

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Minier

Projet de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du titre d'ingénieur d'état en Génie Minier

Thème

***Contrôle de la qualité de la Bentonite à la
production par méthode géostatistique. Cas du
gisement de M'Zila, Mostaganem***

Proposé et dirigé par :

Dr. BENAMGHAR Ahcène

Présenté par :

Mr. MEBARKI Walid

Juillet 2010

*E.N.P; 10, Avenue Hassen Badi, BP 182 EL-Harrach (1600) Alger.
Tél: +213-21-52-53-01/03 – Fax: + 213-21-52-29-73*

Remerciements

Je remercie Allah de m'avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce travail.

Je remercie mes parents de m'avoir élevé, instruit, pour tous leurs sacrifices...

Je tiens à remercier mon promoteur, Dr Ahcène Benamghar, de m'avoir impliqué dans cette « aventure ». J'ajouterai que tout en dirigeant ce mémoire monsieur Benamghar a su me laisser une grande liberté d'action; je le remercie encore pour son initiative et sa confiance.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants du département de génie minier de l'Ecole nationale polytechnique.

Je tiens à remercier vivement les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Je remercie aussi Mr Benioudren Azzedine, mon responsable de stage, et je tiens également à remercier le personnel de BENTAL de l'unité de Mostaganem, en particulier Mr Aziria Touati.

Un remerciement spécial à Mr Guendouz Bachir, ingénieur géologue, de l'unité de Mostaganem pour sa disponibilité et sa serviabilité.

Les mots s'épuisent sans doute, mais vous comprendrez que tout un univers de paroles ne saurait suffire pour vous dire MERCI,...

... je tiens à vous remercier très chaleureusement.

Walid Mebarki

ملخص

مقلع طينة ال بنتونيت بال مزيلة (ولاية مستغانم) يتكون من 14 طبقة شبه عمودية، متفاوتة نوعية للزوجة VL600 (الريولوجية).

من أجل إنتاج طينة بنتونيت ذات نوعية مطلوبة، تعتمد الأشغال الحالية على أخذ وتحليل متكرر لعدة عينات انطلاقا من عملية التحضير للمواد إلي غاية تخزينها في مصنع المعالجة. إن عملية تحديد العينات بهذه الطريقة تكون جد مكلفة ويمكن تجنبها بإتباع طريقة "جيوإحصائية" (geostatistical grade control) مدروسة للزوجة قبل استخراج المعدن.

تكون هذه الطريقة بالاعتماد على شوط وحيد من العينات من الطبقة المراد إستغلالها. تستعمل هذه المعطيات من أجل إحصاء التغيرات الفضائية لـ VL600 واستنتاج نموذج تقاربي لها ليستعمل في تخمين و تقدير متوسط اللزوجة في الطبقة المراد إستغلالها و مقدار تغيرها باحتمال 95%.

الكلمات المفاتيح: الهزيلة، طينة البنتونيت، إستغلال المناجم، اللزوجة، الإحصاء الرقمي، جيوإحصائية.

Résumé

Le gisement de Bentonite de M'Zila (Mostaganem, Algérie) est composé de 14 couches verticales aux qualités rhéologiques différentes (viscosité VL600).

Pour produire une Bentonite de qualité requise, l'exploitation actuelle procède à une multitude d'échantillonnages et d'analyse depuis la préparation des blocs d'exploitation, jusqu'au stockage dans l'usine de traitement. De telles opérations d'échantillonnages, onéreuses, peuvent être évitées si une méthode géostatistique de contrôle des teneurs (ici la viscosité) était mise en application.

Cette méthode démarre d'un seul set d'échantillons de la couche à exploiter. Elle utilise ces données pour modéliser la variabilité spatiale de VL600 et de là estimer, avec 95% de confiance, sa moyenne et sa variabilité dans la parcelle à exploiter.

Mots clés : Bentonite, géostatistique, contrôle des teneurs, krigeage, rhéologie, viscosité, exploitation, M'Zila.

Abstract

The Bentonite ore body of M'Zila (Mostaganem, Algeria) is composed of 14 vertical layers with quite varying rheological properties (VL600 viscosity).

To produce a Bentonite of wanted quality, the current mining operations proceed with a systematic sampling and laboratory checking from block planning, to transport to stockpiling in the mineral processing plant. Such expensive operations of sampling and analysis can be avoided if the "geostatistical grade control" method was applied. This proved method needs only one set of samples which is used in modeling the spatial variability of VL600 variable.

The model is then used to estimate the viscosity of the planned blocks and their variability with 95% confidence interval.

Key words: Bentonite, grade control, geostatistics, kriging, M'Zila, rheology, mining, viscosity.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre I : LES ARGILES BENTONITIQUES ET LEURS USAGES	
I.1. Les argiles.....	03
I.1.1. Propriétés et applications	03
I.1.2. Classification des minéraux argileux	04
I.2. La Bentonite	05
I.2.1. Genèse de la Bentonite	05
I.2.2. Autres minéraux associés à la Bentonite	06
I.2.3. Classification de la Bentonite	06
I.2.4. Structure de la Montmorillonite	06
I.2.5. Aspect macroscopique de la Bentonite	07
I.2.6. Propriétés physico-chimiques de la Bentonite	07
I.2.7. Les paramètres rhéologiques	09
I.2.8. Principales utilisations de la Bentonite	11
Chapitre II : PRESENTATION DU GISEMENT DE BENTONITE DE M'ZILA	
II.1. Présentation de l'entreprise ENOF et de la filiale BENTAL	14
II.1.1. Présentation de l'entreprise ENOF	14
II.1.2. Présentation de la filiale BENTAL.....	14
II.2. Localisation géographique et accès au gisement étudié de M'Zila	16
II.3. Géologie du gisement.....	18
II.3.1. Géologie régionale	18
II.3.2. Géologie locale	22
II.4. Production de la Bentonite de M'Zila	29
II.4.1. Exploration et échantillonnage	29
II.4.2. Conditions technico-minières du gisement de M'Zila	30
II.4.3. Exploitation de la Bentonite	31
II.4.4. Traitement de la Bentonite et la préparation industrielle.....	36
II.4.5. Les exigences du plan de contrôle	38

Chapitre III : GEOSTATISTIQUE

III.1. Historique et applications	39
III.2. Théorie de la variable régionalisée	40
III.2.1. Moments et stationnarité	41
III.3. Le semi-variogramme	43
III.3.1. Le semi-variogramme théorique	43
III.3.2. Le semi-variogramme expérimental	45
III.3.3. Modèles théoriques de variogrammes	46
III.4. Le krigeage.....	49
III.4.1. Le krigeage ordinaire.....	51
III.4.2. Krigeage simple	53
III.5. Variance d'estimation	54
III.6. Variance de dispersion	54
III.7. Contrôle des teneurs à la production	56
III.7.1. Prévion de la teneur d'une production programmée entre plusieurs chantiers.....	56

Chapitre IV : ETUDE DU CAS DU GISEMENT DE M'ZILA

IV.1. Présentation et exploration statistique des données.....	61
IV.1.1. Statistiques des données	61
IV.2. Exploration et modélisation variographique.....	69
IV.2.1. Variogramme omnidirectionnel de VL600	69
IV.2.2. Modélisation du variogramme	72
IV.2.3. Etude d'anisotropie	74
IV.3. Krigeage, résultat et interprétation	76
IV.3.1. Krigeage des données.....	76
IV.4. Variance d'estimation, de dispersion	85

CONCLUSION GENERALE	90
---------------------------	----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	92
-----------------------------------	----

LISTE DES FIGURES

Figure. I.1. Arrangement des octaèdres et tétraèdres dans un feuillet de Montmorillonite (HAYDN, 2007)	07
Figure. I.2. Modèle de Bingham (GARCIA et al, 1968)	10
Figure. I.3. Schéma descriptif du rôle de la boue de forage bentonitique (HAYDN, 2007)	12
Figure. II.1. Organigramme du groupe ENOF	15
Figure. II.2. A. Situation de la wilaya du Mostaganem dans l'Ouest de l'Algérie ; B. Localisation géographique du gisement de M'Zila (Carte Michelin).....	17
Figure. II.3. Carte géologique de la bordure occidentale du massif du DAHRA, Feuille N°103 à l'échelle 1/250 000, (PERRODON, 1957)	19
Figure. II.4. Colonne stratigraphique du bassin du Chélif dans la région de Mostaganem (BENTAL, 1994)	21
Figure. II.5. Colonne stratigraphique du gisement de M'Zila (BENTAL, 1994)	22
Figure. II.6. Les couches bentonitiques du gisement de M'Zila	23
Figure. II.7. Les rainures	30
Figure. II.8. Bloc d'exploitation journalière	33
Figure. II.9. Travaux d'extraction (BENTAL, 2009)	33
Figure. II.10. Chargement du minerai (BENTAL, 2009)	34
Figure. II.11. Transport du minerai (BENTAL, 2009)	35
Figure. III.1. Exemple	39
Figure. III.2. Schéma type d'un variogramme (CAUSEUR, 2006)	44
Figure. III.3. Exemples de variogrammes multidirectionnels (WACKERNAGEL, 1993)	46
Figure. III.4. Ajustement d'un modèle théorique (courbe) de semi-variogramme à un semi-variogramme expérimentale (croix) (CAUSEUR, 2006)	46
Figure. III.5. A ; B : Schéma type d'un semi-variogramme (effet de pépité), (CAUSEUR, 2006)	47
Figure. III.5. C ; D : Schémas type d'un modèle de semi-variogramme : exponentiel(C), gaussien (D), (CAUSEUR, 2006)	48
Figure. III.5. E : Schéma type d'un modèle de semi-variogramme sphérique	49
Figure. III.6. Schématisation de l'exploitation simultanée de plusieurs chantiers (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978)	57
Figure. IV.1. Les parcelles du gisement de M'Zila	63
Figure. IV.2. Localisation des échantillons de Bentonite tels que présentés en tableau IV.1 du gisement de M'Zila.....	66
Figure. IV.3. Histogramme des viscosités VL600, gisement M'Zila.....	67
Figure. IV.4. Diagramme de boîte à moustaches.....	68
Figure. IV.5. Tolérance linéaire (Nicolas, 2006).....	70
Figure. IV.6. Tolérance angulaire (Nicolas, 2006).....	70
Figure. IV.7. Tolérance linéaire et angulaire par rapport au voisinage de recherche (MUTABAZI et VANSNICK, 1991)	71
Figure. IV.8. Variogramme omnidirectionnel expérimentale de VL600 (croix) et le modèle ajusté (courbe continue)	71
Figure. IV.9. Variogramme expérimentale (points) de direction à $N0^\circ \pm 45^\circ$	73
Figure. IV.10. Variogramme expérimentale (points) de direction à $N30^\circ \pm 45^\circ$	73

Figure. IV.11. Variogramme expérimentale (points) de direction à $N60^\circ \pm 45^\circ$	73
Figure. IV.12. Variogramme expérimentale (points) de direction à $N90^\circ \pm 45^\circ$	73
Figure. IV.13. Etude d'anisotropie	74
Figure. IV.14. Variogrammes multidirectionnels.....	75
Figure. IV.15. Les blocs à estimer (la parcelle A- couche VII)	77
Figure. IV.16. Localisation de la parcelle à Kriger	78
Figure. IV.17. Voisinage de recherche	80
Figure. IV.18. Les blocs à estimer de la parcelle A – couche VII.....	80
Figure. IV.19. Schéma de découpage de la parcelle A – couche VII.....	81
Figure. IV.20. La carte de VL600*(Cp) (points estimés) par krigeage ordinaire de la parcelle A- couche VII	82
Figure. IV.21. La carte de VL600*(Cp) (blocs) par krigeage ordinaire de la parcelle A- couche VII	82
Figure. IV.22. La carte de la variance d'estimation σ^2e (Cp ²) (points estimés) par krigeage ordinaire de la parcelle A-couche VII.....	83
Figure. IV.23. La carte de la variance d'estimation σ^2e (Cp ²) (blocs) par krigeage ordinaire de la parcelle A-couche VII.....	83
Figure. IV.24. L'abaque utilisé pour le calcul de la variance de dispersion (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978)	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau. I. 1. Schéma simplifié montrant la classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces (BOURAS, 2003)	04
Tableau. II. 1. Caractéristiques géométriques, rhéologique et physico-mécaniques des couches (BENTAL, 2002)	25
Tableau. II. 2. Comparaison entre la composition chimique moyenne de la Bentonite de Mostaganem et des bentonites d'autres régions (BENTAL, 1994)	28
Tableau II.3. Les exigences du plan de contrôle du tout venant issu du gisement (BENTAL, 2003)	38
Tableau. IV. 1. Tableau représentatif de VL600 des parcelles avec les coordonnées X, Y	62
Tableau. IV. 2. Des échantillons prélevés dans les rainures (BENTAL, 2009)	64
Tableau. IV. 3. Paramètres pour le calcul des variogrammes	70
Tableau. IV.4. Caractéristiques géométriques de la parcelle A – couche VII (BENTAL, 2009)	77
Tableau. IV. 5. Résultats d'estimation locale des points de bloc de la parcelle A – couche VII	84

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

σ_e^2 : variance d'estimation

μ : multiplicateur de Lagrange

λ : poids de krigeage

θ : angle directionnel du variogramme

$\gamma(h)$: semi-Variogramme théorique

$\gamma_e(h)$: semi-Variogramme expérimental

a : portée du semi-variogramme

$C(0)$: palier du semi-variogramme

$C(h)$: Covariogramme à la distance h

C_0 : effet de pépité

e : erreur d'estimation

$E[]$: espérance mathématique

h : pas du semi-variogramme ou inter-distance moyenne

KS : krigeage simple

KO : krigeage ordinaire

$L(\lambda)$: Lagrangien

$D^2(v|V)$: variance de dispersion d'un volume v dans un volume V

m : moyenne

M : mode

S : médiane

σ : écart-type

C.V : coefficient de variation

n : nombre d'observations

$N(h)$: Nombre de paires d'observations séparées par la distance h

var : variance

X : coordonnée (Est-Ouest)

Y : coordonnée (Nord- Sud)

Z : élévation

V : volume d'un grand bloc

v : volume d'un petit bloc

P_a : production annuelle
 P_j : production journalière
 N_{jo} : nombre de jours ouvrables par année
 P_p : production par poste
 N_{pj} : nombre de postes par jour
 N : nombre de blocs exploités par jour
 θ_i : teneur moyenne vraie du bloc B
 θ_i^* : estimateur de la teneur moyenne du bloc B
 P_j : production totale au jour j
 p_{ij} : tonnage fournit par un bloc B au jour j
 t_{ij} : teneur vraie inconnue du bloc B au jour j
 T_j : teneur moyenne vraie effectivement récupérée.
 T_j^* : teneur moyenne prévue
 B_i : bloc
 L : longueur du bloc
 Z : hauteur du bloc
 λ : la largeur du bloc
 λ_r : la largeur de la rainure
VL600 : lecture directe du viscosimètre FANN
L600 : lecture de la viscosité à 600 rotations par minute
L300 : lecture de la viscosité à 300 rotations par minute
API: American Petroleum Institute
Cp: centpoise
 V_p : viscosité plastique
 Y_v : Yield value
 V_A : viscosité apparente
Res.75 : Résidu 75 μ pour la mesure du taux de sable.
IG : indice de gonflement
CPV : Compression à vert
CPX : Cisaillement à vert

Introduction générale

Les argiles présentent une grande diversité minéralogique et physico-chimique, qui leur procure des applications industrielles les plus diverses. Les plus connues sont les Kaolinites, les Illites, les Smectites et les Chlorites.

La Bentonite est une argile de la famille des Smectites. Elle provient de l'altération des Aluminosilicates. Elle est industriellement recherchée pour ses propriétés rhéologiques et physico-chimiques (viscosité, gonflement, adsorption ...).

La décision d'exploiter un gisement de Bentonite dépend de facteurs très divers, tels que la qualité de l'argile in-situ, le traitement et le transport. Dans la plupart des cas la décision dépend premièrement de la qualité de la matière première.

En effet, l'exploitation des gisements bentonitiques fait souvent face au problème de la variabilité des propriétés de l'argile in-situ. Cela cause de nombreux problèmes de qualité pour l'usine de traitement. Il est alors de la charge de l'ingénieur des mines d'établir un plan d'exploitation judicieux et intelligent pour produire un minerai de qualité requise et de variabilité maîtrisée. C'est ce qui est communément appelé par le monde des mineurs "Contrôle des teneurs à la production".

En Algérie, les grands gisements de Bentonite se rencontrent principalement dans le Nord-Ouest, dans les régions de Mostaganem et Maghnia. Leur exploitation industrielle remonte au milieu du 20^{ème} siècle.

Ces gisements sont caractérisés par une variabilité, parfois marquée, de leur qualités de sorte que l'établissement d'une carte qualité s'est imposé comme outil de gestion de l'exploitation.

Le gisement bentonitique de M'Zila fait partie du district de Mostaganem. Il est composé de 14 couches dressantes dispersées sur une surface de plus de 5Km² environ. La variabilité de la qualité de la Bentonite est telle que la mine procède systématiquement à une série onéreuse d'échantillonnages et analyses tout le long du processus de préparation, extraction, transport et stockage.

Cependant, cette méthode de travail est clairement très onéreuse et très compliquée par le nombre élevé d'échantillonnage systématiques de contrôles (nous avons compté au moins 5 échantillonnages distincts) et le risque d'erreurs qui en découlent.

Il est clair que la méthode d'exploitation actuelle est onéreuse et inadaptée. La méthode géostatistique de contrôle des teneurs à la production permet de produire un meilleur résultat à partir d'un seul échantillonnage, celui de la parcelle avant toute extraction.

En assimilant la viscosité à une variable régionalisée on peut estimer à l'aide d'un estimateur robuste et sans biais, c'est-à-dire le krigeage, les viscosités d'unités d'extractions miniers tels que les blocs d'exploitation journalière de la mine de M'Zila.

Le krigeage fournit également une variance d'estimation qui permet de connaître la variabilité des viscosités moyennes estimées des blocs avec un intervalle de confiance de 95%, avant leur exploitation. Cela est d'un grand intérêt au mineur et au traiteur qui peuvent ainsi planifier à l'avance quelle sera la viscosité la plus probable des blocs qu'ils vont extraire et avec quelle variance (ou variabilité), sans devoir les échantillonner systématiquement.

L'objet de ce mémoire concerne l'optimisation de l'exploitation du gisement bentonitique de M'Zila et en particulier l'amélioration des connaissances des variabilités rhéologiques de ces argiles.

Chapitre I

Les argiles bentonitiques et leurs usages

Avant d'entrer dans le détail de la géologie du gisement bentonitique de M'Zila, on présente dans ce chapitre la Bentonite et ses usages.

Un des objectifs de ce chapitre est de mieux comprendre la relation entre les propriétés industrielles souhaitées, la composition des dépôts in situ et les comportements des différents types d'argiles.

I.1. Les argiles

Il existe plusieurs définitions des argiles. Le terme « argile » n'aura pas le même sens en mécanique des roches, en physique du sol, ou en poterie. Il désigne, selon les cas, un ensemble d'espèces minérales, une famille de roches, une catégorie de sols ou encore une classe granulométrique. Sous cette appellation générique se cache donc une grande variété de matériaux, dont le point commun est de posséder des minéraux argileux, qui sont eux de nature bien précise (à base de silicates) et dont la structure confère à ces matériaux, comparativement à d'autres types de sols ou de roches, des propriétés bien spécifiques quant à leur interaction avec l'eau.

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés (il s'agit généralement de silicates d'aluminium, mais parfois de silicates de magnésium), dont la structure feuilletée les a fait se ranger dans la famille des Phyllosilicates. Selon la famille du minéral argileux considéré, les particules les plus fines peuvent être constituées d'un feuillet ou d'un assemblage de quelques feuillets. Leur taille est de l'ordre de 2 à 5 μm . Ces dimensions sont caractéristiques des particules argileuses et ne se retrouvent pas dans d'autres minéraux.

Souvent, le terme « argile » a un double sens : il désigne à la fois les minéraux argileux eux-mêmes, et les sols et roches contenant une assez grande quantité de particules argileuses. En mécanique des sols, on définit la fraction argileuse d'un sol comme étant le pourcentage en particules de moins de 2 à 5 μm de diamètre. Le matériau est lui-même qualifié d'argile s'il contient plus de 50% de minéraux argileux et une faible quantité de matières organiques (GAOMBALET, 2004).

I.1.1. Propriétés et applications

Les diverses applications des argiles sont liées à leurs propriétés spécifiques dont le gonflement-retrait, l'adsorption, l'échange d'ions et la nature de leurs surfaces.

L'argile, par la nature colloïdale de ses particules de silicates, montre en présence d'eau, des propriétés spécifiques qui permettent le façonnage. Après séchage et cuisson, elles forment des matériaux céramiques silicatés à usage décoratifs et culinaire. Calcinées à haute température avec du calcaire, elles forment des ciments. En association avec des minéraux riches en alumine, elles servent de matériaux réfractaires.

Les propriétés colloïdales des argiles sont largement utilisées dans l'industrie (papeterie, cosmétique, etc.). Les propriétés adsorbantes des argiles jouent un rôle très important dans l'agriculture (adsorption et échanges d'ions minéraux) et l'industrie (décoloration, dégraissage, clarification des eaux, etc.). Les argiles sont aussi exploitées pour leurs propriétés catalytiques: la surface étendue que forme leurs microcristaux favorise les propriétés physico-chimiques de ces surfaces.

Dans le milieu naturel, les argiles favorisent aussi bien la fertilité des sols, la rétention de polluants (pesticides par exemple), la formation de barrières géochimiques pour le stockage des déchets, les propriétés rhéologiques des boues de forage. Les matériaux argileux sont également des traceurs pétro-géochimiques: produits d'altération hydrothermale, indicateurs de diagenèse, propriétés chimiques d'adsorption, etc. (GRIDI, 2007).

I.1.2. Classification des minéraux argileux

La classification des minéraux argileux est basée sur des notions structurales : le nombre de couches octaédriques et tétraédriques.

Les minéraux argileux qui font partie du groupe des phyllosilicates se composent de couches élémentaires organisées de manière caractéristique : tétraèdres (SiO) et octaèdres (Al/MgO-OH). Le Tableau I.1 montre la classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces.

Tableau. I. 1. Schéma simplifié montrant la classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces (BOURAS, 2003).

Groupe de minéraux argileux	Espèce minérale	Structure T = couche de tétraèdres O = couche d'octaèdres
Kaolinites	Kaolinite Halloysite Dickite	Minéraux à 2 couches T-O T-O
Smectites	Montmorillonite Saponite Beidellite Nontronite	Minéraux à 3 couches T-O-T T-O-T
Illites Vermiculites Micas	Illite Vermiculite Muscovite Biotite	H ₂ O, cations
Chlorites	Chlorite	Minéraux à 4 couches T-O-T-O T-O-T-O
Sepiolites Palygorskites	Sepiolite (écume de mer) Attapulгите	Minéraux en lattes <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">T-O-T</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">T-O-T</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">T-O-T</div> </div>

I.2. La Bentonite

Le terme Bentonite a été employé en premier par Knight en 1898 (BOURG, 2004) pour décrire une argile plastique fortement colloïdale et fortement gonflante de la région de Fort Benton dans le Wyoming (Etats-Unis d'Amérique). Ce terme a ensuite été étendu aux matériaux naturels dont la composition et les propriétés sont dominées par les Smectites.

Plus précisément, la Bentonite est une argile dont le principal constituant est la Montmorillonite. Ce dernier nom fut proposé pour la première fois en 1847, pour désigner une argile plastique découverte à Montmorillon, en France (HAYDN, 2007).

I.2.1. Genèse de la Bentonite

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des Smectites. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de Bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de Montmorillonite.

La Bentonite se caractérise par une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement, ainsi que par des propriétés rhéologiques particulières (thixotropie : transformation d'un produit de l'état de gel à l'état liquide lorsqu'on le mélange ou qu'on le secoue). Elles ont de ce fait de larges applications, toujours plus nombreuses, dans différents domaines (forage, fonderie, céramique, peinture, pharmacie, terres décolorantes, ..., etc.). La majeure partie de la Bentonite exploitée dans le monde est utilisée comme liant du sable de moulage, dans l'industrie de la fonderie et aussi pour épaissir les fluides de forage.

Pour de nombreuses applications techniques, la Bentonite brute doit être soumise à une préparation adaptée aux exigences d'utilisation (activation). Ainsi, lors de l'activation alcaline, la Bentonite calcique (la plus fréquente) est transformée par traitement avec de la soude en Bentonite sodique, qui se caractérise notamment par une capacité de gonflement plus élevée.

L'activation avec des acides, comme l'acide chlorhydrique, augmente la porosité par dissolution périphérique des Smectites. Il en résulte un produit de haute capacité d'adsorption.

En Algérie, les gisements de Bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'Oranie (ouest algérien). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes, et celle de Mostaganem (M'Zila) avec des réserves de deux millions de tonnes (BOURAS, 2003).

I.2.2. Autres minéraux associés à la Bentonite

En dehors de la Montmorillonite, qui en constitue l'essentiel, la Bentonite peut renfermer d'autres minéraux associés (HAYDN, 2007) :

- ✓ Des minéraux argileux : Chlorite ou Sépiolite.
- ✓ Du quartz ou des résidus de silice amorphe.
- ✓ Des carbonates.
- ✓ Des sulfates (gypse).

I.2.3. Classification de la Bentonite

Il existe deux types de Bentonite :

- ❖ la Bentonite sodique ou à base de sodium (Na-bentonite) qui augmente de volume lorsqu'elle est humide et qui peut absorber plusieurs fois sa masse en eau.
- ❖ La Bentonite calcique (Ca-bentonite) où Fe peut partiellement remplacer Al et gonfle peu. Elle forme par contre avec l'eau une suspension thixotropique (HAYDN, 2007).

I.2.4. Structure de la Montmorillonite

L'établissement des structures de la Montmorillonite a fait l'objet de nombreuses études (HAYDN, 2007). La montmorillonite appartient au groupe des minéraux argileux à 14 Å, caractérisé par un feuillet qui comporte une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques type ½ (Fig. I.1).

La Montmorillonite est composée d'unités constituées de deux couches de silicium tétraédrique et d'une couche centrale d'aluminium octaédrique. Ces couches sont disposées de telles sortes que les atomes d'oxygènes des sommets de chaque tétraèdre de silicium et un des plans d'hydroxyles de la couche octaédrique se situent dans un même plan.

Les sommets des tétraèdres sont formés par quatre atomes d'oxygène reliés à l'atome de silicium central ainsi qu'aux atomes d'oxygènes des octaèdres par liaisons covalentes. Les octaèdres ont par contre leurs sommets occupés par quatre atomes d'oxygènes et deux hydroxyles reliés à l'atome d'aluminium central par liaisons de coordinance.

Les hydroxyles de la couche octaédrique sont placés directement en dessous des cavités Hexagonales de réseau d'oxygène de couches tétraédriques.

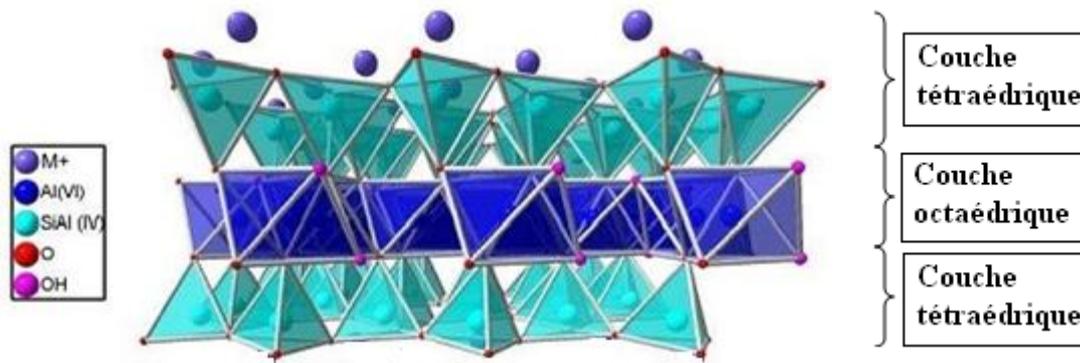


Figure I. 1. Arrangement des octaèdres et tétraèdres dans un feuillet de Montmorillonite (HAYDN, 2007).

I.2.5. Aspect macroscopique de la Bentonite

La Bentonite est un matériau au toucher savonneux, faisant des copeaux sous l'ongle, généralement non plastique à son humidité.

A l'affleurement, elle forme rapidement par dessiccation d'importantes fissures de retrait. Un des traits caractéristiques de ces affleurements est l'absence de ravinement que l'on y observe par le jeu des hydratations et dessiccations successives, il se crée un talus constitué de petits grains d'argile. A la moindre pluie, ces grains gonflent et forment une mince couverture continue et parfaitement imperméable sur laquelle l'eau ruisselle (BENTAL, 1994).

I.2.6. Propriétés physico-chimiques de la Bentonite

I.2.6.1. Gonflement

Mise en suspension dans l'eau, la Bentonite forme une suspension colloïdale provoquant un important gonflement qui est un des indices marquants de ce produit. Les bonnes Bentonites commerciales gonflent jusqu'à 15 à 20 fois leur volume initial. Certaines qualités peuvent atteindre un gonflement de 40 fois.

Cependant, cette propriété de gonflement est détruite par la chaleur. Elle est réversible et peut être activée par des additions de soude ou de phosphate solubles.

I.2.6.2. Capacité d'échange d'ions

Pour la compensation des charges, des cations sont faiblement liés au réseau structural. Ils sont d'habitude alcalins ou alcalino-terreux. Susceptibles d'être échangés dans certaines conditions. L'épaisseur des couches d'eau entre les feuillets de la Montmorillonite dépend du cation interchangeable: pour le Na^+ , il y a une couche monomoléculaire (distance interlamellaire = 12.5Å); avec des ions Ca^{+2} il y a deux couches de molécules d'eau (distance = 14.5 à 15Å). Les cations échangeables ont une influence notable sur les propriétés des Bentonites.

I.2.6.3. Plasticité

Du fait de leur richesse en particules colloïdales, les Bentonites sont très plastiques. L'étendue du domaine plastique (IP : indice de plasticité) des bentonites est élevé et varie de 500 à 700 % suivant la nature de la Bentonite.

Les bentonites sont capables de retenir sous forme « rigide » une grande quantité d'eau (IL : indice de liquidité) de façon à constituer un état plastique. Les Montmorillonites sodiques ont des valeurs qui vont de 350% à plus de 700% tandis que les Montmorillonites calciques ont des valeurs de IL de 100 à 200 %.

Par broyage, la Bentonite peut être réduite à un diamètre dix fois plus fin que celle du ciment.

I.2.6.4. Gels de Bentonite

Si la quantité d'eau introduite dans une Bentonite est faible, les particules s'immobilisent les unes contre les autres et on obtient des gels de dureté variable avec la concentration et dont la consistance augmente plusieurs heures après la préparation.

Ces gels manifestent le phénomène de thixotropie, c'est à dire qu'ils épaississent au repos prolongé et reprennent leur viscosité normale par simple agitation.

I.2.6.5. Suspension de Bentonite

Si la quantité d'eau d'apport est forte par rapport à la quantité de la Bentonite, la dispersion atteint progressivement un degré très élevée. C'est ainsi qu'à des concentrations de l'ordre de 5% dans l'eau pure les bentonites peuvent donner des suspensions qui demeurent stables pendant plusieurs jours.

Le pH de ces suspensions est généralement au voisinage de 9, qui correspond à l'optimum de stabilité. Les acides provoquent la précipitation à une rapidité croissante avec la variation du pH.

I.2.6.6. La teinte de la Bentonite

La teinte de la Bentonite est souvent indicatrice de ses applications. La Bentonite de couleur vert brunâtre est généralement de qualité pour les boues de forage, tandis que la Bentonite blanchâtre est bonne pour les moules de fonderie (DEHIM; 2004).

I.2.7. Les paramètres rhéologiques

I.2.7.1. La viscosité plastique

La viscosité plastique V_p (Cp) est mesuré au viscosimètre FANN, elle est égale à la

différence entre la lecture L600 et la lecture L300 :

$$V_P = L600 - L300$$

L600 : Lecture de la viscosité à 600 (rpm) (rotation par minute) ;

L300 : Lecture de la viscosité à 300 (rpm) (rotation par minute).

Elle dépend de la teneur en solides de la boue. Une augmentation de viscosité plastique ne pourra être combattue que par une élimination de solides (par centrifugation) ou, bien entendu, par dilution. Par ailleurs, la viscosité plastique va être liée à la taille des particules et aussi à leur forme (GARCIA et PARIGOT, 1968).

I.2.7.2. "Yield value" (ou Yield point)

La "Yield value" c'est la tension minimale en dessous de laquelle il n'y a pas écoulement, en pratique les boues de forage appliquent le plus souvent le modèle de Bingham (Fig. I.2) :

$$F = Y_V + V_P \cdot g$$

Avec :

F : Tension de cisaillement (Pa) ;

Y_V : Yield value (Ib/100ft²);

V_P : Viscosité plastique (Cp);

g : Vitesse de rotation (rpm).

La yield value est due surtout aux interactions physiques ou chimiques existant entre les particules en suspension. Ces interactions vont dépendre aussi de la distance entre particules, donc de leur nombre, donc de la teneur en solides. La forme et la taille des particules vont aussi agir sur la yield value.

La yield value est aussi donnée par la formule suivante (GARCIA et PARIGOT, 1968) :

$$Y_V = L300 - V_P$$

L300 : Lecture de la viscosité à 300 rpm (rotation par minute) ;

V_P : La viscosité plastique (Cp).

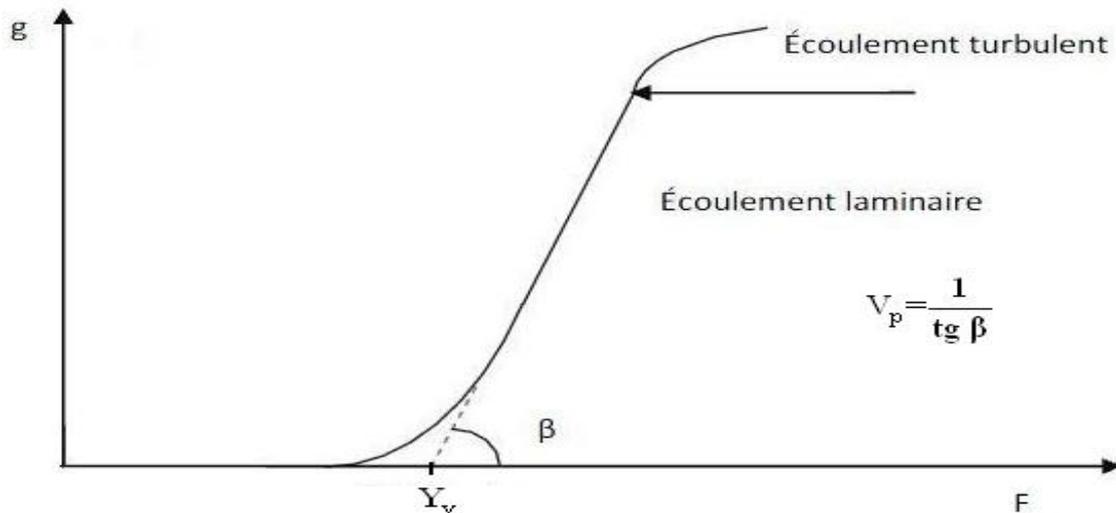


Figure. I. 2. Modèle de Bingham (GARCIA et PARIGOT, 1968).

I.2.7.3. La filtration (filtrat)

Lorsque la boue se trouve au contact des parois plus ou moins perméables du trou de forage, la partie liquide filtre dans la formation en déposant sur les parois sa partie solide que l'on appelle "cake". En effet, les hauts filtrats peuvent déliter les formations délicates (argiles, marnes) et favoriser les éboulements. De plus, le cake déposé peut être épais au point d'empêcher le passage de la tête de l'outil de forage lors des manœuvres de changement d'outils. Pour ces raisons, il est extrêmement important de connaître la filtration.

Le filtrat doit être :

- ✓ Suffisamment élevé pour augmenter la vitesse d'avancement du forage ;
- ✓ Suffisamment bas pour ne pas déliter ou faire gonfler les formations argileuses et marneuses et pour éviter les collages du matériel tubulaire en face des zones perméables (calcaires, dolomies, grès, etc.);
- ✓ Il ne doit pas envahir les formations productives, occasionner des émulsions avec l'huile en place (pétrole ...) ou modifier la porosité et la perméabilité de ces formations, etc.

Fixer le filtrat que doit posséder une boue est un problème délicat qui nécessite une grande connaissance des problèmes et des objectifs de forage. En résumé, des filtrats de 20 à 25cm³ en 30mn sont courants en forage (GARCIA et PARIGOT, 1968).

I.2.7.4. La concentration en sable (résidu <75μ)

On appelle "sable", en terminologie des boues, les particules qui ne passent pas sur un tamis de 200 mesh Tyler, c'est-à-dire les particules dont le diamètre est supérieur à 0,075 mm. Des particules inférieures à 0,075 mm (75 microns) sont appelées "silt". La présence de sable dans une boue a un effet abrasif sur toutes les pièces en mouvement et en particulier sur les chemises et pistons des pompes ainsi que sur les outils. De plus, à concentration élevée le sable augmente la densité de la boue et peut sédimenter dans le trou pendant les arrêts de circulation risquant d'occasionner des coincements.

I.2.7.5. La viscosité apparente

Ce paramètre présente le rendement d'une argile qui est le volume de boue à 15 centipoise de viscosité apparente V_A (Cp) que l'on peut obtenir avec une tonne de produit sec.

La viscosité apparente est donnée par la formule suivante (GARCIA et PARIGOT, 1968) :

$$V_A = \frac{L600}{2}$$

L600 : Lecture de la viscosité à 600 rpm (rotation par minute).

I.2.8. Principales utilisations de la Bentonite

L'utilisation de la Bentonite dans différents domaines d'activités, est liée aux propriétés originales qu'elle possède telles que la capacité de gonflement et le pouvoir adsorbant. Néanmoins elle doit quelques fois subir des traitements pour une utilisation spécifique. C'est le cas de la Bentonite destinée aux fluides de forage.

I.2.8.1. La Bentonite dans les boues de forage

La Bentonite sodique est la constituante majeure des boues de forage. Nous n'entrerons pas ici dans une description détaillée du rôle joué par la Bentonite dans les boues de forage. Il suffit de comprendre que le quasi totalité des forages pour le pétrole et le gaz se fait en milieu fluide.

L'eau seule n'ayant pas la viscosité souhaitable, on y ajoute la Bentonite. La boue de forage joue un rôle essentiel en refroidissant et lubrifiant l'outil de forage, en maintenant les parois et en véhiculant les débris et fragments arrachés des roches vers la surface. La boue maintient aussi une pression hydrostatique sur les couches traversées (Fig. I.3). Cette application de la Bentonite est évidemment reliée au nombre de trous forés et non à la productivité des puits. C'est ce qui explique la position dominante du marché mondiale.

De fait la publication "Word Oil" rapportait que 89 % du total des mètres forés en exploration pour le pétrole et le gaz l'avait été en Amérique du Nord qui produisait la même année 24 % seulement de la production mondiale de Pétrole.

La quantité de Bentonite par 300 mètres forés a varié de 4,05 à 4,72 tonnes. On peut donc estimer une utilisation de 4 tonnes de Bentonite par 300 mètres forés pour jauger du potentiel d'un marché. Et grâce aux propriétés rhéologiques, une tonne de Bentonite sodique permet de produire plus de 16 m³ de boue, pour le forage en milieu non salé (HAYDN, 2007).

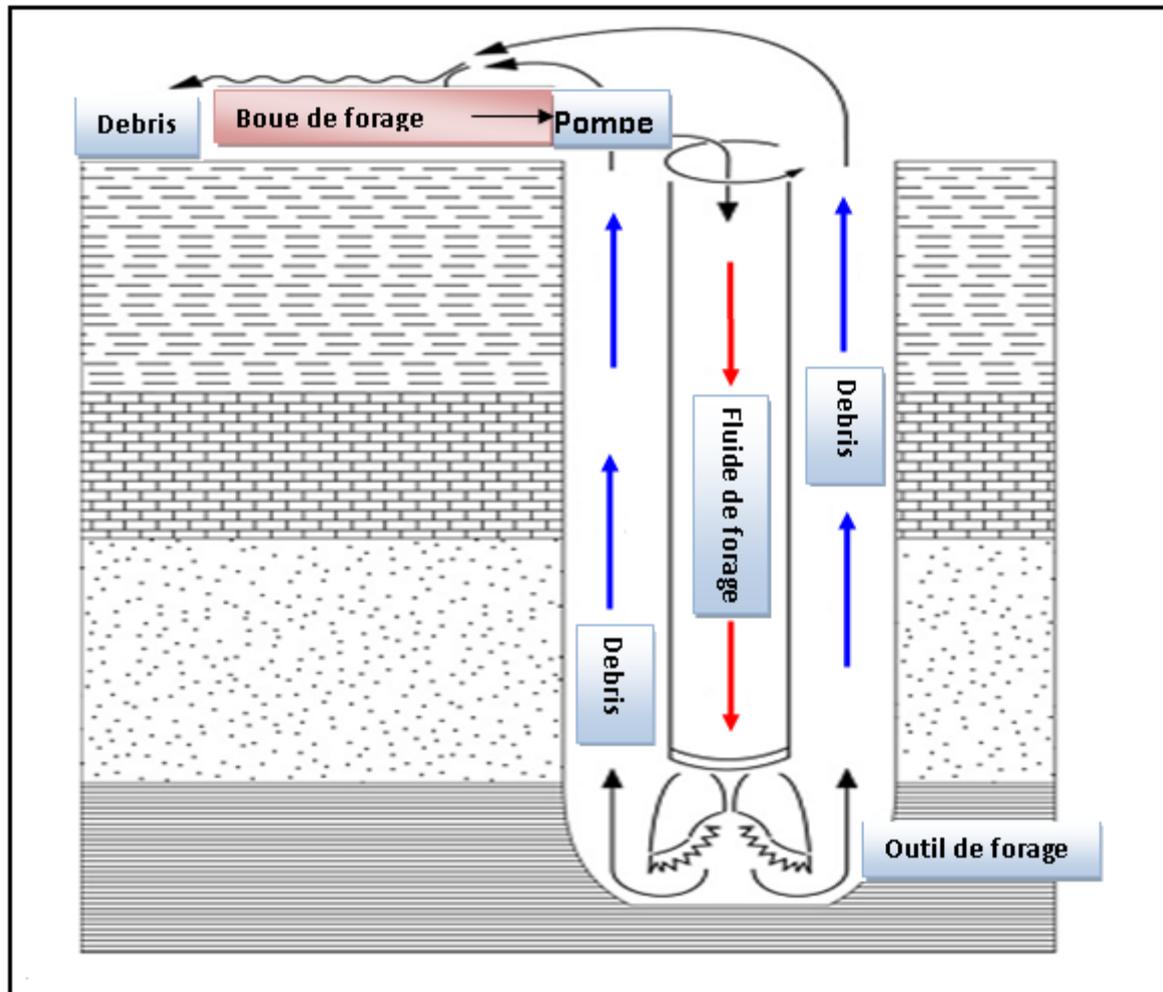


Figure. I. 3. Schéma descriptif du rôle de la boue de forage bentonitique (HAYDN, 2007).

I.2.8.2. La Bentonite de fonderie

La Bentonite de fonderie sert à la préparation des moules en fonderie. Cette application est liée à l'arrivée des sables qualifiés de synthétiques sur le marché. Ce sont essentiellement des sables de silice auxquels on mêle une argile sodique dans une proportion de 4 à 6 %. Cette proportion peut varier considérablement et peut atteindre 10 à 15 % pour les moulages à pression.

L'argile utilisée peut être une Bentonite naturelle du type Wyoming ou une Bentonite de traitement (terres décolorantes ou Bentonite non-gonflante selon la terminologie américaine, traitée en y ajoutant de faible quantité de carbonate de sodium). La tendance des sables dits synthétiques à remplacer les sables naturels (bien que ceux-ci continuent d'être utilisés) s'explique par leur uniformité et la fiabilité des résultats d'application.

La pénétration de ce secteur par les Bentonites est un développement qui s'accroît. Aux États-Unis, le sable de fonderie est le premier marché pour les bentonites non-gonflantes et le troisième en importance pour la Bentonite du type Wyoming (HAYDN, 2007).

I.2.8.3. Bouletage des minerais de fer

Le bouletage du minerai de fer consiste à agglomérer les particules de minerai en forme de boulettes grâce à l'ajout de 4.5 à 8 Kg de Bentonite par tonne de minerai.

La Bentonite naturelle (gonflante) est préférée par les compagnies minières à cause de ses qualités liantes supérieures et de son action de renforcement à haute température. Les compagnies visent évidemment à utiliser le moins de Bentonite possible pour atteindre les propriétés désirables dans le bouletage. Essentiellement, les boulettes doivent être suffisamment solides pour résister au transport et à la manutention et posséder une bonne réductibilité.

Des études ont montré que l'utilisation d'additifs (de quelque nature que ce soit) dans le procédé de bouletage, comporte certains désavantages. Ainsi la Bentonite contamine les concentrés de minerai, diminuant le contenu en fer de 0,6 % et augmentant le contenu en silice de 0,5 % pour chaque unité (%) de Bentonite ajoutée. Ce faisant, la teneur du concentré au haut fourneau est réduite, nécessitent ainsi l'usage de quantités additionnelles de calcaire et de coke durant la réduction.

L'industrie du fer oriente surtout ses recherches vers l'amélioration des qualités chimiques des boulettes, par exemple, en ajoutant de la chaux (HAYDN, 2007).

I.2.8.4. En génie civil

Pour la création de voile d'étanchéité d'excavations, l'injection de coulis de ciment, la présence de Bentonite permet le maintien en suspension du ciment.

I.2.8.5. Terres décolorantes

La Bentonite trouve également des débouchés pour la décoloration des huiles et comme support de catalyse (Bentonite activée à l'acide).

I.2.8.6. Autres utilisations

La Bentonite est un nanocomposite recherché comme charge minérale dans les insecticides et pesticides, les aliments de bétails, les engrais, les produits cosmétiques, les polymères, en pharmacie (comme pansement gastrique) etc.

Chapitre II

Présentation du gisement de Bentonite de M'Zila

Nous présentons ici brièvement la géologie du gisement de Bentonite de M'Zila. Cela en utilisant la multitude de références bibliographiques faite déjà sur la géologie du gisement (BENTAL, 1994; BENTAL, 2002 ; PERRODON, 1957; SONAREM, 1972).

II.1. Présentation de l'entreprise ENOF et de la filiale BENTAL

II.1.1. Présentation de l'entreprise ENOF

Le groupe algérien ENOF Spa (Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux et des Substances Utiles) exploite 18 mines et carrières répartis sur le territoire national. Il est organisé en 6 filiales depuis le 1er janvier 2001, il produit une gamme variée de minerais non ferreux et des substances utiles non métalliques.

Le groupe ENOF a pour vocation : la production, la commercialisation et le développement de nouveaux produits miniers. La diversité et la qualité de ses produits font du groupe ENOF un acteur incontournable sur le plan national et international.

II.1.2. Présentation de la filiale BENTAL

La Société des Bentonites d'Algérie, BENTAL, est une filiale du groupe ENOF Spa.

L'objet social de BENTAL est la recherche, le développement, la production, l'importation, l'exportation, et la distribution en l'état ou après transformation de tous produits miniers et substances minérales non métalliques.

L'ENOF a transféré à la société BENTAL le patrimoine et les activités des deux unités de Mostaganem et de Maghnia.

L'unité de Mostaganem, produit et commercialise de la bentonite, dont les principales débouchées sont :

- Les forages pétroliers et hydrauliques : comme additifs dans les boues,
- La fonderie pour le moulage,
- Les engrais, les pesticides et insecticides comme charge minérale.

L'unité de Maghnia, produit et commercialise :

- La bentonite pour les mêmes débouchés que ceux désignés précédemment,
- La terre décolorante pour la purification des huiles, la fabrication de graisse, la céramique du carbonate de calcium pour le forage pétrolier comme additif dans les boues, pour la fabrication des enduits et mastics ainsi que pour la verrerie et le carreau sol.

L'organigramme de la figure. II.1 présente toutes les filiales, unités et projets de l'ENOF.

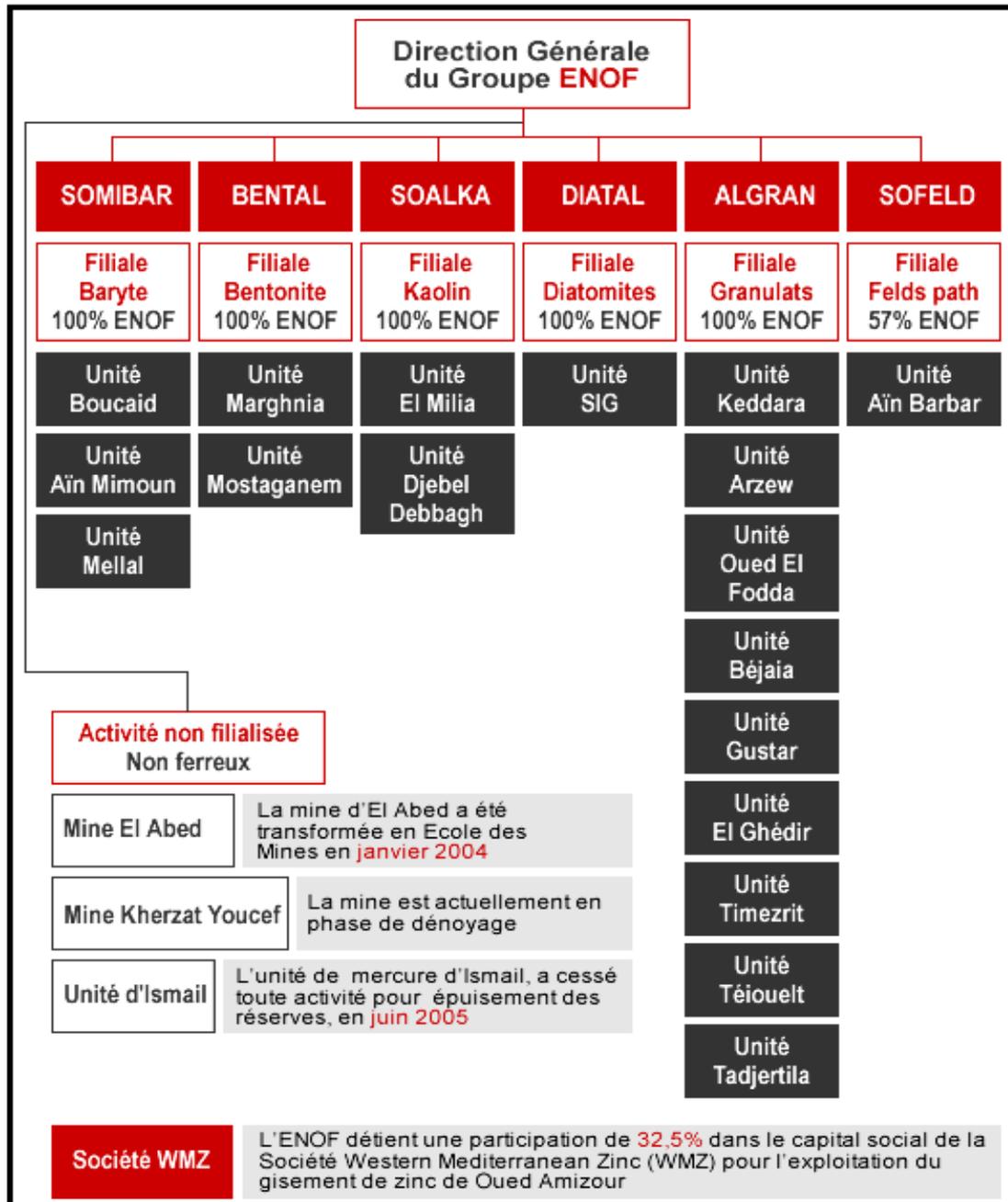


Figure. II. 1. Organigramme du groupe ENOF.

II.2. Localisation géographique et accès au gisement étudié de M'Zila

Le gisement d'argiles bentonitiques brutes de M'Zila est situé à 45 km au Nord est de la ville de Mostaganem et à environ 10 Km à l'est du village côtier Achasta, dont le port accueille l'usine de traitement de la Bentonite (Fig. II.2).

L'infrastructure routière actuelle est adéquate pour la plupart des travaux et les tâches courantes. Cependant le plus grand inconvénient que nous pouvons relever ce sont les pistes d'accès aux chantiers d'exploitation qui deviennent impraticables pendant les périodes pluvieuses.

Le caractère essentiel de la topographie du gisement réside dans l'apparition d'une masse marneuse qui forme des crêtes, de 0 à 100 m, plus marquée à l'Est. L'érosion par drainage et par ravinement a donné un cachet bien particulier à cette zone.

Champ minier s'étale sur une superficie d'environ 5 Km², allongée dans le sens Est-Ouest.



Figure. II. 2 : A. Situation de la wilaya du Mostaganem dans l'Ouest de l'Algérie ; B. Localisation géographique du gisement de M'Zila (Carte Michelin).

II.3. Géologie du gisement

II.3.1. Géologie régionale

Le bassin du bas Chéelif forme une cuvette intra montagneuse de direction NE SW. Il se situe dans la zone externe de l'atlas tellien occidental qui correspond au segment algérien de l'orogénèse alpine.

D'Est en Ouest, le bassin de Chéelif est subdivisé en trois ensembles géographiques.

- le haut Chéelif;
- le moyen Chéelif;
- le bas Chéelif.

Le bassin du bas Chéelif est situé entre deux ensembles de formation essentiellement secondaires qui sont le massif du Dahra au Nord et l'Ouarsenis au Sud. Les dépôts accumulés du bassin du bas Chéelif vont du Miocène post nappe (Miocène moyen-sup) au Quaternaire (Fig. II.3).

Les reliefs occupent une partie importante dans le bassin où ils viennent s'accoler au massif créacé du Dahra pour former un même ensemble orographique. Dès la mise en place du bassin (miocène inf et moy), des mouvements NS à NO/ SE ont engendré le plissement des différentes formations Moi-plio-Quaternaire ainsi que la mise en place des failles. Ces différentes phases se traduisent par des discordances angulaires observées sur le terrain entre le Miocène Inférieur le Miocène supérieur et le Pliocène et à l'intérieur même de ces étages. Les cinérites forment un faciès important dans la formation des bentonites de la région étudiée (PERRODON, 1957).

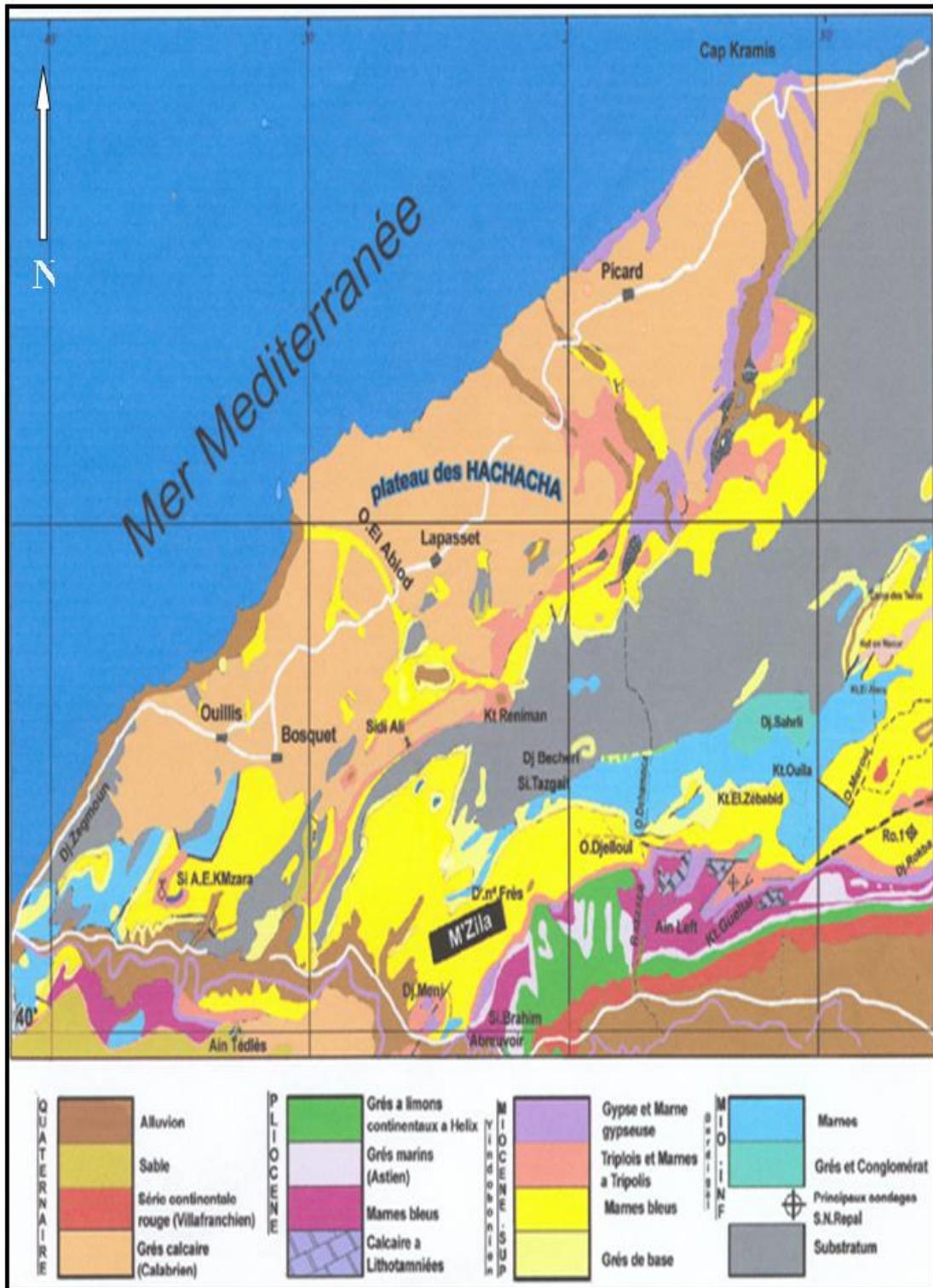


Figure. II. 3. Carte géologique de la bordure occidentale du massif du DAHRA, Feuille N°103 à l'échelle 1/250 000, (PERRODON, 1957).

II.3.1.1. Stratigraphie du bassin du bas Chélif (région de Mostaganem)

Géologiquement, le gisement de M'Zila fait partie du bassin du Bas Chélif, ce dernier est de type intra montagneux comblé de sédiments du Mésozoïque, Cénozoïque et de dépôts du Quaternaire (Fig. II.4).

Mésozoïque

Il est représenté par le Crétacé inférieur, il affleure sur une longue bande orientée Nord Est et caractérisé par des dépôts de quartzite, de calcaire siliceux et de marnes schisteuses, d'une épaisseur de 200m environ.

Paléogène

Il est représenté par l'Oligocène qui affleure sur la côte au Nord Ouest sur une surface réduite, il est caractérisé par des marnes, des argiles marneuses, du sable brun, des grès et des calcaires marneux.

Miocène

Le Miocène est très largement développé dans la région.

Miocène inférieur : il est représenté par une série monotone d'argiles, et des marnes renfermant des veines de gypse, grès et conglomérats.

Miocène supérieur : il comporte une série de grés glauconieux, de marnes argileuses et une puissante couche de marnes bleues (550m) renfermant des intercalations de calcaires, de grés et d'argiles bentonitiques et d'argiles gypsifères. Le gisement de M'Zila appartient à cet horizon d'argiles bentonitiques. Les niveaux de cinérite observés dans la formation des marnes bleues sont riches en glauconie et de soufre au niveau des ponts de Chélif tandis qu'au bassin elles sont représentées par des tufs ryolithiques qui séparent les deux formations Tiélat et Tefaraoui, ce niveau est riche en feldspath, Micas, silice en boule.

Miocène terminal : le Miocène terminal repose sur les formations du Miocène supérieur. Il affleure en bandes caractérisé par une alternance de marnes à tripolis purs et de calcaires siliceux, l'épaisseur totale peut atteindre 30m.

Pliocène

En discordance sur le Miocène, le Pliocène offre une partie inférieure composée de grés, de grés et conglomérats ; le tout surmonté par des grés marins (Astien) et des grés et limons continentaux à hélix. Ces dernières formations sont en discordance avec les précédentes.

Quaternaire

Il est représenté par des grès calcaires, évoluant à travers toute la zone Nord Ouest de la région de Hadjads et Sidi Ali jusqu'à la mer méditerranée par de différentes roches continentales rubéfiées, sableuses et argileuse, ainsi que par des sables marins côtiers tout au long de la côte (BENTAL, 1994).

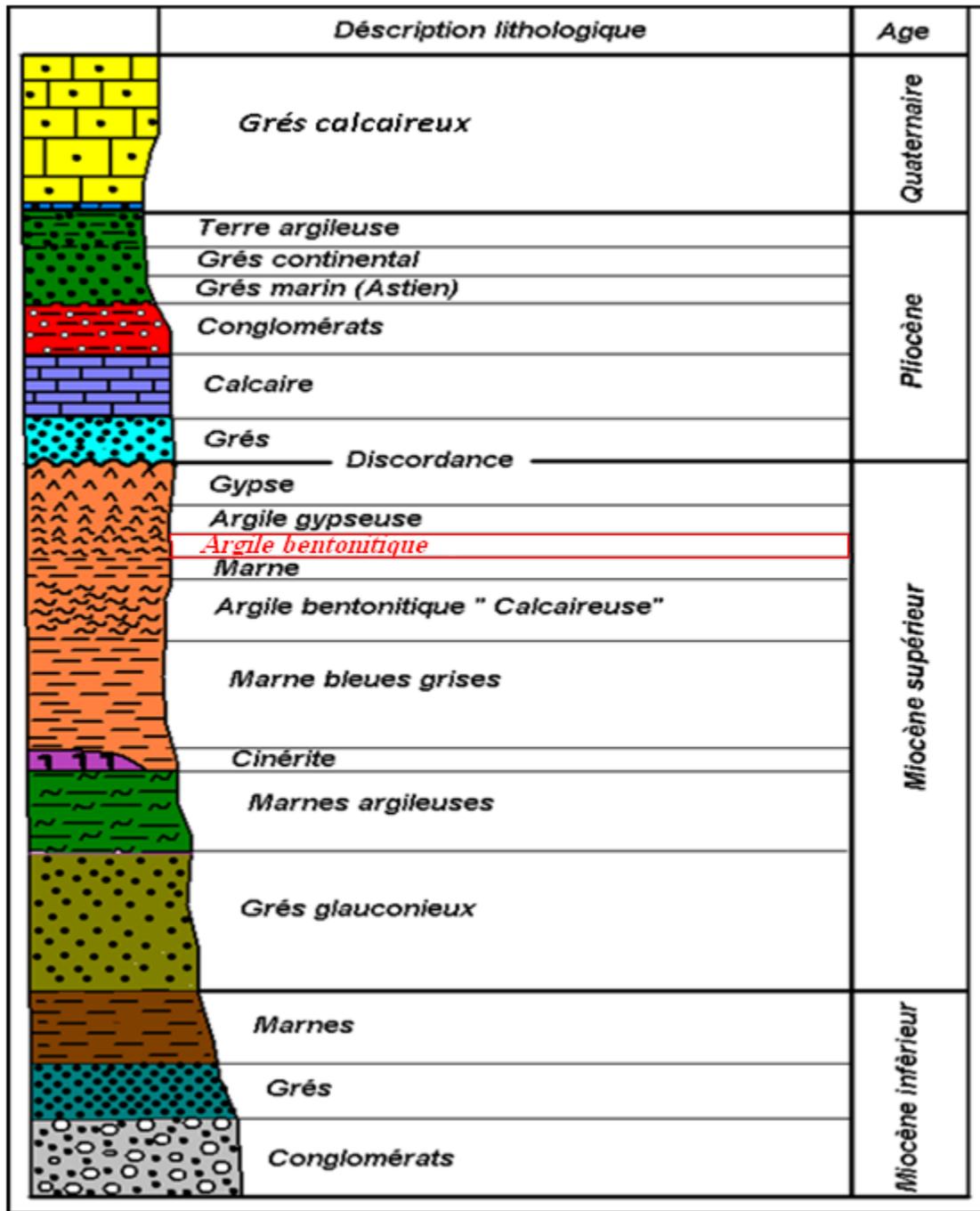


Figure. II. 4. Colonne stratigraphique du bassin du Chélif dans la région de Mostaganem (BENTAL, 1994).

II.3.2. Géologie locale

II.3.2.1. Aperçu géologique du site

À l'échelle du gisement de M'Zila, la séquence du Miocène supérieur exposée dans la région des exploitations débute à la base par un banc épais de marne bleue compacte. Cette dernière est surmontée par les couches d'argiles bentonitiques, qui sont interstratifiées avec des grès biotitiques. Cette séquence est ensuite recouverte par une marne argileuse (Fig. II.5). Quatorze couches d'argiles bentonitiques ont été reconnues dans le gisement de M'Zila (BENTAL, 1994).

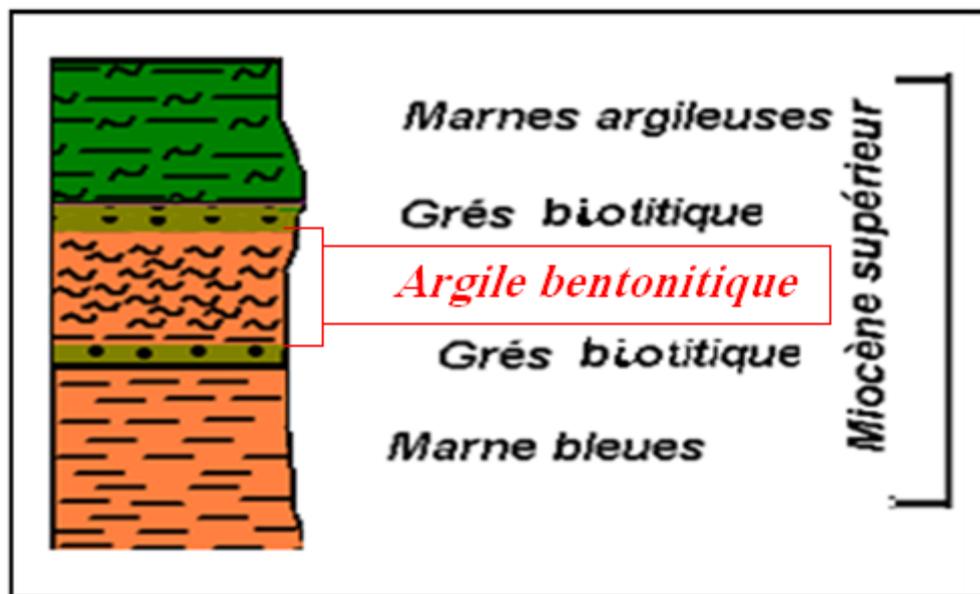


Figure. II. 5. Colonne stratigraphique du gisement de M'Zila (BENTAL, 1994).

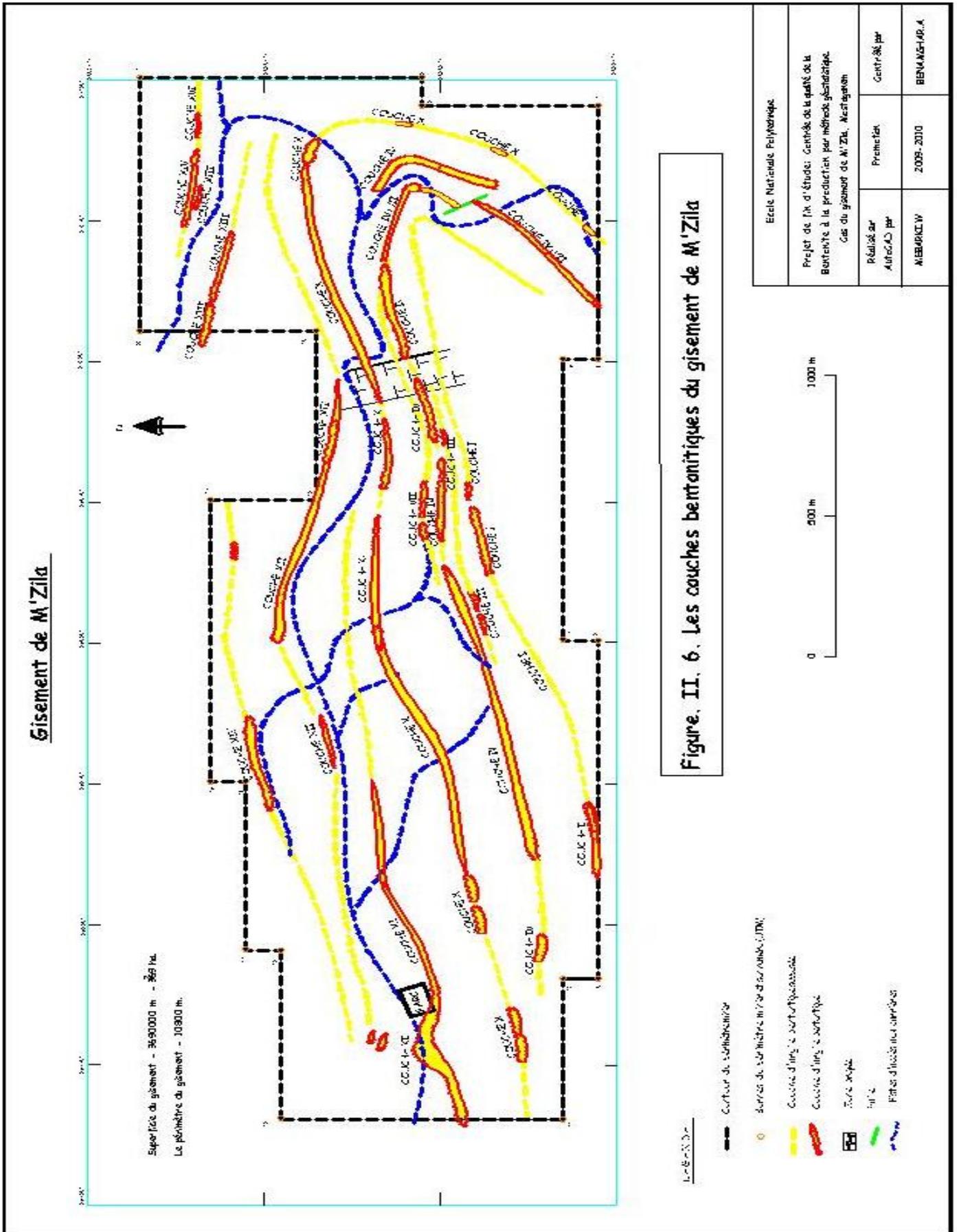
II.3.2.2. Caractéristiques morphologiques du gisement

Le gisement de M'Zila est composé de 14 couches d'argiles bentonitiques identifiées de I à XIV (I, la plus récente, vers le sommet, à XIV la plus ancienne, vers la base) se situant au cœur d'un synclinal dont l'axe est presque Est-Ouest. Les couches du flanc Nord présentent un pendage 10° à 45° S et celles du flanc Sud un pendage 10° à 35° N (Fig. II.6).

Les 14 couches d'argiles bentonitiques du gisement de M'Zila sont tracées d'une façon discontinues "en direction", entaillées par des ravins et un drainage dendritique.

Leur extension se prolonge sous le mort terrain, dans une plaine à topographie moins accidenté. La limite Est des couches, traversée par une zone faillée, coïncide au nez du synclinal. A cet endroit, les couches changent de direction et s'incurvent pour continuer vers le Sud-ouest et ensuite l'Ouest.

Les couches du flanc Sud sont affectées par une tectonique cassante de faible amplitude (SONAREM, 1972).



Remarque: les couches II, V, IX, ont un faible potentiel en réserve.

II.3.2.3. Caractéristiques de la Bentonite de M'Zila

Le tableau II.1 présente un sommaire des principales caractéristiques de chaque couche du gisement de M'Zila. Ces caractéristiques sont rencontrées dans quelques parcelles ou bien dans les parcelles où le prélèvement des échantillons est effectué.

Le nombre d'échantillons varie d'une couche à l'autre (avec une moyenne d'une vingtaine d'échantillons). Le prélèvement s'effectue par saignées de longueur de 0.3 à 3 m dans les tranchées, et par la prise d'un quart de la carotte récupérée dans les sondages.

Les caractéristiques physico-mécaniques données dans ce tableau sont: la viscosité, la filtration ou l'eau libre, l'indice de gonflement, la compression à vert et le cisaillement à vert.

Les essais pour la détermination des différentes caractéristiques des échantillons se poursuivent jusqu'à ce qu'on obtienne deux résultats analogues successifs.

L'épaisseur des couches présentée dans le tableau. II.1 est une épaisseur apparente (épaisseur mesurée horizontalement, sans correction pour l'angle de pendage).

Ce tableau possède une valeur indicative seulement, puisque tous les paramètres requis pour la classification des bentonites en fonction de leur utilisation n'ont pas été mesurés systématiquement pour chaque couche. De plus, pour la même couche, la qualité de la Bentonite peut varier d'un endroit à l'autre.

La lecture L600 de la viscosité et le volume d'eau libre (filtrat) sont les deux seuls paramètres dont les valeurs soient disponibles la pour la plupart des couches, les mesures récentes de ces paramètres ont été préférées aux plus anciennes dans l'élaboration du tableau II.1.

Tableau II. 1. Caractéristiques géométriques, rhéologique et physico-mécaniques des couches (BENTAL, 2002).

Couches/ parcelles		Caractéristiques géométriques			Caractéristiques physiques moyenne						Eléments de gisement		
		Long (m)	Larg (m)	Epais (m)	VL600 (cp)	filtrat (cm ³)	Résidu >75μ (%)	IG (%)	CPV (g/cm ²)	CXV (g/cm ²)	Azim Direc (°)	Azim Pend (°)	Angle Pend (°)
I	A B	3000	8	1.1	03.80	22.00	-	-	-	-	70	160	35
III	B	60	10	04	07.93	28.94	06.81	-	-	-	60	150	35
	A	70	10	04	09.75	24.67	06.15	8.82	683.6	112	70	160	35
IV	A	130	10	04	11.48	17.94	05.00	12.00	480	113	80	170	30
	AEK	70	8	04	11.11	18.18	05.13	-	4.17	-	80	160	30
VII	A	60	12	07	05.64	19.28	09.76	11.00	591	139	70	160	35
X	GR A	60	08	02	17.91	15.86	01.33	13.80	-	-	70	160	30
	D1	45	08	07	16.00	17.75	13.90	-	-	-	70	170	30
	Ben	50	10	05	13.93	21.28	02.19	10.27	-	-	80	160	35
	B4	60	08	03	15.00	21.68	04.46	11.36	-	-	80	160	35
	T2	100	10	02	18.45	23.75	-	-	-	-	80	160	30
XI	A2	900	8-30	6	19.00	20.00	08.00	11.00	-	-	70	160	25
XII		3738	05	03	33.00	16.00	-	-	-	-	70	170	30
XIII	C	700	7	0.9	25.00	22.00	-	-	-	-	70	160	45
XIV	D	25	12	06	36.00	30.04	13.50	11.00	-	-	90	160	40
	E	40	12	06	33.86	27.27	13.50	11.00	-	-	90	160	40
	F	40	12	6	29.26	26.02	06.50	-	-	-	90	160	40

VL600 : Lecture de la viscosité à 600 rotations par minute (centipoise) ;
 Res.75 μ : résidu 75 μ pour la mesure du taux de sable ;
 CPV : Compression à vert. Exprimée en gramme par centimètre carré (g/cm²) ;
 CPX : Cisaillement à vert. Exprimé en gramme par centimètre carré (g/cm²) ;

IG : Indice de gonflement (%) ;
 Long : Longueur de la parcelle (m) ;
 Larg : Largeur de la parcelle (m) ;
 Epais : Epaisseur de la parcelle (m) ;
 Azim Direc : Azimut de direction (°) ;
 Azim Pend : Azimut de pendage (°) ;
 Angle Pend : Angle de pendage (°).

II.3.2.4. Qualité et réserves du gisement de Bentonite de M'Zila

La description qui suit présente un résumé de la qualité et de l'importance en terme de réserves de chacune des couches de Bentonite reconnue dans le gisement de M'Zila (notons que l'orientation d'utilisation de la Bentonite a été faite par rapport aux valeurs moyennes du tableau I.1) :

Couche I : elle a été tracée sur les deux flancs du synclinal, sur une longueur minimale de 3300 mètres, et a été exploitée dans les chantiers 4 et 13.

Couche II : elle a été exploitée dans le chantier 12. Par contre, elle ne possède pas une grande extension et ses réserves sont minimales.

Couche III : elle a été tracée seulement sur le flanc Nord du synclinal. Elle est en cours d'exploitation.

Couche IV : il s'agit d'une couche de bonne épaisseur qui se fusionnerait avec la couche VII dans le nez et sur le flanc Sud du synclinal selon l'interprétation de l'ENOF. Elle a été exploitée dans les carrières 5 et 10, mais ses réserves sont encore importantes.

Couche V : elle est de faible extension et ses réserves sont modestes. De plus, les analyses suggèrent qu'elle est de mauvaise qualité et ne pourrait servir que comme Bentonite de charge.

Couche VI : elle est de faible extension et trop mince pour supporter une exploitation rentable.

Couche VII : il s'agit d'une couche de bonne épaisseur qui a été tracée sur les deux flancs du synclinal. Elle ne possède pas les caractéristiques requises pour les boues de forage, mais est de bonne qualité en fonderie. La couche VII a été exploitée dans les chantiers 11 et 14.

Couche VIII : elle n'a jamais été exploitée, peut-être à cause de son épaisseur relativement faible (1,7m).

Couche IX : cette couche est très mince ne contient pas de réserves significatives. D'ailleurs, la Bentonite y serait de mauvaise qualité.

Couche X : il s'agit de la couche qui a été tracée sur la plus grande distance, soit près de 5,4 kilomètres. Même si elle a été exploitée dans cinq chantiers (3, 6, 9, 15 et Fahim), elle contient encore des réserves très importantes.

Couche XI : elle est restreinte à la partie Ouest du flanc Nord du synclinal. Elle a été exploitée dans le chantier 2, sur une longueur de 900 mètres. Cependant, sa limite vers l'Ouest contient encore des réserves importantes.

Couche XII : elle n'est connue que sur le flanc Nord du synclinal. Cette couche exploitée dans le chantier 8 serait la même que celle qui affleure dans les chantiers 1 et 7 plus à l'Ouest.

Couche XIII : elle a été exploitée dans la carrière 16.

Couche XIV : c'est la couche la plus importante du gisement en épaisseur (9 à 12m) et en réserves (plus de 268 000 t).

Le potentiel d'accroissement des réserves est réel à l'Ouest.

II.3.2.5. Caractéristiques chimiques de la Bentonite de Mostaganem

On reconnaît généralement deux types principaux de Bentonite à l'état naturel. La plus répandue est la Bentonite calcique, dont une analyse typique est donnée dans le tableau II.2 (Bentonite du Sud des États-Unis). La Bentonite calcique n'est pas gonflante, et donc impropre à la préparation des boues de forage.

Par contre, son ion échangeable (Mg^{2+}) lui confère une capacité d'absorption élevée, d'où son utilisation dans la décoloration des huiles végétales et minérales, et le raffinage des produits pétroliers.

L'autre variété est la Bentonite sodique, qui est naturellement gonflante et trouve son application dans la préparation des boues de forage. Une analyse représentative de ce type de Bentonite est présentée dans le tableau II.2.

De par sa composition chimique, la Bentonite de Mostaganem se rattache aux bentonites sodiques (tableau II.2). Comme la Bentonite du Wyoming, sa teneur en $Na_2O > 2\%$ lui confère un indice de gonflement élevé et donc des bonnes propriétés pour la préparation des boues de forage. Par contre, sa teneur en $MgO < 3\%$ la rend impropre à la production de terres décolorantes, contrairement à la Bentonite de Maghnia qui est de bonne qualité pour cette application (BENTAL, 1994).

Tableau II. 2. Comparaison entre la composition chimique moyenne de la Bentonite de Mostaganem et des bentonites d'autres régions (BENTAL, 1994).

% poids	Sud USA	Wyoming	Maghnia	Mostaganem
SiO₂	59.00	64.30	58.89	65.50
TiO₂	ND	ND	00.28	00.27
Al₂O₃	18.40	19.80	17.37	13.85
Fe₂O₃	05.10	04.04	03.32	02.91
FeO	01.26	02.06	ND	00.70
MnO	ND	ND	00.07	00.03
MgO	02.86	02.03	03.37	02.27
CaO	03.88	00.73	01.06	01.86
Na₂O	00.41	02.81	01.32	02.22
K₂O	00.78	00.44	01.30	00.97
H₂O⁺	02.91	01.44	04.46	03.27
H₂O⁻	05.40*	02.11*	08.26	06.06
P₂O₅	ND	ND	00.05	00.06
SO₃	ND	ND	00.68	00.02
TOTAL	100 .00	100.00	100.43	099.99

* : Faite par calcul

ND : non déterminée

II.3.2.6. Spécification de la Bentonite de Mostaganem selon les usages

L'usine de Mostaganem produit de la Bentonite pour trois usages principaux : les boues de forage, les moules de fonderie et de charge industrielle. Chacune de ces applications nécessite des qualités spécifiques.

La production de boues de forage requiert une bentonite dont la viscosité est élevée (>10 centipoises) et dont le volume d'eau libre est faible (< 18 cm³). Ces deux paramètres ont été mesurés systématiquement, depuis 1972, pour les bentonites de Mostaganem. Cependant, tel que mentionné dans le rapport de la SONAREM (1972), les résultats des analyses de 1972 sont douteux. En effet, plusieurs de ces analyses indiquaient une viscosité faible et un volume d'eau libre élevé pour des bentonites qui, en pratique, produisaient des boues de forage de bonne qualité. Pour les mêmes couches de Bentonite, les analyses récentes du laboratoire de l'unité de l'ENOF à Mostaganem, qui ont été fournies à SIDAM, ont donné de bien meilleurs résultats. Pour cette raison les analyses récentes doivent être préférées aux plus anciennes.

La production de moules de fonderie requiert une Bentonite dont la résistance à la compression est supérieure à 570 g/cm² et inférieure à 3 400 g/cm². De plus, la résistance au cisaillement doit être supérieure à 165 g/cm² et supérieurs à 1 510 g/cm².

Essentiellement, la Bentonite de charge est celle qui ne rencontre pas les normes requises pour la production des boues de forage ou des moules de fonderie. Il s'agit d'un produit de qualité inférieure, la seule spécification requise pour cet usage est un degré d'humidité inférieur à 18%.

L'étude de SIDAM (1979) avait démontré que la Bentonite de Mostaganem est très supérieure à celle de Maghnia pour la production des boues de forage à cause de son indice de gonflement plus élevé (proportionnel à la teneur en Na_2O), de sa teneur en sable plus faible et de sa composition plus homogène. La Bentonite de Mostaganem serait également supérieure à celle d'Amérique du Nord pour la fabrication des moules de fonderie.

II.4. Production de la Bentonite de M'Zila

II.4.1. Exploration et échantillonnage

II.4.1.1. Sondage par tarière

A l'aide d'une tarière, deux puisatiers procèdent au creusement d'un puits de sondage en faisant pivoter les tiges manuellement dans le sens des aiguilles d'une montre à partir de la surface du sol, le stérile est extrait au fur et à mesure de l'avancée de la tarière en profondeur. Lorsque la couche de Bentonite est atteinte (variation du faciès), on effectue un prélèvement du minerai contenu dans la tarière, après chaque remontée des tiges, le poids de l'échantillon est de 1Kg et ensuite envoyé au laboratoire pour analyse.

II.4.1.2. Puits de recherche

A l'aide d'une pioche et d'une pelle à manche court, deux puisatiers procèdent au creusement de puits de recherche dont le diamètre est de un mètre.

Lorsque la couche de Bentonite est mise en évidence suite à la variation de faciès on continue à creuser jusqu'à la limite inférieure du minerai lorsque les conditions de sécurité le permettent (stabilité du sol et épaisseur du stérile). A ce moment là, on effectue un prélèvement des minerais sur les parois verticales du puits sur une largeur de 5cm (rainure) et sur toute l'épaisseur de la couche en recueillant des fragments de minerais à l'aide d'une pioche. Le nombre d'échantillons varie en fonction de l'aspect du minerai (lithologie, couleur, structure) et de l'épaisseur de la couche. Lorsqu'aucune variation n'apparaît, un échantillon est prélevé sur chaque mètre.

II.4.1.3. Rainure et prise d'échantillon

A l'aide de pelles et de pioches les puisatiers procèdent au creusement d'une rainure, suivant la largeur de la couche de Bentonite préparée (décapée). La rainure a une largeur de 10 à 20 cm et une profondeur de 10 à 20 cm environs et espacées de 10m (Fig. II.7). Le prélèvement du minerai se fait sur chaque mètre en recueillant des fragments de minerai à l'aide d'une pioche. Lorsqu'il y a variation d'aspect un échantillon est prélevé à chaque variation (BENTAL, 2009).

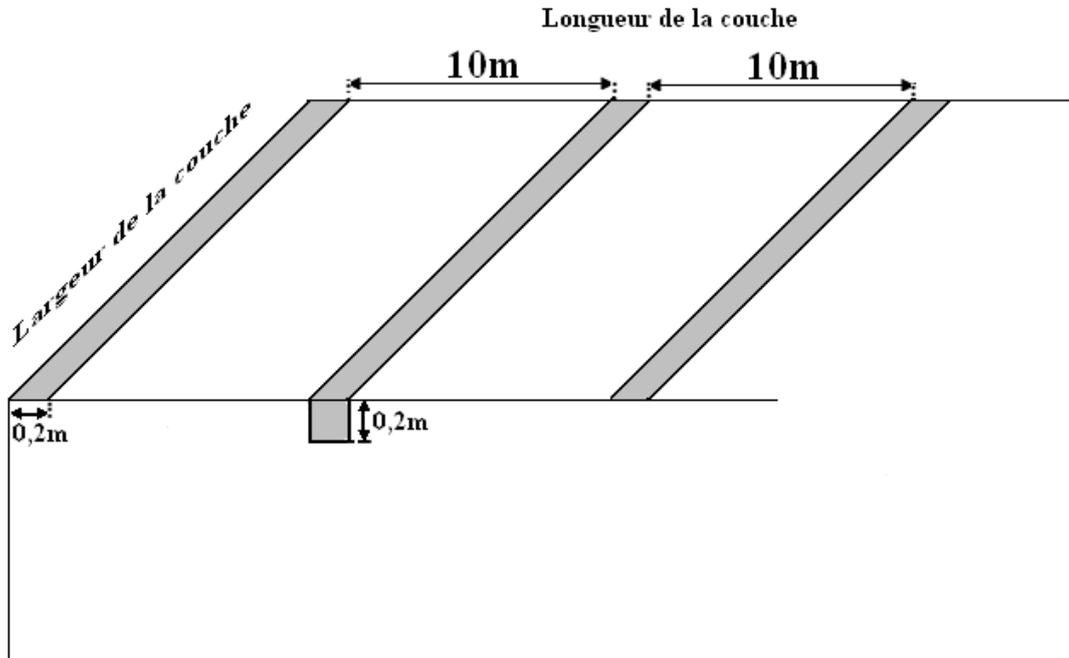


Figure. II. 7. Les rainures.

II.4.2. Conditions technico-minières du gisement de M'Zila

II.4.2.1. Régime de fonctionnement

L'exploitation du gisement de M'Zila fonctionne selon le régime suivant (BENTAL, 2009) :

- ➔ Le nombre de jours ouvrables par an180 jours/an (durant la période comprise entre le mois de Avril jusqu'au mois de Décembre) ;
- ➔ Le nombre de jours ouvrables par semaine5 jours /semaine ;
- ➔ Le nombre de postes de travail par jour.....1 poste /jour ;
- ➔ Le nombre d'heures de travail par poste8 heures /poste.

II.4.2.2. Capacité de production

➔ Capacité annuelle de production, P_a [tonnes/an] :

La tâche technique assignée est d'alimenter une usine de production annuelle en Bentonite égale à 23000 tonnes /an.

Donc : $P_a = 23000$ tonnes /an.

➔ Production journalière, P_j [tonnes/j] :

La production journalière P_j est le rapport de la production annuelle P_a sur le nombre de jours ouvrables par an N_{jo} :

$$P_j = \frac{P_a}{N_{jo}} \quad (\text{II.1})$$

Donc : $P_j = 128$ tonnes/jour.

➔ Production par poste, P_p [tonnes/poste] :

Elle est calculée à partir :

$$P_p = \frac{P_j}{N_{pj}} \quad (\text{II.2})$$

Où:

P_j : la production journalière, $P_j = 128$ t/jour ;

N_{pj} : le nombre de postes par jour, $N_{pj} = 1$ poste.

Donc : $P_p = 128$ tonnes / poste.

II.4.3. Exploitation de la Bentonite

L'exploitation des argiles du chantier M'Zila vise exclusivement la production de Bentonite finie (boue de forage, fonderie et charge industrielle).

L'exploitation à ciel ouvert des couches de Bentonite se fait à partir de chantiers se situant à l'affleurement des couches à la surface et plusieurs doivent être ouverts simultanément pour alimenter l'usine.

Les chantiers peuvent fournir jusqu'à 250 tonnes par jour pendant 9 mois de l'année. La mine fonctionne avec un poste par jour et 5 jours par semaine. Cela tient compte d'une saison des pluies équivalente à deux mois et d'une période de vacances d'un mois.

Les réserves minières sont confinées essentiellement dans les couches III, IV, VII, X, XI et XIV. Les chantiers qui seront exploités au cours des années sont situés sur l'affleurement de 6 couches à la surface. Ils sont donc de faible tonnage chacun et il faut en exploiter plusieurs concomitamment.

La planification des développements de ces chantiers d'abattage est le pivot de l'exploitation. Une bonne planification est celle qui prévoit quels seront les chantiers à développer et ceux à exploiter de façon à donner la production de minerai annuellement requis par l'usine (23000 tonnes/an).

L'échantillonnage et l'analyse suivent toutes les phases d'extraction et de mélange.

Les travaux d'exploitation sont répartis sur trois chantiers :

1. Travaux de découverte
2. Travaux d'extraction, homogénéisation et mise en stock intermédiaire
3. Travaux de transport du tout venant vers l'usine

II.4.3.1. Travaux de découverte

La rentabilité de la méthode appliquée est fonction du taux de découverte t qui est égale au rapport du volume de la découverte V (m^3) sur la quantité de réserves attendues T (tonnes); ce taux doit être inférieur ou égal à $5 m^3/tonnes$ dans le cas de la Bentonite (BENTAL, 2009).

$$t = \frac{V}{T} \quad (\text{II.3})$$

Les pistes d'accès aux parcelles d'exploitations dont la longueur totale atteint plus de 6Km (voir la figure II.6) nécessitent un entretien périodique deux fois par an. Elles deviennent impraticables après les pluies.

Pour le gisement de M'Zila, il n'y a pas le problème de terril, car lors des travaux de découverte on met le stérile à coté du chantier de travail, on extrait la bentonite et on remet le stérile dans la fosse.

II.4.3.2. Travaux d'extraction, homogénéisation et transport de la Bentonite

A l'aide d'une pelle chargeuse, le conducteur d'engin procède à l'extraction du minerai en raclant le front de taille de bas en haut ou de haut vers le bas avec le godet de la pelle.

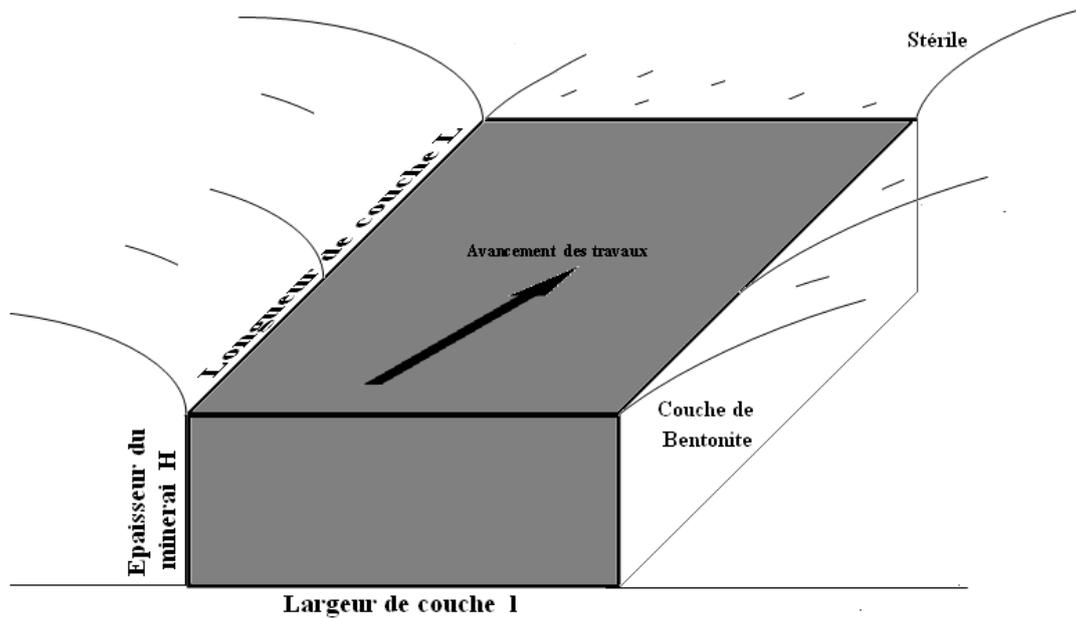


Figure. II. 8. Bloc d'exploitation journalière.

L'extraction se fait directement suivant le pendage de la couche (Fig. II.9). Le minerai est déposé au fur et à mesure de son extraction sous forme de tas où il sera par la suite homogénéisé et transféré vers l'aire de stockage intermédiaire.

La prise d'échantillon est effectuée par le responsable exploitation au niveau du tas homogénéisé. Puis envoyés au laboratoire pour analyses. Le poids de l'échantillon est de 1 Kg.



Figure. II. 9. Travaux d'extraction (BENTAL, 2009).

Le tout venant est étalé à l'aide de la pelle chargeuse et plusieurs passages sont effectués dessus pour briser les mottes et réduire leurs dimensions. Le produit est ensuite mélangé, remanié de fonds en comble à l'aide du godet de la pelle chargeuse et ceci dans tout les sens au niveau de l'étendue où est déposé le tout venant. L'opération est achevée au bout de 45 minutes pour une quantité de 100 tonnes environ.

Lorsque le minerai est homogénéisé la pelle le charge sur un camion qui l'évacue vers les aires de stockage (Fig. II.10). Après séchage à l'air libre pendant une ou deux journées il sera ensuite gerbé sous l'aspect de cônes droits au niveau de l'aire de stockage à l'aide de la pelle chargeuse.



Figure. II. 10. Chargement du minerai (BENTAL, 2009).

Taux de salissage

Le taux de salissage c'est la quantité de stérile mélangée avec la couche de bentonite, en fait c'est le reste de décapage des morts terrains.

Dans le gisement de M'Zila, la découverte est faite de façon à ce que le godet de la chargeuse enlève le stérile avec une partie de la couche de bentonite, donc il ne reste que la bentonite.

La couche de Bentonite reste en contact avec les morts terrains latéralement, qui s'implique que pendant le processus d'extraction il y a la dilution de minerai, alors le taux de salissage est pratiquement non négligeable.

II.4.3.3. Travaux de transport du tout venant vers l'usine

A l'aide d'une pelle chargeuse le conducteur d'engin charge le produit stocké au niveau de l'aire de stockage sur des camions assurant le transport du minerai de la carrière vers l'usine.

Le transport vers l'usine est assuré par 03 camions dont la charge utile est de 20 tonnes (2 camions) et l'autre 15 tonnes (Fig. II.11). Ils effectuent trois rotations par poste de travail, et par camion (BENTAL, 2009).



Figure. II. 11. Transport du minerai (BENTAL, 2009).

II.4.3.4. Les carrières exploitées actuellement

En tenant compte de l'orientation, de l'utilisation de la bentonite et de la possibilité d'accès, la priorité de l'exploitation est orientée vers les zones les plus riches puis vers les autres catégories.

Au Nord et Nord-Ouest seront concentrés actuellement les travaux d'extraction de la Bentonite de forage dans les couches XIV et VII et dans le flanc sud et sud-est l'extraction de la Bentonite des autres catégories (BENTAL, 2009).

La couche XIV :

- Les réserves de la couche XIV sont de 4861 tonnes (sans catégorie).
- La bentonite destinée au forage hydraulique (super bentonite).
- Les parcelles en cours d'exploitation sont : parcelle (F) (niveau 80-90) et parcelle (G) (niveau 80-90) au Nord du gisement
- Réserves de parcelle (F) est 1479 tonnes de bentonite et réserves de parcelle (G) est 6150.

La couche VII

- les réserves de la couche VII sont de 149733tonnes (sans catégorie).
- la bentonite destinée a la fonderie.
- La parcelle en cour d'exploitation est : parcelle (A) niveau (140-150) au Nord du gisement.
- Les réserves de cette parcelle sont de 7824tonnes.

II.4.4. Traitement de la Bentonite et la préparation industrielle

L'usine de traitement étant vétuste, ses capacités de production sont très limitées. De plus, la nuisance à l'environnement est un facteur très important, vu que cette usine est localisée en zone urbaine. Le processus de traitement de la Bentonite issue de la carrière de M'Zila passe par les étapes suivantes :

II.4.4.1. Stockage et activation

La Bentonite brute ramenée de la carrière de M'Zila est déversée en tas sur la rampe d'alimentation de l'usine, en différentes catégories de qualité, selon les résultats des tests de laboratoire faits sur des échantillons sur les caractéristiques rhéologiques des échantillons. Cette catégorisation du brut permet d'approvisionner l'usine avec une qualité donnée.

A l'aide d'une chargeuse la Bentonite brute alimente un skip de capacité 400 kg dans lequel sont aussi ajoutés les adjuvants suivants: le carbonate de sodium (Na_2CO_3) (à un taux de 1 à 2.5%) et la magnésie (MgO) (à un taux de 0.5%). L'activation consiste en un remplacement des cations d'échange Ca^{+2} , Mg^{+2} de Montmorillonite.

Le dosage se fait avant avec un doseur situé au-dessus de la chambre de réception du sécheur, mais le flux thermique entraîne des pertes quantitatives et qualitatives du carbonate de sodium. Le doseur lui-même étant défectueux.

II.4.4.2. Concassage

Le skip circule sur rails et s'élève pour déverser la bentonite brute et les adjuvants dans la trémie d'alimentation.

Par gravité le produit sera déposé sur l'alimentateur à tablier qui, à son tour achemine le produit vers le concasseur composé de deux rouleaux : un lisse et le deuxième à couteaux. La bentonite est concassée à 0-20mm.

Les pertes de produit concassé sont récupérées par une goulotte et rechargées dans le godet du skip.

II.4.4.3. Séchage

Le produit concassé alimente par gravité la chambre de réception du sécheur horizontal rotatif, alimenté en chaleur en souterrain par la chambre de combustion.

Le séchage est effectué dans le sécheur rotatif, le tout venant à l'entrée du sécheur ne doit pas contenir plus de 17-20% d'humidité. Cette étape du procédé est considérée comme critique, elle vise à descendre l'humidité du brut à 13-15% par chauffage modéré. La température de séchage varie entre 70 à 150°C en période hivernale.

Une fois déversé dans la deuxième chambre de réception du sécheur, le produit séché est transporté par vis-sans-fin dans une fosse reliée à un élévateur à godets équipé de 52 godets, qui alimente à son tour la trémie du broyage.

II.4.4.4. Broyage

A l'aide d'un alimentateur jouant le rôle de régulateur de l'alimentation, le produit séché est déversé dans un broyeur pendulaire PM8 à moteur électrique de puissance 100cv, 75kw qui tourne à une vitesse de 1000 t/min.

L'aspiration du produit broyé se fait dans le cyclone propulsé par le ventilateur principal SV-RP92-19500 m³/H avec un moteur électrique de 80cv. Les particules fines sont séparées de l'air au niveau du cyclone.

II.4.4.5. Dépoussiérage

L'installation est dotée d'un électro-filtre intensif type IFJC 5000 m³/heure, 5 rampes d'injection de 35 manches montées en circuit fermé avec le broyeur et le cyclone, il a pour but la récupération de la poussière extrafine limitant les émissions à l'air libre qui sera réinjectée à la base du broyeur par une vis sous filtre.

L'air poussiéreux est, par contre, repris par le ventilateur exhaure MB12-4 5000 m³/heure, 2900tr/min et sera déversé dans un bac d'eau de 3000m³ de capacité afin de récupérer les fines particules par floculation.

II.4.4.6. Conditionnement du produit fini

La mise en sac est assurée par une ensacheuse à air comprimé équipé d'une balance mécanique.

Le produit fini (P.F) est conditionné en sacs de 50 kg à valves et empilés dans des palettes ou en grands sacs selon la commande.

II.4.5. Les exigences du plan de contrôle

L'étude et la comparaison des paramètres rhéologiques des échantillons d'argiles aux normes requises (API ou bien internes) à l'entrée de l'usine a permis d'obtenir 4 qualités de Bentonite.

Les exigences de contrôle illustrées dans le tableau II.3 ci-dessous sont des normes recommandées par API. Et pour aboutir à ces exigences la société BENTAL s'appuie sur des protocoles expérimentaux certifiés « ISO 9001 ».

Tableau II.3. Les exigences du plan de contrôle du tout venant issu du gisement (BENTAL, 2003).

Exigences du plan de contrôle – Tout venant (T.V)									
Paramètres									
Produit fini (P.F)			Humidité (%)	Visc. L600 (cp)	filtrat (cm ³)	Res >75 μ	CPV *	CPX**	IG***
Bentonite de forage	Hydraulique	FB1	25 max	12 min	27 max	25 max	--	--	--
	Pétrolier	FB2	25 max	16 min	25 max	15 max	--	--	--
Bentonite de fonderie		FD	20 max	--	--	--	350 min	90 min	10 min
Bentonite de charge industrielle		BCI	18 max	--	--	--	--	--	--

*CPV : Compression à vert. Exprimée en gramme par centimètre carré (g/cm²) ;

**CPX : Cisaillement à vert. Exprimé en gramme par centimètre carré (g/cm²) ;

***IG : indice de gonflement.

-- paramètres non nécessaire.

Chapitre III

Géostatistique

Ce chapitre est consacré à la théorie de la variable régionalisée (géostatistique). Nous résumons ci-dessous l'essentiel des notions théoriques utilisées dans le cadre de ce travail.

III.1. Historique et applications

Dans les années 50, un ingénieur minier sud-africain D.G.Krige a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution spatiale de la teneur de minerais à partir d'un ensemble de forages.

En 1963, le français Matheron a formalisé l'approche en utilisant les corrélations entre les forages pour en estimer la répartition spatiale. C'est lui qui a baptisé la méthode "krigeage". Il a également été le premier à employer le terme géostatistique pour désigner la modélisation de données spatialement corrélées. Le semi-variogramme est l'outil de base de cette modélisation (VALENTINA, 2004).

Cette technique est principalement appliquée dans les domaines suivants :

- Estimation et planification des mines et des gisements pétroliers.
- Prospection géochimique et géophysique.
- Cartographie.
- Caractérisation de sites contaminés par des polluants (pollution).
- Classification de sols.
- Charges hydrauliques et directions d'écoulement.
- Analyse et caractérisation d'images ...etc.

❖ Étude d'un exemple et discussion :

Considérons le problème de l'estimation locale, par exemple d'estimer la valeur au point A (Fig. III.1), connaissant les échantillons qui l'entourent.

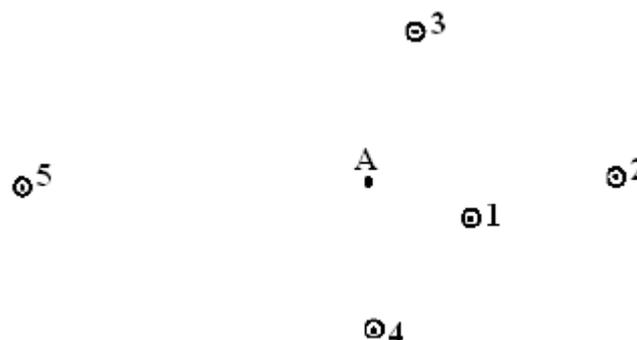


Figure. III.1. Exemple

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

Ainsi, il semble raisonnable d'utiliser un procédé d'estimation qui donne plus d'importance à l'échantillon n°1 qu'à l'échantillon n°5. Face à cette question classique et récurrente, plusieurs méthodes ont été proposées pour décider du poids accordé à chaque échantillon. La plupart des méthodes se sont appuyées sur la distance entre l'échantillon et le point à estimer.

Par exemple, les poids attribués à chacun des échantillons peuvent être approchés par l'inverse de la distance, ou l'inverse de la distance au carré...etc (ISOBEL C, 1979).

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

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

III.2. Théorie de la variable régionalisée

La géostatistique est construite autour du concept de variable régionalisée, c'est à- dire une fonction $z(x)$ dans un domaine D de l'espace géographique (qui inclut éventuellement un intervalle de l'axe temporel), où x est un vecteur de coordonnées spatiales et z une valeur de la quantité d'intérêt (WACKERNAGEL, 2004).

En géostatistique toute variable régionalisée possède une structure de variabilité particulière : l'intérêt $Z(x)$ et $Z(x+h)$ en un même élément en deux points x et $x+h$ d'un domaine sont auto-corrélées.

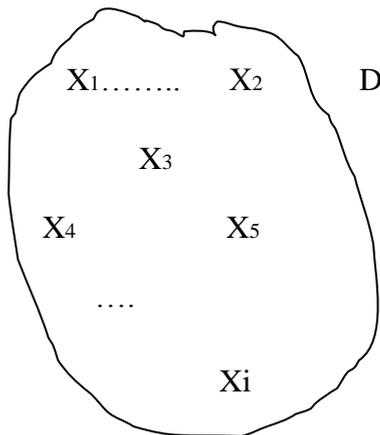
Cette structure d'auto-corrélation dépend du module et de la direction du vecteur séparant les deux points de mesure.

$$\begin{array}{ccc} Z(x) & & Z(x+h) \\ x & \longleftarrow h & \longrightarrow x+h \end{array}$$

L'étude directe de la fonction aléatoire $Z(x)$ est exclue, car la variabilité de cette fonction dans l'espace est très complexe avec toute sorte de discontinuités et d'anisotropies.

L'outil mathématique utilisé pour prendre en compte les variabilités spatiales de ce type est constitué par la théorie des variables aléatoires (WACKERNAGEL, 2004).

Une fonction $Z(x)$ peut être définie comme un ensemble de variables aléatoires $Z(x_i)$ en chaque point x_i du domaine D .



$$Z(x) = [Z(x_i), \forall x \in D].$$

La géostatistique peut être définie comme une application de méthodes probabilistes à des variables régionalisées.

Toutefois, l'approche usuelle est de considérer la variable régionalisée comme une réalisation d'une fonction aléatoire $Z(x)$, c'est-à-dire une famille de variables aléatoires Z dépendant de la localisation x dans D .

III.2.1. Moments et stationnarité

Soit la fonction aléatoire $Z(x)$, pour tout ensemble de k points x_1, x_2, \dots, x_k dans le domaine D .

Il leur correspond une variable vectorielle à k composantes $\{z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_k)\}$ qui est caractérisée par la loi de distribution à k variables :

$$F_{x_1, x_2, \dots, x_k}(Z_1, Z_2, \dots, Z_k) = \text{Prob} \{Z(x_1) < z_1 \dots Z(x_k) < z_k\}.$$

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

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

- **Moment d'ordre 1 :**

Soit la variable aléatoire $Z(x)$ au point x , si la loi de distribution de $Z(x)$ admet une espérance (ce qui est supposé admis), cette espérance de la variable $Z(x)$ reste constante sur tout le domaine étudié :

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

- **Moment d'ordre 2 :**

Si deux variables aléatoires $Z(x_1)$ et $Z(x_2)$ ont des variances aux points x_1 et x_2 , elles ont nécessairement une covariance qui est fonction seulement du vecteur h qui sépare les points x_1 et x_2 .

$$C\{x_1, x_2\} = C(h) = E\{Z(x_1), Z(x_1+h)\} - m.m \quad (\text{III.2})$$

L'équation 2 suppose l'existence et la constance de l'espérance m , ce qui n'est pas toujours possible dans la réalité. C'est pourquoi on préfère souvent une autre fonction, moins exigeante que la covariance, il s'agit du Semi-variogramme. Le Semi-variogramme, ou variogramme, mesure la variance des incréments $[Z(x_1) - Z(x_1+h)]$.

La fonction variogramme s'écrit :

$$2\gamma(x_1, x_2) = \text{Var} [Z(x_1) - Z(x_2)] \quad (\text{III.3})$$

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

L'hypothèse de stationnarité intervient alors pour supposer que dans les gisements homogènes, la corrélation qui existe entre les valeurs $Z(x_1)$ et $Z(x_2)$ ne dépend pas des points x_1 et x_2 mais du vecteur h ($h = x_1 - x_2$) qui les sépare.

La fonction aléatoire $Z(x)$ est stationnaire si sa loi spatiale est invariante par translation. Si (x_1, x_2, \dots, x_n) sont n points d'appui, les n variables aléatoires $(Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n))$ ont la même loi spatiale que les variables aléatoires $(Z(x_1+h), Z(x_2+h), \dots, Z(x_n+h))$.

La stationnarité d'ordre 2 se formulera alors :

- L'espérance mathématique $E [Z(x)]$ existe et ne dépend pas de point x ; $E [Z(x)] = m$

$$E [Z(x)] = m ; \quad \forall x \in D \quad (\text{III.4})$$

Où m est la moyenne de la variable $Z(x)$.

- La covariance d'une fonction aléatoire existe pour toute paire de variables aléatoires $Z(x)$ et $Z(x+h)$ et ne dépend que de la distance h .

$$C(h) = E\{Z(x), Z(x+h)\} - m^2 \quad (\text{III.5})$$

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

$$\text{Var} \{Z(x)\} = E\{(Z(x)-m)^2\} = C(0) \quad \forall x \in D \quad (\text{III.6})$$

$$2\gamma(h) = E\{(Z(x+h)-Z(x))^2\} = C(0) - C(h) \quad \forall x \in D \quad (\text{III.7})$$

Remarquons que cette hypothèse de stationnarité est quelque peu très forte. En effet il existe des phénomènes naturels dont la dispersion est illimitée, c'est à dire qui ne présentent ni de variance ni de covariance a priori finies. Par conséquent on doit adapter cette hypothèse, on supposera suffisante l'existence du variogramme.

Ceci nous amène à contourner le problème et à aborder la variable par l'étude de ses accroissements, d'où l'hypothèse intrinsèque suivante.

- **Hypothèse intrinsèque :**

Tout processus stationnaire de deuxième ordre est stationnaire intrinsèque. Ainsi, certaines fonctions aléatoires sont stationnaires intrinsèques mais non stationnaires de deuxième ordre. L'hypothèse intrinsèque est donc plus générale. Elle est beaucoup plus faible que l'hypothèse de stationnarité d'ordre 2.

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

$$E\{Z(x_i)\} = m \quad \forall x \in D \quad (\text{III.8})$$

$$\text{Var}\{Z(x+h)-Z(x)\} = E\{(Z(x+h)-Z(x))^2\} = 2\gamma(h) \quad \forall x \in D \quad (\text{III.9})$$

Le semi-variogramme $\gamma(h)$ est indépendant de la localisation de x , seulement de h (soit en module, soit en module et en direction).

III.3. Le semi-variogramme

Le semi-variogramme est un outil servant à décrire la continuité spatiale d'un phénomène. Il repose sur l'idée que deux observations séparées par une faible distance, se ressemblent davantage en moyenne que deux observations séparées par une plus grande distance.

III.3.1. Le semi-variogramme théorique

Soit Z la variable considérée distribuée dans un domaine 1D (dimension), 2D ou 3D. La formulation théorique du semi-variogramme $\gamma_{th}(h)$ fait appel à la notion de variance (Var)

appliquée à la différence entre deux observations $Z(x)$ et $Z(x+h)$ séparées par une distance h .

Nous avons montré le semi-variogramme théorique $\gamma_{th}(h)$ qui défini sous l'hypothèse intrinsèque ci-dessous.

Ce qui donne le semi-variogramme théorique, pour tout x dans D :

$$\gamma_{th}(h) = \frac{1}{2} \text{Var} [(Z(x) - Z(x+h))] \quad (\text{III.10})$$

On peut schématiser l'ensemble des modèles théoriques de semi-variogramme par le graphique de la (Fig. III.2). Ce graphique met en avant 3 paramètres fondamentaux. L'effet de pépite, le seuil, et la portée. Ces trois paramètres sont brièvement décrits ci-dessous.

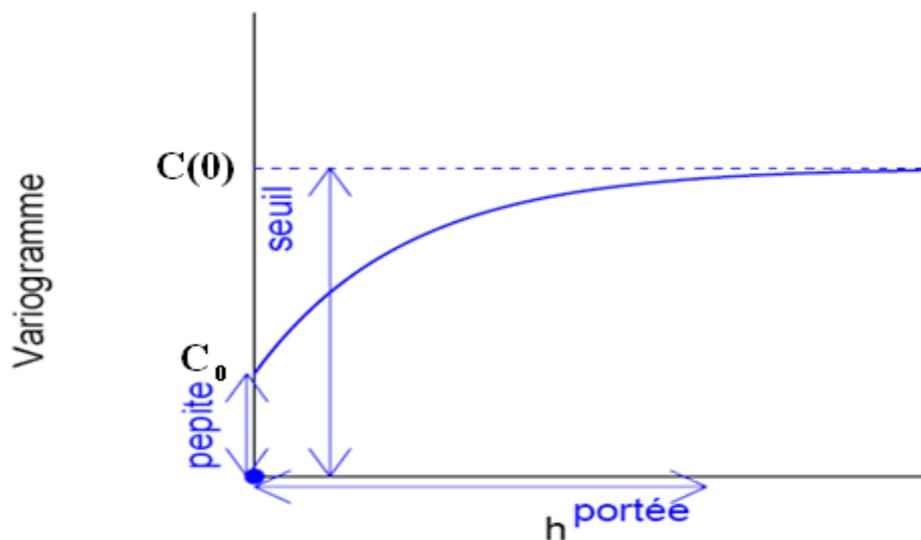


Figure. III.2. Schéma type d'un variogramme (CAUSEUR, 2006).

a. Effet de pépite

L'effet de pépite C_0 est défini par la valeur de semi-variogramme au voisinage de l'origine. C'est la limite de cette fonction quand h tend vers 0.

Il représente une discontinuité à l'origine qui est expliquée par d'éventuelles erreurs de mesure ou par la présence d'une microstructure d'une portée plus faible que la maille d'échantillonnage utilisée.

b. La portée

Dans l'étude de la variabilité spatiale, il est important d'examiner le comportement du semi-variogramme à grande distance. La fonction semi-variogramme peut atteindre une limite à partir d'une certaine distance appelée portée (a). A partir de cette distance il n'y a plus de corrélation spatiale entre les données.

Cette limite est nommée palier et désigne la variance totale $C(0)$. Dans la pratique, la

portée est définie par la distance à laquelle le semi-variogramme atteint 95% de la valeur de son palier.

c. Le seuil ou palier

On appelle seuil du semi-variogramme sa valeur limite pour de grandes valeurs de h . Ce paramètre suscite un intérêt très important dans l'analyse de la régularité des variations locales. En effet, si le seuil d'un semi-variogramme est infini, alors le processus des variations locales n'est pas stationnaire.

III.3.2. Le semi-variogramme expérimental (γ_e)

Dans la pratique il n'est pas possible de calculer le variogramme théorique tel qu'il est écrit car on ne dispose que des échantillons. Pour l'approcher, une expression du semi-variogramme expérimental est plus pratique.

Le semi-variogramme permet de mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée $z(x)$ en calculant la différence entre deux échantillons z_1 et z_2 situés en deux points x_1 et x_2 d'un domaine spatial. Cette différence notée γ_e s'écrit :

$$\gamma_e = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{2} \quad (\text{III.11})$$

Pour voir si l'azimut décrit par les deux points considérés a un effet quelconque on fait dépendre γ_e de la distance et de l'orientation de la paire de points (vecteur $h = x_2 - x_1$) indifféremment de la position de la paire dans le domaine étudié (WACKERNAGEL, 1993).

$$\gamma_e(h) = \frac{1}{2} (Z(x) - Z(x+h))^2 \quad (\text{III.12})$$

En formant la moyenne des dissemblances γ_e entre valeurs pour toutes les $N(h)$ paires de points reliées par un vecteur h donné pour une maille donnée (avec, le cas échéant, une certaine tolérance sur la longueur et l'angle du vecteur), on obtient la notion de semi-variogramme expérimental. (WACKERNAGEL, 1993).

$$\gamma_e(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_i^{N(h)} [(Z(x_i) - Z(x_i+h))^2] \quad (\text{III.13})$$

Où : $N(h)$ représente le nombre de paires d'observations séparées par la distance h .

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques à l'aide d'une expression particulière du variogramme :

$$\gamma_e(h, \theta) = \frac{1}{2N(h, \theta)} \sum_i^{N(h, \theta)} [(Z(x_i) - Z(x_i+h))^2] \quad (\text{III.14})$$

Où : $N(h, \theta)$: nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ .

En pratique, on s'accorde une tolérance sur h et sur θ afin d'avoir suffisamment de paires de points pour chaque h et chaque θ (Fig. III.3).

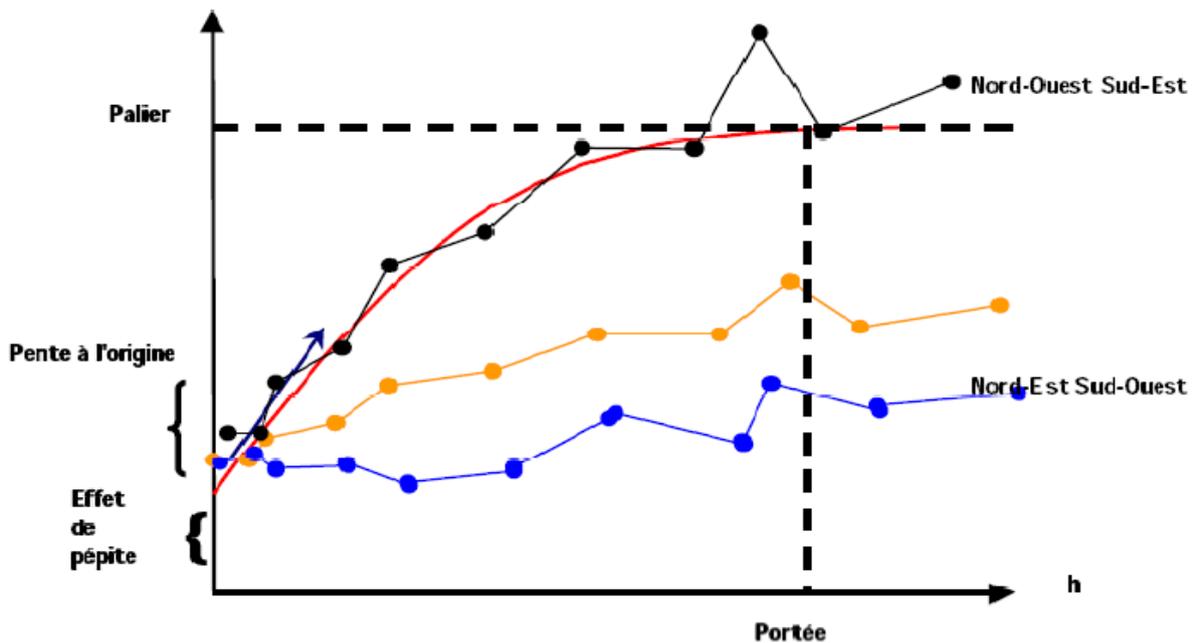


Figure. III.3. Exemples de variogrammes multidirectionnels (WACKERNAGEL, 1993).

Idéalement, afin qu'un point du semi-variogramme expérimental soit jugé représentatif, il est nécessaire que $N(h) \geq 30$. À ces valeurs ponctuelles on ajuste un modèle théorique de semi-variogramme admissible (voir paragraphe suivant).

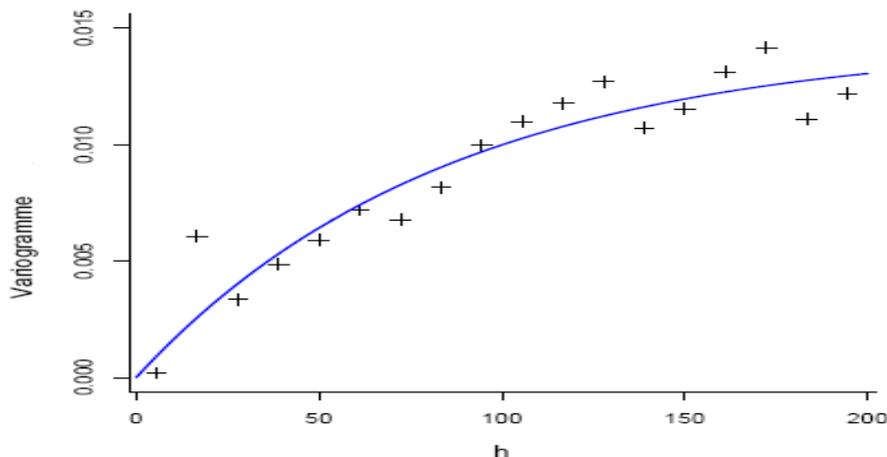


Figure. III.4. Ajustement d'un modèle théorique (courbe) de semi-variogramme à un semi-variogramme expérimentale (croix) (CAUSEUR, 2006).

III.3.3. Modèles théoriques de variogrammes

Une fois que le semi-variogramme expérimentale a été construit, on passe à l'adaptation du modèle théorique de semi-variogramme aux points obtenus en optimisant le modèle par contre vérification. Le semi-variogramme théorique est recherché par modélisations en utilisant une fonction connue de la nuée variographique. L'objectif est de trouver la courbe

théorique qui s'adapte le mieux à la courbe expérimentale.

Les principaux modèles admissibles sont l'effet pépité, le modèle linéaire, le modèle sphérique, le modèle puissance, le modèle gaussien et le modèle exponentiel. Une combinaison de deux de ces modèles ou plus est également faisable.

La situation de plus forte irrégularité des variations locales correspond à une absence de dépendances entre des mesures effectuées en des sites différents, ce qui se traduit par l'effet de pépité (Fig. III.5.A) :

- Pour tout $h \neq 0$;

$$\begin{aligned} C(h) &= 0, \\ \gamma(h) &= C(0). \end{aligned}$$

Inversement, la situation théorique de plus grande régularité correspond à des dépendances locales maximales (Fig. III.5.B) :

- Pour tout $h \neq 0$;

$$\begin{aligned} C(h) &= C(0), \\ \gamma(h) &= 0. \end{aligned}$$

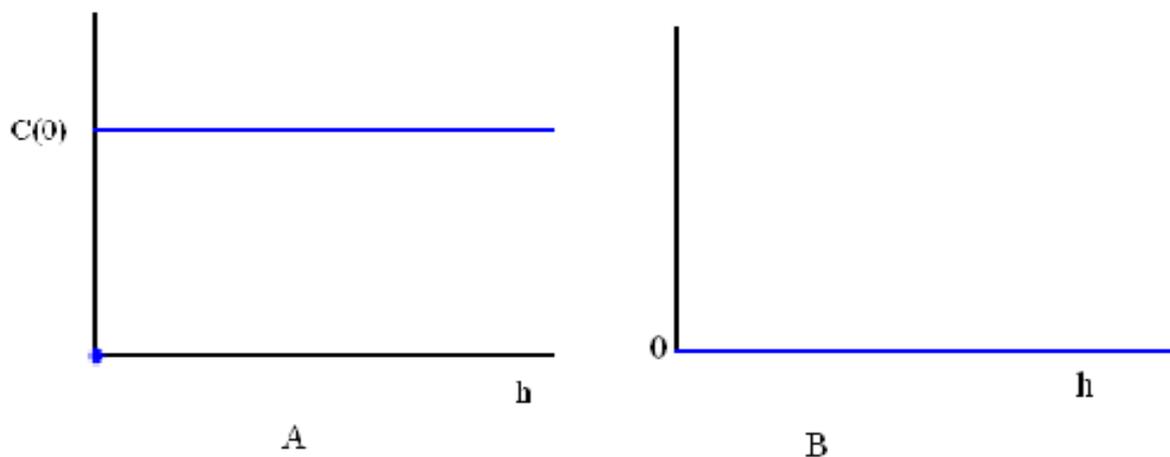


Figure. III.5. A ; B : Schéma type d'un semi-variogramme (effet de pépité), (CAUSEUR, 2006).

Entre ces deux situations extrêmes, la régularité du processus des variations locales se mesure à la régularité fonctionnelle du semi-variogramme de ce processus au voisinage de 0.

Lorsque le semi-variogramme atteint une limite, on s'intéresse à la valeur de h pour laquelle cette limite est atteinte. En effet, cette valeur, qu'on appelle la portée des variations locales, caractérise l'écart entre les sites de mesures au-delà duquel les dépendances entre les mesures du processus sont nulles.

Les trois modèles suivants constituent trois exemples très classiques de semi-variogrammes pour des processus stationnaires se différenciant par leur régularité au

voisinage de 0.

- Le modèle exponentiel (Fig. III.5.C) :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad (\text{III.15})$$

- Le modèle gaussien (Fig. III.5.D) :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right] \quad (\text{III.16})$$

- Le modèle sphérique (Fig. III.5.E) :

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & \dots\dots\dots 0 \leq h \leq a \\ C + C_0 & \dots\dots\dots h > a \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

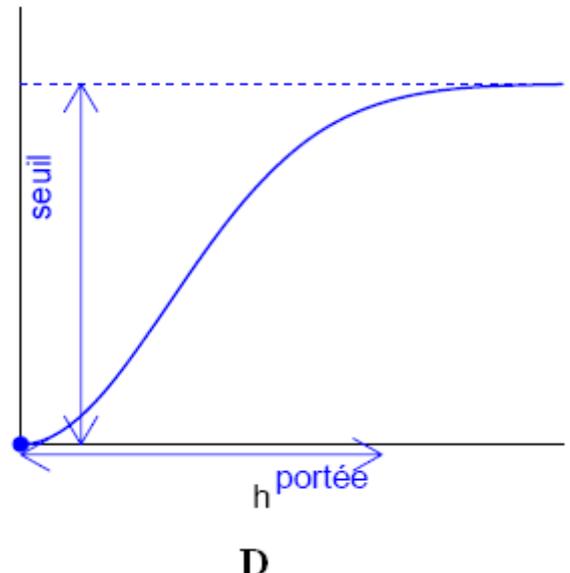
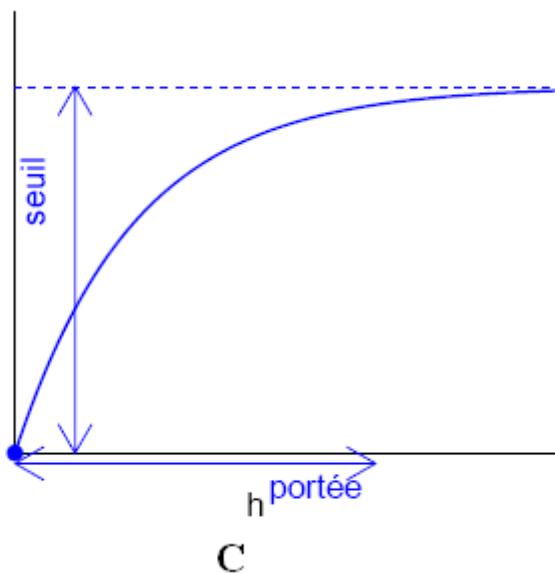


Figure. III.5. C ; D : Schémas type d'un modèle de semi-variogramme : exponentiel(C), gaussien (D), (CAUSEUR, 2006).

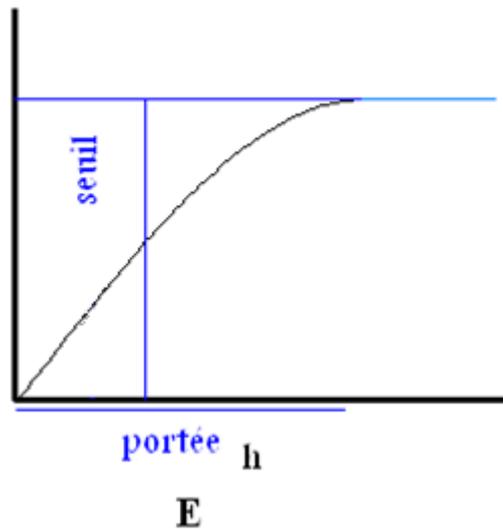


Figure. III.5. E : Schéma type d'un modèle de semi-variogramme sphérique.

III.4. Le krigeage

Le Krigeage est défini comme étant un estimateur linéaire sans biais offrant une variance d'estimation minimale. L'estimateur de krigeage en un point x , noté $Z^*(x)$ est défini comme la combinaison linéaire des valeurs connues $Z(x_i)$, il s'écrit alors :

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (\text{III.18})$$

Les poids λ_i sont les inconnues du problème.

On définit alors l'erreur d'estimation comme étant la différence entre la valeur réelle et la valeur estimée :

$$e = Z(x) - Z^*(x) \quad (\text{III.19})$$

Le meilleur estimateur est celui qui fournit l'erreur e la plus petite possible au point estimé. Pour l'ensemble des estimations réalisées, la variance de cette erreur doit être la plus petite possible.

La variance de cette erreur est la **variance d'estimation** σ_e^2 :

$$\text{Var}(e) = \text{Var}(Z(x)) + \text{Var}(Z^*(x)) - 2\text{Cov}(Z(x), Z^*(x)) \quad (\text{III.20})$$

Substituant $Z^*(x)$ par son expression, en fonction des $Z(x_i)$, donnée en (équation 19), on obtient:

$$\sigma_e^2 = \text{Var}(Z(\mathbf{x})) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \text{Cov}(Z(\mathbf{x}_i), Z(\mathbf{x}_j)) - 2 \sum_i \lambda_i \text{Cov}(Z(\mathbf{x}_i), Z(\mathbf{x})) \quad (\text{III.21})$$

Qui peut être réécrit en fonction du variogramme :

$$\sigma_e^2 = (\sigma^2 - \bar{\gamma}(\mathbf{x}, \mathbf{x})) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j (\sigma^2 - \gamma(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)) - \sum_i \lambda_i (\sigma^2 - \bar{\gamma}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})) \quad (\text{III.22})$$

Puis finalement, puisqu'on a habituellement $\sum \lambda_i = 1$, par simplification on arrive à :

$$\sigma_e^2 = 2 \sum_i \lambda_i \bar{\gamma}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) - \bar{\gamma}(\mathbf{x}, \mathbf{x}) - \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (\text{III.23})$$

Comme on vient de voir, on peut calculer la variance d'estimation soit en utilisant le covariogramme (III.21) ou le variogramme (III.22)

Rappelons que pour avoir la meilleure estimation **on doit avoir la plus petite variance d'estimation possible**. C'est-à-dire qu'on doit minimiser σ_e^2

$$\sigma_e^2 = \text{Var}[Z - Z^*] = \text{Var}[Z] + \text{Var}[Z^*] - 2\text{Cov}[Z, Z^*] \quad (\text{III.24})$$

Rappelons que, ce qui nous intéresse ici est de calculer les poids λ_i qui sont **les inconnues**. Pour minimiser la variance d'estimation on doit calculer les dérivées partielles $\frac{d\sigma_e^2}{d\lambda_i}$ que l'on doit mettre égale à zéro :

$$\frac{d\sigma_e^2}{d\lambda_i} = 0, \quad i = 1 \dots n \quad (\text{III.25})$$

Cela représente un système d'équation à n inconnues (les n poids) qui donnera la variance la plus petite possible. **Mais dont la somme des poids ne sera pas nécessairement égale à 1** puisqu'il n'y a aucune contrainte dans ce sens.

Pour que l'estimateur soit sans biais (équilibré), il faut que :

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (\text{III.26})$$

En effet, dans ce cas, on a

$$E[Z^*] = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot E[Z_i] = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot m = m \quad (\text{III.27})$$

Pour obtenir le meilleur estimateur linéaire sans biais, nous devons donc résoudre le système à n+1 équations mais seulement n inconnues :

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_e^2}{d\lambda_i} = 0, & i=1 \dots n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Pour équilibrer le système nous devons introduire une nouvelle inconnue sous forme du multiplicateur de Lagrange μ et on forme le Lagrangien qui doit être minimisé pour trouver les n inconnues :

$$\begin{aligned} L(\lambda) &= \sigma_e^2 + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \\ &= \text{Var}[Z_v] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{Cov}[Z_i, Z_j] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \text{Cov}[Z_v, Z_i] + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \end{aligned} \quad (\text{III.29})$$

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 :

III.4.1. Le krigeage ordinaire

La méthode de krigeage a été développée par G.Matheron. Dans cette méthode la moyenne est supposée inconnue mais utilise l'invariante sur le voisinage de point d'estimation. Cette méthode ne réclame que l'hypothèse de stationnarité intrinsèque.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_j^n \lambda_j \text{Cov}[Z_i, Z_j] + \mu = \text{Cov}[Z_i, Z_j] \quad \forall i = 1 \dots n \\ \sum_j^n \lambda_j = 1 \end{array} \right. \quad (\text{III.30})$$

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 :

$$\sigma_k^2 = \sigma_e^2 = \text{Var}[Z_v] - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \text{Cov}[Z_v, Z_i] - \mu \quad (\text{III.31})$$

Remarque : 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.

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

Ceci tient au fait que $C(h) = \sigma^2 - \gamma(h)$ et que $\sum \lambda_i = 1$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_j^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - \mu = \bar{\gamma}(v, x_i) \quad \forall i = 1 \dots n \\ \sum_j^n \lambda_j = 1 \end{array} \right. \quad (\text{III.32})$$

Et, alors

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(v, x_i) - \bar{\gamma}(v, v) - \mu \quad (\text{III.33})$$

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

$$\mathbf{K}.\lambda = \mathbf{k}$$

$$\sigma_k^2 = \sigma_k^2 - \lambda.k \quad (\text{III.34})$$

Où :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \text{Cov}(Z_1, Z_2) & \cdot & \text{Cov}(Z_1, Z_n) & 1 \\ \text{Cov}(Z_2, Z_1) & \sigma^2 & \cdot & \text{Cov}(Z_2, Z_n) & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \text{Cov}(Z_n, Z_1) & \text{Cov}(Z_n, Z_2) & \cdot & \sigma^2 & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} \text{Cov}(Z_1, Z_v) \\ \text{Cov}(Z_1, Z_v) \\ \cdot \\ \text{Cov}(Z_n, Z_v) \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \sigma_v^2 = \bar{C}(v, v) \quad (\text{III.36})$$

III.4.2. Krigeage simple

On vient de voir le krigeage ordinaire, on a remarqué que pour ce dernier, il n'est pas exigé de connaître la moyenne de la variable étudiée, elle est supposée constante partout.

Mais 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, dans lequel intervient la moyenne m, sans imposer la contrainte que la somme des poids soit égale à 1 :

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i . Z_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \right) . m \quad (\text{III.37})$$

Où les Z_i désignent les V. A. correspondantes aux échantillons.

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

$$\sigma_e^2 = \text{Var}[Z] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \cdot \lambda_j \text{Cov}[Z_i, Z_j] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \text{Cov}[Z, Z_i] \quad (\text{III.38})$$

On dérive cette expression par rapport à chacun des λ_i . Dans ce cas nous n'avons pas besoin de faire intervenir de nouvelle variable (Lagrangien) car le système d'équation est équilibré. On trouve alors le système de krigeage simple :

Système de krigeage simple

$$\left\{ \sum_j^n \lambda_j \text{Cov}[Z_i, Z_j] = \text{Cov}[Z, Z_i] \quad \forall i = 1 \dots n \quad (\text{III.39}) \right.$$

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

$$\sigma_{ks}^2 = \text{Var}[Z] - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \text{Cov}[Z, Z_i] \quad (\text{III.40})$$

III.5. Variance d'estimation

Il est important de fournir une estimation la plus exacte possible de la variable là où elle n'a pas été échantillonnée. Mais cette estimation est incomplète si elle n'est pas accompagnée d'une variance, c'est la variance d'estimation.

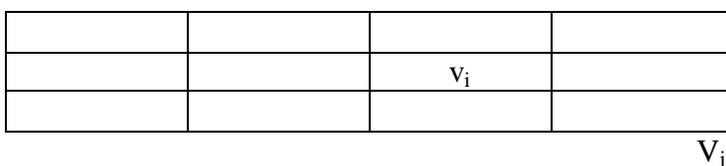
Rappelons que cette variance n'est pas une "réelle" mesure sur la précision de l'estimation de la valeur estimée. Elle donne cependant une idée de la qualité de l'estimation. Car elle ne dépend pas des valeurs aux points d'appui mais dépend de la configuration spatiale des données.

III.6. Variance de dispersion

Considérons un grand bloc V_j découpé en petits blocs v_i .

On a :

$$Z(V_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(v_i) \quad (\text{III.41})$$



On veut déterminer l'importance de la variation de v_i dans V_j , en moyenne pour l'ensemble des blocs V . C'est ce que l'on appelle la variance de dispersion de v dans V que l'on note $D^2(v|V)$.

Soit la variance des échantillons pour un bloc V_j :

$$S_{v_i/V_j}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[Z(v_i) - Z(V_j) \right]^2 \quad (\text{III.42})$$

On définit la variance de dispersion $D^2(v|V)$ comme l'espérance de cette variance expérimentale lorsqu'on considère tous les blocs possibles V_j :

$$\begin{aligned} D^2(v|V) &= E \left[S_{v_i/V_j}^2 \right] = E \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[Z(v_i) - Z(V_j) \right]^2 \right\} \\ &= E \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(Z(v_i) - m \right) - \left(Z(V_j) - m \right) \right]^2 \right\} \\ &= \sigma_V^2 + \sigma_v^2 - \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \text{Cov} \left[Z(V_j), Z(v_i) \right] \\ &= \sigma_V^2 + \sigma_v^2 - 2 \sum_{i=1}^n \text{Cov} \left[Z(V_j), Z(V_i) \right], \text{ Sachant que } \sum Z(v_i) = n \cdot Z(V_i) \\ &= \sigma_V^2 + \sigma_v^2 - 2 \text{Cov} Z(V_i) \\ &= \sigma_V^2 + \sigma_v^2 - 2 \sigma_V^2 \end{aligned}$$

Donc :

$$D^2(v|V) = \sigma_v^2 - \sigma_V^2 \quad (\text{III.43})$$

III.7. Contrôle des teneurs à la production

III.7.1. Prédiction de la teneur d'une production programmée entre plusieurs chantiers

Soit un gisement dont la production quotidienne provient de N blocs $\{B_i, i = 1 \text{ à } N\}$ de même taille V . la teneur moyenne vraie θ_i du bloc B_i est estimée sans biais par l'estimateur θ_i^* avec la variance d'estimation σ_e^2 (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978) :

$$\sigma_{e_i}^2 = E \left\{ \left[\theta_i - \theta_i^* \right]^2 \right\} \quad (\text{III.44})$$

Au jour j , la production totale P_j est programmée à partir des N blocs en cours d'exploitation : chaque bloc B_i fournit le tonnage p_{ij} , de teneur vraie inconnue t_{ij} estimée par θ_i^* (Fig.III.6). Les tonnages élémentaires p_{ij} sont calculés de sorte que la teneur moyenne prévue T_j^* de la production totale P_j vérifie les contraintes de vente ou de laverie. On a ainsi, au jour j , les relations (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978) :

- Tonnage totale produit :

$$P_j = \sum_{i=1}^N p_{ij} \quad (\text{III.45})$$

- Teneur moyenne prévue :

$$T_j^* = \frac{\sum_i p_{ij} \theta_i^*}{P_j} \quad (\text{III.46})$$

- Teneur moyenne vraie effectivement récupérée :

$$T_j = \frac{\sum_i p_{ij} t_{ij}}{P_j} \quad (\text{III.47})$$

Il s'agit de contrôler l'écart entre teneur prévue T_j^* et teneur vraie T_j effectivement récupérée au travers de la variance d'estimation :

$$\sigma_{E_j}^2 = E \left\{ \left[T_j - T_j^* \right]^2 \right\} \quad (\text{III.48})$$

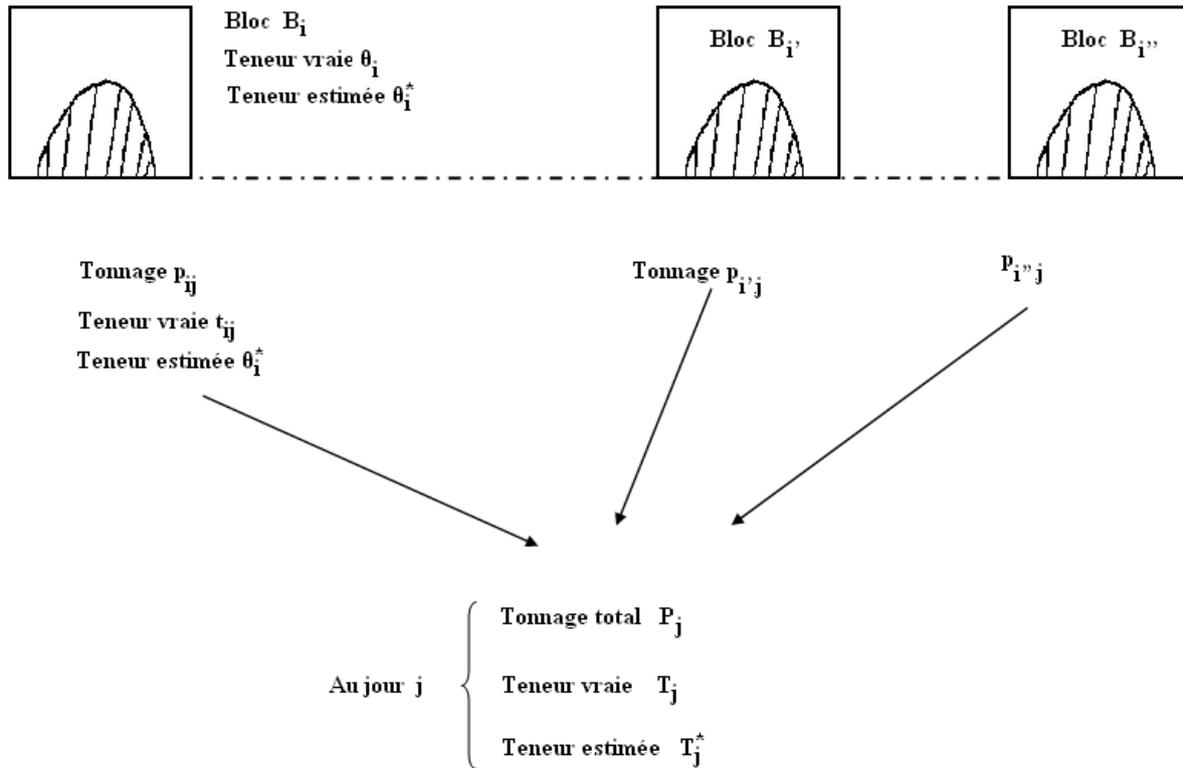


Figure. III.6. Schématisation de l'exploitation simultanée de plusieurs chantiers (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978).

On suppose les N blocs B_i plongés dans une régionalisation stationnaire dont la teneur admet l'espérance m .

Les diverses teneurs : θ_i^* , θ_i , t_{ij} ont donne même espérance m , et la prévision de teneur est sans biais :

$$E\{T_j - T_j^*\} = \frac{\sum_i p_{ij} E\{t_{ij} - \theta_i^*\}}{P_j} = 0 \tag{III.49}$$

Pour la variance d'estimation il vient :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{\sum_i \sum_{i'} p_{ij} p_{i'j} E\{(t_{ij} - \theta_i^*)(t_{i'j} - \theta_{i'}^*)\}}{P_j^2} \tag{III.50}$$

Si les N blocs exploités simultanément sont suffisamment distants l'un de l'autre, on peut supposer indépendants les 2 erreurs $(t_{ij} - \theta_i^*)$ et $(t_{i'j} - \theta_{i'}^*)$ pour $i = i'$. Il reste donc :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{\sum_i p_{ij}^2 E\left\{(t_{ij} - \theta_i^*)^2\right\}}{P_j^2} \quad (\text{III.51})$$

L'erreur élémentaire peut s'écrire :

$t_{ij} - \theta_i^* = (t_{ij} - \theta_i) + (\theta_i - \theta_i^*)$, il vient donc :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{1}{P_j^2} \sum_i p_{ij}^2 \left[E\left\{(t_{ij} - \theta_i)^2\right\} + E\left\{(\theta_i - \theta_i^*)^2\right\} + 2E\left\{(t_{ij} - \theta_i)(\theta_i - \theta_i^*)\right\} \right] \quad (\text{III.52})$$

On peut supposer que la fluctuation des teneurs élémentaires t_{ij} à l'intérieur du bloc B_i est indépendante de l'erreur d'estimation $\theta_i - \theta_i^*$ de ce bloc; il vient alors :

$$E\left\{(t_{ij} - \theta_i)(\theta_i - \theta_i^*)\right\} = 0 \quad (\text{III.53})$$

Si l'on connaissait exactement l'implantation du tonnage p_{ij} dans le bloc B_i , on pourrait calculer la variance d'extension de la teneur t_{ij} de ce tonnage à la teneur θ_i du bloc, c'est-à-dire le terme $E\{(t_{ij} - \theta_i)^2\}$. En pratique, il suffit de considérer la valeur moyenne de ce terme $E\{(t_{ij} - \theta_i)^2\}$ sur tout le bloc B_i , c'est-à-dire la variance de dispersion d'une unité moyenne de production t_i dans le bloc B_i :

$$\frac{1}{V_{B_i}} \int E\left\{(t_{ij} - \theta_i)^2\right\} \cong D^2(p_i/B_i) \quad (\text{III.54})$$

p_i représente le support d'une unité de production moyenne dans le bloc B_i ; en termes de tonnages si le bloc B_i est exploité en k jours, il vient :

$$p_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k p_{ij} \quad (\text{III.55})$$

D'autre part, par définition, $E\{(\theta_i - \theta_i^*)^2\} = \sigma_{ei}^2$ est la variance d'estimation de la teneur moyenne de bloc B_i . Si ce bloc a été estimé par krigeage, σ_{ei}^2 n'est autre que la variance de krigeage du bloc donnée directement par le système de krigeage.

Il vient finalement pour la variance d'estimation de la teneur moyenne T_j de la production totale P_j au jour j :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{1}{P_j^2} \sum_{i=1}^N p_{ij}^2 \left[D^2(p_i/B_i) + \sigma_{e_i}^2 \right] \quad (\text{III.56})$$

Cette variance dépend donc, non seulement de la dispersion des teneurs des unités de production t_i dans chaque bloc B_i , mais aussi de la qualité des estimateurs de teneurs moyenne de ces blocs B_i (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978).

Remarque 1: Si l'on peut baser la programmation de l'exploitation au jour j , non les teneurs estimées θ_i^* des blocs ou des chantiers B_i , mais sur les estimateurs t_{ij}^* de chaque unité de production, la formule précédente se réduit à la composition de N estimations élémentaires indépendantes, soit (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978) :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{1}{P_j^2} \sum_{i=1}^N p_{ij}^2 E \left\{ \left[t_{ij} - t_{ij}^* \right]^2 \right\} \quad (\text{III.57})$$

Ce cas correspond, par exemple, à un gisement à ciel ouvert dont la programmation de l'exploitation est basée sur les analyses ultimes des puits de tir permettant de former les estimateurs t_{ij}^* de chaque unité de production.

Remarque 2: Cependant, il arrive que l'on ne puisse pas estimer directement les teneurs t_{ij} , soit parce que l'on ne sait pas exactement où se trouve l'unité p_{ij} correspondante (ex : du soutirage par block caving de p_{ij} tonnes d'un bloc B_i), soit parce que l'on ne dispose pas de l'information nécessaire pour estimer directement t_{ij} .

Dans de tels cas, il faut bien voir que la qualité du contrôle des teneurs a une limite absolue, imposée par les dispersions des teneurs d'unités dans les blocs et obtenue en annulant les variances d'estimation $\sigma_{e_i}^2$ (c'est-à-dire en supposant les teneurs vraies θ_i des blocs B_i parfaitement connues). Il vient alors pour valeur minimale de la variance d'estimation $\sigma_{E_j}^2$

des teneurs quotidiennes :

$$\min \left\{ \sigma_{E_j}^2 \right\} = \frac{1}{P_j^2} \sum_i p_{ij}^2 D^2(p_i/B_i) \quad (\text{III.58})$$

Si de plus, les productions quotidiennes p_{ij} extraites de chaque bloc B_i sont à peu près égales, on a :

$$D^2(p_i/B_i) = D^2(p/B) \quad \forall i,$$

Et il vient :

$$\min \left\{ \sigma_{E_j}^2 \right\} = \frac{1}{N} D^2(p/B) \quad (\text{III.59})$$

Si $N = 1$, la variance d'estimation $\sigma_{E_j}^2$ prise en moyenne sur le bloc B est égale à la variance de dispersion; si $N > 1$, la formule correspond à la composition de N variances d'estimation moyennes élémentaires et indépendantes).

Remarque 3: On observe que si l'on veut améliorer le contrôle des teneurs de productions quotidiennes, c'est-à-dire si l'on veut diminuer en moyenne les écarts entre teneurs prévues T_j^* et teneurs effectivement récupérées T_j , on peut (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978) :

- ✓ Soit chercher à diminuer les variances d'estimation $\sigma_{e_i}^2$: les teneurs de blocs B_i étant mieux estimées, la programmation de la production est faite sur des bases plus sûres.
- ✓ Soit plutôt à diminuer la variance de dispersion moyenne $\frac{1}{N} \sum_i D^2(p_i/B_i)$ en augmentant le nombre N de chantiers : l'effet de compensation des erreurs d'estimation $(t_{ij} - \theta_i^*)$ entre les différents chantiers est alors plus fort.

Chapitre IV

Etude du cas du gisement de M'Zila

Dans le gisement bentonitique de M'Zila, on se trouve de plus en plus souvent face à un produit dont la qualité est très variable. A en juger par les très nombreux échantillonnages effectués à plusieurs stades du processus d'exploitation et de préparation de minerai (voir § II.4.1), l'usine est sérieusement confrontée à un problème de variabilité de la qualité de l'argile.

Dans ce chapitre nous commencerons par une exploration statistique des données disponibles sur le gisement de M'Zila. La seconde partie sera consacrée à l'étude géostatistique de ces données et la modélisation du variogramme correspondant. La troisième et dernière partie sera réservée à l'estimation ou krigeage des blocs d'exploitation et la détermination de leurs paramètres de variabilité prévisionnels.

IV.1. Présentation et exploration statistique des données

Compte tenu de l'utilisation de la Bentonite dans les domaines (pétrolier, industriel,...etc.) et pour la définition des zones plus ou moins homogènes, dans le gisement les critères et les exigences (représentées par les normes API) sont prises en compte dans l'étude statistique.

Une des sources du problème posé par la société BENTAL peut sans doute se trouver dans la variation de la qualité des argiles bentonitiques. L'analyse statistique est faite sur les données des rainures.

IV.1.1. Statistiques des données

Les données de départ sont celles du tableau fourni par un des rapports de Bental (BENTAL, 2009). La variable qui nous intéresse dans ce tableau est la viscosité VL600.

Ne disposant pas des coordonnées X, Y des échantillons, nous avons procédé nous-mêmes à la lecture de ces coordonnées en utilisant un agrandissement de la carte générale de la mine de M'Zila (Fig. IV.1).

Nous avons utilisé les données obtenues à partir d'échantillons prélevés dans les rainures (tableau. IV.2).

Par conséquent le fichier final pour cette exploration statistique et aussi pour la modélisation géostatistique qui suit est présenté dans le tableau. IV.1 ci-dessous.

Dans le Tableau. IV.1 nous avons six colonnes que nous décrivons comme suit :

- Ident : N° d'identification de la parcelle ;
- Couche : Numéro de couche de parcelle ;
- Parcelle : Nom de la parcelle ;
- X et Y : Coordonnées Lambert du centre de la parcelle (en m);
- VL600 : Viscosité (viscosimètre FANN (600 tours/minute)).

Tableau. IV. 1. Tableau représentatif de VL600 des parcelles avec les coordonnées X, Y.

Ident	Couche	Parcelle	X (m)	Y (m)	VL600 (Cp)
1	III	A	269432	3989142	10
2	III	B	270010	3989232	9
3	IV	AEK	269902	3989239	18
4	IV	A	270976	3989358	10
5	VII	A	269670	3989291	7
6	X	1	270726	3988821	8,7
7	X	T2	268432	3989164	18,5
8	X	Oul	269913	3989388	14,5
9	XI	A3	267973	3989254	15
10	XIII	C	270838	3989926	11
11	XIV	D	268876	3989769	16
12	XIV	E	268771	3989739	24
13	XIV	F	268995	3989799	27,8
14	XIV	A	270932	3989941	33
15	X	E	271010	3989616	14,8
16	IV	E	270077	3989284	22
17	X	C	268301	3989142	16
18	XIV	G	269096	3989814	29
19	XIV	J	271126	3989926	16
20	XI	A3-4	268100	3989276	16
21	X	Benm	271025,3	3989075	13,9
22	X	Grab	271114	3989351	17,9
23	X	B4	269297	3989426	15
24	I	A	269823	3989161	12
25	IV	G	268204	3989023	10
26	VII	B	269794	3989295	9
27	XI	B	267831	3989314	14
28	X	N	268570	3989023	16,5
29	XI	C	268376	3989381	18
30	IV	S	270342	3989344	8,6
31	XII	B	269988	3989549	9
32	XIII	F	270435	3990053	11
33	III	C	269353	3989120	5
34	I	C	268570	3988814	24

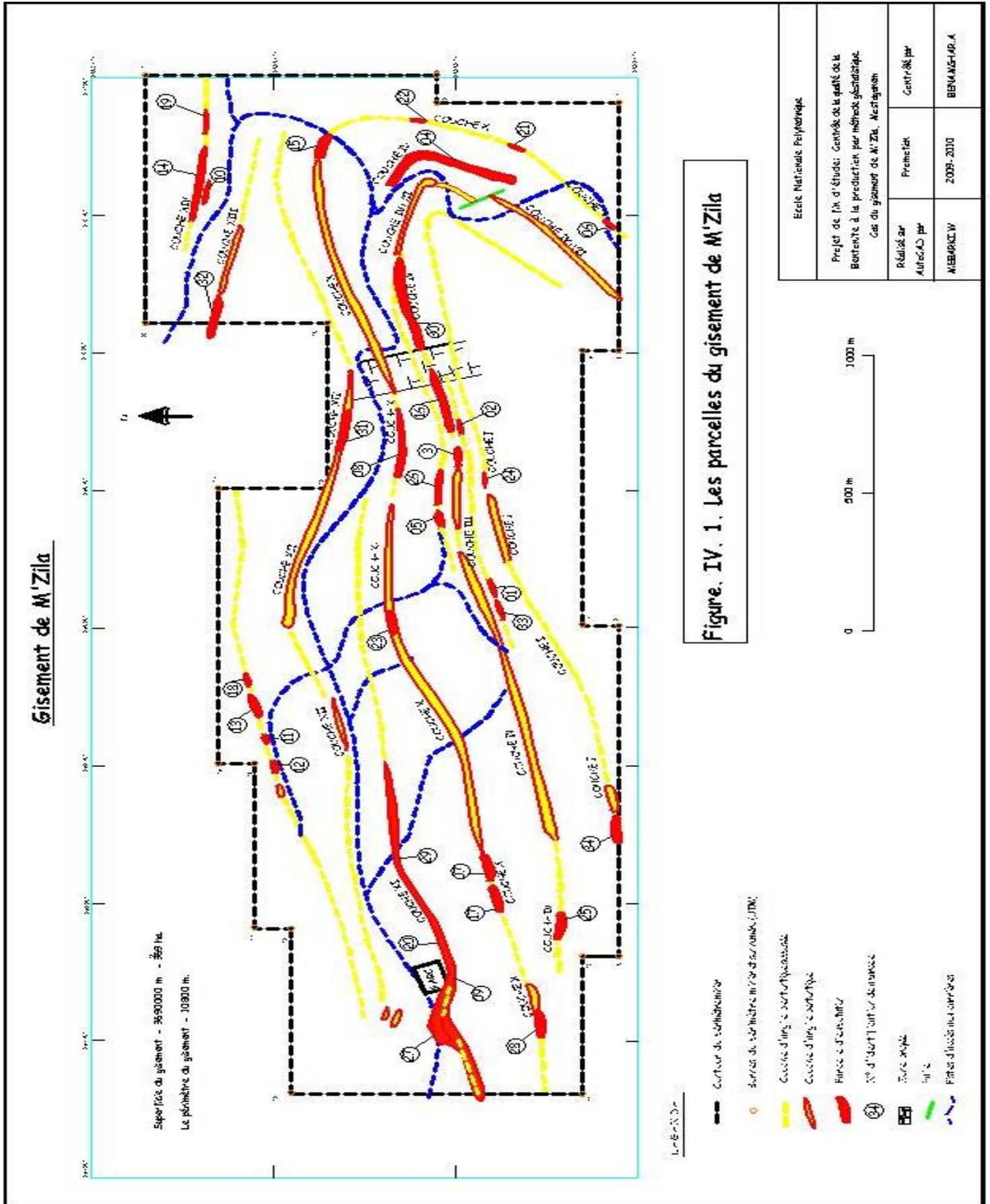


Tableau IV. 2. Des échantillons prélevés dans les rainures (BENTAL, 2009).

Coordonnées des rainures de la parcelle A – couche VII			
Rainure	X(m)	Y(m)	VL600(Cp)
R1	269644	3989282	6,67
R2	269654	3989283	5,33
R3	269664	3989285	4,67
R4	269674	3989286	8,5
R5	269684	3989288	7
R6	269694	3989289	10
Coordonnées des rainures de la parcelle A3 – couche XI			
Rainure	X(m)	Y(m)	VL600(Cp)
R1	267919	3989272	20
R2	267934	3989275	17,5
R3	267949	3989279	12
R4	267964	3989273	19
R5	267979	3989277	10
R6	267994	3989280	7
R7	268009	3989274	13
R8	268024	3989282	21,5
Coordonnées des rainures de la parcelle F - couche XIV			
Rainure	X(m)	Y(m)	VL600(Cp)
R1	268919	3989772	20,3
R2	268929	3989773	22,5
R3	268939	3989775	32,5
R4	268949	3989778	35,6
Coordonnées des rainures de la parcelle E - couche XIV			
Rainure	X(m)	Y(m)	VL600(Cp)
R1	268769	3989747	16
R2	268779	3989751	20
R3	268789	3989754	28
R4	268799	3989757	32

Coordonnées des rainures de la parcelle D - couche XIV			
Rainure	X(m)	Y(m)	VL600(Cp)
R1	268819	3983757	14,5
R2	268829	3983760	17,5
R3	268839	3983764	16
Coordonnées des rainures de la parcelle AEK – couche IV			
Rainure	X(m)	Y(m)	VL600(Cp)
R1	269929	3989247	20
R2	269939	3989249	14
R3	269949	3989251	19
R4	269959	3989248	21
R5	269969	3989250	16
R6	269979	3989249	17,5
R7	269989	3989252	18,5
Coordonnées des rainures de la parcelle B – couche III			
Rainure	X(m)	Y(m)	VL600(Cp)
R1	269994	3989237	11,3
R2	270004	3989239	7
R3	270014	3989240	10,4
R4	270024	3989238	8,3
R5	270034	3989241	10,6

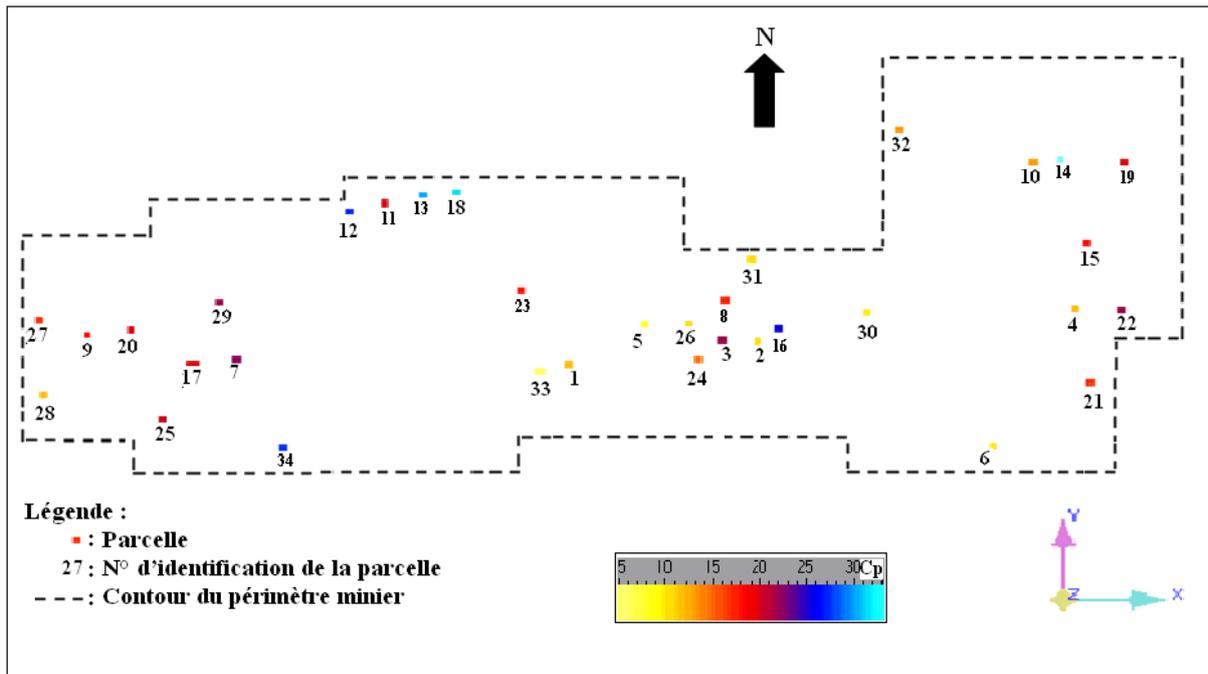


Figure. IV. 2. Localisation des échantillons de Bentonite tels que présentés en tableau IV.1 du gisement de M'Zila.

Une pratique souvent utilisée pour la représentation des ensembles de données est la table de fréquence et en particulier le graphe correspondant: l'histogramme.

L'information contenue dans l'histogramme peut être résumée par un certain nombre de variables statistiques telles que :

- La moyenne, le mode et la médiane : où paramètres de tendance centrale.
- La variance, ou l'écart-type : ceux-ci décrivent la variabilité des valeurs des données par rapport à la moyenne.
- le coefficient de variation : lequel décrit la forme de la distribution.

Le coefficient de variation (C.V.) est défini, pour sa part, comme étant le rapport entre l'écart-type et la moyenne. Ce coefficient est utilisé si les valeurs qu'on représente sont toutes positives.

$$C.V. = \frac{\sigma}{m}$$

Pour appliquer toutes ces notions à notre variable de travail VL600 et déterminer l'histogramme associé, nous utilisons le logiciel de géostatistique S-GeMS. Les résultats obtenus sont résumés dans la figure IV.3.

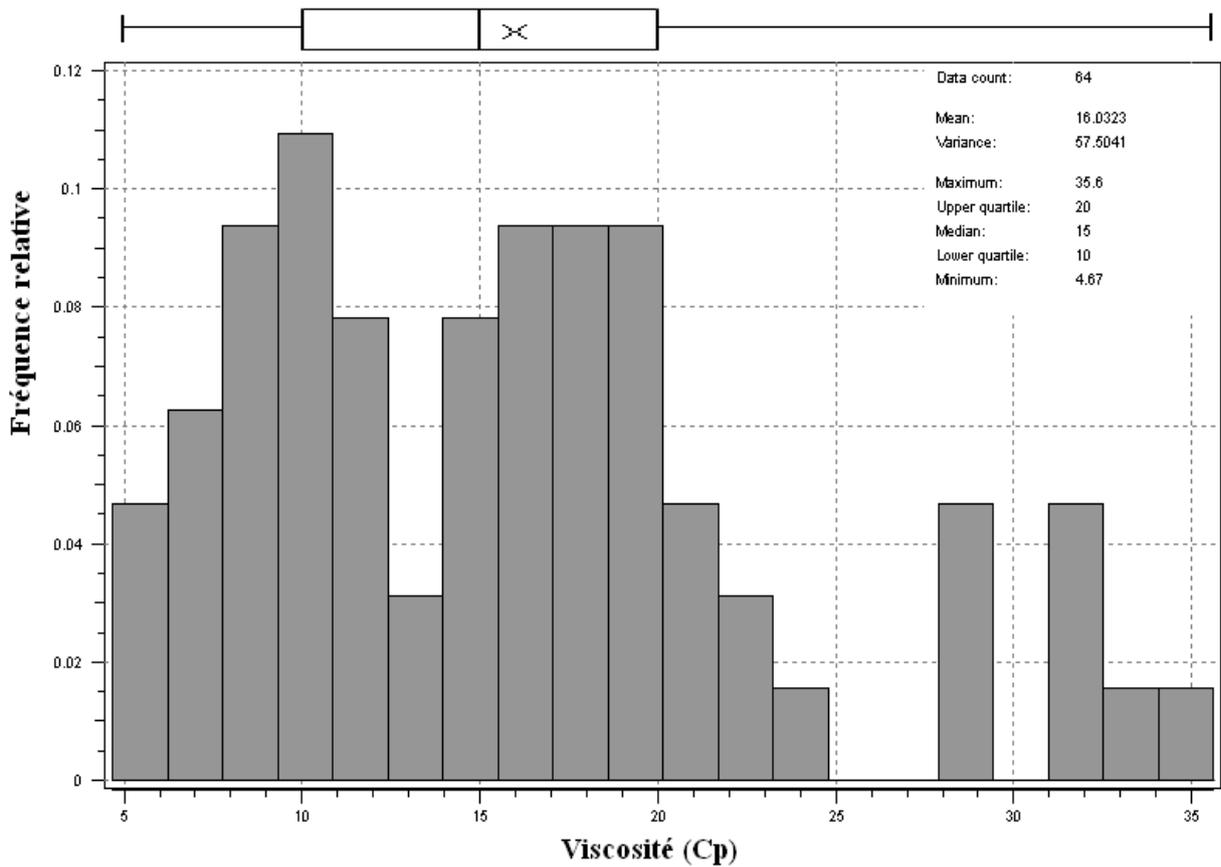


Figure. IV. 3. Histogramme des viscosités VL600, gisement M'Zila.

L'histogramme des viscosités (Fig. IV.3) présente dans l'axe des abscisses les classes des valeurs des viscosités VL600 (Cp), et dans l'axe des ordonnées les fréquences correspondantes à chacune d'elles.

A première vue, nous remarquons un léger étirement de l'histogramme vers les valeurs hautes. Ceci est dû à la présence de quelques valeurs élevées. Remarquons, aussi qu'il y a une classe de valeur légèrement dominante qui est la classe [9,5 ; 11] représentée par 10% de fréquence relative.

On remarque aussi que l'histogramme est globalement formé par deux groupes distinctes, ceci est souvent dû à la présence de deux familles d'échantillons, l'une avec une moyenne autour de 10Cp et l'autre autour de 18Cp.

En effet, Cela s'explique par le fait que ces données sont composées d'échantillons de différents supports, des rainures et des moyennes de plusieurs rainures à la fois.

Les paramètres de cette distribution sont donnés ci-dessous:

a) Caractéristiques de tendance centrale :

Nombre d'échantillons	N = 64 échantillon
Le mode	M = 10 Cp
La médiane	S = 15 Cp
La moyenne	m = 16,03 Cp
Maximum	Max = 35,6 Cp
Minimum	Min = 4,47 Cp
Remarque	M ≠ m

b) Caractéristiques de dispersion :

La variance	$\sigma^2 = 57,5 \text{ Cp}^2$
L'écart type	$\sigma = 7,58 \text{ Cp}$

$$\text{Le coefficient de variation relative } C.V. = \frac{\sigma}{m} = 0,47$$

Le graphique au-dessus de l'histogramme (fig. IV.3), est un diagramme de boîte à moustaches « box plot ». Il délimite les quartiles d'une distribution, c'est-à-dire les proportions occupées par 25, 50, 75 de la population. La figure. IV. 4 illustre, par exemple, la signification des différentes parties.

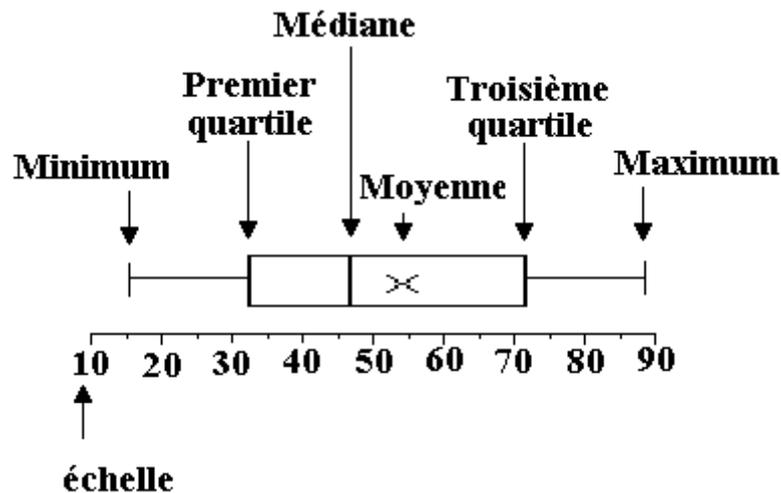


Figure. IV.4. Diagramme de boîte à moustaches.

IV.2. Exploration et modélisation variographique

Nous commençons par calculer un variogramme expérimental omnidirectionnel $\gamma_{eVL600}(h)$ de la variable VL600. Ce calcul compare les paires de points échantillonnés quelle que soit leur orientation dans l'espace (tolérance angulaire de $\pm 90^\circ$) et une tolérance linéaire de $\frac{h}{2}$ (fig. IV.5, fig. IV.6 et fig. IV.7).

Rappelons l'expression de variogramme expérimental (III.13):

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

IV.2.1. Variogramme omnidirectionnel de VL600

Nous avons considérés plusieurs classes d'interdistances h (5, 7, 9, ..., 20m). L'interdistances qui fournit la meilleure courbe expérimentale à été choisie dans notre cas c'est l'interdistance $h = 6m$.

Une bonne structure de variogramme expérimentale est celle qui s'approche d'un modèle théorique connu avec un effet de pépite le plus faible possible.

De plus les points expérimentaux doivent être obtenus à l'aide d'un nombre de paires échantillons excédant les 20 paires (DAVID, 1977; ISOBEL, 1979; JOURNAL et HUIJBREGTS, 1978; ...).

Le variogramme expérimental omnidirectionnel que nous avons ainsi obtenu est représenté par des croix dans la figure IV.8 ci-dessous.

Ensuite, afin de vérifier la présence ou non d'anisotropie, nous calculerons également des variogrammes directionnels, à : $N0^\circ$, $N30^\circ$, $N60^\circ$ et $N90^\circ$ avec à chaque fois une tolérance angulaire de $\pm 45^\circ$. Dans les paragraphes suivants nous allons discuter les résultats de cette exploration variographique et tirer les conclusions relatives.

Les paramètres pour construire les variogrammes sont résumés dans le tableau IV. 3 suivant :

Tableau. IV. 3. Paramètres pour le calcul des variogrammes.

<i>Interdistances</i>				
Nombre de lag (Number of lags)		Interdistances h (Lag separation) (m)		Tolérance linéaire (Lag tolerance) (m)
15		6		5
<i>Directions</i>				
Nombre de directions 4				
N°	Azimut (Azimuth) (°)	pendage (dip) (°)	Tolérance angulaire (Tolerance) (°)	Largeur de bande (bandwidth) (m)
Omnidirectionnel	0	0	90	5000
1	0	0	45	2500
2	30	0	45	2500
3	60	0	45	2500
4	90	0	45	2500

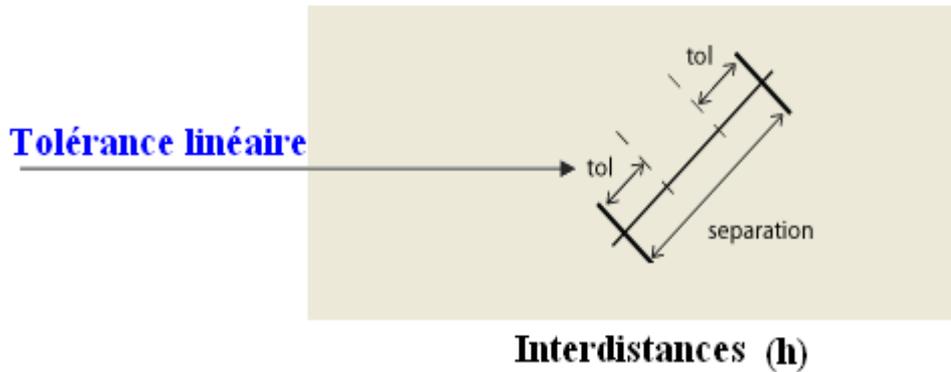


Figure. IV.5. Tolérance linéaire (Nicolas, 2006).

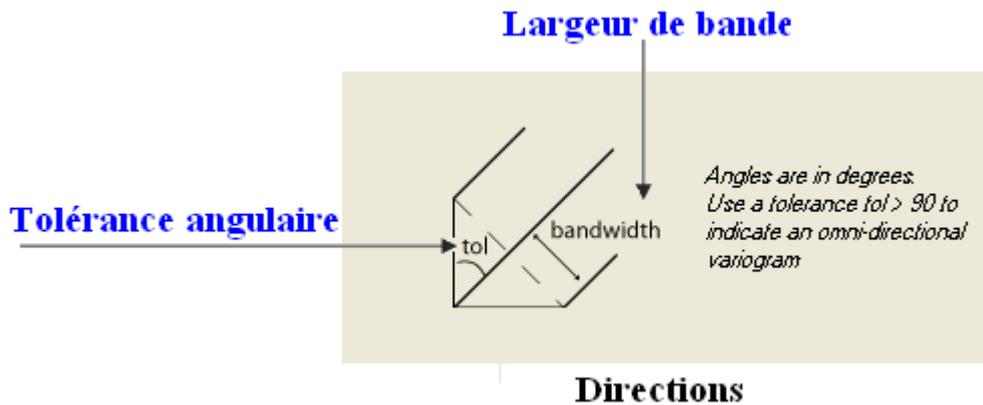


Figure. IV.6. Tolérance angulaire (Nicolas, 2006).

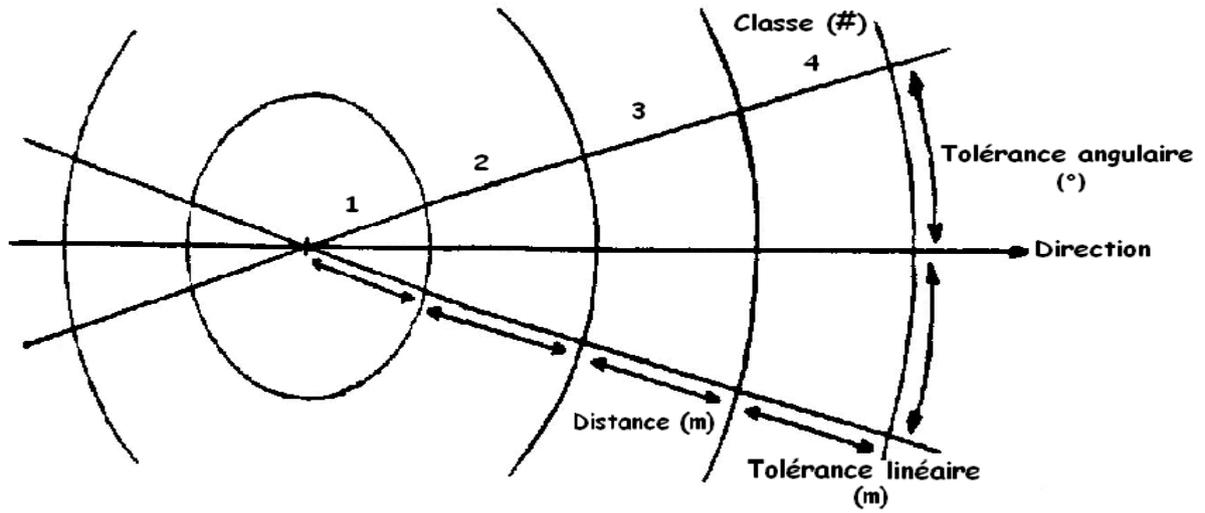


Figure. IV.7. Tolérance linéaire et angulaire par rapport au voisinage de recherche (MUTABAZI et VANSNICK, 1991).

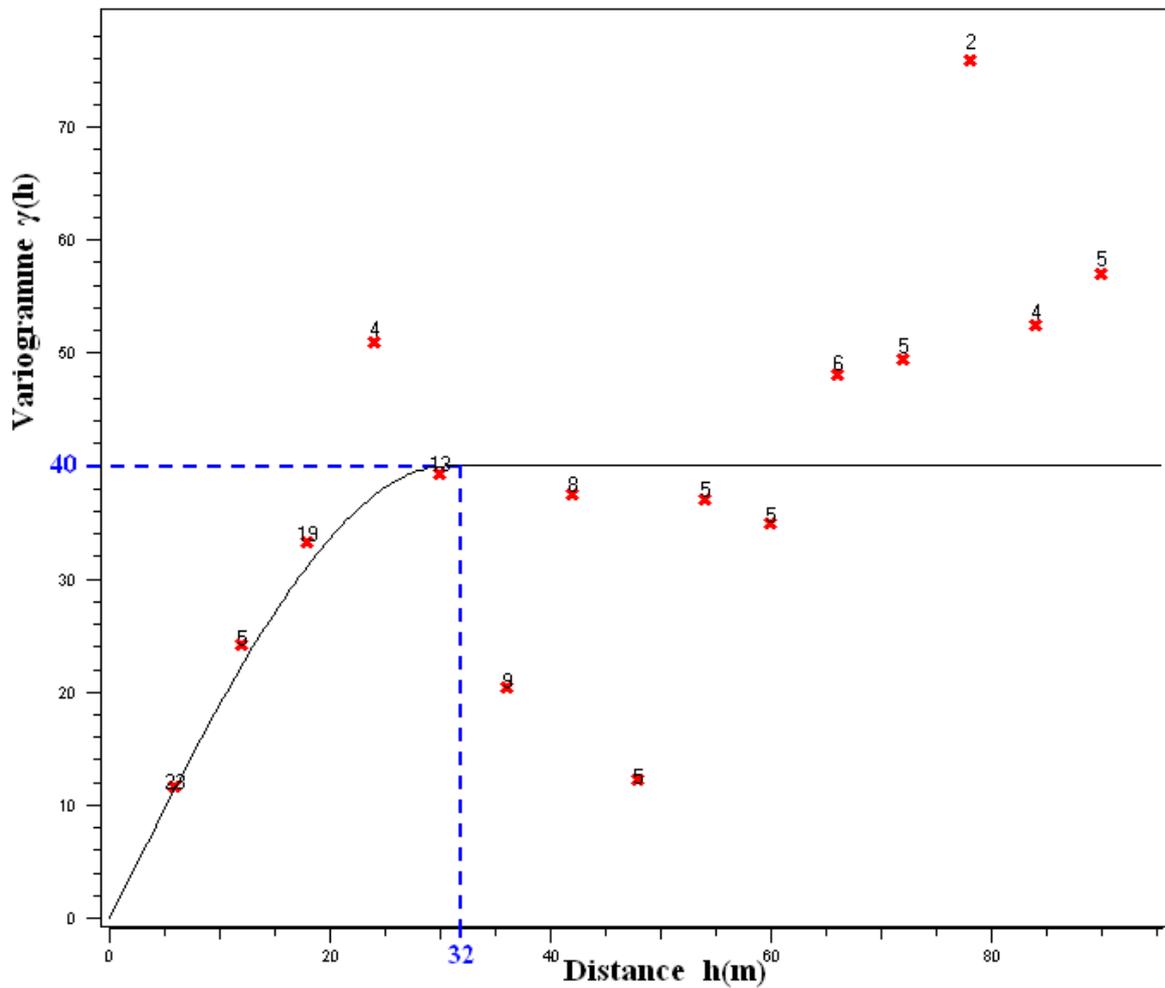


Figure. IV.8. Variogramme omnidirectionnel expérimentale de VL600 (croix) et le modèle ajusté (courbe continue), Les chiffres sur les points représentent le nombre de paires d'échantillons pour le calcul du point en question.

Le variogramme expérimental (Fig. IV.8, croix) montre une allure générale décrivant une structure sphérique avec une portée de l'ordre de 30m, et un seuil de $40(C_p)^2$.

Remarquons aussi que, le quatrième point de cette structure expérimentale sort de l'allure générale sans vraiment la modifier. Cela s'explique par l'influence des valeurs extrêmes lors du calcul de variogramme $\gamma_e(h)$ pour certaines interdistances.

IV.2.2. Modélisation du variogramme

Le variogramme expérimental ne peut pas être utilisé directement mais doit être au préalable ajusté d'un modèle théorique. Les plus utilisés sont: le modèle exponentiel, sphérique, gaussien et puissance.

Concernant la modélisation de cette structure nous avons opté pour un modèle sphérique (Fig. IV.8, courbe) avec une portée de 32m, un seuil de $C(0) = 40(C_p)^2$ et un effet pépite nul.

Les paramètres de cette structure sont donc :

$$C_0 = 0 \text{ Cp}^2; C(0) = 40 \text{ Cp}^2; a = 32\text{m}; h = 6\text{m}.$$

Le modèle de variogramme théorique correspondant à la structure omnidirectionnel est :

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & \text{si } 0 \leq h \leq a \\ C + C_0 & \text{si } h > a \end{cases}$$

D'où en remplaçant les paramètres :

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 + 40 \left(\frac{3h}{2(32)} - \frac{h^3}{2(32)^3} \right) & \text{si } 0 \leq h \leq 32 \\ 0 + 40 = 40 & \text{si } h > 32 \end{cases}$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{15h}{8} - \frac{5h^3}{2(16)^3} & \text{si } 0 \leq h \leq 32 \\ 40 & \text{si } h > 32 \end{cases}$$

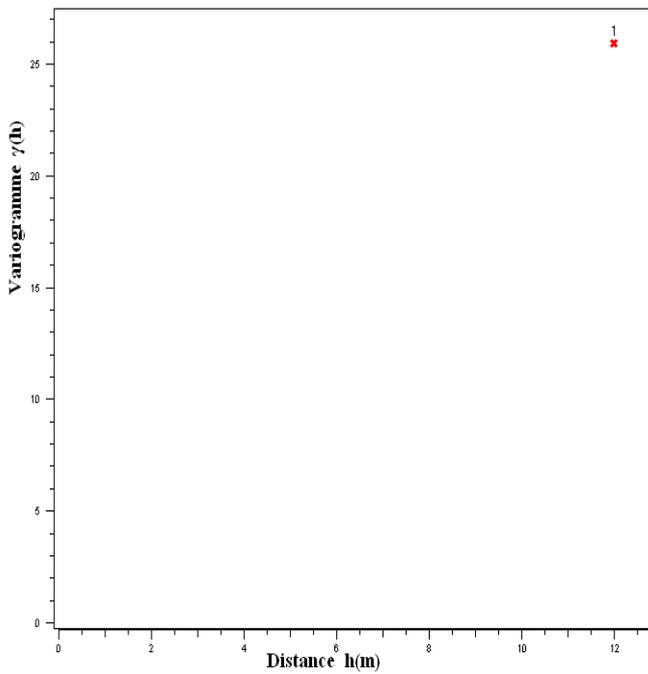


Figure. IV.9. Variogramme expérimentale (points) de direction à $N0^\circ \pm 45^\circ$.

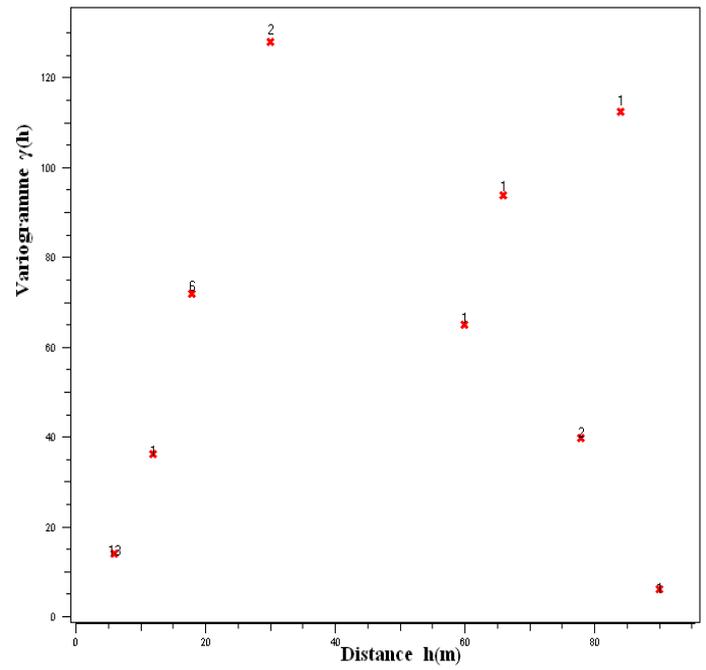


Figure. IV.10. Variogramme expérimentale (points) de direction à $N30^\circ \pm 45^\circ$.

(Les chiffres sur les points représentent le nombre de paires d'échantillons pour le calcul du point en question)

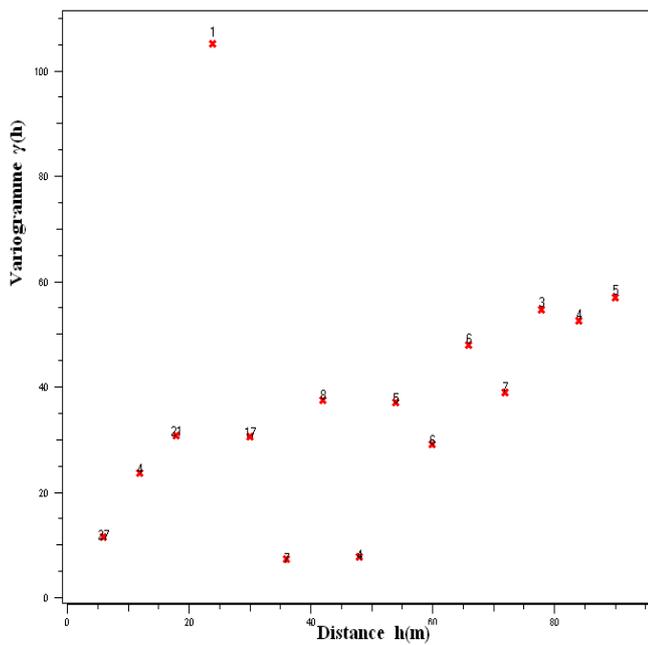


Figure. IV.11. Variogramme expérimentale (points) de direction à $N60^\circ \pm 45^\circ$.

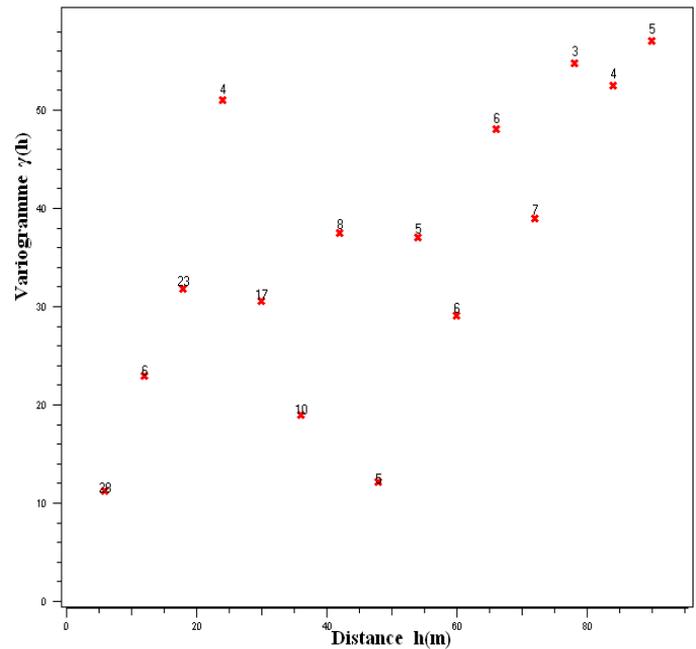


Figure. IV.12. Variogramme expérimentale (points) de direction à $N90^\circ \pm 45^\circ$.

(Les chiffres sur les points représentent le nombre de paires d'échantillons pour le calcul du point en question)

IV.2.3. Etude d'anisotropie

La continuité spatiale n'est pas nécessairement la même dans toutes les directions. Un gisement présentant une forme filonienne peut laisser penser à une meilleure continuité selon l'allongement principal des filons. Pour les placers, on distinguera la meilleure continuité le long des paléochenaux que perpendiculairement à ceux-ci (KONESHLOO, 2007).

- ❖ La figure IV.09 du variogramme de direction à $N0^\circ$, cette structure est représentée par un seul point (Structure chaotique), nous informe qu'il n'y a aucune continuité spatiale particulière dans cette direction.
- ❖ La figure IV.10 du variogramme de direction à $N30^\circ$, cette structure est très erratique (Structure chaotique).
- ❖ La figure IV.11 et la figure IV.12 présentent les variogrammes dans les directions respectivement à $N60^\circ$ et $N90^\circ$. Les structures ressemblent à la structure du variogramme omnidirectionnel (fig. IV.8).

Rappelons que les couches du gisement de M'Zila se situent au cœur d'un synclinal dont l'axe est presque Est-Ouest, c'est-à-dire $N60^\circ$ à $N120^\circ$.

Du point de vue de l'anisotropie ces quatre structures montrent que la variabilité de VL600 a une orientation spécifique dans le champ étudié. Cette orientation est globalement de direction Est-ouest comme les couches de Bentonite et le synclinal qui les accueille.

Cette anisotropie est clairement visible sur la figure. IV. 14 qui compare toutes ces directions en même temps, il s'agit d'une anisotropie géométrique dont le portée maximale ($\pm 30m$) est orientée Est-ouest et un portée quasi nulle dans le sens Nord-sud.

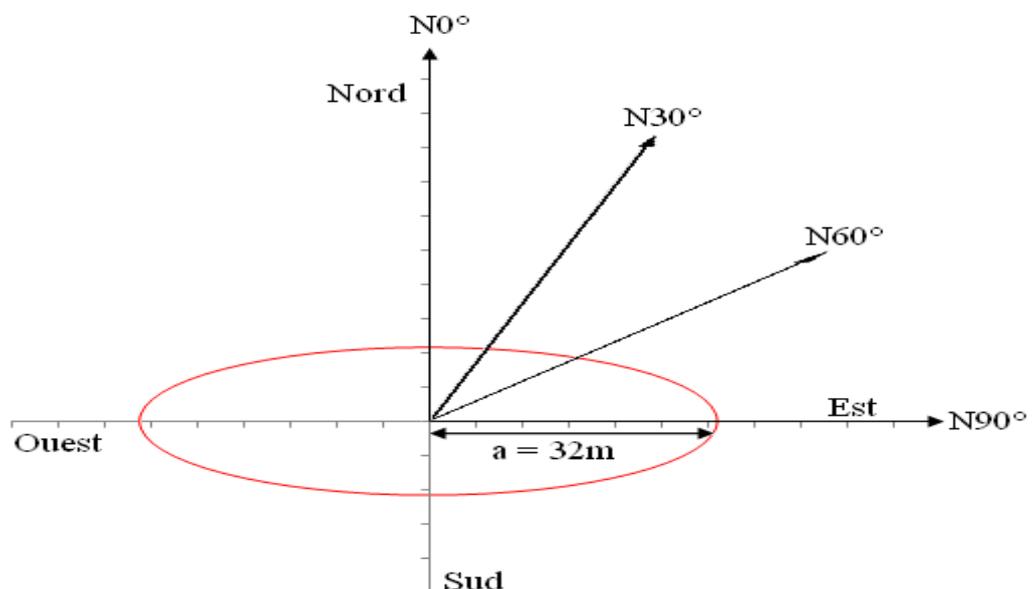


Figure. IV.13. Etude d'anisotropie.

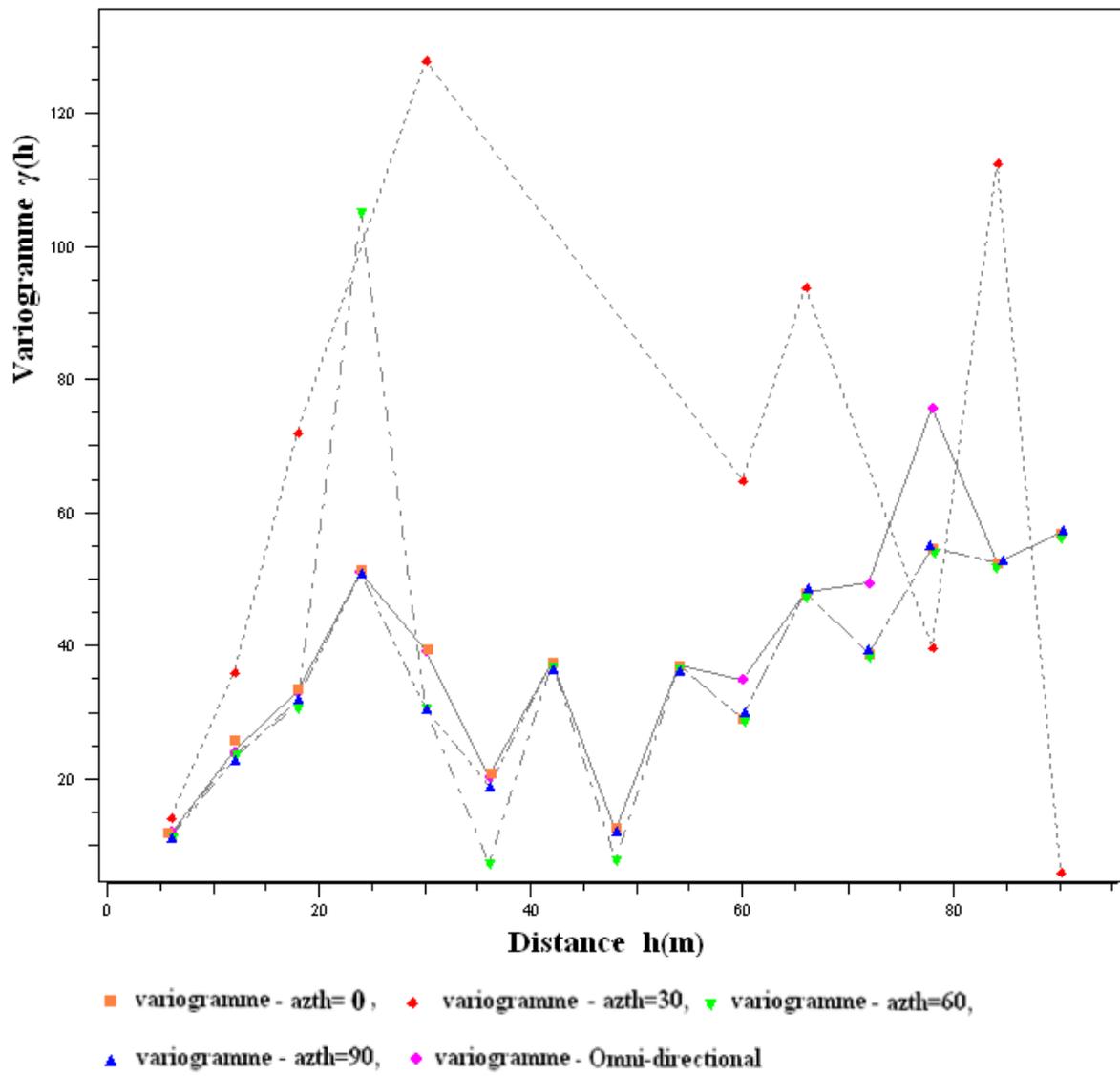


Figure. IV.14. Variogrammes multidirectionnels.

IV.3. Krigeage, résultat et interprétation

Dans les paragraphes suivants, nous allons nous consacrer aux calculs d'estimation ou krigeage. Nous avons travaillé sur la détermination de la variabilité spatiale de variable viscosité VL600 (voir § IV. 2). Le variogramme correspondant à été calculé et modélisé. Rappelons que nous avons décelé une anisotropie géométrique d'orientation Est-ouest.

IV.3.1. Krigeage des données

Nous pouvons maintenant faire une estimation locale de la variation en VL600 et dresser une carte montrant, en chaque endroit, la valeur qu'on peut espérer y trouver VL600*, par krigeage de bloc.

IV.3.1.1. Dimension du bloc

Une fois la modélisation variographique de la variable établie, l'étape préparatoire du krigeage consiste en la définition ou le choix des points ou de la grille des points à estimer. Cette étape consiste à déterminer le support géométrique sur lequel le krigeage sera effectué.

Pour le cas qui nous concerne nous avons découpé la parcelle en exploitation (parcelle A- couche VII, figure. IV. 16) en plusieurs blocs réguliers (Fig. IV.15). Ces blocs ont les dimensions suivantes:

La longueur L = puissance de la couche de Bentonite, fixe = 7m dans le cas de la couche VII;

La hauteur Z = hauteur du gradin exploité = 7m (BENTAL, 2009);

La largeur λ = avancement journalière de l'exploitation, calculée comme suit :

Nous avons le tonnage journalier $m = 250\text{t/jour}$ et la masse volumique (densité) $d = 2\text{t/m}^3$.

$$d \text{ (t/m}^3\text{)} = \frac{m \text{ (t)}}{v \text{ (m}^3\text{)}} = \frac{m \text{ (t)}}{L \text{ (m)} \times \ell \text{ (m)} \times Z \text{ (m)}}$$

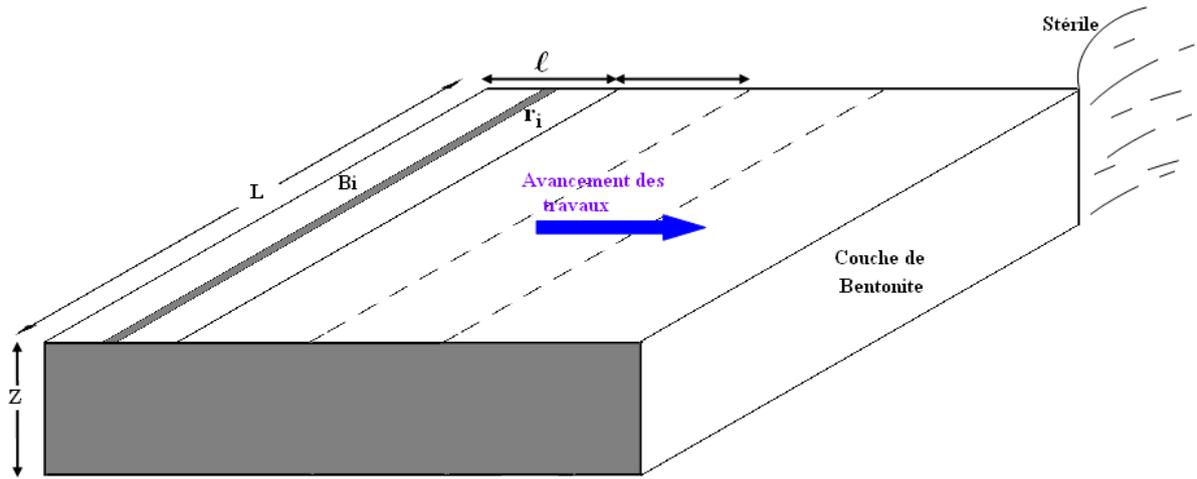
v : le volume de minerai (m^3)

D'où

$$\ell = \frac{m}{L \times d \times Z} = \frac{250}{7 \times 2 \times 7} = 2,5\text{m}$$

Donc :

L'avancement journalier λ de l'exploitation dans la couche VII est : 2,5m.



Légende :

- r_i : Rainure estimée
- B_i : Bloc
- L : Longueur du bloc
- ℓ : Largeur du bloc
- Z : Hauteur du bloc

Figure. IV.15. Les blocs à estimer (la parcelle A- couche VII).

IV.3.1.2. Choix du parcelle à Kriger

Nous avons choisi comme exemple de calcul la parcelle A – couche VII (fig. IV.16), pour le krigeage. On peut appliquer le même raisonnement pour les autres parcelles des différentes couches du gisement.

Tableau. IV.4. Caractéristiques géométriques de la parcelle A – couche VII (BENTAL, 2009).

Longueur (m)	Largeur (m)	Epaisseur (m)
60	7	7

Avec une production journalière environ 250 tonnes, qui donne un avancement de 2,5m par jour. Donc le krigeage à faire sur une série de blocs de 2,5 X 7 X 7.

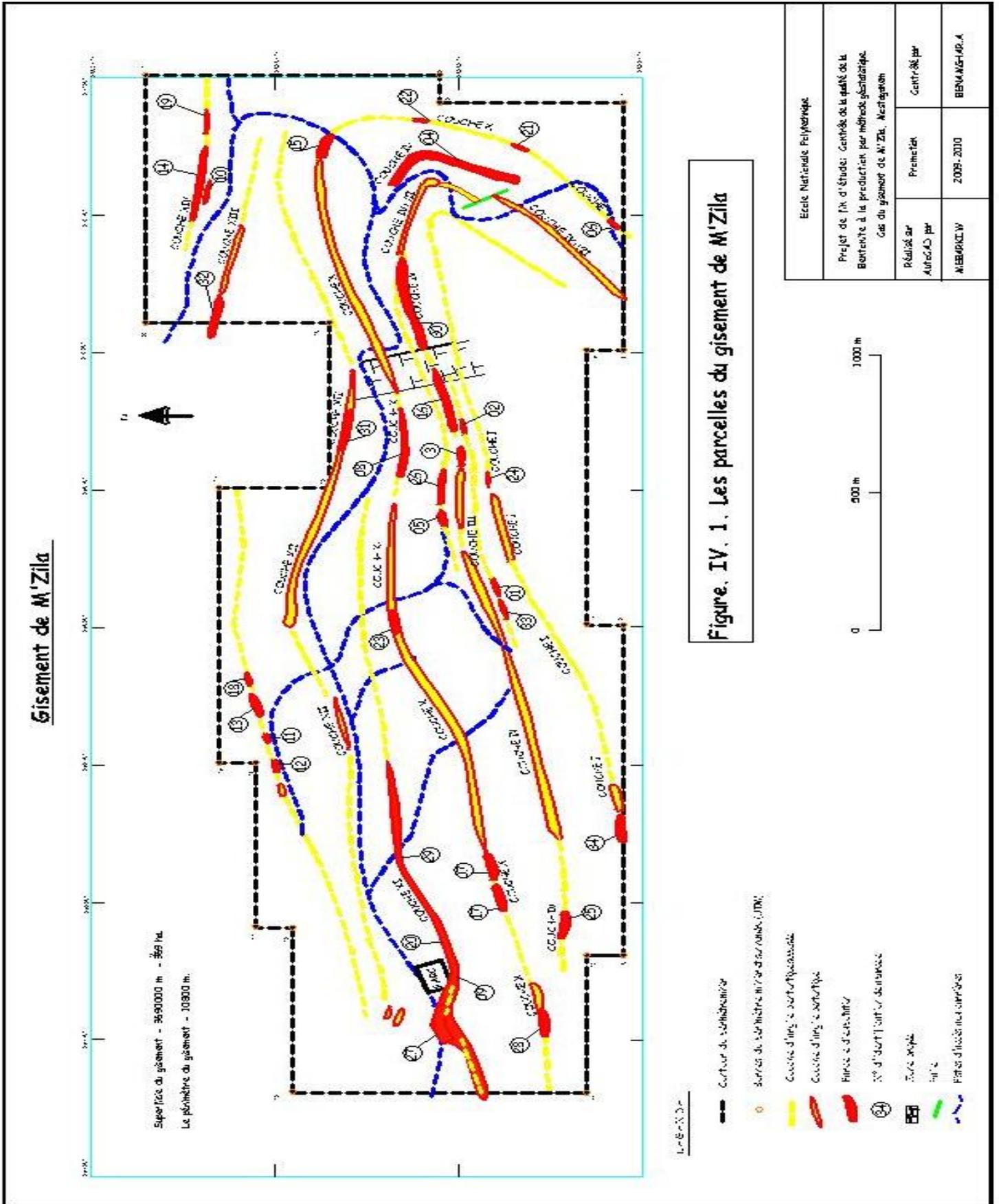


Figure. IV. 1. Les parcelles du gisement de M'Zila

IV.3.1.3. Paramètres de Krigeage

a) Modèle

Cette estimation, a été effectuée en utilisant le modèle de variogramme déjà structuré précédemment (fig. IV.8) dont nous rappelons ici l'équation:

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{15h}{8} - \frac{5h^3}{2(16)^3} & \text{si } 0 \leq h \leq 32 \\ 40 & \text{si } h > 32 \end{cases}$$

b) Voisinage de recherche

Il s'agit du voisinage qui englobe les échantillons rentrant dans l'estimation d'un point inconnu.

En pratique, nous utilisons plusieurs voisinages de recherche qui tiennent compte de la portée du variogramme, de la densité de l'échantillonnage et de la présence éventuelle d'anisotropie.

Nous sélectionnons par la suite le voisinage de recherche qui nous donne des estimations ayant le minimum de variance de Krigeage.

En première tentative, il est courant d'envisager que le voisinage intervenant dans le krigeage soit limité à la zone d'influence du variogramme. Notons que ceci ne constitue en rien une règle stricte. En outre, la vérification du bien-fondé de ce choix ne peut se faire qu'a posteriori.

Dans notre cas le voisinage de recherche utilisé est le suivant:

- Voisinage elliptique (fig. IV.17), car présence d'anisotropie;
- Orientation : $N90^\circ \pm 45^\circ$;
- Rayon maximum = 60m;
- Rayon minimum = 1m;
- Rayon moyenne = 40m;

Nombre d'échantillons à prendre en compte dans le calcul de krigeage d'un point :

minimum = 2 échantillons ;

maximum = 24 échantillons

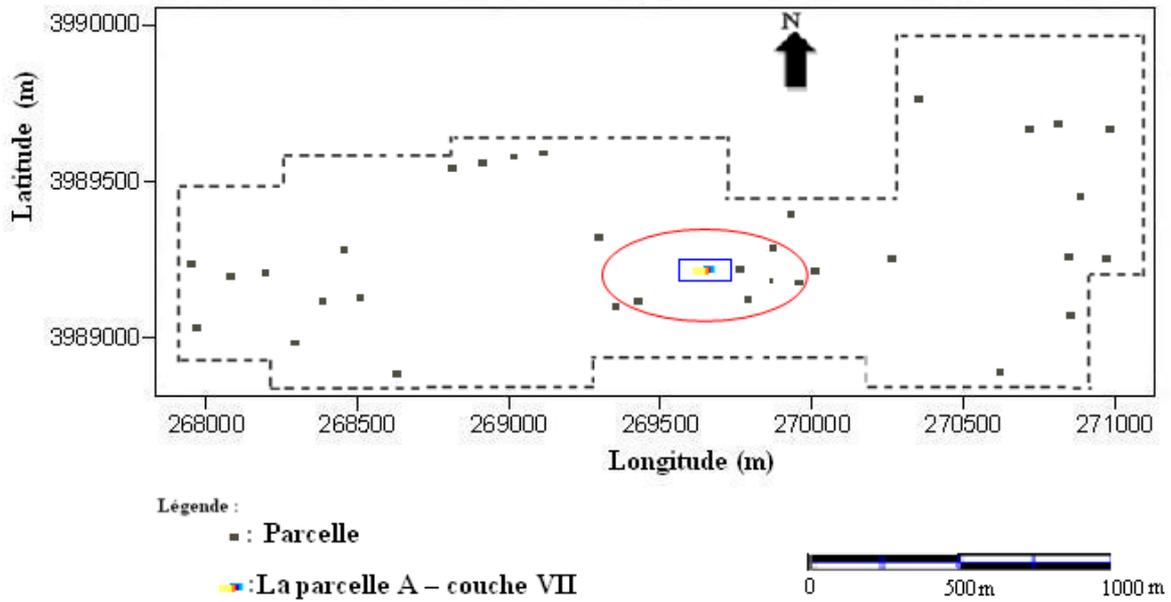
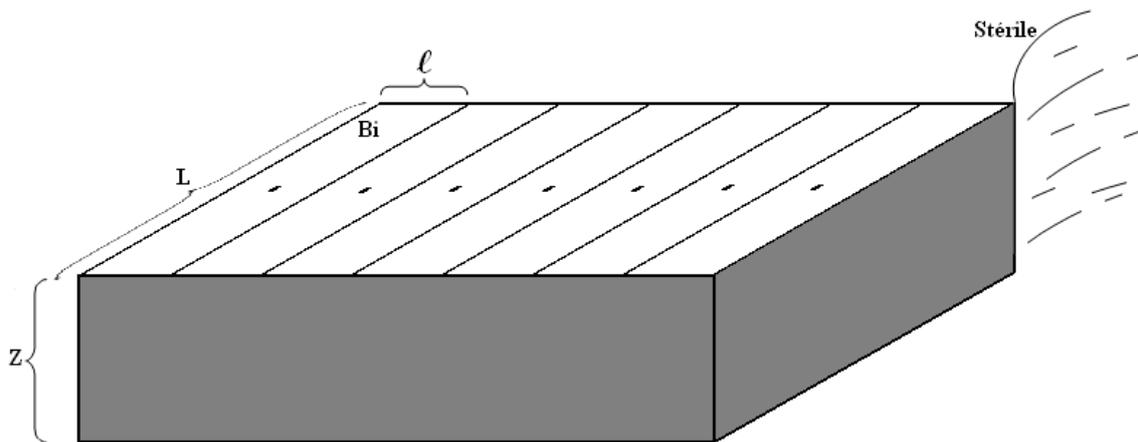


Figure. IV. 17. Voisinage de recherche.

c) Discrétisation des blocs

Les blocs d'exploitation journalière discrétisés par des points au centre de chaque bloc à estimer (fig. IV.18), par krigeage (fig. IV.19).



- Légende :
- : Point de discrétisation du bloc à estimer
 - Bi : Bloc d'exploitation journalière
 - L : Longueur du bloc
 - ℓ : Largeur du bloc
 - Z : Hauteur du bloc

Figure. IV. 18. Les blocs à estimer de la parcelle A – couche VII.

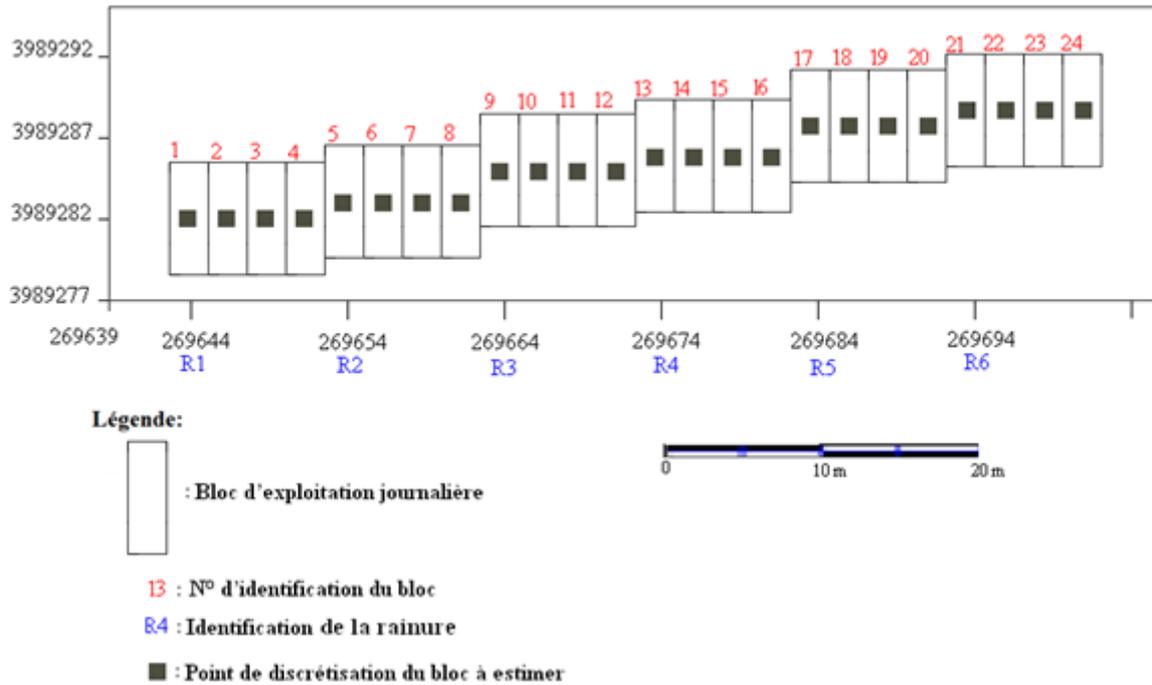


Figure. IV. 19. Schéma de découpage de la parcelle A – couche VII en blocs.

IV.3.1.4. Résultats du krigeage

Les résultats sont présents dans les aux figures IV.20 et IV.22 et résumés dans le tableau IV. 5.

La première figure (fig. IV.20) restitue les valeurs krigées des différents points représentant les blocs de la parcelle.

La seconde (fig. IV.22) représente les résultats de la variance d'estimation σ_e^2 (VL600) des valeurs krigées des différents blocs.

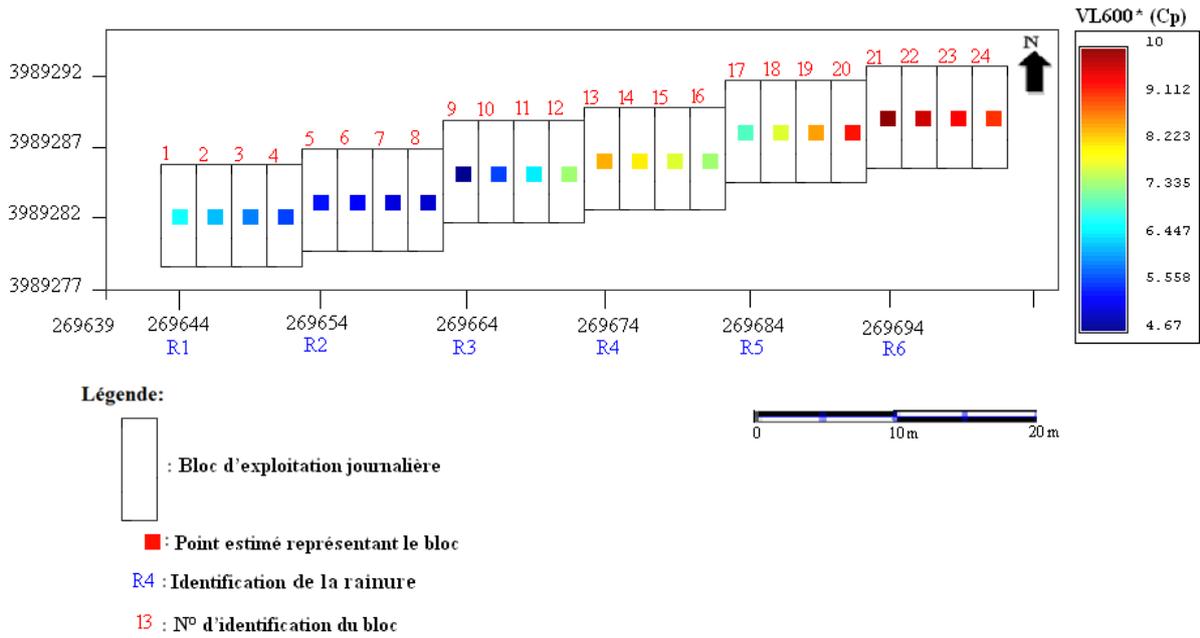


Figure. IV. 20. La carte de VL600* (Cp) (points estimés) par krigeage ordinaire de la parcelle A- couche VII

Cette carte de viscosité VL600* sur la grille de krigeage (parcelle), permet de voir les endroits où la viscosité est élevée. Nous remarquons des valeurs VL600* élevées vers l'extrémité Est sur la carte.

Rappelons que la parcelle A- couche VII est caractérisée par une faible valeur moyenne de viscosité (7Cp). C'est la raison pour laquelle cette figure montre une faible valeur de viscosité en moyenne.

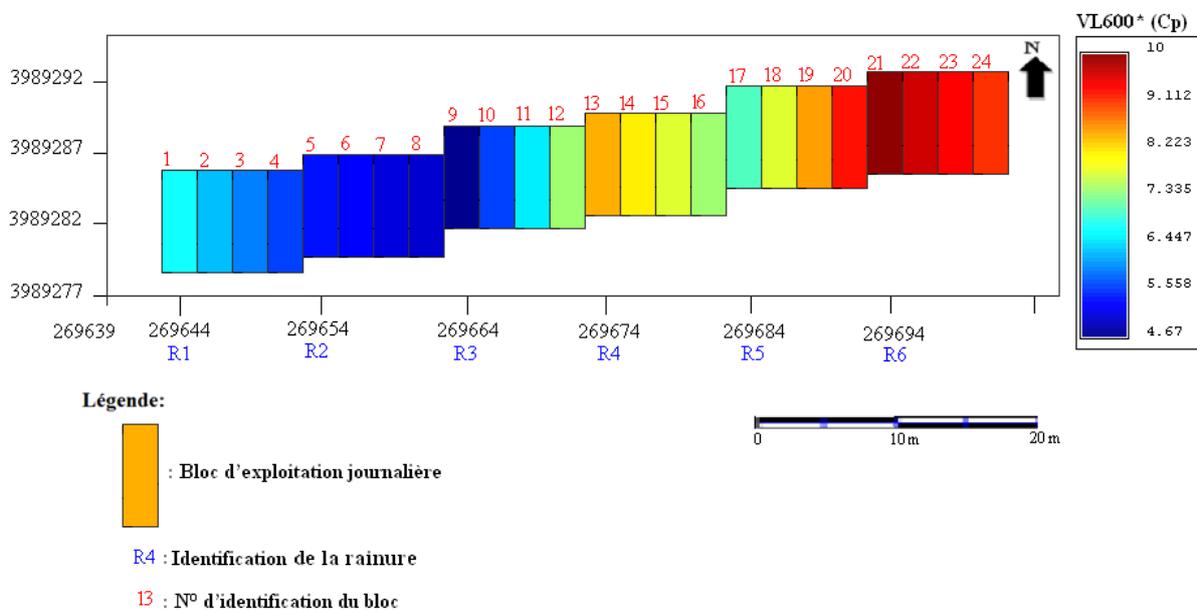


Figure. IV. 21. La carte de VL600* (Cp) (blocs) par krigeage ordinaire de la parcelle A- couche VII.

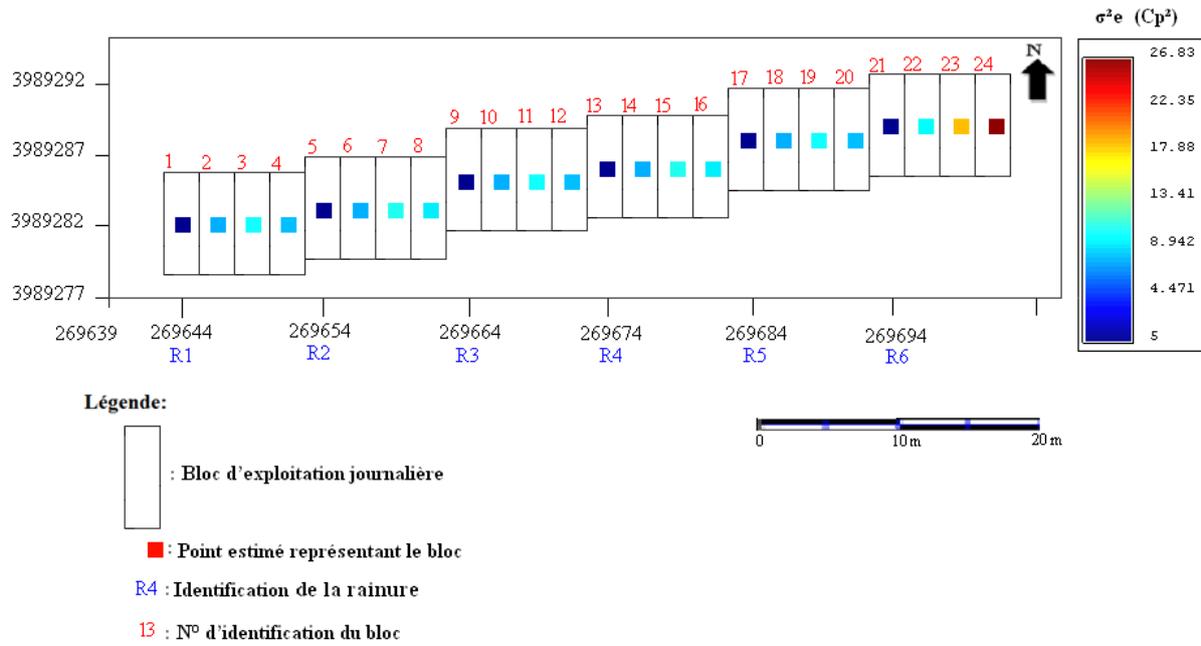


Figure. IV. 22. La carte de la variance d'estimation σ^2_e (Cp^2) (points estimés) par krigeage ordinaire de la parcelle A-couche VII.

Cette carte de variance σ^2_e sur la grille de krigeage (parcelle), permet de voir les endroits où la variance est élevée (extrémité Est). Ce qui s'explique par le manque d'information (échantillons de rainure) à cet endroit. La rainure connue R6 étant à plus de 10m. Ce qui n'est pas le cas pour l'extrémité Ouest qui elle a une variance σ^2_e faible.

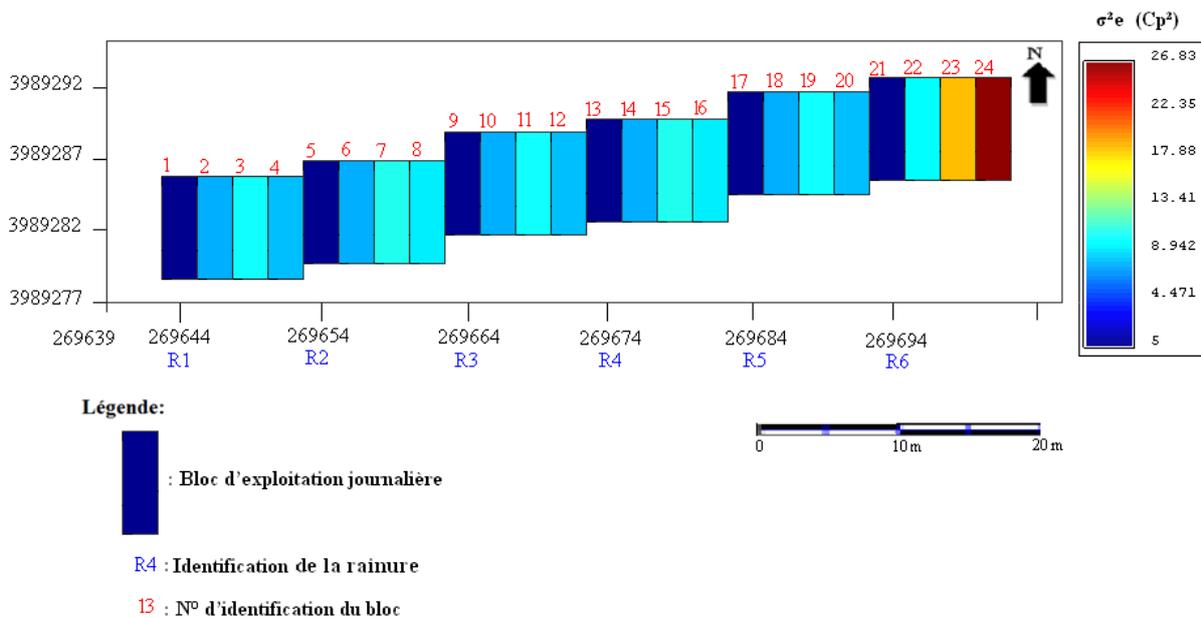


Figure. IV. 23. La carte de la variance d'estimation σ^2_e (Cp^2) (blocs) par krigeage ordinaire de la parcelle A-couche VII.

Tableau. IV. 5. Résultats d'estimation locale des points de bloc de la parcelle A – couche VII.

Bloc	X(m)	Y(m)	VL600*(Cp)	$\sigma_e^2(Cp^2)$
1	269644	3989282	6,67	5,00
2	269646,5	3989282	6,27	7,67
3	269649	3989282	5,92	10,36
4	269651,5	3989282	5,61	8,13
5	269654	3989283	5,33	5,00
6	269656,5	3989283	5,24	7,74
7	269659	3989283	5,12	10,73
8	269661,5	3989283	5,00	9,37
9	269664	3989285	4,67	5,00
10	269666,5	3989285	5,57	7,69
11	269669	3989285	6,52	10,40
12	269671,5	3989285	7,48	8,15
13	269674	3989286	8,50	5,00
14	269676,5	3989286	8,16	7,75
15	269679	3989286	7,81	10,73
16	269681,5	3989286	7,5	9,37
17	269684	3989288	7,00	5,00
18	269686,5	3989288	7,78	7,68
19	269689	3989288	8,54	10,37
20	269691,5	3989288	9,27	8,13
21	269694	3989289	10	5,00
22	269696,5	3989289	9,65	9,73
23	269699	3989289	9,36	18,70
24	269701,5	3989289	9,12	26,83

IV.4. Variance d'estimation, de dispersion

Dans cette section, on cherche à établir les résultats permettant de fournir une mesure de la précision des estimés effectués par le krigeage ordinaire.

On peut calculer la variance d'estimation soit en utilisant le covariogramme (III.21) ou le variogramme (III.23). Dans les cas de modèles sans palier, seul le variogramme peut être utilisé pourvu que $\sum \lambda_i = 1$ dans (III.18).

Par krigeage, chaque configuration et chaque estimateur donnent lieu à un calcul différent. Il n'existe donc des abaques que pour les cas simples d'extension.

Dans notre cas, nous estimons une cellule de 2,5 m X 7 m par son point central avec un modèle sphérique.

De la formule (III.56) la variance d'estimation de la production journalière s'exprime :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{1}{P_j^2} \sum_{i=1}^N p_{ij}^2 \left[D^2(p_i/B_i) + \sigma_{e_i}^2 \right]$$

Dans notre cas on veut calculer la variance d'estimation d'une parcelle à partir des rainures, cette variance s'écrira :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{1}{P_j^2} \sum_{i=1}^N p_{ij}^2 \left[D^2(r_i/B_i) + \sigma_{e_i}^2 \right]$$

$D^2(r_i/B_i)$: La variance de dispersion de la rainure r_i dans le bloc B_i

$\sigma_{e_i}^2$: La qualité des estimateurs des blocs B_i

Variance de dispersion de la rainure r_i dans le bloc B_i :

$$D^2(r/B) = \bar{\gamma}(B, B) - \bar{\gamma}(r, r) \quad (\text{IV.1})$$

$\bar{\gamma}(B, B)$: Variogramme moyen dans le bloc B.

$\bar{\gamma}(r, r)$: Variogramme moyen dans la rainure r.

Les variogrammes moyens sont calculés à l'aide des fonctions auxiliaire $F(L, \lambda)$ (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978).

$$\bar{\gamma}(B_i, B_i) = F\left(\frac{L}{a}, \frac{\ell}{a}\right) = F\left(\frac{7}{32}, \frac{2.5}{32}\right)$$

$$\bar{\gamma}(r_i, r_i) = F\left(\frac{L}{a}, \frac{\ell_r}{a}\right) = F\left(\frac{7}{32}, \frac{0.2}{32}\right)$$

λ_r : la largeur de la rainure

Nous avons utilisé les abaques (fig. IV.21) de la fonction auxiliaire, modèle sphérique $F(L, \lambda)$. Rappelons qu'à partir la variance d'estimation $\sigma_{E_j}^2$ (III.48), nous allons contrôler

l'écart entre VL600 prévue et VL600 vraie effectivement récupérée.

$$F\left(\frac{7}{32}, \frac{2.5}{32}\right) = F(0.22, 0.08) = 0.13$$

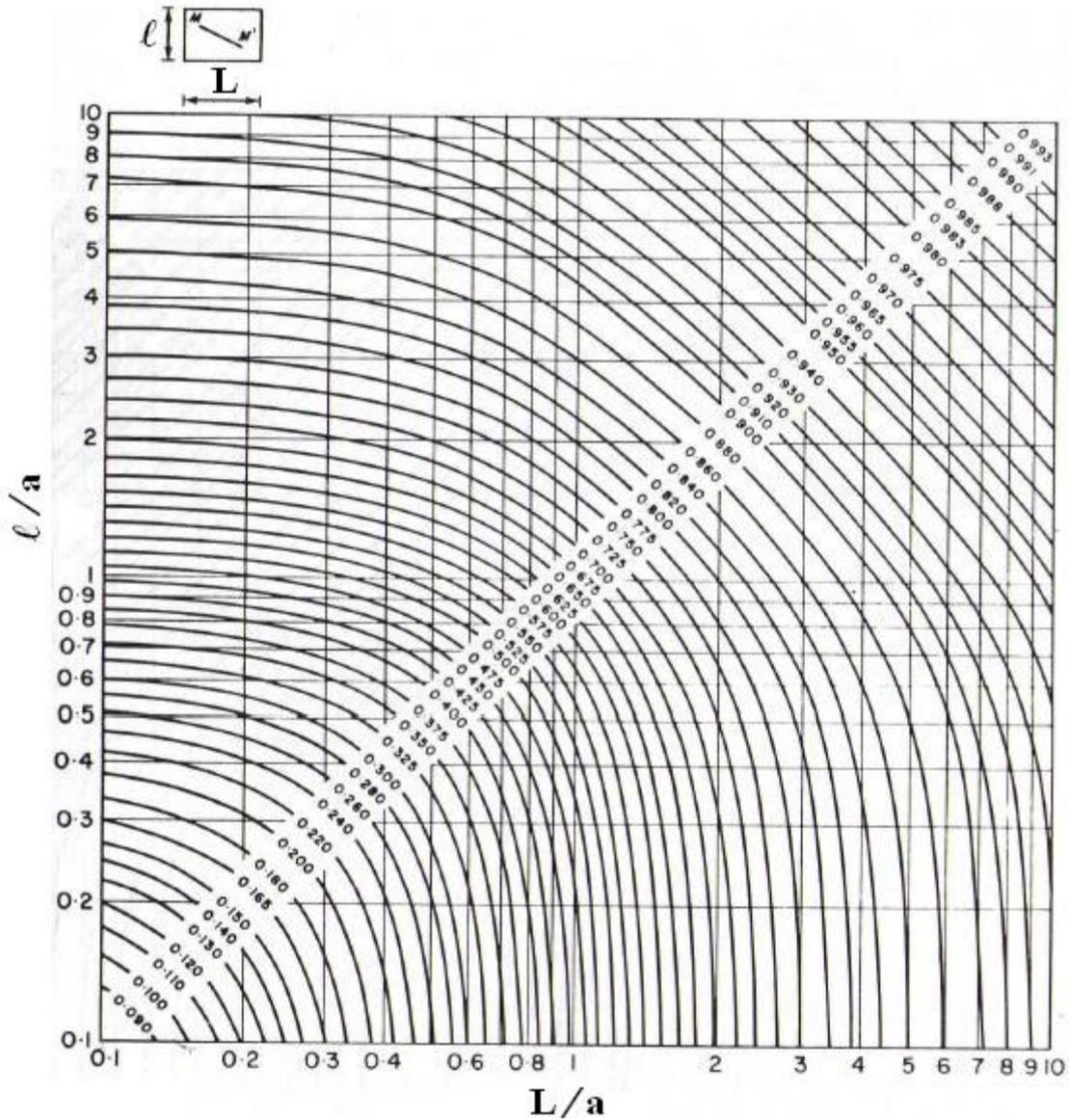
$$F\left(\frac{7}{32}, \frac{0.2}{32}\right) = F(0.22, 0) = 0$$

D'où :

$$D^2(r/B) = 0,13 (Cp)^2$$

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{1}{P_j^2} \sum_{i=1}^N p_{ij}^2 \left[0,13 + \sigma_{e_i}^2 \right]$$

Alors, l'écart type de dispersion de r dans B est $\sigma = 0.36$ ou 36%



Abaque de la fonction auxiliaire, modèle sphérique $F(L, l)$
a: portée de variogramme

Figure. IV. 24. L'abaque utilisé pour le calcul de la variance de dispersion (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978).

Si on suppose que l'usine empile (stocke) la production de n jours ouvrables (pour homogénéisation).

$$P_j \text{ (totale)} = n \times 250t = n.250\text{tonnes.}$$

Sachant qu'on exploite un bloc/jour, alors $n = N$ (N : nombre de blocs exploites/jour)

Alors :

$$\sigma_{E_j}^2 = \frac{1}{(N.250)^2} \left[\left[(250)^2 (0,13 + \sigma_{ei}^2) \right] \right]$$

Pour 7 jours ouvrables, on a :

$$\sigma_{e7}^2 = 5 + 7,67 + 10,36 + 8,13 + 5 + 7,74 + 10,73 = 54,63(\text{Cp}^2)$$

$$\sigma_{E_7}^2 = \frac{1}{(1750)^2} \left[\left[(250)^2 (0,13 + 54,63) \right] \right]$$

$$\sigma_{E_7}^2 = 1,12 \text{ Cp}^2$$

Pour 14 jours ouvrables, on a :

$$\sigma_{E_{14}}^2 = \frac{1}{(3500)^2} \left[\left[(250)^2 (0,13 + 107,99) \right] \right]$$

$$\sigma_{E_{14}}^2 = 0,55 \text{ Cp}^2$$

Pour 21 jours ouvrables, on a :

$$\sigma_{E_{21}}^2 = \frac{1}{(5250)^2} \left[\left[(250)^2 (0,13 + 164,27) \right] \right]$$

$$\sigma_{E_{21}}^2 = 0,37 \text{ Cp}^2$$

Si les VL600 des blocs B_i étaient parfaitement connues ($\sigma_e^2 \rightarrow 0$, à l'aide d'échantillons supplémentaires). Alors la valeur minimale de la variance d'estimation $\sigma_{E_j}^2$ devient :

$$\min \left\{ \sigma_{E_j}^2 \right\} = \frac{1}{N} D^2(r/B)$$

Pour 7 jours ouvrables, on a :

$$\min \left\{ \sigma_{E_7}^2 \right\} = \frac{1}{7} (0,13) = 0,019 \text{ Cp}^2$$

L'amélioration est nettement importante par rapport à $\sigma_{E_7}^2 = 1,12 \text{ Cp}^2$ calculé ci-dessus. Cela montre qu'en rajoutant des échantillons sur la parcelle A- couche VII, on peut améliorer sensiblement la précision sur l'estimation de la moyenne de la parcelle, sans avoir besoin d'augmenter le nombre de jours à stocker.

En supposant que VL600* suit une loi Normale, alors la moyenne estimée de la production de 7 jours sur la parcelle A- couche VII a 95% de chance d'être dans l'intervalle :

$$m^* \pm 2\sigma_E = 5,74 \pm 2(1,06) = 5,74 \pm 2,12 = [3,62; 7,86]$$

En conclusion de ce chapitre on peut affirmer que la méthode de contrôle des teneurs est facilement applicable dans le cas de la parcelle A-couche VII.

Elle peut être généralisée aux autres parcelles de la même manière en utilisant le même model de variogramme.

Dans le cas de la parcelle A-couche VII, il s'est avéré que le nombre d'échantillons actuels n'est pas suffisant et qu'il serait nettement avantageux de rajouter des échantillons supplémentaires pour permettre d'améliorer la précision de l'estimation. Par exemple, de prélever des rainures tous les 5 ou 7m au lieu des 10m actuellement.

Conclusion générale

Conclusion générale

La Bentonite de la région de Mostaganem appartient à la variété de la Montmorillonite sodique, sa teneur élevée en Na_2O lui confère un indice de gonflement élevé, et elle rencontre généralement les exigences requises pour la fabrication des boues de forage, on l'utilise aussi en fonderie et comme Bentonite de charge.

L'étude géologique et topographique du gisement bentonitique de M'Zila a permis l'évaluation de ses réserves exploitables actuelles à 786 973 tonnes, ce qui permet, avec une production annuelle de 23000 tonnes, d'alimenter l'usine de traitement pendant 34 ans. La majeure partie des réserves (71%) est contenue dans les quatre couches IV, VII, X et XIV.

L'exploitation se fait par tranchées à ciel ouvert étroites et limitées à 4 ou 5m. L'extraction devient alors difficile à cause du pendage fort des couches et faute de moyens mécaniques adéquats.

La Bentonite de M'Zila montre également une importante disparité de la qualité de sa viscosité d'une couche à l'autre. Cela constitue en effet un sérieux problème d'exploitation pour les travaux miniers sur place.

Rappelons brièvement les objectifs que nous nous étions assignés au début de cette étude. Il s'agissait de proposer une meilleure méthode d'exploitation sélective de la Bentonite de M'Zila. L'exploitation actuelle souffrant de devoir effectuer une multitude d'échantillonnages à plusieurs stades du processus d'exploitation minière.

La méthode que nous avons proposée et appliquée avec succès est la méthode géostatistique de contrôle des teneurs (ici la viscosité). Elle permet à la mine d'utiliser un seul set d'échantillons au lieu de la multitude d'échantillonnages actuellement pratiqués et de prévoir la viscosité moyenne et son intervalle de fluctuation avec une confiance de 95%.

Le principe de la technique de contrôle des teneurs à la production est simple. Dans un premier temps, nous nous sommes constitués un set de données de la variable VL600, à partir d'échantillons de rainures prélevés dans les couches exploitées de Bentonite. Ensuite, nous avons déduit un variogramme global modélisant la variabilité spatiale de VL600 dans le gisement de M'Zila. Ce modèle de variabilité a ensuite servi pour l'estimation, par krigeage, de la viscosité des 24 blocs de la parcelle A-couche VII, programmés pour être mis en exploitation.

Pour chaque bloc nous avons obtenu une valeur probable de VL600* estimée avec sa variance d'estimation. On démontre que la variance d'estimation d'un ensemble de blocs, c'est-à-dire d'une parcelle entière, s'écrit en fonction de la variance de dispersion des échantillons (rainures) dans le bloc et de la variance de krigeage des blocs. Enfin, en admettant que les viscosités moyennes des blocs, constituant les parcelles, avaient une distribution gaussienne alors nous pouvons affirmer que la viscosité moyenne m de la parcelle krigée se trouve dans un intervalle de $m \pm 2\sigma$ avec 95% de chance.

Ces calculs ont aussi montré qu'il est possible de réduire cette fluctuation de la viscosité moyenne de la parcelle en augmentant la densité de l'échantillonnage utilisé. Cette échantillonnage est en effet composé de rainures transversales à la couche de Bentonite, espacées de 10m. Il est donc recommandé de réduire cet espacement à 7m ou 5m par exemple.

Les calculs d'estimations que nous avons réalisés et présentés dans ce travail sont pour le moment uniquement valables pour la parcelle A de la couche VII. Ils peuvent être répétés pour les autres parcelles de la même couche ou des autres couches du district de M'Zila. Le modèle de variogramme déjà calculé reste valable sur tout le gisement car tous les échantillons du gisement ont été utilisés pour le calculer.

En termes de perspectives et de recommandations futures, nous pouvons déjà rappeler qu'il serait profitable d'augmenter la densité de l'échantillonnage actuel. Cela permettra d'améliorer les résultats du krigeage que nous avons obtenus ci-dessus. Cela pourra également servir à l'établissement d'une carte de qualité de la Bentonite avec une grande précision.

Vue l'utilité d'une bonne connaissance géologique et géométrique fine des dépôts d'argile, pour améliorer la qualité de la production, une étude plus détaillée de la genèse des gisements et de la formation des différentes qualités de Bentonite est nécessaire. Il est important d'essayer d'aborder cette question par une étude bibliographique des gisements similaires et des valeurs observées sur le gisement. L'étude détaillée pourrait être un sujet de recherche en soi.

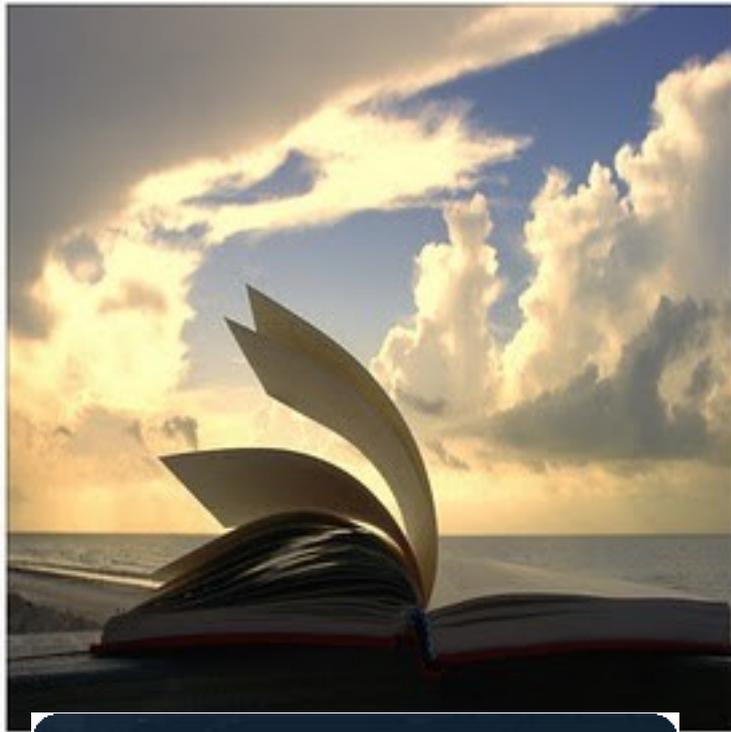
En outre, sur le plan de l'exploitation les équipements actuellement utilisés limitent la profondeur verticale d'exploitation à une dizaine de mètres dans le meilleur des cas. Les couches les plus épaisses et de meilleure qualité pourraient être exploitées avec profit à de plus grandes profondeurs, si une méthode appropriée était utilisée.

L'insuffisance des informations sur les couches de Bentonite revient au peu de sondages profonds implantés dans le gisement de M'Zila. Une compagnie de forage permettra :

- d'étudier l'évolution de la qualité des couches en profondeur.
- de réévaluer les réserves afin de mieux rationaliser l'exploitation, les réserves géologiques entre les parcelles étant inconnues.

L'exploration du flanc Sud du synclinal est recommandée en priorité. La topographie moins accidentée y rendra l'exploitation plus facile que sur le flanc Nord. De plus, le pendage plus faible des strates augmentera la productivité et diminuera le volume de découverte.

Références Bibliographiques



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENTAL, 1994.** Projet de développement d'exploitation du gisement des argiles bentonitiques de M'Zila. Groupe Minier SIDAM. Inédit.
- BENTAL, 2002.** Rapport final projet de qualité. Inédit.
- BENTAL, 2003.** Protocole d'analyse. Inédit.
- BENTAL, 2009.** Plan d'exploitation annuelle. Inédit.
- BOURAS, O., 2003.** Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles : synthèse et caractérisation. Thèse de doctorat. Université de Limoges de France.
- BOURG I.C., 2004.** Caractérisation du comportement d'une bentonite sodique pour l'isolement des déchets : Transport diffusif des traceurs ioniques (Na^+ , Sr^{2+} , Cs^+ et Cl^-) dans la Bentonite sodique compactée saturée, et titration acide-base de la Montmorillonite. Thèse de doctorat. Université de Pau et des Pays de L'adour.
- CAUSEUR, D., 2006.** Modélisation géostatistique. Laboratoire de Mathématiques Appliquées. Pôle d'Enseignement Supérieur et de Recherche Agronomique de Rennes; ([URL:www.agrocampus-ouest.fr/math/causeur/PDF/Geostatistics/PolyGeostatistique.pdf](http://www.agrocampus-ouest.fr/math/causeur/PDF/Geostatistics/PolyGeostatistique.pdf)) visité le : 28/03/2010.
- DAVID, M., 1977.** Geostatistical Ore Reserve Estimation. Ecole Polytechnique, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada. Elsevier Scientific Publishing Company. pp 364.
- DEHIM, S., 2004.** Etude géologique des argiles bentonitiques. Mémoire de fin d'études. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger.
- GAOMBALET, J., 2004.** Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique de Paris.
- GARCIA, C., PARIGOT, P., 1968.** Boues de forage, Editions : Technip, Paris et Institut Français du Pétrole, RUEIL-MALMAISON, pp 186.
- GRIDI, B.F., 2007.** Matériaux de mullite à microstructure organisée composés d'assemblages muscovite – kaolinite. Thèse de doctorat. Université de Limoges de France.
- HAYDN, H.M., 2007.** Applied clay mineralogy, Editions: Elsevier, pp 180.
- ISOBEL, C., 1979.** Practical geostatistics, Applied Science Publishers, pp 127.

- JOURNEL, A.G., HUIJBREGTS, C.J., 1978.** Mining Geostatistics. Centre de Géostatistique Fontainebleau, France, pp 597.
- KONESHLOO, M., 2007.** Caractérisation, estimation et valorisation de gisements d'argiles kaoliniques du bassin des charentes. Thèse de doctorat. Ecole des mines de Paris.
- MAZARI, M., 2009.** Détermination géostatistique du profil géologique sur le tracé d'un ouvrage souterrain Cas d'un tronçon du métro d'Alger (Hai El Badr – El Harrach centre). Mémoire de fin d'études. Département de Génie Minier. École Nationale Polytechnique d'Alger.
- MUTABAZI, J.B., VANSNICK, A., 1991.** Contribution à la géostatistique des gisements miniers - Application à l'évaluation d'un gisement de niobium à Lueshe au Zaïre. Mémoire de fin d'études. Faculté des Sciences Appliquées. Université Catholique de Louvain de Belgique.
- Nicolas, R., 2006.** Programme S-GeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software) Version 1.4, Université de Stanford (<http://sgems.sourceforge.net.htm>).
- OUAHAB, M., 2008.** Proposition d'une méthode d'exploitation du gisement de bentonite de Mostaganem sur la base d'une analyse statistique multidimensionnelle. Mémoire de fin d'études. Département de génie minier. École Nationale Polytechnique d'Alger.
- PERRODON, A., 1957.** Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. Bulletin N°12.
- SONAREM, 1972.** Résultat des travaux géologiques effectués sur le gisement de M'Zila.
- VALENTINA, T., 2004.** Modélisation de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface pour un sol homogène avec relief. Thèse de doctorat. Université de Provence de France.
- WACKERNAGEL, H., 1993.** Cours de Géostatistique Multivariables. 4^{ème} Edition. Ecole des mines de Paris.
- WACKERNAGEL, H., 2004.** Géostatistique et assimilation séquentielle de données. Mémoires des Sciences de la Terre. Ecole des mines de Paris.