

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département Génie Minier

Mémoire du PROJET DE FIN D'ETUDE
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Minier

THEME

**UTILISATION DU GDM POUR LE
CALCUL DES RESERVES MINIERES**

(GDM : Geological Data Managment)

Réalisé par :
MERBOUTI Mustapha

Proposé et Dirigé par:
Dr : CHABOU.S

Promotion 2007/2008

ملخص:

نضرا لنقص في النماذج التقديرية في هندسة المناجم. اعتمدت الطرق الحديثة في تقدير الاحتياط الجيولوجي في الأساس على قوانين جيواحصاء, و في هذا العمل قمنا بتقديم بعض القواعد و القوانين الأساسية, و كذلك بعض للبرامج الحاسوبية التي تستعمل في عملية حساب هذا الأخير.

إن المخزون الجيولوجي لطبقة الفوسفات على مستوى بلاد الهدبة بجبل عنق ولاية تبسة اعتمد في تقديره على برنامج الحاسوب GDM الذي تم خلال هذا العمل عرض أهم المراحل التطبيقية.

كلمات المفتاح

جيواحصاء, الاحتياط الجيولوجي, Krigeage, الحاسوب برنامج GDM, بلاد الهدبة.

Résumé

Du fait de la lenteur des modèles d'estimation auparavant adoptés en génie minier, les méthodes contemporaines d'évaluation des réserves géologiques se fondent essentiellement sur les lois de la géostatistique. Les règles de base de cette discipline sont présentées brièvement dans ce travail de même que certains logiciels utilisés dans les géosciences. Ferphos ayant acquis le GDM (Geological Data Management), nous présentons son mode d'utilisation avec l'exemple du calcul des réserves de la couche principale du gisement de phosphate du site de Bled El Hadba en vue de son exploitation à ciel ouvert prochainement.

Mots clés : Réserves géologiques, géostatistique, krigeage, Bled El Hadba, logiciel GDM (Geological Data Management).

Abstract

Because of the slowness of the evaluation models before adopted in mining genius, the contemporary methods of assessment of the geological reserves are essentially based on the laws of the géostatistic. The basic rules of this discipline are briefly presented in this work as well as some software used in the geosciences. Ferphos having acquired the GDM (Geological Data Management), we present its operating procedure with the example of the calculation of the phosphate reserves in the site El Hadba in view of its open sky exploitation.

Keywords: Geological reserves, géostatistic, Kriging, Bled El Hadba, GDM software (Geological Data Management).

Remerciements

Je tiens à remercier infiniment toute personne participant de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail. Mes gratitudeles les plus distinguées sont présentées à :

Ma promotrice, Mme. CHABOU .S, qui m'a beaucoup aidé pour réaliser ce travail.

Mr OMRACI. K, le Chef de département Génie minier, pour toutes ses orientations et son aide. Ainsi qu'à l'ensemble des enseignants du génie minier qui nous ont aimablement assisté durant tout notre cursus d'études spécialisées.

Mr. BEKHOUCHE, directeur du CERAD pour sa disponibilité et ses conseils durant la période de mon stage au sein de leur établissement.

Melle RACHACHE S, ingénieur responsable d'études géologiques pour tout son aide.

Nos remerciements les plus dévoués pour tout le personnel de CERAD.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents

Mes frères et sœurs

Mon grand père

Ma grande mère

Toute ma famille

Tous mes amis

Tous ceux que j'aime.

Mustapha.

Sommaire

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	01
<i>CHAPITRE I</i> : Calcul des réserves	04
<i>CHAPITRE II</i> : Etudes géostatistique	15
<i>CHPITRE III</i> : Les logiciels de géostatistique	32
<i>CHAPITRE IV</i> : Présentation du GDM (Logiciel de calcul)	43
<i>CHAPITRE V</i> : Utilisation du GDM : Cas du phosphate du gisement de Bled El Hadba	63
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	86
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	89
<i>ANNEXE</i>	91

Table de matières

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Calcul des réserves	4
I.1) Paramètre de calcul des réserves :	5
I.2) Classification des réserves :.....	6
Catégorie A (réserves certaines)	6
Catégorie B (réserves probables)	6
Catégorie C (réserves possibles)	6
I.3) Méthodes conventionnelles de calcul des réserves minérales :.....	7
I.3.1) Méthode des triangles :.....	8
a) Première méthode : la moyenne pondérée	9
b) Deuxième méthode (méthode des %) :.....	10
c) Méthode de l'inverse de la distance :	10
I.3.2) Méthode des coupes géologiques verticales parallèles :	11
I.3.3) Méthode des blocs géologiques :.....	13
I.3.4) Méthode des polygones (plus proche voisin) :	13
I.3.5) Méthode des sections :.....	14
I.4) Conclusion :.....	15
CHAPITRE II : Etudes géostatistique	16
II.1) Introduction :.....	17
II.2) Variable aléatoire (V. A) :.....	17
II.2.1) La moyenne ou l'espérance de la V A :	18
II.2.2) La variance de la variable aléatoire :.....	18
II.3) L'interprétation propre à la géostatistique :.....	19
II.3.1) Différentes visions du même gisement :	19
II.3.2) Support des observations :.....	20
II.3.3) L'effet de support et de l'information sur les calculs des réserves géologiques :...20	
a- L'effet support :.....	20
b- L'effet information :	20
II.4) Variogramme :.....	21
II.4.1) Construction du variogramme expérimental directionnel :.....	23
II.4.2) Paramètres pour le calcul du variogramme expérimental directionnel :.....	23

II.4.3) Propriétés du variogramme :	24
II.4.3.1) Comportement à l'origine :	24
a) Comportement parabolique :	24
b) Comportement linéaire :	24
c) Discontinuité à l'origine :	25
II.4.3.2) Comportement du variogramme à l'infini :	25
II.5) Le krigeage :	26
II.5.1) Krigeage ordinaire :	26
a- Système de krigeage ordinaire :	27
b- Système de krigeage écrit en termes de variogramme:	27
II.5.2) Krigeage simple :	28
II.5.3) Propriétés du krigeage	30
II.5.3.1) Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont:	30
II.5.3.2) Pratique du krigeage	31
a- Grille de krigeage:	31
b- Voisinage utilisé pour le krigeage:	31
II.6) Conclusion :	32
CHPITRE III : Les logiciels de géostatistique	33
III.1) Introduction :	34
III.2) VULCAN :	34
III.2.1) Résultats graphiques (modélisation du gisement)	35
III.2.1.1) La modélisation géologique	35
III.2.1.2) La planification minière	36
III.3) GEOS3D :	37
III.3.1) Hybridation avec des modèles déterministes	38
III.3.2) L'utilisation des modèles estimés	39
III.3.2.1) Planification d'exploitation	39
III.3.2.2) Contrôle des réserves	39
III.4) GEOSTATISTICAL ANALYST :	40
III.4.1) Geostatistical Analyst est utilisé dans de nombreux domaines pour résoudre des problématiques de terrain complexes	40
III.4.2) Analyse Exploratoire des Données Spatiales	41
III.4.3) Choisir le meilleur modèle	41
III.5) TOPKO (Topographie et Modélisation 3D)	41

III.6) Conclusion :	43
CHAPITRE IV : Présentation du GDM (Logiciel de calcul).	44
IV.1) Introduction	45
IV.2) Fiche technique de GDM	45
IV.2.1) Gestion des données	45
Caractéristiques générales	45
Dans les bases GDM	46
INTERPOLATION	46
IV.2.2) GRAPHIQUES	46
a- Caractéristiques générales	46
b- Plans et sections	47
IV.3) Traitement de données de sondages verticaux	47
IV.3.1) Caractéristiques GDM des données de sondages	48
IV.3.2) Connexion aux données Excel	49
a- Forme des données dans Excel	49
b- L'établissement des données dans une base GDM	49
IV.4) Document graphique	51
IV.4.1) L'interface utilisateur	52
a- L'Arbre du Projet	52
b- L'Arbre du Bureau	53
c- Document graphique	53
IV.4.2) Barres d'outils des Documents Graphiques :	54
a- Barre d'outils générale	54
b- Barres d'outils de la Zone de Visualisation :	55
IV.5) Autres fonction de GDM	57
IV.5.1) Interpolation avec les failles	57
IV.5.2) Créer une « vue 3D » dans GDM Windows (vue isométrique)	60
a- Créer une source de données de courbes GDM avec les 6 faces du cube englobant.	60
b- Utiliser la fonction « Calculs – Changer de repère » sur la source de données « Cube (GDM) » pour définir l'angle de vue du Document Graphique	61
c- Créer un nouveau Document Graphique à partir de la source de données Cube (GDM), dans le système de coordonnées locales (proposé par défaut)	61
IV.5.3) Construction de modèles multicouches avec GDM	61
a- Définitions :	61

b- Réalisation d'un modèle multicouche :.....	62
CHAPITRE V : Utilisation du GDM : Cas du phosphate du gisement de Bled El Hadba	64
V.1) Introduction.....	65
V.1) Description du cadre physique général :.....	65
V.1.1) Situation géographique du gisement :.....	65
V.1.2) Hydrographie et Hydrogéologie :	66
a) Réseau hydrographique :.....	66
b) Eaux souterraines :.....	67
V.2) Aperçu géologique régional :.....	67
V.2.1) Stratigraphie :.....	67
V.2.2) Tectonique régionale:.....	69
V.2.3) Caractéristiques géométriques, pétrographiques et chimiques des minerais :.....	69
V.3) Historique des travaux de recherches sur le gisement :	70
V.4) Estimations des réserves géologiques :.....	71
V.4.1) Modélisation de la surface topographique :.....	74
V.4.2) Pour modéliser les cartes toit et mur de la couche principale (CP) :	76
V.4.3) Pour modéliser les cartes d'isoteneur (P ₂ O ₅ , MgO) :	76
V.4.4) Le choix de la méthode d'estimation :.....	77
V.4.5) Les cartes :	77
Plan de situation des sondages du gisement de Bled Elhadba :.....	78
Carte topographique du gisement de Bled Elhadba :.....	79
Toit couche principale du gisement de Bled Elhadba :.....	80
Mur couche principale du gisement de Bled Elhadba :.....	81
Epaisseur couche principale du gisement de Bled Elhadba :.....	82
Carte d'isoteneurs en P ₂ O ₅ du gisement de Bled Elhadba :.....	83
Carte d'isoteneurs en MgO du gisement de Bled Elhadba :.....	84
V.4.6) Calcul de réserve de la couche principale :.....	85
Conclusion générale	87
Bibliographie.....	90
Annexe	92

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE II

Figure 1 : Schéma d'un variogramme à palier et effet pépite	21
Figure 2 : Paramètres pour les calculs du variogramme expérimental directionnel	23
Figure 3 : Comportement du variogramme à l'infini	24

CHAPITRE IV

Figure 1 : Etablir lien avec base	48
Figure 2 : Correspondance base externe-GDM.....	49
Figure 3 : Nouveau Document Graphique	51
Figure 4 : Arbre du Projet	51
Figure 5 : Arbre du Bureau	53
Figure 6 : Document graphique.....	52
Figure 7 : Ouvrir les paramètres.....	58
Figure 8 : Créer grille 2D	57
Figure 9 : Présentation des isovaleurs	58
Figure 10 : Vue 3D.....	59
Figure 11 : Boîte de dialogue GDM pour l'interpolation de surfaces.....	62

CHAPITRE V

Figure 01 : Schéma du périmètre en coordonnées UTM.....	65
Figure 02 : établir lien avec base.....	71
Figure 03 : correspondance de la base externe avec GDM.....	71

Figure 04 : nouveau document graphique avec le plan de situation des sondages	72
Figure 05 : Habillage sur le document graphique	73
Figure 06 : chemin à entrer « Estimer grille 2D ».....	74
Figure 07 : le choix dans l'interpolation sondage.....	74
Figure 08 : le choix des paramètres dans « Créer Grille 2D ».....	74
Figure 09 : le choix de la variable à interpoler	75
Figure 10 : le choix de la méthode d'interpolation	76
Figure 11 : le tableau « model »	84

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'objet de cette étude est à la fois de présenter les méthodes de calcul des réserves par les méthodes conventionnelles et géostatistiques et aussi de faire une recherche sur les logiciels existant sur le marché dans le domaine de l'évaluation des réserves. Une recherche bibliographique a montré que quelques logiciels étaient utilisés par de grandes compagnies minières dans le monde, qu'ils étaient relativement coûteux et que leur utilisation nécessitait des stages d'initiation. Ce fait nous a conduit à nous adresser naturellement aux entreprises algériennes avec lesquelles notre département a des conventions de partenariat. L'entreprise Ferphos ayant depuis quelques temps un de ces logiciels a accepté de nous recevoir en stage et d'utiliser leurs données pour l'application de ce travail.

L'essor de la géostatistique, ensemble de concepts mathématiques appliqués aux géosciences a connu, depuis les années soixante dix, un incroyable développement suivi par celui de l'informatique. C'est ainsi que de nombreux logiciels adaptés à la résolution de la problématique posée par les géosciences et particulièrement le secteur minier ont été élaborés et développés.

La mise en place d'une unité d'exploitation minière nécessite des études d'évaluation préalables notamment la quantification des réserves minérales des sites concernés, composante décisive pour la poursuite des travaux.

Cette estimation est le résultat de nombreux calculs longs et complexes allégés par la mise au point de logiciels de plus en plus performants. Cette évaluation facilitée a conduit à des opérations de simulations qui tiennent compte à la fois du marché et des prévisions de ce marché (à court moyen ou long terme) et aussi des conditions techniques du site.

Notre travail porte sur la manière de calculer des stocks minéralisés par différentes méthodes tant manuelles que par le biais d'ordinateur dans le secteur minier. Le choix d'un logiciel capable de procéder au calcul des réserves géologiques de phosphates au niveau du site Bled El Hadba, région de Tébessa, a été effectué. Il s'agit du Geological Data Management ou GDM.

Le premier chapitre : est consacrée à l'identification des paramètres d'estimation des réserves et aux méthodes conventionnelles basées sur les formules mathématiques simples utilisées dans le domaine minier.

Le deuxième chapitre : porte sur les notions de géostatistique de base utilisées pour améliorer la précision des calculs des réserves géologiques.

Le troisième chapitre : consiste à présenter quelques logiciels employés dans les géosciences .

Le quatrième chapitre : présente le logiciel, GDM, utilisé par la société Ferphos pour l'estimation des réserves de ses concessions.

Le cinquième chapitre : est une application du GDM relative au calcul des réserves de phosphates du site de Bled El Hadba dans la région de Tébessa.

CHAPITRE I

Calcul des réserves

Nous désignons par évaluation des réserves la détermination de la quantité de minerai dans le gisement selon la qualité et le type, à partir des données obtenues lors des travaux de prospection.

I.1) Paramètre de calcul des réserves :

La méthode générale de calcul des réserves consiste à diviser la surface du gisement en petits secteurs ayant une forme géométrique connue, à multiplier la surface de ce secteur par la puissance du minerai puis par la masse volumique de minerai pour obtenir le poids des réserves en tonnes (tonnage). [Chabou M. 1996]

Les réserves en un élément utile donné sont obtenues en multipliant le tonnage du minerai par la teneur en cet élément. La somme des réserves des secteurs isolés représente la valeur des réserves du gisement entier.

Les paramètres du calcul des réserves sont donc :

(S) : La surface (m²)

m : La puissance (m)

(ρ) : La masse volumique (g/cm³)

(t) : La teneur en élément utile (%)

La surface du gîte est obtenue soit par planimétrie manuelle soit à partir des logiciels. Les travaux miniers et les sondages qui coupent le gîte fournissent sa puissance moyenne. Les travaux d'échantillonnages donnent la masse volumique du minerai et la teneur en élément utile.

Le volume du gisement (ou de ses parties) est obtenu par la formule suivante :

$$V = S \times m \text{ (m}^3\text{)} \dots\dots\dots \text{(I. 1)}$$

Le tonnage minerai est alors :

$$Q = V \times \rho \text{ (en tonnes si } \rho \text{ en tonnes / m}^3\text{)} \dots\dots\dots \text{(I. 2)}$$

Les réserves en élément utile (tonnage métal) sont :

$$P = Q \times t / 1000 \text{ (Kg)} \dots\dots\dots \text{ (I. 3)}$$

Q en tonnes et t en g/tonnes.

I.2) Classification des réserves :

Nous avons pris comme classification des réserves celle adoptée par les compagnies minières conformément à la normalisation internationale. Les réserves sont classées en fonction du degré de connaissance en catégorie A1, A2, B, C1 et C2. [Lounis F. 2007]

Catégorie A (réserves certaines)

A1 : réserves entièrement prospectées, étudiées et préparées pour l'exploitation, ces réserves peuvent servir pour le calcul des travaux d'exploitation.

A2 : réserves entièrement prospectées et étudiées; elles peuvent servir à la planification et à l'organisation de la partie minière des entreprises.

Catégorie B (réserves probables)

Réserves étudiées géologiquement, relativement prospectées et partiellement délimitées par des ouvrages miniers et sondages, échantillonnés pour étudier la composition et les propriétés du minerai et pour obtenir des renseignements qualitatifs sur la technologie des méthodes d'utilisation ce sont des réserves techniques minières de l'exploitation. On peut utiliser ces données comme les bases de projets de grands travaux miniers et des entreprises utilisant les produits miniers bruts et pour l'établissement de programmes de travaux.

Catégorie C (réserves possibles)

C1 : réserves établies par l'étude géologique, d'après les affleurements naturels, ou d'après les données géophysiques, relatives à la structure géologique du gisement et à l'échantillonnage à maille cache; on peut utiliser ces données pour la réalisation des travaux de la prospection détaillée et pour l'établissement des plans d'une éventuelle exploitation industrielle.

C2 : réserves relatives aux régions entières ou bassins, calculées d'après leur étude géologique; les réserves des gisements isolés ou de leurs groupes ; sont déterminées d'après les prévisions géologiques;

Cette classification de réserves, permet de délimiter les prospections préalables et détaillées, qui, pendant la réalisation des travaux de prospection, sont très difficiles à délimiter du fait que les différents stades de prospection s'interpénètrent. La prospection préalable doit mettre en évidence les réserves de la catégorie C et, en partie, de la catégorie B. La prospection détaillée doit arriver à évaluer les réserves des catégories A et B.

En plus de l'établissement des réserves de la catégorie A, la prospection détaillée doit se prononcer sur l'usage industriel du minéral prospecté.

C'est pourquoi dans cette étape il est nécessaire de réaliser un essai d'exploitation du gisement étudié afin d'obtenir le minerai en qualité suffisante pour un essai technique à l'échelle semi-industrielle.

I.3) Méthodes conventionnelles de calcul des réserves minérales : [Chabou S. 2008]

On entend par méthodes conventionnelles, toutes les méthodes autres que la géostatistique.

L'objectif est de fournir une estimation de la teneur pour tout élément de volume ou de surface à partir d'un échantillonnage limité. On applique ensuite les teneurs de coupure désirées à ces estimations. Les méthodes conventionnelles sont basées sur un calcul de moyenne pondérée qui attribue des poids aux observations en fonction de la position spatiale des observations par rapport à l'élément de volume ou de surface que l'on veut estimer.

Dans les méthodes géostatistiques et pour la méthode d'inverse de la distance, l'élément de volume (ou de surface) est défini a priori et est habituellement relié à la méthode d'exploitation minière. Pour les autres méthodes, l'élément de volume est habituellement défini en fonction de la position spatiale des observations et la taille et la forme de celui-ci peuvent varier d'un endroit à l'autre. Bref, ces méthodes assignent une « zone d'influence » à chaque observation. La façon dont ces zones d'influence sont construites définit le volume (ou la surface) estimée.

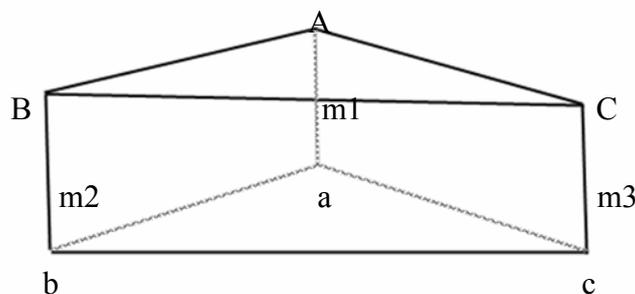
I.3.1) Méthode des triangles :

- Façons de tracer les triangles

Il existe plusieurs façons de construire les triangles. En général, il est préférable de tracer des triangles équilatéraux. Dans certains cas, on peut tracer les triangles parallèlement à la continuité de la minéralisation. La triangulation de Delaunay est unique et fournit les triangles les plus équilatéraux possibles. Une triangulation de Delaunay est obtenue lorsque le cercle passant par les sommets d'un triangle n'inclut aucun point échantillon à l'intérieur, et ce, pour chaque triangle. [Chabou C.M. 1996]

La méthode des triangles consiste à diviser la surface en triangles dont les sommets sont les sondages. Toute la surface sera divisée en prismes triangulaires dont les bases supérieures et inférieures sont les triangles et les sommets les points d'entrée et de sortie des sondages.

Les arêtes latérales de ces prismes correspondent aux puissances du gîte au niveau de chaque sondage.



Prisme trièdre obtenu avec trois sondages

On calcule les réserves pour chaque prisme séparément. Les étapes pour le calcul des réserves de chaque prisme par cette méthode sont :

- Calcul de la surface du triangle (base supérieure du prisme)
- Calcul de la puissance moyenne de chaque prisme. Cette dernière est déterminée d'après la moyenne arithmétique des puissances de chaque sondage.
- Le volume du prisme est alors calculé d'après la formule (I.1)

La teneur moyenne de chaque prisme est déterminée par deux méthodes.

a) Première méthode : la moyenne pondérée

Où on a

$$\text{Teneur moyenne} = \frac{\sum (\text{puissance} \times \text{teneurs})}{\sum (\text{puissance})}$$

$$\text{Soit : } t_m = \frac{(m_1 t_1 + m_2 t_2 + m_3 t_3)}{(m_1 + m_2 + m_3)}$$

Ou

t_m : teneur moyenne du prisme.

(t_1, t_2, t_3) teneur de chaque sondage.

Dans cette méthode, on suppose que les produits $t \times m$ et m varient tous deux linéairement entre chaque sommet des triangles.

m_i (épaisseur) varie linéairement, alors le volume associé au triangle est l'intégrale de l'épaisseur sur le triangle lequel est aussi égal à l'aire du triangle multiplié par l'épaisseur moyenne soit $(\sum m_i / 3) \times S$

De même, si $t \times S$ varient linéairement, le total sur le triangle sera

$$(\sum t_i \times m_i / 3) \times S.$$

La teneur moyenne est donc bien

$$(\sum t_i \times m_i / 3) \times S / (\sum m_i / 3) \times S = \sum t_i \times m_i / \sum m_i$$

b) Deuxième méthode (méthode des %) :

La teneur moyenne est

$$t = \frac{(\sum t_i + \sum t_i \times m_i / \sum m_i)}{4}$$

Dans cette méthode, on suppose que t et S varient tous deux linéairement entre chaque sommet des triangles. Comme précédemment, le volume vaut $\sum S_i / 3 \times A$. L'intégrale sur le triangle du produit $t \times S$ est :

$$[(\sum t_i) \times (\sum m_i) + (\sum t_i m_i)] / 12 \times S.$$

La teneur moyenne est donc :

$$\{[(\sum t_i) \times (\sum m_i) + (\sum t_i m_i)]/12\} \times A / \{\sum m_i/3 \times A\} = (\sum t_i + \sum t_i m_i / \sum m_i) / 4$$

t x S : ce produit ne varie pas linéairement à l'intérieur du triangle

Le tonnage et alors calculé par la formule (I. 3)

En additionnant les réserves des prismes isolés, on trouve les réserves totales.

Outre méthode de calcul de teneur moyenne :

c) Méthode de l'inverse de la distance :

$$t = \{(\sum_{i=1}^n t_i / d_i^b) / (\sum_{i=1}^n 1/d_i^b)\}$$

- Choix d'une distance maximale: puisque l'influence de certains points est négligeable à une certaine distance, on peut les exclure du calcul.
- Inclusion d'anisotropie géométrique, on calcule la distance par la formule:

$$d = (x^2 + ay^2)^{1/2}$$

Où a est un facteur d'anisotropie.

Les coordonnées x et y ne sont pas nécessairement les coordonnées originales, on peut, au préalable, effectuer une rotation du système de coordonnées de façon à rendre le nouveau système parallèle à des directions préférentielles de la minéralisation.

I.3.2) Méthode des coupes géologiques verticales parallèles :

Cette méthode est utilisée dans le cas d'un gisement à relief accident. [CETIM]

Ainsi la réserve Q

$$Q = V \times d \text{ (en tonnes)}$$

Ou :

V : volume (m3)

d : masse volumétrique

Le volume V est calculé comme suit :

- a- Quand les profils ou coupes sont parallèles et la différence entre les deux aires de section de coupe ($S1 - S2$) est inférieure ou égale à 40% de $S1$ ($S1 - S2 \leq 4.0 * S1$). $S1$ est la plus grande section ; on à donc :

$$V = \frac{S1+S2}{2} \times L$$

L : la distance entre les deux aires de section de coupe (en m)

- b- Quand les profils ou coupes sont parallèles et la différence entre les deux aire de section de coupe ($S1 - S2$) est supérieure à 40% de $S1$ ($S1 - S2 > 4.0 \times S1$). $S1$ est la plus grande section ; on a donc :

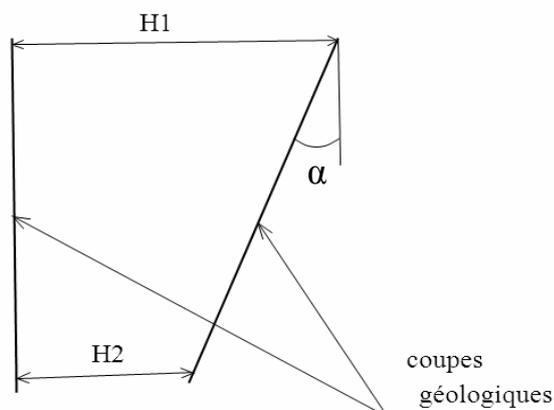
$$V = \frac{S1+S2+\sqrt{S1 \times S2}}{3} \times L$$

- c- Si le bloc repose sur une seule section le volume est donc :

$$V = \frac{1}{3} \times S \times L$$

- d- Quand les profils ne sont pas parallèles et avec un angle α de non parallélisme inférieur ou égal à 10° , avec $S1 - S2 \leq 40\%$ de $S1$ ($S1$ la plus grande section), on à donc :

$$V = \frac{H1+H2}{2} \times \frac{S1+S2}{2}$$



($H1 H2$) : les distances (max, min) entre les deux aires de section de coupe (en m)

e- Quand les profils ne sont pas parallèles et avec un angle de non parallélisme inférieur ou égal à 10° , avec $S1 - S2 > 40\%$ de $S1$ ($S1$ la plus grande section), on a donc :

$$V = \frac{H1+H2}{2} \times \frac{S1+S2+\sqrt{S1 \cdot S2}}{3}$$

f- Quand les profils ne sont pas parallèles et avec un angle de non parallélisme α est supérieur à 10° ($\alpha > 10^\circ$) ; la différence $S1 - S2 \leq 40\%$ de $S1$ ($S1$ la plus grande section), on a donc :

$$V = \frac{\alpha}{\sin \alpha} \times \frac{H1+H2}{2} \times \frac{S1+S2}{2}$$

α : en rd

g- Quand les profils ne sont pas parallèles et avec un angle de non parallélisme α est supérieur à 10° ($\alpha > 10^\circ$) ; la différence $S1 - S2 > 40\%$ de $S1$ ($S1$ la plus grande section), on a donc :

$$V = \frac{\alpha}{\sin \alpha} \times \frac{H1+H2}{2} \times \frac{S1+S2+\sqrt{S1 \cdot S2}}{3}$$

I.3.3) Méthode des blocs géologiques :

Elle est utilisée dans le cas d'un terrain plat et d'une puissance régulière.

La méthode des blocs géologique consiste à diviser la surface du gisement en blocs en se basant sur certains critères (géologique, composition des minerais, densité du réseau de prospection...). [Chabou M. 1996]

Pour chaque bloc, on procède au calcul de ses réserves. Les réserves totales du gisement sont alors égales à la somme des réserves de chaque bloc.

Dans l'application de cette méthode, on divise la surface en blocs. Le calcul des paramètres de chaque bloc se fait de la manière suivante :

- La surface de chaque bloc.
- La puissance moyenne est une simple moyenne arithmétique entre les puissances des échantillons situés à l'intérieur de chaque bloc.
- Ceci fait, nous avons multiplié la puissance moyenne par la surface du bloc, et de cette façon nous avons déterminé le volume des réserves dans un bloc.

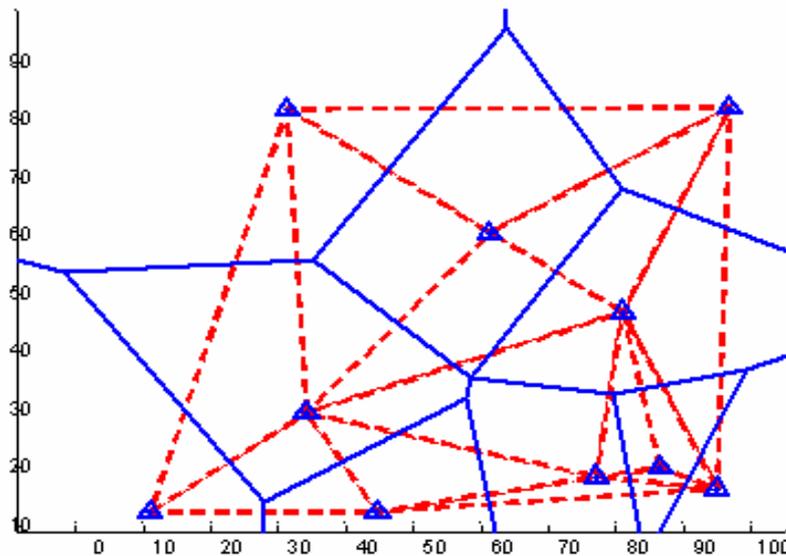
- La teneur moyenne de chaque bloc est la moyenne pondérée (par la puissance) des échantillons situés à l'intérieur.

Le tonnage est alors calculé par la formule (I. 3)

En additionnant les réserves des blocs isolés, on trouve les réserves totales.

I.3.4) Méthode des polygones (plus proche voisin) :

Dans un plan, on trace autour de chaque point représentant l'échantillon prélevé un polygone renfermant tous les points du plan pour lesquels l'échantillon considéré est l'échantillon le plus près. La méthode la plus utilisée consiste à tracer des triangles les plus équilatéraux possibles (triangulation de Delaunay). Une fois les triangles tracés, on abaisse des perpendiculaires aux points milieux des segments des triangles. Les intersections entre trois perpendiculaires définissent un sommet du polygone. [CHABOU S. 2008]



Exemple de polygones d'influence

Le volume associé à un polygone est égal au produit la Surface du polygone par l'épaisseur du gite mesurée au point échantillon situé dans chaque polygone.

Le tonnage est alors calculé par la formule (I. 3) soit $P = Q * t / 1000$

En additionnant les réserves des prismes isolés, on trouve la réserve totale.

I.3.5) Méthode des sections :

La méthode des sections consiste à tracer une suite de sections à travers un gisement, à déterminer les zones de minerais dans chaque section et à compiler le volume total en utilisant les distances entre chaque section. Cette méthode est particulièrement indiquée dans le cas de gisements en forme de veines ou de lentilles. Elle demande que les forages soient positionnés selon des sections parallèles, lesquelles sont habituellement orthogonales au corps minéralisé.

I.4) Conclusion :

Les méthodes conventionnelles de calcul des réserves demandent une bonne connaissance de la distribution spatiale du paramètre étudié (teneur, etc.).

En réalité les connaissances que nous avons sont limitées à un certain nombre d'observations (échantillons) qui ne prennent pas en compte la variabilité spatiale (isotropie, anisotropie) du paramètre étudié, l'effet de support (taille de l'échantillon) et la mesure de l'erreur d'estimation.

La géostatistique qui étudie les lois de distribution spatiale des paramètres géologiques (teneur) dans leur champ naturel, répond à ces considérations. C'est ce que nous allons présenter dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II

Etudes géostatistique

II.1) Introduction :

Auparavant nombre d'articles qui présentaient une méthode d'estimation ou de simulation fondée sur la théorie des fonctions aléatoires se contentaient, au moment de l'appliquer, de faire l'hypothèse que la covariance était exponentielle, ou gaussienne, sans se préoccuper le moins du monde de savoir s'il en était bien ainsi. Or une méthode qui se présente comme optimale ne peut l'être que si on apporte tout son soin à chaque phase de son application, et tout particulièrement à la détermination de la fonction de covariance. L'originalité principale de la démarche géostatistique est qu'elle part des données réelles. [Kante N. 1998]

II.2) Variable aléatoire (V. A) :

On appelle variable aléatoire (V. A) une variable $Z(x)$ dont les valeurs ont été générées par un processus aléatoire donné. [Benamghar A. 2006]

Nous considérons que chacune des observations de $Z(x)$ est une réalisation de la V. A. $Z(x)$ au point échantillonné x

Observation $Z(x)$ = réalisation de la V. A à $Z(x)$

L'ensemble des observations $Z(x)$ avec les probabilités est appelé loi de probabilité ou distribution de probabilité de V. A

Toute V. A. $Z(x)$ est caractérisée par sa fonction de densité $f(x, z)$ et sa fonction de répartition ou fonction de distribution cumulée

La fonction qui décrit ces probabilités est la fonction de densité (pour les V. A. continues; pour les V. A. discrètes, c'est la fonction de masse).

Avec pour propriétés : $f_X(x) > 0$, toute probabilité est positive

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) dx = 1, \text{ l'intégrale de la fonction de densité donne 1}$$

$\int_a^b f_X(x) dx = p$ ($a \leq x \leq b$), probabilité que x prenne une valeur comprise entre $[a$ et $b]$

La distribution complète de la V.A ne peut être, en général, obtenue à partir de quelques paramètres seulement

A partir d'un nombre limité d'observations, tout ce qu'il est possible de faire est le calcul de paramètre statistique basé sur cet ensemble d'échantillons. Mais en pratique, on assume que plus le nombre d'échantillons est élevé plus les paramètres statistiques correspondants tendent à être identiques à ceux du modèle (V A).

Les paramètres des modèles (V A) les plus utilisés dans les méthodes probabilistes sont les deux premiers moments de la V A ; la moyenne et la variance (écart type). Dans les autres cas, ces deux paramètres procurent souvent des informations intéressantes sur les caractéristiques de la VA

Les V A $Z(x)$ sont régionalisées, elles dépendent de leur localisation dans le gisement.

Exemple :

Z : teneur d'un minéral mesurée au point x ou dans un volume centré en x .

II.2.1) La moyenne ou l'espérance de la V A :

L'espérance d'une V A est la valeur pondérée de n réalisations possibles. Chaque réalisation étant pondérée par sa probabilité d'apparence :

$$E(Z) = m = \sum p_i Z(i)$$

L'espérance de la somme de deux V A est égale à la somme des espérances :

$$E(Z+T) = E(Z) + E(T)$$

II.2.2) La variance de la variable aléatoire :

La variance d'une variable aléatoire est l'espérance du carré de la différence entre la V A et sa moyenne :

$$\text{Var}(Z) = E \{ [Z - E(Z)]^2 \}$$

On simplifie par :

$$\begin{aligned}
 \text{Var}(Z) &= E\{[Z - E(Z)]^2\} \\
 &= E\{Z^2 - 2Z E(Z) + E(Z)^2\} \\
 &= E(Z^2) - E[2Z E(Z)] + E[E(Z)^2] \\
 &= E(Z^2) - 2E(Z)E(Z) + E(Z)^2
 \end{aligned}$$

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

Selon ce résultat, si la loi de probabilité était connue, alors la variance de la V A s'écrirait :

$$\text{Var}(Z) = \sum_{i=1}^n p_i * z^2(i) - (\sum_{i=1}^n p_i * z(i))^2$$

II.3) L'interprétation propre à la géostatistique :

II.3.1) Différentes visions du même gisement (G) :

- Collection infinie de valeurs ponctuelles

$$Z_G = \frac{1}{G} \int_G Z(x) dx$$

Z_G est la teneur moyenne du gisement obtenue en faisant la moyenne de toutes les valeurs ponctuelles.

- Collection finie de N petits blocs

$$Z_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_v(x)$$

- Collection finie de M gros blocs

$$Z_G = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Z_v(x)$$

Et ainsi de suite...

Le gisement est donc assimilé à un ensemble fini ou infini (cas ponctuel) de variables aléatoires.

Si on connaît le comportement de la variable aléatoire au niveau ponctuel (ou quasi-ponctuel) alors on peut aussi décrire le comportement de Z_v , Z_V et Z_G .

Cette collection de variables aléatoires s'appelle fonction aléatoire. Le gisement en est une réalisation limitée dans le temps et dans l'espace. On cherchera à caractériser $Z(x)$ pour pouvoir dire quelque chose sur Z_v , Z_V et Z_G .

II.3.2) Support des observations :

Dans la pratique, $Z(x)$ ne sera jamais mesuré sur un support ponctuel mais sur un support physique relativement très petit (carotte, wagon, ...) par rapport à la taille du gisement (disons v avec $v \ll G$). Il est de toute première importance de s'assurer que toutes les observations proviennent de supports identiques.

En effet, les statistiques habituelles calculées sur des supports différents n'ont aucun sens physique précis.

II.3.3) L'effet de support et de l'information sur les calculs des réserves géologiques :

Ces deux problèmes sont fondamentaux en géostatistique. [Koneshloo M. 2007]

L'effet support :

L'effet support indique que la distribution des teneurs dépend de la taille des blocs que l'on considère. Ainsi pour un même tonnage extrait et supposant que l'on connaisse les vraies valeurs des blocs, on retire toujours plus de métal si la sélection s'effectue sur de petits blocs plutôt que sur des gros blocs (L'opération sur de petits blocs est plus sélective).

a- L'effet information :

L'effet information indique que l'on ne dispose pas des vraies teneurs des blocs qui nous intéressent mais seulement d'une estimation de celles-ci. Pour un même tonnage extrait, la sélection s'effectuant sur des blocs d'une taille donnée, on récupérera toujours moins de métal avec un estimateur qu'avec les vraies valeurs. Normalement plus on améliore l'estimateur, soit en recourant à de meilleures méthodes d'estimation, soit en augmentant le nombre de données, plus on retire de métal pour un même tonnage.

Un problème très important relié à l'effet information et à l'effet support est le problème de biais conditionnel. Très souvent, pour un tonnage extrait donné, on aura retiré beaucoup moins de métal que ne le prévoyait l'estimation, ce qui risque d'être ruineux pour la compagnie minière. Pour minimiser ce biais conditionnel, il faut utiliser des estimateurs qui tiennent compte à la fois de l'effet support et de l'effet information. C'est ce que fait le krigeage qui sera développé plus tard

II.4) Semi-variogramme:

La répartition spatiale des paramètres géologiques (teneur, profondeur, puissance, ...) dans un gisement se présente sous un aspect partialement aléatoire et partialement structuré. [Chabou C.M. 1996]

On ne peut nullement assimiler ces paramètres à des variables aléatoires indépendantes. Les paramètres géologique étudiés ont plus ou moins grand continuité dans l'espace ; les valeurs numériques peuvent certes, varier considérablement et d'une manière aléatoire d'un point à un l'autre dans l'espace mais ne sont pas entièrement indépendantes de leur localisation ; au voisinage d'un sondage riche, on trouvera en général du minerai riche. On dit que ces paramètres sont assimilés des variables plus ou moins fortement corrélées.

Ils sont nommés : variables régionalisées

L'aspect aléatoire des paramètres nous permet de traiter ces populations par des méthodes statistiques. L'aspect structuré va nous permettre d'introduire la notion de zone d'influence d'un sondage ou d'un échantillon. Par définition, elle représente la distance à partir de laquelle les corrélations spatiales entre un paramètre géologique deviennent négligeables, et permettra de délimiter le gisement en bloc.

C'est donc par l'étude des corrélations spatiales que sera déterminée la zone d'influence d'un sondage ou d'un échantillon.

Pour exprimer ces corrélations, on utilise une fonction $\gamma(h)$ appelée semi-variogramme qui représente, en fonction de vecteur h , la moitié de la valeur moyenne du carré de la différences des teneuses ou de tout autre paramètre géologique.

Si $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont les valeurs de la V A en les points x $x+h$, l'expression du

variogramme γ pour la distance h est :

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

La variogramme exprime le demi- accroissement quadratique moyenne entre deux point distants de h . le variogramme permet d'évaluer et de discuter la corrélation entre les éléments voisins, et d'interpréter l'évaluation de cette corrélation lorsque la distance entre élément croit progressivement. La construction du variogramme expérimental est sont interprétation constituent la première étape incontournable à toute évaluation géostatistique.

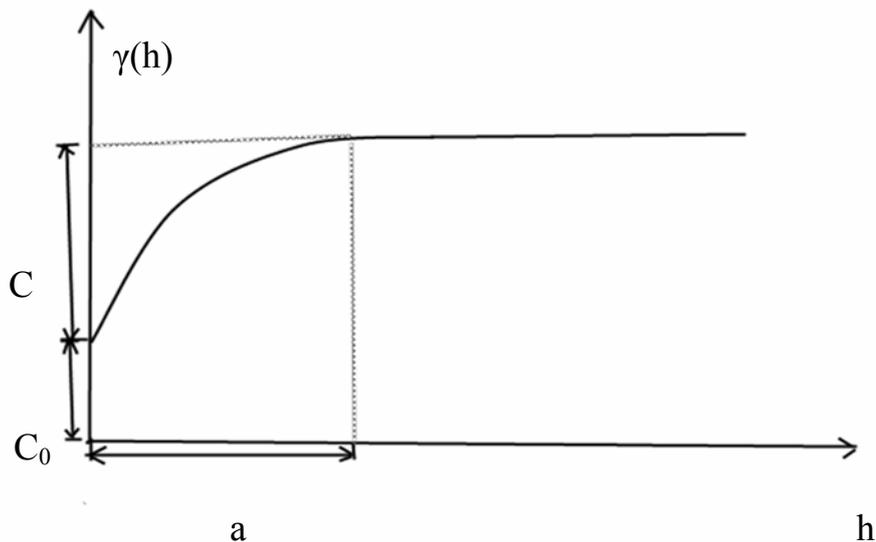


Figure 1 : variogramme à palier et effet pépite

C_0 : effet pépite.

C : palier.

$C_0 + C$: variance d'un V.A

a : portée

II.4.1) Construction du variogramme expérimental omnidirectionnel :

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

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

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

- La distance moyenne h.
- Le variogramme $\gamma(h)$.
- Le nombre des couples (N) présents dans la classe (qui doit être le plus élevé possible pour que les moyennes estimées aient une précision suffisent).

En générale il y a plus de couples aux petites distance qu'aux grandes et le variogramme devient plus incertain an fur et à mesure que la distance s'accroit. La représentation graphique d'un variogramme expérimentale indique jusqu'à quelle distance un point expérimental peut influencer sur l'ensemble des autres informations.

II.4.2) 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.

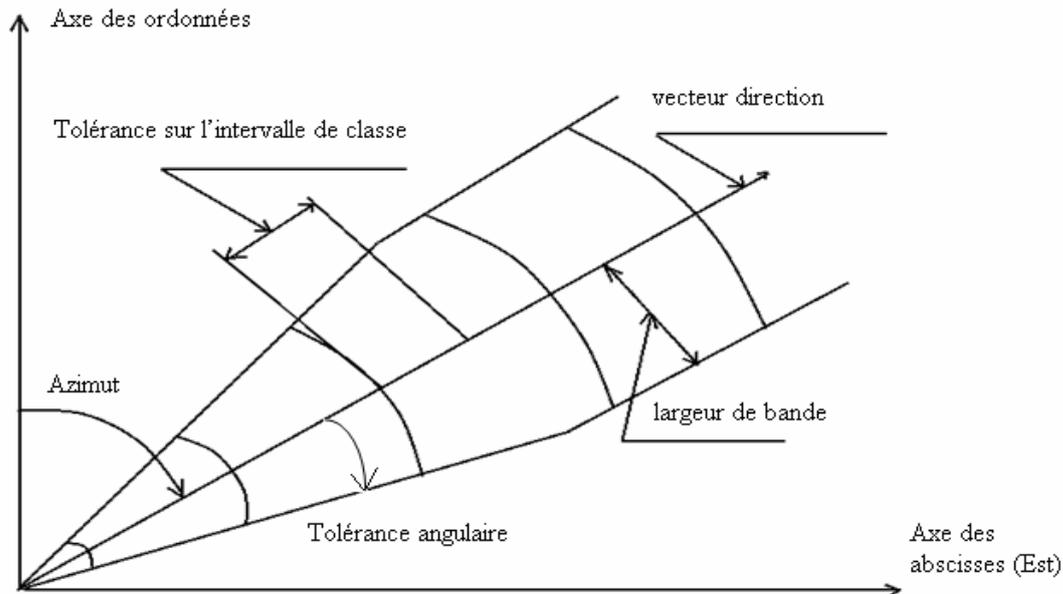


Figure 2 : Paramètres pour les calculs du variogramme expérimental directionnel

La construction des variogramme expérimental directionnels se fait dans diverses direction de l'espace pour déceler d'éventuelles différences de variabilité suivent ces direction ; ce sont les anisotropies de structure.

II.4.3) Propriétés du variogramme :

II.4.3.1) Comportement à l'origine :

Le comportement du variogramme à l'origine rend compte de la continuité et de la régularité de la fonction aléatoire qui décrit la variabilité de la variable régionalisée. 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 $h \rightarrow 0$ $\gamma(h) \rightarrow \alpha |h|^1$. Dans ce cas la variable est moins régulière que dans le cas précédent.

c) Discontinuité à l'origine :

$\gamma(h)$ ne tend pas vers zéro 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 micro-variabilité du phénomène étudié. Il y a ce qu'on appelle effet de pépite pur. Il correspond au cas où il n'y a aucune corrélation entre deux points expérimentaux quelle que soit la distance.

II.4.3.2) Comportement du variogramme à l'infini :

Aux grandes distances le variogramme présente deux aspects :

- Le variogramme peut continuer à croître indéfiniment, la variance devient infinie la covariance n'existe plus. On dit que le variogramme est non borné.
- Dans un nombre de cas le variogramme au-delà d'une certaine limite « a » se stabilise autour d'une valeur limite $\gamma(\infty)$ appelée 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 où il n'y a pas de corrélation.

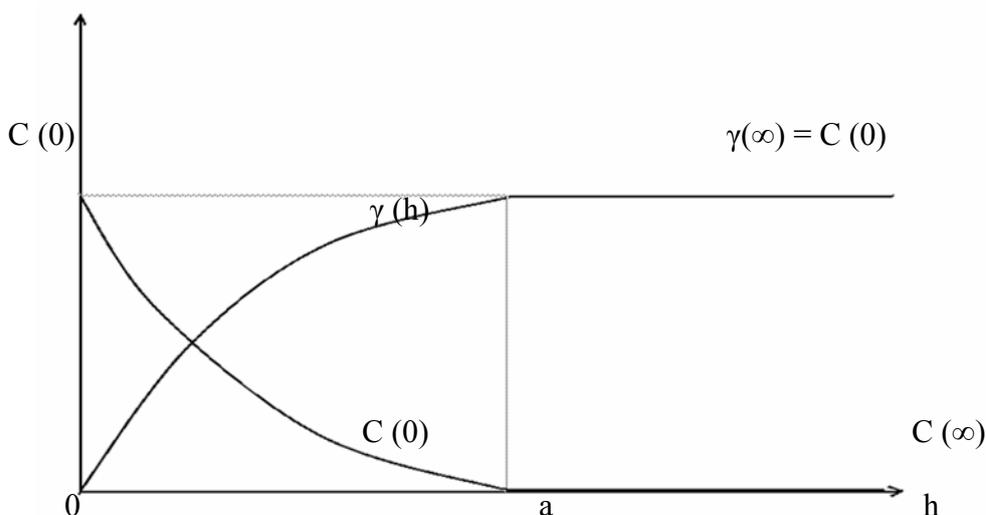


Figure 3 : Comportement du variogramme à l'infini

II.5) Le krigeage : [BENAMGHAR A. 2006]

Une fois le variogramme connu, il est possible de calculer la variance d'estimation associée à tout estimateur linéaire, et en plus de déterminer les pondérateurs qui conduisent à la variance d'estimation minimale tout en assurant une absence de biais ; c'est le krigeage. Les principes en sont bien connus. La théorie se développe d'abord dans un monde idéal où moyenne et covariance sont connues ; dans le cas stationnaire, on reconnaît deux types principaux, selon que la moyenne du processus est connue ou non, soit le krigeage simple et le krigeage ordinaire. Ce dernier est, de loin, le plus fréquemment utilisé. [Gilles G.2004]

II.5.1) Krigeage ordinaire :

Supposons que l'on veuille estimer un bloc v centré au point x . Notons Z_v la vraie valeur (inconnue) de ce bloc et Z_v^* l'estimateur que l'on obtient.

L'estimateur est linéaire :

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z_i$$

Où les Z_i désignent les V.A correspondant aux points échantillons.

On veut minimiser:

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

substituant l'expression de l'estimateur dans cette équation, on obtient:

$$\sigma_e^2 = \text{Var} [Z_v] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{Cov} [Z_i ; Z_j] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov} [Z_v ; Z_i]$$

pour que l'estimateur soit sans biais, il faut que:

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

En effet, dans ce cas, $E [Z_v^*] = \sum_{i=1}^n \lambda_i E [Z_i] = \sum_{i=1}^n \lambda_i * m = m$

On a un problème de minimisation d'une fonction quadratique (donc convexe) sous contrainte d'égalité que l'on solutionne par la méthode de Lagrange. On forme le lagrangien:

$$L(\lambda) = \sigma_z^2 + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right)$$

$$= \text{Var}[Z_v] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{Cov}[Z_i; Z_j] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov}[Z_v; Z_i] + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right)$$

Où est le multiplicateur de Lagrange. Le minimum est atteint lorsque toutes les dérivées partielles par rapport à chacun des λ_i et par rapport à μ s'annulent. Ceci conduit au système de krigeage ordinaire:

a- Système de krigeage ordinaire :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \text{Cov}[Z_i; Z_j] + \mu = \text{Cov}[Z_v; Z_i]; \forall i = 1 \dots n$$

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

La variance d'estimation minimale, appelée variance de krigeage, est obtenue en substituant les équations de krigeage dans l'expression générale pour la variance d'estimation:

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

Note: Cette variance de krigeage ne dépend pas des valeurs observées, elle ne dépend que du variogramme et de la configuration des points servant à l'estimation par rapport au point (ou bloc) à estimer.

b- Système de krigeage écrit en termes de variogramme:

Comme la variance d'estimation s'écrit aussi directement en termes de variogramme, on peut aussi écrire le système de krigeage en fonction du variogramme.

Ceci tient au fait que $C(h) = \sigma^2 - \gamma(h)$ et que $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i; x_j) - \mu = \bar{\gamma}(v; x_i)$$

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

et alors :

$$\sigma_k^2 = \sum_{j=1}^n \lambda_j * \bar{\gamma}(v; x_i) - \bar{\gamma}(v; v) - \mu$$

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

$$K_0 * \lambda_0 = k_0$$

$$\sigma_{K_0}^2 = \sigma_v^2 - K_0 * \lambda_0$$

Où

$$K_0 = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \text{Cov}(Z_1; Z_2) \dots & \text{Cov}(Z_1; Z_n) & 1 \\ \text{Cov}(Z_2; Z_1) & \sigma^2 & \dots & \text{Cov}(Z_2; Z_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \text{Cov}(Z_n; Z_1) & \text{Cov}(Z_n; Z_2) \dots & \sigma^2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

et

$$k_0 = \begin{bmatrix} \text{Cov}(Z_1; Z_v) \\ \text{Cov}(Z_2; Z_v) \\ \vdots \\ \text{Cov}(Z_n; Z_v) \\ 1 \end{bmatrix} \quad \lambda_0 = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix}$$

II.5.2) Krigeage simple :

Parfois on connaît la moyenne "m" du champ à estimer ou du moins on en possède un estimé fiable. On peut alors former un estimateur sans biais sans imposer la contrainte que la somme des poids soit égale à 1.

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z_i + (1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i) m$$

Tout comme pour le krigeage ordinaire, on écrit la variance d'estimation et on substitue l'expression précédente pour l'estimateur Z_v^* .

On trouve

$$\sigma_e^2 = \text{Var} [Z_v] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{Cov} [Z_i; Z_j] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov} [Z_v; Z_i]$$

On dérive cette expression par rapport à chacun des λ_i On trouve alors le système de

krigeage simple.

a- Système de krigage simple :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \text{Cov} [Z_i ; Z_j] = \text{Cov} [Z_v ; Z_i] ; \forall i = 1 \dots n$$

Et la variance d'estimation, appelée variance de krigage simple s'écrit

$$\sigma_{KS}^2 = \text{Var} [Z_v] - \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov} [Z_v ; Z_i] ; \forall i = 1 \dots n$$

Note :

- La variance de krigage simple est toujours inférieure à la variance de krigage ordinaire car on n'a pas besoin d'imposer de contrainte sur les poids λ_i . Toutefois, elle requiert la connaissance de la moyenne "m". De plus, l'hypothèse de stationnarité requise est plus forte que dans le cas du krigage ordinaire. Dans le cas du krigage ordinaire, seule l'hypothèse intrinsèque est requise. Dans le cas du krigage simple, la stationnarité est nécessaire. Ainsi, il n'est pas possible d'effectuer un krigage simple si le variogramme ne présente pas de palier.

- Le système de krigage simple (KS) ne peut s'écrire directement en termes de variogramme puisqu'on n'a pas $\sum \lambda_i = 1$.

- En termes pratiques, les estimés obtenus par krigage ordinaire (KO) et simple (KS) sont très similaires lorsqu'on effectue le krigage à courte distance par rapport aux points connus et par rapport à la portée du variogramme et que le variogramme montre une structure importante.

Lorsqu'on effectue l'estimation à grande distance ou si le variogramme montre un effet de pépite plus important, alors l'estimation KO consistera essentiellement en une moyenne des points du voisinage et l'estime KS sera simplement la moyenne supposée connue "m".

- Règle générale, le KO est préférable au KS. Dans certaines applications telles le krigage d'indicatrices et les simulations il est préférable de recourir au KS.

II.5.3) Propriétés du krigeage

II.5.3.1) Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont:

- Linéaire, sans biais, à variance minimale, par construction.
- Interpolateur exact. : si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue.
- Présente un effet d'écran: les points les plus près reçoivent les poids les plus importants. Cet effet d'écran varie selon la configuration et selon le modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus l'effet de pépité est important, moins il y a d'effet d'écran.
- Tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux.
- Par l'utilisation du variogramme, tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépité, anisotropie, etc.).
- Effectue généralement un lissage, i.e. les estimations sont moins variables que les teneurs réelles (point ou bloc) que l'on cherche à estimer.
- Presque sans biais conditionnel. Ceci signifie que lorsqu'on applique une teneur de coupure à des valeurs estimées, on récupérera approximativement la teneur prévue. C'est une propriété très importante pour les mines. Cette propriété implique que l'estimateur utilisé soit plus lisse que la valeur qu'il cherche à estimer, ce qui est le cas pour le krigeage.
- Transitif. Si l'on observe en un point une valeur coïncidant avec la valeur krigeage pour ce point, alors les valeurs krigeage en d'autres points ne sont pas modifiées par l'inclusion de ce nouveau point dans le krigeage. Par contre les variances de krigeage, elles, sont diminuées. De même, si l'on krigeage un certain nombre de points et que l'on utilise les valeurs krigées comme si c'étaient de nouvelles données, alors les krigeage subséquents ne s'en trouvent pas modifiés (sauf pour la variance de krigeage).

II.5.3.2) Pratique du krigeage

a- Grille de krigeage:

Souvent, le krigeage est réalisé sur une grille régulière de points ou de blocs.

Dans le cas de points, L'objectif est habituellement de fournir une carte de la variable étudiée. La grille de krigeage doit être alors assez dense pour que la carte corresponde effectivement au krigeage et non à la méthode particulière (souvent inconnue) utilisée pour tracer les iso contours.

Lorsque des blocs sont estimés, ceux-ci correspondent en général à des unités de sélection (SMU: small mining units) de la mine et leur taille est donc dictée par l'opération. L'objectif peut être d'appliquer une teneur de coupure à ces blocs pour prévoir les ressources du gisement. Toutefois, le nombre de blocs de la grille ne devrait généralement pas dépasser d'un facteur 10 le nombre d'observations dans la zone d'intérêt. En effet, les ressources estimées varient très peu au-delà d'un certain niveau de discrétisation. Passé ce seuil, on augmente considérablement le temps de krigeage sans effet réel sur les estimés.

b- Voisinage utilisé pour le krigeage:

- Habituellement en voisinages glissants.
- Nombre de points suffisant (>10; peut atteindre jusqu'à 50-100).
- Zone de recherche des points assez grande pour assurer un minimum de points dans le krigeage.

S'il y a anisotropie, on peut adopter une zone de recherche elliptique parallèle à la direction de meilleure continuité. Toutefois une zone de recherche circulaire peut être suffisante si l'on augmente suffisamment le nombre de points dans le krigeage.

- Recherche par quadrants assure une répartition plus uniforme des points (exiger au moins 2 ou 3 points par quadrant).

II.6) Conclusion :

Ce chapitre donne une présentation générale des différents outils de la géostatistique. Ces outils sont exécutés dans un enchaînement bien déterminé. Cet enchaînement est défini comme suit :

- Choix du maillage du réseau d'échantillonnage du paramètre à étudier.
- Calcul et tracé du variogramme expérimental (vérification de l'isotropie et l'anisotropie dans les différentes directions).
- Estimations par krigeage ou / et simulation.
- Cartographie des valeurs estimées.

CHPITRE III

Les logiciels de géostatistique

III.1) Introduction :

L'introduction des logiciels dans le domaine minier consiste à faciliter le travail d'une part et d'autre part à minimiser les erreurs systématiques. Nous présentons quelques logiciels dans le domaine des géosciences.

III.2) VULCAN:

VULCAN est un logiciel destiné à la gestion des travaux géologiques. Il est utilisé pour la représentation et la modélisation de données [Ouled Berrouigel R. Cherkaoui O. 2002].

Parmi les éléments d'amélioration on note les aspects suivants dans la dernière version de ce programme:

Regroupement de toute l'information dans une base qui permet de faire les filtres des données ;

Minimisation du temps de la recherche de l'information ;

Possession de l'information complète sur les sondages : le nom, les coordonnées, le corps, le type,...etc. ;

Affichage des messages d'erreurs au moment de la saisie au niveau :

- a. Des coordonnées de chaque sondage (Zone d'exploitation, d'exploration, hors zone);
- b. Des dédoublements des données ;
- c. Des chevauchements des passes des analyses ou de la lithologie;

Import automatique de toute l'information inscrite dans le rapport d'analyse

Possibilité d'un suivi régulier de l'état des réserves pour évaluer le mali et le boni

Comparaison des différents paramètres de la production (tonnage extrait géologique, tonnage extrait mine) avec le tonnage tout venant déclaré par l'usine d'une manière journalière en vue d'éviter les fluctuations au niveau de l'usine de traitement.

III.2.1) Résultats graphiques (modélisation du gisement) :

Cette phase consiste en la réalisation de l'objectif principal de cette application : la modélisation géologique et la planification minière.

III.2.1.1) La modélisation géologique :

Dans le logiciel VULCAN 3D , la modélisation consiste à suivre les étapes suivantes :

- a. Affichage des sondages ;
- b. Création de composites : Cette section fournit les informations pour le calcul d'échantillonnages des sondages et des fronts. Ceux ci incluent la création des modèles structurels et analytiques. Les blocs sont calculés par la méthode de l'inverse de distance;
- c. Création du bloc modèle : Le processus de la construction du bloc consiste à créer un nouveau dossier de définition qui comporte :
 - L'origine du bloc et son orientation ;
 - L'extension du modèle, les dimensions du bloc et des sous bloc ;
 - Les noms et les types des variables ;
 - Les conditions de calcul
- d. Estimation de la teneur : L'estimation de la teneur est un processus d'interpolation des valeurs d'une base de données dans les blocs modèles. La technique d'estimation fournit une meilleure solution que la méthode classique de calcul des réserves du minerai. En effet, les méthodes d'estimation expliquent les rapports spatiaux entre les échantillons. Il est aussi possible de visualiser la répartition de l'information suivant une section donnée.
- e. Calcul de réserves : vu la diversification des méthodes de calcul des réserves suivant le degré de précision voulue, plusieurs rapports de calcul qui sont donc à disposition, visent à aider dans l'exploitation les géologues en vue d'exploiter les blocs de façon sélective lors de la planification à court et à moyen terme.

Parmi ces méthodes de calcul on distingue :

- Calcul des réserves par triangulation ;
- Calcul du bloc réserves sans coupure ;
- Calcul du bloc réserves par triangulation avec des teneurs de coupure ;
- Calcul du bloc réserves avec des teneurs de coupure

Cet outil de modélisation et de planification minière propose une option « Batch » pour la superposition des couches.

III.2.1.2) La planification minière :

Dans le cadre de la planification minière, la partie de l'interface développée fait preuve d'une grande importance commençant par un suivi régulier de la production et un suivi de l'extrait géologique mensuel jusqu'à arriver à un suivi des réserves afin d'évaluer le boni de chaque chantier.

Cette interface permet de dégager des synthèses d'évaluation pour une prochaine actualisation

- a. Suivi journalier des chantiers
- b. Synthèse journalière de la production
- c. Synthèse journalière du suivi de la production du service fond avec l'usine de traitement.
- d. Rapport journalier de l'usine
- e. Graphique de synthèse de la production

III.3) GEOS3D : [Bouchin J. 2000]

GEOS3D est un logiciel de modélisation de gisement basé sur les principes de la géostatistique et conçu pour une exploitation par un personnel non spécialisé.

L'environnement logiciel proposé est facile à maîtriser car préfabriqué pour un

gisement et un type d'exploitation donné :

- les fonctions inutiles sont occultées
- l'opérateur n'est confronté qu'aux variables et aux qualités spécifiques à son exploitation.
- les paramètres invariants sont figés au démarrage de chaque application à la suite d'une étude réalisée par un géostatisticien.
- le logiciel peut intégrer des options propres à telle ou telle activité industrielle (développements spécifiques notamment au niveau de l'interface avec les sondages).

En contrepartie, une application ne peut être utilisée sur une exploitation très différente de celle pour laquelle elle a été prévue à l'origine. De plus, tout changement radical dans les conditions d'exploitation ou dans la morphologie du gisement peut requérir l'intervention d'un géostatisticien (ce logiciel n'inclut pas d'outils d'analyse statistique).

GEOS3D permet d'affecter à chaque variable estimée une variable pondérée et se charge de pondérer tous les calculs de manière transparente pour l'opérateur.

L'opérateur n'aura donc à travailler que sur des variables homogènes aux analyses réalisées en laboratoire. Ce système a également l'avantage de maximiser l'utilisation de toutes les mesures en cas de valeurs manquantes.

III.3.1) Hybridation avec des modèles déterministes :

L'estimation minière répond à tout quand la seule information disponible est une information numérique en sondage. Mais souvent la répartition de la minéralisation est fortement conditionnée par des discontinuités géologiques dont la position géométrique est considérée comme déterminée.

Cette information géométrique ne peut être négligée surtout si elle sert de guide à l'exploitation. GEOS3D propose donc des modèles hybrides dans lequel on peut importer des surfaces géologiques considérées comme parfaitement déterminées :

- modèle en couches estimées à 2 dimensions

Ce type de modèle est adapté aux cas où l'exploitation découpe un gisement stratiforme en suivant les limites entre les couches.

- modèle à 3 dimensions avec 1 surface conductrice

Ce type de modèle est bien adapté aux gisements stratiformes ondulés et/ou recoupés par des failles sub-verticales et exploitées par gradins.

- modèle à 3 dimensions avec 2 surfaces conductrices

Ce type de modèle permet de gérer des qualités géologiques au sein d'un caisson minéralisé dont les limites sont bien connues. Ex: un gisement stratiforme à fort pendage recoupé obliquement par les gradins d'exploitation.

Notons que le choix d'un modèle dépend non seulement de la géométrie du gisement mais aussi de celle de l'exploitation. Un même gisement stratiforme sera modélisé selon l'une ou l'autre des 3 méthodes ci-dessus selon le type d'exploitation prévu. Ainsi, une discontinuité géologique mal connue sera considérée comme parfaitement déterminée dans les cas où on envisage une méthode d'exploitation capable de la suivre ; on ne fera pas ce choix dans le cas contraire.

III.3.2) L'utilisation des modèles estimés :

Fonctionnellement, GEOS3D se situe entre un logiciel de gestion de sondages qui l'alimente en données et des systèmes de conduite (planification ; contrôle d'exploitation qui utilisent le modèle de gisement).

III.3.2.1) Planification d'exploitation :

La planification d'exploitation regroupe toutes les opérations garantissant l'accessibilité à la gamme des qualités utilisées par la conduite d'exploitation. Autrement dit, on planifie à l'avance le développement géométrique de l'exploitation de façon à éviter toute rupture dans la disponibilité de telle ou telle qualité géologique requise pour la fabrication d'un produit marchand.

Toutes les techniques utilisées dans ce domaine consistent à simuler des terrassements sur le modèle de gisement. Ces simulations peuvent être automatisées pour des méthodes d'exploitation relativement figées et faire appel à des algorithmes d'aide à la décision (ex: programmation des avances au décapage par analyse convexe).

III.3.2.2) Contrôle des réserves :

Le contrôle des réserves regroupe toutes les opérations permettant de vérifier que les objectifs à long terme de l'exploitation pourront toujours être atteints :

- contrôle de la méthode d'estimation par comparaisons prévu /réalisé.
- contrôle du défrètement par l'exploitation : on détecte toute forme d'écrémage non détectable au stade de la conduite d'exploitation.
- réactualisation systématique du projet d'exploitation sur ce qui reste à exploiter du gisement.

Pour toutes ces opérations l'opérateur utilisera des fonctions de type bureau d'études restreintes au contexte limité d'un gisement et d'une exploitation.

III.4) GEOSTATISTICAL ANALYST : [ESRI. 2002]

GEOSTATISTICAL ANALYST est un outil statistique pour l'analyse exploratoire des données spatiales et leurs modélisations.

GEOSTATISTICAL ANALYST est une extension de la famille de logiciels ArcGIS. ;il offre une gamme d'outils géostatistiques puissants pour l'analyse exploratoire des données spatiales et la création de surfaces interpolées. Geostatistical Analyst permet de créer des modèles continus à partir de données échantillonnées et de prédire ainsi les valeurs sur des régions où le prélèvement n'a pas pu être effectué.

De plus, GEOSTATISTICAL ANALYST offre la possibilité d'analyser les caractéristiques qualitatives et quantitatives des données échantillonnées. En permettant de modéliser les phénomènes sur le terrain grâce à des méthodes géostatistiques et déterministes avancées, de valider et d'optimiser ces estimations, GEOSTATISTICAL ANALYST se présente comme un lien entre la géostatistique et les Systèmes d'Information Géographique (SIG).

III.4.1) GEOSTATISTICAL ANALYST est utilisé dans de nombreux domaines pour résoudre des problématiques de terrain complexes :

Ce logiciel permet de minimiser les coûts des campagnes de sondages : modéliser les phénomènes permet en effet de faire des économies en lançant des campagnes ciblées de recueil de données. De l'identification des variations des phénomènes naturels jusqu'à la modélisation des risques liés à ces changements, il permet à toute personne disposant de données de terrain de comprendre, visualiser, analyser, modéliser et cartographier ces risques.

Il est aujourd'hui utilisé dans de nombreux domaines tels que : l'exploitation des ressources naturelles (minières, pétrolières...), la géologie, l'hydrologie, la météorologie, l'agriculture, l'archéologie, la protection de l'environnement, le domaine foresterie, la santé et les risques naturels et industriels.

Geostatistical Analyst offre plusieurs méthodes d'interpolation permettant de créer des modèles interpolés très précis. (Un assistant aide l'utilisateur tout au long du processus d'analyse.) ; il permet deux types d'interpolation déterministe et géostatistique.

- Les méthodes **déterministes** permettent de réaliser des cartes continues à partir de relevés ponctuels en se basant soit sur la distance entre points (méthode dite Inverse Pondéré de la Distance - IDW) soit en ajustant des fonctions de lissage (Radial Basis Fonctions).

- Les méthodes **géostatistiques** (krigeage) ont une approche probabiliste du phénomène d'étude et sont utilisées pour des estimations plus avancées, comme le calcul des erreurs de prédiction et le calcul de probabilité.

III.4.2) Analyse Exploratoire des Données Spatiales :

GEOSTATISTICAL ANALYST contient un module d'Analyse Exploratoire des Données Spatiales (ESDA en anglais) qui permet de visualiser et d'analyser les données selon des techniques statistiques.

L'outil ESDA offre une large gamme de possibilités permettant la détection de tendances ou de dérives dans les données, l'identification des erreurs de mesure et l'étude des corrélations spatiales de ces mêmes données.

On peut ainsi évaluer la meilleure méthode d'interpolation adaptée aux données à étudier selon les utilisateurs.

III.4.3) Choisir le meilleur modèle :

En plus du calcul d'erreur d'estimation, GEOSTATISTICAL ANALYST offre des outils de contrôles et de validation croisés qui permettent d'évaluer la pertinence des modèles. Les outils quantifient la précision de la modélisation. On peut soit accepter le modèle et ses paramètres, soit les modifier pour créer un meilleur modèle. Une fois les interpolations réalisées, il est également possible de comparer les différents modèles.

III.5) TOPKO (Topographie et Modélisation 3D) :[Ouled Berrouigel R ;Cherkaoui O. 2002]

TOPKO est un logiciel promis à la gestion des travaux topographiques. Il est doté d'outils sophistiqués et intuitifs pour les levés topographiques, cadastraux et les modélisations tridimensionnelles des terrains. Il permet la résolution de calculs topographiques aussi complexes que variés.

Il est possible d'importer des données codées ou pas directement en s'interfaçant avec des stations de travail ou par l'intermédiaire de formats natifs ou des formats d'échanges (DXF, DWG...), et générer des profils en longs, des profils en travers, des courbes de niveaux, et aussi de créer des modèles numériques de terrain, de calculer des cubatures.

Modules additionnels

- GPS :

Importation des fichiers en ASCII Gestion et calcul de données GPS (Latitude - Longitude), des coordonnées géocentriques. Depuis les coordonnées géodésiques, le programme calcule la correspondance des coordonnées planes en utilisant des paramètres établis pour les injecter dans TOPKO.

- **DEM (Modèle digital du Terrain) :** TOPKO DEM offre la solution à toutes les problématiques relatives à la gestion, l'affichage, l'analyse et en général à l'utilisation des DEM. Il est possible d'importer à l'intérieur du projet des différents DEM et les utiliser pour engendrer des cartes, calculer des profils et sections, extraire des modèles

mathématiques, et ce du terrain jusqu'à l'élaboration des plans, en passant par toutes les phases nécessaires à aux études, calculs, plans... (Calculs de Coordonnées, Linéaires, Surfaces, Profils en Long, Profils en travers, Courbes de Niveaux, Calculs de Cubatures...)

- **Acquisition des données:** TOPKO joue le rôle d'interface avec les stations de travail directement, soit en passant par les formats natifs d'importation des carnets électroniques, soit par des formats d'importation de type DXF, DW G...

- **Calculs:** Calcul du levé de terrain (Polygonaion, triangulations...), calcul des moyenne des lectures multiples, gestion des mesures inversées, calcul et compensations empiriques, calcul et compensation des triangulations avec visualisation de l'ellipse d'erreurs.

- **Codage automatique:** Création de dessins à partir de codes saisis sur le terrain ; à travers une utilisation appropriée de codification, il est possible de générer automatiquement du dessin.

- **Modélisation numérique:** la génération du modèle polyédrique du terrain (DTM) se fait de manière automatiquement, semi-automatique ou pas à pas manuellement. Le maillage automatique tient compte des éléments inclus ou pas et des lignes insérées dans le levé.

- **Cubature:** il est possible de calculer des volumes de cubature avec ou sans plan de référence. Calcul des volumes de déblais ou de remblais entre deux DTM (Modèles de terrain)

- **Profils en travers:** TOPKO extrait automatiquement des profils de terrain soit par des points isolés, ou par directrices complexes.

III.6) Conclusion :

Les logiciels cités, basés sur les principes de la géostatistique ont des usages variés chacun de ces logiciels est orienté vers des travaux précis (topographie, estimation des gisements ...).

Le choix d'un logiciel est basé essentiellement sur sa disponibilité, sur le travail à effectuer d'une part et le degré d'erreurs d'estimations engendré par chaque logiciel d'autre part.

Dans le cas de notre travail nous avons utilisé le GDM car il intéresse le secteur minier et surtout car Ferphos nous a permis de comprendre sur fonctionnement en nous facilitant l'accès dans ses locaux à Tébessa.

Nous avons aussi été aidés par les ingénieurs en charge de ce logiciel et avons appris à l'utiliser par le biais de données relatives aux caractéristiques d'un gisement phosphaté du district du Bled El Hadba.

CHAPITRE IV

Présentation du GDM

(Logiciel de calcul)

IV.1) Introduction :

Le logiciel des géologues GDM « Geological Data Managment » est utilisé pour la représentation et la modélisation de données géologiques pourvues de coordonnées X, Y et Z, quel que soit leur type (contours géologiques, failles, forages, échantillons), et quelle que soit leur forme (codes géologiques, textes descriptifs, résultats d'analyses, diagraphies). GDM lit directement des données (Texte, Excel, Access et Oracle), et produit des graphiques; il est appliqué dans l'exploration et l'exploitation des ressources minérales, l'aménagement du territoire, la conception de tunnels, barrages, sites de stockage souterrains, diagnostics de pollution du sous-sol et gestion des ressources en eau.

IV.2) Présentation de GDM :**IV.2.1) Gestion des données :****Caractéristiques générales :**

Nous avons la liste des caractéristiques générales [Bobillier J. 2004].

- Connexion directe aux bases Access, Oracle, SQL-Server (lecture seule),
- Connexion directe aux fichiers Excel, dBase, Texte (lecture seule),
- Nombre illimité d'enregistrements jusqu'à 256 champs,
- Utilisation de coordonnées locales et générales, avec des unités variées,
- Champs textes (jusqu'à 5000 caractères) et champs codes (jusqu'à 20 caractères),
- Distinction entre valeurs nulles et valeurs absentes,
- Calcul automatique et conservation des paramètres statistiques des champs numériques,
- Gestion de sondages verticaux ou déviés,
- Fusion de données de sondages en fonction de la profondeur,
- Détermination de formations et de composites à partir des bases de sondages,

Dans les bases GDM :

- Définition, sauvegarde et réutilisation de modèles de bases de données,
- Suppression, addition, insertion, copie, couper-coller d'enregistrements,
- Recherche, remplacement, saisie répétitive de valeurs,
- Digitalisation à l'écran de points, courbes, polygones 3D sur plans ou sections,
- Mise à jour (par champ clef), et concaténation (enchaînement logique) d'enregistrements,
- Valorisation de champs avec des opérateurs et des fonctions,
- Calcul de surfaces projetées sur un plan.

Interpolation :

- Prise en compte de failles, de limites polygonales, de variable indicatrice,
- Estimation de points, de grilles de points, ou de grilles de blocs 2D,
- Huit méthodes d'interpolation dont le krigeage,
- Calcul de la variance d'estimation,
- Définition de dérive polynomiale et/ou externe,
- Recherche de voisinage global, ou rectangulaire, ou par octants avec prise en compte de groupement des données en profils ou en clusters,
- Contrôle du pré-classement des données et du seuil de fusion,
- Sauvegarde et réutilisation des paramètres d'interpolation,
- Calcul et modélisation de variogramme.

IV.2.2) Graphiques :**Caractéristiques générales :**

- Catalogues de symboles, types de traits et figurés,

- Combinaison de graphiques individuels,
- Un clic sur le plan ou la section affiche le log de sondage, ou pointe sur la donnée dans la base,
- Un clic dans le log de sondage pointe sur la donnée dans la base, ou repère la donnée sur tous les plans ou sections affichés.

Plans et sections :

- Représentation en coordonnées locales ou générales,
- Structure en couches du dessin (jusqu'à 20 couches, 9 types de couches),
- Superposition des données sur une ou plusieurs images en fond de plan,
- Légendes, échelles graphiques, flèche nord,
- Sections rectilignes, ou non rectilignes dépliées (profils en long),
- Échelles horizontale et verticale distinctes sur les sections,
- Représentation des données de sondages,
- Représentation des données de courbes : types de traits et/ou remplissages par figurés déterminés par valeurs de champs,
- Représentation des données interpolées par des courbes iso valeurs avec ou sans remplissage, ou par des blocs colorés,

IV.3) Traitement de données de sondages verticaux : [Bobillier J. 2004]

GDM lit directement des différents types de données (Point, Sondage, Courbe, Grilles, Image, ...etc.).

Pour les sondages, toutes les données seront représentées dans une base de données. (GDM, ACCESS, ORACLE, EXCEL 97, DBIASE IV, TEXT, SQL S server).

Dans le dossier d'installation de GDM, vous trouvez deux sous-dossiers Access et Excel, permettant de faire l'exercice selon votre choix sur des données contenues dans une base Access 97 ou dans un classeur Excel 97.

Chacun des sous-dossiers Access et Excel contient deux sous-dossiers Start et End :

- Start est le dossier dans lequel vous ferez l'exercice : il ne contient que les données nécessaires au démarrage de l'exercice.
- End est le dossier contenant le même exercice dans l'état terminé. Il vous permet de voir les résultats de l'exercice (Logs, cartes, sections) avant de commencer, ou en cours d'exercice et aussi de restaurer en cas de besoin le contenu des sous-dossiers Start et End.

IV.3.1) Caractéristiques GDM des données de sondages :

GDM affiche les données de sondages dans deux tableaux :

a- Le tableau des « **Têtes de sondages** » contenant une ligne (un enregistrement) par sondage. On doit y trouver au minimum le nom du sondage. On peut y ajouter n'importe quelle donnée se rapportant au sondage dans son ensemble, comme la date de réalisation, la longueur totale d'un sondage, le type de sondage,... etc.

GDM retrouvera les sondages par leur nom. On peut choisir un nom court (Indicatif Réduit, de 4 caractères au maximum), ou un nom long (Indicatif Complet, de longueur définie par l'utilisateur dans la limite de 80 caractères), ou les deux noms.

Chaque sondage devra être pourvu de ses trois coordonnées, X, Y et Z, sauf si on compte seulement utiliser GDM pour dessiner des logs de sondages.

b- Le tableau des « **Passes de sondages** » contenant une ligne (un enregistrement) par passe de sondage. On doit y trouver au minimum la « Profondeur fin de passe ». On peut y ajouter n'importe quelle donnée décrivant une passe de sondage (code, texte, mesure, nom d'image, etc.).

GDM repère les passes de sondages par leur profondeur « fin de passe ». Pour chaque sondage, les enregistrements sont rangés par profondeur croissante. Chaque passe est la portion de sondage comprise entre la profondeur fin de la passe précédente (ou la profondeur zéro pour la première passe) et sa propre profondeur fin. Si vos données comportent une profondeur début de passe et une profondeur fin de passe, GDM vérifiera que les passes ne se recouvrent pas, et intercalera des passes vides quand des portions de sondage ne seront pas décrites.

Les observations de mesures ponctuelles et le long d'un sondage sont repérées par une seule profondeur, qui pour GDM est la profondeur « fin de passe ». La distinction entre une observation ponctuelle et une observation comprise entre deux profondeurs n'apparaît pas dans la structure des données GDM. Elle est faite par l'utilisateur au moment du traitement des données.

IV.3.2) Connexion aux données Excel :

a- Forme des données dans Excel :

Le classeur contient toutes les données de sondages, réparties dans des feuilles (ces données pourraient tout aussi bien se trouver dans des classeurs Excel)

- Ces données décrivant les mêmes sondages sont rangées dans des feuilles différentes, puisqu'elles correspondent à différents découpages selon la profondeur.
- Dans chaque feuille on trouve bien les champs indispensables (nom de sondage, coordonnées X, Y et Z, et profondeur fin de passe).
- L'ordre des sondages n'a pas d'importance
- Pour chaque sondage, les passes sont rangées par profondeur croissante, et donc toutes les profondeurs sont définies.

Les étapes d'entrée des données sont :

b- L'établissement des données dans une base GDM :

Les Bases Externes sont connectées à GDM exclusivement par la fonction « Etablir lien avec Base » du menu du Projet « Données du Projet ».

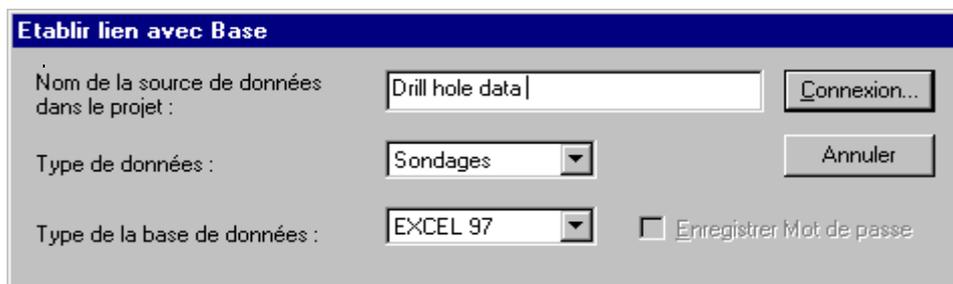


Figure 1 : Etablir lien avec base

Dans la boîte de dialogue, on doit entrer :

- Nom de la source de données : saisissez un nom qui désignera explicitement ces données dans ce Projet. C'est le nom qui sera inscrit dans les Arbres du Projet et du Bureau.
- Type de données (Sondages, Courbes, etc....).
- Type de la base de données : choisir Access / Oracle / SQL-Server / Excel /dBase / Text (CSV).

Cliquer ensuite sur le bouton « Connexion ». La boîte de dialogue Windows d'ouverture d'un fichier permet alors de choisir la Base de données externe à ouvrir (sauf dans le cas d'une base Oracle ou SQL-Server).

L'ouverture du fichier de la Base externe est suivie de l'affichage de la boîte de dialogue « Correspondance Base externe – GDM » :

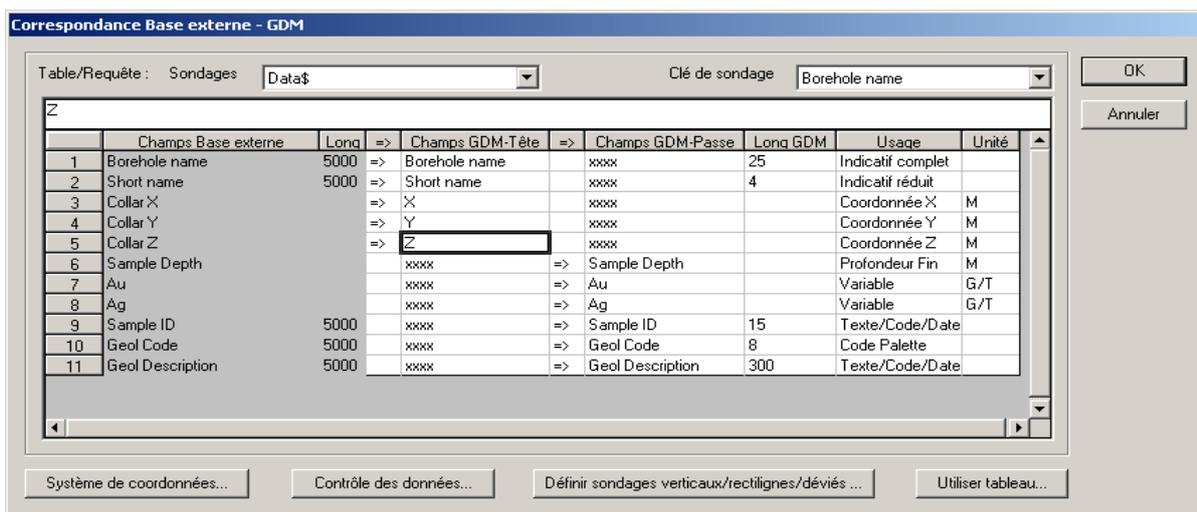


Figure 2 : Correspondance base externe-GDM

Tableau de correspondance entre les champs de la Base externe et ceux qu'on veut voir dans GDM :

- Pour mettre en correspondance : double clic dans la colonne située sous la flèche => Pour les sondages (ou les courbes), choisir la colonne Champs GDM-Tête, ou Champs GDM-Passe éventuellement les deux pour certains champs.
- On doit préciser la longueur des champs texte (colonne Long GDM) qu'on veut considérer dans GDM, sauf si la longueur déclarée dans la base externe (Colonne Long) nous convient.

- On doit définir l'usage GDM de chaque champ (double clic et choix dans la liste).
- Eventuellement corriger ou compléter les unités (double clic et choix dans la liste).
- **Système de coordonnées** : définition du repère de la Base. A utiliser si les coordonnées de la Base sont des coordonnées locales.
- **Contrôle des données** : pour savoir si la définition des usages des champs est compatible avec une structure de Source de données GDM.
- **Définir sondages verticaux/rectilignes/déviés** : par défaut, les sondages seront considérés comme verticaux. Pour qu'ils soient considérés comme rectilignes (inclinés), il faut disposer dans les Champs GDM Tête d'un champ d'usage Azimut et d'un champ d'usage Inclinaison. Pour que l'option « Sondages déviés » soit disponible, il faut qu'une Source de données de mesures de déviation soit déjà présente dans le Bureau.
- **Utiliser tableau** : les paramètres qui ont été choisis dans la boîte de dialogue Correspondance Base externe – GDM sont enregistrés automatiquement dans un « Fichier de Liens », dans le Dossier du Projet.

Usages GDM des champs

Les usages sont inscrits en entier (par exemple Coordonnée X) dans le tableau « Correspondance Base externe – GDM », et en abrégé dans différents fichiers de paramètres, ainsi que dans certaines boîtes de dialogue (Structure, Visualiser – Résumé, etc.).(cf. Annexe1)

IV.4) Document graphique :

Après avoir rempli les données dans le tableau de la fenêtre « Correspondance Base externe », on clique sur le bouton OK, à ce stade nous allons voir le début du processus de traitement.

Cette fenêtre est une fenêtre principale de notre travail qui contient toutes les données ainsi que les opérations de traitement.

Pour définir un nouveau document graphique et que l'on veut afficher le résultat de notre travail, on procède de la manière suivante :

Sur la barre de menu on trouve « données du projet » qui a « Nouveau Document Graphique » Le document vierge apparaîtra dans la partie droite de la fenêtre « Nouveau Document Graphique » (figure 3)

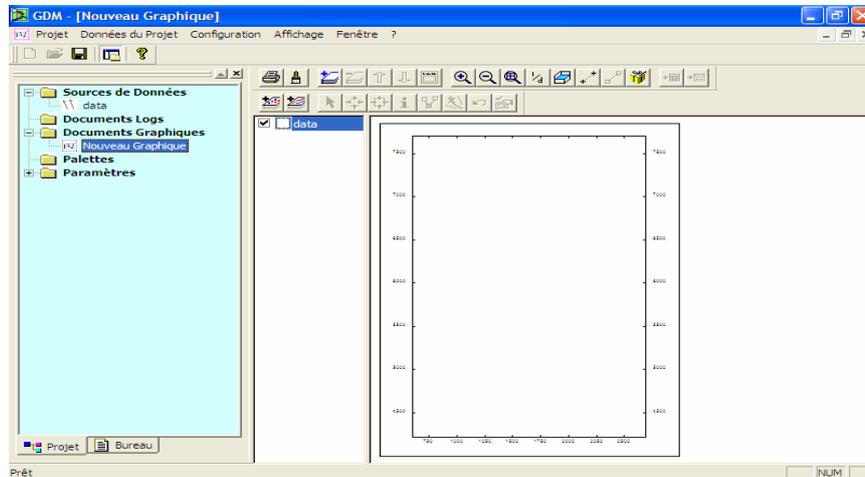


Figure 3 : Nouveau Document Graphique

IV.4.1) L’interface utilisateur :

L’écran est divisé en deux zones :

- À gauche l’Arbre du Projet ou celui du Bureau.
- À droite le document graphique.

a- L’Arbre du Projet :

L’arbre du projet affiche la liste de l’ensemble des éléments du projet, classés en 5 catégories :

Sources de données, Documents Logs, Documents Graphiques, Palettes, et Paramètres.

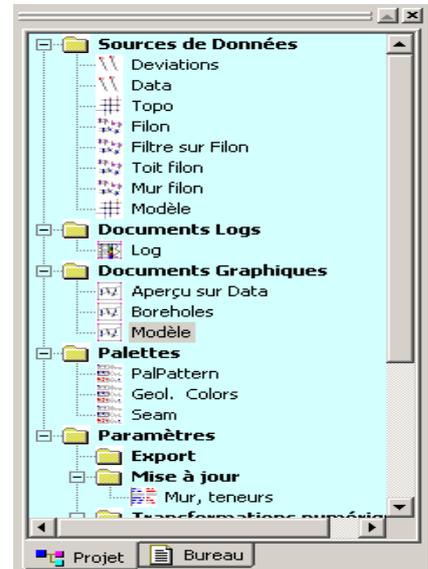


Figure 4 : Arbre du Projet

Dans chaque catégorie les éléments sont rangés dans l’ordre de leur création par le Projet, ou de leur insertion dans le Projet. On voit donc toujours les éléments dans le même ordre.

- Pour les sources de données et les Palettes, en dessous du « Type de Base »,

- Pour les Documents et les Paramètres, en face de « Nom du fichier ».

b- L'Arbre du Bureau :

L'arbre du bureau affiche la liste des Sources de données, des documents et des Palettes sur lesquels on est en train de travailler (ceux qui sont chargés dans GDM).

Le Bureau est donc un sous-ensemble du Projet.

On remarque que les Paramètres n'apparaissent jamais sur le Bureau.

Dans chaque catégorie les éléments sont rangés dans

l'ordre de leur ajout sur le Bureau.

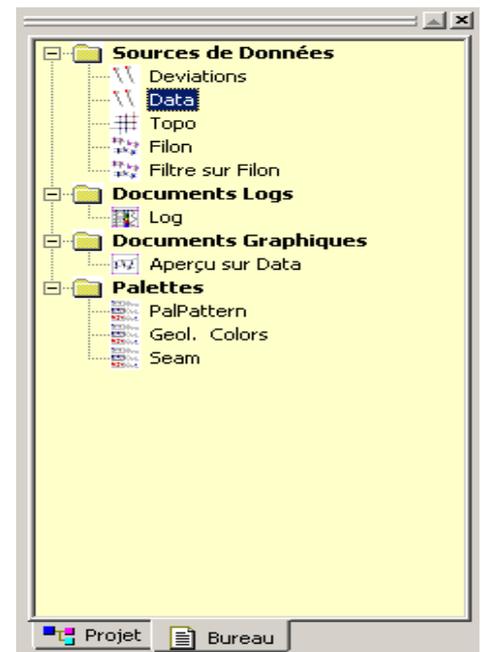


Figure 5 : Arbre du Bureau

Comme on peut « Ranger » des éléments du Bureau dans le Projet, et les « Ajouter » plus tard au Bureau, on ne voit donc pas toujours les éléments dans le même ordre.

c- Document graphique :

Le Document Graphique apparaît dans l'arbre du Bureau sous le nom « Nouveau Graphique ». Faites un double-clic sur le nom du Document (ou menu contextuel – Visualiser) pour l'afficher :

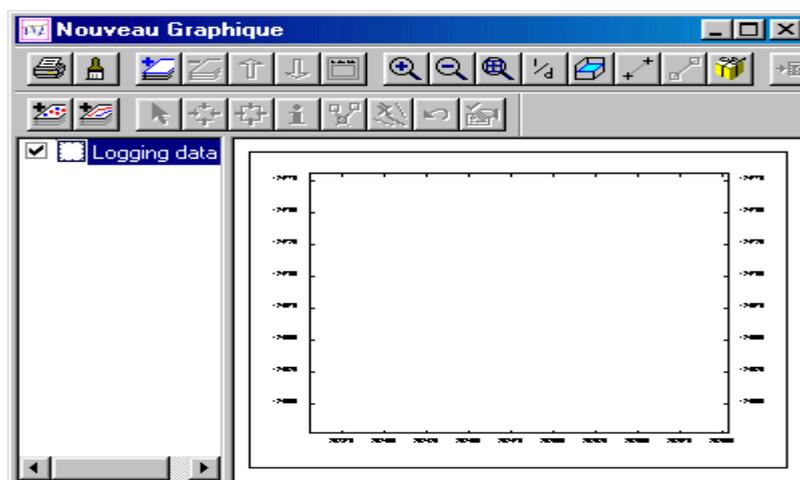


Figure 6 : Document graphique

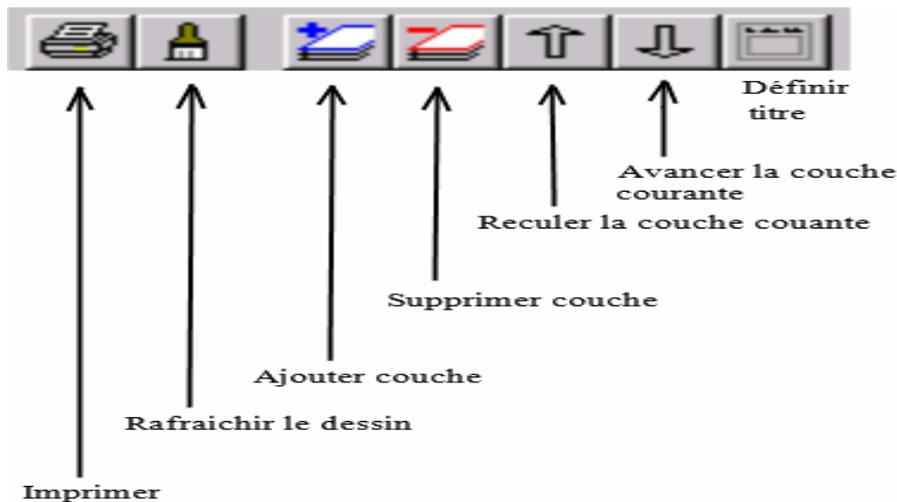
Le nouveau Document Graphique contient une couche Cadre () dans le système de coordonnées géographiques.

Pour visualiser des données, il faudra ajouter une ou plusieurs couches graphiques à ce document.

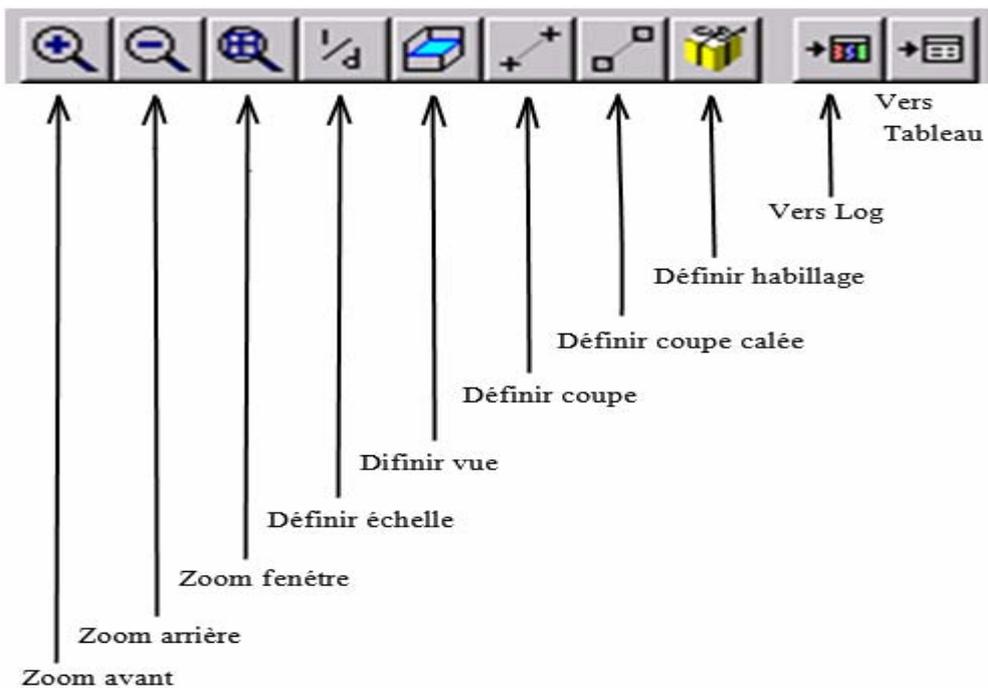
IV.4.2) Barres d'outils des Documents Graphiques :

a- Barre d'outils générale :

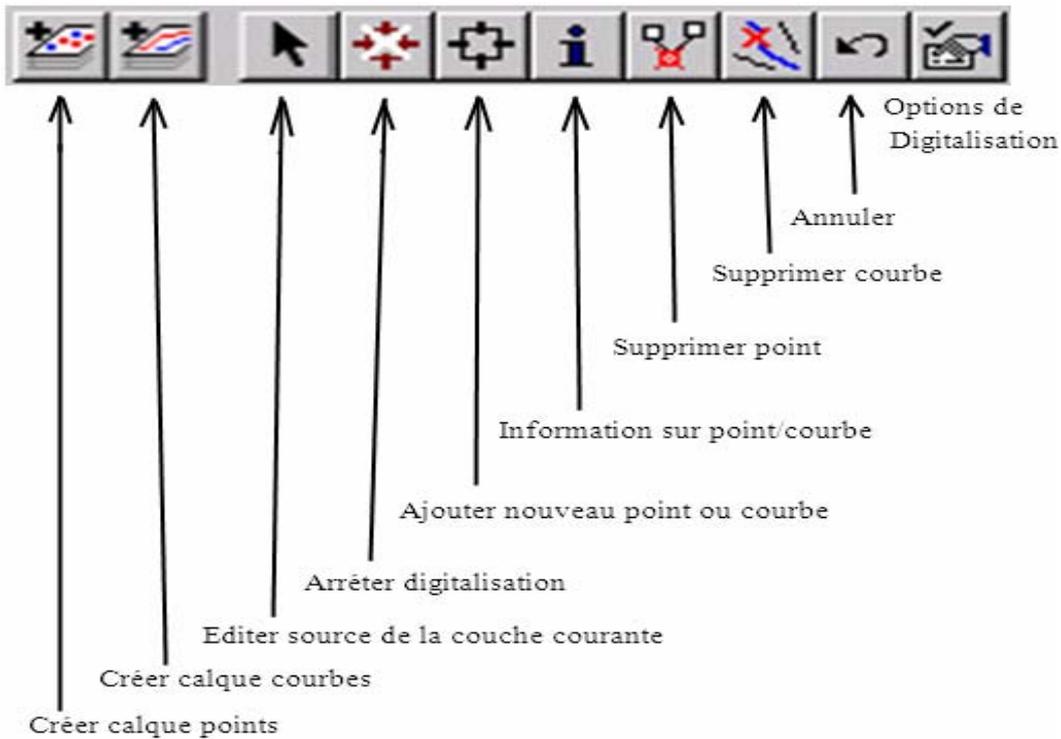
Partie gauche :



Partie droite :



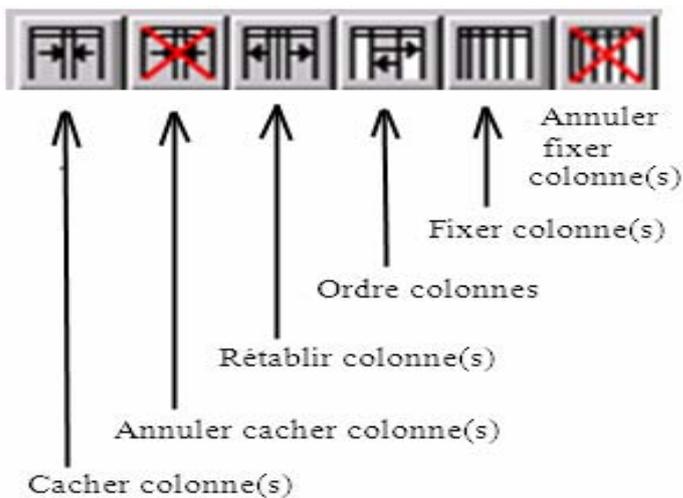
Barre d'outils de digitalisation :



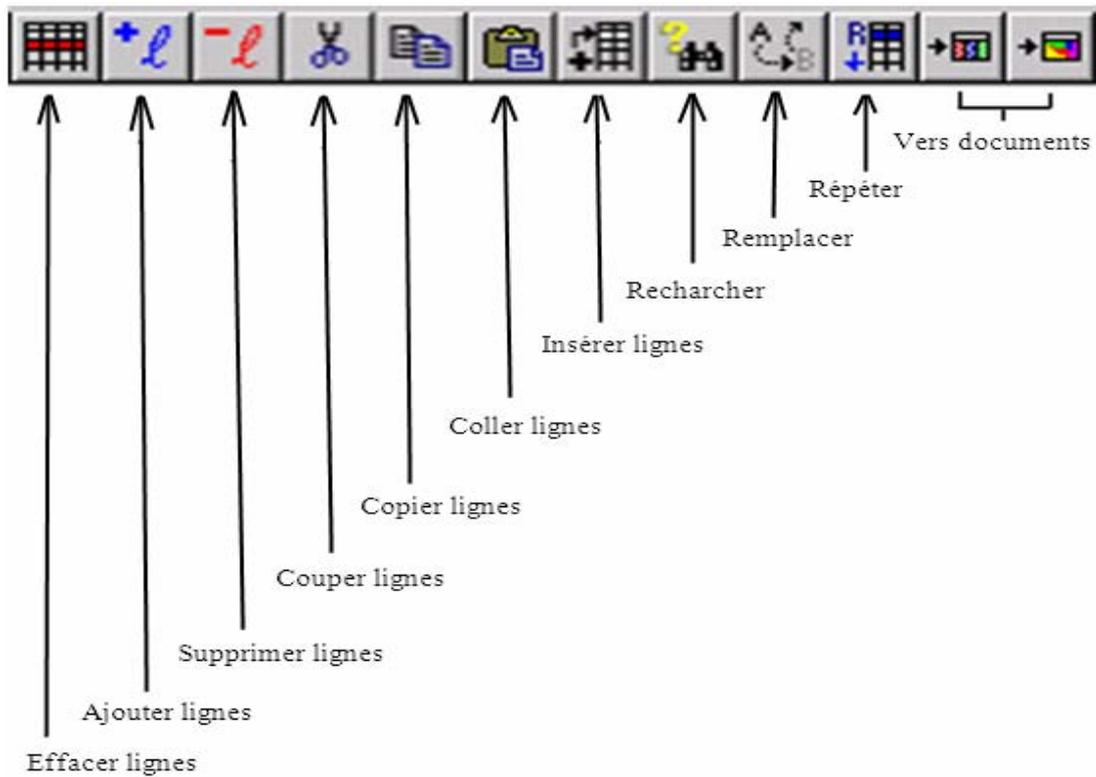
b- Barres d'outils de la Zone de Visualisation :

Barre d'outils du Mode Liste :

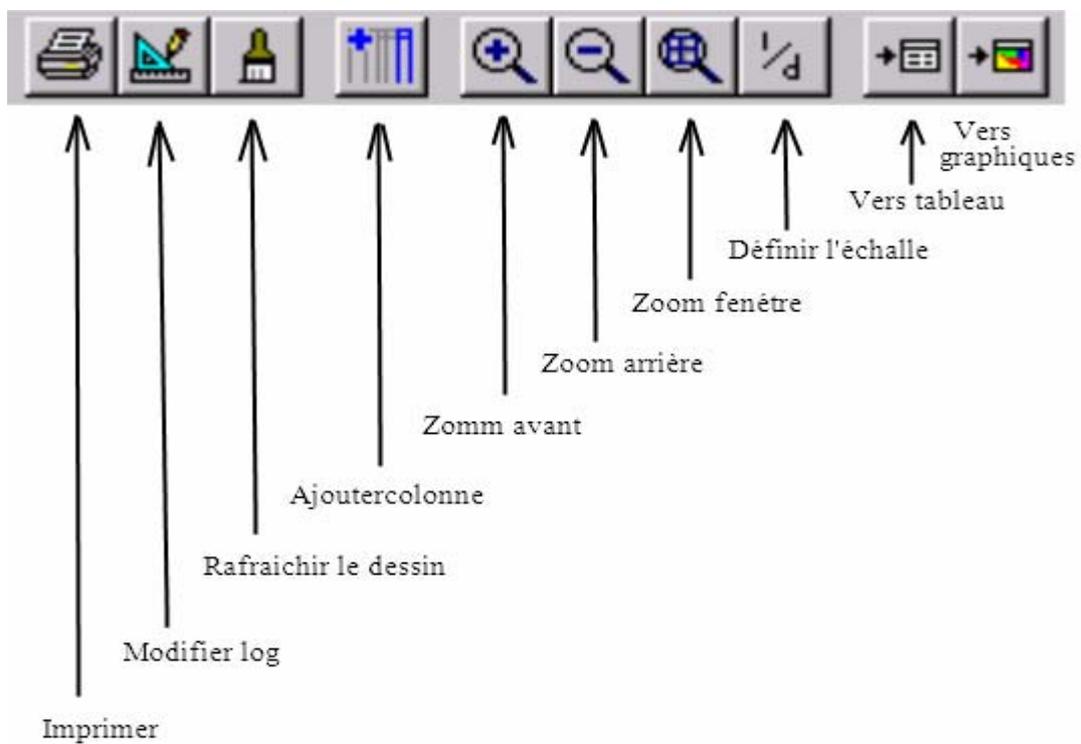
Partie gauche : boutons « colonnes »



Partie droite : boutons « lignes » et recherche



Barre d'outils des Documents Logs :



Après avoir donné un aperçu sur la différente fonction possible de les barres d'outils du GDM, il s'avère important de décrire, maintenant, le processus suivi par le logiciel lors du calcul des réserves géologiques.

En premier lieu, l'utilisateur est tenu de sélectionner la méthode d'interpolation conformément à la précision du traitement souhaité.

- krigeage avec modèle de variogramme
- krigeage avec variogramme linéaire sans dérive
- krigeage avec variogramme linéaire avec dérive
- moindres carrés locaux
- plus proche voisin
- moyenne mobile
- inverse des distances
- polygones d'influence
- interpolation spline local

C'est ainsi que notre logiciel permet d'élaborer les cartes des données introduites (topographique, iso -teneur, toit et mur d'un couche, épaisseur moyenne, ...etc.). De plus, il affiche les tableaux contenant les résultats de l'analyse comme l'épaisseur de la zone étudiée, la superficie et le nombre de mailles : trois éléments éventuellement utilisés dans le calcul du volume selon la formule suivante :

Volume = la superficie de la mailles * le nombre des mailles * l'épaisseur moyenne

Par ailleurs, ce logiciel possède d'autres fonctions que nous allons présenter ci après :

IV.5) Autres fonctions de GDM : [BOBILLIER J. 2004]

IV.5.1) Interpolation avec les failles :

Utilisez la fonction « Calculs – Estimer Grille 2D » Sur la Source de données « Forages ». Cliquez sur « Utiliser Paramètres... » Et ouvrez « Sans failles » :



Figure 7 : Ouvrir les paramètres

Retirez « Coordonnée Z » de la liste des variables à interpoler, Choisissez « Failles » dans la liste déroulante « Source Failles » : « Enregistrez les Paramètres » sous le nom de « Avec failles ». Cliquez sur OK pour lancer le calcul de la grille.

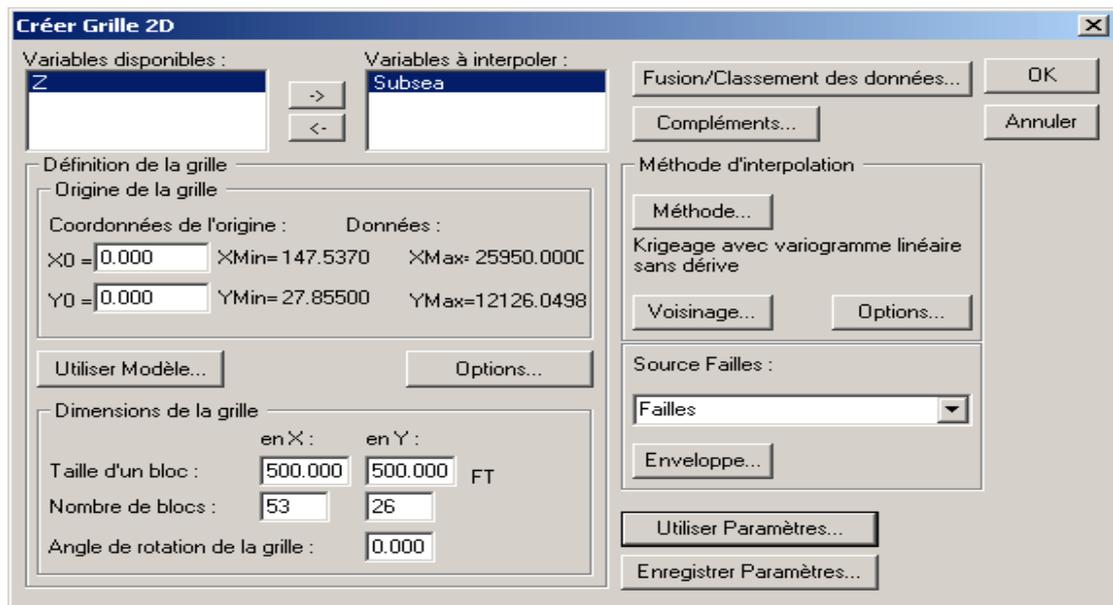


Figure 8 : Créer grille 2D

Renommez la nouvelle Source de données « Grille 2D sur Forages » en « Avec failles ». Faites une copie du Document « Plan de position » sous le nom de « Avec failles », avec la fonction « Enregistrer sous... ».

Sur le Document Graphique « Avec failles » : Cliquez sur « Définir vue »; et saisissez. Ajoutez une couche de type « Isovaleurs » à partir de la Source de données « Avec failles ».

Reculez cette couche en seconde position (juste après la couche Cadre), et modifiez comme suit son Mode de Présentation, sans oublier de choisir la Source « Failles » dans la liste déroulante du cadre « Source Failles », ni de demander un remplissage par couleurs

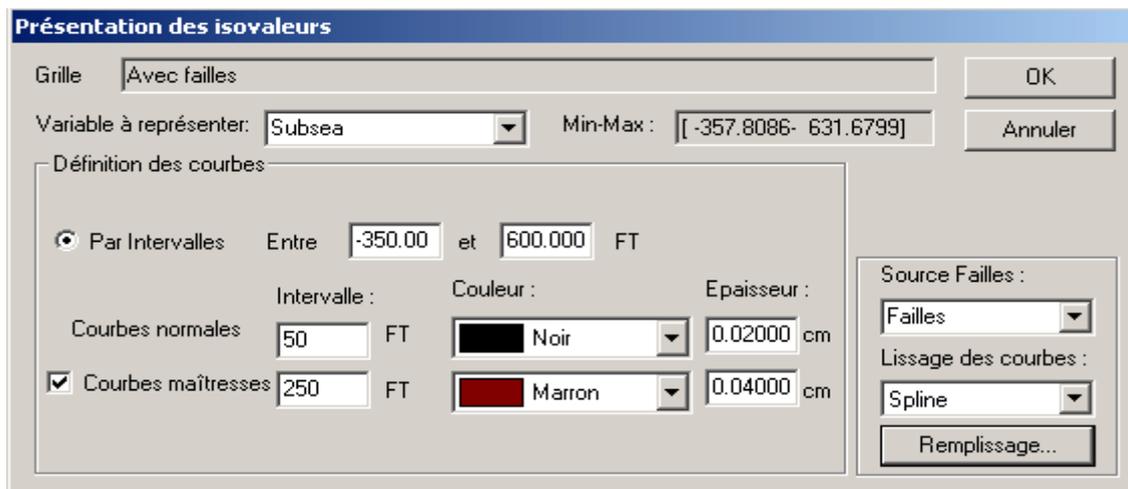


Figure 9 : Présentation des isovaleurs

GDM ne peut pas faire le calcul des courbes isovaleurs quand deux points (ou plus) d'une faille sont dans une même maille de la grille. Dans ce cas, GDM crée une Source de données « Nouvelle définition de failles » dans laquelle des segments ont été éliminés.

- **Correction des Sources de failles :**

Nous avons vu que GDM peut corriger automatiquement les Sources de failles quand il ne s'agit que d'éliminer des segments.

Cependant

- La correction automatique peut dans certains cas (rares puisque les segments éliminés sont très courts, surtout si votre grille a une petite taille de maille) provoquer un changement de tracé des failles qui ne convient pas à l'utilisateur,
- GDM ne peut pas corriger toutes les anomalies de tracé de failles, et quelquefois l'utilisateur devra lui-même insérer, déplacer, ou éliminer des points.

IV.5.2) Créer une « vue 3D » dans GDM Windows (vue isométrique) :

Une astuce d'utilisation de GDM pour créer des vues isométriques. Toutes les données utilisées par GDM (points, sondages, courbes), ou créées par GDM sont des données 3D (avec des coordonnées X, Y et Z)

En jouant sur la définition du repère, on peut aussi visualiser les données projetées sur un plan oblique quelconque.

Le programme GDMVRML, exécutable sous DOS, permet de convertir les données GDM en format VRML2 (Virtual Reality Modeling Language - version 2).

Ces données sont alors visualisables avec n'importe quel visualisera supportant la norme VRML2.

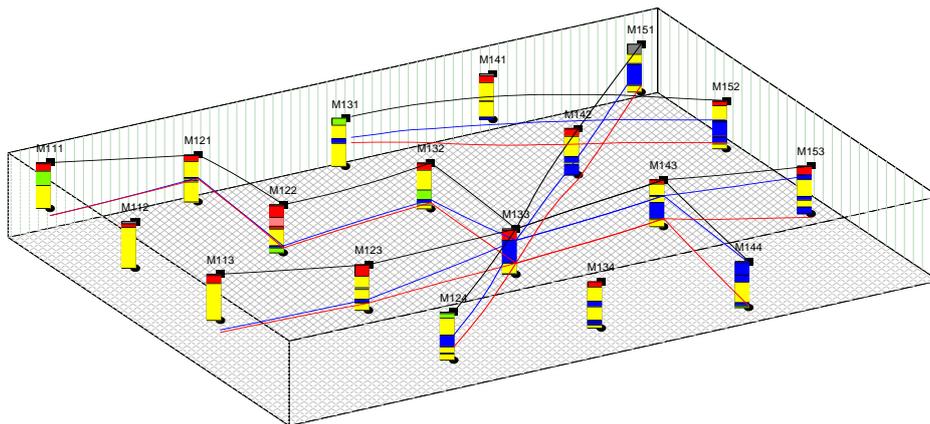


Figure 10 : Vue 3D

a- Créer une source de données de courbes GDM avec les 6 faces du cube englobant

- Utiliser CubeCalc.xls pour préparer ces données de courbes.

Note : les noms des faces servent ensuite dans GDM pour remplir certaines faces avec différents figurés.

- Créer la source de données de courbes « Cube (Excel) » en établissant un lien sur la feuille CubeCalc.xls - Cube.

- Enregistrer « Cube (Excel) » sous : « Cube (GDM) » qui est alors une source de données GDM.
- b- Utiliser la fonction « Calculs – Changer de repère » sur la source de données « Cube (GDM) » pour définir l'angle de vue du Document Graphique**
- Note : cette fonction ne modifie pas la position des données. Elle recalcule seulement les coordonnées locales dans un nouveau système.
- c- Créer un nouveau Document Graphique à partir de la source de données Cube (GDM), dans le système de coordonnées locales (proposé par défaut)**
- Ajouter une couche de courbes à partir de la source de données Cube (GDM). Vous voyez alors le cube « en 3D ».
- Ajouter les autres données (sondages, points, courbes, etc)
- Rendez invisible la couche cadre, ou définissez les graduations des axes de façon à ne pas afficher les coordonnées (ces coordonnées locales n'ont pas de signification).

IV.5.3) Construction de modèles multicouches avec GDM :

a- Définitions :

Modèle multicouches : c'est le modèle numérique d'un empilement de couches de terrain (ou « formations ») continues ou non, éventuellement faillées, d'épaisseurs variables. Un modèle multicouche ne permet pas de gérer les superpositions d'une même formation (plis déversés, ou redoublement de séries).

On va modéliser les surfaces qui limitent les couches, surfaces qu'on peut aussi appeler contacts ou interfaces, à partir de points connus de ces surfaces. Chaque couche est comprise entre deux contacts (son mur en bas, et son toit en haut).

- Quand deux couches superposées sont continues (non biseautées, non lenticulaires) la surface du toit de la formation inférieure est identique à la surface du mur de la formation supérieure.
- Quand une couche disparaît (par biseau / érosion) dans certaines parties du modèle, la valeur de son épaisseur dans le modèle est nulle. La valeur de l'altitude de son toit est

égale à la valeur de l'altitude de son mur, et est égale à la valeur de l'altitude du toit d'une des couches inférieures, ou du mur d'une des couches supérieures.

A partir des points de chaque surface connus par leurs coordonnées X_c , Y_c , Z_c , GDM va calculer par interpolation, pour tous les nœuds d'une grille à maille rectangulaire horizontale (X , Y) régulière, la valeur estimée Z_e de l'altitude de la surface.

Le modèle multicouche sera une grille régulière comportant dans la zone du modèle en chaque nœud de la grille, les valeurs estimées Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_n de tous les contacts (interfaces)

Une fois le modèle calculé, GDM pourra dessiner les cartes en courbes iso valeurs de chaque interface, ou n'importe quel profil vertical (rectiligne ou curviligne) montrant l'empilement des couches.

Pour obtenir une vue 3D, on va exporter le modèle (la grille) et convertir chaque surface en une surface au format VRML. On pourra alors visualiser en 3D sous n'importe quel angle l'empilement des couches à l'aide d'un visualiseur VRML

b- Réalisation d'un modèle multicouche :

b-1) Les données de base :

Toutes les données de type X_c , Y_c (localisation horizontale) et Z_c altitude du toit ou du mur d'une formation géologique sont utilisables (données de sondages, données géophysiques, limites d'affleurement, semis de points topographiques, etc.).

Pour mettre dans des tables distinctes de GDM les données correspondant à différentes interfaces, ou disposer d'un système de codage qui permettra de filtrer dans GDM les données de chaque surface.

b-2) Interpolation de chaque surface :

Pour construire le modèle multicouche, on va interpoler chaque surface (calculer le modèle (la grille) de chaque surface) individuellement.

Pour limiter horizontalement l'interpolation de la surface, on définit les caractéristiques géométriques de la grille (origine, taille de la maille en X et Y , nombre de mailles en X et Y ,

orientation de la grille par rapport au Nord). GDM propose des valeurs par défaut pour tous ces paramètres en fonction de la répartition X, Y des données à interpoler.

C'est au géologue de choisir les coordonnées Xmin, Xmax, Ymin, Ymax du modèle de façon à englober les différentes surfaces qui constitueront le modèle multicouches, et de calculer chaque surface dans les mêmes limites. Ces opérations sont faciles dans GDM car quand on représente sur une même carte des données correspondant à toutes les surfaces, GDM affiche les coordonnées Xmin, Xmax, Ymin, Ymax de l'ensemble des sources de données, quand la grille de la première surface a été calculée, il suffit de la prendre comme « modèle de grille » pour le calcul des autres surfaces.

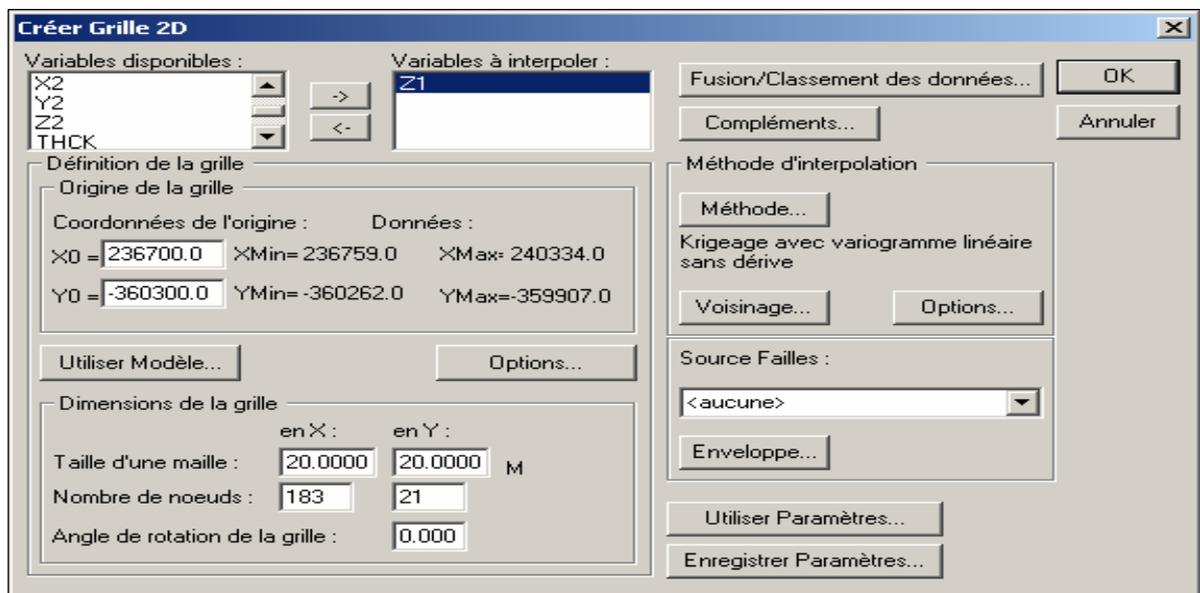


Figure 11 : Boîte de dialogue GDM pour l'interpolation de surfaces

Après ces corrections, la surface sera calculée de nouveau par GDM, et visualisée pour vérification. Comme GDM permet de sauvegarder tous les paramètres de chaque interpolation, le recalcul d'une surface est rapide et on peut procéder rapidement à plusieurs calculs lors des essais que le géologue fera pour tenir compte des particularités au mieux de la zone étudiée.

CHAPITRE V

Utilisation du GDM : Cas du phosphate du gisement de Bled El Hadba

V.1) Introduction :

Afin de mieux comprendre le mode de fonctionnement des logiciels d'estimation des stocks miniers exploitables, nous avons choisi le GDM comme modèle de traitement des données obtenues à partir des données de sondage effectué sur le gisement de phosphate de Bled El Hadba. Les mesures ont été prises essentiellement sur la couche principale du gisement.

V.1) Description du cadre physique général :

V.1.1) Situation géographique du gisement :

Le gisement de phosphate de Bled El Hadba est situé à 14 Km au S.E de la ville de Bir El Ater et à 6Km de la frontière algéro -tunisienne.

Le secteur en question est limité par les coordonnées suivantes :

Coordonnées UTM :

N°d'ordre	X	Y
1	421859	3833944
2	424342	3837335
3	425769	3836312
4	423357	3832149

Coordonnées Lambert :

N°d'ordre	X	Y
1	999250	163975
2	1001510	167520
3	1003000	166590
4	1000860	162280

Superficie : 897 Ha.

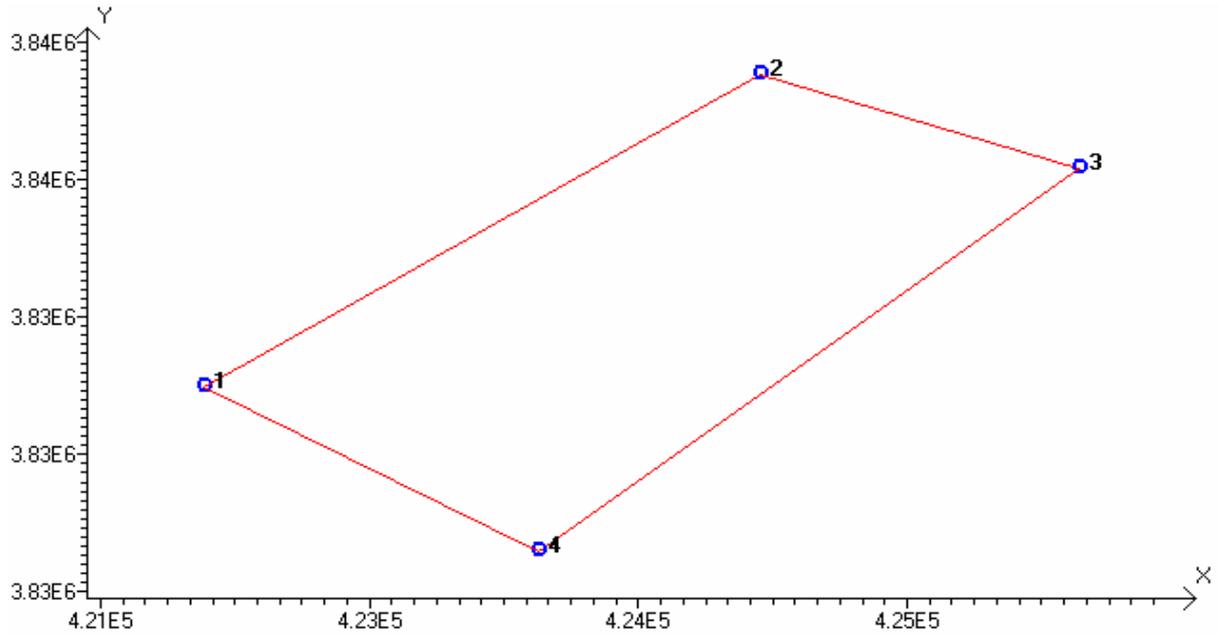


Figure 01 : Schéma du périmètre en coordonnées UTM.

Du point de vue altimétrique, les cotes varient de 730 à 790m.

Géomorphologiquement, le relief est très peu accidenté comparativement aux autres gisements de phosphate de la région.

V.1.2) Hydrographie et Hydrogéologie :

a) Réseau hydrographique :

Dans la commune de Bir El Ater, ce réseau est composé de 3 principaux sous bassins versants:

- Celui d'Oued Rheznata, au Nord-Est de la commune;
- Ceux d'Oued Soukiès et d'Oued Horchane, au Sud de la commune, dans la zone objet de notre étude. [BRGM1992]

Ces sous-bassins versants font partie du bassin versant du Chott Melghir et ils sont affectés par une action conjuguée d'érosion hydrique et éolienne. La faible couverture végétale indique une importante surface d'ablation.

A l'intérieur de la zone d'étude, il y a plusieurs petits oueds (Tarfaya, Abiod, El Bir, Regou, etc.) qui ne coulent que quelquefois durant l'année et pendant quelques heures à chaque fois. Cependant, leurs crues peuvent être violentes et couper les voies d'accès.

Compte tenu du caractère intermittent des oueds, il n'existe pas de données sur la qualité de leurs eaux.

b) Eaux souterraines :

La région de Tébessa compte plusieurs aquifères potentiels liés aux divers types lithologiques. L'aquifère le plus important de la région semble se situer dans les grès et sables quartzeux miocènes.

D'autres aquifères situés dans les calcaires Turoniens et Maestrichtiens sont beaucoup moins connus. La source de Tenoukla, dont le débit est conséquent, est alimentée par les calcaires du Turonien. Les calcaires éocènes sont également aquifères.

Dans la région de Bir El Ater, on distingue la nappe de Chéria (d'où le Complexe de Djebel Onk pompait son eau dans le passé), la nappe d'Elma Labiod, les nappes de Dokkara et d'Oglat Ahmed (sur la frontière Algéro-tunisienne), la nappe de Darmoun (d'où le Complexe de Djebel Onk pompe actuellement son eau) et le Complexe Terminal de Négrine.

V.2) Aperçu géologique régional :

V.2.1) Stratigraphie :

La région de Bir El Ater se caractérise par la présence des formations du Crétacé supérieur (Maastrichtien), du Paléogène, du Néogène et du Quaternaire.

La division stratigraphique de la région est basée sur les études de (Ranchin G. 1963) et de (FOMINE N. 1978), ainsi que les études de la macrofaune établies par les auteurs du rapport de prospection –évaluation de l'O.R.G.M, (1985-1987) ; toutes ces études ont été citées par le BRGM et SOFREMINEs, 1992

a) Crétacé supérieur :

- Maastrichtien :

Les plus anciens sédiments rencontrés dans la région de Bir El Ater sont ceux du Maastrichtien, localisés dans la partie axiale de l'anticlinal du Dj.Onk.

Les sédiments en question sont représentés par des calcaires à Inocérames, avec de rares intercalations de marnes, et surmontés par des argiles attribuées au Maastrichtien supérieur (Laffitte, en 1939), et Kozlov W. rapporta leur majeure partie au Maastrichtien supérieur.

- Paléogène :

Le Paléogène est représenté par les sédiments du Paléocène et de l'Eocène, formés de calcaires et marnes, phosphates et au sommet par des évaporites. La puissance des formations du Paléocène est de l'ordre de 350 m.

- Miocène :

Les dépôts de cet étage sont représentés dans la région de Dj.Onk par un complexe de roches terrigènes composées de conglomérats, de grés, de sables et d'argiles sableuses.

Lithologiquement, les sédiments du Miocène sont divisés en trois (03) termes.

b) Terme inférieur :

Représenté par des conglomérats et des sables grossiers qui reposent en discordance sur les terrains anciens du Tertiaire, avec une épaisseur totale de 200m.

c) Terme moyen :

Le Miocène moyen est constitué surtout d'argiles brunes, schisteuses et d'intercalations de sable fins de couleur blanche, avec une épaisseur totale de 100m

d) Terme supérieur :

Le terme supérieur est représenté par des sables et grés à bancs de graviers avec une épaisseur totale dépassant les 100m.

e) Quaternaire :

Les dépôts récents du Quaternaire sont largement répandus dans la région du secteur des travaux, ils sont représentés par des sables, graviers éboulis et blocs de calcaires, et surtout d'alluvions et des sables éoliens.

V.2.2) Tectonique régionale:

La région de Tébessa, faisant partie de l'Atlas Saharien, se caractérise par l'alternance d'anticlinaux coffrés, étroits et allongés avec des synclinaux au coeur très large. Les directions axiales de ces structures sont généralement NE-SW.

A noter, cependant, que la région se distingue des autres parties de l'Atlas Saharien par le fossé d'effondrement (graben) récent de Tébessa qui recoupe indifféremment les structures anticlinales et synclinales plus anciennes.

Les structures sont recoupées par de rares mais de grands accidents transversaux tels que la faille de Tenoukla qui décroche les formations crétacées. D'autres failles parallèles aux structures sont beaucoup moins importantes.

Le diapirisme présent dans la région a dû être déclenché lors des premiers mouvements et a dû se poursuivre très tardivement.

La disposition régionale des structures précitées est liée aux mouvements de cisaillement dextres le long de la faille transverse de Gafsa, de direction N120°E.

Les accidents transverses N110° / N 120°E, très abondants dans le bassin de Dj.Onk-Gafsa- Metlaoui constituent des structures ayant fonctionné depuis le Turonien, pendant le Crétacé - Eocène jusqu'à la phase post-Pliocène (Aissaoui ,1984).

V.2.3) Caractéristiques géométriques, pétrographiques et chimiques des minerais :

Le faisceau phosphaté présente une géométrie simple et régulière. Son épaisseur est assez uniforme ; elle est de l'ordre de 30m. En moyenne sur toute l'étendue du gisement, à l'exception de la partie nord, caractérisée par des épaisseurs réduites à causes de l'effet de l'érosion ante-Miocène.

Chimiquement, les phosphates du gisement de Bled El Hadba sont divisés en trois (03) horizons, présentant des caractéristiques chimiques et pétrographiques distinctes.

La couche sommitale, en contact direct avec les calcaires dolomitiques de l'Yprésien est caractérisée par un phosphate dolomitique pauvre en P_2O_5 et riche en MgO.

La couche principale, divisée en deux sous -horizons, présente des caractéristiques chimiques légèrement différentes.

Sa partie supérieure est riche en P_2O_5 et pauvre en MgO, tandis que sa partie inférieure est riche en P_2O_5 , mais plus dolomitique.

La couche basale, présente les mêmes caractéristiques que la couche sommitale. A la base de cette couche, on trouve de minces intercalations d'argiles marneuses, de phosphates argileux et bitumineux de couleur sombre, et dont l'épaisseur n'excède pas 4 mètres.

V.3) Historique des travaux de recherches sur le gisement :

Les phosphates de Bled El Hadba sont connus de longue date. Ils ont fait l'objet d'une reconnaissance par puits et galeries, dès le début du siècle, en 1910 et 1911. La géologie de la zone phosphatée de la région Djebel Onk compris ou les niveaux phosphatés affleurent est décrite par différents auteurs cités dans les rapports inédits ou pas comme Dussert 1924 ;Visse , 1955 ; Ranchin 1963 ;Chabou –Mostefai 1987 (communication orale Chabou 2008).

Ce gisement a fait l'objet par le passé de quelques campagnes de prospection et d'évaluation à savoir :

- **En 1978**, la SONAREM, avait réalisé neuf (09) sondages carottés

(S27-S51 K à S58 K) suivant une maille de 400 x 900 m et une série de tranchées sur les affleurements (T 43 K –TR 55 K).

De cette campagne il ressortait un potentiel géologique de 113 millions de tonnes de réserves probables (C1) à 19, 58 % P_2O_5 et 129 millions de tonnes de réserves possibles (C2) à 20,30 % P_2O_5 soit un total de 242 millions de tonnes , dont 60 millions titrent plus de 23 % P_2O_5 .

- **En 1987** , L'EREM avait resserré la maille précédente à 400 x 600 m en réalisant onze (11) sondages (SH 01 – SH 11) , et (07) tranchées (TR 01 H – TR 07 H) . Les réserves estimées après ces campagnes s'élevaient à 324 millions de tonnes toutes catégories confondues, et réparties ainsi :
- **En 1999**, Ferphos a lancé une campagne de prospection complémentaire détaillée de la partie nord du gisement sur une superficie de 2,61 Km² afin de certifier au moins 100 millions de tonnes de minerai en catégorie B dans cette partie du gisement.

V.4) Estimations des réserves géologiques :

L'estimation des réserves géologiques par le GDM consiste, en premier lieu à élaborer les différentes cartes indispensables et à calculer le volume de la couche principale en second lieu.

Les données de sondage sont portées sur un fichier EXCEL (le data) qui enclore deux feuilles :

Dans la première feuille, un tableau qui comprend les données géologiques (en lignes : les numéros des sondages et en colonnes : les coordonnées X –Y- Z ; la lithologie ; la description et la profondeur).

Dans la deuxième feuille, un autre tableau qui comporte les données chimiques (les numéros des sondages en lignes et les coordonnées X- Y- Z ; la profondeur ; et les teneurs de P2O5, MgO, CaO et SiO2 sont portées en colonnes).

Après avoir saisi ces données EXCEL ; on procède au traitement en exécutant les étapes suivantes :

Démarrez le GDM, et créez un Nouveau Projet et remplir le « Etablir lien avec base » de la façon suivante :

- Nom de la source de données dans le projet : c'est le nom du fichier Excel (data)
- Type de données : sondages
- Type de la base de données : EXCEL 97

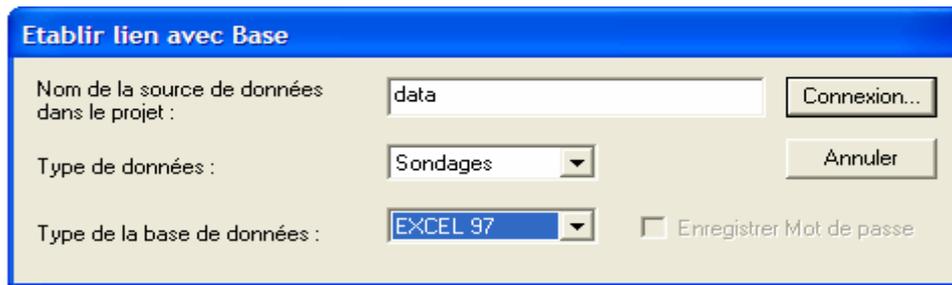


Figure 02 : établir lien avec base

Cliquez sur Connexion et choisissez data

La boîte de dialogue « Correspondance Base externe – GDM » nous permettra de définir comment GDM va interpréter les données contenues dans les feuilles Excel .

En première feuille, les numéros des sondages et les coordonnées X –Y- Z seront aperçus comme des champs « tête » quant à la lithologie, la description et la profondeur s’apercevront comme des champs « passe ».

Sur la deuxième feuille, les numéros des sondages et les coordonnées X-Y- Z seront annoncées comme des champs « tête ». La profondeur ; les teneurs de P2O5, MgO, CaO, SiO2 seront affichées comme des champs « passe ».

La boîte de dialogue montre les champs de la feuille chimie (la première par ordre alphabétique) :

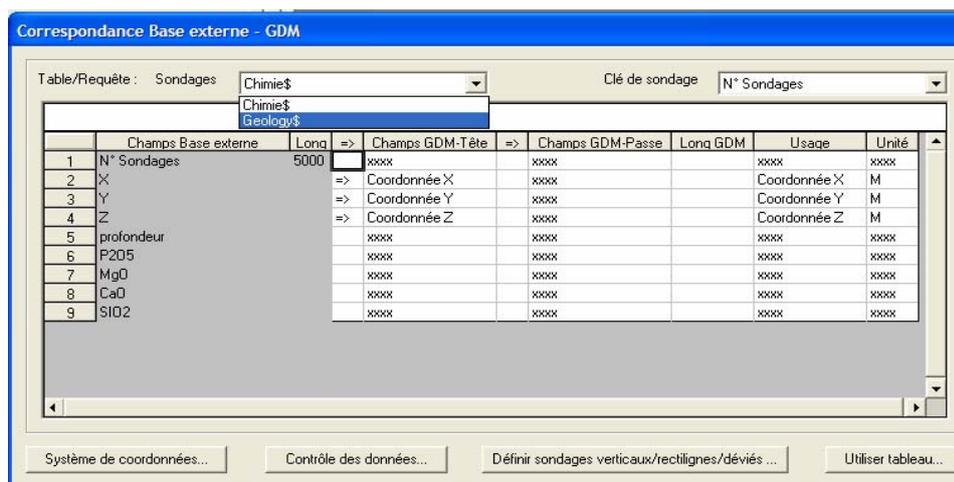


Figure 03 : correspondance de la base externe avec GDM

Le GDM lui attribue un « Usage » par défaut (en général « Texte/Code/date » pour un champ texte, et « Variable » pour un champ numérique). On peut alors modifier, selon nos besoins, son « Usage » en double-cliquant sur l'usage affiché comme suivant :

Numéros des sondages → indicatif complet

Les coordonnées X- Y -Z → coordonnée X, coordonnée Y, coordonnée Z

La lithologie → indicatif réduit

La description → indicatif complet

La profondeur → profondeur fin

Les teneurs de P2O5, MgO, CaO, SiO2 → variable

Enfin, quand l'usage d'un champ numérique a été choisi, on peut modifier « l'unité » en double-cliquant sur l'unité affichée.

Les coordonnées X, Y, Z → M (mètre).

La profondeur → M

Les teneurs de P2O5, MgO, CaO, SiO2 → PERC (pourcentage).

Cliquer sur OK, Passez maintenant aux Documents Graphiques. On voit la Source de Données «**data** » dans l'arbre du Projet et dans celui du Bureau. C'est une Source de données du type Sondages ()

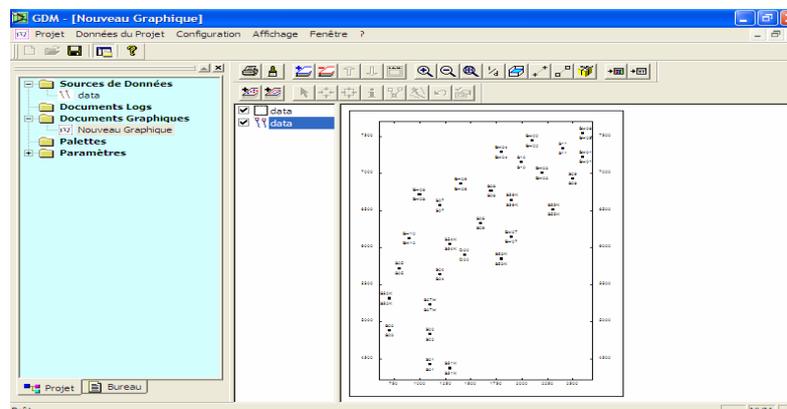


Figure 04 : nouveau document graphique avec le plan de situation des sondages.

Le document Graphique contenant deux couches :

- La couche Cadre () qui est toujours la première couche d'un Document Graphique, avec un mode de représentation par défaut,
- Une couche Sondages (), avec un mode de représentation par défaut.

Utilisez maintenant la fonction « Aperçu » sur la Source de Données « data »

Sur ce nouveau Document Graphique, utilisez le bouton « Habillage () » et cochez les options « Flèche du Nord » et « Barre d'échelle ».



Figure 05 : Habillage sur le document graphique

V.4.1) Modélisation de la surface topographique :

Nous allons estimer la surface topographique en tous points de la zone couverte par les sondages à partir des coordonnées Z des 28 Têtes de sondages. Il faut signaler que si nous disposions des points plus nombreux, comme ceux d'un relevé topographique, nous obtiendrions un modèle topographique plus précis.

Utilisez le menu contextuel « Calculs – Estimer Grille 2D » sur la source des données, par «data » comme indiqué sur la figure suivante :

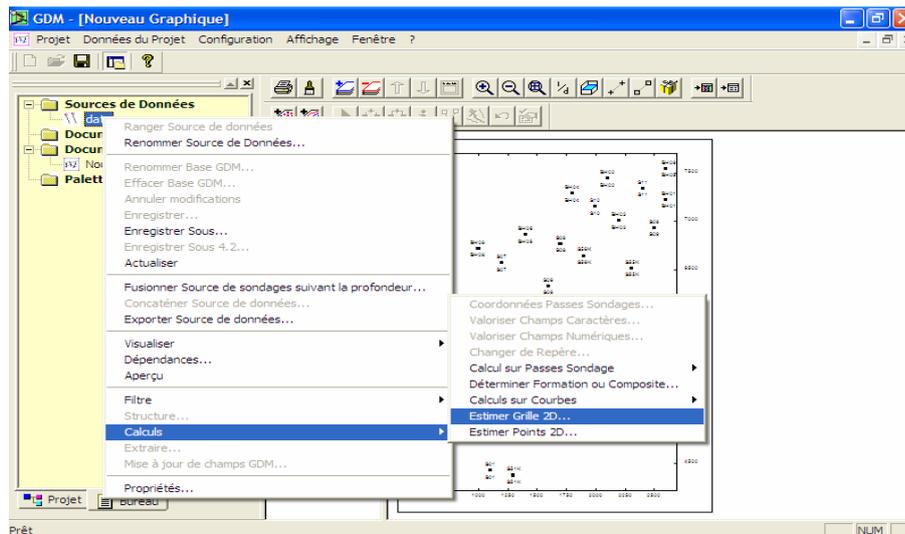


Figure 06 : Chemin à entrer « Estimer grille 2D »

Choisissez « Interpolation sur les têtes », puis cliquez sur OK



Figure 07 : le choix dans l'interpolation sondage

Nous remplirons ensuite le quadrillage « créer Grille 2D » comme suite :

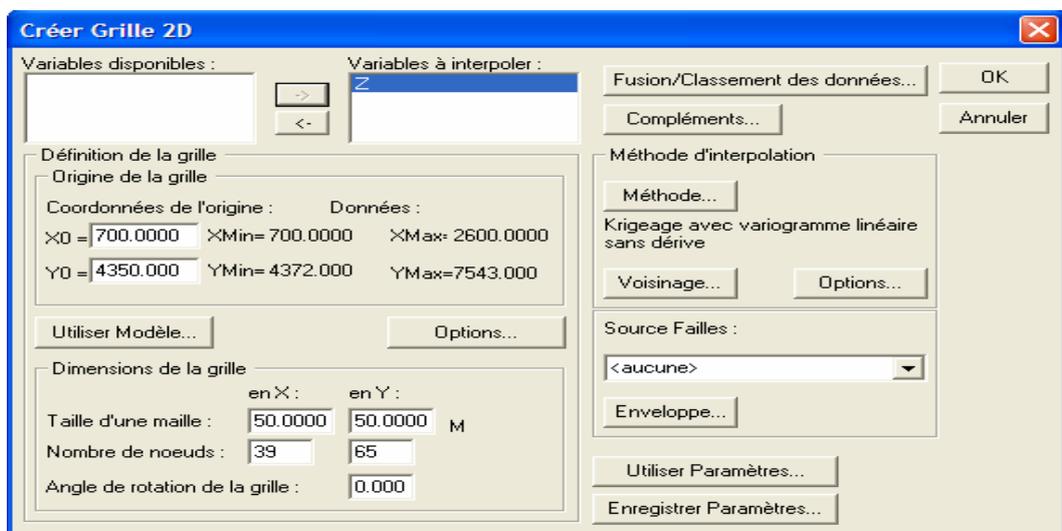


Figure 08 : le choix des paramètres dans « Créer Grille 2D »

Sélectionner Z comme unique variable à interpoler, puis cliquez sur OK pour faire apparaître la carte topographique. Le GDM élabore un modèle de la topographie en utilisant toutes les options, par défaut.

V.4.2) Pour modéliser les cartes toit et mur de la couche principale (CP) :

- Utilisez le menu contextuel « Calculs- Détermine Formation ou Composite... » sur la source des données « data », dans le cadre « Détermination d'une Formation ou d'un Composite » ; choisissez « à partir du code » et sélectionnez dans la liste de code « Litho », ensuite « CP » ; cliquez sur OK. Sur l'Arbre du Projet, une nouvelle source de données « Composition data » est affichée.

- Utilisez le menu contextuel « Calculs- Estimation Grille 2D » sur la nouvelle source des données « Composition data » et sélectionnez Z1 comme une variable à interpoler sur le cadre « Créer Grille 2D »

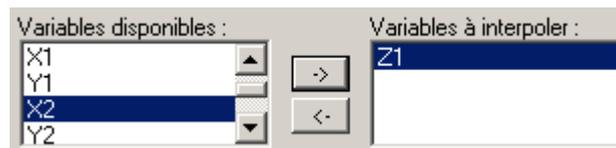


Figure 09 : le choix de la variable à interpoler

(Nous obtiendrons la carte de toit de la couche principale).

Nous procédons de la même manière pour la carte de mur de la couche principale en choisissant Z2.

V.4.3) Pour modéliser les cartes d'iso teneur (P2O5, MgO) :

- Utilisez le menu contextuel « Calculs- Estimation Grille 2D » sur la source des données « data » et choisissez « Interpolation sur les passes » dans le cadre « Interpolation Sondage ».

- Sélectionnez P2O5 dans le cadre « Créer Grille 2D » comme une variable à interpoler, cliquez sur OK (une carte d'isoteneur de P2O5 est apparue).

- De même pour le MgO.

Le choix des deux paramètres sous-cités, est le même pour les trois modélisations :

- Taille de la maille : en X = 10 m, et en Y = 10 m

- La méthode d'interpolation : Krigeage avec variogramme linéaire sans dérive

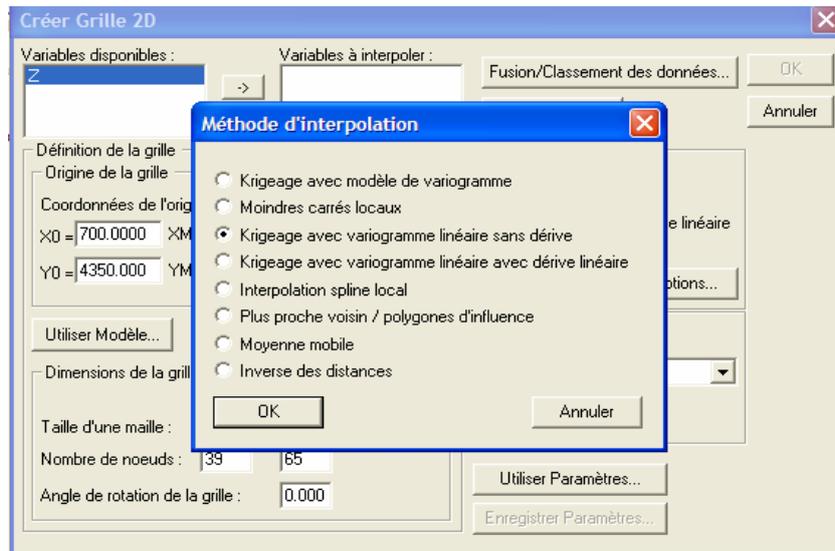


Figure 10 : le choix de la méthode d'interpolation

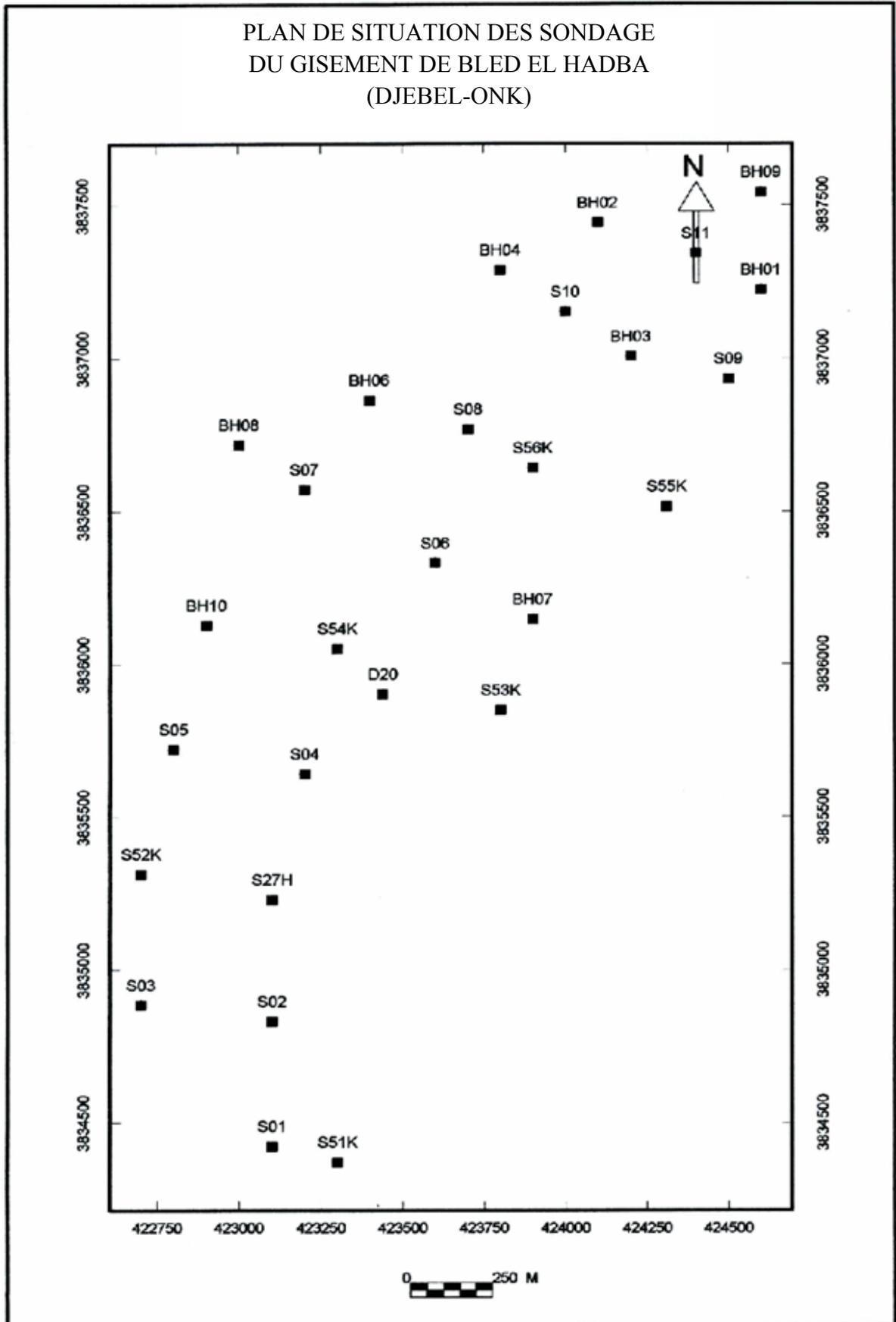
V.4.4) Le choix de la méthode d'estimation :

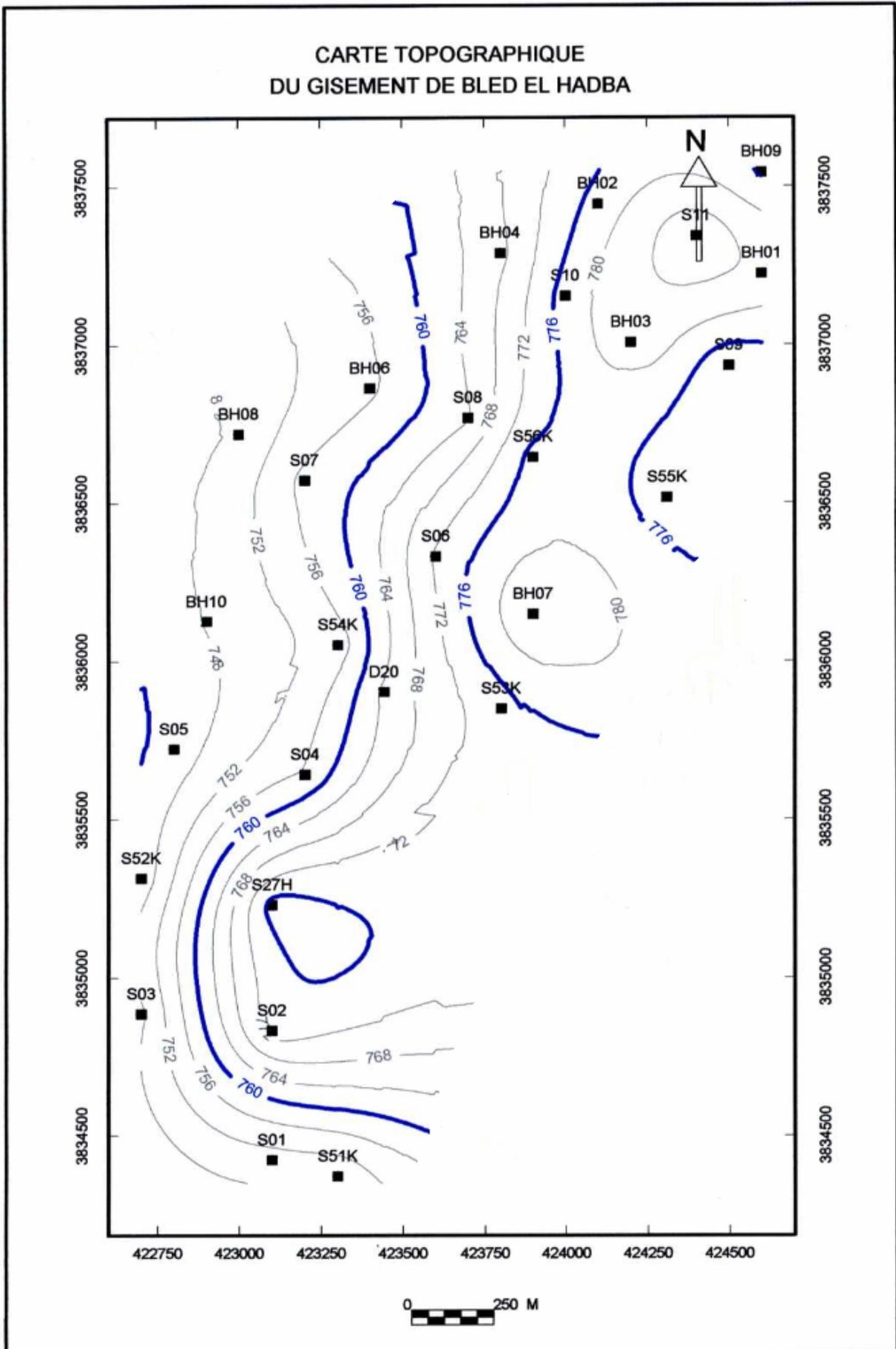
L'étude des caractéristiques et propriétés associées à chaque méthode d'estimation montre que le krigeage est la méthode optimale, au sens statistique en terme d'estimation. Il existe plusieurs propriétés et caractéristiques propre au krigeage et qui sont les plus strictes dans le traitement des données statistiques, nous à savoir :

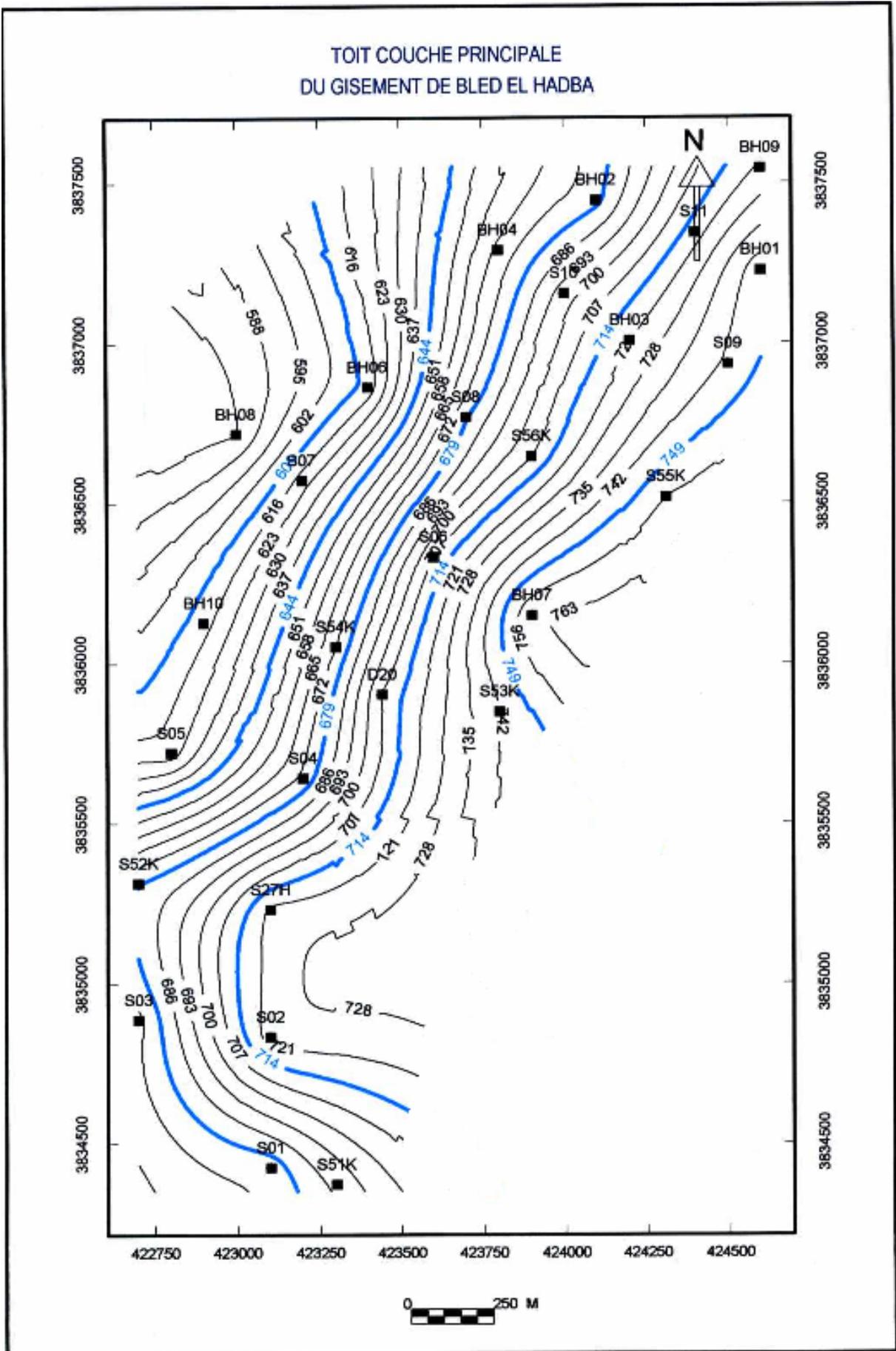
- Linéaire sans biais. A variance minimale, par construction.
- Interpolation exacte : si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue.
- Tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux.
- Par l'utilisation du variogramme, tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépite, anisotropie...etc.).
- Effectue généralement un lissage c'est-à-dire les estimations sont moins variables que les valeurs réelles que l'on cherche à estimer.
- Presque sans biais conditionnel. Ceci signifie que lorsqu'on applique une teneur de coupure à des valeurs estimées, on récupère approximativement la teneur prévue.

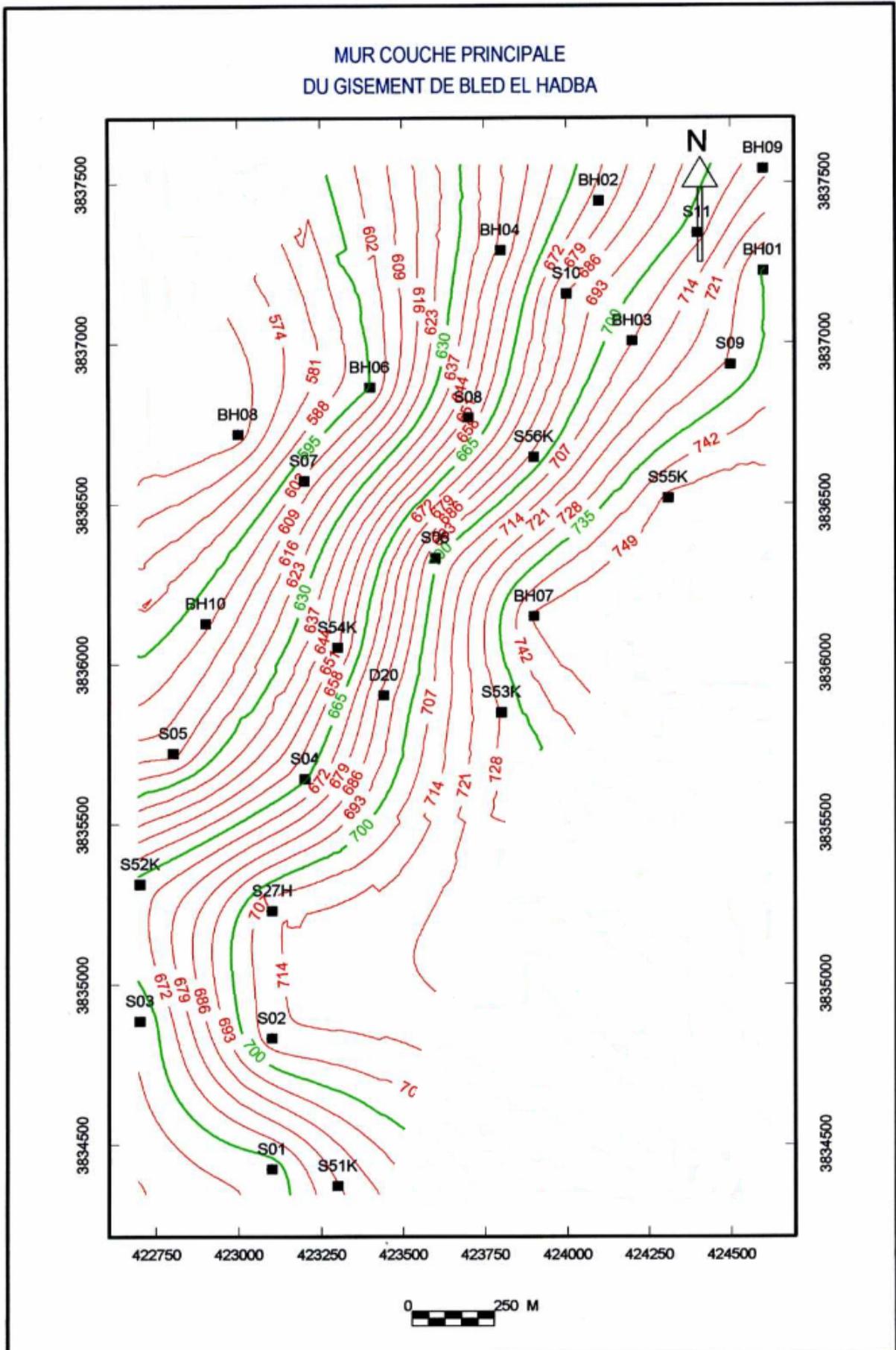
V.4.5) Les cartes :

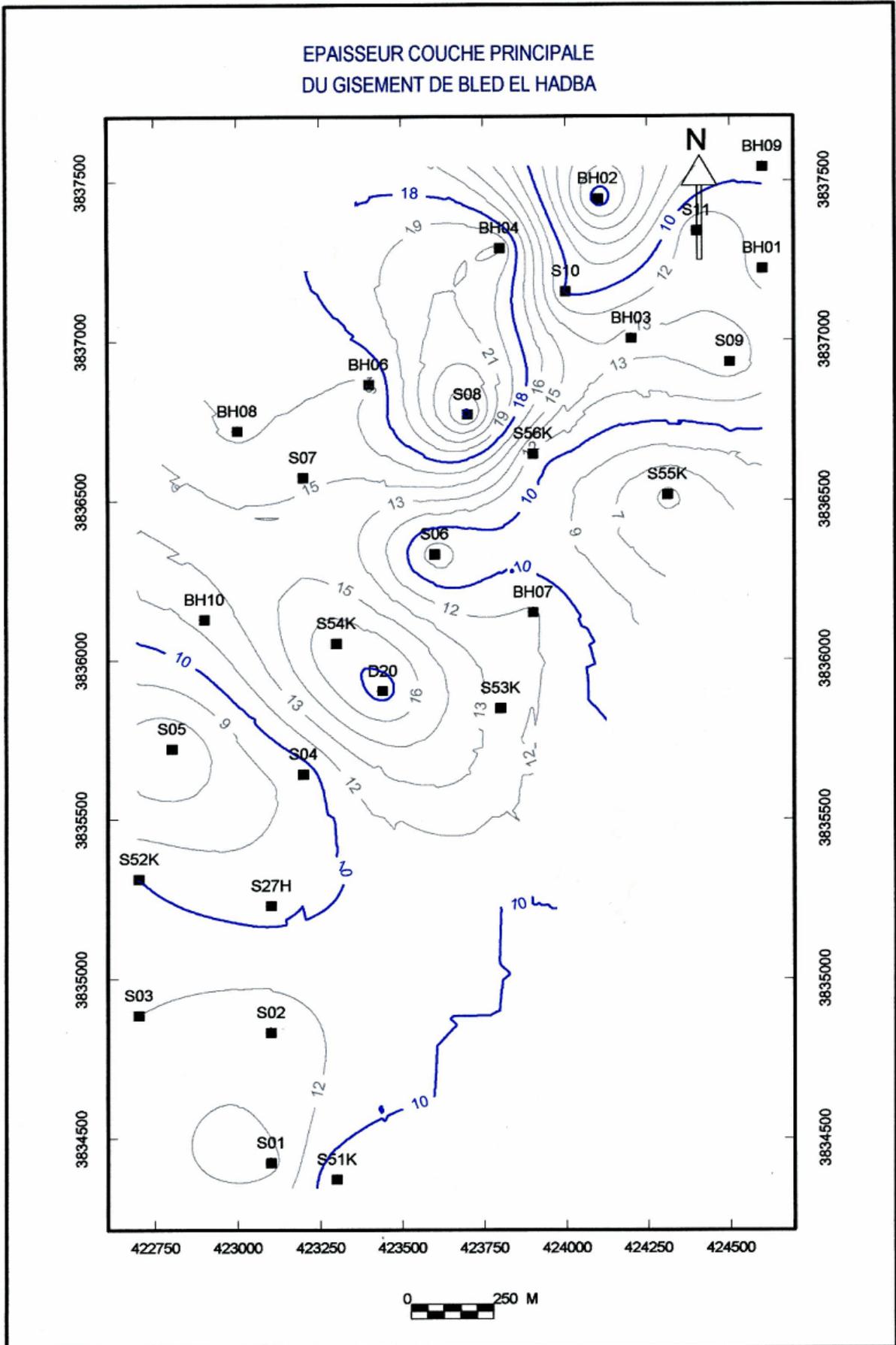
A la fin de ces étapes, nous obtiendrons les cartes suivantes :

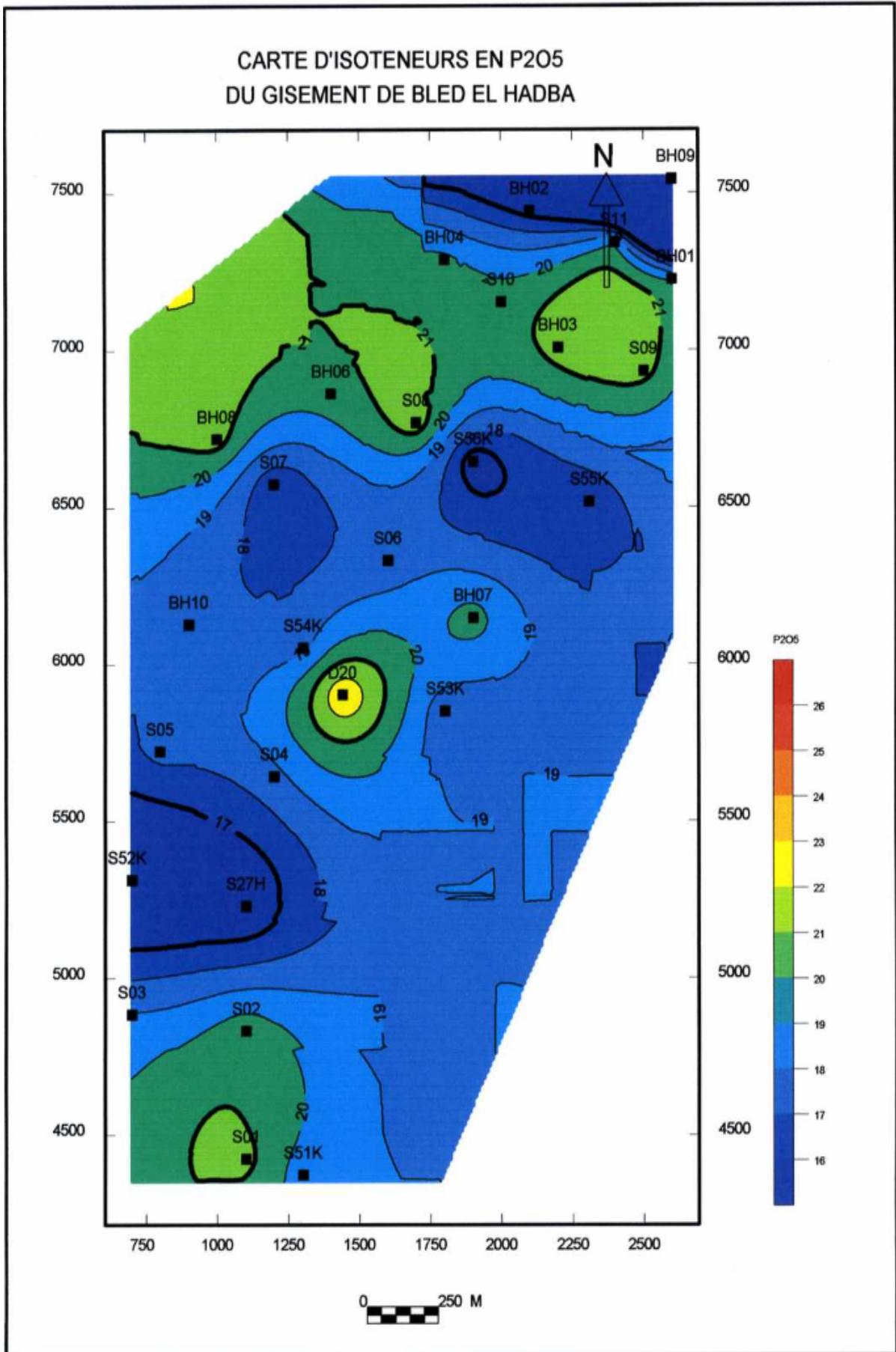


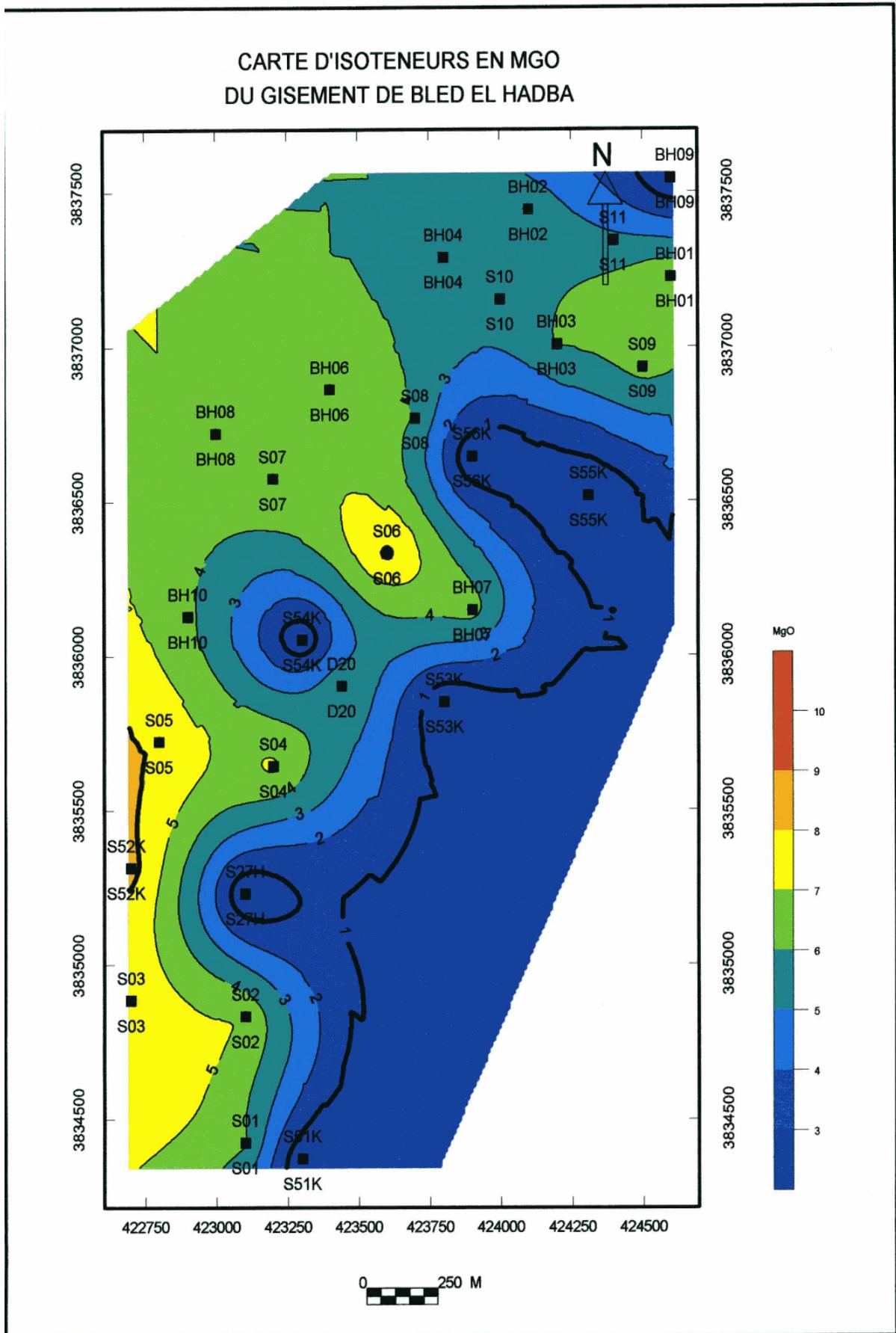












V.4.6) Calcul des réserves de la couche principale :

Après la procédure « Calculs- Détermine Formation ou Composite... » les statistiques calculées automatiquement par le GDM lors de l'enregistrement de la source de données « Composition data », sont portées sur un tableau « model ».

12.715							
	Nom étendu	Unité	Effectif	Minimum	Maximum	Moyenne	Ec ▲
2	Toit	M	58224	586.12000	763.34000	674.27000	5.
3	Mur	M	58224	574.72000	749.21000	661.55000	4.
4	Recouvrement	M	58224	24.450000	157.33000	93.870000	7.
5	Epaisseur de CP	M	58224	0.0000000	26.830000	12.715000	6.

Figure 11 : le tableau « model »

Sur la ligne « épaisseur » on note :

- Effectif = 58224, c'est le nombre de blocs de grilles valorisés
- Moyenne = 12.715, épaisseur moyenne de C P
- teneur moyenne de P₂O₅ et MgO

Nous avons en plus, la taille de la maille que nous avons déjà choisi dans le cadre « Créer Grille 2D ».

-la surface **S** de la maille étant :

$$S = 10 \times 10 = 100 \text{ m}^2$$

En multipliant cette surface par l'effectif et par l'épaisseur moyenne, nous obtiendrons le volume de la couche principale

$$V = 100 \times 58224 \times 12.715 = 74031816 \text{ m}^3$$

Le tonnage **T** de phosphate de la couche principale sera :

$$T = V \times \rho$$

ρ : la masse volumique de la roche de phosphate

La densité de la roche est égale à 2.22, ce qui implique que la masse volumique de cette roche est égale à 2.22 g /cm³

$$\text{Donc } \rho = 2.22 \cdot 10^3 \text{ Kg /m}^3$$

$$T = 74031816 \times 2.22 \cdot 10^3 = 164350631000 \text{ Kg} = 164.35 \text{ M.T (Million de Tonne)}$$

Les réserves (P) des (P₂O₅ ; MgO), seront ainsi calculées par le produit du tonnage de la couche principale par les teneurs moyennes de (P₂O₅ ; MgO) en cette couche.

$$P = T \times t$$

t : teneur moyenne, ($t_{P_2O_5} = 22 \%$, $t_{MgO} = 4 \%$)

$$P_{(P_2O_5)} = 164.35 \times 0.22 = 36.157 \text{ M.T}$$

$$P_{(MgO)} = 164.35 \times 0.04 = 6.574 \text{ M.T}$$

Les données de sondages renfermant les coordonnées des différentes stations prospectées, la stratigraphie et les teneurs des minerais correspondant aux différentes profondeurs ont été introduites. Après traitement de ces données les documents graphiques obtenus sont la carte topographique du site , la délimitation de la couche principale au toit et au mur et son épaisseur sans oublier les cartes iso teneurs du P₂O₅ et MgO. Des tableaux aussi ont été obtenus portant les résultats statistiques, notamment le tableau « model » dont nous nous sommes servis pour le calcul des réserves. Ces ressources sont estimées à 164,35 millions de tonne pour les phosphates ; 36,157 M.T et 6,574 M.T concernant les P₂O₅ et les MgO respectivement.

En conclusion on peut dire que le GDM nous a permis de calculer les réserves de phosphates au niveau du site de Bled El Hadba. Son usage est relativement simple ;il présente un panel complet pour l'usage des spécialistes.

Evidemment son interet réside dans la rapidité, une fois les données introduites, de l'exécution de graphiques non seulement pour un calcul de réserves mais aussi et surtout comme l'envisage Ferphos le suivi d'extraction mécanisée par l'établissement journalier de plans d'extraction.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La précision d'estimation des réserves géologiques d'un site géographique donné est liée principalement au degré d'exactitude dans la détermination de la répartition spatiale des différents paramètres du gisement d'un minéral utile. Ceci contribue, par la suite, à la fiabilité des résultats de prospection, permettant ainsi la prise de décisions appropriées et la maîtrise des travaux au moment du passage à l'exploitation qui sera assurée par une planification adéquate.

Après avoir cité les catégories de réserves géologiques, notre étude s'est basée essentiellement sur l'identification des paramètres et des méthodes de calcul de ces réserves fréquemment utilisées dans le domaine minier. Le traité des différentes méthodes a révélé que le niveau de précision des résultats fournis par ces procédés est fonction des lois mathématiques appliquées dans l'évaluation des ressources. C'est ainsi que les méthodes qui s'appuient sur les notions de la géostatistique s'avèrent les plus précises grâce à l'adaptation des concepts de cette discipline à la géologie minière. Or la rapidité du traitement et la crédibilité des résultats sont assurés par l'utilisation des logiciels.

Dans ce travail nous avons pris comme modèle le GDM pour calculer les réserves de phosphates au niveau du site de Bled El Hadba. Les données de sondages renfermant les coordonnées des différentes stations prospectées, la stratigraphie et les teneurs des minerais correspondant aux différentes profondeurs ont été introduites. Après traitement de ces données les documents graphiques obtenus sont la carte topographique du site ; la délimitation de la couche principale au toit et au mur et son épaisseur sans oublier les cartes iso teneurs du P_2O_5 , MgO. Des tableaux aussi ont été obtenus portant les résultats statistiques, notamment le tableau « model » dont nous nous sommes servis pour le calcul des réserves. Ces dernières sont estimées par ce logiciel à 164,35 millions de tonne pour les phosphates ; 36,157 M.T; 6,574 M.T concernant les P_2O_5 et les MgO respectivement.

Ces quantités évaluées par le GDM, semblent être intéressantes pour une exploitation rationnelle et un suivi à court ou moyen terme.

Pour Ferphos GDM lui permet d'assurer l'évaluation des ressources minérales à la fois dans le cadre de ses réserves mais aussi dans le cas de l'extraction mécanisée journalière comme cela est envisagé à Bled El Hadba pour une exploitation rationalisée dont les différentes étapes seront suivies de près par la quantification de ce qui est prévu pour l'extraction et de ce qui reste.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- **BENAMGHAR. A.**
Cours de géostatistique, ENP, 2007.
- **BOBILLIER Jacques.**
GDM (Geological Data Managment) L'outil quotidien du géologue (Guide de l'utilisateur), 2004.
- **BOUCHIN J.**
Présentation du logiciel GEOS3D Modélisation des gisements par krigeage 3D ,2000.
- **BRGM et SOFREMINES.**
Rapport des travaux de recherche du gisement de phosphate de Djebel Onk, 1992, rapport inédit. CERAD.
- **CETIM**
Rapport géologique inédit.
- **CHABOU M.C..**
Comparaison du calcul des réserves par la méthode de bloc géologique et de triangles sur l'exemple de la partie centrale de la zone 9 du gisement aurifère d'Amesmessa, Projet de fin d'étude, ENP, 1996.
- **CHABOU S.**
Cours d'évaluation, ENP, 2008.
- **Cherkaoui-Omari M. et Ouled Berrouigel R.**
Développement d'une interface pour la gestion des données multi sources et sa mise en place sur l'outil SIG vulcan 3d pour la modélisation géologique et la planification minière ; 2000.
- **ESRI.**
ESRI France Arc View, Statistical Analyst; 2002.
- **GILLES Guillot.**
Introduction à la géostatistique ; 2004.
- **KONESHLOO M.**
Caractérisation, estimation et valorisation de gisements d'argiles kaoliniques du bassin des Charentes ; 2007.
- **KANTE N..**
Application des méthodes géostatistiques à l'estimation des réserves géologiques, Projet de fin d'étude, ENP, 1998.
- **LOUNIS F.**
Projet d'ouverture et d'exploitation du gisement de calcaire de Kef Batha (Tissemsilt), Projet de fin d'étude, ENP, 2007.

ANNEXE

ANNEXE 1

Usages GDM des champs : Dans la liste suivante, les abrégés des usages sont inscrits entre parenthèses.

Indicatif réduit (INDR/SHID) : champ de type texte, longueur 4 caractères. Utilisé pour stocker un nom court d'échantillon, de sondage, de courbe, etc.

Indicatif complet (INDC/FLID) : champ de type texte, longueur définie par l'utilisateur (maximum 80 caractères). Utilisé pour stocker un nom long d'échantillon, de sondage, de courbe, etc.

Numéro d'échantillon (NECH/SAMP) : champ numérique de type entier long. Utilisé pour stocker un numéro d'échantillon, de sondage, de courbe, etc.

Texte/Code/Date (CODE) : champ de type texte, longueur définie par l'utilisateur. Longueur totale autorisée pour l'ensemble des champs Texte/Code/Date d'un tableau.

Code Palette (CODP) : sous-type de Texte/Code/Date, dont la longueur est limitée à 20 caractères au maximum. En effet, pour pouvoir utiliser un champ texte comme Code dans une Palette.

Coordonnée X ou Y ou Z (XXXX, ou YYYY, ou ZZZZ) : champ numérique de type décimal simple (7 ou 8 chiffres significatifs). Quand on établit un lien sur une Base externe contenant seulement les coordonnées X et Y, GDM attribue automatiquement la valeur 0 à la coordonnée Z. Unités possibles : Kilomètres, Mètres, Centimètres, Miles, Feet, Inches.

Azimut (AZIM) : champ numérique de type décimal simple. Utilisé pour les angles des sondages. Unités possibles : degrés, grades, radians.

Inclinaison (INCL) : champ numérique de type décimal simple. Utilisé pour les angles des sondages. Unités possibles : degrés, grades, radians.

Direction (DIR) : champ numérique de type décimal simple. Utilisé pour les angles des structures, ou les plans des sections dans lesquelles on digitalise. Unités possibles : degrés, grades, radians.

Pendage (DIP) : champ numérique de type décimal simple. Utilisé pour les angles des structures, ou les plans des sections dans lesquelles on digitalise. Unités possibles : degrés, grades, radians.

Profondeur fin (TO) : champ numérique de type décimal simple. L'unité doit être la même que celle de la Coordonnée Z.

Profondeur début (FROM) : champ numérique de type décimal simple. L'unité doit être la même que celle de la Coordonnée Z.

Epaisseur (THIC) : champ numérique de type décimal simple. L'unité doit être la même que celle de la Coordonnée Z.

Profondeur totale (TTD) : champ numérique de type décimal simple. L'unité doit être la même que celle de la Coordonnée Z.

Altitude (ALTI) : champ numérique de type décimal simple. L'unité doit être la même que celle de la Coordonnée Z.

Topographie (TOPO) : champ numérique de type décimal simple. L'unité doit être la même que celle de la Coordonnée Z.

Surface (AREA) : champ numérique de type décimal simple. Unités possibles : Kilomètres², Mètres², Miles², Feet², Inches², Hectares, Acres.

Densité (DENS) : champ numérique de type décimal simple. Unité quelconque (une densité n'ayant pas d'unité, elle ne sera pas prise en compte).

Ordre des points de courbe (ORDP) : champ numérique de type décimal simple. Unité quelconque. Obligatoire pour une connexion sur une base de données Access, Oracle, ou SQL-Server.

Variable (VARI): champ numérique de type décimal simple. Unité quelconque (pas prise en compte dans les calculs. C'est à l'utilisateur d'appliquer les coefficients nécessaires dans les calculs). [BOB. 2004]

ANNEXE 2

Les données des sondages du gisement de Bled El Hadba (données géologiques : lithologie).

N° Sondages	X	Y	Z	litho	Description	profondeur
BH01	424600	3837224	783.164	Sm	Sables Miocenes	13.6
BH01				CA	calcaires	23.5
BH01				C S	c-sommitale	36.2
BH01				C P	c-principale	47.5
BH01				C B	c-basale	59
BH01				MN	marnes noires	61.2
BH02	424100	3837444	777.459	Sm	Sables Miocenes	4
BH02				AM	argiles marneuses	75.5
BH02				CA	calcaires	85.4
BH02				C S	c-sommitale	100.7
BH02				C P	c-principale	102.7
BH02				MN	marnes noires	108.4
BH03	424200	3837006	782.673	Sm	sables miocenes	39
BH03				CA	calcaires	44.7
BH03				C S	c-sommitale	62
BH03				C P	c-principale	76
BH03				C B	c-basale	77
BH03				MN	marnes noires	158
BH04	423800	3837289	766.895	AM	argiles marneuses	39.9
BH04				SA	sables argileux	54.2
BH04				AM	argiles marneuses	75
BH04				CA	calcaires	84.1
BH04				C S	c-sommitale	100.1
BH04				C P	c-principale	121.3
BH04				MN	marnes noires	123.4
BH06	423400	3836862	755.259	Sm	sables miocenes	93.5
BH06				CAD	calcaires dolomies	125.8
BH06				CAD	calcaires dolomies	126.5
BH06				C S	c-sommitale	144
BH06				C P	c-principale	160.3
BH06				C B	c-basale	166
BH06				MN	marnes noires	167
BH07	423900	3836148	784.041	CAD	calcaires dolomies	7.3
BH07				C S	c-sommitale	21.8
BH07				C P	c-principale	34
BH07				C B	c-basale	36.6
BH07				MN	marnes noires	48.1
BH08	423000	3836718	748.504	AM	argiles/marnes	106
BH08				CA	calcaires	151.5
BH08				C S	c-sommitale	168
BH08				C P	c-principale	184.8

Données des sondages du gisement de Bled El Hadba (données chimiques)

N° Sondages	X	Y	Z	profondeur	P2O5	MgO	CaO	SiO2
BH01	424600	3837224	783.164	13.6				
BH01				22.5				
BH01				23.5				
BH01				25	18.98	8.76	43.97	2.61
BH01				26	25.25	3.96	48.96	3.98
BH01				27	25.72	2.96	48.86	5.31
BH01				28	25.6	3.1	48.46	6.06
BH01				29	25.64	2.61	48.96	3.87
BH01				30	15	8.78	43.43	1.15
BH01				31	14.3	8	44.51	2.75
BH01				32	24.32	3.74	48.86	1.75
BH01				33	22.99	4	48.28	1.99
BH01				34	20	6.88	45.77	2.05
BH01				35	23.75	3.87	48.82	1.85
BH01				36.2	25.26	2.84	49.94	1.41
BH01				37.3	26.78	2.26	51.69	2.81
BH01				38.4	26.4	2.97	51.63	2
BH01				39.5	24.51	3.61	48.46	1.84
BH01				40.5	23	5.94	47.38	0.53
BH01				41.5	24.5	3.36	48.82	2.29
BH01				42.5	23.87	4.39	47.98	1.82
BH01				43.5	23.14	7.74	42.36	0.58
BH01				44.5	24.59	7.45	43.79	1.42
BH01				45.5	24.71	7.47	43.72	0.66
BH01				46.5	25.75	6.71	43.79	1.94
BH01				47.5	23.63	7.74	41.64	2.64
BH01				48.7	19.8	7.74	42.36	4.65
BH01				49.7	14.24	10.07	42.36	1.35
BH01				50.7	23.63	7.61	42	5.08
BH01				51.7	20.53	4.48	42.72	1.25
BH01				54	23.06	4.12	42	11.12
BH01				55	15.21	6.19	42	7.6
BH01				59	20.78	7.71	42	10.3
BH01				61.2			42	
BH02	424100	3837444	777.459	4				
BH02				75.5				
BH02				85.4				
BH02				87	23.78	4.35	49.71	1.11
BH02				88	20.61	4.8	48.72	1.71
BH02				89	19.6	5.43	47.25	2.43
BH02				90	21.71	2.69	50.57	2.26
BH02				91	21.45	3.45	48.79	1.64
BH02				92	20.52	4.84	49	2.26
BH02				93	21.01	4.33	48.55	1.79
BH02				94	22.91	2.07	50.95	2.21