches intrusives syn-plissement et métamorphiques de la série à stromatolihe: On y distingue les phases suivantes:

Phase I: Dunnites, pyroxénite, gabbros, gabbro-diorite, diabases, porphyrique diabasiques.

Phase II: Granites et granosyérite à biotite, micas et plus rarement à amphibole, aprite pegmatites à miscovite grenat, tourmaline.

De nombreux massifs de granitoïdes tarditectoniques et les dykes de compositions variées, constituent d'importantes ceintures de dykes parmi les roches du complexe Tsroukam y sont rattachés.

3 - Tectonique :

Le schéma tectonique de la région est tiré des conclusions faites lors des travaux de recherches systématiques effectués à l'échelle 1/200000 en 1984 (Kiniakine et al, 1984). Trois grandes unités tectoniques composent le schéma tectonique de la région:

3.1 Le bloc granulite d'In-ouzzal :

Il constitue l'élément tectonique majeur de la région. Il exerce une influence sensible sur la répartition de la minéralisation aurifère. Ce bloc a une forme triangulaire allongée suivant une direction sub-méridienne sur environ 200km. Sa largeur est de 5 km maximum au Sud, 40km au centre (21°20') et d'environ 60 km au nord.

La partie centrale du bloc est caractérisée par des structures en dômes, et linéaires, recoupées à l'Est et à l'Ouest par des failles E-W. Dans sa partie centrale, la faille In-allaren-In-ouzzal est suivie sur le terrain par des bandes de calcyphyres, de petits corps ultrabasiques, de syénites (mangérites), de pegmatites à minéralisation en TR et U.

3.2. Domaine structural d'In-ouzzal-Est

Il s'étire en direction méridienne sur environ 200 km avec une largeur dépassant 15 km. Il a une structure assignetrique sur toute sa longueur. A l'ouest de ce domaine, les formations de la série Tekouyat forment des structures monoclinales ou des plis avec des anticlinaux recoupés par des granito-gneiss tandis que sur leur flanc Est affleurent les formation intrusives de Tsroukam.

4- Minéralisation de la région :

De tous les indices minéralogiques de la région, seuls ceux classés comme indices aurifères ont un intérêt économique. A.Kiniakine distingua les zones structuro-formationnelles potentielles en or suivantes :

4.1- La dépression de Chet-Iller :

Avec une superficie de près de 5300km², elle porte 63 petits indices d'or associés aux roches de composition différentes. Les plus intéressants sont ceux liés aux filons à quartz-hématites et à quartz tourmaline. Leur longueur s'étend sur 10km environ et les teneurs en or sont de l'ordre de 10g/t

4.2 Domaine In-ouzzal-Est :

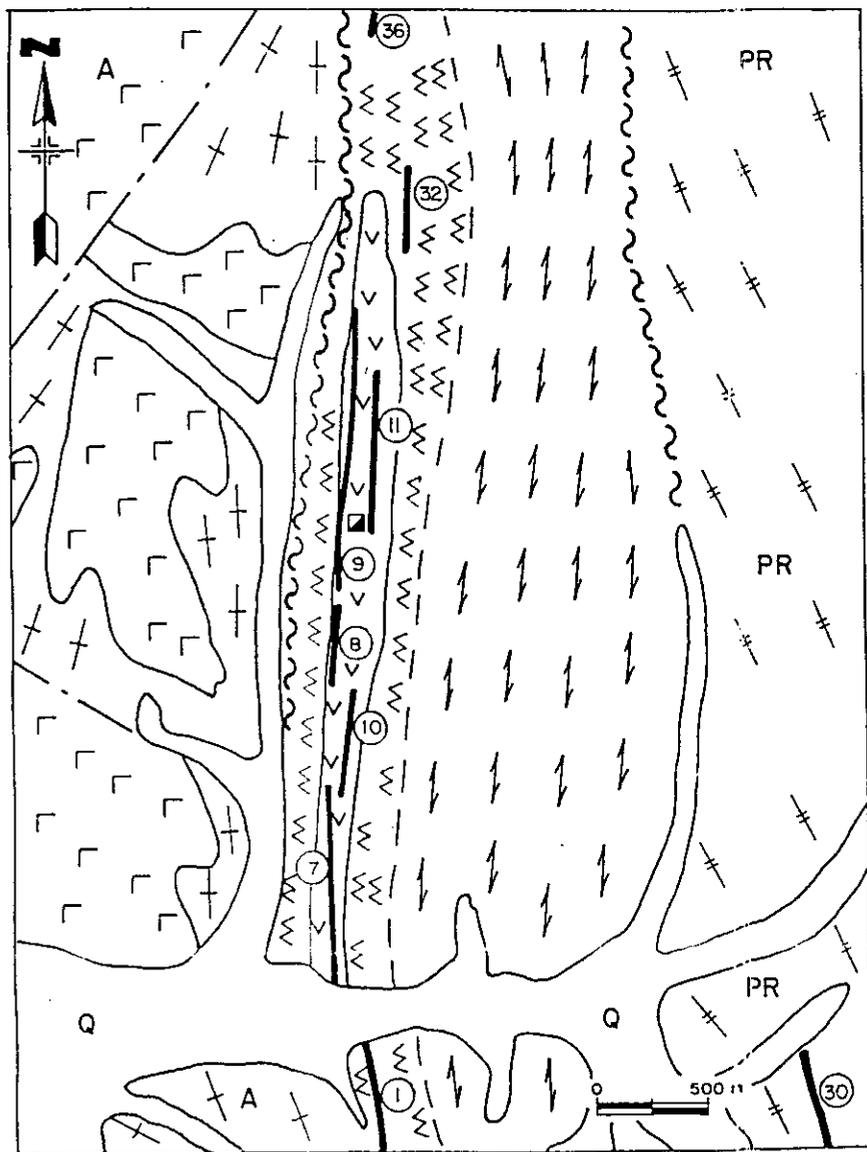
Il s'étend sur une superficie de 3700km² environ. 33 indices d'or associés en général au quartz métasomatique y ont été décelés. Ils sont constitués par des zones quartzieuses de largeur 100m et de longueur pouvant atteindre 3 km, avec une teneur généralement en dessous de 1-2g/t.

4-3- Le bloc granulite d'In-ouzzal :

Du point de vue de la minéralisation aurifère il est le domaine le plus important. La minéralisation est associée à des filons de quartz ou des zones quartzieuses. Un grand nombre d'indices et de gisements sont localisés à l'intérieur du bloc ou le long de sa bordure orientale. Parmi ces indices on note ceux d'Amesmessa et de Tirek, représentant près de quarante (40) indices dont les plus importants sont à Timeg, et à In-Allaren-Sud.

La minéralisation est localisée dans des filons de quartz formant des essaims ou des zones de broyage ou de mylonitisation. L'altération aux épontes est caractérisée par des processus hydrothermaux intenses : silicification, chloritisation, feldspathisation, carbonatation, et pyritisation. Cette association paragenétique est proche des bésites et elle joue un rôle important dans la concentration des minéralisations aurifères.

L'extension verticale de la minéralisation a été étudiée jusqu'à Amesmessa et Tirek ou elle a été recoupée à des profondeurs de 310 à 450m. L'or se rencontre le plus souvent sous forme de colonnes minéralisées. En plus de l'or des minéralisations en U, Th, Tr, et de Pt liées aux roches ultrabasiques ont été mises en évidence.



LÉGENDE

- Q QUATERNAIRE : DÉPÔTS DE SABLE
- PR PROTÉROZOÏQUE :
- X X GNEISS LEUCOCRATE
- // MYLONITE
- F F ULTRAMYLONITE
- V V GABBRO - DIORITE
- A ARCHÉEN :
- Γ Γ GABBRO
- / / GRANITO - GNEISS
- / ① ZONE AURIFÈRE IDENTIFIÉE
- ~ LIMITES DE LA ZONE DE FAILLE D'IN-CUZZAL EST
- - - FAILLE
- PUIITS DE MINE VERTICAL

FIGURE 2

CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE 9 DU
GISEMENT D'AMESMESSA (D'APRÈS L'EREM, 1990)

IV - GEOLOGIE DU GISEMENT :

Le territoire du gisement est formé de roches archéennes de la série d'In-ouzzal et du protérozoïque inférieur (PR1) recoupées par des dykes et petites intrusions d'âge et de composition variés (Rapport O.R.G.M ;1993).

1. Stratigraphie

1.1. Les roches archéennes

Elles constituent la partie Ouest du gisement localisées dans le mole d'In-ouzzal à structure géologique très compliquée. Ces roches sont représentées par des métagabbros, des gabbro-amphibolites et des pyroxénites. Elles sont granitisées à différents niveaux passant parfois des meso à des leuco-gneiss. Les plus importantes sont les granito-gneiss-leucocrates.

Les roches sont à gros grains et prennent parfois une texture pegmatoïde avec du quartz bleuâtre caractéristique des roches archéennes.

1.2. Formations du Protérozoïque inférieur :

Ces formations sont représentées par les roches du PR-1 qui affleurent à l'Est du gisement. Dans les limites du gisement, elles sont constituées par des gneiss – leucocrates et des granito-gneiss au milieu desquels des minces interlits d'amphiboles occurrent. Elles ont une forme brachiforme de direction submeridienne.

2. Les formations intrusives :

Leur extension est réduite dans les limites du gisement. Elles apparaissent sous forme de petits corps et dykes de gabbro, diorites et roches ultrabasiques. Dans la partie Ouest du gisement elles ont subi des processus secondaires de transformation (chloritisation, calcification, épéritisation serpentinitisation). Dans la partie Est elles forment des dykes de puissances variant entre 200-300m et de largeur de l'ordre de 2-3 km. Dans les limites du gisement on rencontre des dykes de rhyolite, de felsite, de diorite-porphyre, de gabbro-diorite de diabases , des dykes de granite porphyrisyrique.

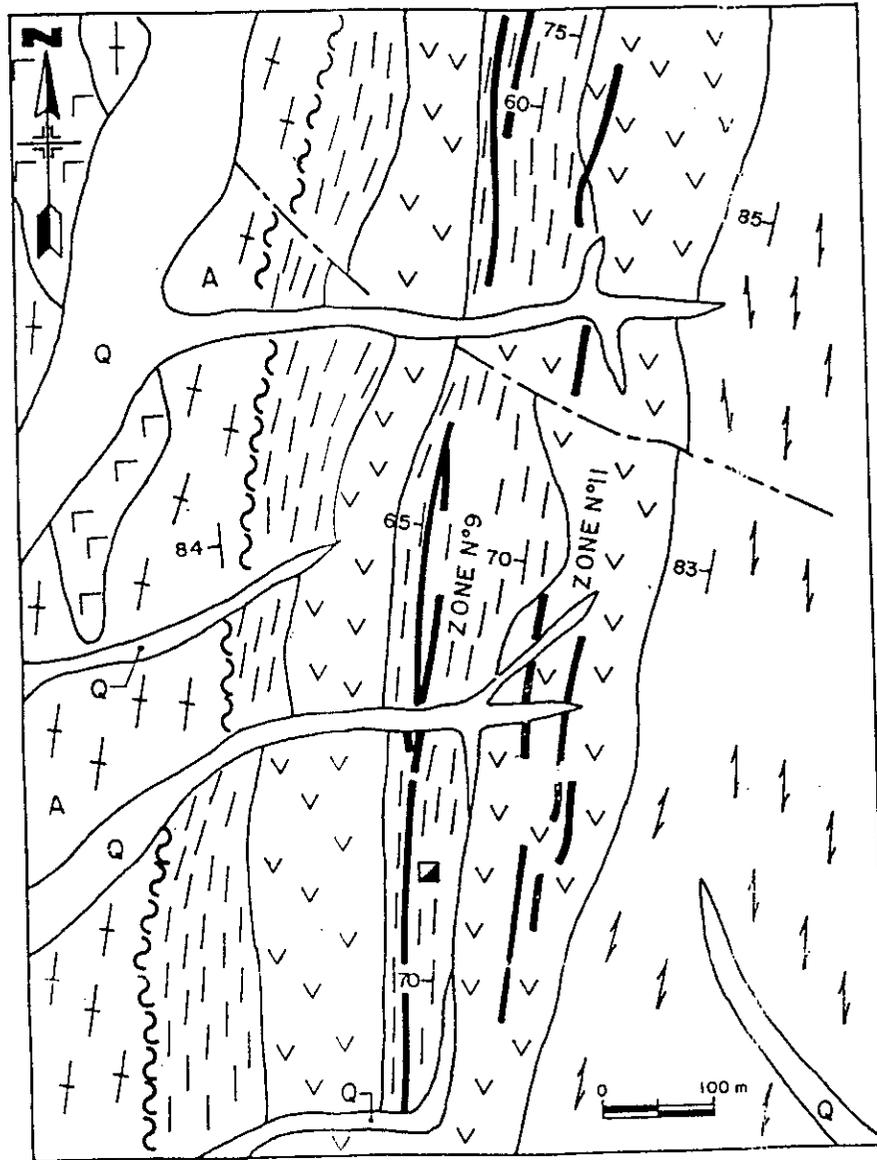
3. La tectonique cassante :

La tectonique cassante a été un élément majeur dans la mise en place de la minéralisation aurifère le long de la faille In-ouzzal-Est. Cette faille a un pendage de 70-80°W. Elle correspond à une faille inverse avec soulèvement du bloc Ouest. Elle est caractérisée par de puissantes zones de mylonitisation et de schistosité surtout pour le bloc Est, domaine du protérozoïque inférieur . Les roches de cette

zone se sont formées dans des conditions de dynamométamorphisme puissantes existant durant de longues périodes. La zone est représentée sur le terrain par une bande mylonitique de 0.2 à 2km de largeur.

La faille est accompagnée de fissures parallèles et diagonales. La minéralisation d'Amesmessah est localisée dans les fractures de cisaillement parallèle à la faille principale. Les fractures les plus tardives ont en générale une direction NW, NE, et E.W.

Les rejets successifs de ces fractures d'orientations diverses ont favorisé la création de blocs et de colonnes minéralisés, caractéristiques typiques du gisement d'Amesmessah en particulier et plus généralement de tous les gisements situés le long de la faille In-ouzzal.



LEGENDE

- Q QUATERNAIRE : DÉPÔTS DE SABLE
- // MYLONITE
- V V GABBRO-DIORITE
- /// ULTRAMYLONITE
- A ARCHEEN :
- GABBRO
- X X GRANITO-GNEISS
- ~ ZONE AURIFÈRE
- ~ LIMITE OUEST DE LA ZONE DE FAILLE D'IN-OUZAL EST
- - - FAILLE
- CONTACT GÉOLOGIQUE
- 70 DIRECTION ET PENDAGE D'ÉLÉMENTS STRUCTURAUX
- PUIXS DE MINE VERTICAL

FIGURE 3

GÉOLOGIE LOCALE DE LA ZONE 9 DU GISEMENT
D'AMESMESSA (D'APRÈS L'EREM, 1990)

4. Caractéristiques de la zone 9 :

Plusieurs zones aurifères ont été mises en évidence dans le gisement d'Amesmessa qui est un prolongement Sud du gisement de Tirek. Parmi elles la zone 9 est celle qui a fait l'objet de travaux d'évaluation les plus détaillés et qui présente à court terme le meilleur potentiel minier

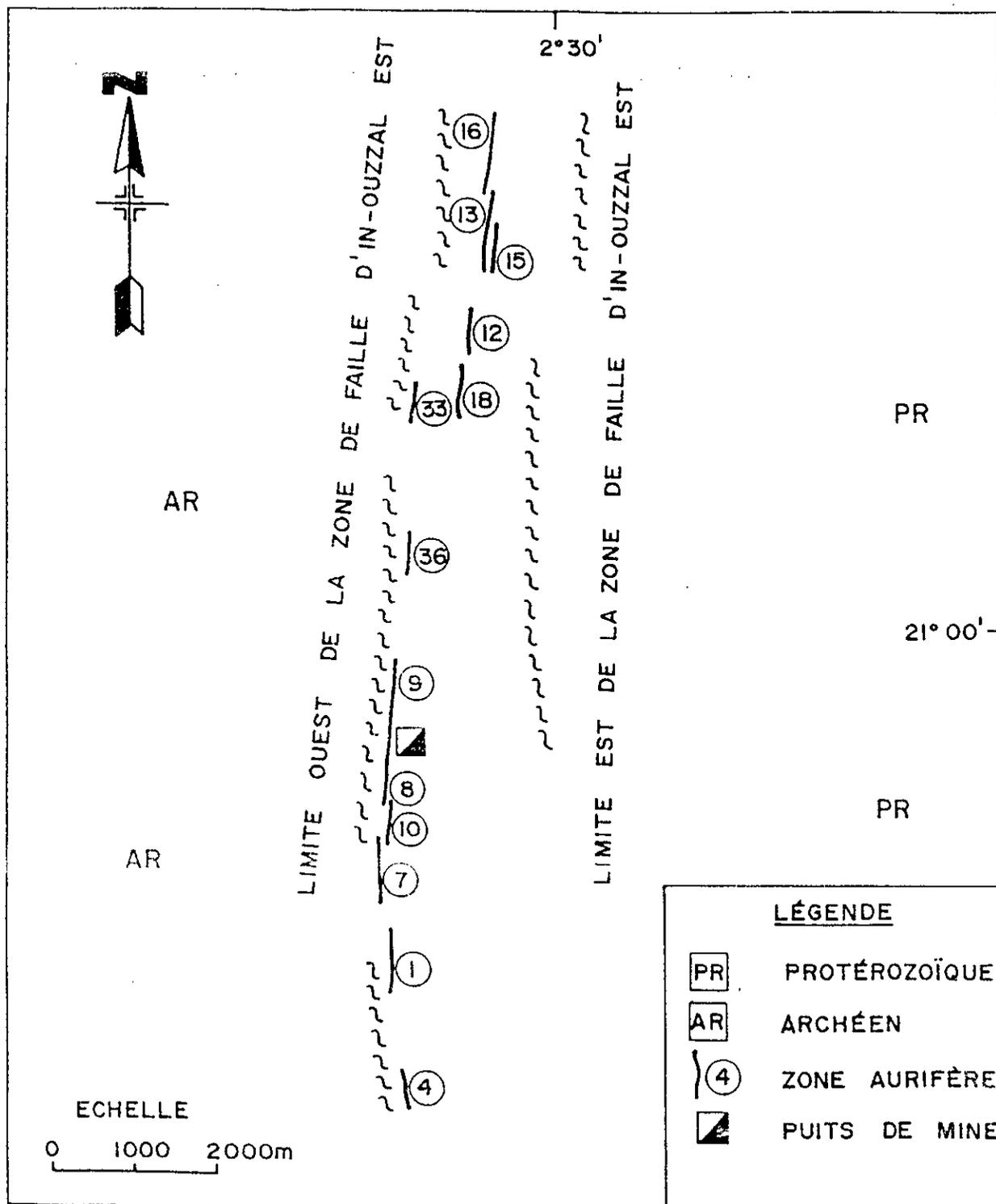


FIGURE 4 : CARTE DE LOCALISATION DES ZONES AURIFÈRES NUMÉROS 1, 4, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 18, 33 ET 36 D'AMESMESSA (D'APRÈS L'EREM, 1990).

Située sur le secteur centre du gisement d'Amesmessas, la zone 9 montre une direction pratiquement N-S (0 à 15°) avec un pendage de 60 à 80° vers l'ouest. La zone 9 se caractérise par une morphologie lenticulaire montrant des structures de pincement et de renflement marquées. Ceci est la caractéristique principale des gisements formés en zones de cisaillement. La zone 9 s'étend sur une longueur de 1320 m et une largeur variant entre 0 et 10m. Elle est composée d'un filon de quartz central d'épaves bétonnées minéralisées. Ce filon est une lentille discontinue distribuée à l'intérieur de la zone de faille d'In-ouzzal-Est.

5. Conditions minières et géotechniques :

Les corps minéralisés d'Amesmessas sont représentés par des filons de quartz à faible épaisseur (0.2 à 2.00m rarement 3.00m) . Soit en moyenne 1.66m. Les corps sont encaissés dans des mylonites. Le quartz filonien est à gros grain. Il est caractérisé par une intense fissuration longitudinale. Parfois il prend l'aspect de schiste. Les fissures sont moins développées. Les contacts des corps minéralisés sont très tectonisés. Ils sont souvent constitués par de l'argile de friction. La puissance des zones de contact atteint parfois 0.1 à 0.3m rarement elle est de 0.5 à 1.00m. Loin des contacts la schistification diminue brutalement, par la suite viennent des roches altérées. Ces roches sont parfois recoupées par des fissures diagonales. La stabilité des roches du toit et du mur est très bonne. Tous les travaux miniers ont été réalisés sans soutènement. Les minerais et les roches encaissantes sont faiblement humides. Le coefficient de foisonnement est de 1.6. Ainsi les conditions géotechniques du gisement sont simples et permettent une exploitation du gisement par chambre magasin.

6. Conditions hydrogéologiques du gisement.

Les conditions hydrogéologiques du gisement ont été jugées favorables par le groupe minier SIDAM Inc. (Canada) pour sa mise en exploitation d'après une étude de faisabilité réalisée en 1993. Cependant une visite sur site permet de constater l'absence totale de cours d'eau permanents dans la région. Les cours d'eau les plus proches sont situés au pied du Tassilis de Timissaou à environ 100-120km au S-E du gisement. Les débits de ces sources d'eau n'excèdent pas 0.15l/sec. L'Oued d'Amesmessas qui draine le gisement coule rarement étant données les faibles précipitations de la région (5mm/an en moyenne). La présence d'eau en quantité importante dans les alluvions des zones d'altération du socle métamorphique est presque exclue. On ne peut compter que sur les réservoirs d'eau souterraines localisés dans les failles. On pensait que le problème d'eau avait été résolu par les recherches effectuées par l'E.R.E.M entre 1979 et 1982 dans la partie Est de la dépression Tanezrouft dont le résultat fut la mise en évidence d'un bassin aquifère à deux niveaux dans les formations argilogresseuses du crétacé. Mais il n'en est rien. Le vrai obstacle à la mise en exploitation du gisement reste l'eau.

CHAPITRE 2

TYPES DES TRAVAUX
ET
STATISTIQUE DES DONNEES

Chapitre 2

Types des travaux et statistique des données

Introduction:

Préalablement à tout calcul géostatistique il est absolument nécessaire de procéder à une critique des données. Cette critique préliminaire est nécessaire dans la mesure où elle permet à l'opérateur de se familiariser avec les données. Elle consiste en une description des types travaux qui ont permis d'acquérir les données d'étude et une statistique élémentaire de ces dernières.

I - Types des travaux :

Les travaux effectués sur la zone 9 du gisement d'Amesmessas comprennent des tranchées, des forages, un puits vertical, une galerie directionnelle, des recoupes et des rainurages.

1. Tranchées :

71 tranchées ont été creusées perpendiculairement à la direction de la zone à tous les 10m en moyenne. Les dimensions de l'échantillon prélevé dépendaient de l'épaisseur de la zone. Ainsi pour une épaisseur d'un mètre et plus l'échantillon mesurait 5cm de profondeur sur 10cm de largeur. Pour des épaisseurs de moins d'un mètre l'échantillonnage se faisait par grattage avec de grandes largeurs. Le poids de l'échantillon était compris entre 10 et 15 kg.

2. Forages :

147 forages ont été effectués sur la zone jusqu'à une profondeur maximale de 400m. Ces forages suivent une maille de 40mx40m dans les réserves de catégorie C1 et 80mx80m dans les réserves de catégorie C2. Le diamètre des carottes de sondage est de 76mm et le poids de l'échantillon recueilli pour analyse varie de 1 à 8kg.

3. Puits :

Un puits vertical de 7.6 mètres carrés de section a été foncé dans l'éponte inférieure de la veine avec un travers banc de 66 mètres de longueur jusqu'à la zone minéralisée.

4. Galerie directionnelle :

Une galerie directionnelle de 316 mètres de longueur a été creusée dans la zone minéralisée afin d'en étudier les caractéristiques. Cette galerie mesure 5 mètres carrés de section. Les déblais abattus lors du creusage ont été évacués à l'aide de wagonnets par une chargeuse pneumatique.

5- Les recoupes :

26 recoupes perpendiculaires à la direction de la galerie ont été taillées à tous les 20 mètres de façon à traverser toute l'épaisseur de la zone minéralisée jusqu'à la roche fraîche.

6. Rainurages :

165 rainures ont été prélevées à tous les 3 mètres environ le long de la galerie. La saignée était pratiquée sur le front de taille à 1 mètre du plancher de la galerie. Comme pour les tranchées l'échantillon prélevé était de 5 centimètres de profondeur sur 10 centimètres de largeur et était plus large lorsque le filon était plus petit. De cette façon le poids total de l'échantillon variait entre 4 et 14kg. Pour les analyses chimiques l'échantillon global était divisé en échantillon individuel selon le type de quartz et de roches encaissantes. La méthode d'analyse utilisée était la docimasie .

7. Insuffisances notées lors des travaux d'évaluation du gisement :

Le rapport d'évaluation du groupe minier SIDAM Inc...(1993) avait révélé certaines insuffisances lors des travaux d'évaluation du gisement. L'étude de certains corps par travaux souterrains est insuffisante pour le stade de l'évaluation détaillée. Certaines données de sondage n'ont pas été vérifiées par travaux miniers. La variabilité de la minéralisation par les cheminées n'a pas été étudiée. L'étude par sondage de certains corps n'a pas été couronnée de succès. Les corps aveugles n'ont pas été étudiés. Les oueds de la région n'ont pas été estimés à fond.

Ces problèmes doivent servir d'orientation pour les travaux futurs.

II. STATISTIQUE DES DONNEES :

Les données utilisées pour ce travail ont été fournies sur un plan représentant la projection verticale de la zone 9 d'Amesmessà à l'échelle 1/1000. Ce plan a été réalisé à la suite des travaux d'évaluation détaillée du gisement aurifère d'Amesmessà par l'O.R.G.M (office nationale de la recherche géologique et

minière). Sur ce plan les profils au nombre de 32 sont espacés de 40 mètres et orientés en direction Nord Sud.

1. Informations relatives aux sondages et tranchées :

1.1 Les sondages (forages) :

Ils sont implantés suivant une maille régulière de 40mX40m. Ils sont identifiés par un cadre rectangulaires dans lequel sont marqués le numéro du sondage, sa teneur en or , sa longueur d'interception avec la couche minéralisée (puissance) , et son accumulation qui est égale au produit de la puissance minéralisée par la teneur. La profondeur maximale des sondages est de 400m. Certains n'ont pas fait l'objet d'échantillonnage. Il s'agit des sondages S119, S120, S145, S175 , S177 , S181, S189, S195, S199, S228, . Pour le calcul les teneurs en or dans ces sondages ont été considérées comme nulles pour éviter un risque de surévaluation. Au total 147 sondages ont été retenus.

1.2 Les tranchées et recoupes :

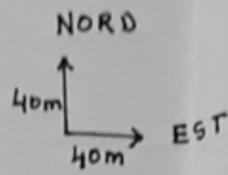
Les tranchées sont espacées le long du filon de 10m parfois de 5m. Les données relatives à certaines tranchées sont illisibles sur le plan .Ce sont les tranchées T46, T53, T196 ,T197, T198, T216 , T217, T218 , T219 , T676, T685 , T694 ,T696. Ces tranchées n'ont pas été retenues pour les calculs.

Une erreur a été commise dans l'identification des tranchées sur le plan. En effet des valeurs de teneurs ont été attribuées à des épaisseurs et vice versa. Ainsi on peut lire sur le plan des épaisseurs de 700 m et plus pour des teneurs de moins de 0.2g/t. Cette faute a été corrigée à la saisie des données. Au total 74 tranchées ont été retenues.

Par ailleurs 24 recoupes réalisées perpendiculairement à la direction de la galerie d'exploitation rentrent dans le calcul.

2. ANALYSE STATISTIQUE :

Préalablement à l'étude des autocorrelations spatiales nous procédons à une statistique élémentaire des variables étudiées. Cette étude passera tout naturellement par la construction des histogrammes ou courbes expérimentales d'apparition des différentes valeurs des variables. L'histogramme est un moyen de vérifier l'homogénéité d'une répartition spatiale et de distinguer des valeurs extrêmes ou suspects.



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

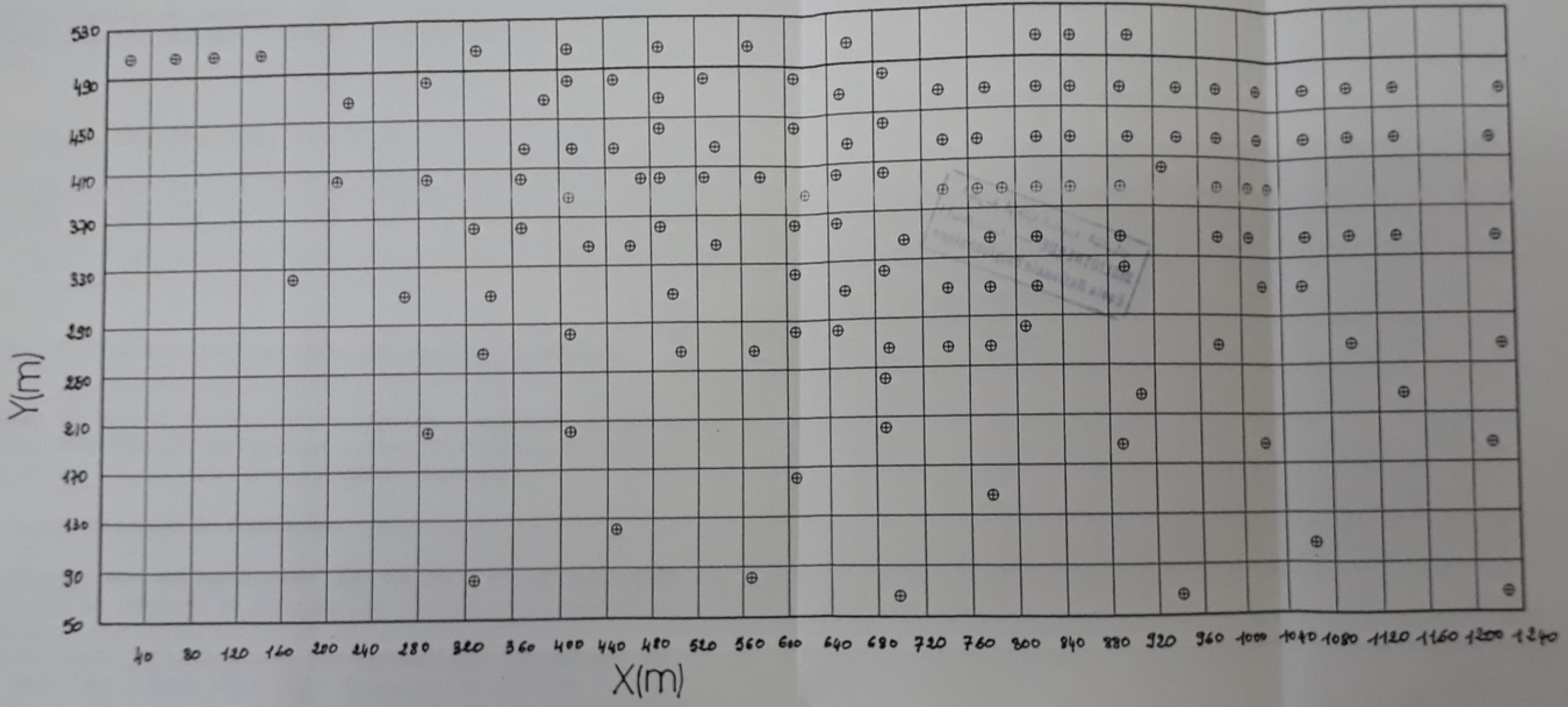


Fig. 5 .Disposition des points d'échantillonnage sur la zone 9 d'Amesmesssa ⊕ : forages.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

2.1 Etude des distributions :

L'objectif visé dans ce paragraphe est la détermination des paramètres statistiques principaux et de trouver la loi théorique à laquelle obéit la distribution statistique expérimentale des variables étudiées. Les variables concernées sont la teneur, l'épaisseur, et l'accumulation.

Le tableau 1 résume les paramètres généraux (moyenne, variance, minimum, maximum, écart type, skewness, kurtosis, coefficient de variation) des trois variables.

Variabes	Effectifs	Min.	Max.	Moy (m)	Var (S ²)	Ecart type (S)	Skewness	Kurtosis	Coef. de var
Teneur(g/t)	293	0,00	254,4	15,07	718,58	26,806	4,45	30,91	177,811
Epaisseur(m)	293	0,00	8,18	1,77	1,93	1,39	1,56	5,94	78,40
Accu.(mg/t)	293	0,00	464,03	33,71	4765,2	69,03	3,46	15,908	204,78

Tableau 1: Paramètres généraux statistiques des variables étudiées

Par ailleurs une étude de corrélation entre variable teneur et variable épaisseur a montré que ces variables sont très faiblement corrélées. Le coefficient de corrélation calculé r est de 0.159. Ainsi elles peuvent être étudiées séparément.

2.1.1. Analyse des courbes des distributions

Intéressons nous aux histogrammes FIG 6.a ,6b et 6 c. Ils représentent respectivement les allures de la distribution des variables teneur, épaisseur et accumulation.

En première approximation ils sont du type lognormal avec prédominance des valeurs faibles pour quelques valeurs fortes disséminées. Ils présentent tous une queue allongée dans le sens des valeurs croissantes de l'axe des abscisses. Ces distributions sont dissymétriques. Ce qui est tout à fait normal." Les distributions réelles de valeurs expérimentales des paramètres géologiques dans un gisement aurifère sont dans la plus part du cas représentées par des courbes dissymétriques. " Ces distributions sont non représentatives. Ceci est due à la présence de valeurs très élevées par rapport à la moyenne. Pour adoucir cet effet, les variables ont été loguées. Le tableau 2 résume les paramètres statistiques généraux de la distribution de ces variables logarithmiques.

Variables	Effectif.	Min.	Max.	Moy(m)	Var (S ²)	Ecart type (S)	Skewness	Kurtosis	Coef de var.
LN(Teneur)	286	-1,897	5,53	1,838	1,847	1,359	0,020	3,007	73,926
LN(Epais.)	287	-1,715	2,102	0,585	0,585	0,765	-0,193	2,642	238,86
LN(Acc)	287	-2,813	6,140	3,122	3,12	1,76	-0,099	2,84	81,69

Tableau 2: Paramètres statistiques généraux des variables logarithmiques

Les figures 6.a ,6.b et 6.c montrent l'allure des histogrammes décrivant la distribution des variables logarithmiques avec les diagrammes des fréquences cumulées correspondantes.

Ces distributions montrent une symétrie plus moins parfaite par rapport à l'axe des fréquences. En première approximation ces distributions peuvent être ajustées à des courbes normales ou gaussiennes .

Ici il est nécessaire d'effectuer des tests statistiques pour affirmer la normalité des distributions des variables logarithmiques.

2.1.2 Test du KHI-DEUX :(χ^2) :

Ce test a été effectué pour ajuster la distribution des variables logarithmiques observée à une distribution normale. Les calculs ont été effectués pour la teneur , l'épaisseur et l'accumulation.

a. Application aux variables logarithmiques

Test du KHI-DEUX pour LN (Teneur)

Classes	Limites de classes	Z pour limite de classes	Aire sous la courbe normale	Aire pour chaque classe	Fréquences théoriques	Fréquences observées
-3 , -1.5	-3	-3.55	0.4998	0.007	2.009	5
-1.5 , 0	-1.5	-2.45	0.4928	0.0813	23.33	20
0 , 1.5	0	-1.35	0.4115	0.3128	89.17	100
1.5 , 3	1.5	-0.25	0.0987	0.401	115.08	100
3 , 4.5	3	0.85	0.3023	0.1749	50.19	55
4.5 , 6	4.5	1.97	0.4772	0.0214	6.14	6
	6	3.08	0.4986			

Tableau 3

Le degré de liberté $d = n - 1 - q$

n : nombre de classes = 6

q : paramètres de la loi théorique = 2 (loi normale)

Il vient alors $d = 3$

Le résultat du calcul du χ^2 par la formule (7) donne $\chi^2 = 8.9$

Pour $d = 3$ et un seuil de signification de 2.5% $\chi_0^2 = 9.35$. $\chi^2 \in [0, \chi_0^2]$

Ainsi l'hypothèse selon laquelle la distribution des LN(Teneur) serait normale est acceptée avec un seuil de signification $\alpha = 2.5\%$

Test du KHI-DEUX pour LN(Epaisseur)

Classes	Limites de classes	Z pour limites de classes	Aire sous la courbe normale	Aire pour chaque classe	Fréquences théoriques	Fréquences observées
-2 -1.5	-2	-3.03	0.0038	0.0214	6.16	5
-1.5 -1	-1.5	-2.37	0.0252	0.0688	19.81	12
-1 -0.5	-1	-1.72	0.0940	0.1359	39.13	30
-0.5 0	-0.5	-1.07	0.2299	0.1384	39.85	50
0 0.5	0	-0.41	0.3683	0.755	67.6	65
0.5 1	0.5	0.23	0.3867	0.1206	34.73	36
1 1.5	1	0.88	0.2661	0.1461	42.07	65
1.5 2	1.5	1.54	0.1200	0.0845	24.33	17
2 2.5	2	2.19	0.0355	0.0286	8.23	7
2.5 3	2.5	2.84	0.0069	0.006	1.72	
	3	3.50	0.009			

Tableau 4

Le degré de liberté $d = n - 1 - q$

n : nombre de classes = 10

q : paramètres de la loi théorique = 2 (loi normale)

Il vient alors $d = 7$

Le résultat du calcul du χ^2 par la formule (7) donne $\chi^2 = 21.80$

Pour $d = 7$ $\chi_0^2 = 24.32$. $\chi^2 \in [0, \chi_0^2]$

Ainsi l'hypothèse selon laquelle la distribution des LN(Epaisseur) serait normale est acceptée avec un seuil de signification de $\alpha = 0.1\%$

Test du KHI-DEUX pour LN(Accumulation)

Classes	Limites de classes	Z pour limites de classes	Aire sous la courbe normale	Aire pour chaque classe	Fréquences théoriques	Fréquences observées
-4 -2	-4	-3.49	0.4997	0.0092	2.64	2
-2 0	-2	-2.35	0.4905	0.1	28.7	29
0 2	0	-1.22	0.3896	0.3538	101.54	98
2 4	2	-0.09	0.0358	0.383	109.92	104
4 6	4	1.03	0.3472	0.18118	51.99	50
6 8	6	2.17	0.3183	0.02	5.74	4
	8	3.03	0.49948			

Tableau 5

Le degré de liberté $d = n - 1 - q$

n : nombre de classes = 6

q : paramètres de la loi théorique = 2 (loi normale)

Il vient alors $d = 3$

Le résultat du calcul du χ^2 par la formule (7) donne $\chi^2 = 10.39$

Pour $d = 3$ et un seuil de signification de 1% $\chi_0^2 = 11.34$. $\chi^2 \in [0, \chi_0^2]$

Ainsi l'hypothèse selon laquelle la distribution des LN(Accumulation) serait normale est acceptée avec un seuil de signification $\alpha = 2.5\%$

2.1.4 . Estimation des moyennes des variables à partir de leurs moyennes logarithmiques.

Si une population est distribuée suivant une loi lognormale on peut calculer la moyenne μ de cette distribution en appliquant la relation suivante.

(9)

$$\mu = e^{\alpha + v/2}$$

Où α = la moyenne des logarithmes des données ,

v = la variance des logarithmes des données ,

Les moyennes ainsi estimées pour les trois variables teneur, épaisseur, et accumulation sont respectivement égale à 15.82, 1.84, et 41.38. Ces moyennes sont très proches des moyennes des variables brutes. Or " si l'écart entre la moyenne des variables brutes et la moyenne estimée à partir de la moyenne logarithmique des mêmes variables n'est pas élevé alors on peut admettre que l'ajustement de la distribution des variables à la loi normale est accepté " (JEKHOWSKY.B 1977)

3. Calcul de la dispersion absolue des variables:

Le gisement aurifère d'Amesmessas admet une distribution lognormale des teneurs et des épaisseurs .C'est un "gisement lognormale". Les gisements lognormaux admettent une dispersion intrinsèque et il est possible de calculer une dispersion absolue dite dispersion absolue logarithmique portant sur les logarithmes des variables teneur et épaisseur . Dans ces conditions tous les calculs porteront sur les logarithmes des variables et toutes les variances obtenues sont des variances logarithmiques. Il est très facile d'expliquer ce que signifie ces variances logarithmiques.

Désignons par S_b^2 la variance des variables brutes (valeurs expérimentales des variables) et S_L^2 celle des LN des variables. m_b étant la moyenne arithmétique des variables brutes les formules de la loi lognormale permettent d'écrire:

$$S_b^2 = m_b^2 [e^{s^2L} - 1]$$

En admettant que S_L^2 est petit en se limitant aux premiers termes du développement de l'exponentielle en série

$$e^{s^2L} = 1 + S_L^2 \text{ il vient}$$

$$S_b^2 = m_b^2 \cdot S_L^2 \Rightarrow S_L^2 = S_b^2 / m_b^2 \text{ autrement dit}$$

(10)

$$S_L = S_b / m_b$$

Cette formule montre que l'écart type logarithmique est équivalente à l'écart type relatif des variables brutes. Pour des limites de confiance sur m_b l'erreur relative sur m_b est maximum $\pm S_L / \sqrt{N}$, N étant le nombre de variables ou en d'autres termes

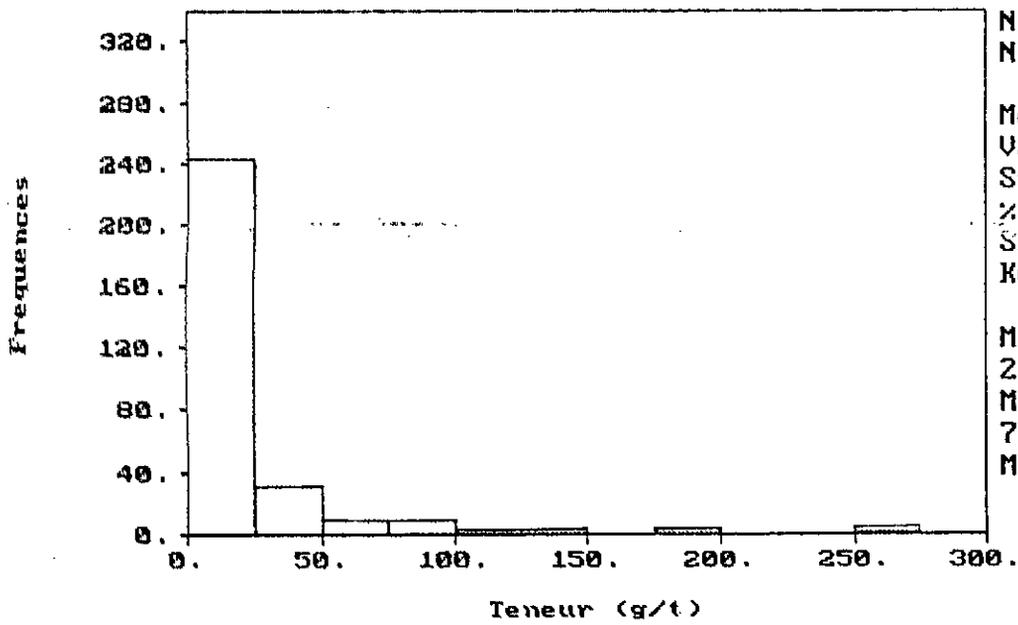
$$m(-s_L / N^{1/2}) = m_b = m \cdot e(S_L / N^{1/2})$$

Le calcul de la dispersion absolue des variables a donné respectivement pour les variables teneur, épaisseur, et accumulation 1.77, 0.78, et 2.04 .

Conclusion :

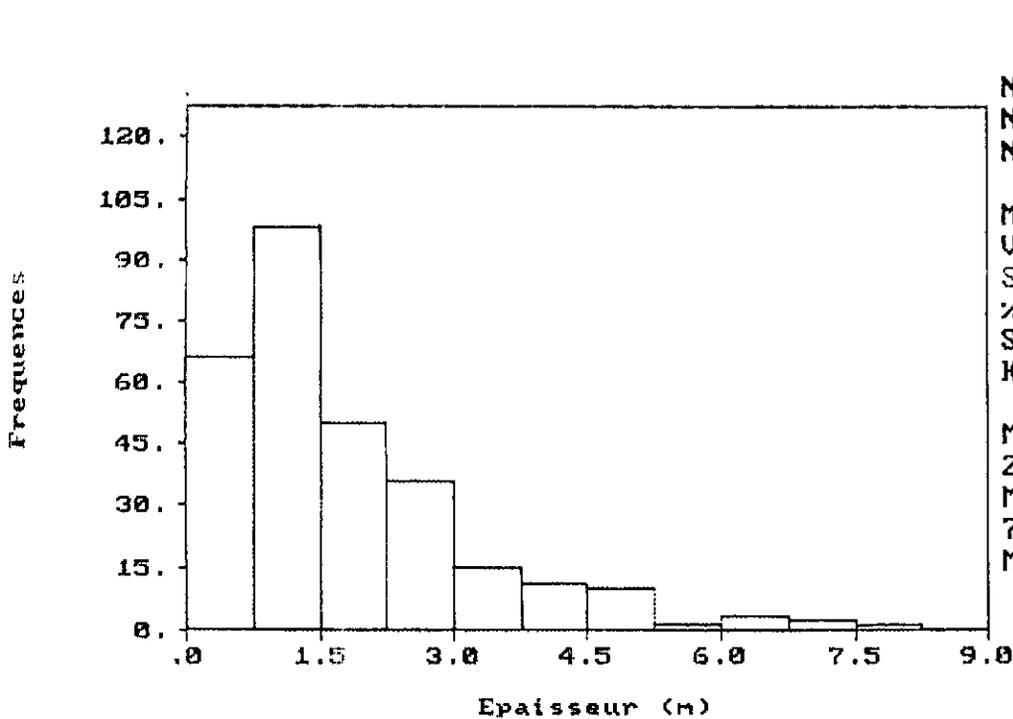
Les variables brutes expérimentales suivent une distribution dissymétrique. Par contre les variables logarithmiques sont distribuées suivant la loi normale. Le test du KHI-DEUX atteste ce point de vue. Le coefficient de corrélation calculé en SCATTER PLOT sous le logiciel Geoeas pour les variables Teneurs et Epaisseurs a montré que ces deux variables étaient indépendantes .

Fig. 6.a Histogramme pour Teneur



Statistics

N Total :	293
N Miss :	0
N Used :	293
Mean :	15.113
Variance :	720.632
Std. Dev :	26.845
% C.V. :	177.623
Skewness :	4.446
Kurtosis :	30.824
Minimum :	.000
25th % :	2.425
Median :	5.300
75th % :	15.450
Maximum :	254.400

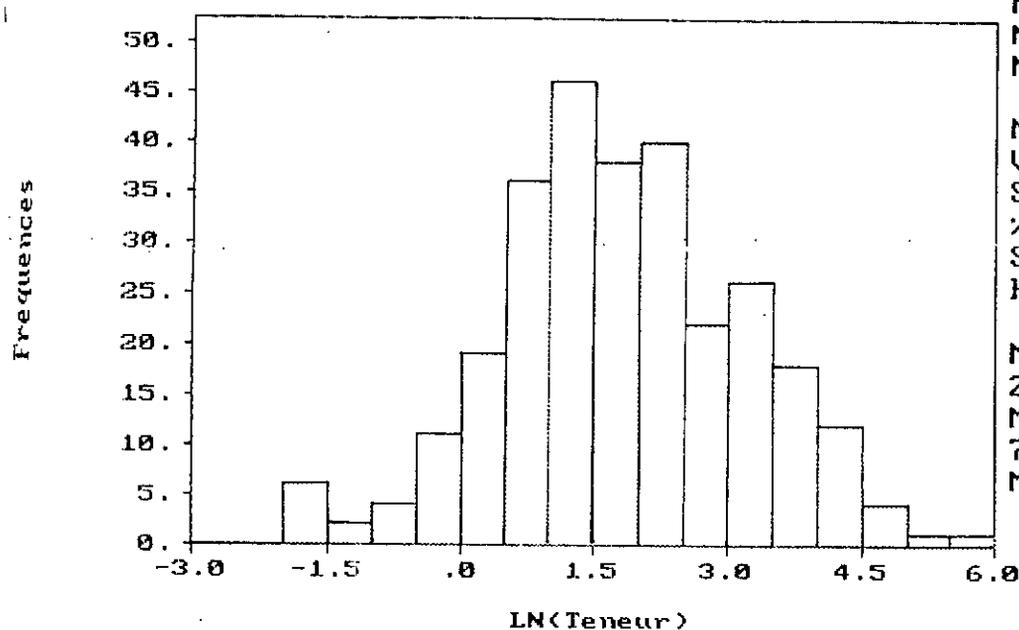


Statistics

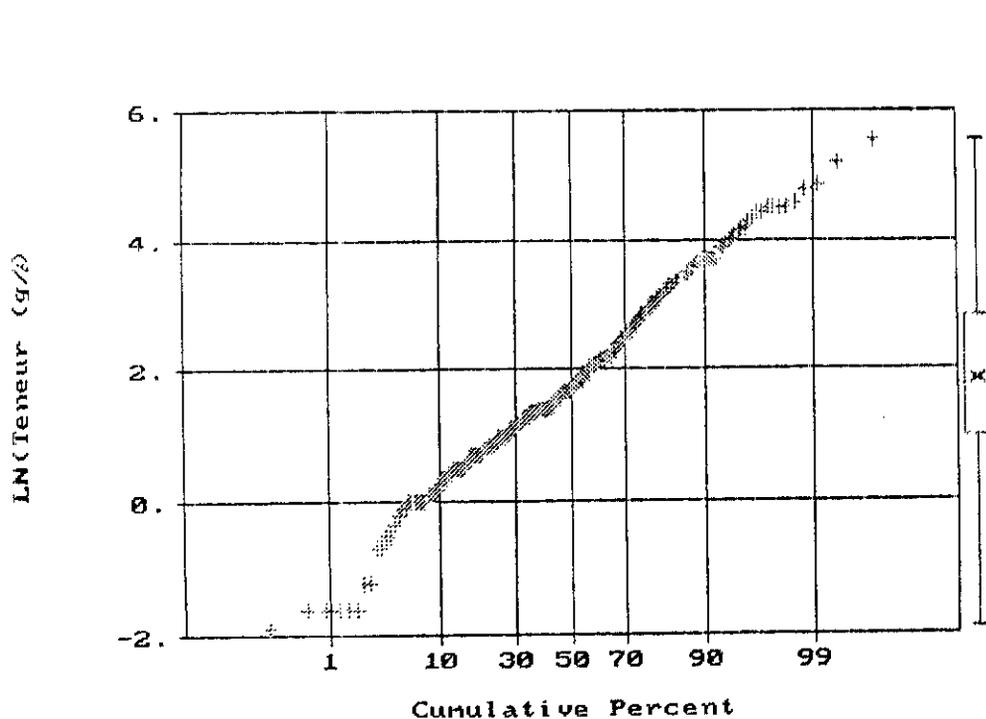
N Total :	293
N Miss :	0
N Used :	293
Mean :	1.770
Variance :	1.936
Std. Dev :	1.392
% C.V. :	78.616
Skewness :	1.576
Kurtosis :	5.958
Minimum :	.000
25th % :	.800
Median :	1.350
75th % :	2.300
Maximum :	8.180

Fig 6.b Histogramme pour Epaisseur

Fig. 7.a Histogramme pour LN(Teneur)



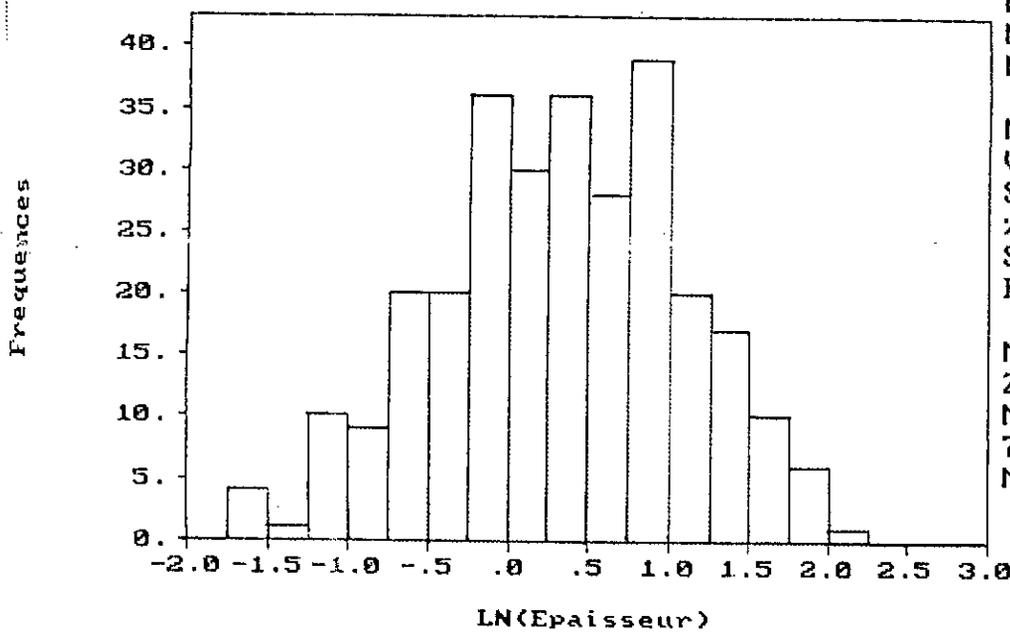
Statistics	
N Total :	293
N Miss :	7
N Used :	286
Mean :	1.840
Variance :	1.853
Std. Dev :	1.361
% C.V. :	73.984
Skewness :	.017
Kurtosis :	2.998
Minimum :	-1.897
25th % :	.956
Median :	1.705
75th % :	2.791
Maximum :	5.539



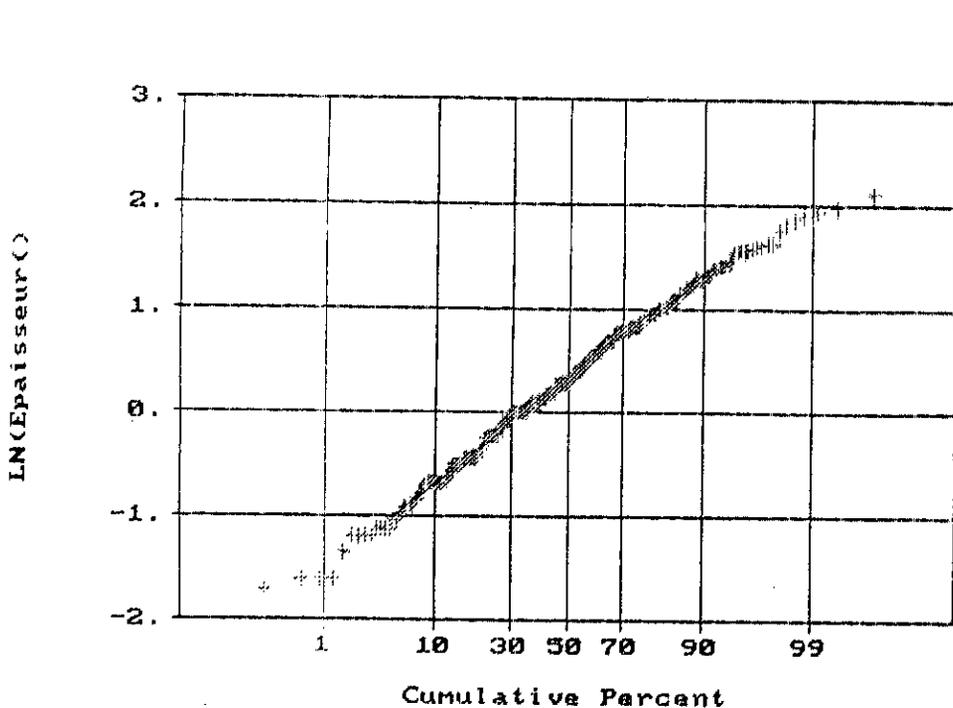
Statistics	
N Total :	293
N Miss :	7
N Used :	286
Mean :	1.840
Variance :	1.853
Std. Dev :	1.361
% C.V. :	73.984
Skewness :	.017
Kurtosis :	2.998
Minimum :	-1.897
25th % :	.956
Median :	1.705
75th % :	2.791
Maximum :	5.539

Fig. 7.b Diagramme des fréquences cumulées pour la LN(Teneur)

Fig. 7.c Histogramme pour LN(Epaisseur)



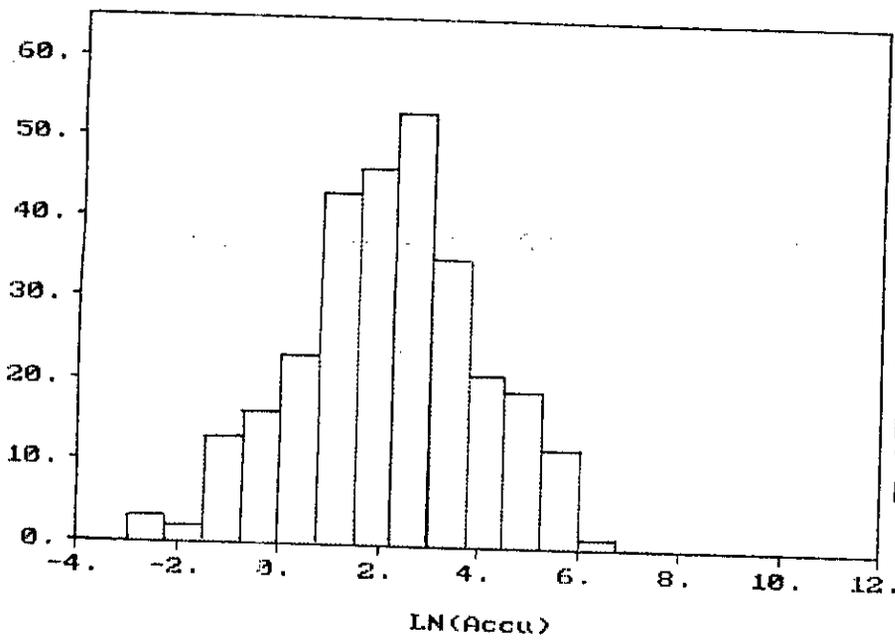
Statistics	
N Total :	293
N Miss :	6
N Used :	287
Mean :	.318
Variance :	.586
Std. Dev :	.765
% C.V. :	240.757
Skewness :	-.187
Kurtosis :	2.643
Minimum :	-1.715
25th % :	-.223
Median :	.300
75th % :	.833
Maximum :	2.102



Statistics	
N Total :	293
N Miss :	6
N Used :	287
Mean :	.318
Variance :	.586
Std. Dev :	.765
% C.V. :	240.757
Skewness :	-.187
Kurtosis :	2.643
Minimum :	-1.715
25th % :	-.223
Median :	.300
75th % :	.833
Maximum :	2.102

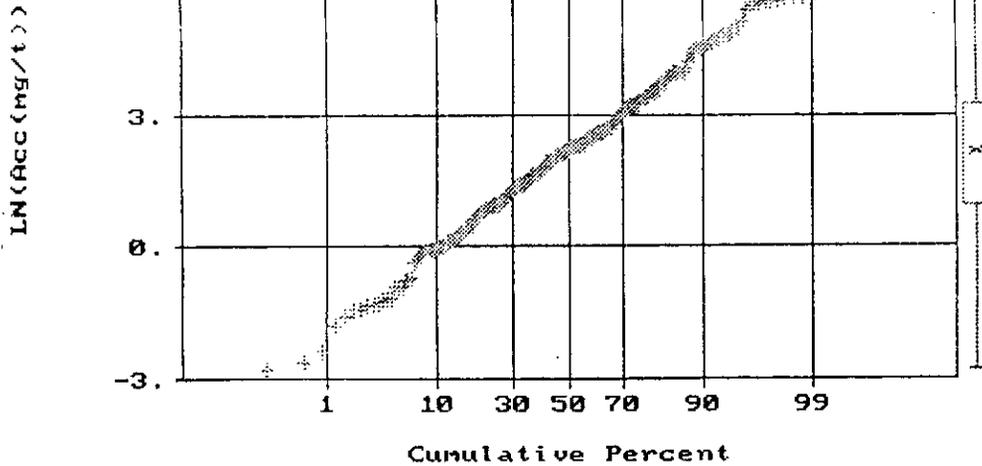
Fig. 7.d Diagramme des fréquences cumulées pour LN(Epaisseur)

Fig. 7.e Histogramme pour LN(Accu.)



S t a t i s t i c s

N Total :	293
N Miss :	6
N Used :	287
Mean :	2.154
Variance:	3.110
Std. Dev:	1.763
% C.V. :	81.871
Skewness:	-.095
Kurtosis:	2.855
Minimum :	-2.813
25th % :	.932
Median :	2.197
75th % :	3.260
Maximum :	6.140

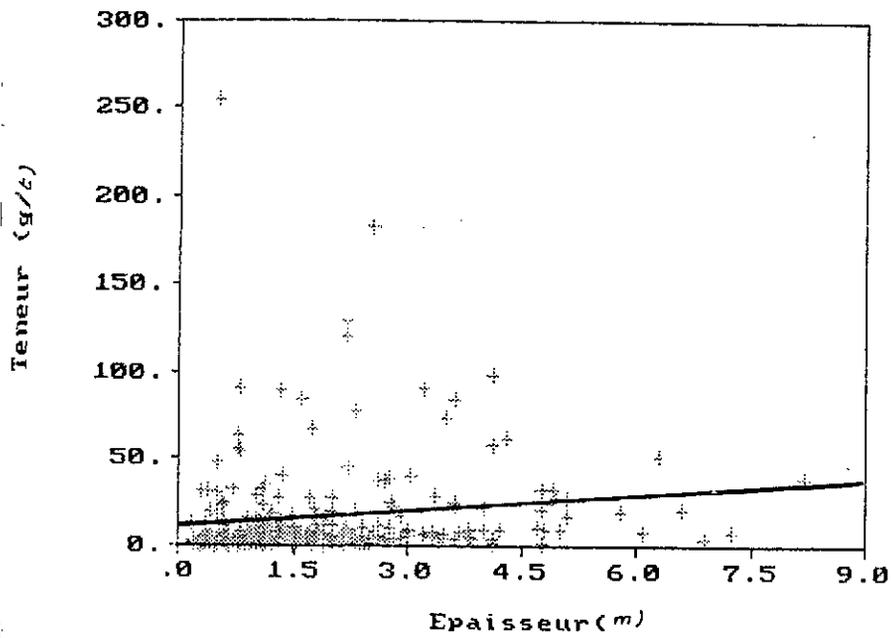


S t a t i s t i c s

N Total :	293
N Miss :	6
N Used :	287
Mean :	2.154
Variance:	3.110
Std. Dev:	1.763
% C.V. :	81.871
Skewness:	-.095
Kurtosis:	2.855
Minimum :	-2.813
25th % :	.932
Median :	2.197
75th % :	3.260
Maximum :	6.140

Fig. 7.f Diagramme des fréquences cumulées pour LN(Accu.)

Scatter Plot
from data file faly.dat



Regression Results:

# Pairs	:	293
Slope	:	3.065
Intercept	:	9.689
Correl. coeff.:	:	.159

Fig7.g Courbes de régression Teneur/Epaisseur

CHAPITRE 3

ANALYSE STRUCTURALE

Chapitre 3

Analyse structurale

I- Rappels en géostatistique monovariante:

1. Introduction:

“ L’approche géostatistique se manifeste à travers la théorie des variables régionalisées qui se fixe comme objectif de caractériser la structure spatiale des phénomènes naturels sous une forme mathématique appropriée et de résoudre le problème d’estimation à partir d’un échantillonnage donné ”. (Delhomme.J.P,1977) me. Par variables régionalisées nous entendons des variables mesurées dans la nature telles que la teneur ou l’épaisseur d’une couche, la profondeur d’un horizon géologique, des anomalies géochimiques etc.

Un gisement est toujours un phénomène régionalisé à trois dimensions. L’analyse structurale d’un phénomène régionalisé est l’ensemble des études qui contribuent à l’élaboration d’un modèle opérationnel caractéristique de cette régionalisation. L’analyse structurale passe par la construction de variogrammes expérimentaux qui reflètent les corrélations entre variables en fonction de la distance entre points échantillonnés.

2. L’outil variogramme:

2.1. Définition:

Si $z(x)$ est la valeur de la variable en un point x , l’expression du variogramme γ pour la distance h est :

$$(11) \quad \gamma(h) = 1/2E[(z(x)-z(x+h))^2]$$

Le variogramme exprime le demi-accroissement quadratique moyen entre deux points distants de h . Le variogramme permet d’évaluer et de discuter la corrélation entre les éléments voisins, et d’interpréter l’évolution de cette corrélation lorsque la distance entre éléments croît progressivement. La construction du variogramme expérimental et son interprétation constituent la première étape incontournable à toute évaluation géostatistique.

2.2 . Construction du variogramme expérimental directionnel:

Si nous disposons de N couples de points distants de h , le variogramme expérimental directionnel est estimé par:

$$(12) \quad 2\gamma(h) = 1/N \cdot \sum [Z(x_i) - Z(x+h)]^2$$

Il est calculé à partir de l'ensemble des couples de points expérimentaux. On définit un certain nombre de classes de distances entre ces points puis on arrange tous les couples formés par les points échantillonnés. Pour chaque classe de distance on détermine :

- la distance moyenne h ;
- le variogramme γ ;
- le nombre de couples présents dans la classe « qui doit être le plus élevé possible pour que les moyennes estimées aient une précision suffisante » ;

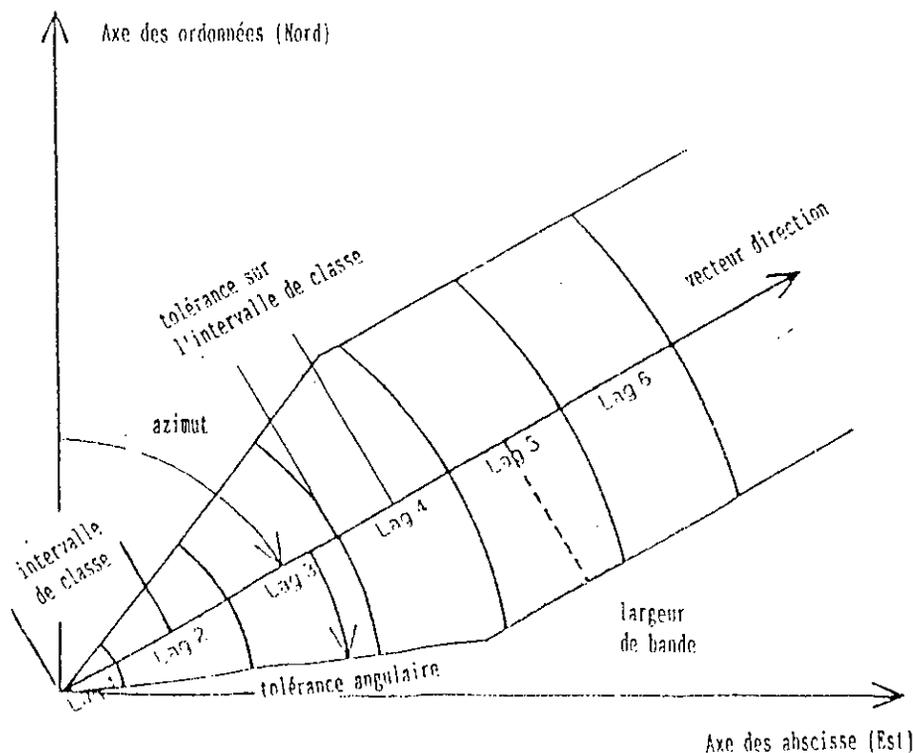
“En générale il y a plus de couples aux petites distances qu'aux grandes et le variogramme devient plus incertain au fur et à mesure que la distance s'accroît” (Delhomme 1984). La représentation graphique d'un variogramme expérimental indique jusqu'à quelle distance un point expérimental peut influencer sur l'ensemble des autres informations.

2.3. Paramètres pour le calcul du variogramme expérimental directionnel :

Pour le calcul du variogramme expérimental nous avons besoin des données suivantes:

- la distance de l'intervalle de classe (h);
- la tolérance de l'intervalle de classe qui peut être la moitié de l'intervalle de classe ou plus petite;
- l'angle azimutal ou l'angle suivant lequel $\gamma(h)$ est calculé;
- la tolérance angulaire;
- la largeur de la bande ou distance maximale acceptable dans la direction perpendiculaire au vecteur directeur.

Fig.8. Paramètres de calcul du variogramme expérimental directionnel



La construction des variogrammes expérimentaux directionnels se fait dans diverses directions de l'espace pour déceler d'éventuelles différences de variabilité suivant ces directions: ce sont les anisotropies de structure.

2.4. Propriétés du variogramme:

2.4.1. Comportement à l'origine :

Le comportement du variogramme à l'origine rend compte de la continuité et de la régularité de la fonction aléatoire F.A $Z(x)$ qui décrit la variabilité de la variable régionalisée $z(x)$ (z en minuscule). On distingue quatre types de comportements à l'origine.

a. Comportement parabolique:

Le comportement parabolique indique une variable avec une variabilité spatiale hautement régulière

$$\gamma(h) \rightarrow \alpha |h|^2 \text{ quand } h \rightarrow 0$$

b. Comportement linéaire:

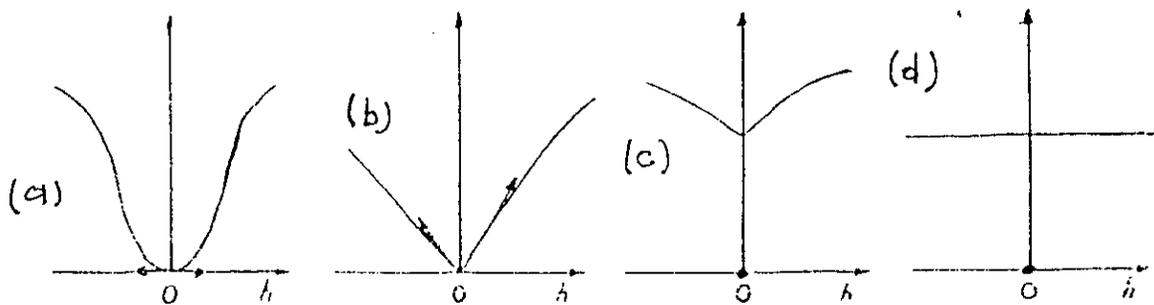
Quand $h \rightarrow 0$ $\gamma(h) \rightarrow \alpha(h)$. Dans ce cas la variable est moins régulière que dans le cas précédent.

c. Discontinuité à l'origine: $\gamma(h)$ ne tend pas vers 0 même si par définition $\gamma(0) = 0$. La discontinuité du variogramme à l'origine traduit ce qu'on appelle "l'effet de pépite". Il correspond à une forte concentration locale d'une teneur (en l'occurrence pour l'or). "L'effet de pépite est une conséquence directe des erreurs de mesure et de la microvariabilité du phénomène étudié." (Maréchal A.1975) .Il y a ce qu'on appelle effet de pépite pur. Il correspond au cas où il n'y aucune corrélation entre deux points expérimentaux quelque soit la distance.

Fig.9. Comportement du variogramme à l'origine

(a) Comportement

parabolique; (b) comportement linéaire; (c) effet de pépite; (d) pure effet de pépite.



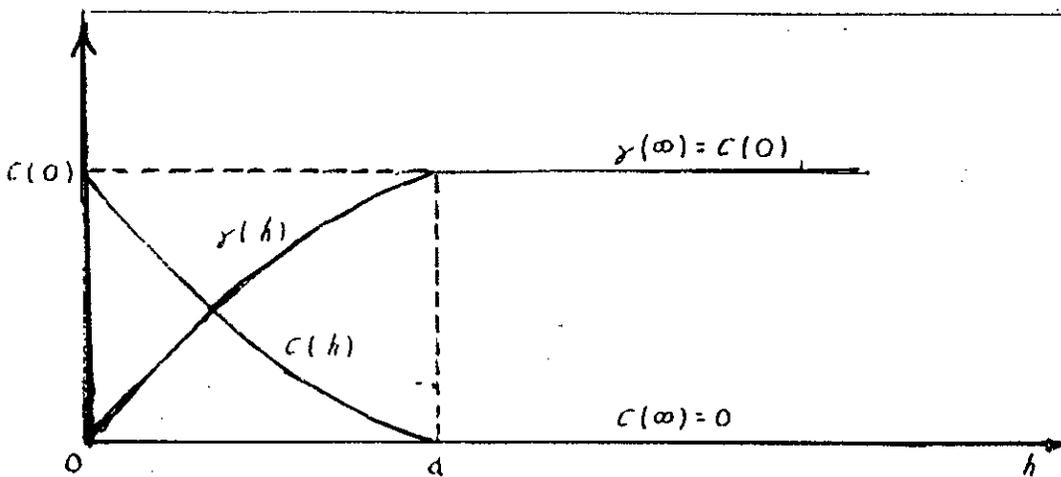
2.4.2 .Comportement du variogramme à l'infini:

Aux grandes distances le variogramme présente deux aspects:

a. Le variogramme peut continuer à croître indéfiniment ,la variance devient infini et la covariance n'existe . On dit que le variogramme est non borné.

b. Dans un grand nombre de cas le variogramme au delà d'une certaine limite "a" se stabilise autour d'une valeur limite $\gamma(\infty)$ appelé palier qui se rapproche fortement de la variance $\gamma(\infty) = \text{var}[z(x)] = C$. Le variogramme qui prend un tel comportement caractérise ce qu'on appelle un phénomène de transition du fait que la portée "a" caractérise l'état de corrélation spatiale ($h < a$) et l'état ou il n'y a pas de corrélation

Fig. 10. Comportement du variogramme à l'infini



2.4. Modélisation du variogramme:

Le besoin d'un modèle de variogramme tient du fait qu'on pourrait avoir besoin d'une valeur de variogramme pour une certaine distance ou dans une certaine direction pour laquelle on ne dispose pas de données expérimentales. Il y a cinq type d'ajustement du variogramme.

2.5.1. Modèle linéaire:

$$(13) \quad \gamma(h) = \omega|h|^\lambda$$

Le modèle linéaire est un modèle sans palier.

2.5.2 .Modèle sphérique:

$$(14) \quad \gamma(h) = \begin{cases} 3/2h/a - 1/2(h/a)^3 & \forall h \in [0, a] \\ 1 & \forall h \geq a \end{cases}$$

C'est un schéma de transition à palier avec comportement linéaire à l'origine.

2.5.3 .Modèle exponentiel :

$$(15) \quad \gamma(h) = 1 - \exp(-3h/a)$$

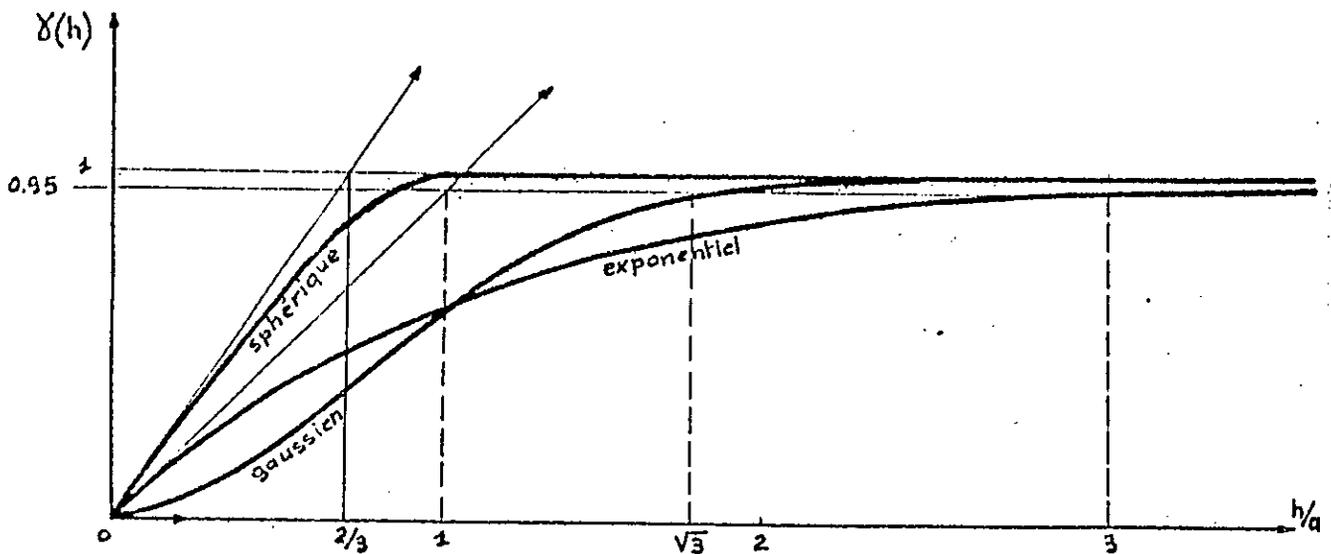
C'est un schéma de transition à palier avec comportement linéaire à l'origine.

2.5.4 Modèle Gaussien:

$$(16) \quad \gamma(h) = 1 - \exp[-3(h/a)^2]$$

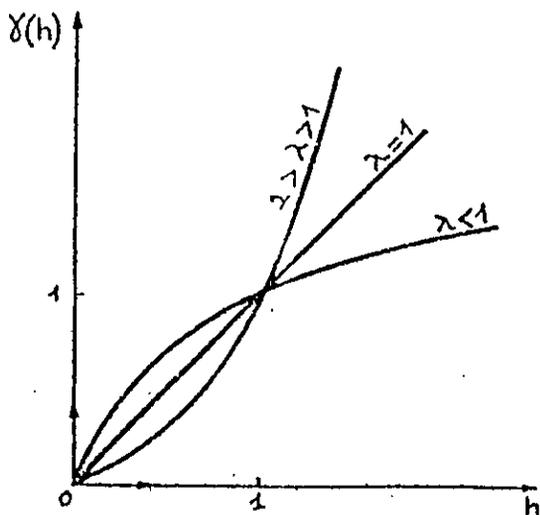
C'est un schéma de transition à palier avec un comportement parabolique à l'origine.

Fig.11 Modèles de variogrammes (Maréchal .A , 1975)



- Schémas en h^λ :

Schémas à palier



II- VARIOGRAPHIE SUR L'ENSEMBLE DES DONNEES DE LA ZONE 9:

1. Construction de variogrammes expérimentaux directionnels:

Comme il a été indiqué plus loin si l'on dispose de N couples de données distants de h l'expression du variogramme expérimental est :

$$(17) \quad 2\gamma(h) = 1/N \cdot \sum [(z(x_i+h) - z(x_i))^2]$$

Les variogrammes ont été construits dans le plan horizontal. La mesure de la variabilité a été effectuée suivant les axes de la maille d'échantillonnage (direction 0 et 90°) et les diagonales de cette maille (direction 45 et 135°). Dans la pratique minière , pour simplifier les calculs en analyse structurale on se ramène toujours dans le cas d'une distribution gaussienne pour les variables d'étude . C'est pour cette raison que dans ce qui va suivre seulement les logarithmes des variables seront prises en compte.

Pour chaque variogramme directionnel la distance maximale acceptable est égale à la longueur moitié du champ d'étude soit environ 650 m (la longueur du champ étant de 1320 m); l'incrément h (distance moyenne entre deux points successifs ou le pas) est de 40m pour une tolérance sur le pas de 10 m; la distance maximale interpair est de 400 m ;la tolérance angulaire est de 20°.

Les calculs des variogrammes expérimentaux directionnels ont été effectués par le programme **vario** du logiciel **Geoeas** (Geostatistical Environmental Assesment Software) mise au point par The U.S Environmental Protection Agency ,Las Vegas (1990). Le fichier de données utilisé est un fichier indexé **FALY.DAT** de format conforme au format des fichiers utilisés par le logiciel **Geoeas**. Le fichier de sortie est un fichier indexé **FALY.PCF**.(pairs comparison file) construit par le programme **Prevar** du même logiciel. Après exécution du programme on obtient un tableau de résultats dans lequel on peut lire pour chaque classe de distance le nombre de pairs de points dans la classe et la valeur moyenne du variogramme. Les tableaux 7, 8, 9, et 10 résument les résultats des calculs . Les figures 12.a à 14.d montrent les allures des variogrammes construits avec les modèles théoriques correspondants.

2. Construction des variogrammes expérimentaux directionnels pour les variables d'étude:

2.1 Variogrammes directionnels pour la LN(Teneur):

Les figures 12.a ,12.b,12.c, 12.d montrent les ajustements de ces variogrammes. Le variogramme suivant la direction 0° est un modèle sphérique de constante de pépite C_0 de 0.80 pour une portée a de 130 m et un palier C de 1.2. Le variogramme pour la direction 90° est ajusté à un modèle sphérique de constante de pépite $C_0 = 0.805$ pour une portée a de 130 m et un palier C de 1.2.

Le variogramme pour la direction 45° est un modèle sphérique de constante de pépité C_0 égal à 0.8 pour une portée a de 130 m et un palier C de 1.201

Le variogramme de direction 135° a été ajusté à un modèle sphérique de C_0 égale à 0.801 pour a de l'ordre de 130 m et un palier C de 1.2.

2.2 . Variogrammes directionnels pour la LN(Epaisseur):

Les figures 13.a, 13.b, 13.c et 13.d montrent les ajustements de ces variogrammes. Pour les quatre directions ($0, 90, 45, \text{et } 135^\circ$) ces variogrammes sont parfaitement identiques et ont tous été ajustés à un modèle sphérique de constante de pépité C_0 égale à 0.3 pour une portée a de 120 m et un palier C de 0.3.

2.3 . Variogrammes directionnels pour la LN(Accu.)

Les ajustements de ces variogrammes expérimentaux directionnels sont montrés par les figures 14.a, 14.b, 14.c, et 14.d. Ce sont des modèles sphériques de même constante de pépité C_0 égal à 1.65 pour une portée a de 160m suivant les quatre directions ($0, 90, 45, 135^\circ$). Cependant le palier C diffère très légèrement selon les directions. Il est respectivement de 1.6; 1.8 ; 1.6 et 1.7.

Résultats du calcul des Variogrammes expérimentaux:

Direction 0

Tolérance 20°

N.pairs total :8100

N.pairs	d.moyenne(m)	Variogrammes estimés		
		LN(Teneur)	LN(Epaisseur)	LN(Accu.)
227	27,06	1,25	0,392	2,034
597	60,74	1,54	0,488	2,371
801	100,184	1,88	0,586	3,036
828	139,69	2,01	0,535	3,248
868	179,38	2,13	0,523	3,275
886	219,82	2,07	0,576	3,318
842	259,51	1,89	0,587	3,076
834	299,97	1,97	0,512	3,035
766	339,37	1,91	0,587	3,153
747	379,23	1,97	0,604	3,296
704	419,57	2,05	0,581	3,126

Tableau 6

Direction 90

Tolérance 20°

N.pairs total :5005

N.pairs	d.moyenne(m)	Variogrammes estimés		
		LN(Teneur)	LN(Epaisseur)	LN(Accu.)
138	27,75	1,377	0,445	2,143
479	59,81	1,654	0,492	2,611
637	99,35	2,200	0,693	3,509
615	13,92	2,441	0,572	3,831
581	179,28	2,425	0,576	3,777
566	219,33	2,291	0,569	3,734
539	259,07	2,061	0,615	3,404
455	299,59	1,904	0,567	3,171
393	339,97	2,040	0,609	3,548
323	379,96	1,953	0,570	3,328
279	420,13	2,036	0,549	3,181

Tableau 7

Direction 45

Tolérance 20°

N.pairs total : 7564

N.pairs	d.moyenne(m)	Variogrammes estimés		
		LN(Teneur)	LN(Epaisseur)	LN(Accu.)
263	27,052	1,257	0,428	2,00
569	60,568	1,582	0,477	2,434
762	99,812	1,929	0,587	3,060
766	13,087	2,060	0,518	3,259
813	17,676	2,098	0,536	3,293
820	219,556	2,042	0,562	3,256
788	259,263	1,827	0,595	2,984
756	299,673	2,005	0,517	3,073
704	339,347	1,994	0,588	3,230
675	379,124	2,017	0,609	3,345
648	419,682	2,080	0,600	3,197

Tableau 8

Direction 135

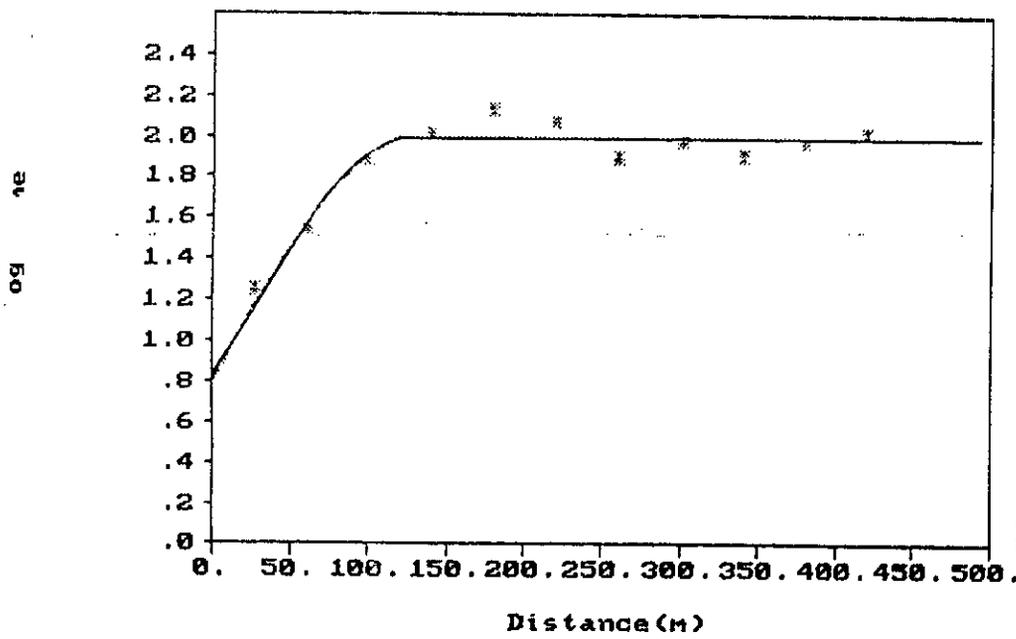
Tolérance 20°

N.pairs total : 7732

N.pairs	d.moyenne(m)	Variogrammes estimés		
		LN(Teneur)	LN(Epaisseur)	LN(Accu.)
263	27,014	1,242	0,407	1,995
569	60,137	1,611	0,481	2,521
775	99,790	1,985	0,589	3,204
783	13,244	2,074	0,512	3,275
832	179,513	2,092	0,538	3,250
861	219,679	1,967	0,585	3,238
808	259,433	1,758	0,581	2,856
776	299,847	1,973	0,505	2,984
704	339,230	1,867	0,572	2,991
699	379,148	1,940	0,599	3,188
	419,750	2,021	0,586	3,115

Tableau 9

**** Variogramme experimental — Variogramme theorique



Parameters

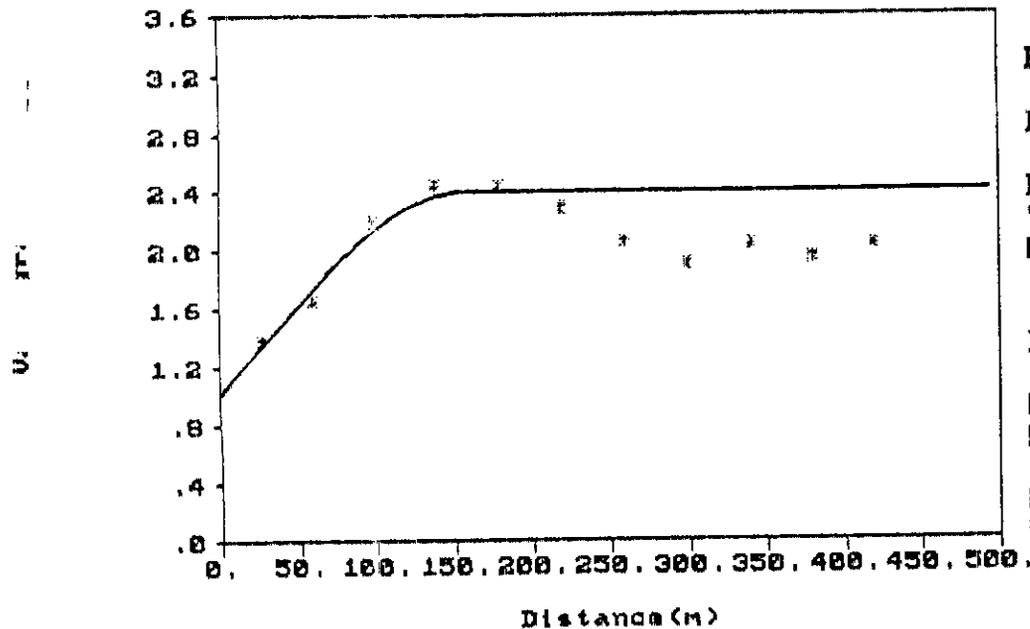
File :faly.pcf
 Pairs : 8100
 Direct.: .000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000

LN (Teneur (g/)) Limits

Minimum: -1.897
 Maximum: 5.539
 Mean : 1.840
 Var. : 1.8463

Fig.12.a Variogramme pour LN(Teneur),direction 0

**** Variogramme experimental — Variogramme theorique



Parameters

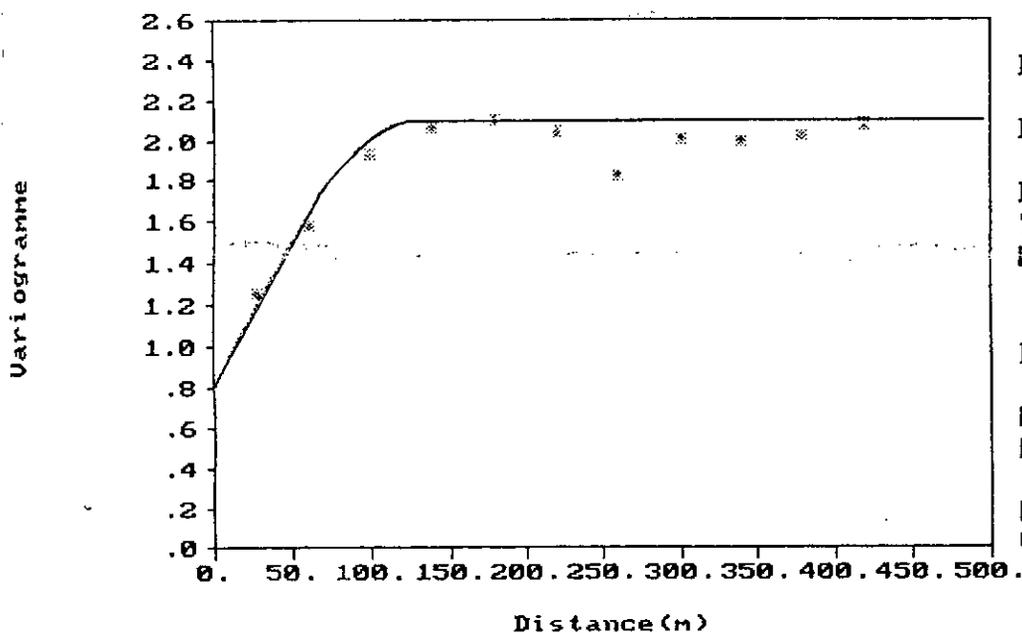
File :faly.pcf
 Pairs : 5005
 Direct.: 90.000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000

LN (Teneur (g/)) Limits

Minimum: -1.897
 Maximum: 5.539
 Mean : 1.840
 Var. : 1.8463

Fig.12.b Variogramme LN(Teneur) direction 90

**** Variogramme experimental — Variogramme theorique



Parameters

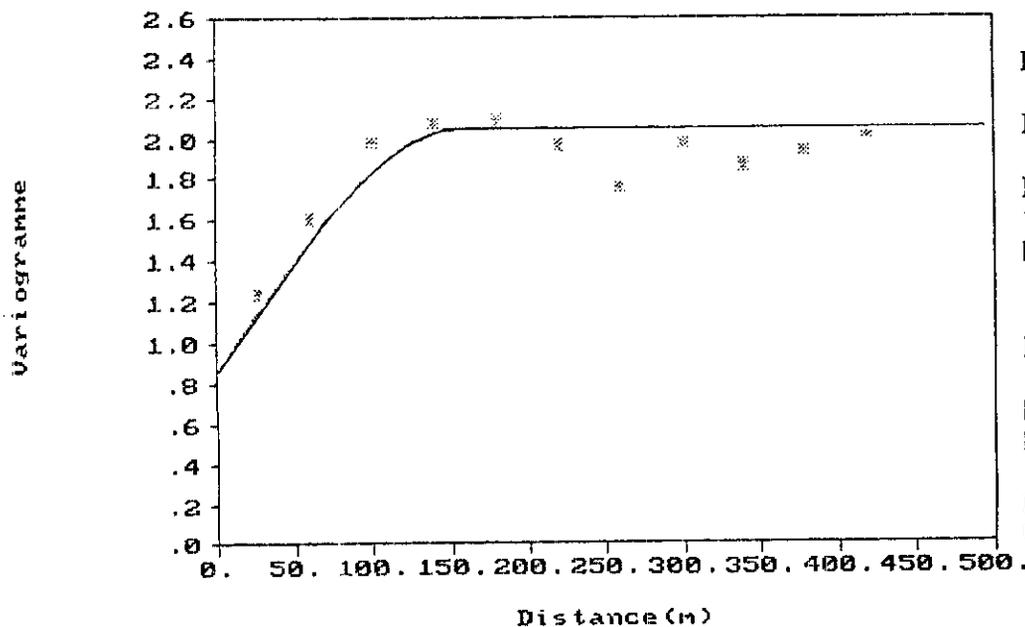
File :faly.pcf
 Pairs : 7564
 Direct.: 45.000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000

LN (Teneur (g/)) Limits

Minimum: -1.897
 Maximum: 5.539
 Mean : 1.840
 Var. : 1.8463

Fig. 12.c Variogramme LN(Teneur).direction 45

**** Variogramme experimental — Variogramme theorique



Parameters

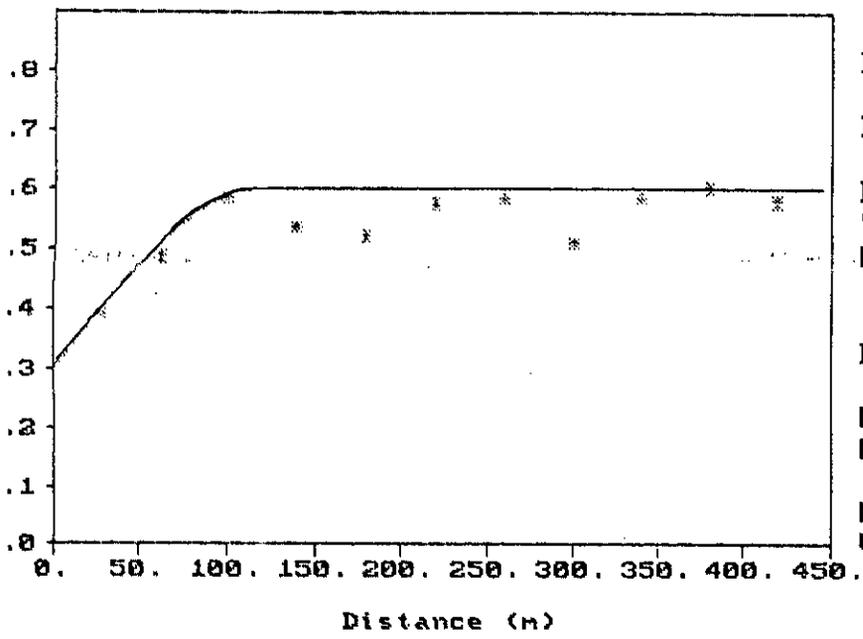
File :faly.pcf
 Pairs : 7732
 Direct.: 135.000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000

LN (Teneur (g/)) Limits

Minimum: -1.897
 Maximum: 5.539
 Mean : 1.840
 Var. : 1.8463

Fig. 12.d Variogramme LN(Teneur) direction 135

**** Variogramme experimental — Variogramme theorique

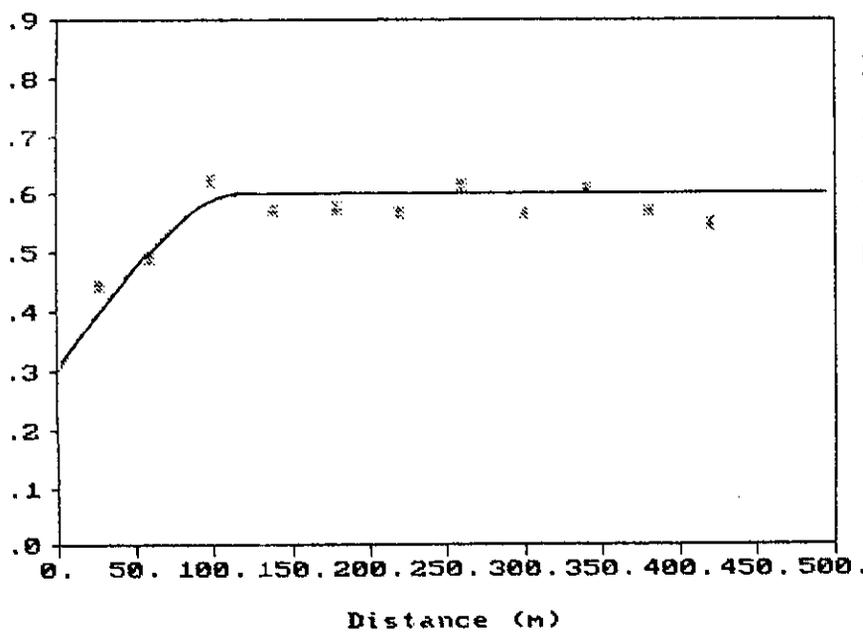


Parameters
 File :faly.pcf
 Pairs : 8100
 Direct.: .000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000

LN (Epaisseur()) Limits
 Minimum: -1.715
 Maximum: 2.102
 Mean : .318
 Var. : .58346

Fig.13.a Variogramme LN(Epaisseur) direction 0

**** Variogramme experimental — Variogramme theorique

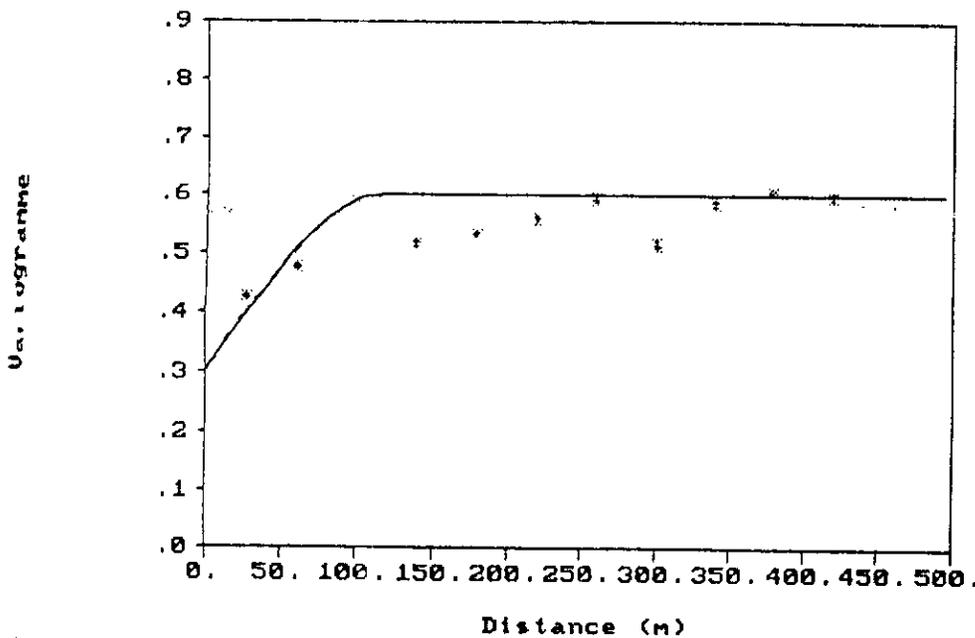


Parameters
 File :faly.pcf
 Pairs : 5005
 Direct.: 90.000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000

LN (Epaisseur()) Limits
 Minimum: -1.715
 Maximum: 2.102
 Mean : .318
 Var. : .58346

Fig.13.b Variogramme LN(Epaisseur) direction 90

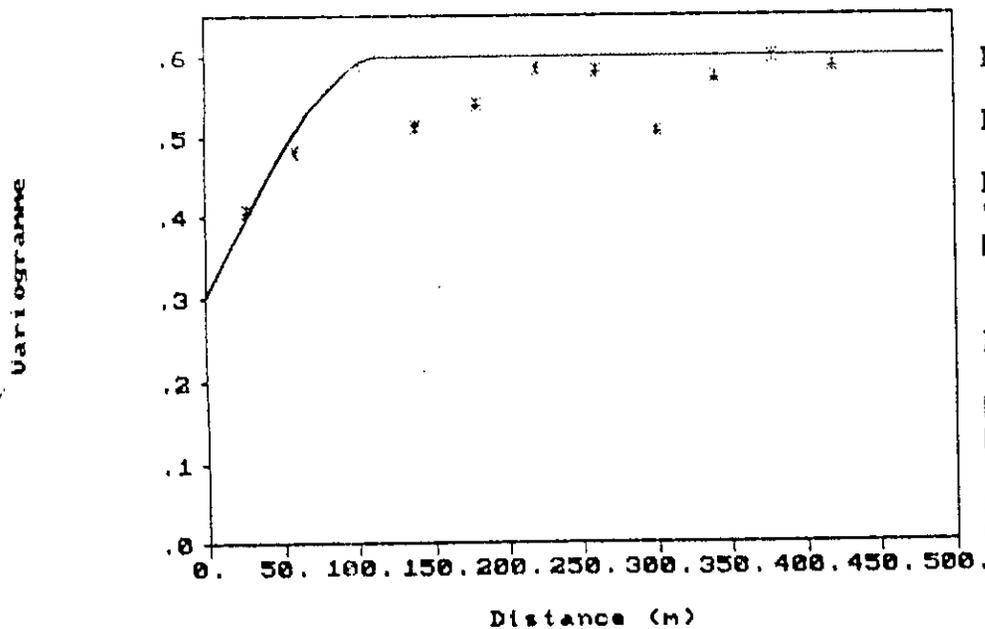
**** Variogramme experimental — Variogramme theorique



Parameters
 File : faly.pcf
 Pairs : 7564
 Direct.: 45.000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000
 LN (Epaisseur()) Limits
 Minimum: -1.715
 Maximum: 2.102
 Mean : .318
 Var. : .58346

Fig. 13.c Variogramme LN(Epaisseur) direction 45

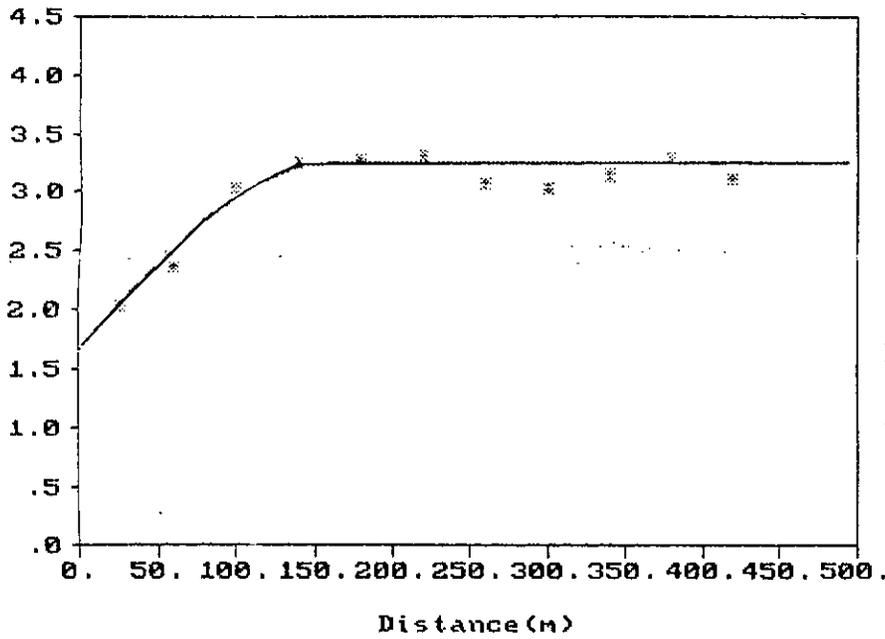
**** Variogramme experimental — Variogramme theorique



Parameters
 File : faly.pcf
 Pairs : 7732
 Direct.: 135.000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000
 LN (Epaisseur()) Limits
 Minimum: -1.715
 Maximum: 2.102
 Mean : .318
 Var. : .58346

Fig. 13.d Variogramme LN(Epaisseur) direction 135

**** Variogramme experimental — Variogramme Theorique



Parameters

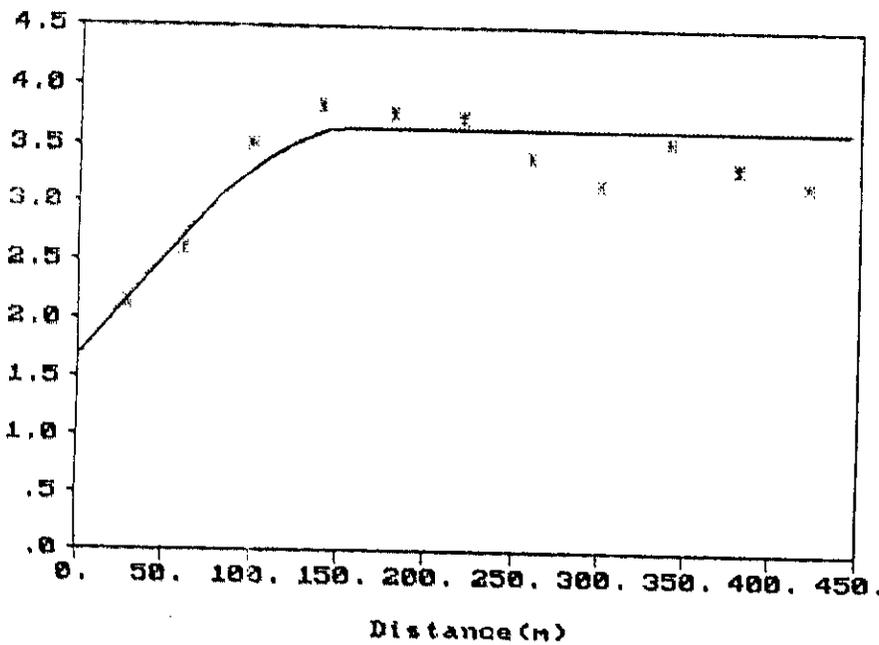
File :faly.pcf
 Pairs : 8100
 Direct.: .000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000

LN (Acc(mg/t)) Limits

Minimum: -2.813
 Maximum: 6.140
 Mean : 2.154
 Var. : 3.0988

Fig.14.a Variogramme pour LN(Accu.) direction 0

**** Variogramme experimental — Variogramme theorique



Parameters

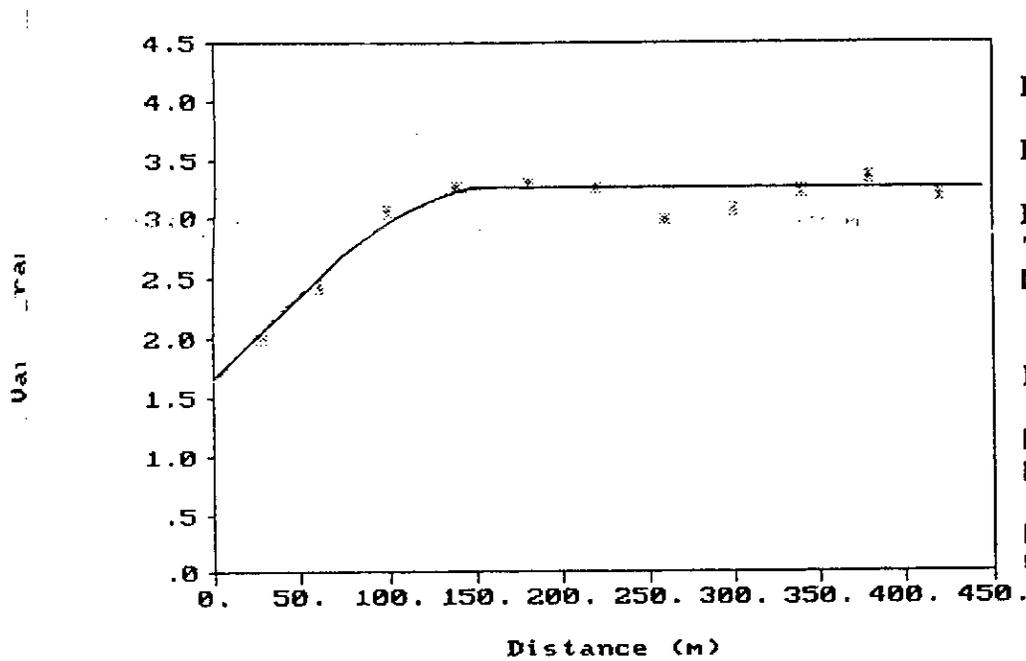
File :faly.pcf
 Pairs : 5005
 Direct.: 90.000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000

LN (Acc(mg/t)) Limits

Minimum: -2.813
 Maximum: 6.140
 Mean : 2.154
 Var. : 3.0988

Fi_ 14.b Variogramme pour LN(Accu.) direction 90

**** Variogramme experimental — Variogramme theorique

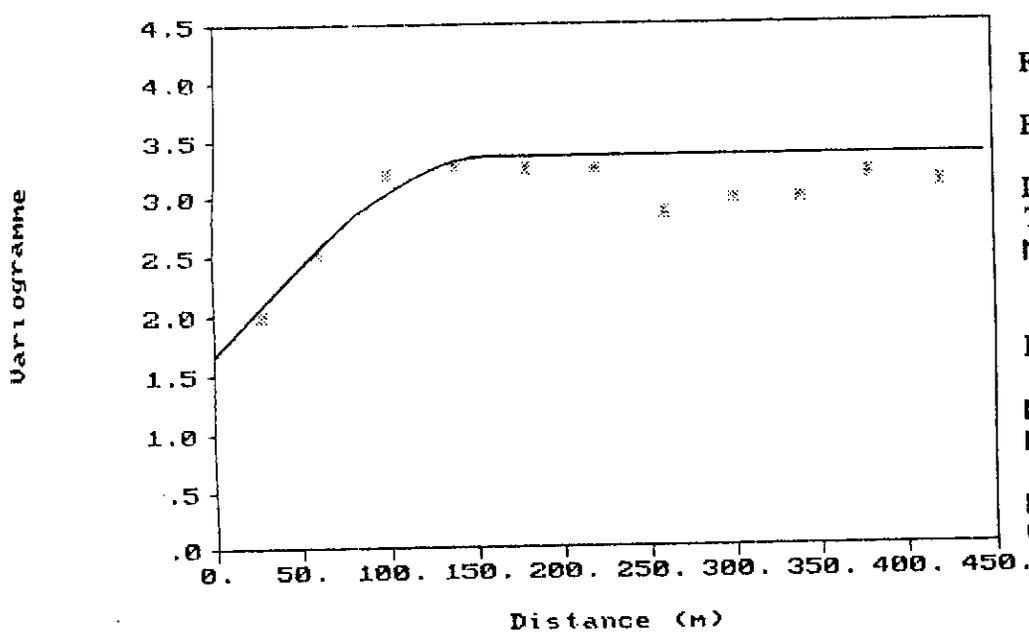


Parameters
 File : faly.pcf
 Pairs : 7564
 Direct.: 45.000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000

LN (Acc(mg/t)) Limits
 Minimum: -2.813
 Maximum: 6.140
 Mean : 2.154
 Var. : 3.0988

Fig.14.c Variogramme pour LN(Accu.) direction 45

**** Variogramme experimental — Variogramme theorique



Parameters
 File : faly.pcf
 Pairs : 7732
 Direct.: 135.000
 Tol. : 20.000
 MaxBand: 650.000

LN (Acc(mg/t)) Limits
 Minimum: -2.813
 Maximum: 6.140
 Mean : 2.154
 Var. : 3.0988

Fig.14.d Variogramme pour LN(Accu.) direction 135

3. Hypothèse d'isotropie : Construction de variogrammes moyens.

L'ajustement des variogrammes expérimentaux directionnels des variables n'a montré aucune direction privilégiée de variabilité. Ceci étant nous pouvons admettre que le phénomène de régionalisation du gisement aurifère d'Amesmessa est un phénomène isotrope. Nous pouvons alors construire pour chacune des variables un variogramme moyen qui reproduit dans toutes les directions de l'espace la structure de sa variabilité.

3.1. Variogramme moyen pour LN(Teneur).

Le variogramme moyen pour la LN(Teneur) est un modèle sphérique de constante de pépite C_0 égale à 0.8 pour un palier C égal à 1.2 et une portée a égale à 130 m.

$$\gamma(h)_{LN(Teneur)} = C_0 + (C_0 + C) \text{sph}_{130}$$

$$\gamma(h)_{LN(Teneur)} = 0.8 + 2.00.\text{sph}_{130}$$

3.2. Variogramme moyen pour la LN(Epaisseur)

Le variogramme moyen pour la LN(Epaisseur) est un modèle sphérique de constante de pépite C_0 égale à 0.3 pour un palier C égal à 0.3 et une portée a égale à 120 m.

$$\gamma(h)_{LN(Epaisseur)} = C_0 + (C_0 + C) \text{sph}_{120}$$

$$\gamma(h)_{LN(Epaisseur)} = 0.3 + 0.6.\text{sph}_{120}$$

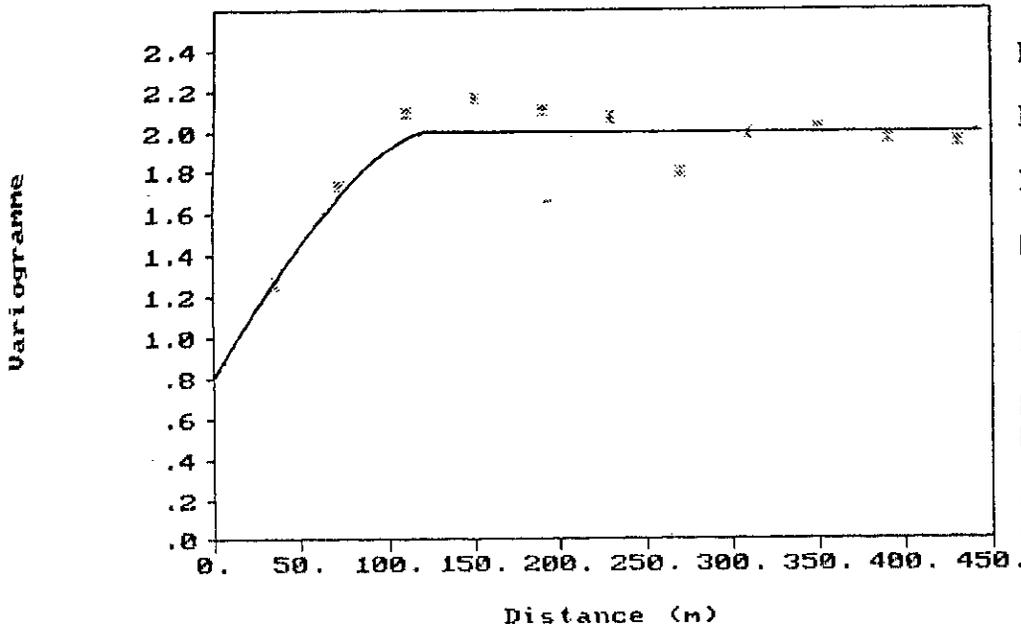
3.3. Variogramme moyen pour la LN(Accu)

Le variogramme moyen pour la LN(Accu) est un modèle sphérique de constante de pépite C_0 égale à 1.6 pour un palier C égal à 1.65 et une portée a égale à 160 m.

$$\gamma(h)_{LN(Accu)} = C_0 + (C_0 + C) \text{sph}_{160}$$

$$\gamma(h)_{LN(Accu)} = 1.6 + 3.25.\text{sph}_{160}$$

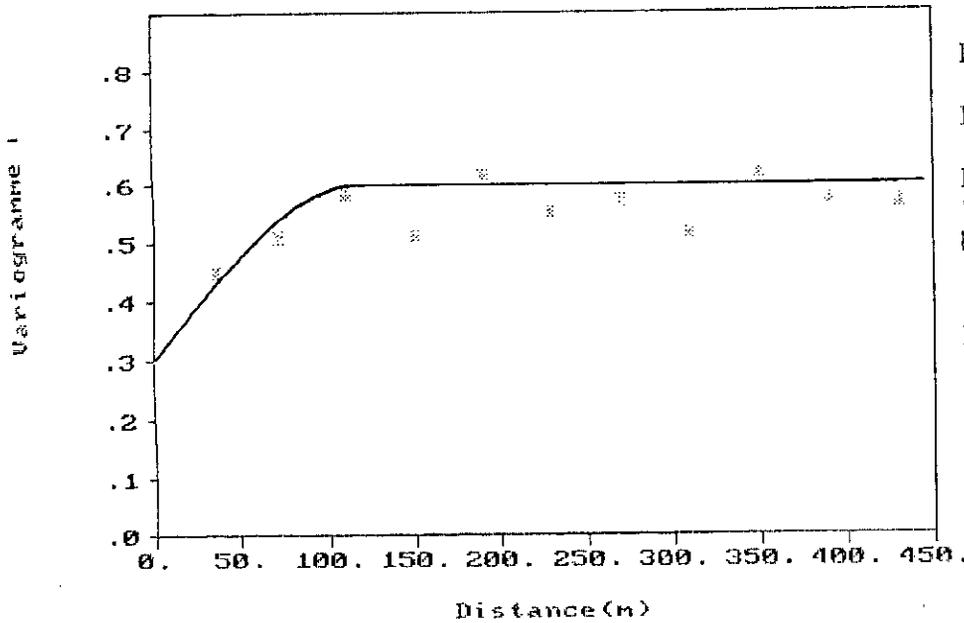
Variogramme moyen pour LN(Teneur) Fig.15.a
 **** Variogramme experimental — Variogramme theorique



Parameters

File : faly.pcf
 Pairs : 9434
 Direct.: 90.000
 Tol. : 90.000
 MaxBand: 650.000
 LN (Teneur (g/)) Limits
 Minimum: -1.897
 Maximum: 5.539
 Mean : 1.840
 Var. : 1.8463

Fig.15.b. Variogramme moyen pour LN(Epaisseur)
 **** Variogramme experimental — Variogramme theorique

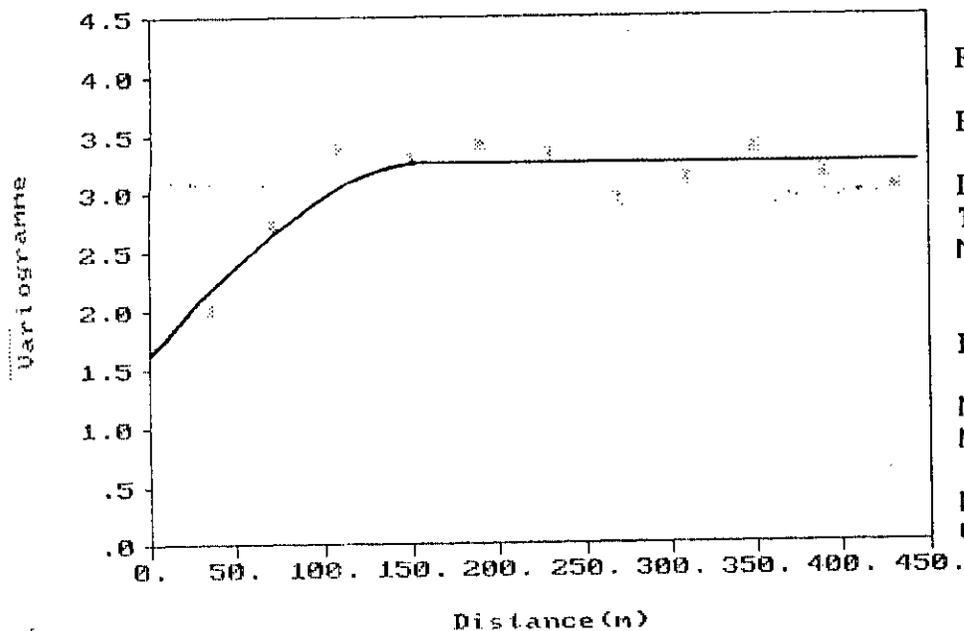


Parameters

File : faly.pcf
 Pairs : 9434
 Direct.: 90.000
 Tol. : 90.000
 MaxBand: 650.000
 LN (Epaisseur()) Limits
 Minimum: -1.715
 Maximum: 2.102
 Mean : .318
 Var. : .58346

FIG.15.c Variogramme moyen pour LN(Accu.)

*** Variogramme experimental _____ Variogramme theorique



Parameters

File : faly.pcf

Pairs : 9434

Direct.: 90.000

Tol. : 90.000

MaxBand: 650.000

LN (Acc(mg/t)) Limits

Minimum: -2.813

Maximum: 6.140

Mean : 2.154

Var. : 3.0988

CHAPITRE 4

ESTIMATION DES RESERVES

Chapitre 4

Estimation des réserves

I. INTRODUCTION ET DEFINITIONS GENERALES:

L'estimation consiste à partir d'un échantillonnage discret d'une variable spatialement répartie à évaluer la valeur de la variable étudiée en un lieu où il n'y a pas eu nécessairement de mesures. Les procédés d'estimation sont de deux sortes: les méthodes analytiques et les méthodes probabilistes

1. Les méthodes analytiques : Ce sont

- l'interpolation linéaire par triangularisation;
- l'interpolation polynomiale;
- l'interpolation par la méthode des moindres carrées
- l'interpolation par les méthodes de pondération (pondération en fonction de la distance et méthode de Thiessen)

L'expérience a montré que ces méthodes d'estimation sont d'une élaboration lourde et fastidieuse comportent un grand risque d'erreur. En effet elles présentent deux inconvénients majeurs. D'une part elles ne donnent pas la variance d'estimation pour déterminer l'intervalle de confiance de chaque valeur estimée mais d'autre part elles ne tiennent pas compte de la structure spatiale du phénomène. Or les phénomènes naturels présentent une certaine structure par un processus de dépendance ou autocorrélation régionalisée. Pour palier à ces handicaps le retour aux méthodes probabilistes par procédées géostatistiques est incontournable.

2. Méthode géostatistique d'estimation : le KRIGEAGE

Après avoir procédé à l'analyse structurale de la variable spatiale étudiée au moyen du variogramme l'approche géostatistique s'étend à une deuxième étape traitant de l'estimation dans son contexte probabiliste . Dans ce sens la procédure géostatistique a donné lieu à une méthode d'estimation linéaire , le KRIGEAGE, qui est le lien étroit entre la précision d'une estimation et la structure du phénomène étudié. " Le krigeage consiste à trouver le meilleur estimateur possible d'une caractéristique inconnue à partir de l'information disponible" (A. Journel . Annale des mines, Paris 1975). En générale l'information disponible consiste en une information expérimentale (par exemple N teneurs de carottes implantées à l'intérieur ou à l'extérieur d'un panneau) et une information structurale (variogramme).

3. Equations du krigeage ordinaire: (Journel. A. 1975)

Soit à estimer la teneur moyenne $z_v = 1/v \int_v z(x) dx$ du support v à partir de l'information disponible constituée par les N teneurs moyennes $z_i = 1/v_i \int_{v_i} z(x) dx$ définis sur les supports v_i . L'estimateur z_v^* de la valeur vraie z s'exprime en formant la combinaison linéaire $z_v^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i z_i$. Il s'agit de déterminer les pondérateurs λ_i tels que l'on ait

$$\begin{cases} \sum \lambda_i = 1 & (1) \\ E[(Z_v^* - Z_v)^2] \text{ minimum} & (2) \end{cases}$$

L'équation (1) représente la condition de non-biais.

L'équation (2) représente la condition d'optimalité de l'estimateur linéaire.

$E[(Z_v - Z_v^*)^2] = \sigma^2$ représente la variance d'estimation.. Développons l'équation du krigeage de la manière suivante:

$$\begin{aligned} \gamma(h) = \gamma(X_i - X_j) &= 1/2 E[(Z_i - Z_j)^2] \\ &= 1/2 E\{(Z_i - Z_v) - (Z_j - Z_v)\}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma(X_i - X_j) &= 1/2 E\{(Z_i - Z_v)^2\} + 1/2 E\{(Z_j - Z_v)^2\} - E\{(Z_i - Z_v)(Z_j - Z_v)\} \\ &= \gamma(X_i + X_v) + \gamma(X_j + X_v) - E\{(Z_i - Z_v)(Z_j - Z_v)\} \end{aligned}$$

↓

$$E\{(Z_i - Z_v)(Z_j - Z_v)\} = \gamma(X_i - X_v) + \gamma(X_j - X_v) - \gamma(X_i - X_j)$$

D'autre part

$$\begin{aligned} E[(Z_v^* - Z_v)^2] &= E\left[\left(\sum \lambda_i Z_i - Z_v\right)^2\right] \\ \sum \lambda_i = 1 \Rightarrow E[(Z_v^* - Z_v)^2] &= E\left[\left(\sum \lambda_i Z_i - \sum \lambda_i Z_v\right)\right] \\ &= E\left[\sum \lambda_i (Z_i - Z_v)\right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E[(Z_v^* - Z_v)^2] &= E\left[\sum \lambda_i (Z_i - Z_v) \sum \lambda_j (Z_j - Z_v)\right] \\ &= \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j E[(Z_i - Z_v)(Z_j - Z_v)] \\ &= \sum_i \sum_j \left[\gamma(X_i - X_v) + \gamma(X_j - X_v) - \gamma(X_i - X_j) \right] \end{aligned}$$

Etant donné que $\sum_i \lambda_i \gamma(X_i - X_v) = \sum_j \lambda_j \gamma(X_j - X_v)$ et en admettant que

$$\sum_i \lambda_i = \sum_j \lambda_j$$

on aura:

$$(19) \quad E[(Z_v^* - Z_v)^2] = \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma(X_i - X_j) + 2 \sum_i \lambda_i \gamma(X_i - X_v)$$

En minimisant l'équation précédente par introduction du multiplicateur de Lagrange μ on aboutit au système linéaire du krigeage à $n+1$ équations et $n+1$ inconnues (n pondérateurs λ_i et le multiplicateur de Lagrange μ).

$$(20) \quad \begin{cases} \sum \lambda_i \gamma(X_i - X_v) + \mu = \gamma(X_i - X_v) \\ \sum_i \lambda_i = 1 \end{cases}$$

Sous forme matricielle il s'écrit:

$$(21) \quad \begin{pmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \dots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \dots & \gamma_{2n} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{1v} \\ \gamma_{2v} \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma_{nv} \\ \cdot \\ 1 \end{pmatrix}$$

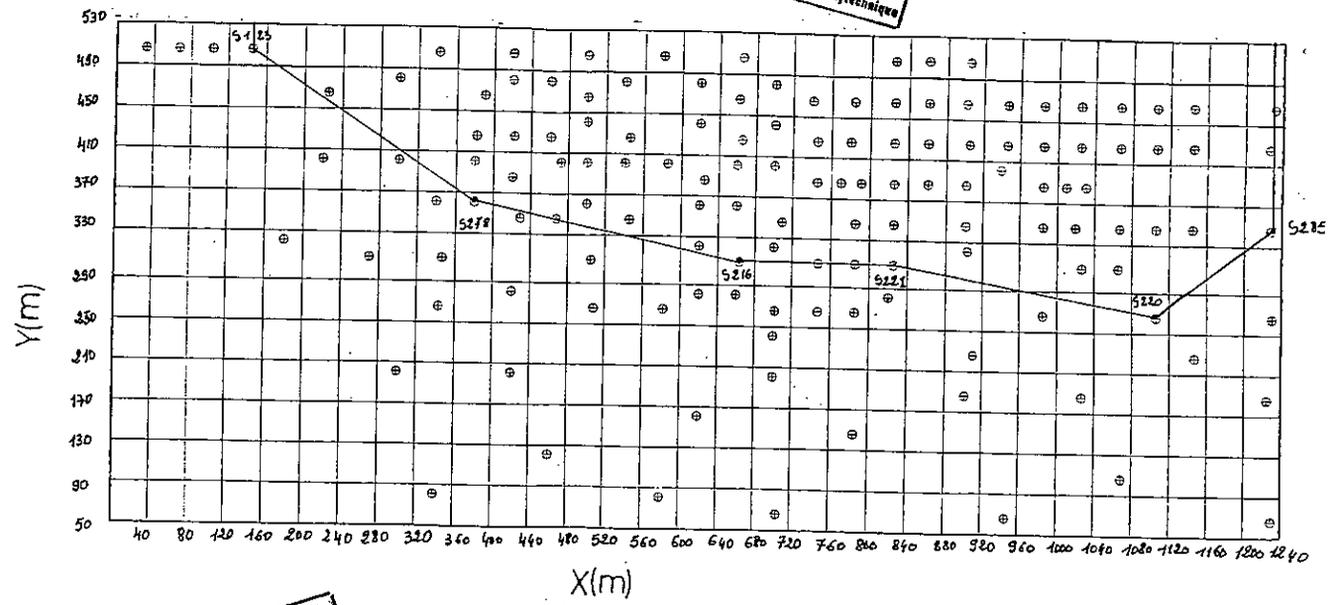
II. Krigeage de la zone 9 :

1. Description de la démarche à suivre :

Le krigeage adopté est le krigeage par blocs de 40mX40m. Cette dimension représente celle de la maille d'échantillonnage moyenne. Les blocs doivent être discretisés par un nombre de points dont la valeur moyenne estimée représente celle du bloc en question. Les points de discretisation sont disposés suivant une grille régulière. La fiabilité de l'estimation dépend du nombre de points de discretisation. En effet plus ce nombre augmente, plus l'estimation est meilleure. L'expérience a montré qu'une grille de 4X4 soit 16 points pour

40m
40m
EST

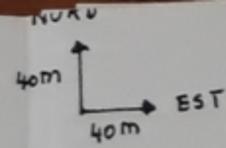
المدرسة الوطنية للتكنولوجيا
BIBLIOTHEQUE
المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية للتكنولوجيا
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Fig. 16. Délimitation du polygone de krigage ⊕ : forages

— : limite du polygone



المركز الوطنية المتعددة التخصصات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

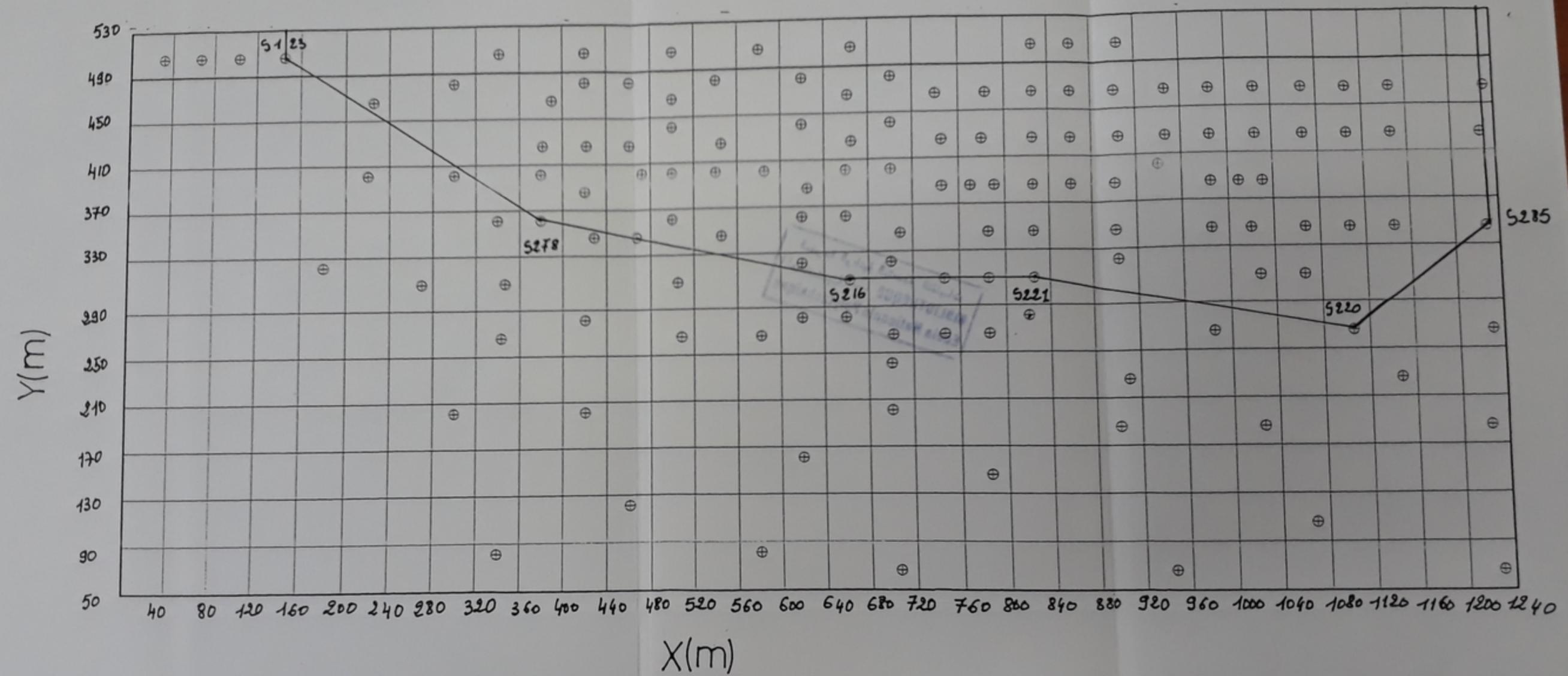


Fig .16. Délimitation du polygone de krigeage ⊕ :forages
 — : limite du polygone

المركز الوطنية المتعددة التخصصات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

des blocs à deux dimensions donne des résultats satisfaisants. L'estimation des points de discretisation est effectuée en définissant un cercle de recherche centré au point considéré. Le cercle de recherche est fonction de l'ellipse des portées. Il se déplace à l'intérieur d'un polygone dont les limites sont fixées en fonction du degré de connaissance des réserves. On définit également le nombre d'échantillons à introduire dans le calcul. Ce nombre est en général de 8.

2. Krigeage des variables teneur, épaisseur, et accumulation :

Le calcul des valeurs moyennes des variables à estimer par bloc de 40mX40m a été effectué par le programme Krige du logiciel Geoeas. Pour l'exécution du programme on définit pour chaque variable le modèle variographique moyen décrivant sa variabilité.

On spécifie également le type du Krigeage à adopter , ici krigeage par bloc . Dans ce cas on introduit les dimensions des blocs à kriger.

Après exécution du programme on obtient pour chaque variable une répartition des valeurs estimées par bloc et la variance d'estimation correspondante.

Les figures 17.a et 17.b représentent respectivement la répartition des teneurs krigées par bloc et la cartographie de la variance d'estimation correspondante.

Les figures 18.a et 18.b représentent respectivement la répartition des épaisseurs krigées par bloc et la cartographie de la variance d'estimation correspondante.

Les figures 19.a et 19.b représentent respectivement la répartition des accumulations krigées par bloc et la cartographie de la variance d'estimation correspondante.

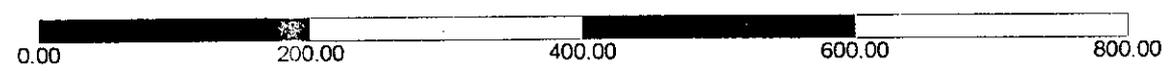
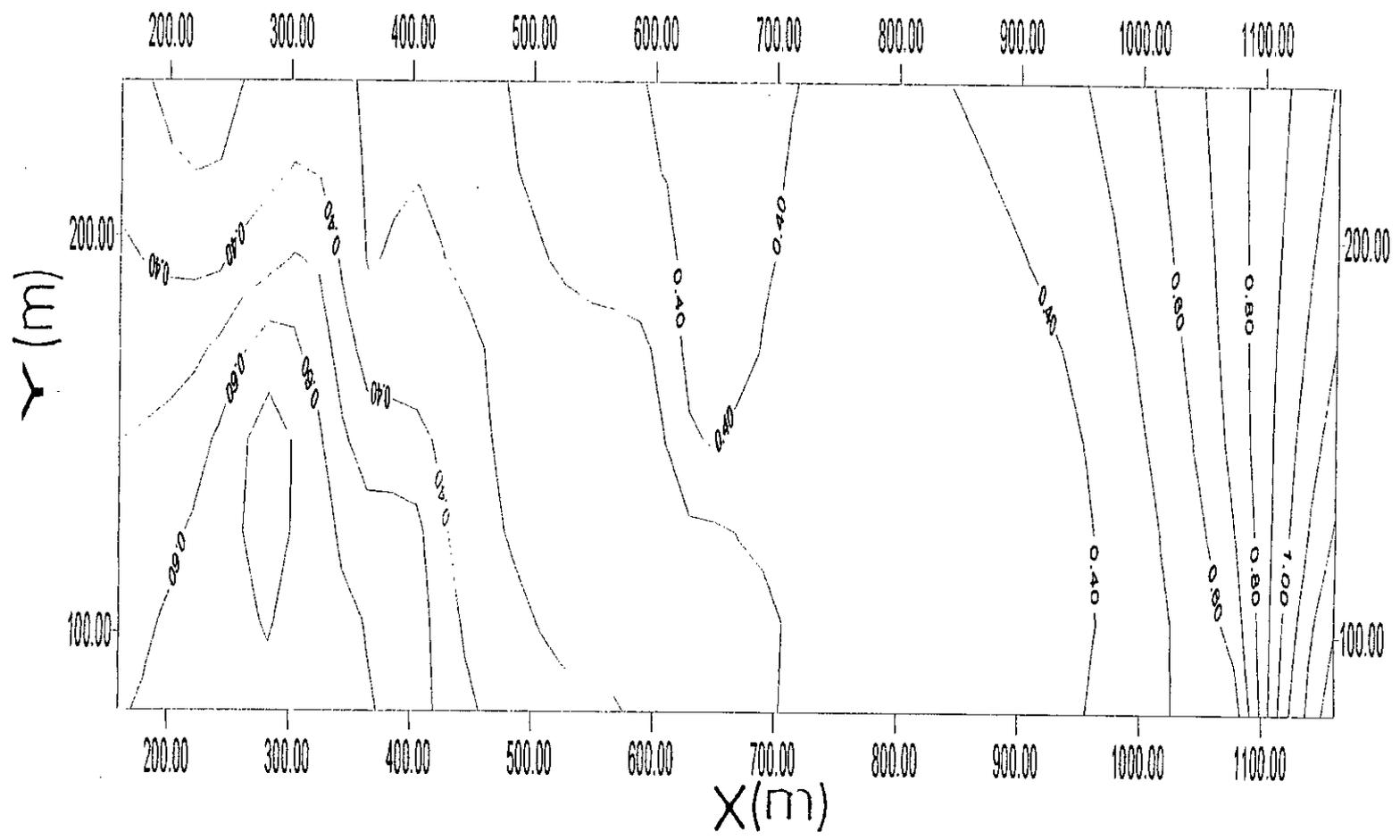


Fig. 17.6 . Cartographie de la variance d'estimation pour la teneur

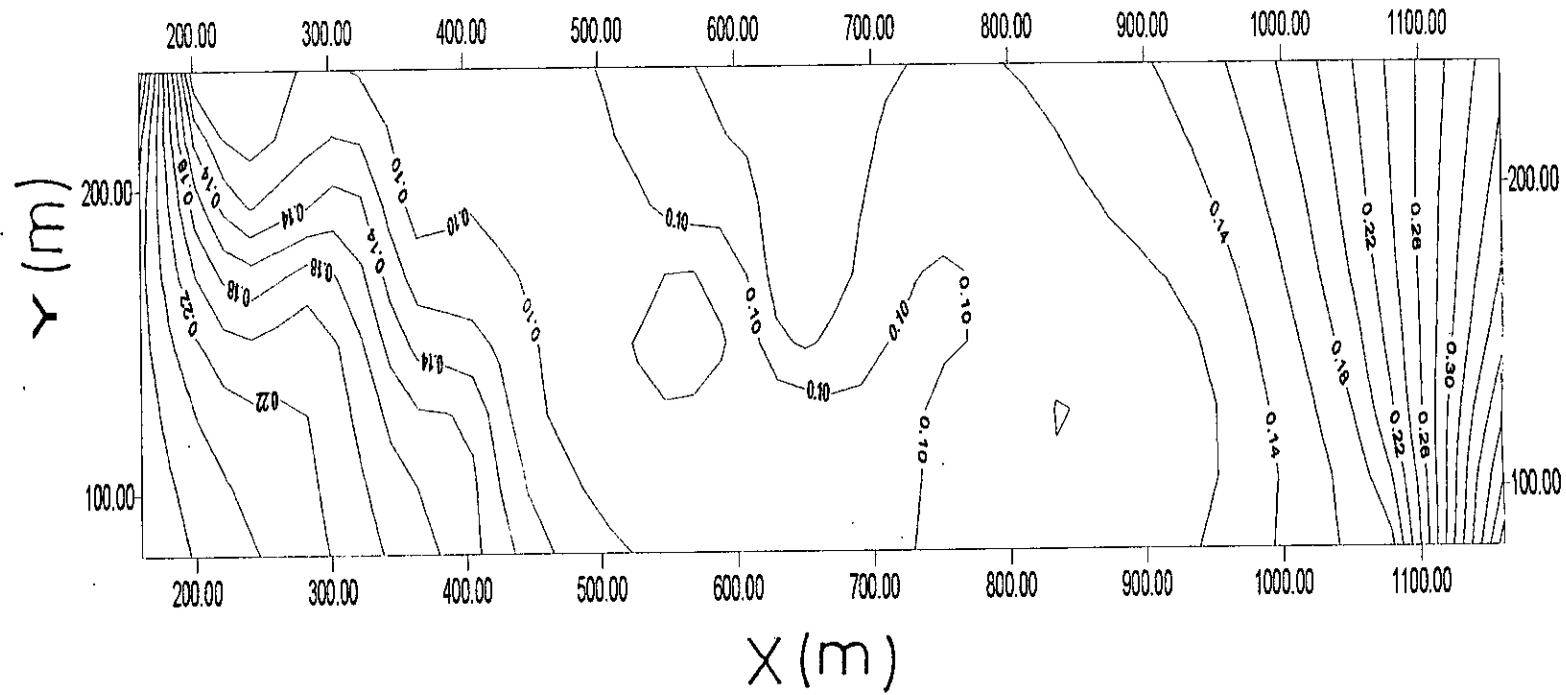


Fig. 18.b. Cartographie de la variance d'estimation pour l'épaisseur

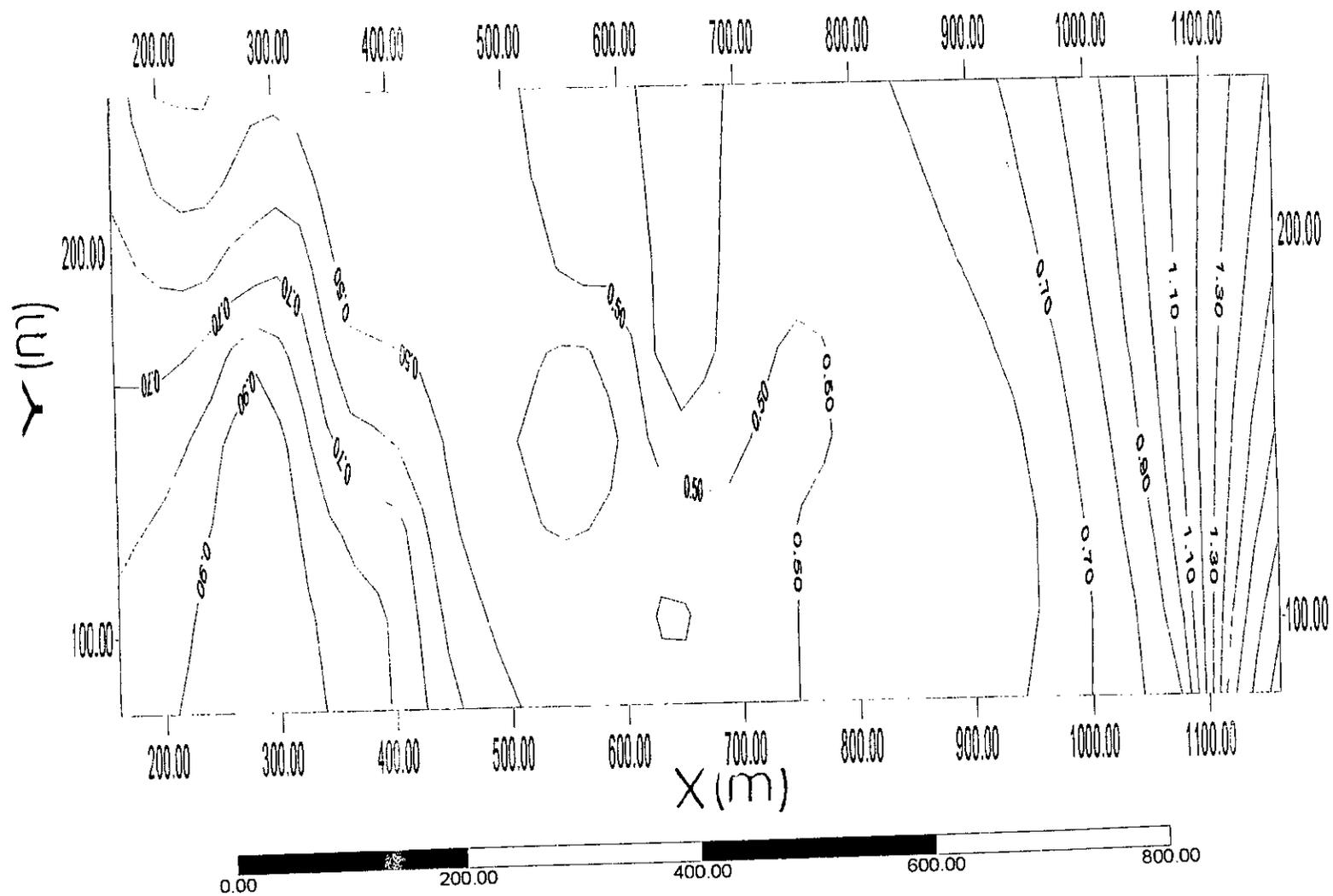


Fig. 19.b - Cartographie de la variance d'estimation pour l'accumulation.

III- CALCUL DES RESERVES :

Introduction :

L'objectif de ce chapitre est l'évaluation de la quantité de métal Q *in-situ* dans le gisement. L'estimation de Q passe par l'estimation de la surface et de la puissance minéralisées qui nous permettront d'évaluer le tonnage du minerai. Ensuite on estimera la teneur moyenne du gisement avant de calculer enfin la quantité Q .

En parallèle on déterminera pour chaque paramètre calculé la variance d'estimation correspondante. Ici, tous les calculs porteront sur le gisement tel que défini par le krigeage.

1. Estimation de la surface minéralisée(S^*):

La surface minéralisée S^* est estimée par la somme des surfaces de tous les blocs krigés.

$$(22) \quad S^* = N.l_1.l_2$$

N : nombre total de blocs krigés

l_1, l_2 : cotés du blocs (m).

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

$$(23) \quad \sigma_s^2 / S^{*2} = 1/N^2 \left[\frac{N_y}{6} + 0.0609 \cdot \frac{N_x^2}{N_y} \right]$$

N_x : nombre de blocs parallèles à l'axe x divisé par 2 = 39/2

N_y : nombre de blocs parallèles à l'axe y divisé par 2 = 10/2

N : le nombre total de blocs = 48

2. Estimation de la puissance minéralisée(h):

La puissance du gisement est estimée par la moyenne de sa distribution statistique soit ici 1.77m sur l'ensemble du gisement. La variance d'estimation correspondante est donnée par la relation :

$$(24) \quad \sigma_h^2 = \frac{1}{N} [C_0 + C(\sigma_e^2)]$$

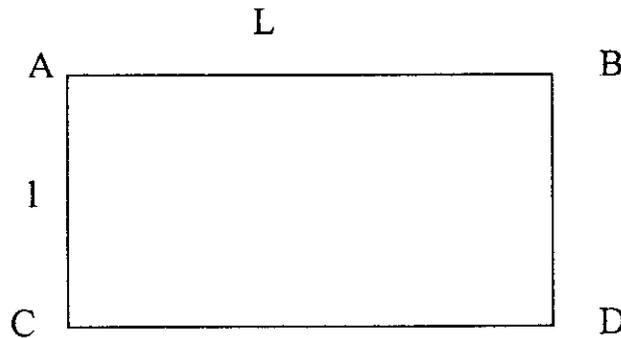
N: nombre de blocs

C et C_0 palier et l'effet de pépite du modèle variographique de la puissance

σ_e^2 : variance d'extension rapprochée par les fonctions auxiliaires $H(l, l)$ et $F(l, l)$.

Une fonction auxiliaire est une valeur moyenne du variogramme correspondant à des géométries particulièrement simples que l'on retrouve dans les études le plus souvent.

Considérons un rectangle ABCD



Posons $h = MM'$ avec M fixé en A au départ et M' décrivant le rectangle .

$F(L, l)$ est la valeur moyenne du variogramme quand M et M' décrivent indépendamment tout le rectangle.

$F(L, l) = F(l, L) = \gamma(ABCD, ABCD)$ (γ : variogramme moyen)

$H(L, l)$ = est la valeur moyenne du variogramme quand M décrit un coté de longueur l et M' décrit le coté adjacent L.

$$H(L, l) = H(l, L) = \gamma(AC, AB).$$

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

$H(l/2, l/2)$ et $F(l, l)$ sont calculées à partir des abaques des fonctions auxiliaires $H(l, l)$ et $F(l, l)$. Le résultat du calcul de

$$\sigma_h^2 = 0.0065$$

3. Estimation du tonnage du minerai(T)

Le tonnage du minerai est estimé par:

$$(25) \quad T = S \cdot h \cdot d \quad \text{ou}$$

S^* = surface minéralisée

h = puissance moyenne minéralisée

d = densité du minerai = 2.8 selon les rapports géologiques

L a variance d'estimation du tonnage du minerais est donnée par la relation:

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

$$d = \text{cste} \Rightarrow \sigma_d^2 = 0$$

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

4. Estimation de la teneur moyenne (t):

La teneur moyenne du gisement est le rapport de la somme des accumulations krigées de tous les blocs sur la somme des épaisseurs krigées.

$$(26) \quad t = \frac{\sum Acc}{\sum h}$$

La variance d'estimation correspondante est rapprochée par l'expression:

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

ρ : coefficient de corrélation (Accu , épaisseur)

σ_{Acc}^2 est estimé suivant le même principe que σ_h^2 .

5. Estimation de la quantité de métal (Q):

La quantité de métal Q est le produit de la teneur moyenne par le tonnage du minerai.

$$(27) \quad Q = T \cdot t$$

La variance d'estimation correspondante est donnée par la relation:

$$\sigma_Q^2/Q^2 = \sigma_T^2/T^2 + \sigma_t^2/t^2$$

Les résultats de tous les calculs sont résumés dans le tableau 10

Paramètres	Valeur estimée	Variance d'estimation relative
Surface minéralisée S*(m ²)	76800	0,002
Puissance minéralisée h (m)	1,77	0,040
Tonnage du minerai T(tonnes)	380620,8	0,008
Teneur moyenne t(g/tonnes)	18,92	0,011
Quantité de métal or Q(Kg)	7201,345	0,021

Tableau10. Résultat du calcul des réserves

CONCLUSION

Conclusion :

Au cours de ce travail nous avons appris à partir d'un échantillonnage discret de données à évaluer un gisement par application de la méthode géostatistique d'estimation . Ceci a permis l'établissement d'une carte de répartition des blocs avec une teneur moyenne Krigée pour chaque bloc et la variance d'estimation correspondante. L'étude de faisabilité semble ainsi plus fiable . Des prévisions intéressantes en matière de frais d'ouverture, de méthode d'exploitation pourraient être fournies. Connaissant la répartition des panneaux le découpage de la mine en vue de la planification de l'exploitation serait plus facilité . On pourrait décider ainsi de l'exploitabilité de certains panneaux.

En somme la méthode géostatistique est outil intéressant pour la gestion des réserves géologiques au sein du gisement aurifère d'Amesmesssa.

Cependant compte tenu de la forte variation des teneurs en or de la zone 9 l'incertitude sur les réserves demeure toujours assez grande.

BIBLIOGRAPHIE

AZZOUZI.M 1993 Contribution à la cartographie automatique des grandeurs hydrogéologiques de la Mitidja . Thèse de Magister I.N.A. Alger.

BENAMAGHAR .A. 1995 Contribution à l'étude géostatistique du gisement de zinc et de soufre pyriteux de Chabet -El -Hamra Thèse de Magister E.N.P.Alger.

BENCHOUCK.M. 1994 Analyse factorielle krigéante des données de prospection géochimique multi-élémentaire (Prospection de l'or de Fourou , Mali). Thèse de Magister . E.N.P. Alger.

CHABOU. M.C. 1996 Comparaison du calcul des réserves par la méthode des blocs géologiques et des triangles sur l'exemple de la partie centrale de la zone 9 du gisement aurifère d'Amesmessas. P.F.E. E.N.P. Alger.

COLEAU. T. et DE FOUQUET. C. 1985. Etude géostatistique sur la carrière de Beaucaire . E.N.S.M.P. Paris.

DAVID. M. 1977. Geostatistical ore reserve estimation . Edition Eisevier scientifique publishing company.

E.R.E.M .1993. Rapport final sur l'évaluation détaillée du gisement aurifère d'Amesmessas.

Goossens.P.J. 1994. Exploration minière .Volume II .Techniques appliquées et intégrées d'un programme allant de l'inconnue à la découverte d'une

concentration minérale et se terminant par une étude économique de faisabilité .

Université de Liège.

SIDAM Inc... 1993. Etude de faisabilité Amesmessa -Tirek. Rapport inédit
Groupe minier.

JEKHOWSKY.B. 1977. Elément de statistique à l'usage des géologues.
Edition Technip.

JOURNEL. A. 1975 . Guide pratique de géostatistique minière .C.G.M.M.de
Fontainebleau. Paris.

MATHERON. G. 1962. Traité de géostatistique appliquée. Edition
Technip.Paris.

MARECHAL. A. 1975. Géostatistique et applications minières. Annales des
mines.Paris.

RAGUIN.E. 1964 .Mémento de quelques techniques de géologie
minière.Paris.

ANNEXES

Annexe I: Données sur les échantillons miniers

FALY.PAT FICHER DE DONNEES	S: Sondage				
b	R: Recoupe				
N°(ouv)	T: Tranchée				
Epaisseur(m)					
Teneur (g/t)					
Acc(mp/t)					
EASTING(X)					
NORTHING(Y)					
S1	0.35	11.6	4.04	470.00	243
S2	0.26	1.7	0.31	551.00	233
S3	1.77	20.6	36.46	63.00	235
S4	1.56	1.00	1.55	22.00	236
S5	0.66	0.6	0.30	802.00	228
S6	1.34	6.6	8.84	570.00	150
S125	1.38	1.9	2.62	1.00	254
S124	1.63	2.7	4.401	71.0	245
S76	1.27	2.9	3.68	114.00	258
S123	0.64	2.7	1.72	156	240
S126	0.5	1.7	0.55	195.0	120
S172	1.47	0.2	0.39	193.00	200
S77	0.90	4.8	4.32	196.00	230
S75	1.48	2.1	3.1	196.00	250
S122	0.41	2.25	0.92	237.00	235
S171	0.5	1.6	0.8	235.00	206
S74	3.83	3.5	13.405	267.00	256
S170	0.46	4.1	1.33	267.00	200
S279	1.47	8.9	13.38	256.00	150
S294	1.70	4.9	8.53	257.00	65
S121	2.44	1.6	1.50	308.00	240
S73	0.92	5.7	5.34	356.00	255
S30	1.12	3.2	3.38	1231.00	252
S128	1.10	1.00	1.13	356.00	192
S278	0.64	10.7	6.34	334.00	115
S295	1.09	6.20	2.34	338.00	0
S127	1.53	5.2	1.33	381.00	240
S168	2.16	1.00	2.16	377.00	207
S169	0.87	1.60	1.39	378.00	167
S197	0.61	3.70	2.15	395.00	67
S201	0.32	0.90	0.18	395.00	26
S280	1.40	2.30	3.72	425.00	-10
S200	1.61	5.80	9.33	433.00	120
S167	0.57	21.8	12.42	439.00	182
S193	4.10	3.60	14.76	437.00	210
S129	2.13	2.70	5.75	436.00	240
S166	2.75	39.0	10.25	476.00	160
S146	1.74	1.40	2.33	472.00	130
S196	1.90	0.20	0.39	476.00	75
S191	0.18	13.15	23.67	515.00	115
S199	0.00	0.00	0.00	475.00	20
S165	1.34	89.00	111.26	516.00	145
S192	0.37	0.700	0.259	515.00	200
S72	0.51	16.50	8.31	488.00	207
S71	2.50	1.0	2.5	523.00	0
S163	1.61	84.1	133.401	553.00	158
S164	4.95	26.4	133.68	555.00	122
S267	0.64	3.3	2.31	577.00	-50
S195	0.00	0.00	0.00	542.00	60
S185	2.53	182.4	461.002	596.00	150
S120	0.00	0.00	0.00	580	54
S177	5.80	19.00	113.2	596.00	160
S60	0.87	3.00	2.31	571.00	196
S61	2.38	1.60	3.40	601.00	235
S63	1.27	3.30	2.30	635.00	213

S188	1.84	6.00	11.36	601.00	206
S64	8.18	38.2	312.47	635.009	-50
S186	0.77	55.0	4.23	638.00	120
R-49	1.4	7.3	10.22	630	203
S215	1.38	4.8	6.62	638.00	118
S218	0.80	1.15	0.92	636.00	55
S70	0.00	0.00	0.00	640	71
S232	0.64	1.40	0.89	664.00	-138
S229	0.64	4.20	2.68	660.00	-50
S234	4.76	1.60	7.61	665.00	10
S182	0.57	23.3	13.28	676.00	120
S103	1.23	4.20	5.16	685.00	196
R-45	0.6	10.6	6.36	648.00	203
R-41	0.9	14.8	13.32	668.00	203
R-37	1.2	5.6	6.72	682	203
R-34	2.4	3.6	8.64	700	203
S161	0.96	5.90	5.66	692.00	164
S159	6.88	4.00	27.52	712.00	152
S160	5.09	16.1	81.94	715.00	120
S69	1.34	12.8	17.15	715.00	195
S181	0.00	0.00	0.00	704.00	80
S217	0.64	0.20	0.070	750.00	0
S183	1.13	1.5	1.29	755.00	132
R-25	4.00	21.4	85.6	747	203
R-21	2.2	3.1	6.82	758	203
S68	0.94	0.5	0.47	725.00	213
S62	3.03	40.2	121.8	683.00	243
S65	1.72	4.3	7.39	765.0	238
S174	2.29	4.6	10.53	765.00	202
S67	1.77	3.00	5.31	798.00	193
R-17	0.6	25.0	15.00	780.00	203
R-13	0.6	13.6	8.16	800.00	203
S118	2.00	3.60	7.2	762.00	160
S178	0.42	5.30	2.22	798.00	155
S219	1.15	9.90	11.38	800.00	125
R-9	1.6	6.2	9.92	820.00	203
S230	0.64	1.70	1.08	830.00	-52
S233	1.13	34.7	39.21	810.00	-130
S235	0.90	7.60	6.84	843.00	-15
S221	1.15	4.60	5.29	843.00	93
S149	1.97	2.6	5.12	875.00	133
S179	1.47	17.2	25.28	842.00	170
S132	2.60	5.10	13.26	880.00	176
S147	0.35	1.40	0.49	875.00	196
S130	1.06	2.40	2.54	842.00	230
R-1	1.00	0.9	0.9	860.00	203
S66	1.53	2.00	3.06	878.00	250
S272	1.54	1.50	2.31	903.00	10
S208	2.60	3.80	9.88	907.00	121
S180	2.22	5.40	11.98	915.00	176
S178	1.07	13.00	2.22	918.00	200
S131	2.76	10.60	29.25	918.00	240
R-7	2.00	19.4	28.8	920.00	203
R-3	0.6	2.6	1.56	900.00	203
R-0	1.3	1.8	2.34	880.00	203
S78	2.21	8.60	19.008	955.00	230
S148	0.5	48.00	24	955.00	198
R-11	1.1	22.6	24.86	940	203
R-15	2.1	2.6	5.46	960	203
S133	1.03	13.00	13.039	945.00	153
S184	0.92	0.800	0.73	940.00	80
S177	0.00	0.00	0.00	942.00	113
S231	0.64	1.3	0.83	938.00	80
S273	0.77	3.7	2.84	945.00	60
S217	0.30	0.2	0.06	947.00	70

214	3.3	5.3	17.49	954.00	107
R-19	1.2	15.3	18.33	840.00	203
R-23	2.7	37.5	101.25	1000.00	203
S220	0.32	0.5	0.16	1025.0	20
S190	0.32	2.3	0.71	1040.0	116
S198	2.16	8.1	17.49	1007.0	158
S187	1.72	26.5	45.58	1040.00	158
S194	1.72	5.60	9.63	1005.00	200
R-27	0.20	1.00	0.20	1020.00	103
R-32	2.7	37.5	101.25	1040.00	103
S112	0.64	2.10	1.34	1005.00	215
S79	2.30	19.00	43.7	1004.00	241
S134	1.15	2.20	2.53	1050.00	230
S150	3.20	90.00	288	1045.00	195
R-35	2.6	11.6	30.16	1060.00	203
R-39	4.3	62.00	266.6	1078.00	203
S202	2.21	45.10	99.67	1077.00	195
S209	2.20	2.50	5.5	1074.00	152
S211	0.77	0.30	0.23	1069.00	122
S282	0.57	1.80	1.56	1074.00	103
S296	0.53	4.80	2.54	1068.00	0
S144	0.77	0.30	0.23	1090.00	82
S223	0.49	0.20	0.09	1106.00	110
S151	0.87	4.00	3.48	1095.00	155
S136	0.80	7.20	5.76	1118.00	185
S80	0.50	254.4	127.2	1103.00	228
R-43	1.2	10.80	12.96	1100.00	203
R-47	2.6	5.4	14.04	1117.00	203
S135	3.68	7.800	28.70	1153.00	230
S203	1.23	17.70	21.77	1150	207
S210	0.43	0.60	0.258	1147.00	155
S213	0.32	3.00	0.96	1145.00	120
S283	4.11	1.11	4.52	1145.00	118
S292	1.00	28.5	28.5	1145.00	-20
S116	0.41	18.9	7.74	1193.00	220
S297	0.61	1.60	0.976	1220.00	-7
S265	0.78	63.6	49.60	1250.00	66
S284	1.22	1.00	1.22	1231.00	129
S35	1.15	1.1	1.26	1237.00	188
S205	0.66	3.5	2.31	1231.00	223
T147	0.2	1.5	0.3	-50.00	285
T148	0.5	48	24	-35.00	285
T149	1.97	2.6	5.12	-25.00	285
T150	3.20	90	288	-20.00	285
T151	0.8	5.2	4.16	-10.00	285
T152	0.6	5.2	3.12	5.00	285
T153	1.5	6.3	9.45	15.00	285
T154	0.4	3.8	1.52	25.00	285
T155	1.00	5.200	5.2	35.00	285
T156	1.00	6.3	6.3	40.00	285
T157	1.00	1.00	1.0	55.00	285
T158	1.3	5.6	7.28	65.00	285
T57	1.3	26.8	34.84	75.00	285
T159	0.5	2.6	1.3	85.00	285
T160	0.85	2.89	2.46	95.00	285
T161	1.00	2.5	2.5	105.00	285
T162	1.65	3.8	6.27	115.00	285
T163	1.00	2.00	2	125.00	285
T164	2.3	4.3	9.89	135.00	285
T165	0.8	1.2	0.96	145.00	285
T166	2.3	2.3	5.29	155.00	285
T167	2.5	4.1	10.25	165.00	285
T168	0.80	2.00	1.6	175.00	285
T169	0.5	2.4	1.2	185.00	285
T170	2.00	26.4	53.8	195.00	285

T171	1.00	13.70	13.7	210.00	285
T172	2.00	17.2	34.4	220.00	285
T55	0.450	2.00	0.9	225.00	285
T173	3.45	6.00	20.7	230.00	285
T174	2.2	129.2	285.56	235.00	285
T175	1.5	2.2	3.3	245.00	285
T176	2.7	2 8.6	77.22	255.00	285
T177	2.0	2 8.7	57.4	265.00	285
T178	2.6	37.1	96.46	275.00	285
T179	0.70	32.0	22.4	285.00	285
T180	4.2	8.3	34.86	295.00	285
T181	1.8	17.2	30.96	305.00	285
T182	3.8	4.5	17.2	315.00	285
T183	2.3	3.9	8.87	325.00	285
T84	2.8	4.00	11.2	335.00	285
T185	1.00	3.9	3.9	350.00	284
T186	1.3	3.5	4.55	355.00	284
T187	2.55	6.9	17.59	365.00	283
T54	0.8	90.7	72.24	375.00	283
T188	1.0	8.5	8.5	380.00	283
T189	0.5	2.00	1.00	390.00	283
T190	0.2	2.00	0.4	400.00	282
T192	1.00	1.1	1.1	435.00	282
T193	1.5	7.7	11.55	445.00	282
T673	1.8	7.8	14.04	450.00	283
T194	0.7	2.9	2.03	455.00	284
T674	0.7	2.6	1.82	460.00	284
T195	2.4	10.2	24.48	465.00	284
T677	2.9	3.3	9.57	505.00	285.5
T52	2.2	15.5	34.1	510.00	287
T199	4.75	32.47	154.275	515.00	288
T200	3.3	7.7	25.41	530.00	288
T679	1.9	6.3	11.97	535.00	288
T201	1.8	3.2	5.58	540.00	288
T680	1.30	8.00	10.4	545.00	290
T682	1.1 0	26.8	29.15	550.00	290
T51	3.00	8.00	24	555.00	290
T202	3.00	8.2	24.6	560.00	290
T684	2.6	3.8	9.88	565.00	290
T203	3.35	28.8	96.48	570.00	290
T204	3.00	5.00	15.0	580.00	289
T685	6.6	20.6	135.96	585.00	288
T205	2.15	4.77	10.105	590.00	288
T50	0.30	30.3	9.00	600.00	287
T206	7.25	7.7	347.825	605.00	287
T207	4.00	8.70	34.8	610.00	287
T686	4.10	58.0	237.8	615.00	287
T208	3.60	22.5	81.00	620.00	287
T687	5.1	26.4	134.64	625.00	287
T703	0.3	0.15	0.45	800.00	285
T704	6.1	8.1	53.07	810.00	285
T225	3.5	73.6	257.6	815.00	285
T226	4.8	8.7	41.76	835.00	285
T42	0.30	4	1.2	860.00	285
T227	2.3	3.2	7.36	875.00	285
T40	1.5	2.6	3.9	890.00	285
T253	2.3	3.1	7.12	895.00	285
T39	2.0	12.00	24.00	920.00	285
T254	3.4	4.00	13.6	935.00	285
T38	0.8	3.6	2.88	960.00	285
T85	1.00	4.00	4.00	970.00	285
T85/0	1.35	14.1	19.61	985.00	285
T85/1	1.0	2.60	2.6	995.00	284
T85/2	1.0	8.60	8.6	1005.0	284
T85/3	2.0	5.60	11.2	1015.0	283

T255	2.0	4.300	8.6	1030.0	282
T255	1.2	6.8	8.16	1045.0	282
T37	0.50	30.0	15	1050.0	282
T256	5.0	8.6	43	1070.0	281
T257	2.3	77.1	177.33	1080.0	281
T35	1.35	40.49	54.67	1090.0	281
T85/6	0.2	10.1	20.2	1105.0	280
T85/7	0.05	2.0	0.1	1125.0	280
T85/8	0.05	3.0	0.15	1135.0	281
T85/9	0.1	1.5	0.15	1145.0	282
T85/10	1	30.2	30.2	1155.0	283
T32	1.35	10.0	13.5	1165.0	284
T209	4.75	20.6	97.85	630.0	287
T49	4.100	98.1	401.8	635.00	287
T210	6.3	51.8	326.34	640.00	287
T688	4.9	31.7	155.33	645.00	287
T211	3.6	24.65	89.79	650.00	285
T689	2.9	17.14	50.46	655.00	287
T212	1.8	14.2	25.56	660.00	287
T690	1.9	14.4	27.56	665	287
T213	3	8.6	25.8	670.00	287
T691	3.6	84.6	304.92	675.00	287
T47	2.77	24.0	8.64	680.00	287
T214	3.6	3.9	14.04	690.00	287
T692	1.8	11.8	21.24	695.00	287
T215	1.05	11.80	12.39	700.00	287
T693	1.5	10.2	15.3	705.00	287
T697	2.2	8.8	19.36	740.00	285
T698	0.8	54.2	43.36	745.00	285
T44	2.2	120.4	264.8	750.00	285
T45	1.75	67.0	117.42	760.00	285
T699	3.2	6	19.2	765.00	285
T221	4.7	10.31	48.41	770.00	285
T700	3.8	8.8	33.4	775.00	285
T222	2.25	4.6	10.35	780.00	285
T701	2.8	22.2	61.6	785.00	285
T223	1.1	32.2	35.42	790.00	285
T702	1.1	8.8	9.68	795.00	285
T85/11	5.7	22.5	128.25	1180.0	285
T85/13	0.5	8.4	4.2	1190.0	285
T85/14	0.5	36.6	18.3	1200.0	285
T30	0.4	31.2	12.48	1210.0	285
T270	1.2	12	14.4	1220.0	285

Annexe.2

Resultats des calculs anterieurs des réserves géologiques de la zone 9

1. Resultat du calcul des réserves par la méthode des blocs géologiques.

Paramètres de calcul des réserves	Valeur calculée
Surface minéralisée (m ²)	98329.17...
Epaisseur moyenne (m)	1.84
Volume du minerai (m ³)	181100.79
Densité du minerai (cm ³)	(Donnée) 2.8
Tonnage du minerai (t)	507.06 10 ³
Teneur moyenne (g/t)	19.74
Quantité de métal Q (kg)	10014.33

Réf.: CHABOU .M.C (1996)

2. Resultat du calcul des réserves par la méthode des triangles.

Paramètres de calcul des réserves	Valeur calculée
Tonnage du minerai (t)	337460
Teneur moyenne (g/t)	22.56
Quantité de métal Q (kg)	7613.98

Réf.: CHABOU.M.C (1996)

3. Calcul de l'E.R.E.M. (1990)

Méthode : Blocs géologiques projetés sur une section longitudinale verticale de la zone minéralisée

Paramètres	Valeur calculée
Epaisseur moyenne (m) C1	2.56
Tonnage du minerai (t) C1	797800
Teneur moyenne (g/t)	21.1
Quantité or métal (kg) C1	16.84.10 ³

C1 Catégorie de réserves reconnue par une maille de 40mx40m

Réf. Groupe minier SIDAM Inc... (1993)

4. Calcul de Systèmes Géostat International (1991)

Méthode : Méthode des blocs de 10x10m (sans ecretage et sans dilution)

Paramètres	Valeur calculée
Epaisseur moyenne (m) C1+C2	2.24
Tonnage du minerai (t) C1+C2	1164932
Teneur moyenne (g/t)	21.3
Quantité or métal (kg) C+C2	$24.81 \cdot 10^3$

C1 Catégorie de reserve reconnue par une maille de 40mx40m

C2 Catégorie de reserve reconnue par une maille de 80mx80m

Réf. Groupe minier SIDAM Inc... (1993)

4. Calcul de l'O.R.G.M (1992)

Méthode : Blocs géologiques projetés sur une section longitudinale verticale de la zone minéralisée

Paramètres	Valeur calculée
Epaisseur moyenne (m) C1	2.94
Tonnage du minerai (t) C1	517500
Teneur moyenne (g/t) C1	22.7
Quantité or métal (kg) C1	$11.75 \cdot 10^3$

Réf. Groupe minier SIDAM Inc...(1993)

Annexe.3

Références des programmes et logiciels utilisés

STAT1 : Un des programmes du logiciel Geocas (*Géostatistical Environmental Assesment Software*) Version 1.2.1.1990 . U.S. Environmental Protection Agency , Las Vegas , Nevada & Computer Sciences Corporation, Las Vegas ,Nevada -U.S.A. Ce programme permet de calculer les paramètres statistiques généraux des variables et la construction des histogrammes décrivant leurs distributions.

VARIO : Un des programmes du logiciel Geocas (*Géostatistical Environmental Assesment Software*) Version 1.2.1.1990. U.S. Environmental Protection Agency , Las Vegas , Nevada & Computer Sciences Corporation, Las Vegas ,Nevada -U.S.A. Ce programme permet de calculer et de construire les variogrammes expérimentaux des variables

KRIGE : Un des programmes du logiciel Geocas (*Géostatistical Environmental Assesment Software*) Version 1.2.1.1990 . U.S. Environmental Protection Agency , Las Vegas , Nevada & Computer Sciences Corporation, Las Vegas ,Nevada -U.S.A. Avec ce programme on effectue le krigeage des variables. Il donne également la variance d'estimation de chaque valeur krigée.

SURFER : Version 5.01 Surface Mapping System 1994 Golden Software Inc.. C'est un outils pour la création de graphes en 2D ou 3D. Il permet aussi la création de cartes en iso-valeurs et la représentation en relief de données en XYZ.

Annexe.4

Resultat du krigeage pour les variables

I.Resultat du krigeage pour la teneur :Tableau 1

Coordonnées des centres des bioes		Valeur estimée (g/t)	Variance d'estimation
X(m)	Y(m)		
160	240	4.45	0.362
200	240	8.17	0.259
240	200	4.35	0.340
240	240	13.1	0.259
280	160	4.61	0.758
280	200	4.01	0.414
280	240	10.9	0.346
320	160	4.62	0.618
320	200	3.12	0.489
320	240	5.70	0.321
360	120	7.13	0.563
360	160	4.56	0.387
360	200	3.29	0.272
360	240	6.85	0.296
400	120	7.54	0.584
400	160	8.27	0.381
400	200	7.04	0.324
440	120	11.00	0.353
440	160	17.2	0.348
440	200	12.4	0.275
480	120	21.4	0.302
480	160	31.7	0.277
480	200	19.3	0.293
520	120	34.9	0.266
520	160	43.5	0.270
520	200	20.5	0.309
560	120	44.3	0.278
560	160	47.3	0.198
560	200	26.2	0.387
600	120	55.2	0.306
600	160	59.9	0.252
640	120	38.3	0.238

Suite tableau i

640	160	42.8	0.497
680	120	20.00	0.290
680	160	14.1	0.389
720	120	11.8	0.306
720	160	6.69	0.314
760	120	6.90	0.357
760	160	4.95	0.302
800	120	6.50	0.335
840	120	5.09	0.404
880	120	3.76	0.345
920	120	2.97	0.322
960	120	5.71	0.395
1040	80	13.5	0.521
1080	80	9.76	0.550
1120	80	7.46	1.08
1160	80	31.9	1.38

2.Resultat du krigeage pour l'épaisseur :Tableau 2

Coordonnées des centres des blocs		Valeur estimée(m)	Variance d'estimation
X(m)	Y(m)		
160	240	1.13	0.336
200	240	1.02	0.083
240	200	0.795	0.105
240	240	1.01	0.0804
280	160	0.87	0.216
280	200	1.08	0.126
280	240	1.67	0.103
320	160	0.984	0.18
320	200	1.40	0.145
320	240	2.07	0.0981
360	120	1.16	0.169
360	160	1.14	0.118
360	200	1.54	0.0867
360	240	1.50	0.0901
400	120	1.31	0.170

Suite tableau.2

400	160	1.36	0.116
400	200	1.69	0.099
440	120	1.52	0.109
440	160	1.65	0.106
440	200	1.98	0.0874
480	120	1.60	0.0946
480	160	1.67	0.0873
480	200	1.51	0.0919
520	120	1.67	0.0842
520	160	1.47	0.083
520	200	1.19	0.0966
560	120	2.40	0.0867
560	160	2.05	0.0633
560	200	1.51	0.118
600	120	2.07	0.0931
600	160	2.70	0.0792
640	120	1.67	0.076
640	160	2.43	0.146
680	120	2.14	0.0915
680	160	2.47	0.120
720	120	3.11	0.0954
720	160	3.25	0.0985
760	120	2.10	0.109
760	160	2.20	0.0953
800	120	1.45	0.105
840	120	1.40	0.125
880	120	1.81	0.110
920	120	1.84	0.104
960	120	1.73	0.124
1040	80	1.58	0.160
1080	80	1.16	0.176
1120	80	1.05	0.309
1160	80	0.755	0.431

3.Resultat du krigeage pour l'accumulation:Tableau.3

Coordonnées des centres des blocs		Valeur estimée(m.g/t)	Variance d'estimation
X(m)	Y(m)		
160	240	6.73	0.571
200	240	16.2	0.399
240	200	7.67	0.539
240	240	26.3	0.384
280	160	2.98	0.998
280	200	5.76	0.609
280	240	22.5	0.477
320	160	3.43	0.823
320	200	4.19	0.652
320	240	13.00	0.466
360	120	7.33	0.810
360	160	4.72	0.565
360	200	4.67	0.431
360	240	8.21	0.424
400	120	11.3	0.797
400	160	11.3	0.539
400	200	10.00	0.465
440	120	21.2	0.544
440	160	27.6	0.495
440	200	18.6	0.421
480	120	42.2	0.465
480	160	53.2	0.414
480	200	33.3	0.440
520	120	69.8	0.414
520	160	72.1	0.394
520	200	35.6	0.461
560	120	98.5	0.416
560	160	103	0.312
560	200	66.4	0.579
600	120	102	0.438
600	160	137	0.394
640	120	55.4	0.374
640	160	90.00	0.667
680	120	23.33	0.446
680	160	19.2	0.596
720	120	30.5	0.467

Tableau.3 suite

720	160	21.00	0.493
760	120	18.3	0.523
760	160	13.4	0.474
800	120	11.1	0.513
840	120	6.36	0.596
880	120	7.30	0.544
920	120	7.68	0.525
960	120	18.00	0.610
1040	80	34.1	0.785
1080	80	27.4	0.912
1120	80	23.1	1.59
1160	80	39.7	1.86

Annexe 5

Rappel théorique en géostatistique

I DEFINITION ET APPLICATION

1. Définition

“ La géostatistique est l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des phénomènes naturels ” (Matheron.G 1962)

Au sens le plus large , la géostatistique est l'étude des lois de distribution dans leur champ naturel des variables régionalisées présentant une signification géologique notamment la puissance d'une formation géologique, la granulométrie d'un sable, d'un gravier, la distribution géochimique des oligo-éléments, la répartition des teneurs dans un gisement minier.

Toutes ces grandeurs ont en commun un certain nombre de caractères qui sont ceux des variables régionalisées (V.R)

En effet un phénomène naturel peut être caractérisé par la distribution dans l'espace d'une ou plusieurs variables appelées variables regionalisées. La théorie de la géostatistique démarre de l'idée que toutes les variables régionalisées ont un aspect aléatoire et structural. Ce sont des fonctions d'espace définies dans un champ homogène (en général une formation géologique) , à partir d'un support géométrique déterminé (volume du prélèvement pour les granulométries) et dont la variation dans l'espace présente des caractères de continuité plus ou moins marqués. Le support géométrique est censé se déplacer par translation pour occuper toutes les positions à l'intérieur du champ géométrique. A chacune de ces positions correspond une valeur de la variable régionalisée. Si l'on change soit la forme , les dimensions ou l'orientation de ce support , on obtiendrait une nouvelle V.R. dont la répartition dans l'espace ne serait pas identique à celle de la première.

2. Application

Soit $z(x)$ la valeur de la variable au point x . Le problème est de représenter la variabilité de la fonction $z(x)$ quand x varie . Cette représentation sera alors

utilisée pour résoudre le problème de l'estimation de la valeur $z(x_0)$ en un point x_0 où aucune donnée n'est disponible.

La géostatistique résout ce problème en supposant que chacune des variables aléatoires V.A représente une réalisation particulière d'une fonction aléatoire F.A (ensemble de variables aléatoires autocorrélées) . Ainsi donc caractériser la variabilité de $z(x)$ revient à modéliser les corrélations entre les différentes variables aléatoires constituant la F.A. L'interprétation probabiliste de la variable régionalisée $z(x)$ comme une réalisation particulière d'une certaine fonction aléatoire n'a de sens que s'il est possible de connaître entièrement la loi de probabilité qui la définit.

A ce jour la géostatistique a été appliquée avec succès dans différents domaines comme l'exploration minière , la géophysique , la géochimie, l'hydrogéologie, la géotechnique et plus généralement dans toutes les disciplines des sciences de la terre.

II. NOTION DE MOMENTS ET DE STATIONARITE

1. Les moments

En géostatistique minière seulement les deux premiers moments sont pris en compte:

- le moment d'ordre 1 ou espérance mathématique

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

- le moment d'ordre 2

. **Covariance:** $E\{[z(x+h) - m(x+h)][z(x) - m(x)]\} = C(x,h)$ (h = au pas ou

vecteur de translation) ou

$$\text{Variogramme : } E\{[z(x+h) - z(x)]^2\} = 2\gamma(x,h)$$

Le variogramme est toujours positif $\gamma(h) > 0$ tandis que la covariance peut présenter des valeurs négatives. L'existence de la covariance implique celle du variogramme . Les deux moments se correspondent alors par la relation

$$\gamma(h) = C(0) - C(h).$$

Le variogramme peut exister sans que la covariance existe. L'hypothèse d'existence de la covariance étant plus forte que celle du variogramme on préfère en géostatistique l'outil variogramme à la covariance.

2. Stationnarité

La fonction aléatoire est dite stationnaire au sens stricte si sa loi spatiale est invariante par translation dans son espace de définition. Autrement dit les deux vecteurs à k composantes de variables aléatoires $\{z(x_1); \dots; z(x_k)\}$ et $\{z(x_1+h); \dots; z(x_k+h)\}$ possèdent la même loi de distribution à k variables quelque soit le vecteur de translation h .

La fonction aléatoire sera stationnaire d'ordre 2 si ses deux moments sont invariants par translation sur son espace de définition.

En d'autres termes:

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

$$E\{z(x+h).z(x)\} - m^2 = C(h) = C(-h)$$

$$E\{[z(x+h) - z(x)]^2\} = 2\gamma(h) = 2\gamma(-h)$$

Il apparait sous l'hypothèse de stationnarité d'ordre 2 que le variogramme et la covariance sont deux outils équivalents pour caractériser les autocorrélations entre deux variables $z(x+h)$ et $z(x)$ distantes de h . Dans la pratique on se contente de l'hypothèse intrinsèque locale.

. Hypothèse intrinsèque

Une fonction aléatoire admet l'hypothèse intrinsèque si les accroissements de la variable régionalisée $[z(x+h) - z(x)]$ sont localement stationnaires

$$\{z(x_i)\} = m \quad \forall x$$

$$\text{VAR}\{z(x+h) - z(x)\} = E\{[z(x+h) - z(x)]^2\} = 2\gamma(h) \quad \forall x$$

III. LE VARIOGRAMME

1. Définition

Pour caractériser l'aspect aléatoire de la fonction $Z(x)$ (Z en majuscule) par des paramètres constants dans tout l'espace du domaine parcouru par la variable régionalisée $z(x)$ (z en minuscule) une notion nouvelle, le *variogramme*, a été introduite.

Le variogramme est l'outil de base de la géostatistique. Il représente la variance des accroissements de la variable régionalisée $z(x)$ quand x se déplace à travers tout le domaine du gisement, le vecteur de translation h restant constant en module et en direction.

$$2\gamma(h) = E\{ [z(x) - z(x+h)]^2 \}$$

On distingue pour le variogramme une valeur expérimentale calculée sur un réseau fini de données recouvrant le champ V ($V =$ au volume du gisement); une valeur locale calculée à partir de toutes les valeurs prises par la variable dans le champ V ; et une valeur théorique ou valeur probable des deux précédentes.

Variogramme expérimental

Si nous disposons de N couples de données distants de h le variogramme expérimental est exprimé par :

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

Variogramme local

Il est estimé par :

$$2\gamma_l(h) = \frac{1}{\text{Mes}(v')} \int_{v'} [z(x+h) - z(x)]^2 dx \quad v' = \text{intersection de } v \text{ par son translaté de } h.$$

Variogramme théorique

Il est donné par l'expression suivante

$$2\gamma(h) = E\{2\gamma^*(h)\} = E\{2\gamma_1(h)\}$$

2. Caractéristiques du variogramme

Le variogramme est un modèle mathématique qui sera utilisé pour la résolution de tous les problèmes pratiques posés en géostatistique. Il s'avère donc nécessaire de connaître quelques propriétés essentielles de cet outil.

2.1 Comportement du variogramme au voisinage de zéro (origine)

Le comportement du variogramme au voisinage de zéro rend compte de la régularité et de la continuité dans l'espace de la variable étudiée.

Une indépendance totale entre variables mesurées met l'accent sur l'aspect nettement aléatoire du phénomène. Dans ce cas la covariance s'annule $\gamma(h) = Cste = 0$.

Pour un phénomène très irrégulier h et l'accroissement $[z(x) - z(x+h)]$ sont proportionnels. $\gamma(h)$ se comporte alors comme une fonction parabolique. Par contre pour un phénomène moins régulier que précédemment, au voisinage de zéro $\gamma(h)$ est linéaire.

Généralement $\gamma(0) \neq 0$. On a une discontinuité à l'origine. On parle dans ce cas d'*effet de pépîte*.

2.2 Comportement du variogramme aux grandes distances

Quand h devient plus grand $\gamma(h) \rightarrow \gamma(\infty) = C(0)$ appelé *palier*. La distance a à laquelle $\gamma(h)$ atteint son palier est appelée portée. Au delà de cette distance les variables $z(x)$ et $z(x+h)$ ne sont plus corrélées. $\gamma(h)$ prend une allure qui est considérée comme sa forme idéale.

N.B. Dans le cadre de l'analyse structurale d'un phénomène régionalisé la construction des variogrammes se fait dans plusieurs directions de l'espace. Ceci est recommandé dans la mesure où il permet de déceler les anisotropies de structure. Un phénomène est dit isotrope si sa variation est identique dans toutes les directions de l'espace. Si le variogramme représentant la variabilité d'un phénomène dans l'espace change de forme ou de paramètres (palier, portée) dans une certaine direction de l'espace on dira que ce phénomène est anisotrope.

4. Modélisation du variogramme

Le besoin d'un modèle de variogramme tient du fait qu'on pourrait avoir besoin d'une valeur de variogramme pour une certaine distance ou dans une certaine direction pour laquelle on ne dispose pas de données expérimentales. Il y a cinq type d'ajustement du variogramme.

Modèle linéaire:

$$\gamma(h) = \omega|h|\lambda.$$

Le modèle linéaire est un modèle sans palier.

Modèle sphérique:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 3/2h/a - 1/2(h/a)^3 & \forall h \in [0, a] \\ 1 & \forall h \geq a \end{cases}$$

C'est un schéma de transition à palier avec comportement linéaire à l'origine.

Modèle exponentiel :

$$\gamma(h) = 1 - \exp.(-3h/a)$$

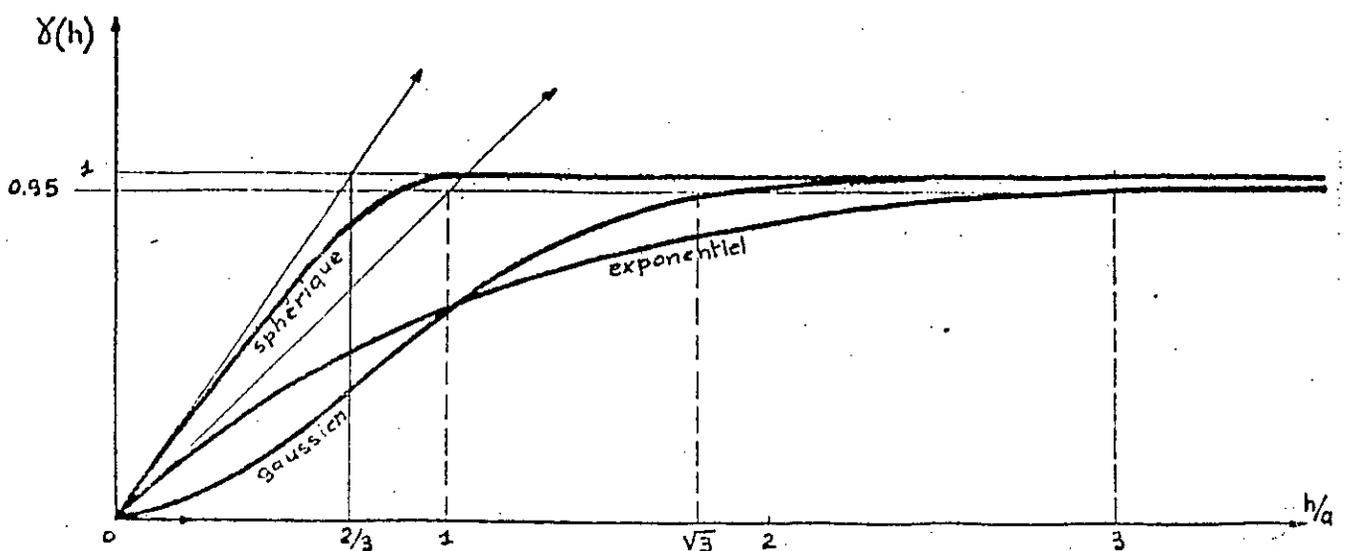
C'est un schéma de transition à palier avec comportement linéaire à l'origine.

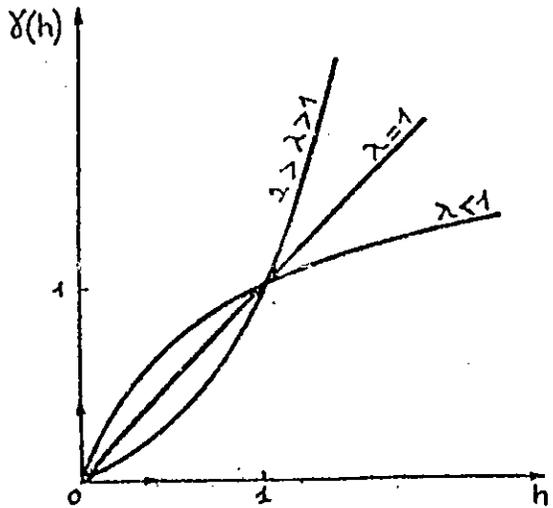
Modèle Gaussien:

$$\gamma(h) = 1 - \exp.[-3(h/a)^2]$$

C'est un schéma de transition à palier avec un comportement parabolique à l'origine.

FIG. 4 Modèles de variogrammes (Maréchal .A., 1975)





5. Comment le variogramme intervient dans l'estimation du phénomène naturel

La réponse à cette question nous amène à évoquer l'aspect quantitatif du variogramme .

Soit z la valeur de la variable aléatoire représentant la valeur du phénomène étudié. La vraie valeur de z est inconnue .En général on cherche à l'estimer par la valeur connue z^* . Nous commettons alors une erreur notée $\epsilon = [z - z^*]$ considérée comme une variable régionalisée. Certes nous ne pouvons pas calculer cette erreur , mais nous essayons de maîtriser sa dispersion afin de choisir le meilleur estimateur possible. Le meilleur estimateur est celui qui donne une espérance proche de zéro (*estimateur non biaisé*) et une variance minimale.

$$\begin{cases} E(\epsilon) = E[z - z^*] = 0 \text{ (non biais)} \\ \text{Var}(\epsilon) \approx \min \end{cases}$$

De plus un estimateur doit être tel qu'on puisse calculer ce qu'on appelle la *variance d'estimation* .

Expression générale de la variance d'estimation

Soit à estimer la teneur moyenne z_v sur un domaine v par la teneur moyenne $z_{v'}$

$$z_v = \frac{1}{v} \int_v z(x) dx ; \quad z_{v'} = \frac{1}{v'} \int_{v'} z(x) dx$$

$z(x)$ = la variable régionalisée ponctuelle d'une fonction aléatoire stationnaire d'ordre 2 de variogramme $\gamma(h)$. L'estimateur étant supposé non biais la variance d'estimation est donnée par l'expression générale

$$\sigma^2_e = E\{[z_v - z_{v'}]^2\} = \frac{2}{v \cdot v'} \int_v dx \int_{v'} \gamma(x - x') dx' - \frac{1}{v^2} \int_v dx \int_v \gamma(x - x') dx' - \frac{1}{v'^2} \int_{v'} dx \int_{v'} \gamma(x - x') dx'$$

En termes de variogrammes la variance d'estimation peut être exprimée par

$$\sigma^2_e = E\{[z_v - z_{v'}]^2\} = 2\gamma(v, v') - \gamma(v, v) - \gamma(v', v').$$

III. LES GRANDES LIGNES D'UNE ETUDE GEOSTATISTIQUE

1. Nettoyage des données
2. Analyse statistique, utilisation des outils habituels (calcul des moyennes, variance etc.)
3. Analyse structurale, calcul de variogrammes
4. Estimation
5. Estimation globale