

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة
Année 2008

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option

**Recherche et Prospection des Ressources Minérales et
Énergétiques**

THEME

**Etude géologique et géostatistique du gisement de Fer de
Châabet El Ballout –Souk Ahras- (N-E algérien)**

Par
HALIMI Fahima

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Pr. MEZGHACHE Hamid Univ. Badji Mokhtar - Annaba

DEVANT LE JURY

Président : Pr. LAOUR Rabah

Univ. Badji Mokhtar-Annaba

**Examineurs : Dr. TOUBAL Abderrahmane
: Dr. HAMMOR Dalila**

Univ. Badji Mokhtar-Annaba

Univ. Badji Mokhtar-Annaba

Membre invité: Mr. MOUZAYA

SOMIFER - FERPHOS

REMERCIEMENT

...Enfin l'occasion m'est donnée de remercier, Dieu avant tout et tous ceux qui ont contribué la réalisation de ce travail de près ou de loin. Ce travail n'a pu voir le jour, sans l'aide et les nombreux conseils de mon Directeur de mémoire M. Hamid MEZGHACHE pour son soutien et l'encadrement apporté durant ces trois années (en plus des années de graduation). Ses commentaires et sa rigueur intellectuelle m'ont permis d'enrichir ce travail. Je lui témoigne toute ma reconnaissance et qu'il trouve ici, mes remerciements les plus sincères.

** Tous mes remerciements à M. Bouabsa et Toubal pour leur aide.*

** M Laour .Rabah. Qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance.*

** membres de jury, M. TOUBALI A.R. et Hammor Dalila qui ont accepté de participer à ce jury en tant qu'examineurs du mémoire,*

** Tous les enseignants des Départements de Géologie de l'université Badji Mokhtar – Annaba.*

** Tous les responsables et les personnels du groupe SOMIFER particulièrement Mr. Halimi le directeur technique du groupe SOMIFER, ainsi que sa femme Hmama pour son accueil chaleureux et son hospitalité.*

** Tous mes remerciements à Mr. Mouzaya le directeur de la mine Châabet El Ballout, Ingénieur géologue au CRAD Mr Bouanik.*

** Tous mes remerciements à ma très chère amie Amel sans jamais pouvoir la remercier comme il se doit pour son soutien morale et son aide durant l'impression.*

Mes remerciements sont adressés aussi à tous ceux qui ont participé de près ou de loin et dont leurs noms ne figurent pas sur cette liste.

H.FAHIMA

Résumé

Actuellement, il y a une forte hausse de prix des minerais de fer qui est due à la forte demande d'un certain nombre de pays dit émergents. Les prix de ce métal ont augmenté de plus de 200% au courant de ces dernières années pour atteindre 60 cents/1% fer par tonne. L'expansion de la sidérurgie algérienne s'appuie, en grande partie, sur l'utilisation rationnelle de toutes les ressources en fer. L'essentiel du potentiel géologique se trouve au Nord du pays – gisements d'Ouenza-Boukhadra avec 80 millions de tonnes- et dans deux autres gisements au Sud Ouest du pays- gisements de « Mecheri Abdelaziz » et de « Gara Djebilet » à 250 km à l'Est de Tindouf, avec 3.5 milliards de tonnes en Fe-. Cependant la mise en exploitation de ces derniers nécessite du temps et de gros investissements. Pour satisfaire la forte demande de ce métal, il est donc nécessaire de se tourner vers la réouverture des petites mines. Le gisement de fer de Châabet El Ballout en fait partie. Le minerai extrait de ce gisement est vendu soit à Arcélor quand les teneurs sont élevées (>45%), soit aux cimenteries dès que la teneur est supérieure à 35%.

Afin de planifier une exploitation rationnelle en vue de satisfaire les différents clients, des études géologiques et géostatistiques - estimation des réserves locales et récupérables – de ce petit gisement ont été effectuées.

- L'étude géologique du gisement de Châabet El Ballout a permis la détermination des facteurs de contrôle de la minéralisation. Trois nappes de charriages – nappe numidienne, tellienne et triasique – sont rencontrés au niveau du gisement. La structure cassante est marquée par la présence de quatre systèmes de failles de directions N180°, N30°, N90° et N300°. Le principal corps de minerai de fer est formé par une zone de broyage de 45m d'épaisseur, de direction N300° et un angle de pendage de 30⁰ vers le Sud Ouest. A l'échelle locale décamétrique, cette zone peut être confondue avec une couche stratiforme. Dans la partie gréseuse située à la base, le minerai de fer joue le rôle de ciment. Le toit est constitué de calcaires du Crétacé supérieur alors que le mur lui, est constitué par les grés et les marnes du Miocène. Dans l'encaissant, les fissures et différents vides sont remplis par du minerai hématitique. Etant donné l'orientation du corps principal, ce gisement aurait dû être exploré à l'aide de profil de prospection de direction N30° au lieu de profils orientés N180°.

- Le minerai de fer est constitué d'hématite, limonite et goethite, et accompagné de rares imprégnations de cuivre gris de malachite, d'azurite, et de pyrite. Cependant la sidérite est rencontrée dans les parties profondes. La présence de reliques de sidérite dans la partie

supérieure oxydée prouve l'oxydation de la sidérite. La minéralisation ferrifère du gisement de Châabet El Ballout est donc d'origine hydrothermale métasomatique, d'âge post Miocène.

- Pour une teneur de coupure de 20% fer, les teneurs moyennes du gisement ont été estimées à 30.50% en FeO, 25.30% en SiO₂, et 11.17% en CaO. L'Analyse en Composantes Principales montre des corrélations négatives significatives entre les trois oxydes FeO, SiO₂, CaO, et dans certains cas une association chimique entre SiO₂, CaO qui représente le ciment carbonaté des grès du Miocène.

- Le calcul et l'ajustement des variogrammes expérimentaux à 3D sur FeO, SiO₂ et CaO ont permis de détecter une anisotropie entre le plan vertical et le plan horizontal. Le krigeage ordinaire des teneurs en FeO, SiO₂, CaO, dans chacun des blocs de (25x10x10m³) des dix niveaux-gradins a été effectué. L'ensemble des réserves des blocs krigés et dont la teneur est supérieure à 25% totalise 17.29 Millions de tonnes de minerai. En fonction de l'erreur relative sur la teneur du bloc, ces réserves sont réparties en trois grandes catégories qui sont respectivement de 1.97 Millions de tonnes de minerai avec une teneur moyenne en FeO de 41.75% pour les réserves prouvées (catégorie A), 12.63 Millions de tonnes de minerai avec une teneur moyenne en FeO de 39.55% pour les réserves probables (catégorie B) et 2.68 Millions de tonnes de minerais avec une teneur moyenne en FeO de 37.80% pour les réserves possibles (catégorie C1). Cependant il faut noter que seuls 693 blocs de l'ensemble ont une teneur en silice inférieure à 15%. Ces blocs représentent 4.85 Millions de tonnes de minerais, avec une teneur moyenne en FeO de 39.80%.

- La répartition des teneurs des blocs krigés dans le plan horizontal montre une certaine zonalité. Au niveau du toit du corps principal qui est représenté par les carbonates, le minerai est plus riche.

- Les variogrammes expérimentaux des indicatrices relatives à trois dimensions des différentes teneurs de coupures (35%, 40%, 45%) ont été calculés et ajustés. Le krigeage de ces mêmes indicatrices a été fait. La cartographie des indicatrices supérieures à 35%, 40% et 45%, des coupures 35%, 40% et 45%. Ces résultats faciliteraient l'exploitation sélective en vue d'un éventuel enrichissement.

Abstract

Currently, there is a big rise in the prices of the iron ores which are refer to the keen demand of a certain number of countries known as emergent. The prices of this metal increased of more than 200% with the current of these last years to reach 60 cents/1% iron per ton. The expansion of the Algerian iron and steel industry is based, mainly, on the rational use of all the iron resources. The essence of the geological potential is has U Northern of the country – layers of Ouenza-Boukhadra with 80 million tons and in two other layers in the Western South of the country layers of "Mecheri Abdelaziz" and "Gara Djebilet" to 250 km in the East of Tindouf, with 3.5 billion tons out of Fe -. However the introduction of the latter requires time and large investment. To satisfy L keen demand of this metal has, it is thus necessary to turn to the reopening of the small mines. Iron the layer of Châabet El Ballout in fact part. L E ore extracted from this layer is sold either in Arcélor when the contents are high (> 45%), or with the cement factories as soon as the content is higher than 35%.

In order to plan a rational exploitation in order to satisfy the various customers, investigations geological and geostatistic - estimate of the local and recoverable reserves – of this small layer were carried out.

- The geological investigation of the layer of Châabet El Ballout allowed the determination of the factors of control of mineralization. Three over thrust folds – Triassic tablecloth numidienne, tellienne and – are met on the level of the layer. The breakable structure is marked by the presence of four fault systems of directions N180°, N30°, N90° and N300°. The principal iron ore body is formed by a zone of crushing of 45m thickness, N300° direction and an angle of dip of 30° towards the Western South. With the decametric local scale, this zone can be confused with a stratiform layer. In the sandy part located at the base, the iron ore plays the role of cement. The roof consists of limestones of the higher Cretaceous whereas the wall him, is consisted the likings and the marls of Miocene. In boxing, the cracks and different empty are filled by ore hematitic. Being given the orientation of the principal body, this layer should have been explored using profile of N30° direction instead of directed profiles N180°.

- The iron ore consists of hematite, limonite and goethite, and is accompanied by rare pyrite and azurite, malachite grey copper ore impregnations. However siderite is met in the major parts. The presence of siderite relics in the part

Higher oxidized the oxidation of siderite proves. L has mineralization iron-bearing of the layer of Châabet El Ballout is thus of origine hydrothermal metasomatic, of age post Miocene.

- For a content of cut of 20% iron, the average contents of the layer were estimated at 30.50 % of FeO, 25.30 % in SiO₂, and 11.17 % in CAD. The Analysis in component principal shows significant negative correlations between three oxides FeO, SiO₂, CAD, and in certain cases a chemical association between SiO₂, CAD which represents carbonated cement of the likings of Miocene.

- The calculation and the adjustment of the experimental variogrammes with 3D on FeO, SiO₂ and CAD made it possible to detect anisotropy between the vertical plane and the horizontal plane. The ordinary krigage of the contents of FeO, SiO₂, CAD, in each block of (25x10x10m³) of the ten level-steps was carried out. The whole of the reserves of the krigés blocks and whose content is higher than 25% adds up 17.29 Million tons of ore. According to the relative error on the content of the block, these reserves are divided into three main categories which are respectively 1.97 Million tons of ore with an average content of FeO of 41.75 % for the proven reserves (A) category, 12.63 Million tons of ore with an average content of FeO of 39.55 % for the probable reserves (B) category and 2.68 Million tons of ores with an average content of FeO of 37.80 % for the possible reserves (C1 category). However it should be noted that only 693 blocks of the unit have a silica content lower than 15%. These blocks represent 4.85 Million tons, with an average content of FeO of 39.80%.

- The distribution of the contents of the blocks krigés in the horizontal plane shows certain zonality. On the level of the roof of the principal body which is represented by carbonates, the ore is richer.

- The experimental variogrammes of the relative indicator to three dimensions of different the contents from cuts (35%, 40%, 45%) were calculated and adjusted. The krigage of these same indicators was made. The cartography of the indicator higher than 35%, 40% and 45%, of the cuts 35%, 40% and 45%. These results would facilitate the selective exploitation for a possible enrichment.

م ا ل خ ص

نظرا لتزايد طلب بعض البلدان المتطورة للحديد, تزايدت أسعار الحديد بنسبة 200% في هذه السنوات الأخيرة لتصل إلي سنس/1 % 60 في الطن الواحد من الحديد.

إن توسع صناعة الحديد في الجزائر يرتكز علي الاستعمال العقلاني لكل الموارد الجيولوجية . تتواجد في شمال البلاد و تتمثل في مكن ونزه و بوخضرة بنسبة 80 مليون طن، و يشمل أيضا مكن مشـري عبد العزيز, غارا جبيلات علي بعد 250 كم شرق تندف ب 3.5 مليار طن من الحديد لكن استغلال هذين الأخيرين يتطلب وقتا و كثيرا من المصاريف.

و لتلبية الطلب المتزايد علي هذا المعدن يتوجب الاتجاه إلي فتح المناجم الصغيرة. و من بين هذه المناجم مكن شعبة البلوط الذي معدنه يباع إلي اسيلور بعنابه, وذلك عندما تكون النسبة المؤوية أكثر من 45 أو إلي مصانع الاسمنت إذا كانت النسبة المؤوية أقل من 35.

من اجل تخطيط و الإنشاء العقلاني لتلبية طلبات الزبائن , بعض الدراسات الجيولوجية و الجيوساتاستيكية لتقدير المخزون المحلي و الممكن لتحصيل هذا المنجم الصغير, قد استعملت الدراسة الجيولوجية لمنطقة واد مغـراس و مكن شعبة البلوط أظهرت العوامل المراقبة اهد المعدن, ثلاث مستويات نقل المتمثلين في النوميديان, ألتلي, الترياسي يتواجدون علي مستوى هذا المكن. أربعة شقوق ذو اتجاهات شمال 180⁰, شمال 90⁰, شمال 30⁰, شمال 300⁰.

- تكون الجسم الرئيسي لمعدن الحديد من منطقة رحي ذات سمك يقدر ب 45م ذو اتجاه شمال 300⁰, وزاوية ميل 30⁰ في اتجاه الجنوب الغربي. علي السلم المحلي هذه المنطقة صعب تمييزها بين الطبقات الاخرى.

معدن الحديد يلعب دور اسمنت, سقف المنطقة متكون من حجر كلسي ذو عمر طباشيري 00000 بينما السور متكون من الغري والسجيل ذو عمر ميوسان. في المجاور الكسور و الفراغات ممتلئين بالمعدن الحديدي.

- من المعطيات الموجودة و من اتجاه الجسم الرئيسي , فان من الممكن ان المنجم كان قد استكشف بواسطة أعمدة ذو اتجاه شمال 30⁰ في مكان أعمدة ذو اتجاه شمال 180⁰. يتكون معدن الحديد من هيماتيت, ليمونيت, و غوتيت و مصحوب بقليل من النحاس علي شكل متناثر, ازيريت , بيريت , بينما السيديريت يتواجد في الأماكن العميقة.

- إن تواجد هياكل السيديريت في المعدن المؤكسد تؤكد النشأة الادروتمالية ذات عمر بعد الميوسان.

بعد اختيار النسبة الهامشية 20% حديد حسبت معدلات قيم أكسيد الحديد, الأكسيد الكلسي و أكسيد السيليسيوم لهذا المكن و قدرت النتائج ب 30.50% من أكسيد الحديد, 25.30% أكسيد السيليسيوم, 11.17% أكسيد الكلسي.

- تحليل المركبات الاساسية بين مختلف الاكسيد اظهر وجود مجموعة بين الأكسيد السيليسيوم والأكسيد الكلسي التي تمثل اسمنت الكلسي لجر الغري ذو عمر ميوسان. حساب الفاريوغرامات التجريبية ذات الثلاثة أبعاد لأكسيد الحديد, الأكسيد الكلسي و أكسيد السيليسيوم أظهرت وجود انيزتروبي منطقية بين المستوي الأفقي و العمودي. كريجاج العادي لهذه القيم في كل كتلة ذات الأبعاد التالية (25x10x10م³) للعشرة مستويات قد حسب. مجموع كمية المعدن في هذه الكتل علي اساس قيمة هامشية 25% يساوي 6.82 مليون طن من المعدن تنوزع كما يلي 8.24 ألف طن تمثل الكمية الثابتة, 5 مليون طن تمثل الكمية المحتملة, 1 مليون طن تمثل الكمية المحتملة. غير أنه يجب الإشارة إلي انه يوجد 693 كتلة من مجموع الكتل لديهم قيمة أقل من 15% من أكسيد السيليسيوم, تمثل 1.94 مليون طن من أكسيد الحديد بمعدل 39.80%.

- توزع القيم في الكتل الكريجي في المستوي الأفقي أظهرت نوعا ما من المنطقية علي مستوي سقف الكلسي للجسم الرئيسي المعدن و المتمثل في الكربونات, إنها ثرية القيمة.

- الفاريوغرامات التجريبية للاندكاتريس ذات الثلاثة أبعاد لمختلف القيم الهامشية (35%, 40%, 45%) قد تم حسابهم و مطابقتهم الكريجاج المتصل بهذه القيم قد تم, و كذلك رسم خرائط لانديكاتريس ذات القيم فوق 35%, 40%, 45% للقيم 35%, 40%, 45% هذه النتائج تسهل الاستغلال انتقائي للإثراء المحتمل.

SOMMAIRE

| | |
|------------------------------------|----------|
| INTRODUCTION | 1 |
| SITUATION GEOGRAPHIQUE..... | 2 |

PARTIE I

GEOLOGIE REGIONALE ET LOCALE

| | |
|--|-----------|
| 1- GEOLOGIE REGIONALE | 4 |
| 1. – 1. – Lithostratigraphie | 4 |
| 1. – 2. – Tectonique | 8 |
| 1. – 3. – Minéralisations..... | 11 |
| 2. – GEOLOGIE LOCALE..... | 13 |
| 2. – 1. – Lithostratigraphie | 13 |
| 2. – 2. – Tectonique | 14 |
| 2. – 3. – Minéralisation ferrifère | 20 |

PARTIE II

GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES RESERVES LOCALES

| | |
|--|-----------|
| 1. – METHODOLOGIE DE PROSPECTION | 25 |
| 1. - 1. – Travaux géologiques et miniers..... | 25 |
| 1. - 2. – Travaux topo-géophysiques..... | 26 |
| 1. - 3. – Travaux géochimiques et de laboratoires..... | 26 |
| 1. - 4. – Paramètres géologo-économiques | 27 |
| 2. – EXIGENCES INDUSTRIELS DES CLIENTS..... | 27 |
| 2. – 1. – Les cimenteries..... | 27 |
| 2. – 2. – La sidérurgie..... | 28 |
| 2. - 3. - Qualité du minerai de fer du gîte de Châabet El Ballout..... | 30 |
| 3. - ANALYSE DES DONNEES DE PROSPECTION..... | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 3. - 1. - Analyse monovariabile..... | 32 |
| 3. - 2. - Analyse multivariabile (ACP)..... | 37 |
| 4. - ESTIMATION DES RESERVES LOCALES A L'AIDE DES METHODES GEOSTATISTIQUES..... | 38 |
| 4. - 1. - Variographie | 38 |
| 4. - 2. - Krigeage ordinaire des teneurs en FeO, CaO, SiO ₂ et cartographie | 46 |
| 5.- ESTIMATION DES RESERVES RECUPERABLES A L'AIDE DU KRIGEAGE NONPARAMETRIQUE – INDICATRICES RELATIVES..... | 55 |
| 5. - 1. - Codage des indicatrices relatives..... | 55 |
| 5. - 2. - Variographie | 56 |
| 5. - 3. - Krigeage des indicatrices relative pour de I(35), I(40), I(45) et cartographie... .. | 60 |
| CONCLUSIONS GENERALES... .. | 64 |
| ANNEXES I RAPPEL SUR LA METHODE D'ANALYSE CHIMIQUE EFFECTUEE... .. | 67 |
| ANNEXES II RAPPELS SUR LES METHODES STATISTIQUES ET GEOSTATISTIQUES UTILISEES..... | 71 |
| BIBLIOGRAPHIE... .. | 92 |

INTRODUCTION

Les minerais de fer sont utilisés essentiellement en sidérurgie mais aussi dans les cimenteries, et autre domaine. Actuellement, la forte hausse de prix est due au développement et à la forte demande d'un certain nombre de pays dit émergents. Les prix de ce métal ont augmenté de plus de 200% au courant de ces dernières années pour atteindre 60 cents/1% fer par tonne. L'expansion de la sidérurgie algérienne s'appuie, en grande partie, sur l'utilisation rationnelle de toutes les ressources en fer. L'essentiel du potentiel géologique se trouve :

- Au Nord du pays « Ouenza » avec 80 millions de tonnes Fe, « Boukhadra » avec 50 millions de tonnes.

- Et dans deux autres gisements au Sud Ouest du pays, Il s'agit des gisements de « Mecheri Abdelaziz » et de « Gara Djebilet » situés à 250 km à l'Est de Tindouf, avec 3.5 milliards de tonnes en Fe. Cependant ces derniers ne sont pas encore exploités car ils nécessitent de gros investissement. La forte demande a poussée vers le développement de l'industrie minière de ce métal et la réouverture des petites mines. Le gisement de fer de Châabet El Ballout en fait partie. La quasi-totalité de son minerai extrait est vendu soit à Arcélor quand les teneurs sont élevées, soit aux cimenteries dont la teneur demandée est supérieure à 35%.

Afin de procéder et planifier une exploitation rationnelle en vue de satisfaire les différents clients, des études géologique et géostatistiques - estimation des réserves locales et récupérables – de ce petit gisement sont nécessaires et c'est le but de notre travail.

Afin d'atteindre ce but, il a été nécessaire de procéder à:

- L'étude géologique de la région d'Oued Mougras et surtout celle du gisement de Châabet El Ballout. Cette étude a permis de déterminer les facteurs de contrôle de la minéralisation.
- L'analyse de données mono et multivariées et l'estimation locale des réserves en fer. à l'aide de krigeage ordinaire ainsi que l'estimation des teneurs en CaO et SiO₂ dans chacun des blocs d'exploitation de 25 m x 10 m x 10 m. La hauteur du gradin est donc égale à 10m.

- l'estimation des réserves récupérables à l'aide de la méthode géostatistique non paramétrique (krigeage des indicatrices).

Les résultats obtenus sont présentés dans le présent mémoire en deux grandes parties totalisant 93 pages, 38 figures et 24 tableaux.

SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le gisement de Chaabat El Balout est situé dans la partie Nord-Est de l'Algérie, à 20 km au Nord Est de la ville de Souk Ahras, plus précisément dans la localité d'Ouled Driss. (Fig. 1). Il est localisé sur le versant septentrional des monts de la Medjerda D'après David (1956). Le réseau hydrographique au voisinage du gisement est constitué des Oueds de Châabet El Ballout, El Malleh, Ezzarour et Messaoud qui sont à écoulement temporaire et aussi de deux Oueds importants à écoulement permanent qui sont celui de la Medjerda et d'Erreman. Il existe, plusieurs points d'eau à faible débit ; il s'agit des sources de Fedj Essaouria, Bordj du Caid, Aine Fras et la fontaine de Mechtet El Ouzira localisées à moins de 2km à l'Ouest du gisement.

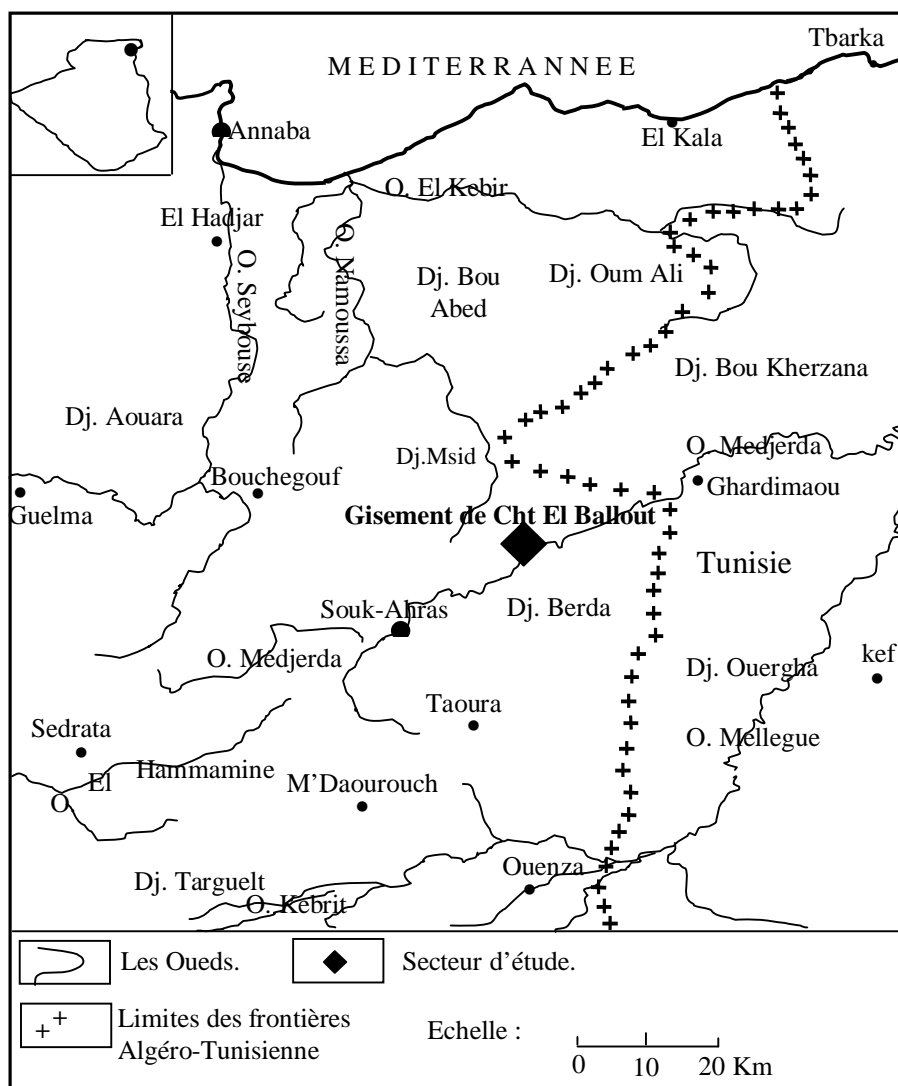


Fig. 1 – Situation géographique du gisement de fer Châabet El Ballout.

PARTIE I

GEOLOGIE REGIONALE

ET LOCALE

1. - GEOLOGIE REGIONALE

1. – 1. - Lithostratigraphie

Les différents âges des formations rencontrées varient du Trias au Quaternaire (Figs 2 et 3).

1. – 1. – 1. – Trias – t

Le Trias fait partie de la bande de Jelmana qui, elle-même appartient au massif triasique de SoukAhras (Fig. 3). Il est rencontré sous forme de marnes bariolées de couleur vert, violet et rouge. Ces marnes contiennent des gypses saccharoïdes en abondance. Il est également représenté par des cargneules de couleur jaune ou brune, de calcaires dolomitiques bleu noir, de calcaires marneux en plaquette de couleur grise ou beige, de dolomie et calcaires divers, de psammites et grés. Le gisement de fer de Châabbet Ballout – Objet de la présente étude, est situé en bordure de cette bande.

1. – 1. – 2. - Crétacé inférieur (n^5 - c^1)

a) – Aptien (n^5)

Il est formé par une alternance de marnes grises ou noirâtres, des calcaires dont la puissance atteint plusieurs centaines de mètre, des marno-calcaires, de grés gris ou blanchâtres à patine brune, souvent calcaireux. La puissance de ces formations est 300 m. Les fossiles rencontrés sont des *Ammonites et Foraminifères* genre «*Tincnella n. sp, Pseudovalvulineria Trochoidea Grand*» (Kriviakine, 1990).

b) - Albien-Cénomanién (n^6 - c^1)

Il est rencontré sous forme d'intercalation de marnes de couleur grise, de marno-calcaires de couleur gris foncé et de calcaires de couleur gris à *Hedbergella, Cushmani*. La puissance de ces formations est de 550 m

1. – 1. – 3. - Crétacé supérieur (c^2 - c^6)

a) –Turonien (c^2)

Le Turonien se présente par une intercalation monotone de calcaire gris foncé à patine grise ou jaune, et de marnes à grosses *Globigérinides et Globotrincanes*, la puissance de ces formations est de 200 m.

b) – Coniacien (c³)

Le Coniacien est rencontré sous forme d'intercalation de marnes avec quelque passées détritiques, marno-calcaire et calcaires marneux à patine jaune et *Inocéramus*, avec une puissance de 250 m.

c) – Santonien (c⁴)

Formé par une intercalation de calcaires de couleur gris, de calcaires marneux et marnes grises foncées à petits lits de calcaires à *Inocéramus*, l'épaisseur de ces formations atteint les 400m.

d) - Campanien (c⁵)

Du point de vue lithologique, la base du Campanien présente une grande uniformité avec les marnes grises tantôt bleutées, tantôt verdâtres à petits lits de calcaires à *Inoceramus* et les calcaires blancs riches en *Foraminifère*. Dans sa partie supérieure, il est formé par une intercalation de calcaires, marno-calcaires et marnes blanchâtres à *Micraster*. La puissance de ces formations est de 400 m.

e) - Maestrichtien (c⁶)

Le Maestrichtien est rencontré sous forme de calcaires crayeux blancs avec de nombreuses empreintes d'incérâmes regularis. Des lits de marnes grises ou bleutées à *Globotruncanes*, de calcaires marneux à *Globotruncanes*, la puissance de ces formations est de 350 m.

1. – 1. – 4. – Paléogène (e¹⁻⁶)**a) - Paléocène (e¹⁻³)**

Il correspond à une série marneuse noire à rares intercalations de calcaires marneux jaune crème avec *Foraminifères*. La puissance de ces formations est de 150m.

b)- Eocène (e⁴⁻⁶)

Il est représenté par les étages de l'Yprésien- Lutétien et Priabonien.

◆ Yprésien-Lutétien (e⁴⁻⁵)

Il est représenté essentiellement par des bancs de calcaires massifs *Nummulitiques* gris-clair avec des passées de marnes grises argileuses la puissance de cet étage est de 150 m.

◆ Priabonien (e⁶)

Il est rencontré sous forme de marnes grises à rares intercalations de *Lumachelles*, ces marnes ont une puissance de 100m.

c) - Oligocène (g³)

Il est caractérisé par des grès siliceux hétérogènes pouvant atteindre une grande taille pour passer à des dragées, Les bancs de grès sont séparés par des argiles schistifiées et de glauconites. Les argiles existent à la base de la formation, de couleur grise elles passent vers le haut à des argiles de teinte verte, noirâtre, bariolées, ou rouge et de vert celles-ci se trouvent en alternance avec les grès. La puissance de ces formations est de 100m.

1. – 1. – 5. – Néogène**a) - Miocène (m¹⁻³)****◆ Miocène inférieur (m¹⁻²)**

Il est formé de dépôts marins et il présente la gamme habituelle des faciès littoraux ou de mer peu profonde. Dans l'ensemble, il est rencontré sous forme de marnes noires riches en calcaire. Ces marnes sont plus ou moins ferrugineuses, des grès blancs à grain moyen à ciment calcaire ou calcaréo-siliceux, des conglomérats à poudingues, de glauconites, de calcaire coquilliers, et sables, l'épaisseur de ces formations est de 175 m.

◆ Miocène supérieur (m²⁻³)

Les formations consistent en une alternance régulière et monotone de marnes et de petits bancs de grès ou de conglomérats les seuls fossiles recueillis sont des *Ostracodes* du genre « *Hiocypris* », l'épaisseur de ces formations est de 270 m.

| Série | Etage | Indexe | Colonne | M | Caractéristique des roches | |
|-----------------------------|------------|-------------------------------|----------------------|---|--|--|
| Pliocène | | pq | | 30 | Gravelites, grés, argiles. | |
| | | p | | 100 | Conglomérats, gravelites, grés, argiles, avec lentille de marnes. | |
| Miocène | Supérieur | m ₃ ²⁻³ | | 90 | Marnes, argiles à rares intercalations d'argiles. | |
| | | m ₂ ²⁻³ | | 180 | Grés gravelite à rares intercalations d'argiles. | |
| | Moyen | m ₁ ²⁻³ | | 200 | Argiles, marnes vert foncé, grés glauconieux. | |
| | Inférieur | m ¹⁻² | | 175 | Grés, marnes argilites à Pélécypodes et foraminifère, grés, conglomérats, marnes argile. | |
| m _c ¹ | | | | | | |
| Oligocène | | g ³ | | 100 | Grés, argiles schisteuses et de glauconites, marnes | |
| Eocène | Priabonien | e ⁶ | | 100 | Marne à rares intercalations de Lumachelles. | |
| | Yprésien | e ⁴⁻⁵ | | 175 | Calcaires nummulitiques gris-clair avec des passées de marnes argileuses. | |
| Paléocène | | e ¹⁻³ | | 150 | Marne noires à rares intercalations de calcaires marneux jaune crème avec Foraminifères. | |
| Crétacé | Supérieur | Sénonien | | c ^{6b} | 200 | Marne grises, calcaires marneux à Globotruncanes. |
| | | | | c ^{6a} | 150 | Calcaires crayeux blancs avec de nombreuses empreintes d'incérâmes regularis en bas lits de marnes à Globotruncanes. |
| | | Campanien | | c ^{5b} | 150 | Calcaires, marno-calcaires et marnes blanchâtres à Micraster. |
| | | | c ^{4b-5a} | 400 | Marnes à petits lits de calcaires à Inoceramus. | |
| | | Santonien | c ^{4b-5a} | 400 | | |
| | | | c ^{4a} | 150 | Calcaires, calcaires marneux, marnes à inocéramus. | |
| | | Coniacien | c ³ | 250 | Marnes, marno-calcaires et calcaires marneux à patine jaune contenant Inocéramus. | |
| | | Turonien | c ² | 200 | Calcaire gris foncé intercalation de marnes à grosses Globigérinides et globotrincanes. | |
| | | Inférieur | Albien - Cénomannien | n ⁶ -c ¹ | 550 | Marnes, intercalation de calcaires marneux, Siltstones, calcaires à Hedbergella, Cushmani. |
| | | | | n ⁵ | 300 | Alternance de marnes, calcaire et de grés |
| Trias | | | ? | Formation marno-gypsifère avec des brèches de calcaires et des grés | | |

Encaissant de la minéralisation ferrifère

Fig. 2 – Colonne lithostratigraphique de la région d'Oued Mougras d'après Kriviakine (1990) modifiée.

b) - Pliocène (p)

Comme dans toute série continentale il est représenté par des conglomérats, grès et sables, calcaires lacustres, marnes, argiles, limons. Les faunes recueillies ne comprennent que des *Mollusques* ou *Dulcaquicoles*. L'épaisseur la formation est de 130m.

1. – 1. – 6. – Quaternaire (q)

Les dépôts rencontrés sont récents et caractérisés par des brèches, des alluvions, des limons, des éboulis, des travertins et des terrasses fluviales.

1. - 2. - Tectonique

Du point de vue structural, la région d'Oued Mougras est formée par deux unités, l'une tellienne et l'autre saharienne (Fig. 3). Ces unités sont bien au contact l'une de l'autre.

a) L'unité saharienne

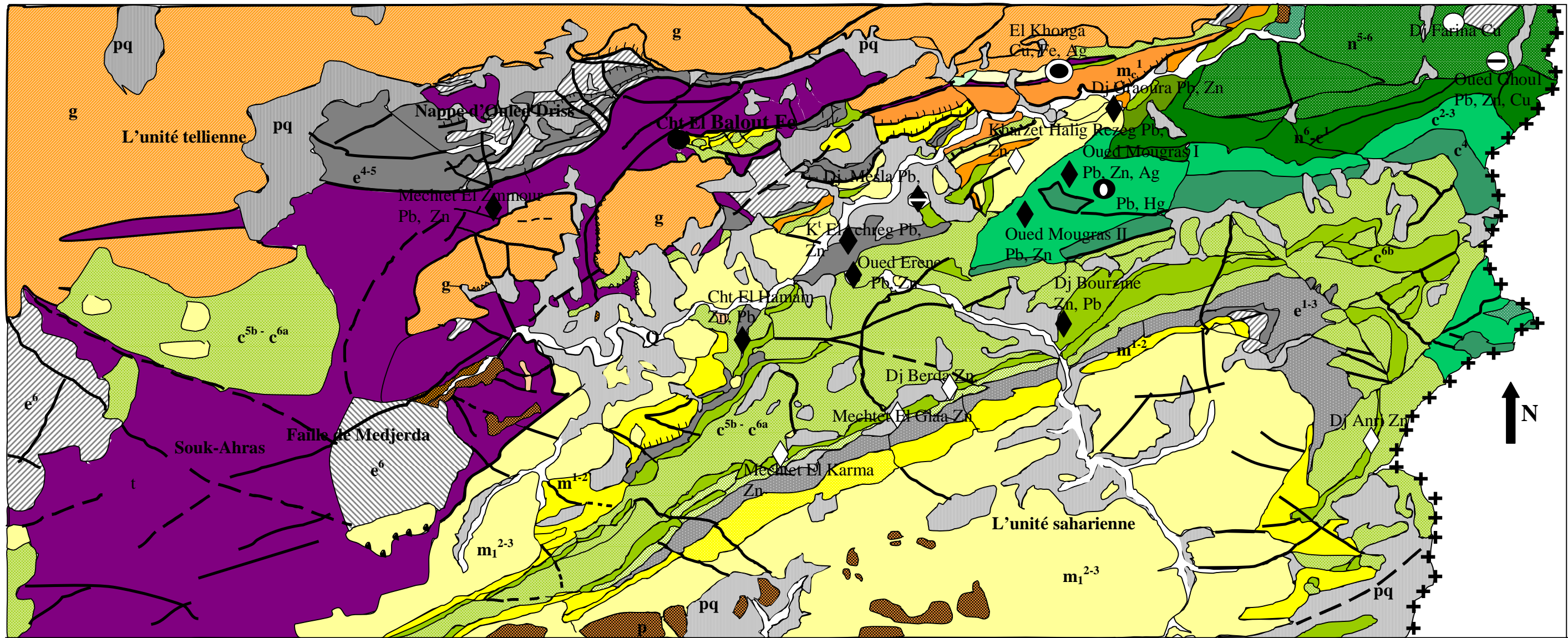
Cette unité montre une succession régulière de plis simples de direction SW-NE.

b) L'unité tellienne

Elle s'amorce progressivement par exagération de plis et changement de leur direction qui tend à devenir Ouest-Est. Dans cette zone, sont observées la nappe numidienne qui est une nappe de glissement et le domaine des écaïlles.

Ø **La nappe numidienne** : Elle est constituée des dépôts des grès de l'Oligocène qui se sont décollés au niveau de leurs argiles de base et ont glissé vers le sud de la bordure du Tell. Elle recouvre les plis telliens. Au niveau de Guern Djedi – Dj El Hamra, celle-ci est complètement isolée de ses racines. Elle se place à environ 12 km au NE de Souk-Ahras, le long de la bande triasique du Jelmana. Une partie de cette nappe appartient à notre secteur d'étude.

Ø **Domaine des écaïlles** : D'après Kriviakine et al. (1990), ces écaïlles sont formées de fragments de la nappe tellienne qui se chevauchent par endroit comme elles peuvent chevaucher les dépôts des autres étages (Trias, Miocène ou autres). Ce type d'écaïlles est visible au niveau d'Ouled Driss : Nappe d'Ouled Driss (Kriviakine et al. 1990) où toutes les roches se caractérisent par le changement brusque de pendage et de direction.



Légende :

| | | | |
|--|-------------------|--|---|
| | Quaternaire | | Priabonien |
| | Pliocène | | Yprésien |
| | | | Paléocène |
| | Miocène moyen | | Maestrichtien supérieur |
| | Miocène inférieur | | Campanien supérieur - Maestrichtien inférieur |
| | | | Santonien |
| | Oligocène | | |

Minéralisation de la région :

| | | | |
|--|----------|--|----|
| | Cu-Fe-Ag | | Cu |
| | Pb-Hg | | Pb |
| | Fe | | |
| | Pb-Zn | | |
| | Zn | | |
| | Pb-Zn-Cu | | |

| | |
|--|---|
| | a : failles cachées b : failles visibles |
| | Chevauchement |
| | Charriage |



Fig. 3 – Carte géologique de la région de Souk Ahras - Oued Mougras d'après (Kriviakine, 1990) complétée par l'auteur.

c) Structures disjonctives

En plus des chevauchements, trois principaux systèmes de failles sont rencontrés dans la région (Fig. 4):

- le premier système: composé de failles parallèles de direction Est –Ouest, le plus souvent jalonné par les dépôts du Trias ;
- le deuxième système est formé par des failles de direction Sud Ouest- Nord Est ;

le troisième système lui est formé par les failles de direction inverse au deuxième système.

d) Le Trias

La mise en place des roches de cet âge dans la région est l'objet de plusieurs hypothèses. D'après David (1956), les accidents méridiens ont d'abord joué le rôle de rides, entraînant la montée de grosses masses triasiques : Diapirs. Cette hypothèse a été adoptée par Kriviakine et al, (1990). Cependant Vila (1993) considère que les roches du Trias peuvent se présenter en trois types (Fig. 4) qui sont :

- le domaine des véritables structures diapiriques;
- le domaine des glaciers de sel sous marins;
- le Trias allochtone sous forme de nappes dans la région de Souk Ahras où il se trouve en contact avec les nappes telliennes et numidienne et les unités allochtones des Sellaouas.

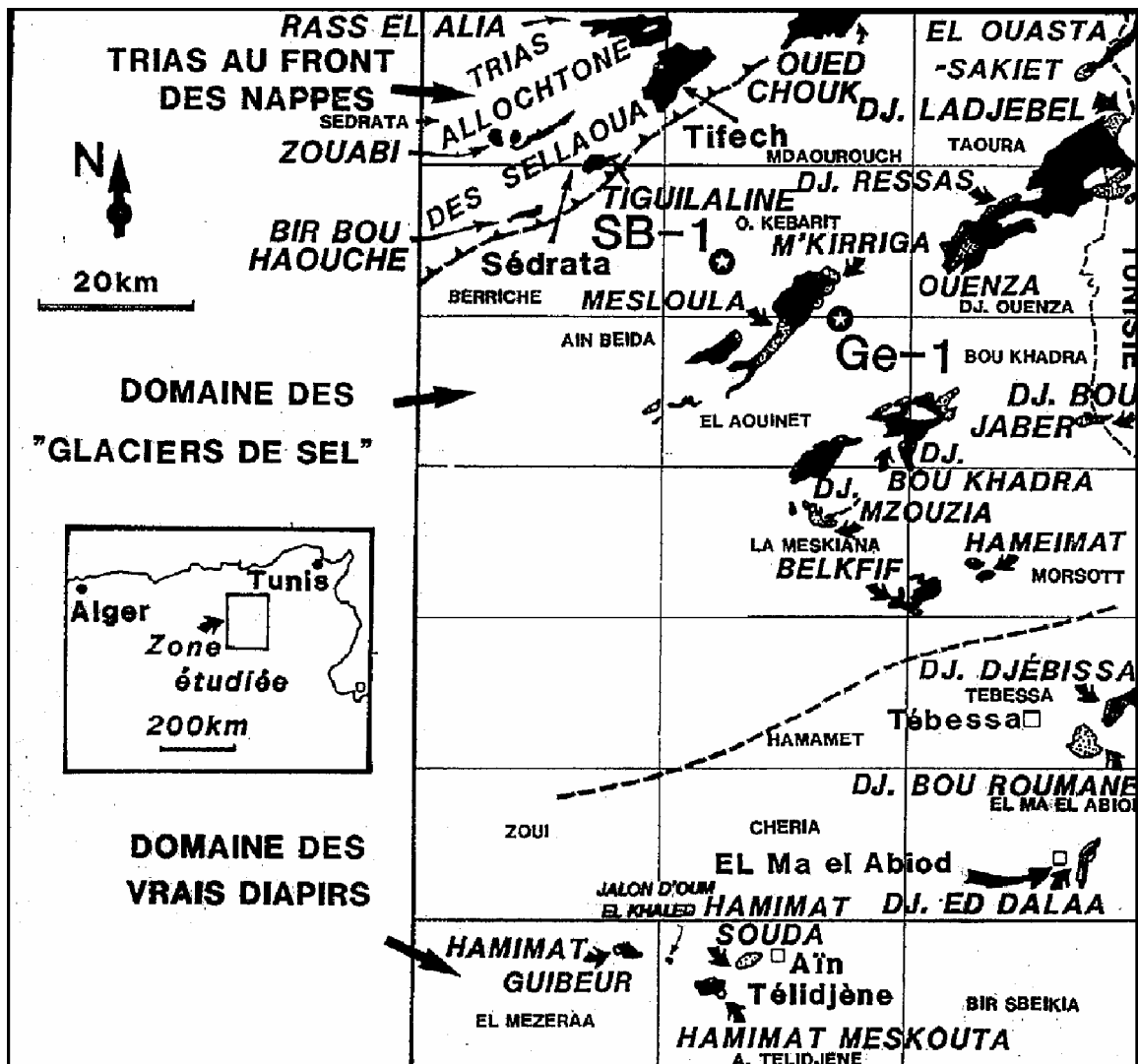


Fig. 4 - Délimitations des trois domaines triasique dans les confins Algéro-tunisiens (Vila *et al.*, 1993-2000)

1. – 3. - Minéralisations

Dans la province métallogénique de la frontière algéro-tunisienne, un grand nombre d'indices de minéralisations et de gisements se localisent soit dans des diapirs, soit dans les marnes et calcaires du Crétacé (Fig. 3). Ce sont des concentrations minérales de Fe, Pb, Zn, Cu, Hg, Ag, Au, Bi. Parmi les minéraux principaux représentant ces minéralisations il y a : galène, sphalérite, hématite, avec des minéralisations secondaires comme la pyrite, la chalcopryrite...etc.

La morphologie des corps minéralisés est variable, elle se présente en filons et amas. D'après Rudis (1972) la majorité de ces minéralisations se localisent dans les failles de direction Nord

Ouest- Sud Est. Ce type morphologique se manifeste dans les gîtes d' Oued Ghoul, Dj Farina, et El Khanga, Dj Bou Rzine, Dj Berda, Châabet El Hammam, Dj Mesla, Koudiat ElAchreg, Kharzet Halig Rezeg, près d'Oued Renem, Dj Anri, et Dj Graoura, à Oued Mougras, et en fin Châabet El Ballout objet de la présente étude.

En plus de ces différentes minéralisations, il existe les matériaux de construction telle que les calcaires dolomitiques, les sables fins pour la construction et les calcaires sénonien à Inocérames et les calcaires Eocènes pour l'empierrement des routes. Les substances utiles rencontrées le sel, le gypse et de soufre qui accompagnent le trias et les phosphates de Kef El Achreg liés à l'Eocène (Rudis, 1972).

2. - GEOLOGIE LOCALE

La géologie du gisement a été étudiée essentiellement par Rudis (1972) et Kouzmine (1990).

2. – 1. - Lithostratigraphie

Le gisement est constitué par des formations d'âges Triasiques, Crétacé supérieur, Oligocène, Miocènes inférieur et Quaternaire (Fig. 5).

2. – 1. – 1. – Trias -t

Le Trias affleure dans la partie Nord Est du gisement. Il se caractérise par des formations argileuses varicolores à passées gypseuses broyées, des marnes bariolées très argileuses qui débutent parfois par des couches très minces d'argilites de couleur jaune foncée, les marnes bariolées contiennent aussi du gypse par endroit, des brèches de calcaires-dolomitiques et de dolomies noires, et enfin des grés en deux variétés, à grains fins et grossier. Le gypse est accompagné souvent de soufre natif et de sel gemme.

N'ayant pas de données et d'informations sur des sondages profonds, deux hypothèses restent poser sur l'origine du Trias, existant dans le gisement : «un diapir enraciné » et «une semelle de nappe».

2. – 1. – 2. - Crétacé

a) - Crétacé supérieur (Sénonien) (c⁵- c⁶)

Le Crétacé supérieur est d'âge Sénonien. Sa puissance globale est en moyenne de 200m. Il est caractérisé par deux séries lithologiques différentes, l'une inférieure et l'autre supérieure. Au niveau du gisement seul les formations de la série supérieures sont rencontrées.

- **La série inférieure** : de puissance dépassant les 100m, est essentiellement formée de marnes noires ou gris foncées ; fortement érodées souvent transformées en gravillons à passé de calcaire jaune contenant de la calcite.

- **La série supérieure** : à une très large extension sur la surface du gisement. Elle est constituée par trois bancs aux caractères lithologiques différents. La puissance totale de cette série est estimée à 100m.

- **Le banc inférieur** est formé par des marnes noires et grises et de calcaires marneux. Sa puissance est inférieure à 50m.

- **le banc moyen** est constitué par des calcaires massifs blancs pélitomorphes. La puissance du banc est de 50m. Il repose en concordance sur les roches sous-jacentes. Ces calcaires forment l'encaissant de la minéralisation.

- **le banc supérieur** est formé de calcaires marneux gris foncé, qui sont similaires aux roches de la série inférieure. La puissance du banc atteint 20 à 30m. Ce banc est recoupé par les sondages n°44, 32, 43 avec une épaisseur de 23m en moyenne.

2. – 1. – 3. - Paléogène – Oligocène (g³)

Seuls les dépôts de l'Oligocène sont rencontrés. Ces dépôts sédimentaires s'observent dans la partie Sud Ouest du gisement. Ils sont formés par une assise homogène de grés quartzeux blancs, rose et jaune foncée à gros grain. La présence de lits de conglomérats à gravillons et de gravelites est notée. Cette assise repose en discordance subhorizontale sur le Trias et se trouve en contact tectonique avec le Crétacé.

2. – 1. – 4. – Néogène– Miocène inférieur (m¹⁻²)

Les formations Miocènes affleurent au centre et au Nord Est du gisement. Elles sont constituées par des grés à grains fins et moyens dont le ciment est calcaire parfois siliceux, De marnes noires et des horizons conglomératiques représentés souvent par des grés quartzeux à grains grossiers, des gravelites, conglomérats, et des galets de calcaires pélitomorphe. La puissance de ces formations est de l'ordre de 200m.

2. – 1. – 5. – Quaternaire (q)

Il s'agit essentiellement des alluvions, des travertins, des limons et cailloutis.

2. – 2. - Tectonique

Sur le plan structural, le gîte de Châabet El Ballout est formé par trois structures complexes de nappes et chevauchements (Fig. 5), qui sont : la nappe tellienne, complexe triasique allochtone et la nappe numidienne, qui surmonterait les deux premiers. La

documentation et les observations faites dans la carrière d'exploitation du gisement ont permis de préciser la tectonique du gîte. Cette dernière est essentiellement cassante. Elle est constituée de quatre systèmes de failles (Fig. 5).

- Un premier système de faille de direction Est-Ouest ($N90^0$). Ce système est représenté, au niveau du gisement, par deux accidents majeurs subparallèles avec un pendage vers le Nord ; La distance entre eux est de 600 à 800m. Ces failles limitent le gisement vers le Sud et vers le Nord.
- Le deuxième système de faille est de direction NW-SE ($N300^0$) ;
- Le troisième système est perpendiculaire au deuxième avec une direction de 30^0N ;
- Le quatrième système de faille a une direction $N180^0$.

Ces systèmes de failles ont subdivisé le gisement de Châabet El Ballout d'Ouest en Est en trois blocs (Fig. 5): le bloc Ouest, le bloc centrale et le bloc Est.

a) Le bloc Ouest

Il est limité en Est par la faille $N300^0$ (Fig. 5), il est constitué au Sud par la nappe numidienne qui repose sur le Trias, et chevauche les sédiments du Crétacés, a pendage de 20^0 à 30^0 vers l'ouest.

La vérification des logs de sondages ainsi que l'étude du terrain a permis d'effectuer quelques corrections sur la carte géologique initiale du gisement.

Les coupes géologiques (Figs. 6, 8) faites suivant la direction SW-NE, montrent que les couches du Crétacé supérieur surmontent celle du Miocène ce qui est d'une allure anormale. Par contre au centre, l'absence des formations du Crétacé est notée du fait de l'érosion.

Pour Rudis (1972) et Kouzmine (1992), l'emplacement du Crétacé supérieur sur le Miocène est dû à un renversement. Cependant Kriviakine et al, (1990), considère qu'il est dû a un chevauchement.

La coupe géologique, faite à partir des gradins d'exploitation (Fig. 7) et l'étude de terrain, ont permis de déterminer une zone de broyage minéralisée de 45 m de large, de direction Nord Ouest-Sud Est et qui continue en profondeur avec un pendage de 30^0 vers le

sud ouest. Le toit de cette zone est constitué de calcaires et le mur est constitué par les grés et les marnes du Miocène.

La mise en évidence de la structure du gîte, a permis de préciser l'orientation des profils de prospections, ces derniers doivent être perpendiculaire à la structure, donc orientés dans la direction Sud Ouest- Nord Est

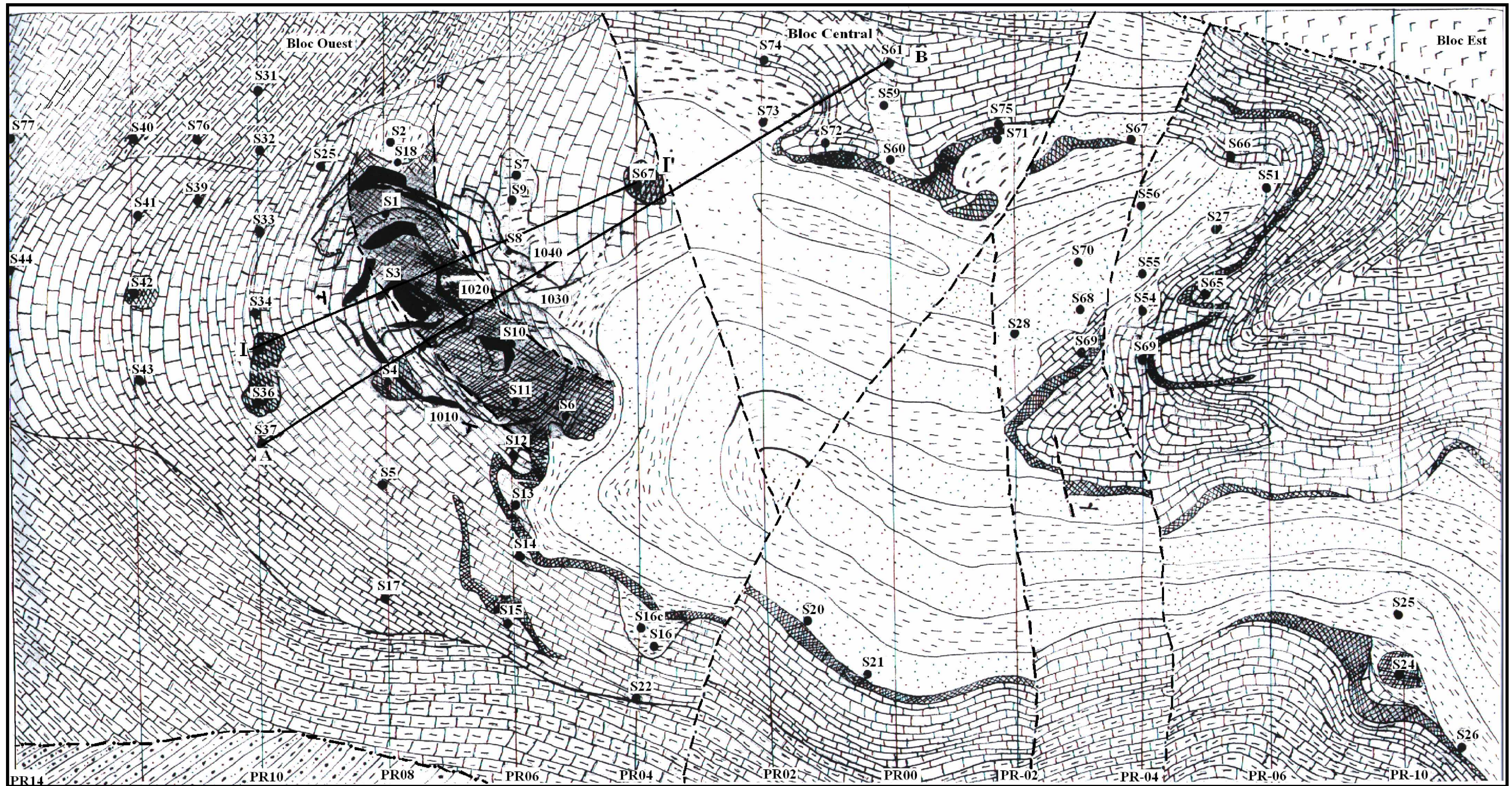
Cette zone de broyage qui a permis de déduire le sens du chevauchement des couches de Crétacé sur ceux du Miocène qui est vers le Nord Est.

b) Le bloc central

Il est limité à l'Ouest par la faille N300°, et en Est par la Faille N 180°. Le bloc est constitué par des sédiments terrigènes Miocène occupant le centre, et des sédiments carbonatés du Crétacé occupant les limites, ce dernier est plus soulevé, car les formations du Crétacées ont été érodées. (Fig. 8)

c) Le bloc Est

Il est limité à l'Ouest par la faille N180°, et il est formé par les sédiments du Crétacé supérieur qui sont sus-jacent aux sédiments terrigènes Miocènes, et par des formations triasiques jalonnant la faille Est-Ouest (Fig. 5).



Légende :

- | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--|-------------------|--|--|
| | Intercalation de grés et de marnes | | Grés numidien | | Minerai de fer affleurant au niveau de la carrière |
| | Calcaires massifs pélitomorphes | | Trias | | Front de carrière d'exploitation |
| | Calcaires marneux | | Failles supposées | | Sondages |
| | Minerai de fer affleurant en surface | | | | Pendage |
| | | | | | PR : Profile |

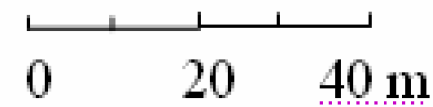


Fig. 5. – Carte géologique du gisement de fer de Châabet El Ballout.

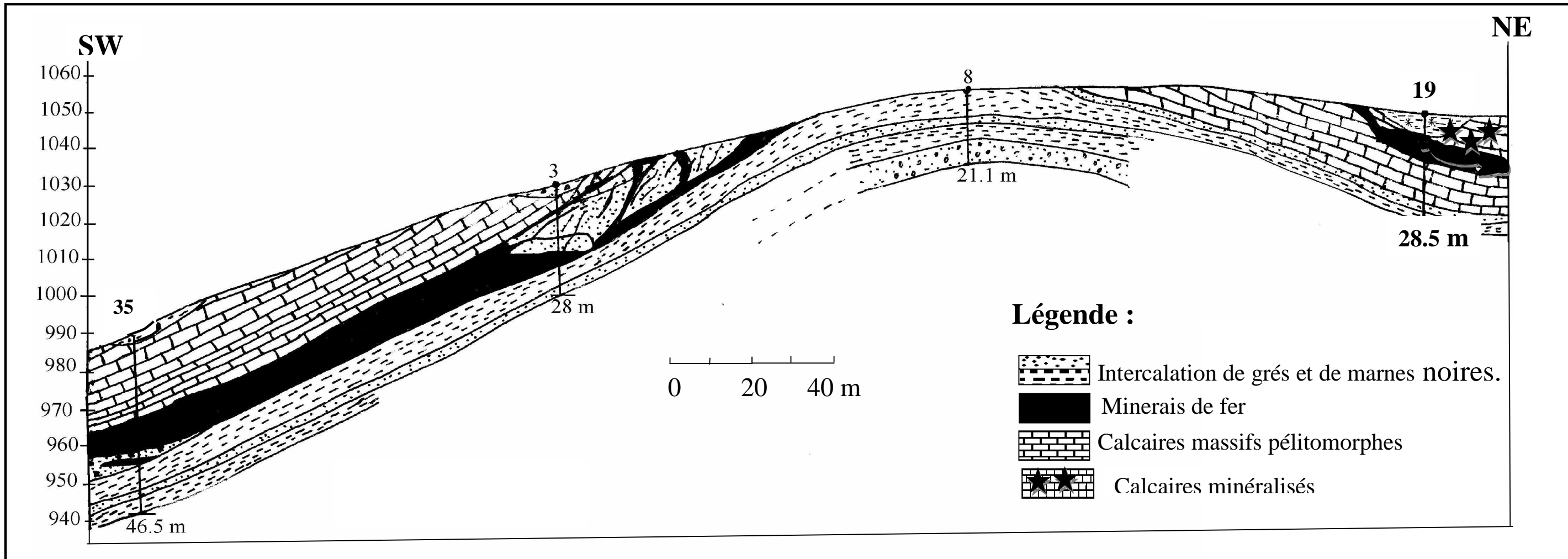


Fig.6. - Coupe géologique du bloc Ouest suivant la ligne II' de la figure 5.

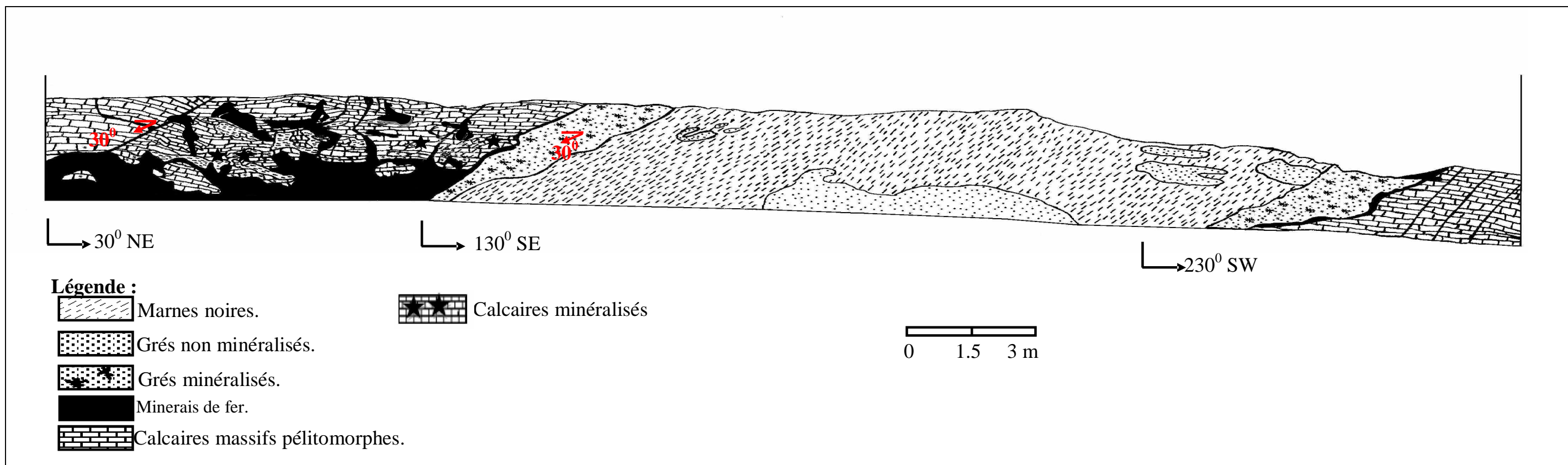


Fig.7. - Géologie du front de carrière, gradin N° :1020m.

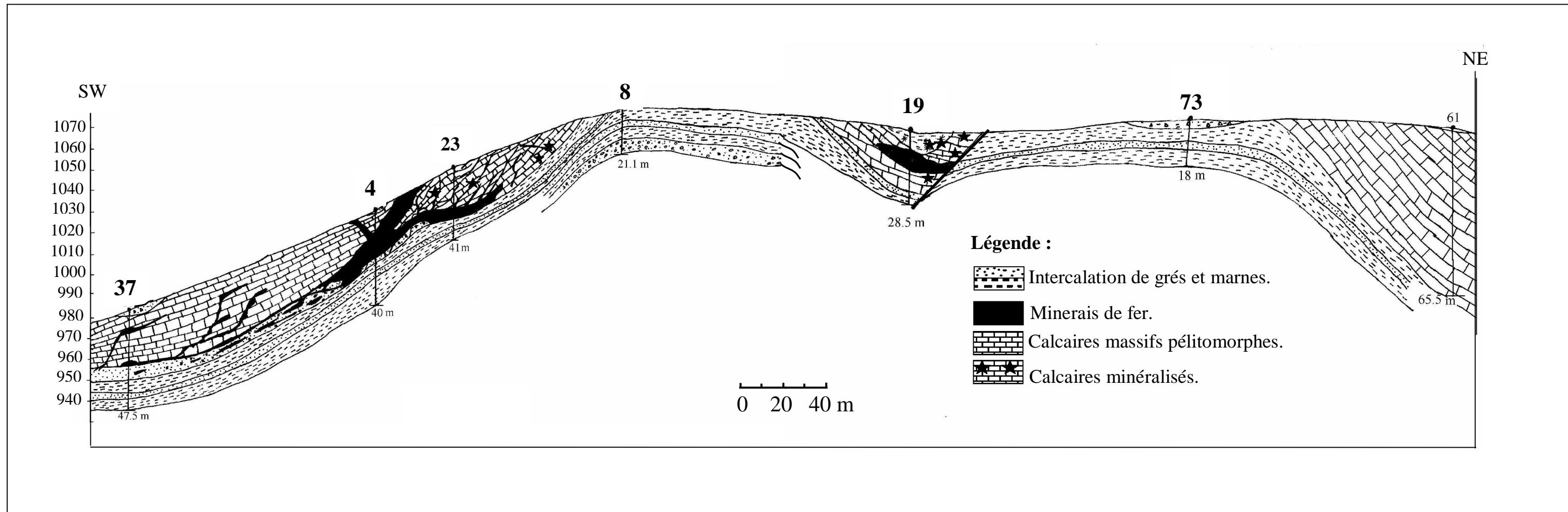


Fig.8. - Coupe géologique des blocs Ouest et central suivant la ligne I' I', de la figure 5.

2. - 3. -Minéralisation ferrifère

La minéralisation du gisement de Châabet El Ballout se localise essentiellement dans la zone de contact des grès du Miocène et des calcaires du Crétacé (Fig. 7). Cette position présente une allure stratiforme, à l'échelle décamétrique et un aspect discordant à l'échelle métrique. (Fig 9).

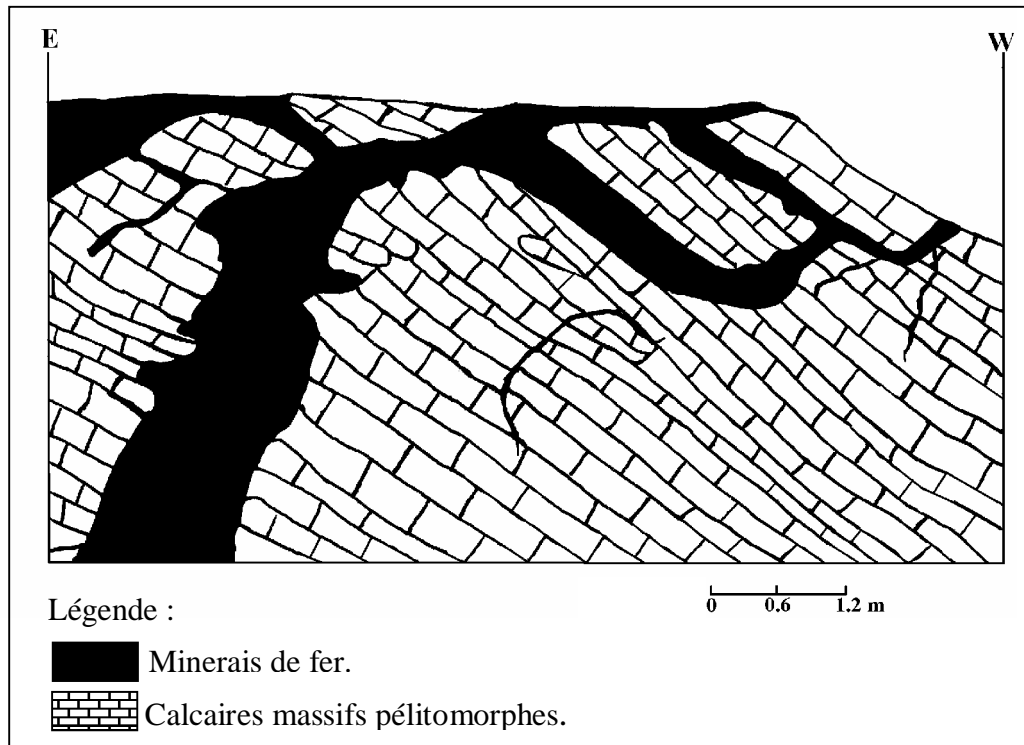


Fig. 9. – Aspect de la minéralisation à l'échelle métrique.

2. - 3. - 1. – Composition minéralogique

Les minéralisations ferrifères sont constituées essentiellement par un minerai hématitique (minerai oxydé) sous forme massive, et goethite et limonite, mais aussi d'un minerai carbonaté généralement peu abondant rencontré en profondeur. Ce minerai carbonaté est constitué d'ankérite et de sidérite.

D'après Kouzmine (1992), le minerai oxydé est accompagné de rares imprégnations de cuivre gris, de malachite, d'azurite et de pyrite, ainsi que l'existence des reliques de sidérite.

2. - 3. - 2. – Mode de dépôt et morphologie des corps de minerais de fer

Les observations de terrain ainsi que l'étude macroscopique des échantillons, ont permis de distinguer les différentes morphologies des corps de minerais parmi celles-ci:

Ø remplissage des fissures ou des vides

Ce type de structure est rencontré dans les calcaires fracturés formant ainsi des veinules minéralisées (Fig. 10), il est aussi rencontré dans les grès bréchifiés qui sont cimentés partiellement par la limonite et l'hématite, Ils présentent beaucoup de vides résiduels dans lesquels s'est déposée la calcite tardive (Fig. 11).

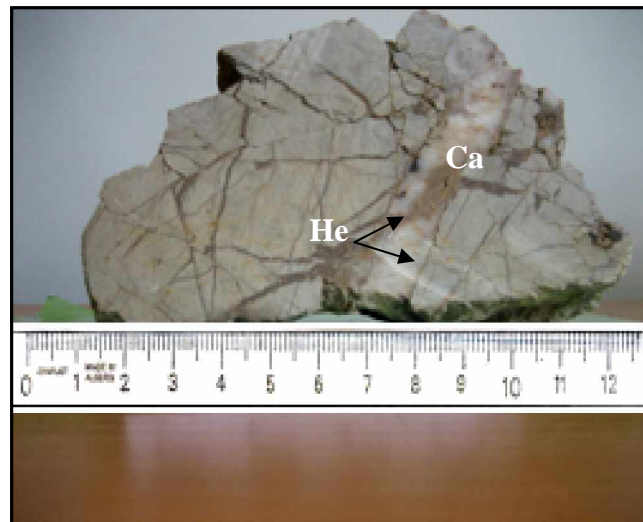


Fig. 10 - Bréchification veinulée (He) hématite, (Ca) calcite.

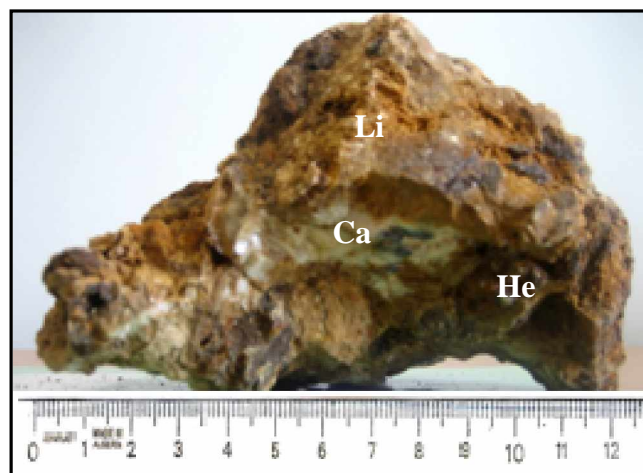


Fig. 11 - Brèche à éléments hétérométriques Ca (calcite), li (limonite), He (hématite).

La minéralisation s'est déposée aussi dans les vides de formes irrégulières en couches concentriques sous forme irrégulière.

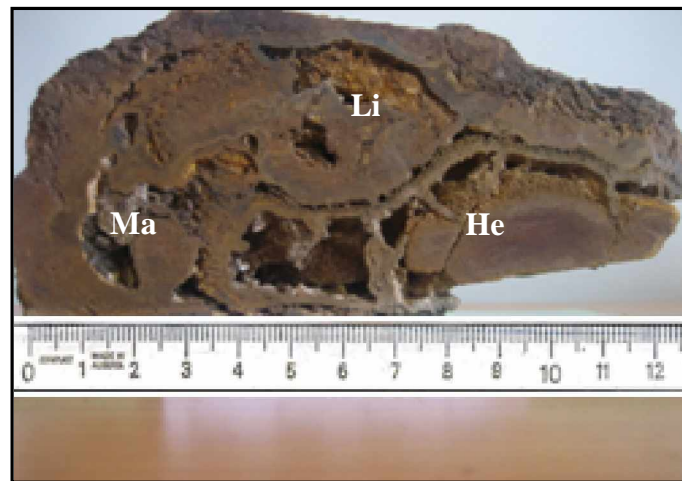


Fig. 12 –Minéralisation par remplissage des vides.
Ma (marne), Li (limonite), He (hématite).

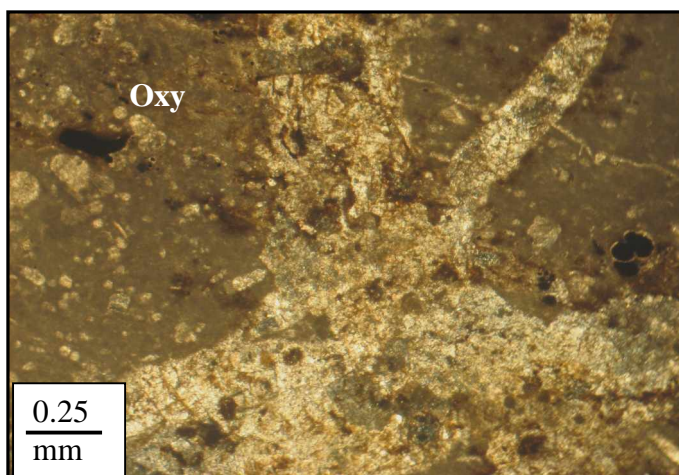


Fig. 13 - Biomicrite à foraminifère planctonique, avec une dissémination de fer dans le ciment.

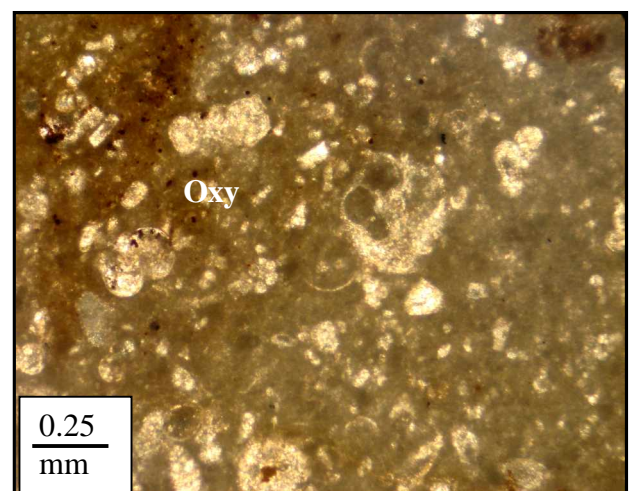


Fig. 14 - Biomicrite à foraminifère planctonique, avec une minéralisation disséminée et filonienne dans le ciment.

L'étude microscopique des calcaires Biomicrite à foraminifère planctonique, montre que le fer est présent aussi sous forme de dissémination (Fig. 13, 14).

Ø Substitution

Ce phénomène est rencontré dans les grès ferrugineux où le ciment carbonaté est lessivé par de l'hématite (substitution de Ca par Fe). Les grès sont fortement imprégnés d'oxyde de fer. Et constituent parfois un véritable minerai siliceux.

Au microscope le fer constitue de grandes plages dans les quelles on observe des grains de quartz fins subarrondis. (Fig. 15).

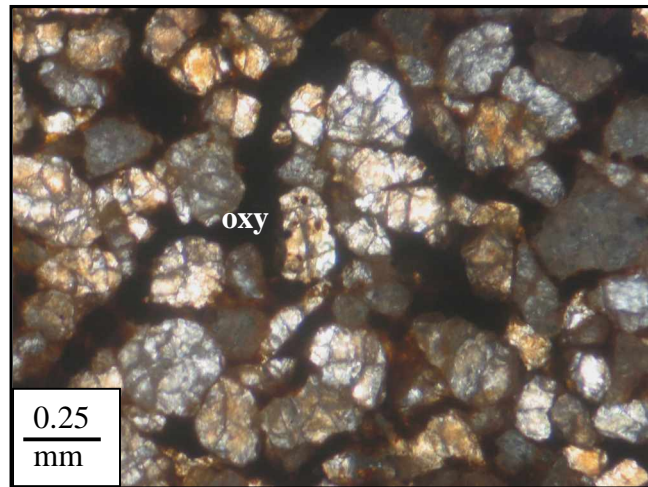


Fig. 15 – grés à ciment ferrugineux.

Ø En amas

La minéralisation se présente aussi sous forme massive Fig. 16.



Fig. 16 - structure massive, He (hématite).

2. - 3. - 3. – Genèse de la minéralisation

Les études faites sur le gisement avancent une hypothèse hydrothermale J. Savornin (1930) a avancé une hypothèse hydrothermale métasomatique sur l'origine de la minéralisation.

Et d'après Rudis (1972) « la minéralisation est présente dans les calcaires crétacés et les grés Tertiaires, elle s'est effectuée au cours des processus tectoniques qui ont aussi agi plus tard », et il l'explique par la présence, dans le minerai même, de nombreuses stries tectoniques.

En effet nous considérons que la minéralisation ferrifère du gisement de Châabet El Ballout est d'origine hydrothermale métasomatique, d'âge post Miocène. Elle s'est formée à la suite de la circulation des fluides hydrothermaux, qui favorisent les échanges géochimiques (métasomatose).

Dans un premier stade l'interaction des solutions riche en fer avec les roches encaissantes (grés et calcaire) a permis la précipitation de la sidérite. Cette dernière est oxydé pour donner un deuxième stade de minéralisation (minerai oxydé), en effet et d'après Kouzmine (1992) la présence des reliques de sidérite dans le minerai hématitique, prouve l'altération de la sidérite en hématite, en plus le minerai carbonaté se trouve dans les parties profondes des sondages (apparition d'un minerai oxydé en profit d'un minerai carbonaté en profondeur).

PARTIE -II-

GEOSTATISTIQUE ET

ESTIMATION DES

RESERVES LOCALES

1. – METHODOLOGIE DE PROSPECTION

Les premiers travaux de découverte du gisement de Châabet-El-Ballout ont eu lieu en 1898. Les tentatives d'exploitation furent entamées en 1903 mais sans résultats satisfaisants.

De 1928 à 1946, les travaux de recherche et d'exploitation ont été repris une deuxième fois avec des moyens archaïques, coûteux, non rentable et dont la production était négligeable. Les réserves en fer métal furent évaluées à 87.671 tonnes.

De Janvier à Octobre 1955, la société générale agricole et minière de Châabet-El-Ballout a remis en état les bâtiments et le câble transporteur et construit des pistes reliant les chantiers principaux à la station de départ du téléphérique avec l'acquisition d'équipements modernes de terrassement et le téléphérique qui assure le transport du minerai de la mine à la gare de Oued Mougras.

En Février 1956, les travaux ont été interrompus définitivement pour des raisons soit disant climatique et depuis aucune tentative de reprise des recherches n'a été entamée.

Le gisement de châabet El Ballout a été exploré en détail par deux campagnes de prospection FERPHOS en 1989, et L'EREM en 1990. Des levés géologiques et géophysiques réalisés, ainsi que des travaux de forage ont été entamés.

1. - 1. – Travaux géologiques et miniers

a) - Itinéraires de recherche au 1/1000

Ils ont couverts toute la superficie du gisement, réalisé suivant des profils parallèles de direction méridienne, équidistant de 100m. Les observations sont rattachées aux piquets implantés le long des profils chaque 20m. A l'issu de ces travaux une carte géologique au 1/10000 a été établie.

b) – Travaux miniers

Les travaux miniers réalisés sont : les forages, les galeries, les puits et tranchées.

Ø **Travaux de forage** : la zone minéralisée a été prospectée par la maille de 100x50m en moyenne; les sondages verticaux et inclinés ont été implantés le long des profils du levé géologique et le long des profils intermédiaires. Au total 62 sondages ont été réalisés (Fig. 5), réparties en 38 sondages dans la zone ouest et 24 dans la zone centrale. Cependant uniquement 33 sondages ont recoupé le minerai de fer.

1. - 2. – Travaux topo-géophysiques

a) – Travaux topographiques

Le traçage des profils a été fait suivant la direction méridienne avec une maille de 100x50m perpendiculairement aux structures géologiques supposées

b) – Travaux géophysiques

- Levés magnétiques

La prospection magnétique du secteur ouest du gisement a été réalisée à l'échelle 1/1000, suivant les profils du levé géologique, la prospection a été menée suivant deux phases.

- La première phase, les mesures ont été prises le long des profils distants de 100 m et l'intervalle des stations de 2 à 3m.
- La deuxième phase dans la zone favorable des profils supplémentaires distants de 25 m ont été ajoutés.

Les mesures ont été prises chaque minute avec un retour à la base toutes les deux heures pour pouvoir déterminer et éliminer la variation diurne du champ.

1. - 3. – Travaux géochimiques et de laboratoires

a) - Géochimie roche en place

Les échantillons ont été prélevés des carottes de sondages au pas variant de 0.5 à 5m. Les anciens travaux munis accessibles (galeries et affleurements) ont été échantillonnés par saignée. La section de la saignée est 10cm x 5cm. La longueur moyenne de l'échantillon est de 2m.

b) – Travaux de laboratoires**Ø Analyse chimique**

Tous les échantillons prélevés à partir de carottes, des travaux miniers des affleurements ont été soumis à l'analyse chimique sur les oxydes suivant : FeO, CaO, SiO₂

Ø Mesure du poids volumétrique

La mesure du poids volumétrique du minerai de fer de Chaâbet El Ballout a été déterminée par la moyenne de 13 échantillons des différentes zones minéralisée sidérite (01éch), limonite (03 éch) et l'hématite (09 éch).

Les résultats obtenus au niveau du gisement ont donné des valeurs de 2.5 t/m³ à 3.1 t/m³ en moyenne 2.78 t/m³.

1. - 4. – Paramètres géologo-économiques

SOMIFER - FERPHOS a procédé au calcul de réserves à l'aide de la méthode des coupes géologiques verticales. Les conditions de calcul des réserves sont comme suit :

- 1- Teneur marginale en FeT =20%
- 2- Puissance minimale d'exploitation : 2,0m
- 3 - Epaisseur maximale des couches stériles et minerai non exploitable : 3.0m

Les réserves du gisement de Châabet El Ballout ont été estimées à 9.2 millions de tonnes.

2. – EXIGENCES INDUSTRIELS DES CLIENTS

Le minerai de fer de Châabet El Ballout extrait est vendu soit à Arcélor, soit aux cimenteries. Ces clients ont des exigences qui doivent être respecté.

2. – 1. – Les cimenteries

Les cimenteries utilisent le SiO₂ ou Al₂O₃, et Fe₂O₃ comme additifs, pour modérer les hétérogénéités du matériau naturel ou pour des raisons de souplesse de fabrication. Les sources principales de ces ajouts sont :

- sables quartzeux, grés, quartzites pour SiO₂ ;
- bauxites pour Al₂O₃ ;
- minerais de fer pour Fe₂O₃.

Pour que le ciment soit de meilleures qualités, il existe plusieurs normes à respecter sur CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, So₃, K₂O, Na₂O et F₂O₃, ce dernier est exigé à teneur supérieure à 35%.

2. – 2. – La sidérurgie

La variation de la composition chimique et minéralogique du minerai réceptionné au niveau de l'usine sidérurgique pose des problèmes aussi bien du point de vue teneur en fer qu'indice de basicité

L'indice de basicité est le rapport de la somme des constituants basiques d'un laitier (CaO, MgO) à la somme de ses constituants acides (SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅).

$$I_b = \%CaO + MgO / \%SiO_2 + P_2O_5$$

La forme la plus simple utilise le rapport des teneurs en CaO (constituant basique) et en silice (constituant acide).

$$I_b = \%CaO / \%SiO_2$$

La teneur en fer demandée est égale à 48% avec un indice de basicité égale à 1. Ces deux paramètres sont les indices de qualité les plus importants et sur lesquels les utilisateurs peuvent intervenir pour les améliorer.

La qualité du minerai de fer dépend aussi des impuretés contenues, car si leurs teneurs dépassent les normes, le gisement perd de sa valeur économique, le tableau 1, si dessous présente l'impact des différentes impuretés contenues dans les minerais de fer sur la qualité de l'acier et les normes exigés.

Tableau 1 - Impact des différentes impuretés contenues dans les minerais de fer sur la qualité de l'acier d'après Bouaziz (1992) modifier.

| Éléments chimiques nocifs | Effet de l'impureté | Le taux |
|---------------------------|--|-------------------------------|
| Phosphore (P) | <ul style="list-style-type: none"> - il passe dans la fonte et il est éliminé de façon coûteuse au cours de l'opération d'affinage. - Un acier contenant trop de phosphore voit sa résilience réduite et devient fragile à froid. | nocifs si il est >0.3% |
| Plomb (Pb) | <ul style="list-style-type: none"> - ne passe pas dans la fonte mais s'accumule dans la partie inférieure du creuset, pénètre dans les joints de revêtement et détruit celui-ci | nocifs si il est >0.05% |
| Soufre (S) | <p>Dégrade sérieusement les qualités métallurgiques du métal : lorsque la teneur en soufre dans le minerai est diminuée de 0.1%, on réduit la consommation de coke de 2% et celle de la chaux de 6% à 7%</p> <ul style="list-style-type: none"> -la présence du soufre dans le laitier le rend fragile et diminue ses qualités marchandes, par conséquent il faut un grand volume de laitier pour un minerai fortement sulfureux. | nocifs si il est > 2% |
| Zinc (Zn) | <p>Existe en faible quantité dans de nombreux minerais.</p> <p>Ne passe pas dans la fonte, il se volatilise pendant la réduction et provoque des accrochages de charges, ce qui empêche le bon fonctionnement du haut fourneau.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pénètre sous forme d'oxydes dans les joints du revêtement réfractaire et le détruit. | nocifs si il est >0.1 |
| Cuivre (Cu) | <ul style="list-style-type: none"> - Se trouve dans la fonte et l'acier. Peut améliorer la résistance de l'acier, à la corrosion, mais en trop grande proportion, il entraîne la fragilité à chaud. | Utilisé comme additif < 10% |
| Chrome (Cr) | <ul style="list-style-type: none"> - Passe on totalité dans la fonte, pendant l'élaboration de l'acier, il n'est pas souhaitable que la fonte contient du chrome car celui-ci passe dans la scorie et la rend trop | Utilisé comme additif jusqu'à |

| | | |
|-----------------------------|---|-------------------------|
| | épaisse. | 10% |
| Titane (TiO ₂) | - son effet n'est pas totalement expliqué, par ailleurs un laitier contenant plus de 17-18% de TiO ₂ ne coule pas facilement et tend à obturer le trou de coulée et à former | nocifs si il est >0,3 % |
| Vanadium (V) et Cobalt (Co) | - passent partiellement ou totalement dans la fonte puis dans l'acier et donnent à celui-ci des propriétés non souhaitables. | nocifs si il est >0,3 % |
| Silice (SiO ₂) | - diminue la fusibilité du minerai | nocifs si il est >10 % |

2.- 3. - Qualité du minerais de fer du gîte de Châabet El Ballout

Des analyses chimiques, sur Fe_t, Co, CaO, Cu, MgO, Ni, P₂O₅, Al₂O₃, Cr₂O₃, Zn, Pb, V, C, S et As, ont été faites par l'entreprise FERPHOS, le Centre de Recherche Nucléaire de Draria (CRND), sur les échantillons, prélevés du gisement de Châabet El Ballout, dont le but de déterminer la composition chimique du minerai (Tableau 2).

La comparaison des résultats des analyses chimiques avec les normes exigées par l'industrie sidérurgique montre que la majorité des éléments existent en faible quantité ne dépassent pas les normes. Cependant les résultats obtenues par les analyses chimique, ainsi que les teneurs mentionnées sur les logs de sondages montrent que le taux de SiO₂ est supérieur à 15%, dépassant parfois les normes exigées (<15%).

Tableau 2 - composition chimique du minerai de fer à hématite du gisement de Châabet El Ballout

| Echantillons | Echantillons prélevés du sondage 04 | | | | Echantillons prélevés par Melle : Halimi 2006 au | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--|--------------|--------------|-----------|
| | E 1 | E 2 | E 3 | E4 | E5 | E6 | | |
| Éléments+oxyde | Teneurs en % | | | | Moyenne % | Teneurs en % | | Moyenne % |
| Fe _t | 59.16 | 54.7 | 53.98 | 52.26 | 55.02 | 34.3245 | 18.7632 | 26.544 |
| Co | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | ND | ND | |
| SiO ₂ | 3.12 | 7.72 | 4.28 | 3.4 | 4.63 | ___ | ___ | ___ |
| CaO | 0.22 | 0.17 | 0.044 | 1.27 | 0.42 | 1.9699 | 0.69914 | 1.3345 |
| Cu | 0.003 | 0.0054 | 0.001 | 0.001 | 0.0026 | 0.0096 | 0.00306 | 0.0063 |
| MgO | 0.2 | 0.22 | 0.093 | 0.675 | 0.29 | 0.1152 | 0.07404 | 0.0946 |
| Ni | 0.0057 | 0.0048 | 0.0057 | 0.0057 | 0.0054 | 0.0018 | 0.00129 | 0.0015 |
| P ₂ O ₅ | 0.36 | 0.25 | 0.24 | 0.36 | 0.3 | ___ | ___ | ___ |
| Al ₂ O ₃ | 1.026 | 1.76 | 2.86 | 0.95 | 1.64 | ___ | ___ | ___ |
| Cr ₂ O ₃ | 0.0035 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0035 | ___ | ___ | ___ |
| Zn | 0.007 | 0.015 | 0.0018 | 0.41 | 0.108 | 0.0039 | 0.0038 | 0.0038 |
| Pb | 0.004 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.0025 | ___ | ___ | ___ |
| V | ND | ND | ND | ND | ___ | ___ | ___ | ___ |
| C | 0.85 | 0.31 | 0.42 | 0.96 | 0.63 | ___ | ___ | ___ |
| S | 0.05 | 0.012 | 0.035 | 0.033 | 0.032 | ___ | ___ | ___ |
| As | 0.006 | 0.008 | 0.005 | 0.009 | 0.007 | ___ | ___ | ___ |
| Na ₂ O | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ |
| K ₂ O | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ |
| TiO ₂ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ |
| MnO | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ | ___ |
| Paf | 10.46 | 11.3 | 12.51 | 16.63 | 12.72 | | | |
| profondeur (m) | 5.30 | 8.5 | 15 | 42 | | Gradin 1020m | Gradin 1020m | |

3. - ANALYSE DES DONNEES DE PROSPECTION

L'ensemble des données de carottes des compagnes de prospections, a été modélisé par l'étude géostatistique.

3. - 1. - Analyse monovariante

Le traitement statistique a été effectué sur les 240 échantillons de carottes prélevés de 38 sondages. Ces échantillons ont été analysés sur FeO (Figs. 17, 18), CaO, SiO₂ (tableau 3).

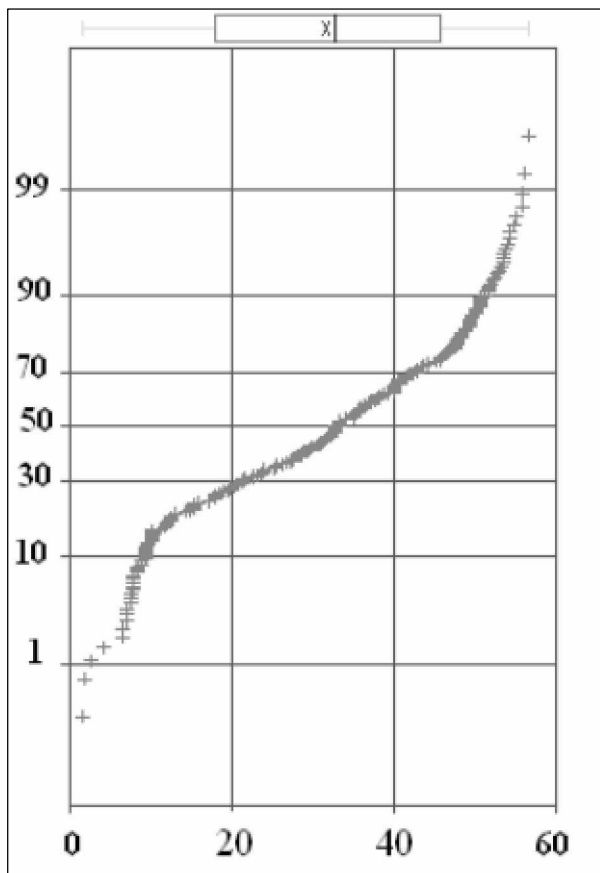


Fig. 17- fonction de répartition de l'ensemble des données des teneurs en fer

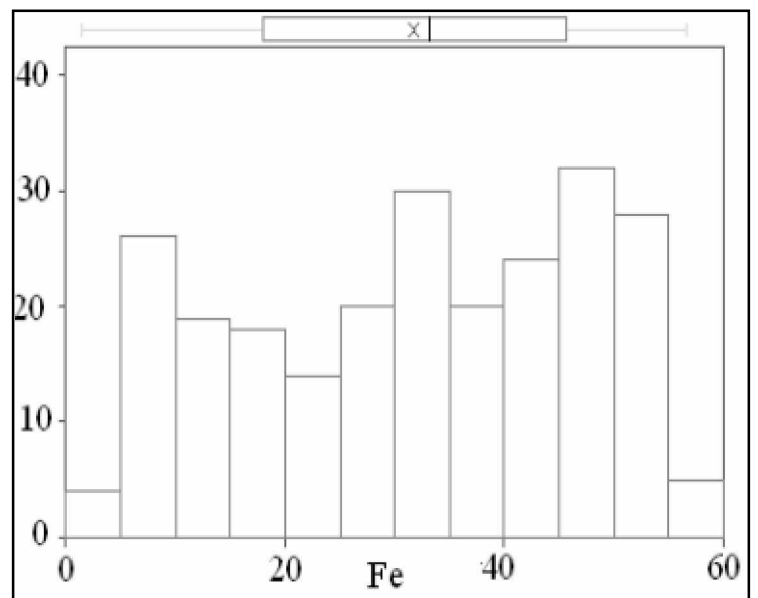


Fig. 18- histogramme de l'ensemble des données des teneurs en fer.

Tableau 3. – statistique de l'ensemble des échantillons.

| Elés. | FeO | SiO ₂ | CaO |
|-----------------------------|--------|------------------|--------|
| N | 241 | 241 | 241 |
| N. ab. | 0 | 0 | 7 |
| Min (%) | 1.38 | 1.67 | 0.96 |
| Max (%) | 56.58 | 85.72 | 55.36 |
| \bar{X} (%) | 30.50 | 25.30 | 11.17 |
| σ^2 (%) ² | 240.28 | 592.04 | 115.34 |

X (%): la moyenne $S^2(\%)^2$: variance expérimentale; **N**: nombre des échantillons ; **N. ab** : nombre de valeur absente.

- **Statistique de FeO par classes de teneurs**

D'une façon générale, il a été constaté les données du tableau 4.

Tableau 4 – paramètres statistiques de l'ensemble des classes.

| Classe des teneurs | S^2 (%) ² | \bar{X} (%)FeO | \bar{X} (%)SiO ₂ | \bar{X} (%)CaO | N | Contrôle lithologique de la minéralisation |
|--------------------|------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|----|--|
|] 1.38-22.75] | 28.40 | 12.53 | 47.51 | 17.11 | 76 | Essentiellement des grés Miocène |
|] 23.00-29.52] | 3.82 | 26.46 | 33.54 | 10.98 | 22 | Dans les grés uniquement |
|] 29.52-37.20] | 4.35 | 33.44 | 17.06 | 12.47 | 45 | Minerais d'hématite dans les marnes |
|] 37.22-43.01] | 2.89 | 40.20 | 12.71 | 8.97 | 28 | Infiltrations dans les calcaires |
|] 43.01-52.08] | 2.41 | 49.06 | 9.63 | 4.89 | 39 | Le mur de la minéralisation est formé par des grés ; le toit est formé par le minerai de la classe 06. |

| | | | | | | |
|----------------|------|-------|------|------|----|---|
|] 52.08-56.58] | 1.84 | 54.11 | 6.99 | 3.19 | 20 | Le toit de la minéralisation est formé de calcaire ; le mur est formé par le minerai de la classe 05. |
|----------------|------|-------|------|------|----|---|

\bar{X} (%): la moyenne $S^2(\%)^2$: variance expérimentale; N: nombre des échantillons.

◆ Minéralisation essentiellement dans les grés Miocène

Une partie de la minéralisation se localise le plus souvent dans les grés Miocène, elle forme la classe des teneurs] 1.38-22.75]. Un traitement statistique monovarié a été effectué sur les données de cette classe.

La courbe des fréquences cumulées du FeO (Annexe. Fig. 42) montre un point d'inflexion qui divise la totalité des échantillons en deux sous populations; Une sous population pauvre en FeO (<15%), qui représente 50% des valeurs observées, et qui est formée par des calcaires Crétacé, et une autre sous population (> 15%) en FeO, qui représente 50% du nombre des échantillons étudiés et qui est formée par les grés du Miocène.

Sur le plan géologique ces deux faciès forment la roche encaissante de la minéralisation.

◆ Minéralisation dans les grés uniquement

L'étude des logs de sondages a montré que la minéralisation se trouve aussi dans les grés formant un minerai siliceux pauvre, elle forme la classe des teneurs] 23.00-29.52]. Un traitement statistique monovarié a été effectué sur les données de cette classe.

La courbe des fréquences cumulées du FeO (Annexe. Fig. 44) montre un seul point d'inflexion qui divise la totalité des échantillons en deux sous populations; Une sous population pauvre en FeO (<27%), qui représente 50% des valeurs observées, et qui représente les grés faiblement minéralisés, et une autre avec en FeO (>27%), qui représente 50% du nombre des échantillons étudiés et qui forme les grés minéralisés.

◆ Minéralisation d'hématite dans les marnes

L'étude des logs de sondages a montré que la minéralisation se trouve en plus des deux faciès précédents qu'elle se trouve aussi dans les marnes elle forme la classe des teneurs] 29.52-37.20]. Un traitement statistique monovarié a été effectué sur les données de cette

classe.

La courbe des fréquences cumulées du FeO (Annexe. Fig. 46) montre un seul point d'inflexion qui divise la totalité des échantillons en deux sous populations; Une sous population avec des teneurs FeO (<33%), qui représente 50% des valeurs observées, et qui représente les marnes minéralisés formant l'encaissant de la deuxième sous population, avec des teneurs en FeO (>33%), qui représente 50% du nombre des échantillons étudiés et qui forme minerais d'hématite dans les marnes.

◆ **Infiltrations dans les calcaires**

Une partie de la minéralisation se localise dans les calcaires fissurés sous forme d'infiltration, elle forme la classe :] 37.22-43.01]. Un traitement statistique monovarié a été effectué sur les données de cette classe.

La courbe des fréquences cumulées du FeO (Annexe. Fig. 48) montre un seul point d'inflexion qui divise la totalité des échantillons en deux sous populations; Une sous population avec des teneurs en FeO (<41%), qui représente le minerai moins riche que la deuxième sous population (>41%), et qui se trouve sous forme d'infiltration dans les calcaires.

◆ **Le mur de la minéralisation est formé par des grés**

Se faciès est formé par la classe] 43.01-52.08] elle est en contact direct avec les calcaires qui forment le toit (Fig. 19). Un traitement statistique monovarié a été effectué sur les données de cette classe.

La courbe des fréquences cumulées du FeO (Annexe. Fig. 50) montre un seul point d'inflexion qui divise la totalité des échantillons en deux sous populations; Une sous population avec des teneurs en FeO (<49.2%), qui représente le minerai moins riche que la deuxième sous population (>49.2%), qui est formée par un minerai d'hématite dont le mur est formé par des grés et le toit par le faciès de la sixième classe.

◆ **Le toit de la minéralisation est formé de calcaire**

Se faciès est formé par la classe] 52.08-56.58] elle est en contact direct avec les grés qui forment le mur. Un traitement statistique monovarié a été effectué sur les données de

cette classe.

La courbe des fréquences cumulées du FeO (Annexe. Fig. 52) montre un seul point d'inflexion qui divise la totalité des échantillons en deux sous populations; Une sous population avec des teneurs en FeO (<53.9%), qui représente le minerai moins riche que la deuxième sous population (>53.9%), qui est formée par un minerai d'hématite dont le mur est calcaires et son toit c'est le minerai de la classe précédente.

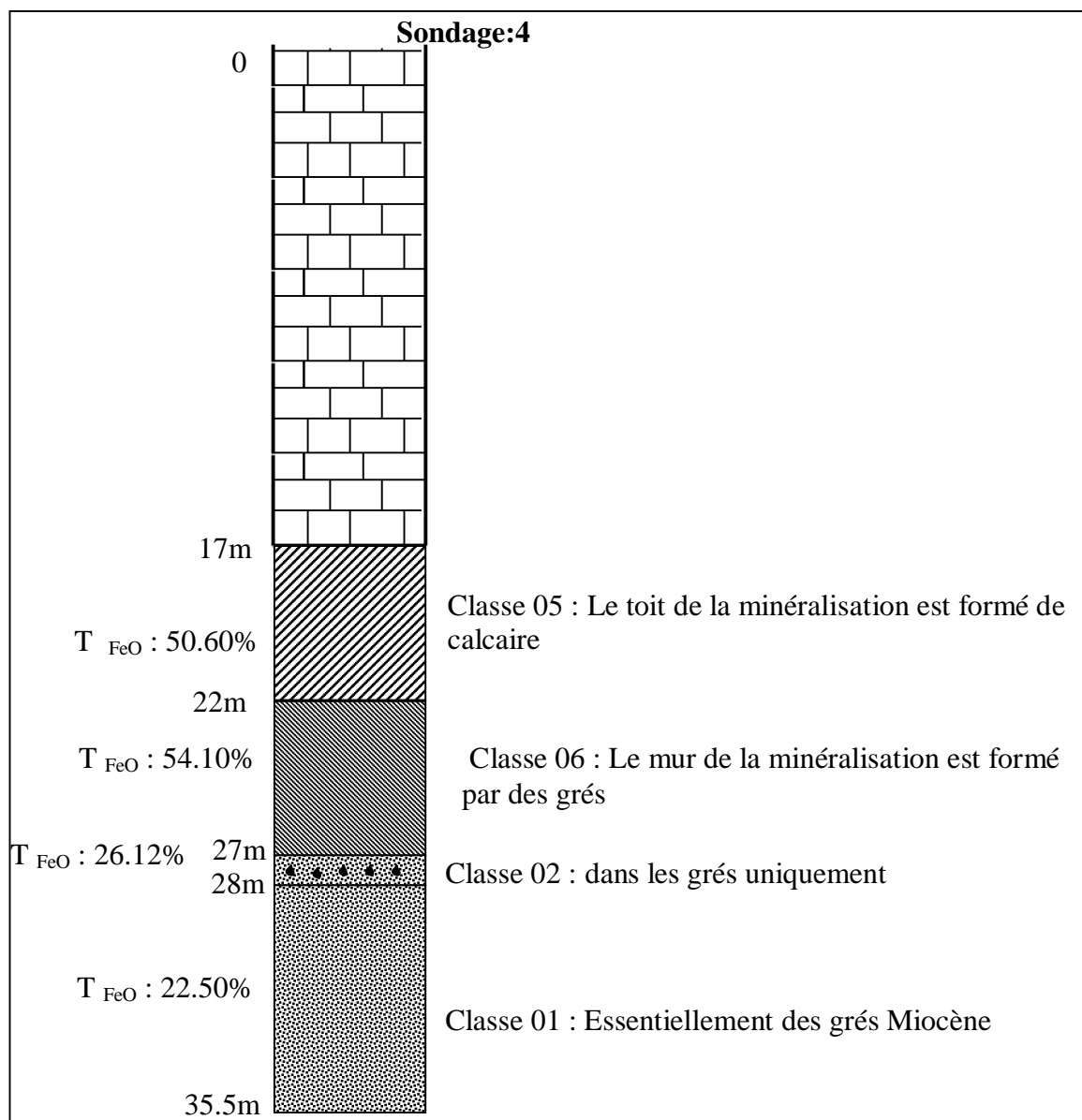


Fig. 19. – schéma général de la distribution du minerai de fer dans les logs de sondage.

3. - 2. - Analyse multivariable (ACP)

Le calcul de la matrice de corrélation (tableau 5) effectué sur l'ensemble des données des sondages du gisement a permis de démontrer que le FeO est corrélé négativement à CaO

et SiO₂.

Sur le plan géologique cette corrélation négative se traduit par le fait que le FeO, CaO et SiO₂ n'ont pas les mêmes conditions de formations

Tableau. 5 - Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement de Châabet El Ballout.

| Élément | FeO | SiO ₂ | CaO |
|------------------|--------|------------------|-----|
| FeO | 1 | | |
| SiO ₂ | -0,66* | 1 | |
| CaO | -0,45* | -0,26* | 1 |

-0.26*: corrélations significatives.

A partir de la matrice de corrélation de l'ensemble des éléments analysés (tableau. 6), les facteurs de charge ont été calculés (tableau. 6) et les cercles de corrélation ont été tracés (Fig. 20)

Tableau.6 - Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement de Châabet El Ballout.

| élément | F1 | F2 | F3 |
|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| Valeurs propres | L ₁ =1.68 | L ₂ = 2.95 | L ₃ = 3 |
| Variance (%) | 56.08 | 42.15 | 1.77 |
| Variance cumulée (%) | 56.08 | 98.23 | 100 |
| FeO | -0,98 | 0,17 | -0,15 |
| SiO ₂ | 0,79 | 0,60 | -0,14 |
| CaO | 0,33 | -0,94 | -0,11 |

Ø Interprétation des résultats de l'ACP

La représentation graphique des corrélations entre les variables (oxydes) d'une part et entre les facteurs de charge d'autre part, a permis de visualiser leurs degrés d'associations et la signification de leurs corrélations avec les facteurs.

○ Les cercles de corrélations montrent une association constituée de CaO, SiO₂ elle est caractérisée par une corrélation positive avec le facteur F1, et pratiquement nulle avec le facteur F3. Elle représente le ciment carbonaté des grès du Miocène.

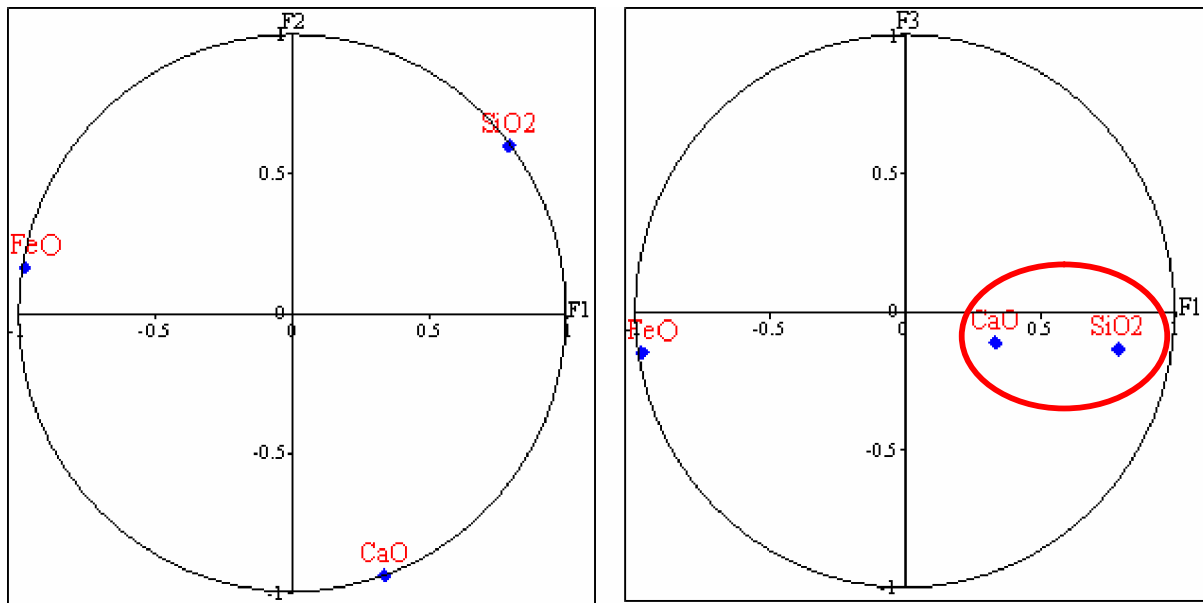


Fig. 20 – les cercles de corrélations de l'ACP sur l'ensemble des données de sondages du gisement de Châabet El Ballout.

4. - ESTIMATION DES RESERVES LOCALES A L'AIDE DES METHODES GEOSTATISTIQUES

4. - 1. - Variographie

Les principales variables régionalisées étudiées sont la teneur en FeO, SiO₂, CaO des carottes de sondages, puisque la teneur de ces deux derniers peut faire l'objet d'exigence sidérurgique donnant l'exemple de l'indice de basicité.

* Calcul et ajustement des variogrammes expérimentaux

Avant de procéder au calcul des variogrammes expérimentaux 3D des teneurs de Fe, SiO₂, CaO, il faut préparer le fichier pour calculer les couples des teneurs distants de h
Tableau 7.

Tableau. 7 - paramètres utilisés pour la construction des variogrammes expérimentaux des teneurs de Fe, SiO₂, CaO

| | Axe X (m) | Axe Y (m) | Axe Z (m) |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| Début | 86270 | 53814 | 862.71 |
| Fin | 87330 | 54326 | 1055.25 |
| Pas maximal | 150 | 150 | 20 |

Ø 224 échantillons retenus par le programme sur 240 échantillons.

Ø 8874 couples calculés.

Le calcul de variogrammes expérimentaux a été fait en 3D dans le plan de la couche. Les échantillons qui se trouvent à une distance ' h ' suivant une direction de 0° avec une tolérance de $\pm 90^\circ$, et une tolérance de $\pm 30^\circ$ sur l'angle verticale ont servi pour le calcul du variogramme (Fig. 21).

Ensuite les variogrammes expérimentaux du gisement et ces paramètres ont été construits, ainsi que leurs ajustements.

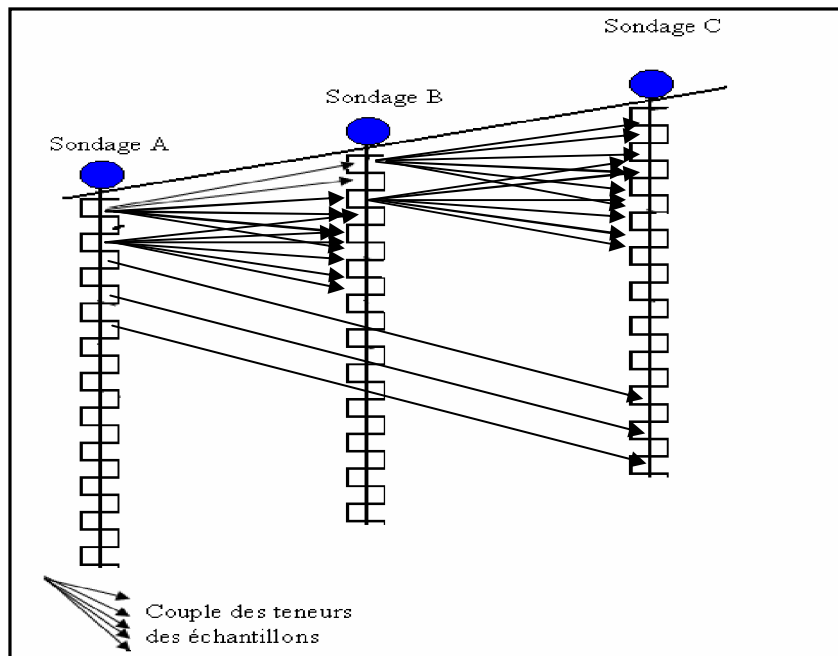


Fig. 21 – procédure de calcul des couples des teneurs des échantillons des sondages pour la construction des variogrammes expérimentaux 3D.

A) Les variogrammes de FeO

○ Variogramme vertical

Le variogramme vertical moyen expérimental des teneurs en FeO (Fig. 22, Tableau 8), a été construit à partir des données de sondages, et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 12$ (m), d'un effet de pépité $C_0 = 49(\%^2)$, et d'un palier $C = 64(\%^2)$.

$$\gamma(h) = 49 + 64sph_{12}(h)$$

Tableau 8 – données du variogramme vertical moyen des teneurs en FeO.

| Pas | Couples | Distance (m) | $\gamma(h) (\%^2)$ |
|-----|---------|--------------|--------------------|
| 1 | 141 | 2.74 | 74.34 |
| 2 | 100 | 7.30 | 106.67 |
| 3 | 70 | 12.29 | 110.76 |
| 4 | 34 | 16.78 | 74.64 |
| 5 | 20 | 22.78 | 121.90 |
| 6 | 27 | 27.93 | 111.54 |
| 7 | 30 | 32.66 | 136.97 |

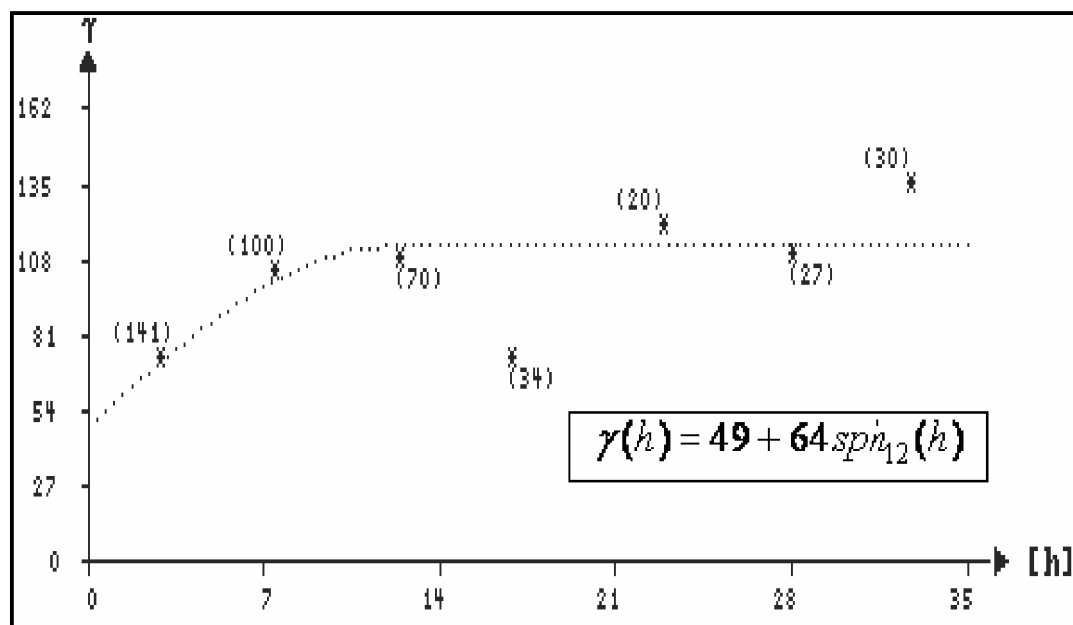


Fig. 22 - Le variogramme vertical moyen des teneurs en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$
Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$.

Le variogramme verticale montre une pseudo-périodicité de 8 m d'amplitude, qui se traduit par la périodicité de la répartition spatiale des teneurs en FeO.

Sur le plan géologique cette périodicité s'explique par la présence de couches minéralisées discontinues de 08 m d'épaisseur en moyenne (Figs. 6, 7).

○ Variogramme horizontal

Le variogramme horizontal moyen expérimental des teneurs en FeO (Fig. 23, Tableau 9), a été construit à partir des données de sondages, et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 70(m)$, d'un effet de pépité $C_0 = 30 (\%^2)$, et d'un palier $C = 70(\%^2)$.

$$\gamma(h) = 30 + 70sph_{70}(h)$$

Tableau 9 – paramètres du variogramme horizontal moyen des teneurs en FeO.

| Pas | Couples | Distance (m) | $\gamma(h) (\%^2)$ |
|-----|---------|--------------|--------------------|
| 1 | 41 | 24.37 | 68.96 |
| 2 | 230 | 54.54 | 99.49 |
| 3 | 288 | 97.18 | 94.32 |
| 4 | 988 | 119.40 | 107.29 |
| 5 | 804 | 153.65 | 98.81 |

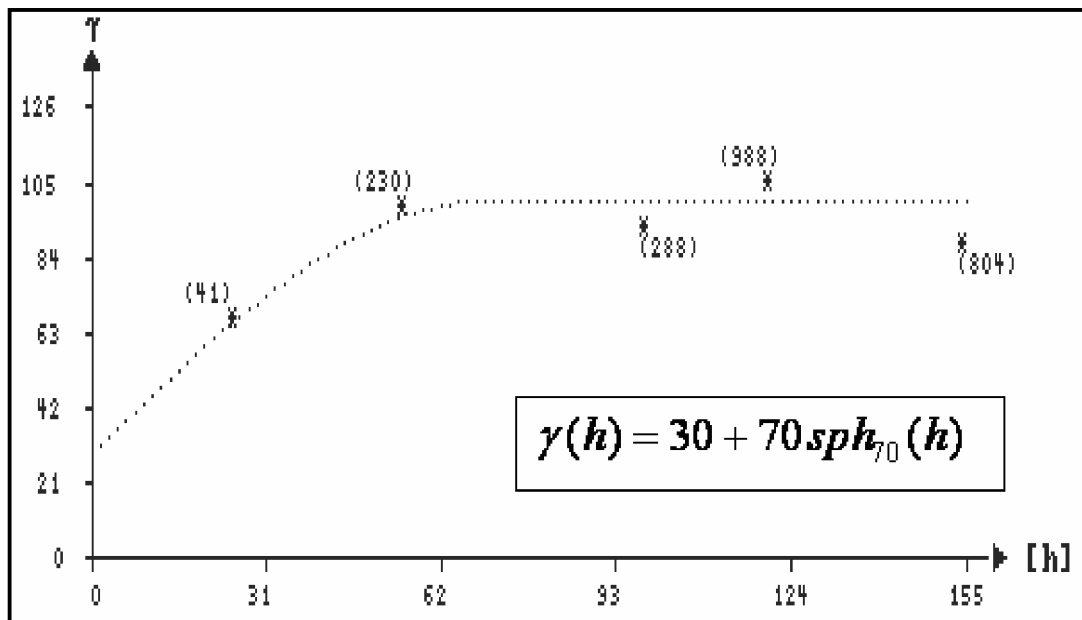


Fig. 23 - Le variogramme horizontal moyen des teneurs en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$
Angle vertical : $0^0 \pm 30^0$.

B) Les variogrammes de SiO₂

○ Variogramme vertical

Le variogramme vertical moyen expérimental des teneurs en SiO₂ (Fig. 24, Tableau 10), a été construit à partir des données de sondages, et ajusté par un modèle sphérique de portée a = 15 (m), d'un effet de pépite C₀ = 120(%²), et d'un palier C = 425(%²).

$$\gamma(h) = 120 + 425sph_{15}(h)$$

Tableau 10 – paramètres du variogramme vertical moyen des teneurs en SiO₂.

| PAS | Couples | Distance (m) | $\gamma(h)$ (% ²) |
|-----|---------|--------------|-------------------------------|
| 1 | 296 | 2.67 | 256.33 |
| 2 | 213 | 7.36 | 397.21 |
| 3 | 161 | 12.40 | 547.80 |
| 4 | 109 | 17.05 | 559.90 |
| 5 | 55 | 22.42 | 510.70 |
| 6 | 46 | 27.67 | 378.31 |
| 7 | 56 | 32.31 | 468.51 |

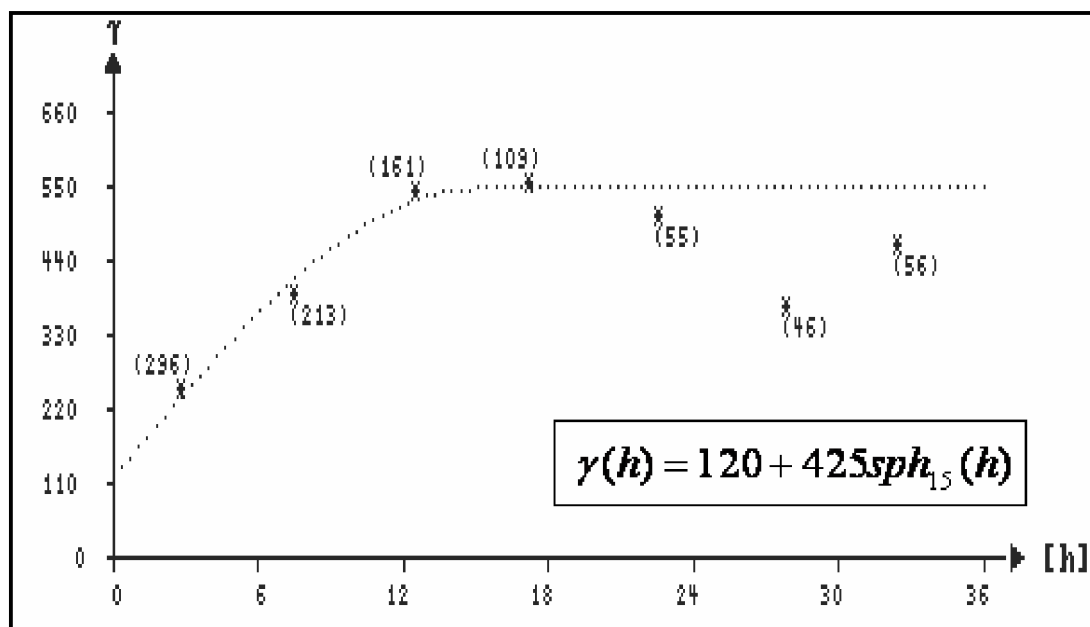


Fig. 24 - Le variogramme vertical moyen des teneurs en SiO₂ Direction : 0° ± 90°
Angle vertical : 90° ± 30°.

○ **Variogramme horizontal**

Le variogramme horizontal moyen expérimental des teneurs en SiO_2 (Fig. 25, Tableau 11), a été construit à partir des données de sondages, et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 120(\text{m})$, d'un effet de pépite $C_0 = 260(\%^2)$, et d'un palier $C = 414(\%^2)$.

$$\gamma(h) = 260 + 414sph_{120}(h)$$

Tableau 11 – paramètres du variogramme horizontal moyen des teneurs en SiO_2 .

| PAS | Couples | Distance (m) | $\gamma(h) (\%)^2$ |
|-----|---------|--------------|--------------------|
| 1 | 112 | 17.55 | 394.96 |
| 2 | 386 | 57.64 | 531.17 |
| 3 | 1000 | 102.11 | 652.44 |
| 4 | 1000 | 129.92 | 662.74 |
| 5 | 815 | 170.08 | 838.82 |

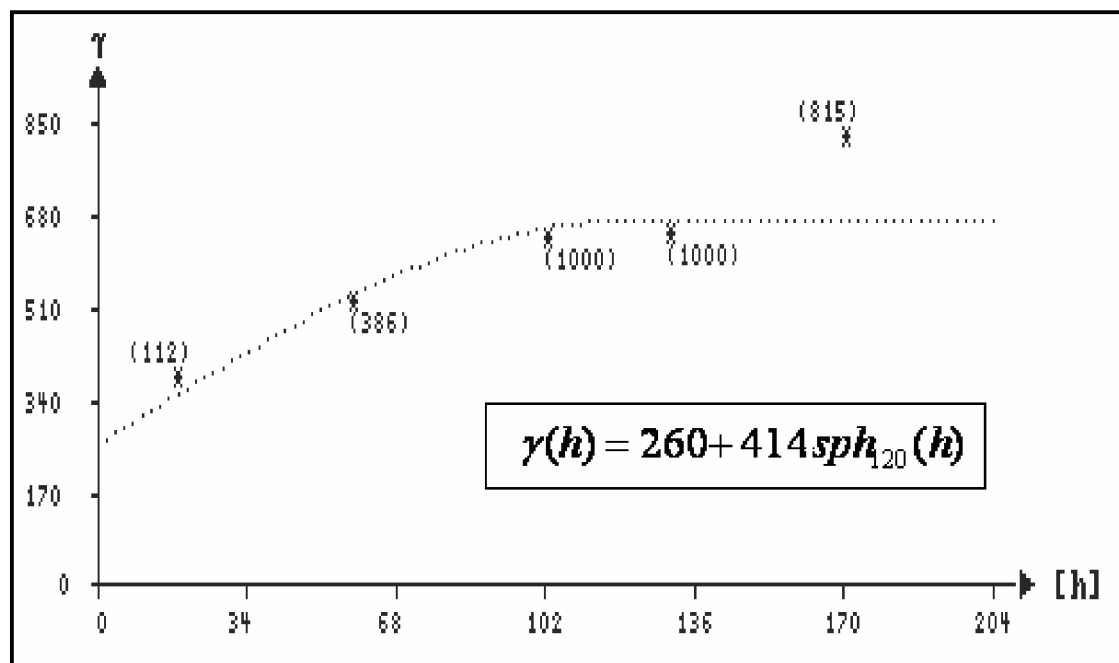


Fig. 25 - Le variogramme horizontal moyen des teneurs en SiO_2 Direction : $0^0 \pm 90^0$
Angle vertical : $0^0 \pm 30^0$.

C) Les variogrammes de CaO

○ Variogramme vertical

Le variogramme vertical moyen expérimental des teneurs en CaO (Fig. 26, Tableau 12), a été construit à partir des données de sondages, et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 12$ (m), d'un effet de pépité $C_0 = 44(\%^2)$, et d'un palier $C = 89(\%^2)$.

$$\gamma(h) = 44 + 89sph_{12}(h)$$

Tableau 12 – paramètres du variogramme vertical moyen des teneurs en CaO.

| PAS | Couples | Distance (m) | $\gamma(h) (\%)^2$ |
|-----|---------|--------------|--------------------|
| 1 | 258 | 02.62 | 81.36 |
| 2 | 170 | 07.36 | 117.82 |
| 3 | 114 | 12.36 | 126.26 |
| 4 | 87 | 17.15 | 134.98 |
| 5 | 53 | 22.38 | 139.23 |
| 6 | 45 | 27.71 | 160.89 |
| 7 | 56 | 32.31 | 150.58 |

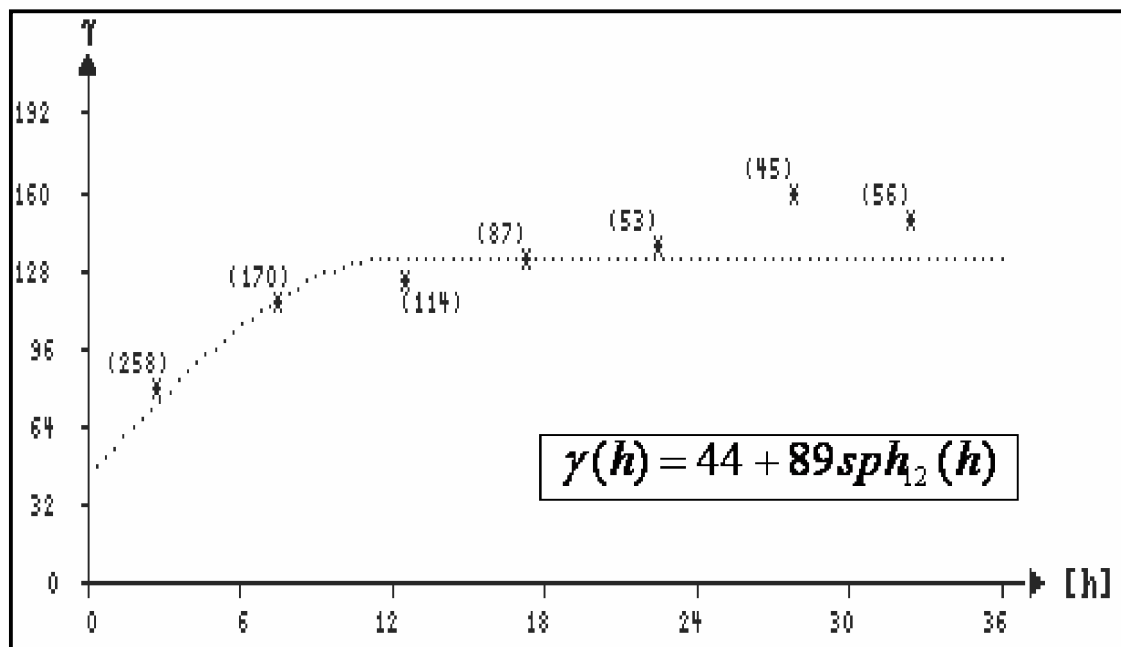


Fig. 26 - Le variogramme vertical moyen des teneurs en CaO Direction : $0^0 \pm 90^0$
Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$.

○ **Variogramme horizontal**

Le variogramme horizontal moyen expérimental des teneurs en CaO (Fig. 27, Tableau 13), a été construit à partir des données de sondages, et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 95(m)$, d'un effet de pépité $C_0 = 42 (\%^2)$, et d'un palier $C = 70(\%^2)$.

$$\gamma(h) = 42 + 70 \exp_{95}(h)$$

Tableau 13 – paramètres du variogramme horizontal moyen des teneurs en CaO.

| PAS | Couples | Distance (m) | $\gamma(h) (\%^2)$ |
|-----|---------|--------------|--------------------|
| 1 | 130 | 25.80 | 83.71 |
| 2 | 549 | 72.21 | 103.65 |
| 3 | 1000 | 107.25 | 127.00 |
| 4 | 1000 | 162.04 | 92.64 |

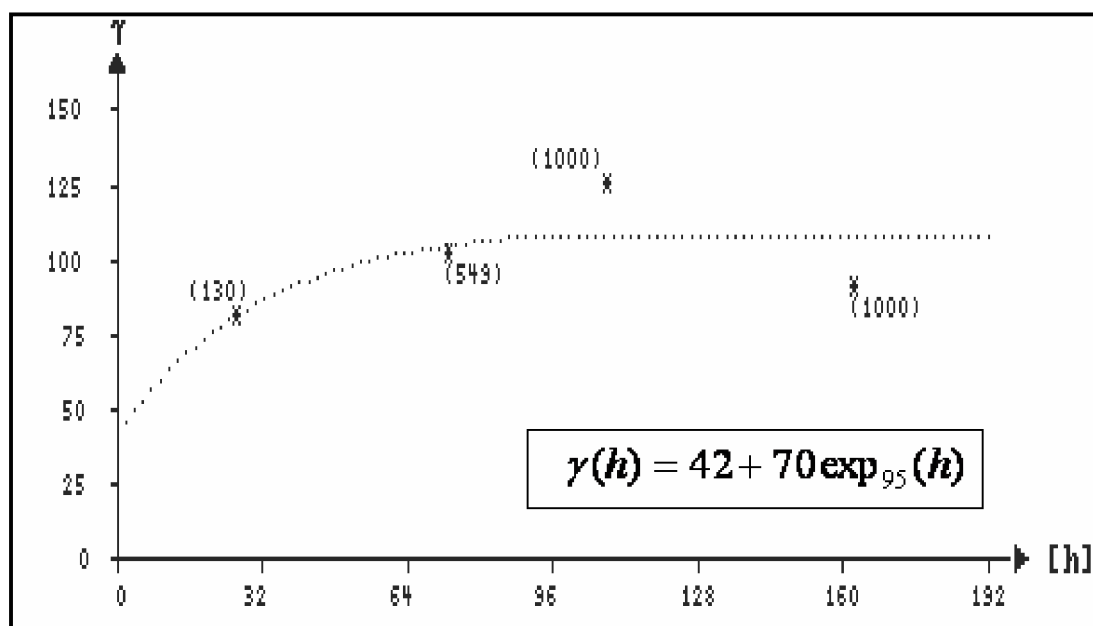


Fig. 27 - Le variogramme horizontal moyen des teneurs en CaO Direction : $0^0 \pm 90^0$
Angle vertical : $0^0 \pm 30^0$.

4. – 2. - Krigeage ordinaire des teneurs en FeO, CaO, SiO₂ et cartographie

4. – 2. – 1. - Krigeage ordinaire des teneurs en FeO, CaO, SiO₂

a) - Paramètre du krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire a été effectué à l'aide de certains paramètres décrits dans le tableau 14. Afin d'estimer les teneurs des blocs d'exploitations en FeO, CaO, SiO₂

Le krigeage ordinaire est effectué en introduisant la configuration du plan de krigeage, et en utilisant les paramètres des variogrammes, pour donner les résultats du tableau. 15

Tableau 14 - Paramètre de krigeage.

| | Axe X (m) | Axe Y (m) | Axe Z (m) |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Var | X | Y | Z |
| Origine | 86270 | 53810 | 860 |
| Taille des blocs | 25 | 10 | 10 |
| Nombre de blocs | 24 | 60 | 20 |
| Rayon de recherche | R ₁ = 70 m | R ₂ = 70 m | R ₃ = 35 m |

Le nombre minimal d'échantillon utilisé pour calculer la valeur estimée du bloc par krigeage est 4.

Le krigeage ordinaire des teneurs en FeO, a été calculé sur l'ensemble des échantillons de carotte de sondages qui ont des teneurs supérieurs à 20 %.

Tableau. 15 - Statistique de krigeage de tous les oxydes.

| | \bar{X} (%) | S^2 (%) ² | σ_k^2 (%) ² | N |
|------------------|---------------|------------------------|-------------------------------|------|
| FeO | 39.331 | 14.343 | 103.179 | 2563 |
| SiO ₂ | 25.831 | 171.07 | 576.995 | 2999 |
| CaO | 10.93 | 28.877 | 121.603 | 3057 |

\bar{X} (%) : la moyenne ; S^2 (%)² : la variance expérimentale ; σ_k^2 (%)² : variance d'estimation

N : nombre de bloc.

b) - Statistique des teneurs de chaque niveau

Une étude statistique a été effectuée pour chaque niveau afin de déterminer les paramètres statistiques (Tableau. 16).

Tableau. 16 : Paramètres statistiques des teneurs en FeO, CaO, SiO₂ des blocs krigés pour chaque oxyde.

| | | FeO | | | | | CaO | | | | | SiO ₂ | | | | |
|-----|------|-------|-------|-----------|-------|-----|------|-------|-----------|-------|-----|------------------|-------|-----------|-------|-----|
| N : | Niv | min | Max | \bar{x} | S (%) | Nb | min | max | \bar{x} | S (%) | Nb | min | max | \bar{x} | S (%) | Nb |
| 10 | 940 | 28.16 | 49.22 | 37.63 | 4.54 | 158 | 2.84 | 20.73 | 8.50 | 3.50 | 239 | 4.43 | 58.45 | 30.04 | 13.40 | 253 |
| 09 | 950 | 28.22 | 49.01 | 38.46 | 4.72 | 220 | 3.12 | 21.40 | 9.00 | 4.33 | 274 | 5.04 | 58.39 | 24.26 | 13.21 | 287 |
| 08 | 960 | 29.43 | 50.24 | 39.82 | 4.37 | 260 | 2.48 | 19.42 | 8.69 | 4.09 | 311 | 2.6 | 61.93 | 22.05 | 11.53 | 314 |
| 07 | 970 | 26.24 | 49.87 | 39.87 | 4.19 | 304 | 2.58 | 21.27 | 9.37 | 3.78 | 368 | 4.43 | 69.78 | 25.29 | 13.69 | 268 |
| 06 | 980 | 34.06 | 51.06 | 40.06 | 3.25 | 302 | 2.08 | 20.90 | 10.04 | 3.33 | 352 | 4.32 | 69.19 | 26.17 | 13.29 | 353 |
| 05 | 990 | 33.62 | 47.71 | 39.60 | 3.06 | 315 | 3.18 | 22.76 | 11.18 | 3.47 | 348 | 4.32 | 66.37 | 25.47 | 12.82 | 350 |
| 04 | 1000 | 32.46 | 46.83 | 39.55 | 2.80 | 308 | 4.41 | 21.93 | 11.80 | 2.93 | 342 | 5.46 | 62.57 | 24.98 | 12.80 | 344 |
| 03 | 1010 | 32.24 | 51.98 | 39.81 | 2.67 | 263 | 3.92 | 37.96 | 14.10 | 5.00 | 330 | 5.75 | 55.23 | 23.31 | 13.40 | 333 |
| 02 | 1020 | 32.03 | 47.28 | 39.67 | 3.17 | 207 | 3.48 | 35.22 | 14.71 | 6.16 | 290 | 7.10 | 51.64 | 23.11 | 11.78 | 293 |
| 01 | 1030 | 31.41 | 47.84 | 39.37 | 3.56 | 133 | 3.45 | 35.74 | 14.93 | 7.56 | 203 | 6.40 | 50.96 | 24.49 | 10.63 | 204 |

N : nombre de niveau; **Niv** : altitude du niveau ; **min** : teneur minimale, **max** : teneur maximale ; \bar{x} : moyenne, **S (%)** : écart type ; **Nb** : nombre de blocs.

c) - Estimation des réserves

Dans un premier temps ; les résultats de krigeage ordinaire ont été utilisés pour le calcul des réserves en minerais de fer du gisement de châabet El Ballout, avec une teneur de coupure en fer égale à 25% (Tableau. 17), puis un classement selon l'ordre croissant d'erreur a été effectué (Tableau. 18). La marge d'erreur sur l'évaluation des réserves est variable, pour les gisements métallifères elle est approximativement égale à : la catégorie A : +/-20%, la catégorie B : +/-20 - 30%, la catégorie C₁ : +/- 30% - 60%, la catégorie C₂ : >60%.

Et dans un deuxième temps le calcul a été fait en tenant compte de la teneur en silice par élimination de tous les blocs qui ont une teneur en silice supérieure à 15% (Tableau. 19).

Les blocs d'exploitation ont une dimension de 25 m de longueur, 10 m de largeur et 10 m de hauteur pour chaque niveau.

La quantité en métal est calculée par la formule suivante :

$$Q_{\text{métal}} = v * d * T_{\text{moy}} / 100$$

D'où : -V : est le volume du bloc (25mx10mx10m) en m³.

-d : poids volumique du minerai de fer = 2.8 T/m³.

-T_{moy} : la teneur moyenne de fer en %.

Tableau.17 - tonnage des réserves en fer du gisement de Châabet El Ballout avec Tc=25%.

| Niv | Z(m) | NB | \bar{x} (%) | Q(T) | Q métal (T) |
|--------------|------|-------------|---------------|-----------------|------------------|
| 10 | 940 | 158 | 37,63 | 1106000 | 416187,8 |
| 9 | 950 | 220 | 38,46 | 1540000 | 592284 |
| 8 | 960 | 260 | 39,82 | 1820000 | 724724 |
| 7 | 970 | 304 | 39,87 | 2128000 | 848433,6 |
| 6 | 980 | 302 | 40,06 | 2114000 | 846868,4 |
| 5 | 990 | 315 | 39,6 | 2205000 | 873180 |
| 4 | 1000 | 308 | 39,55 | 2156000 | 852698 |
| 3 | 1010 | 263 | 39,81 | 1841000 | 732902,1 |
| 2 | 1020 | 207 | 39,67 | 1449000 | 574818,3 |
| 1 | 1030 | 133 | 39,37 | 931000 | 366534,7 |
| Total | | 2470 | | 17290000 | 6828630,9 |

Niv : niveau ; NB : nombre de bloc ; \bar{x} (%) : moyenne en fer; Q : Quantité en minerai de Fe

L'estimation des quantités en métal du gisement de Châabet El Ballout par méthodes géostatistiques à donnée **6.82** Millions de tonnes.

Tableau-18- catégorisation des réserves du gisement de Châabet El Ballout.

| Catégorie des | Erreur relative | NB | Réserves | \bar{x} (%) | Q (métal)T |
|--------------------------|-----------------|------|----------|---------------|------------|
| Catégorie A | 0 - 20% | 282 | 1974000 | 41.75 | 824145 |
| Catégorie B | 20 - 30% | 1805 | 12635000 | 39.55 | 4997142,5 |
| Catégorie C ₁ | 30% - 60% | 383 | 2681000 | 37.80 | 1013418 |
| Catégorie C ₂ | >60% | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tableau.19 - calcul des réserves du gisement de Châabet El Ballout avec SiO₂ <15%

| Niv | Z(m) | NB | Q(minerais)T | \bar{x} (%) | Q(métal)T |
|--------------|------|------------|----------------|---------------|-------------------|
| 10 | 940 | 11 | 77000 | 37,4 | 28798 |
| 9 | 950 | 65 | 455000 | 39,98 | 181909 |
| 8 | 960 | 76 | 532000 | 38,85 | 206682 |
| 7 | 970 | 73 | 511000 | 41,65 | 212831,5 |
| 6 | 980 | 77 | 539000 | 42,42 | 228643,8 |
| 5 | 990 | 83 | 581000 | 40,63 | 236060,3 |
| 4 | 1000 | 85 | 595000 | 39,81 | 236869,5 |
| 3 | 1010 | 112 | 784000 | 40,08 | 314227,2 |
| 2 | 1020 | 71 | 497000 | 39,3 | 195321 |
| 1 | 1030 | 40 | 280000 | 37,90 | 106116,22 |
| Total | | 693 | 4851000 | 39.80 | 1947458,52 |

Niv : niveau ; **NB** : nombre de bloc ; σ_k^2 (%)² : variance d'estimation ; R (T)

Au total 693 blocs ont une teneur en silice inférieure à 15%. Ces blocs représentent 1.94 Millions de tonnes, avec une teneur moyenne en FeO de 39.80%.

4. - 2. - 2. - Cartographie des teneurs des blocs krigés

Les cartes des isoteneurs des blocs ou plans d'exploitation des dix niveaux du gisement pour la teneur de FeO, CaO, SiO₂, et de l'indice de basicité (I_B) ont été établies. Ces cartes ont été disposées de telles sortes qu'elles forment un bloc diagramme (Figs. 28, 29, 30, 31).

La cartographie des dix niveaux d'exploitation des teneurs en FeO, à permis de montrer que la répartition des teneurs des blocs krigés dans le plan horizontal montre une

certaine zonalité : Au niveau du toit du corps principal qui est représenté par les carbonates, le minerai est plus riche.

Les teneurs en SiO₂ dans les blocs krigés varient de 2.6% à 70%, avec une moyenne de 25.83% ; d'où la nécessité de cartographier l'indice de basicité (Fig. 32).

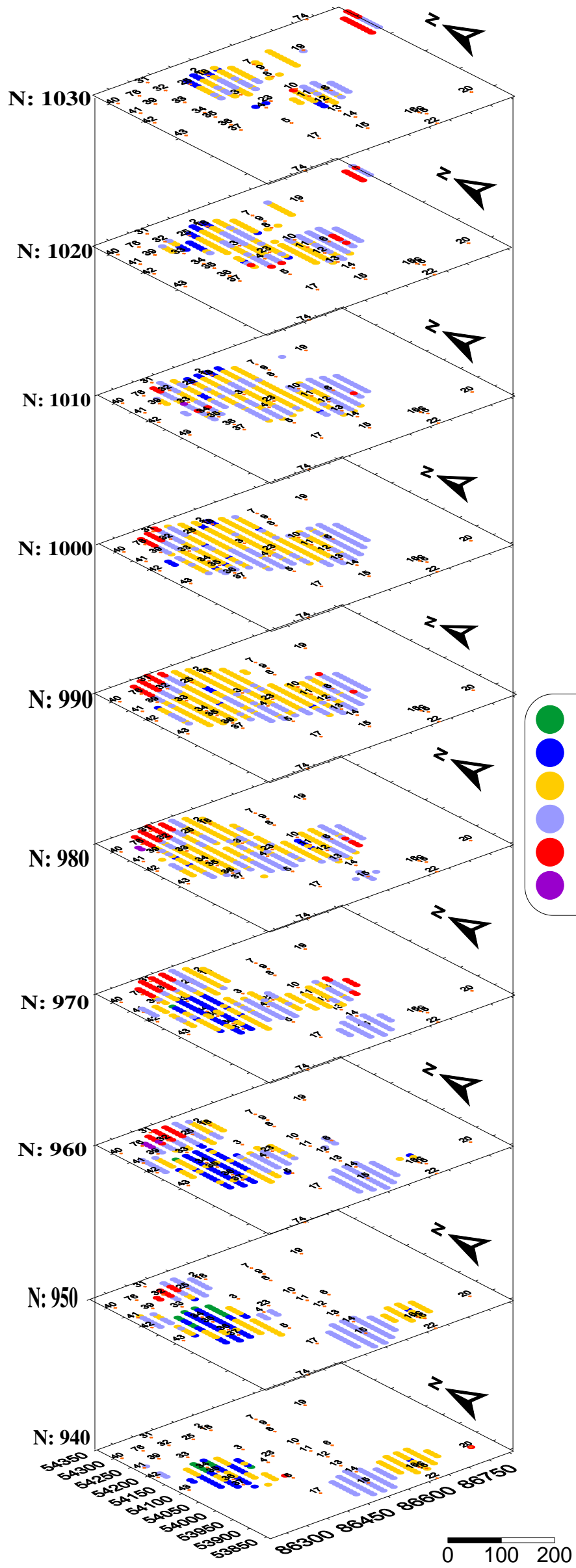


Fig. 28 – cartes des teneurs krigeé en FeO dans les blocs d'exploitation des 10 niveaux du gisement.

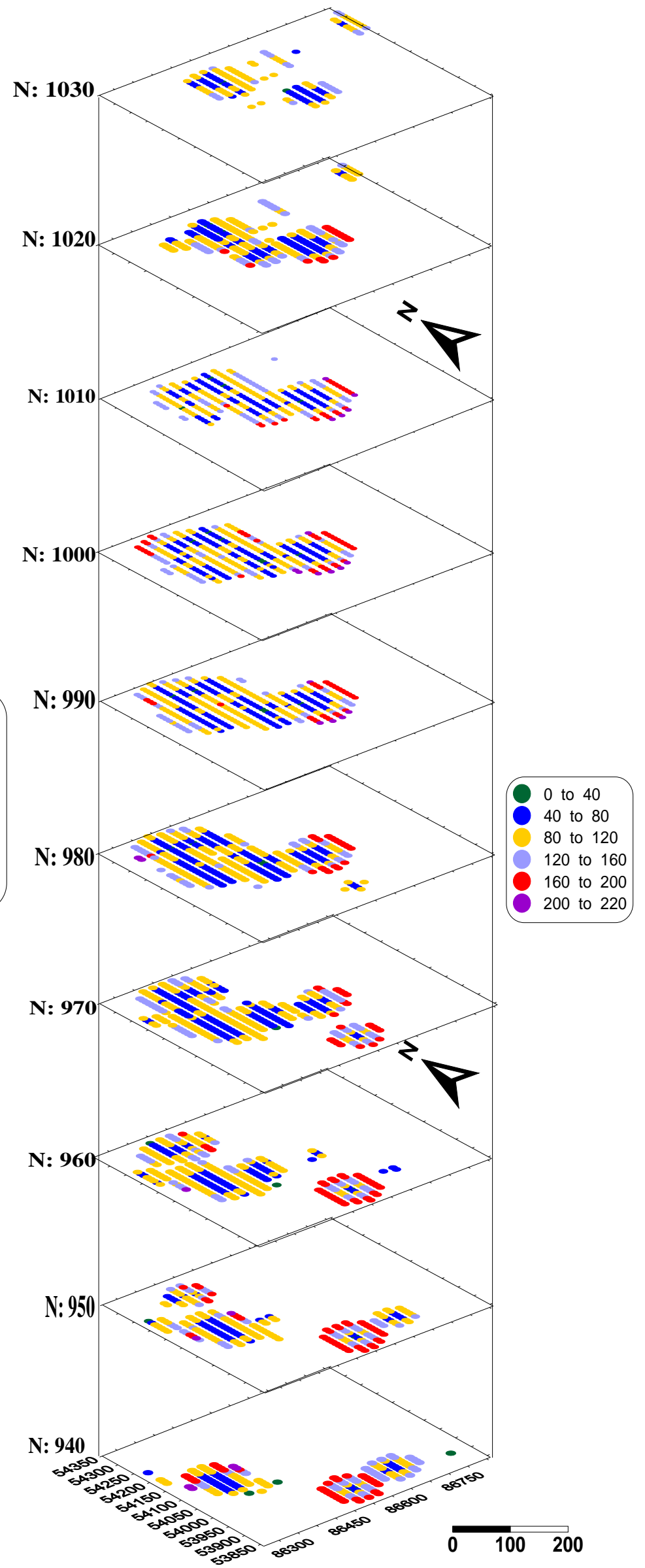


Fig. 29 – Carte des variances de krigeage des teneurs en FeO dans les blocs d'exploitation des 10 niveaux du gisement.

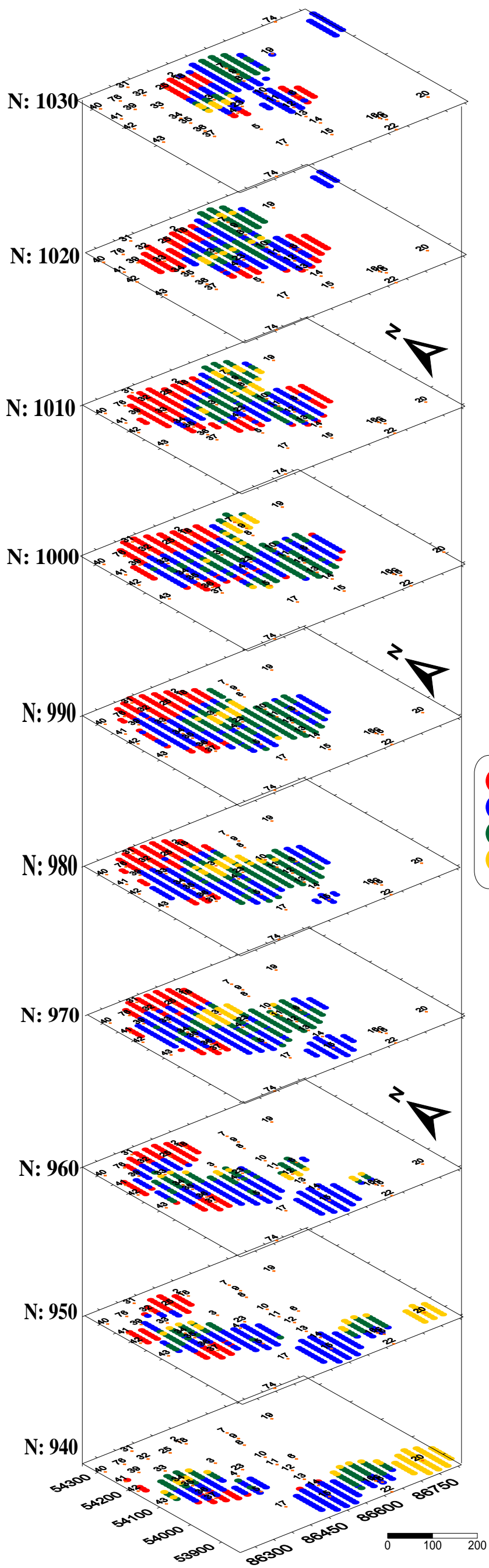


Fig. 30 – cartes des teneurs en SiO_2 dans les blocs d'exploitation des 10 niveaux du gisement

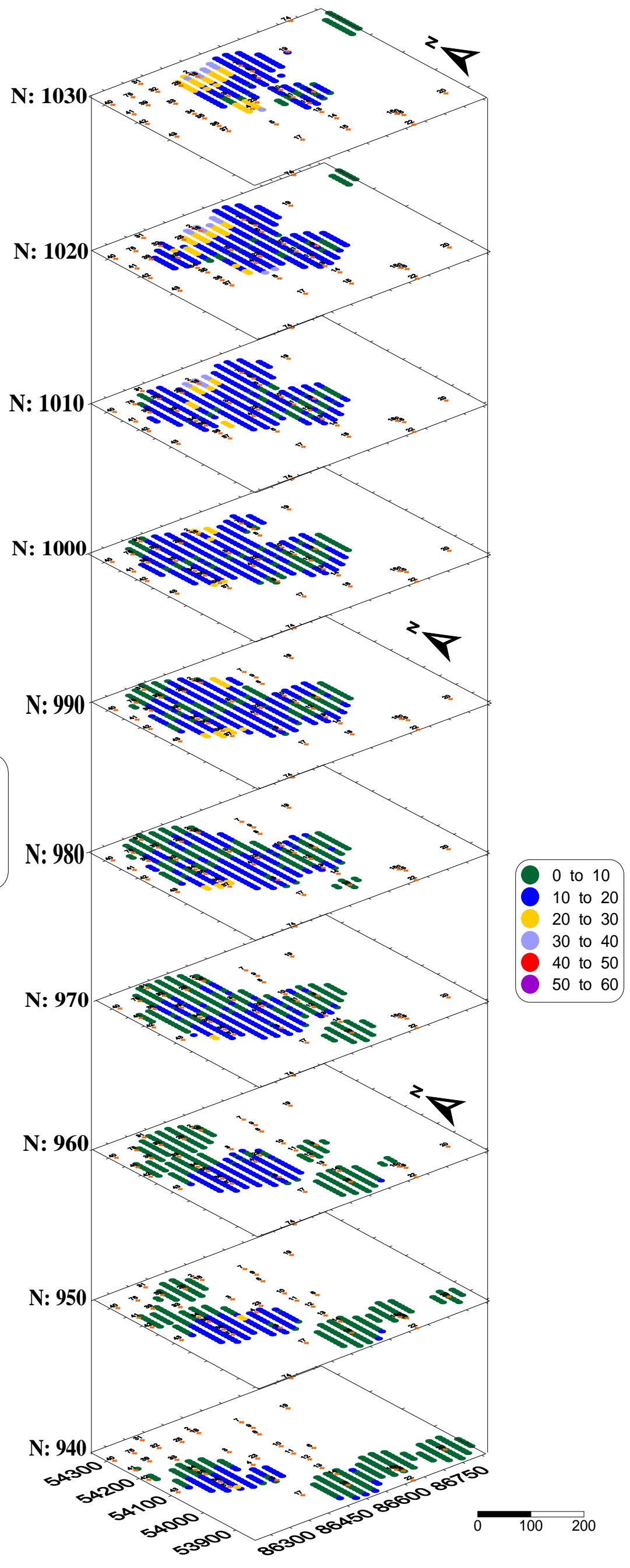


Fig. 31 – cartes des teneurs en CaO dans les blocs d'exploitation des 10 niveaux du gisement

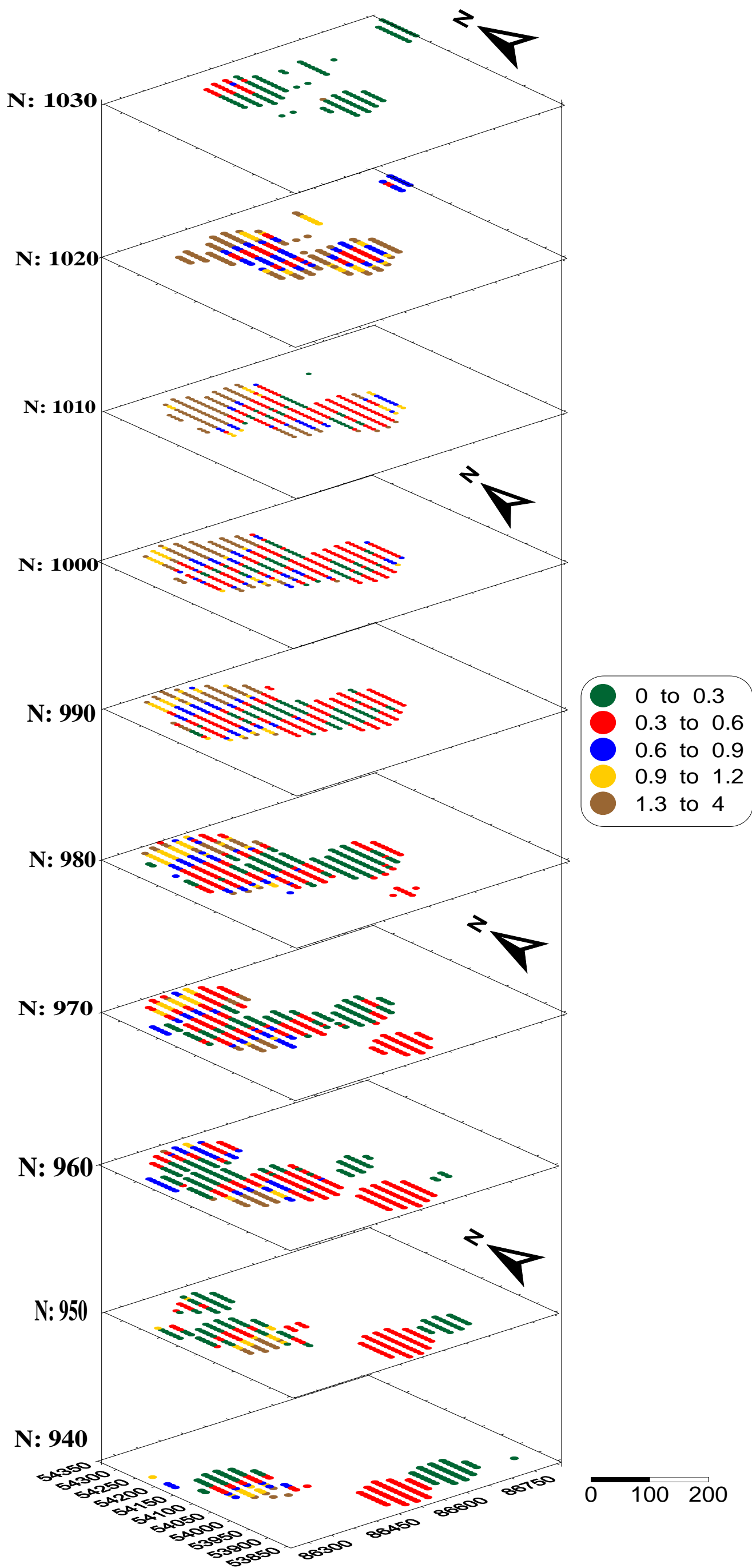


Fig. 32. – Carte de l'indice de basicité

5.- ESTIMATION DES RESERVES RECUPERABLES A L'AIDE DU KRIGEAGE NON PARAMETRIQUE – INDICATRICES RELATIVES

Ø Krigeage des indicatrices - réserves récupérables

- **Krigeage disjonctif** : est le cokrigeage des indicatrice $I(Y(x)=i)$ ou $I(Y(x) \geq i)$.

Il s'obtient par résolution de simples systèmes de krigeage qui sont le krigeage absolue et relative (voir annexe).

Vu l'inconvénient du krigeage d'indicatrice absolue qui donne des probabilités est supérieur à 1 due à la présence d'un effet de bord, d'où la nécessiter d'utiliser le krigeage d'indicatrice relative.

Pour estimer $I(35)$, $I(40)$, $I(45)$ en se servant de l'information disponible il suffit de coder les teneurs; calculer et modéliser le variogramme des indicatrices $I(35)$, $I(40)$, $I(45)$; en fin effectuer le krigeage

5. - 1. - Codage des indicatrices relatives

Avant de procéder au calcul des variogrammes pour la variable régionalisée fer ; un codage de cette dernière a été fait, (Tableau 19) suivant les teneurs de coupures choisis selon des exigences sidérurgique (45%) et cimentrique (35%), ensuite la variographie a été faite sur les teneurs codées.

Tableau 19. - exemple de codage des teneurs en fer

| Fe | I(35) | I(40) | I(45) |
|-------|-------|-------|-------|
| 49,58 | 1 | 1 | 1 |
| -1,00 | -1 | -1 | -1 |
| 49,22 | 1 | 1 | 1 |
| 47,38 | 1 | 1 | 1 |
| 35,38 | 1 | 0 | -1 |
| 20,70 | -1 | -1 | -1 |
| 35,42 | 1 | 0 | -1 |
| -1,00 | -1 | -1 | -1 |
| 46,46 | 1 | 1 | 1 |
| 46,16 | 1 | 1 | 1 |
| 35,88 | 1 | 0 | -1 |

5. - 2. - Variographie

Une fois le codage est fait, les variogrammes d'indicatrices de fer peuvent être calculés, avec la même procédure précédente.

- Les variogrammes d'indicateur relative I(35)

o Variogramme vertical

Le variogramme horizontal moyen des valeurs de la teneur de coupure 35% en FeO (Fig. 33), a été construit et ajusté par un modèle exponentiel de portée $a = 15$ (m), d'un effet de pépite $C_0 = 0.11$ ($\%^2$), et d'un palier $C = 0.14$ ($\%^2$).

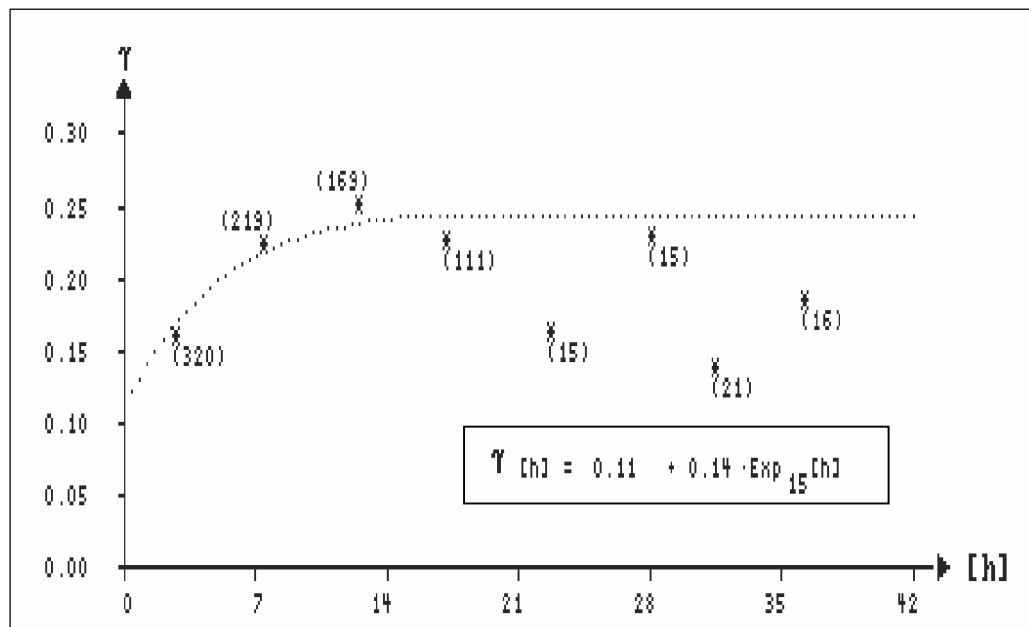


Fig. 33- Le variogramme vertical moyen d'indicateur I(35%) en FeO Direction : $0^{\circ} \pm 90^{\circ}$, Angle vertical : $90^{\circ} \pm 30^{\circ}$.

o Variogramme horizontal

Le variogramme horizontal moyen des valeurs de la teneur de coupure 35% en FeO (Fig. 34), a été construit et ajusté par un modèle exponentiel de portée $a = 70$ (m), d'un effet de pépite $C_0 = 0.11$ ($\%^2$), et d'un palier $C = 0.14$ ($\%^2$).

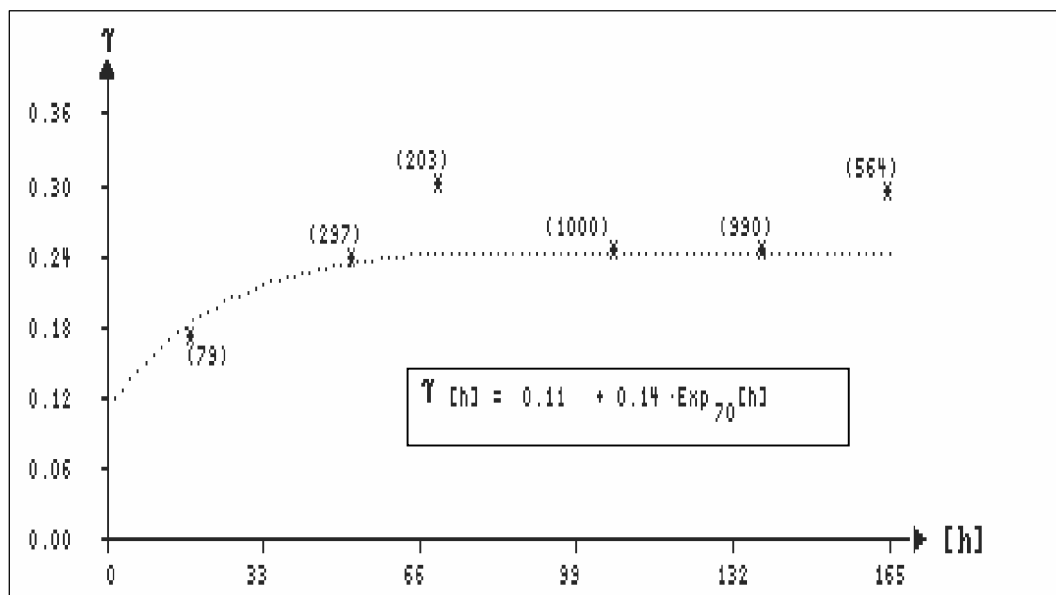


Fig. 34- Le variogramme horizontal moyen d'indicateur I(35%) en FeO Direction : $0^{\circ} \pm 90^{\circ}$, Angle vertical : $0^{\circ} \pm 30^{\circ}$.

- Les variogrammes d'indicateur relative I(40)

o Variogramme vertical

Le variogramme horizontal moyen des valeurs de la teneur de coupure 40% en FeO (Fig. 35), a été construit et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 15$ (m), d'un effet de pépité $C_0 = 0.12$ ($\%^2$), et d'un palier 0.11 ($\%^2$).

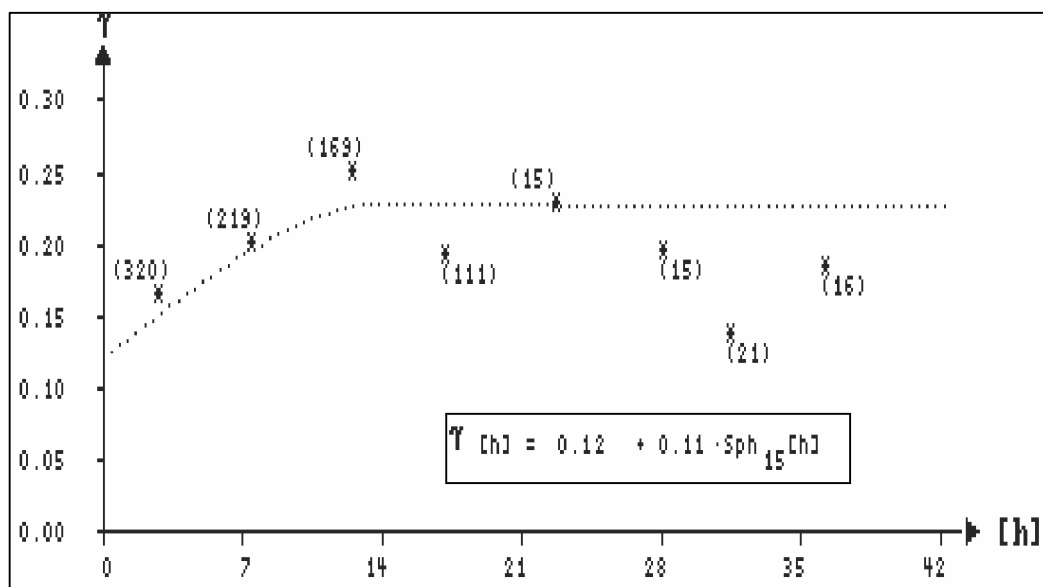


Fig. 35- Le variogramme vertical moyen d'indicateur I(40%) en FeO Direction : $0^{\circ} \pm 90^{\circ}$, Angle vertical : $90^{\circ} \pm 30^{\circ}$.

○ **Variogramme horizontal I(40)**

Le variogramme horizontal moyen des valeurs de la tenue de coupure 40% en FeO (Fig. 36), a été construit et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 70$ (m), d'un effet de pépité $C_0 = 0.06$ ($\%^2$), et d'un palier 0.17 ($\%^2$).

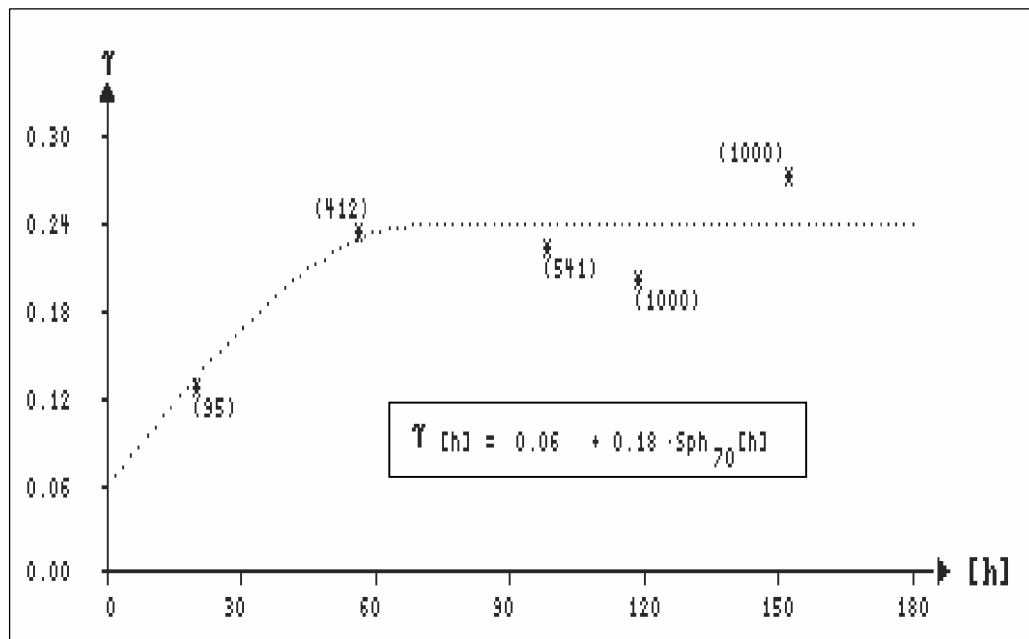


Fig. 36- Le variogramme horizontal moyen d'indicateur I(40%) en FeO Direction : $0^\circ \pm 90^\circ$, Angle vertical : $0^\circ \pm 30^\circ$.

- Les variogrammes d'indicateur relative I(45)

○ **Variogramme vertical I(45)**

Le variogramme horizontal moyen des valeurs de la tenue de coupure 45% en FeO (Fig. 37), a été construit et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 12$ (m), d'un effet de pépité $C_0 = 0.09$ ($\%^2$), et d'un palier $C = 0.145$ ($\%^2$).

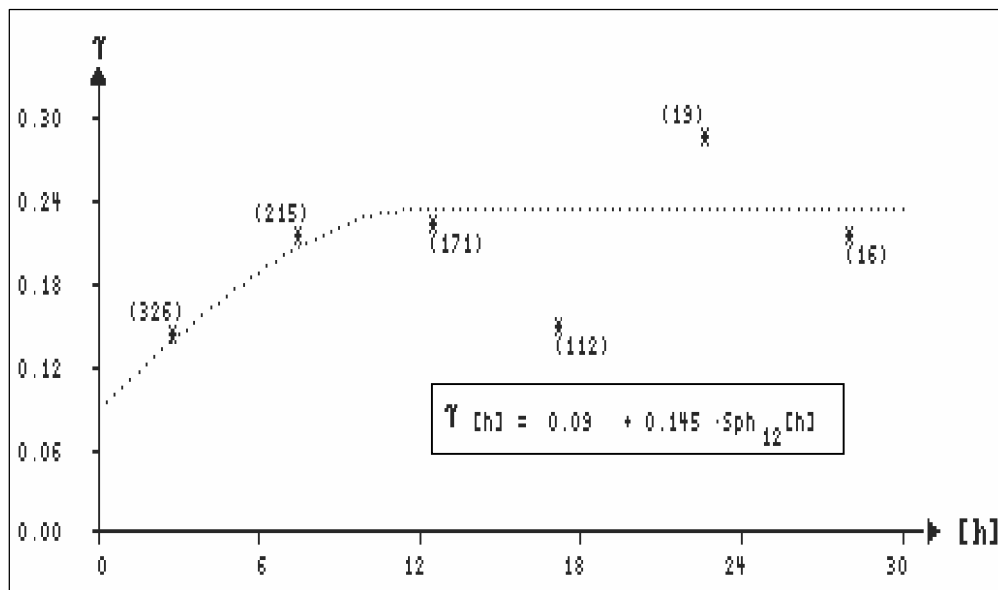


Fig. 37 - Le variogramme vertical moyen d'indicateur I(45%) en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$.

○ **Variogramme horizontal I(45)**

Le variogramme horizontal moyen des valeurs de la teneur de coupure 45% en FeO (Fig. 38), a été construit et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 70$ (m), d'un effet de pépité $C_0 = 0.09$ ($\%^2$), et d'un palier $C = 0.11$ ($\%^2$).

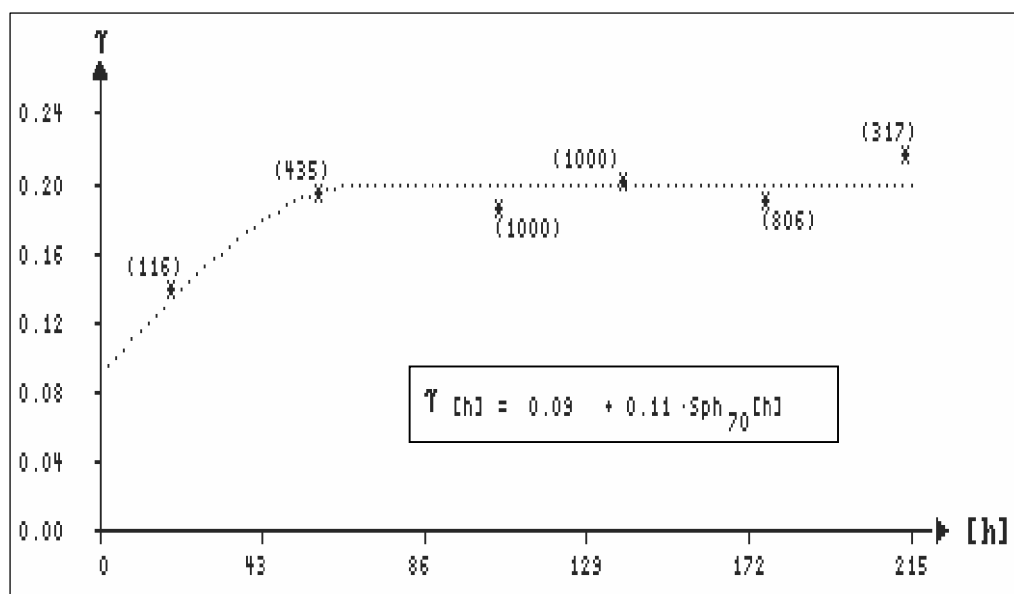


Fig. 38 - Le variogramme horizontal moyen d'indicateur I(45%) en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $0^0 \pm 30^0$.

5. - 3. - Krigeage des indicatrices relative pour de I(35), I(40), I(45) et cartographie

5. - 3. – 1. - Krigeage de I(35), I(40), I(45)

a) Paramètre du krigeage des indicatrices

Le krigeage relative a été effectué à l'aide de certains paramètres décrits dans le tableau 21.

Tableau. 21. - Paramètre de krigeage.

| | Axe X | Axe Y | Axe Z |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Var | X | Y | Z |
| Origine | 86270 | 53810 | 860 |
| Taille des blocs | 25 | 10 | 10 |
| Nombre de blocs | 24 | 60 | 20 |
| Rayon de recherche | R ₁ = 70 m | R ₂ = 70 m | R ₃ = 45 m |

Tableau. 22. – statistiques du krigeage d'indicatrice.

| Valeur d'indicatrice | \bar{X} (%) | $S^2(\%)^2$ | $\sigma_k^2 (\%)^2$ | N de blocs |
|----------------------|---------------|-------------|---------------------|------------|
| I(35) | 0.779 | 0.023 | 0.192 | 2393 |
| I(40) | 0.763 | 0.039 | 0.220 | 1583 |
| I(45) | 0.758 | 0.046 | 0.185 | 1324 |

b) Statistique des indicatrices relatives I(35), I(40), I(45)

D'après les résultats de krigeage d'indicatrice relative un traitement statistique a été effectué sur tableaux 23, 24.

Tableau. 23. – statistique des blocs des niveaux 10, 9, 8, 7, 6, pour les teneurs de coupures 35%, 40%, 45%.

| Niveaux | 10 | | | 09 | | | 08 | | | 07 | | | 06 | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Indicatrices | I(35) | I(40) | I(45) | I(35) | I(40) | I(45) | I(35) | I(40) | I(45) | I(35) | I(40) | I(45) | I(35) | I(40) | I(45) |
| % volume | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB |
| 75% | 118 | 99 | 59 | 164 | 145 | 100 | 241 | 190 | 136 | 268 | 206 | 165 | 279 | 209 | 193 |
| 50% | 107 | 87 | 45 | 158 | 120 | 93 | 240 | 160 | 132 | 265 | 172 | 147 | 279 | 178 | 172 |
| 25% | 79 | 31 | 8 | 134 | 34 | 34 | 164 | 58 | 51 | 160 | 82 | 65 | 158 | 94 | 78 |
| Nb totale | 176 | 171 | 170 | 222 | 216 | 215 | 277 | 278 | 268 | 295 | 281 | 281 | 309 | 302 | 302 |

Tableau. 24. – statistique des blocs des niveaux 5, 4, 3, 2, 1, pour les teneurs de coupures 35%, 40%, 45%.

| Niveaux | 05 | | | 04 | | | 03 | | | 02 | | | 01 | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Indicatrices | I(35) | I(40) | I(45) | I(35) | I(40) | I(45) | I(35) | I(40) | I(45) | I(35) | I(40) | I(45) | I(35) | I(40) | I(45) |
| % volume | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB |
| 75% | 314 | 197 | 190 | 312 | 161 | 173 | 260 | 127 | 121 | 205 | 72 | 52 | 144 | 27 | 8 |
| 50% | 311 | 175 | 171 | 305 | 148 | 158 | 247 | 111 | 121 | 197 | 56 | 49 | 137 | 20 | 8 |
| 25% | 145 | 90 | 63 | 135 | 74 | 49 | 94 | 47 | 39 | 70 | 15 | 17 | 43 | 3 | 2 |
| Nb totale | 342 | 327 | 325 | 337 | 328 | 325 | 291 | 272 | 267 | 224 | 204 | 198 | 149 | 51 | 22 |

Les résultats obtenus dans les tableaux précédents peuvent être interprétés comme suite :

Dans le niveau 8, pour la teneur de coupure 40% fer [I(40)], chacun des 190 blocs est constitué d'un minerai dont 75% du volume a une teneur supérieure à 40%.

5. - 3. – 2. - Cartographie des indicatrices relatives des blocs krigés

Les résultats de krigeage des indicatrices peuvent être représentés soit sous forme de fichiers, ou visualisées sous forme de cartes (Fig. 39).

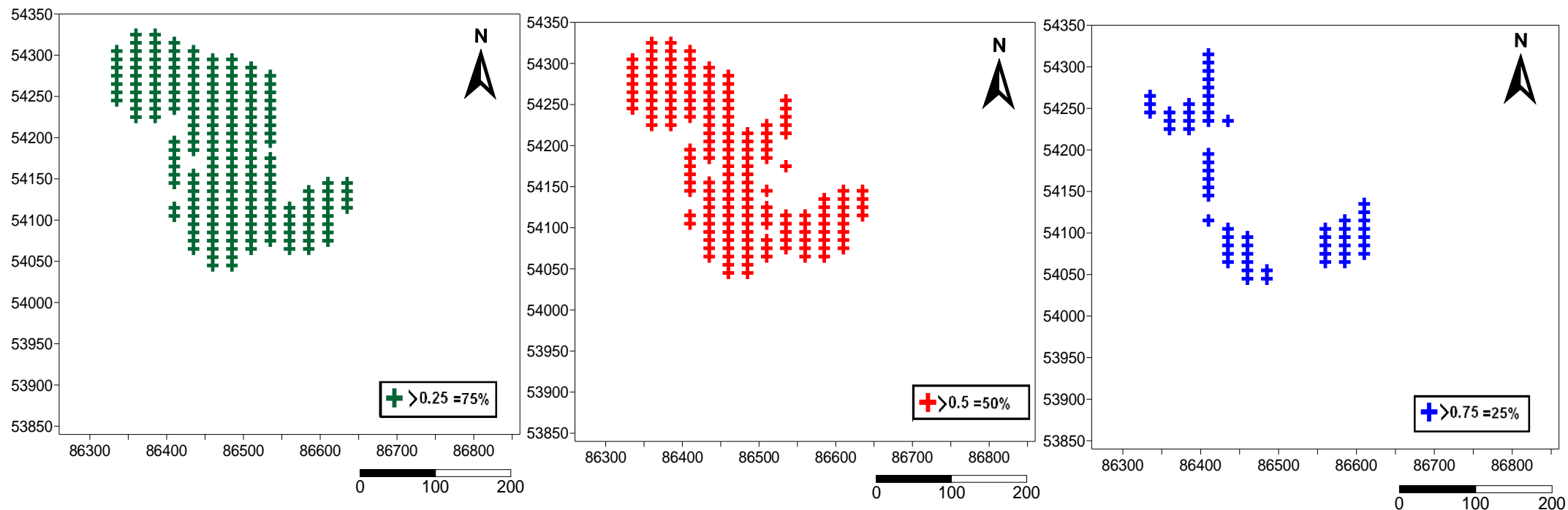


Fig. 39 -Répartition des blocs du niveau 1010 en fonction du pourcentage de volume pour une teneur de coupure donnée a), b), c).

a) - carte des blocs qui ont 75% du volume dont la teneur est $>40\%$

d) - carte des blocs qui ont 50% du volume dont la teneur est $>40\%$

c) - carte des blocs qui ont 25% du volume dont la teneur est $>40\%$

CONCLUSIONS GENERALES

Le gisement de Châabet El Ballout est situé dans la partie Nord-Est de l'Algérie, à 20 km au nord est de la ville de Souk Ahras, plus précisément dans la localité d'Ouled Driss.

Les travaux de recherches effectués sur ce gisement, dans le cadre de la préparation de ce mémoire, ont permis les conclusions suivantes :

1 – La géologie

- Le gisement comporte trois nappes de charriages – nappe numidienne, tellienne et triasique - et quatre systèmes de failles de directions N180°, N30°, N90° et N300°.
- Le principal corps de minerai de fer est formé par une zone de broyage de 45m d'épaisseur, de direction N300° et un angle de pendage de 30°. A l'échelle locale décimétrique, cette zone peut être confondue avec une couche stratiforme. Dans la partie gréseuse située à la base, le minerai de fer joue le rôle de ciment. Le toit est constitué de calcaires du Crétacé supérieur alors que le mur lui, est constitué par les grés et les marnes du Miocène. Dans l'encaissant, les fissures et différents vides sont remplis par du minerai hématitique.
- Ce gisement aurait dû être exploré à l'aide de profils de direction N30° qui est la direction perpendiculaire à celle du corps principal au lieu de profils orientés N180°.

2 – La minéralisation

- Le minerai de fer est constitué de différents oxydes et hydroxyde de Fe – Hématite, limonite et goethite, et accompagné de rares imprégnations de cuivre gris de malachite, d'azurite, et de pyrite.
- Deux types de minéralisations sont distingués : l'une carbonatée formée par la sidérite rencontrée en profondeur et la deuxième oxydée rencontrées en subsurface. La présence de reliques de sidérite dans cette dernière prouve l'oxydation de la sidérite. La minéralisation ferrifère du gisement de Châabet El Ballout est donc d'origine hydrothermale métasomatique, d'âge post Miocène.
- La composition chimique du minerai montre que, d'une façon générale, le taux de silice dépasse les normes exigées par l'industrie sidérurgique qui sont inférieures à 15%SiO₂.

3 – Analyse de données et Géostatistique

- L'analyse statistique monovariante faite sur les teneurs de FeO, SiO₂, CaO des échantillons de carottes montre que pour une teneur de coupure de 20%. Le minerai présente une teneur moyenne de 30.50% en FeO, 25.30% en SiO₂, et 11.17% en CaO.
- L'étude des logs a permis de définir la répartition des teneurs et des types de minerais dans les carottes de sondages.
- Le traitement multivariante (ACP) montre une corrélation négative entre FeO, SiO₂, CaO, ainsi qu'une association chimique entre SiO₂, CaO qui représente le ciment carbonaté des grès du Miocène.
- Les variogrammes expérimentaux à 3D sur FeO, SiO₂ et CaO ont été calculés et ajustés. Les variations sont anisotropes. Pour FeO, une anisotropie zonale apparaît entre le plan vertical et le plan horizontal: Dans le plan horizontal, le variogramme est isotrope. Il a été ajusté à l'aide d'un modèle sphérique de portée $a = 70$ m ; $C = 70(\%)^2$, et $C_0 = 30(\%)^2$.
- Dans le plan vertical, le variogramme est isotrope. Il a été ajusté à l'aide d'un modèle sphérique de portée $a = 12$ m ; $C = 64 (\%)^2$, et $C_0 = 49(\%)^2$.
- Le krigeage ordinaire des teneurs des blocs de (25x10x10m³) des dix niveaux-gradins a permis d'estimer les teneurs et les variances de krigeage en FeO, SiO₂, CaO, dans chacun des blocs.
- L'estimation des quantités du minerai de fer du gisement de Châabet El Ballout par méthodes géostatistiques avec une teneur de coupure en fer égale à 25%, a donné des réserves de 17.29 Millions de tonnes de minerai. En fonction de l'erreur relative sur la teneur du bloc. Ces réserves sont réparties en trois grandes catégories, qui sont respectivement de 1.97 Millions de tonnes de minerai avec une teneur moyenne en FeO de 41.75% pour les réserves prouvées (catégorie A), 12.63 Millions de tonnes de minerai avec une teneur moyenne en FeO de 39.55% pour les réserves probables (catégorie B) et 2.68 Millions de tonnes de minerais avec une teneur moyenne en FeO de 37.80% pour les réserves possibles (catégorie C1). Cependant il faut noter qu'au total 693 blocs ont une teneur en silice inférieure à 15%. Ces blocs représentent 4.85 Millions de tonnes de minerai, avec une teneur moyenne en FeO de 39.80%.

- La répartition des teneurs des blocs krigés dans le plan horizontal montre une certaine zonalité : Au niveau du toit du corps principal qui est représenté par les carbonates, le minerai est plus riche.
- Les variogrammes expérimentaux des indicatrices à trois dimensions des différentes teneurs de coupures (35%, 40%, 45%) ont été ajustés à l'aide des schémas exponentiels. Ces variogrammes ont été utilisés pour le krigeage relative de ces mêmes indicatrices, ce qui a permis l'estimation des réserves récupérables, et la cartographie des blocs en fonction du pourcentage des volumes des blocs ($25 \times 10 \times 10 \text{m}^3$) qui ont des teneurs supérieures à 35%, 40% et 45 % de FeO. Ces résultats faciliteraient une exploitation sélective en vue d'un éventuel enrichissement.

Annexe I

RAPPEL SUR LA METHODE D'ANALYSE CHIMIQUE

EFFECTUEE

1. - Dosage du fer par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)

C'est en 1859 que la loi établie par Kirchoff stipulant que tout corps chimique peut absorber les radiations qu'il émet lui-même dans des conditions déterminées. L'absorption de lumière par les atomes fournit un puissant instrument analytique à la fois pour l'analyse quantitative et qualitative. La spectrométrie par absorption permet de doser une soixantaine d'éléments chimiques à l'état de traces (quelque mg/litre).

Ø Principe

La spectroscopie d'absorption atomique (SAA) est basée sur le principe que les atomes libres peuvent absorber la lumière d'une certaine longueur d'ondes. Dans un état excité, la molécule possède un niveau d'énergie supérieur à celui de l'état fondamental, le passage entre ces deux niveaux se traduit par une absorption.

L'absorption de chaque élément est spécifique, aucun autre élément n'absorbe sa longueur d'ondes. C'est une méthode qui utilise les propriétés des atomes à être excité par rapport à une énergie extérieure sous forme de photons de fréquence bien définie. Si on envoie un faisceau de lumière monochromatique qui traverse une flamme dans laquelle on introduit l'élément à analyser sous forme de fines gouttelettes pulvérisées, une partie du flux lumineux énergétique incident est alors absorbé par la vapeur atomique produite par la flamme. Cette absorption est proportionnelle à la concentration selon la loi établie par Lambert- Beer

$$D.O = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon LC$$

Avec :

D.O : Densité optique

I_0 : intensité du flux incident

I : intensité du flux émergent

ϵ : coefficient d'extinction molaire

L : épaisseur de la source d'atomisation

C : concentration des atomes dans la flamme à l'état fondamental.

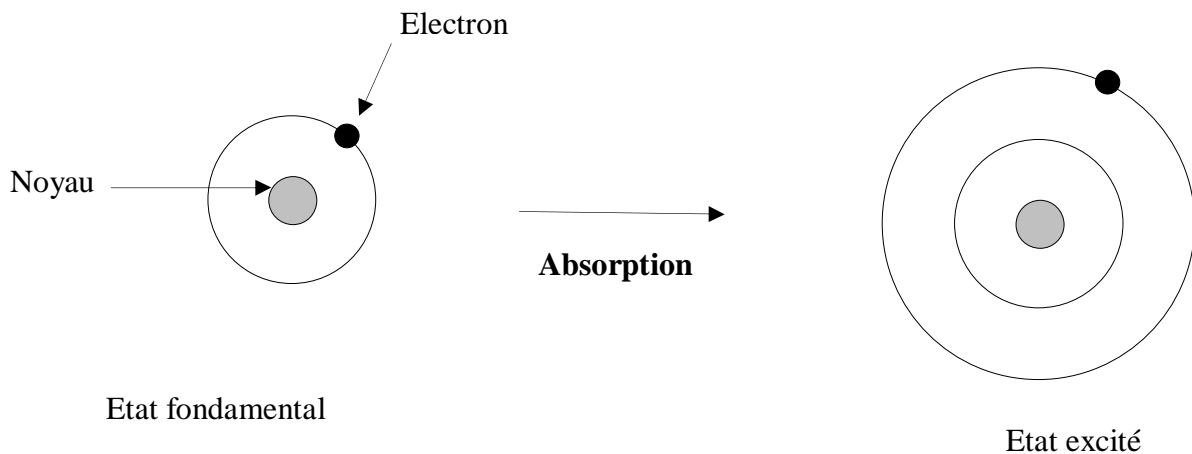


Fig.63 - Schéma montrant le principe de l'absorption atomique

Ø Appareillage

Le dispositif expérimental utilisé en absorption atomique se compose d'une source, la lampe à cathode creuse, d'un brûleur et un nébuliseur, d'un monochromateur et d'un détecteur relié à un amplificateur et un dispositif d'acquisition. (Fig. 64)

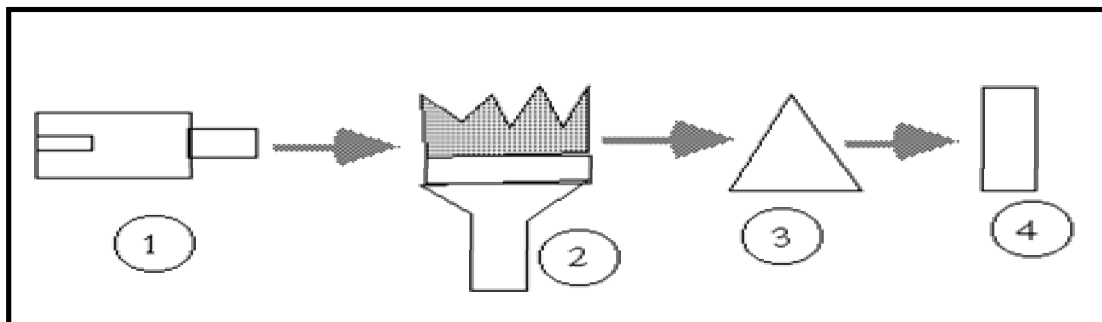


Fig.64 – dispositif de l'absorption atomique

- **La lampe à cathode creuse**

La lampe à cathode creuse est constituée par une enveloppe de verre scellée et pourvue d'une fenêtre en verre ou en quartz contenant une cathode creuse cylindrique et une anode. La cathode est constituée de l'élément que l'on veut doser. Un vide poussé est réalisé à l'intérieur de l'ampoule qui est ensuite remplie d'un gaz rare (argon ou néon). Lorsqu'on applique une différence de potentiel de quelques centaines de volts entre les deux électrodes, une décharge s'établit. Le gaz rare est alors ionisé et ces ions bombardent alors la cathode, arrachant des atomes à celle-ci. Ces atomes sont donc libres et sont excités par chocs : il y a émission atomique de l'élément constituant la cathode creuse. La particularité du rayonnement ainsi émis est qu'il est constitué de raies très intenses et très fines.

- **Le nébuliseur**

L'échantillon à analyser est en solution. Celle-ci est aspirée au moyen d'un capillaire par le nébuliseur. A l'orifice du nébuliseur, du fait de l'éjection d'un gaz à grande vitesse, il se crée une dépression. La solution d'analyse est alors aspirée dans le capillaire et à la sortie, elle est pulvérisée en un aérosol constitué de fines gouttelettes. Cet aérosol pénètre alors dans la chambre de nébulisation dont le rôle est de faire éclater les gouttelettes et d'éliminer les plus grosses. Ce brouillard homogène pénètre alors dans le brûleur.

- **La flamme – atomisation**

L'aérosol pénètre dans le brûleur puis dans la flamme. Au bout d'un certain parcours au seuil de la flamme, le solvant de la gouttelette est éliminé, il reste les sels ou particules solides qui sont alors fondus, vaporisés puis atomisés. A la place d'une flamme, on peut également utiliser un four cylindrique en graphite pour atomiser l'échantillon.

∨ **Source d'atomisation**

∩ la flamme : c'est le résultat d'une réaction exothermique entre carburant et un combustible, tous deux à l'état gazeux. Ce mélange de gaz arrive au niveau d'un brûleur à la sortie duquel aura la combustion. Les combustibles les plus utilisés sont : l'acétylène, le propane, le butane, l'hydrogène et les carburants sont : l'air, l'oxygène pur, le protoxyde d'azote.....etc

∩ pulvérisation : l'élément est présent sous forme de composé chimique dans une solution à une certaine concentration C. son introduction dans la flamme se fait par pulvérisation dans le gaz carburant.

∩ atomisation : les gouttelettes arrivent ainsi au niveau d'une zone de réaction appelée dard, c'est à ce niveau que la réaction entre le combustible et le carburant se passe, et c'est là où a lieu le dégagement intense d'énergie sous forme d'espèces chimiques en état d'excitation ou l'énergie dégagé par combustion les vaporise et dissocie le composé chimique contenant l'élément.

∅ **La méthode de dosage par spectrophotométrie d'absorption atomique**

Lors d'une analyse par absorption atomique, un échantillon liquide est introduit par un tube capillaire vers un nébuliseur qui réduit l'échantillon en fines gouttelettes, lesquelles sont introduites dans la flamme d'un brûleur (flamme 1700°C-3200°C). Ce processus de

vaporisation atomique s'appelle l'atomisation. L'atomisation s'obtient à l'aide d'une flamme formée d'un mélange air-acétylène (air- C_2H_2) ou d'oxyde nitreux-acétylène ($N_2O - C_2H_2$). Un ensemble complexe de réactions interdépendantes se produit lors de l'atomisation; ces processus entraînent la formation d'un mélange d'atomes, d'ions, de molécules et d'oxydes par la réaction du carburant, de l'oxydant et des éléments contenus dans la solution à analyser. L'étape d'atomisation est donc l'élément le plus critique pour un bon rendement analytique.

Le rayonnement d'une source lumineuse (une cathode creuse ou une lampe à décharge sans électrodes) émet le spectre de l'élément à analyser. Le spectre passe à travers la flamme contenant des atomes de l'élément d'intérêt à l'état fondamental. Le rayonnement de la source est absorbé induisant une transition électronique de l'état fondamental stable à un état excité.

La quantité de rayonnement absorbée dépend de la population de l'élément à l'état fondamental qui est proportionnelle à la concentration d'élément dans l'échantillon. L'absorption d'une longueur d'onde choisie est mesurée par le changement de l'intensité de la lumière frappant le détecteur par la présence et/ou l'absence de l'élément dans la flamme.

Remarque : pour la spectrophotométrie d'absorption atomique et spectrophotométrie d'émission atomique l'échantillon doit être en solution c'est pour cette raison que les minerais de fer doivent subir un traitement préalable.

-Mode opératoire

Peser 1gramme d'échantillon de minerai de fer broyé dans un bêcher de 250 ml, verser quelques ml de H_2O distillée et ajouter 7.5 ml de l'acide chlorhydrique et 2.5 ml de l'acide nitrique couvrir de verre de montre, laisser chauffer sur plaque chauffante jusqu'à mise à sec. Laisser refroidir ajouter 25ml d'acide chlorhydrique et 25 ml de l'eau distillée, chauffer à douce ébullition pendant 10mn laisser refroidir à température ambiante, transvaser le contenu du bêcher en le rinçant à l'eau distillée dans une fiole jaugée de 500 ml. Homogénéiser bien la fiole, ajuster au trait de jauge, homogénéiser encore, filtrer, rejeter les premiers ml du filtrat et recueillir dans un flacon sec.

Annexe II

RAPPELS SUR LES METHODES STATISTIQUES ET GEOSTATISTIQUES UTILISEES

1. - RAPPELS STATISTIQUES

Toute étude géostatistique et estimation des réserves doit être précédée par une analyse statistique des variables étudiées (teneurs des éléments chimiques entre autres) et de confronter les résultats obtenus avec les hypothèses géologiques.

Deux types d'approches statistiques ont été utilisés pour le traitement des données : traitement monovarié, et multivarié.

1. - 1. - Analyse monovarié

Ce traitement permet de déterminer les paramètres statistiques de la distribution des variables étudiées (paramètres de position centrale et de dispersion) des éléments chimiques et de résumer graphiquement les caractéristiques essentielles de la distribution de chaque variable.

- **Représentation graphique**

L'histogramme d'une variable donnée visualise la répartition des effectifs dans un certain intervalle de variation prise par cette variable. L'allure générale de l'histogramme et/ou de la courbe des fréquences cumulées permet d'apprécier l'homogénéité ou l'hétérogénéité des données; ainsi que la loi de distribution des variables.

1. – 2. - Analyse multivarié

L'analyse des données désigne l'ensemble des méthodes qui permettent de collecter, d'organiser, d'analyser, de présenter que l'on appelle les données. L'analyse approfondie des données, fait découvrir des méthodes d'analyse des données multidimensionnelles. Ces méthodes utilisent des techniques géométriques permettant de mettre en évidence des groupes d'individus homogènes, des liens entre individus et variables, des ressemblances ou des différences entre variables, etc.

L'analyse en composantes principales (ACP) permet d'analyser plusieurs variables quantitatives observées sur n individus. Elle permet entre autres de regrouper des individus semblables, d'isoler des individus marginaux et d'étudier les relations entre les différentes variables.

Ø Analyse en Composantes Principales (ACP)

Afin de déterminer les différentes associations des éléments chimiques, on est amené à rechercher les liens qui existent entre eux. Ainsi, il s'agit de traiter les données de plusieurs variables simultanément. Parmi les méthodes utilisées, il y a l'Analyse en Composantes Principales qui se propose de fournir la synthèse de l'ensemble des valeurs numériques des analyses chimiques sous forme de tableaux et de graphes (Morineau, 1988).

Les résultats des analyses chimiques sont représentés dans un tableau R de type variable – individu, avec q colonnes représentant les éléments analysés (variables) et n lignes représentant les individus (analyse chimique d'un échantillon) (Chamussy et al, 1994).

L'Analyse en Composantes Principales "A.C.P" se propose de :

- Réduire l'ensemble des q variables de n échantillons, non pas par la sélection des échantillons et des variables, mais par la construction d'un ensemble de nouvelles variables appelées "facteurs".
- Ajuster le nuage de points ainsi obtenu, c'est-à-dire de le projeter au mieux sur un axe, un plan ou un hyperplan (espace vectoriel à n dimensions rapporté à une origine fixe).

a - Réduction de l'ensemble du nuage de points

o Le centre de gravité du nuage statistique

Le centre de gravité de nuage formé par les q variables des n échantillons est en général un échantillon fictif dont les teneurs auraient pour valeurs les moyennes des différentes variables.

$$g = \{\bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j, \dots\}$$

$$\text{avec : } \bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots \dots \dots \bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \dots \dots \dots \text{etc}$$

Les liaisons de variables prises deux à deux peuvent être regroupées dans un tableau V qu'on appellera tableau des variances et des covariances ou matrice de corrélation.

o Calcul de la matrice V

L'ensemble des q variables des n échantillons (individus) géochimiques peut être donné sous la forme d'un tableau de n ligne et de q colonne

$$[X_{ij}] = \begin{vmatrix} x_{11} \dots & x_{1j} \dots & x_{1q} \\ x_{i1} \dots & x_{ij} \dots & x_{iq} \\ x_{n1} \dots & x_{nj} \dots & x_{nq} \end{vmatrix} \quad \begin{array}{l} i = 1 \text{ à } n \\ J = 1 \text{ à } q \end{array}$$

La matrice $\sqrt{n} |Y_{nq}|$ des données centrées et réduites est obtenue à partir du tableau

$$X_{nq} \text{ avec : } Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \overline{X}_j}{\sigma_j \cdot \sqrt{n}}$$

Où X_{ij} : teneur de la variable j;

\overline{X}_j : moyenne de la variable j ;

σ_j : écart type de la variable j;

n : nombre d'individus

On obtient alors la matrice Y_{nq} :

$$[Y_{nq}] = \begin{vmatrix} y_{11} \dots \dots y_{1j} \dots \dots y_{1q} \\ y_{i1} \dots \dots y_{ij} \dots \dots y_{iq} \\ y_{n1} \dots \dots y_{nj} \dots \dots y_{nq} \end{vmatrix}$$

La matrice V est une matrice de dimension (q, q), symétrique par rapport à la diagonale et de terme général : $V = Y^T \cdot Y$

Il s'agit de la matrice de corrélation simple :

$$V = \begin{vmatrix} 1 & & & \\ V_{11} \dots \dots 1 & & & \\ V_{i1} \dots \dots V_{ij} \dots \dots 1 & & & \\ V_{q1} \dots \dots V_{qj} \dots \dots \dots \dots V_{qq} & & & \end{vmatrix}$$

b - Ajustement du nuage pour l'espace des échantillons

○ **Inertie du nuage**

Un échantillon peut être considéré comme un point défini par q coordonnées représentant les valeurs des q variables, c'est-à-dire, un vecteur d'un espace vectoriel \mathbb{R}^q . il est donc possible par analogie avec la géométrie et la physique de mesurer la distance entre deux échantillons e_1 et e_2 .

Soit deux axes d'angle θ dont l'origine est confondue avec le centre de gravité du nuage (Fig. 65). La distance entre les deux échantillons e_1 et e_2 par rapport au centre de gravité du nuage est donnée par le carré suivant:

$$D^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 - 2(x_1 - x_2)(y_1 - y_2) \cos \theta$$

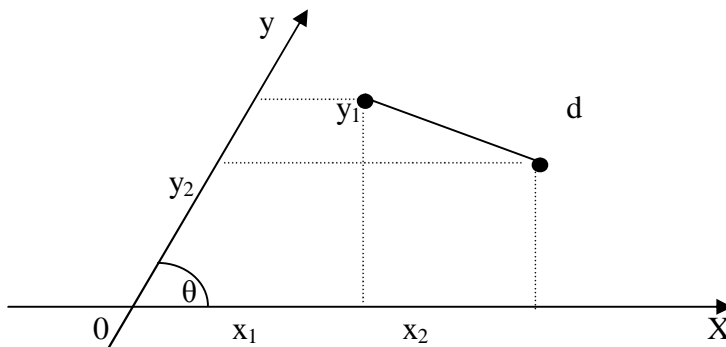
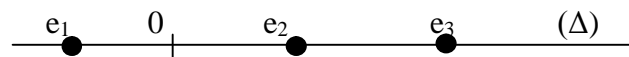


Fig.65 - Ajustement d'un nuage statistique dans l'espace des échantillons (ACP)
On appelle inertie du nuage la moyenne des carrés des $n(n-1)/2$ distances entre les n points du nuage.

○ **Plan et axe principal du nuage**

Le plan principal du nuage est le plan qui rend maximum l'inertie des points p projetés sur lui. L'axe principal est la droite (Δ) qui passe par le centre de gravité du nuage de telle sorte que les c_i représentant les mesures algébriques des projections des p échantillons sur (Δ) rendent maximale l'inertie.



○ **Les axes factoriels**

L'espace des échantillons est un espace vectoriel dont l'axe principal et les autres axes sont obtenus par diagonalisation de la matrice V. Plusieurs méthodes peuvent être appliquées pour la diagonalisation de la matrice V ; elles aboutissent toutes à la matrice A des valeurs propres.

$$A = \begin{vmatrix} \lambda_1 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \lambda_2 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \lambda_q \end{vmatrix}$$

Les vecteurs propres V_1, V_2, \dots, V_q associés aux valeurs propres écrits dans un ordre croissant constituent les axes de l'espace des échantillons.

○ **Les coordonnées des échantillons dans l'espace vectoriel R^q**

Les coordonnées sont obtenues par :

$$M_{sc} = Y * V_t$$

Avec M_{sc} : Matrice des f acteurs scores (coordonnées).

Y : Matrice des variables centrées et réduites.

V_t : Matrice des vecteurs propres.

○ **Représentation graphique des échantillons**

Les coordonnées des échantillons dans un plan sont données par les composantes M_j . La cartographie des échantillons se fait alors par la sélection de deux facteurs scores (axes) et ce selon la configuration envisagée.

c - Ajustement de nuage pour l'espace des variables

Un ensemble de q variables associées à un échantillon est un vecteur x_j d'un espace vectoriel R de dimension n (R^n).

Dans l'espace R^q , on mesure la distance entre les échantillons. Dans l'espace R^n , on définit une corrélation entre variables par le cosinus des angles θ_i formés par les vecteurs pris deux à deux.

o **Le cercle de corrélation**

On démontre que le coefficient simple de corrélation des variables avec les axes factorielles F_i est égal à la $i^{\text{ème}}$ composante du $j^{\text{ème}}$ vecteur multiplié par $\sqrt{\lambda_i}$. C'est-à-dire :

$$r_{ij} = \sqrt{a_{ij}} \cdot \mathbf{Vt}_{ij} \quad i = 1 \text{ à } q \text{ et } j = 1 \text{ à } n$$

Avec A : matrice des valeurs propres, a_{ij} un élément de A.

On en déduit que la somme des carrés de coefficients de corrélations d'ordre i est

$$\text{égale : } \sum_{j=1}^q r^2_{ij} = \lambda_i$$

Si on représente chaque variable par un point dont les coordonnées sont les coefficients de corrélations d'ordre r_{ij} , les variables s'inscrivent alors dans un cercle de rayon 1 appelé " **cercle de corrélation**" (Fig. 51). Ce cercle aura pour abscisses et ordonnées les coordonnées relatives à deux axes choisis au préalable.

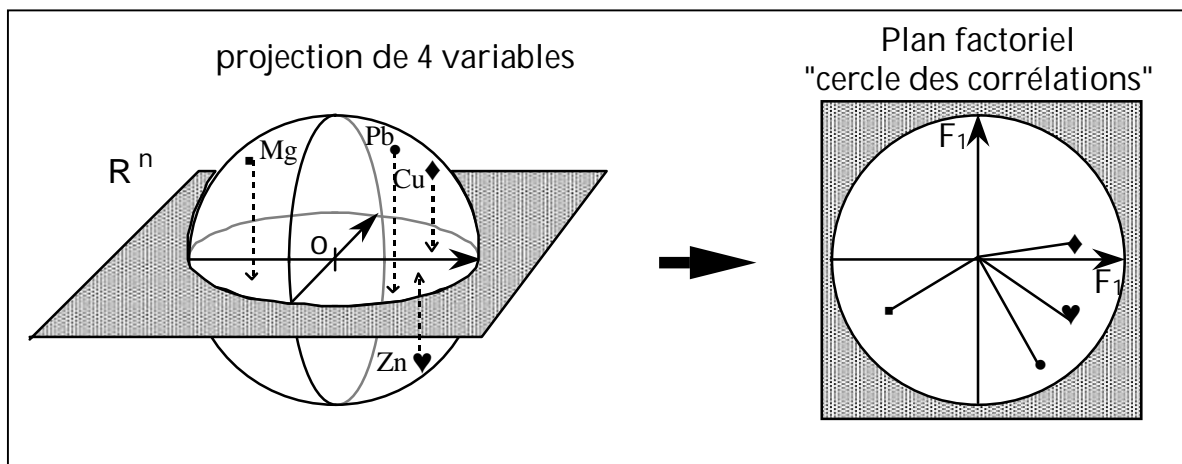


Fig. 66- Représentation de cercle de corrélation

2. – GEOSTATISTIQUES

C'est dans les années 50, avec des noms comme H.S. Sichel, D.G. Krige, H.J. DeWijfs, qu'ont commencé à voir le jour, pour besoins des évolutions minières, les méthodes appelées plus tard géostatistique développées et conceptualisées en grande partie par G. Matheron. Depuis, cet ensemble de méthodes n'a cessé de s'enrichir, au contact de nouveaux problèmes d'évaluation et de nouveaux domaines d'application : pétrole, hydrogéologie, sciences du sol,

agriculture, forêts, pêches, topographie, météorologie, environnement, géné-civil, sciences des matériaux....

2. – 1. - Notion de la géostatistique paramétrique

La géostatistique est définie comme étant la théorie des variables régionalisées (VR) et des fonctions aléatoires réparties dans l'espace.

Elle étudie les phénomènes naturels répartis dans l'espace (Phénomènes régionalisés) et/ou dans le temps (Minéralisation, pollution, propriété

-Variable régionalisée : Le terme qui définit le type d'observation est la variable. Le terme variable régionalisée a été choisi par Matheron (1965, 1970) pour souligner les deux aspects apparemment contradictoires de ce type de variable : un aspect aléatoire, qui explique les irrégularités locales; et un aspect structuré, qui reflète les tendances du phénomène à grande échelle.

- Géostatistique Intrinsèque : C'est l'application de la théorie des fonctions aléatoires ; qui sont eux même des réalisations particulières de la variable aléatoire, l'ensemble de ces variables aléatoires formerait la fonction aléatoire (F.A.).

- Géostatistique transitive: La VR est considérée comme valeur unique ce qui permet d'étudier les phénomènes de la corrélation spatiale et la structure de la V.R.

- Géostatistique stationnaire : Si les moyennes des variables aléatoires aux points x_i sont égales, alors on dit que la fonction aléatoire $Z(X)$ est stationnaire : L'espérance mathématique (moyenne) est constante et égale à m sinon c'est la **Géostatistique non stationnaire**.

2. – 1. - 2. – Les outils et modèles de la géostatistique paramétrique

La nature n'est pas entièrement "imprévisible". Deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées.

En géostatistique, on cherche à quantifier cette continuité préalablement à tout calcul effectué sur le gisement.

Le phénomène naturel étudié peut être stationnaire ou non. Il y a stationnarité lorsque tous les moments de variable sont invariants par translation dans l'espace de définition. En générale

on se contente de deux premiers moments la moyenne, la covariance ou le variogramme ; ces derniers sont les outils de base de la géostatistique et qui sont utilisés pour différents calculs, estimation autre procédures.

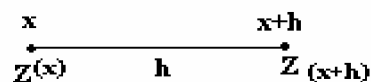
- Au moment d'ordre 1 : l'espérance mathématique ne dépend pas de $x \in E[Z(x)]=m$;

- Au moment d'ordre 2 : $E[z(x) - z(x+h)]^2$ où $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont deux point de l'espace de définition :

- $C(h)$ est appelé fonction de covariance ou covariogramme ; $E[z(x) - z(x+h)] - m^2$
- $\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(z(x) - z(x+h))^2]$, $\gamma(h)$ est appelé semi variogramme.

Ø Le variogramme théorique

Considérons deux valeurs numériques, $Z(x)$ et $Z(x+h)$, implantées en deux points distants du vecteur h ,



Le variogramme $\gamma(h)$ ne dépend pas de la localisation x , seulement de h soit en module, soit en module et en direction (hypothèse intrinsèque)

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

Où x est le vecteur de coordonnées (1, 2 ou 3 coordonnées selon le cas), h est le vecteur distance.

Le variogramme est un outil servant à décrire la continuité spatiale d'un phénomène (si l'on examine dans différentes directions). Il est fonction du vecteur h ; Dans la plupart des cas, il croît jusqu'à une certaine limite appelée palier.

Ø Le variogramme expérimental

Le variogramme expérimental est calculé à l'aide de la formule suivante :

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

Il sert à l'estimation du variogramme théorique à partir des données puis l'ajusté à des modèles, qui sont :

- **Schéma à palier**, présente:

Ø Un comportement linéaire à l'origine:

- Sphérique : $\gamma(h) = c \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$

- Exponentiel : $\gamma(h) = c \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right]$

Ø Un comportement parabolique à l'origine:

- Gaussien : $\gamma(h) = c \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right]$

- **Schéma à effet de trou**: $\gamma(h) = 1 - \frac{\sin(h)}{h} \quad \forall h > 0$

- **Schéma sans palier**:

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

- Effet de pépite :

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

- Puissance (cas particulier : linéaire) : $\gamma(h) = ch^\lambda \quad 0 < \lambda < 2 \quad \lambda = 1 \text{ linéaire}$

- Propriétés du variogramme

En générale le Variogramme peut être représenté graphiquement et montre les caractéristiques suivantes (Fig. 52).

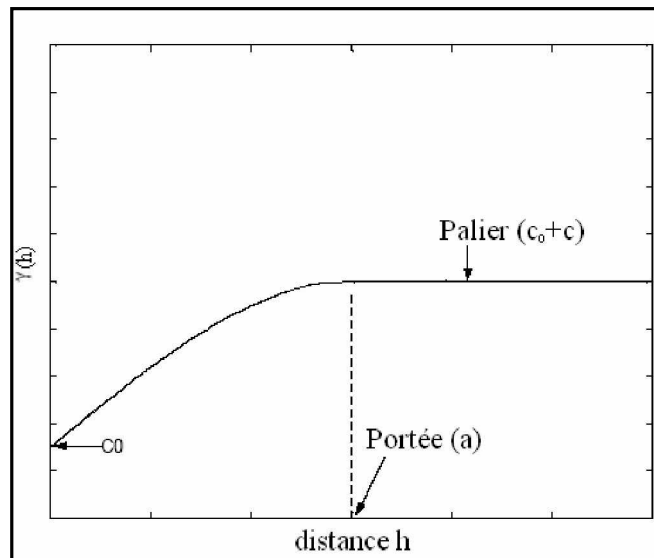


Fig. 67 - Les caractéristiques du graphe $\gamma(x, h)$ en fonction de h .

- **palier** $\sigma^2 = C_0 + C$: Variance de la V.A. ($\text{Var}(Z(x))$) puis s'aplatit.
- **Portée a** : Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne, elles ne sont plus liées (covariance nulle) linéairement. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire.
- **Effet de pépite C_0** : Variation à très courte échelle, erreurs de localisation, erreurs d'analyse et précision analytique. $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \gamma(\varepsilon) = C_0$
- **Anisotropies** : Le variogramme est calculé pour tout couple de points, et il révèle dans certains cas que la continuité spatiale n'est pas nécessairement la même dans toutes les directions. Dans ce cas il existe une anisotropie.

A) - anisotropie géométrique : lorsque deux variogrammes directionnels ont des paliers identiques et des portées différentes.

B) - anisotropie zonale : lorsque deux variogrammes directionnels ont des paliers et les portées sont différents.

2. – 1. - 3. - Concept de variance d'estimation

Si Z est la valeur inconnue que l'on cherche à estimer par la valeur mesurée ou calculée Z^* . L'erreur commise est $[Z - Z^*]$. Comme Z est une V.A. alors Z^* et $[Z - Z^*]$ sont aussi des réalisations particulières de variable aléatoire.

L'erreur aléatoire $[Z - Z^*]$ est caractérisée par ses deux premiers moments :

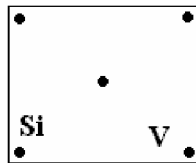
- Moyenne, $b = E \{ [Z - Z^*] \}$, quand cette moyenne est nulle ($b = 0$), on dit que l'estimation est sans biais sinon l'estimation est biaisée.

- La variance d'estimation est définie comme étant : $\sigma_{Est}^2 = E \left\{ [Z - Z^*]^2 \right\} - b^2$

Si l'on dispose de N informations, l'estimateur est :

$$Z^* = Z_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z(x_i)$$

Dans le cas où l'information disponible est représenté par N sondages :



Dans ce cas on démontre que la variance d'estimation s'écrit alors, en annotation symbolique:

$$\sigma_{Est}^2 = E \left\{ [Z_v - Z^*]^2 \right\} = 2 \sum_i \lambda_i \bar{\gamma}(S_i, V) - \bar{\gamma}(V, V) - \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \bar{\gamma}(S_i, S_j)$$

Il faut signaler que cette formule est générale quelle que soient les géométries des informations S_i et quels que soient les pondérateurs λ_i .

Le non-biais doit cependant être assuré $E \{ Z_v - Z^* \} = 0$, pour cela il suffit d'imposer la condition $\sum_i \lambda_i = 1$.

2. - 1. - 4. - Procédures de Krigeage

Le problème de krigeage consiste à trouver le meilleur estimateur linéaire possible d'une caractéristique inconnue à partir de l'information disponible. L'information disponible consiste généralement en une information expérimentale, et une structurale.

En géostatistique linéaire stationnaire il existe plusieurs types de krigeage : univarié : Krigeage ordinaire, krigeage simple, krigeage universel.

Ø Krigeage ordinaire

La fonction aléatoire $Z(x)$ est stationnaire d'espérance $E\{z(x)\} = m$, constante mais inconnue.

a) Contrainte de linéarité

L'estimateur est de la forme : $z_v^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i z_i$

b) Contrainte de non-biais

Pour annuler l'erreur $E[Z_v - Z_v^*]$; Il suffit d'imposer la condition $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$.

Il vient alors: $m - \sum_{i=1}^N \lambda_i m_i = 0$

c) Contrainte d'autorisation

Il faut s'assurer que l'espérance et la variance de l'erreur de prévision $\{ E[Z_v - Z_v^*]^2 \}$ existent. Cette contrainte n'intervient que dans le cas où la fonction aléatoire $Z(x)$ est supposée stationnaire intrinsèque.

d) Contrainte d'optimalité

Consiste à trouver les poids λ_i et la constante μ qui minimisent la variance de l'erreur d'estimation.

- le système du krigeage ordinaire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, v_j) + \mu = \bar{\gamma}(v_j, V) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{array} \right\} \forall i = 1..N \dots et .. j = 1..N$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, V) + \mu - \bar{\gamma}(V, V)$$

2 – 2. – Notion de La géostatistique non paramétrique

La géostatistique non paramétrique ne tient compte des valeurs des variables, ces dernières sont codées par 1,0 selon un seuil donné.

2 – 2. - 1. - Krigeage disjonctif (estimation des réserves récupérables)

Krigeage disjonctif ou le cokrigeage des indicatrices permet l'estimation de toute fonction de la FA.

Il est pratiquement équivalent de réaliser le cokrigeage des $I(Y(x)=i)$ ou $I(Y(x)\geq i)$. Cependant le cokrigeage des indicatrices peut se simplifier, et deux types de modèles (corrélation intrinsèque ou la factorisation) permettent de le faire. Les deux types, le cokrigeage s'obtient en résolvant de simples systèmes de krigeage.

Ø Variable $Z_1(x), Z_2(x), Z_3(x)..... Z_n(x)$ en corrélation intrinsèque

C'est le cas où toutes les covariances ou les variogrammes simples et croisés, sont identiques, à un facteur près. Dans ce modèle le cokrigeage de n'importe quelle variable, ou d'une combinaison linéaire quelconque des variables, est égale à son krigeage.

Ø Factorisation des $Z_1(x), Z_2(x), Z_3(x)..... Z_n(x)$

Si les $Z_1(x), Z_2(x), Z_3(x)..... Z_n(x)$ sont sans corrélation spatiale (coefficients de corrélation égaux à zéro et covariances croisées identiquement nulles), le krigeage de chacune des ces variables est égale à son cokrigeage.

Lorsqu'il existe une corrélation entre les variables de départ, on peut parfois se ramener à d'autres variables, sans corrélation spatiale, et qu'il suffira de kriger pour obtenir le cokrigeage. C'est ce qui arrive lorsque, par combinaison linéaire des $Z_1(x), Z_2(x), Z_3(x)..... Z_n(x)$, on peut en chaque point x fabriquer des variables sans corrélation spatiale $Y_i(x)$ permettant à leur tour d'exprimer linéairement les $Z_j(x)$.

$$Z_j(x) = \sum a_{ij} y_i(x)$$

Alors on peut écrire le système de krigeage disjonctif de la façon suivante :

$$[f(y(x))]^{KD} = \sum_i f_i [I(y(x)) = i]^{CK} = \sum_i f_i [I(y(x)) = i]^K$$

• L'effet de bord

Si ce point est proche de la frontière de A : il ya alors un effet de bord, les bordures de A étant en moyenne plus pauvres que le cœur

a) Krigeage d'indicatrice absolue

Méthode géostatistique non linéaire, cherche à estimer la fonction de distribution conditionnelle en tout point.

- Soit $Z(x)$ une V.A. continue définie au point x et $F(x,c)$, la fonction de répartition de la V.A. au point x pour la valeur « c ».

Par définition:

$$F(x,c) = P(Z(x) \leq c) = E[I(x,c)]$$

$$\text{Où } I(x,c) = 1 \text{ si } Z(x) \geq c$$

$$0 \text{ si } Z(x) < c$$

$$I(Y(x) \geq 0) = 1$$

$$I(Y(x) \geq 10 \text{ ppm}) = I(Y(x) \geq 10 \text{ ppm}) + I(Y(x) \geq 60 \text{ ppm}) + I(Y(x) \geq 150 \text{ ppm})$$

$$I(Y(x) \geq 60 \text{ ppm}) = I(Y(x) = 60 \text{ ppm}) + I(Y(x) = 150 \text{ ppm})$$

$$I(Y(x) \geq 150 \text{ ppm}) = I(Y(x) = 150 \text{ ppm})$$

Le krigeage d'indicatrice est défini comme absolue mais dans certains cas de probabilité est supérieur à 1 due à la présence d'un effet de bord, d'où la nécessité d'utiliser le krigeage d'indicatrice relative.

b) krigeage d'indicatrice relative

La différence avec les indicatrices absolues est que tous les teneurs codés par 0 pour des teneurs de coupure inférieure à celle qui est de nouveau prise en considération sont totalement négligés et seules celles qui étaient codés par 1 sont codés par 0 alors que celles qui sont supérieures à la nouvelle teneur de coupure sont codés par 1.

$$\text{Où } I(x,c) = 1 \text{ si } Z(x) \geq c$$

$$0 \text{ si } Z(x) = c$$

$$-1 \text{ si } Z(x) < c$$

Le krigeage d'indicatrice relative donne le même résultat que dans le cas de krigeage des indicatrices absolues, mais pour les seuils qui succèdent le krigeage est effectué d'une façon que la somme des probabilités cumulatives sera égale à 1.

Pour estimer $I(x,c)$ en se servant de l'information disponible il suffit de coder les $Z(x_i)$; calculer et modéliser le variogramme des indicatrices $I(x_i,c)$; en fin effectuer le krigeage, La valeur krigée peut être interprétée comme une estimation de $P(Z(x_0) < c | Z_1, \dots, Z_n)$.

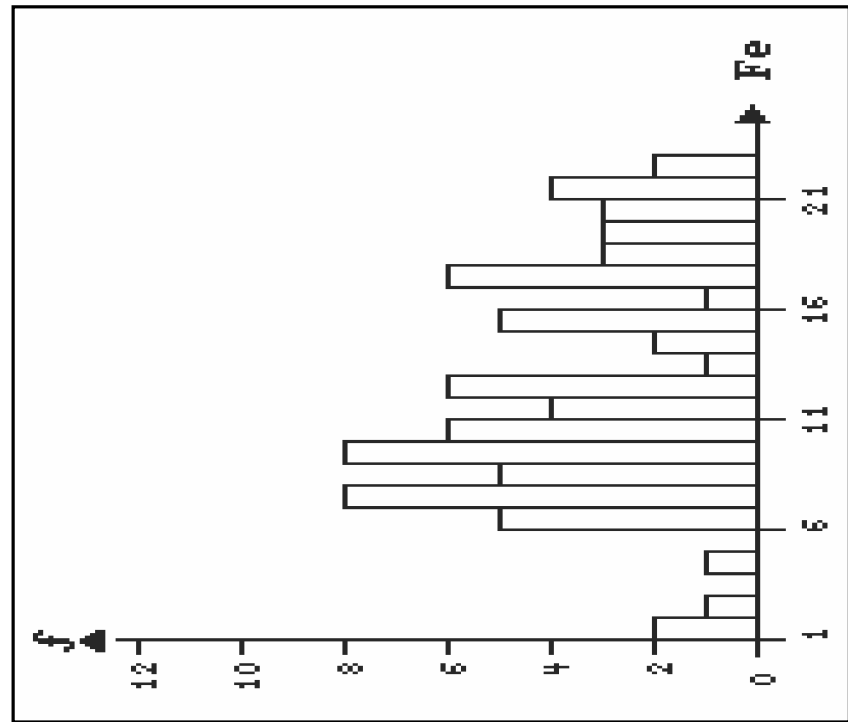


Fig. 41— Histogramme de la classe] 1.38-22.75] des teneurs de FeO

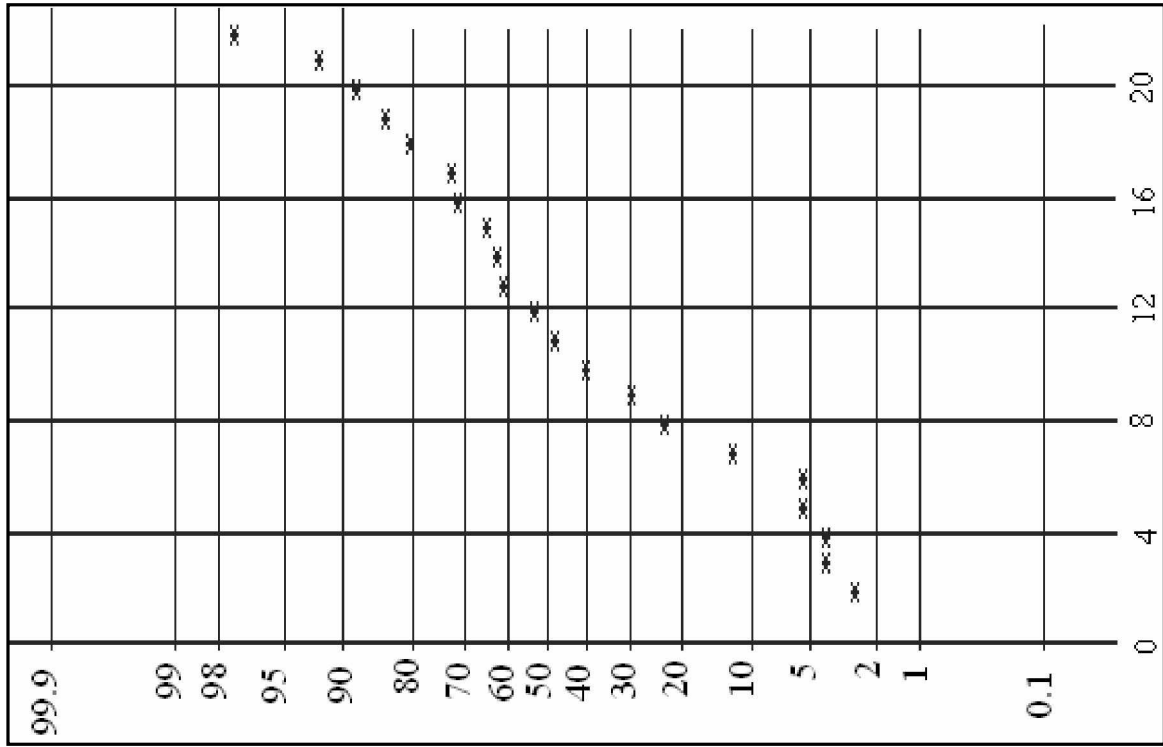


Fig. 40 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 1.38-22.75] des teneurs de FeO

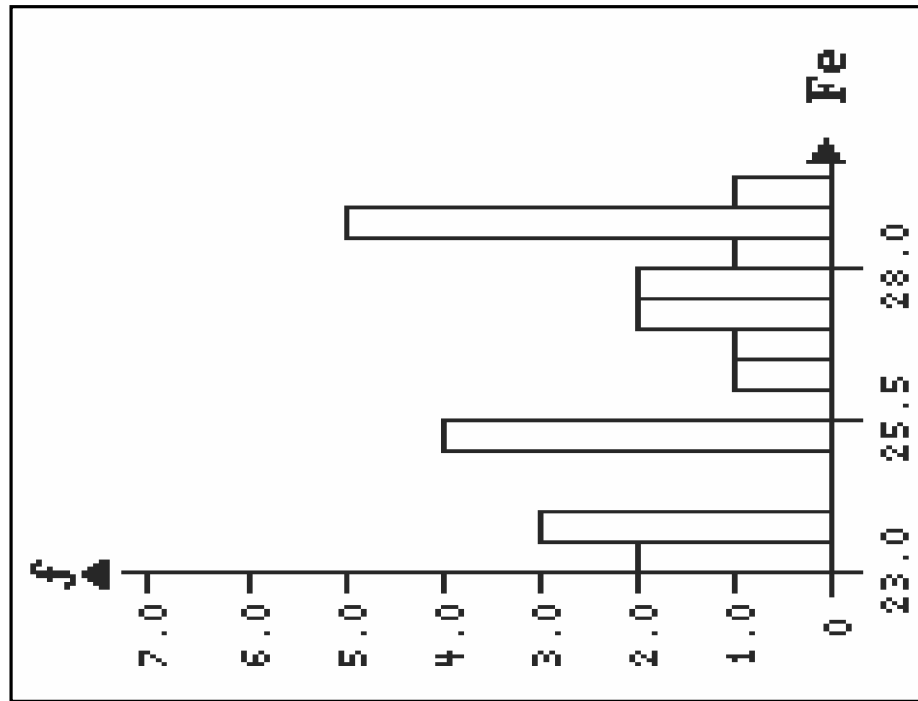


Fig. 43– Histogramme de la classe] 23.00-29.52] des teneurs de FeO

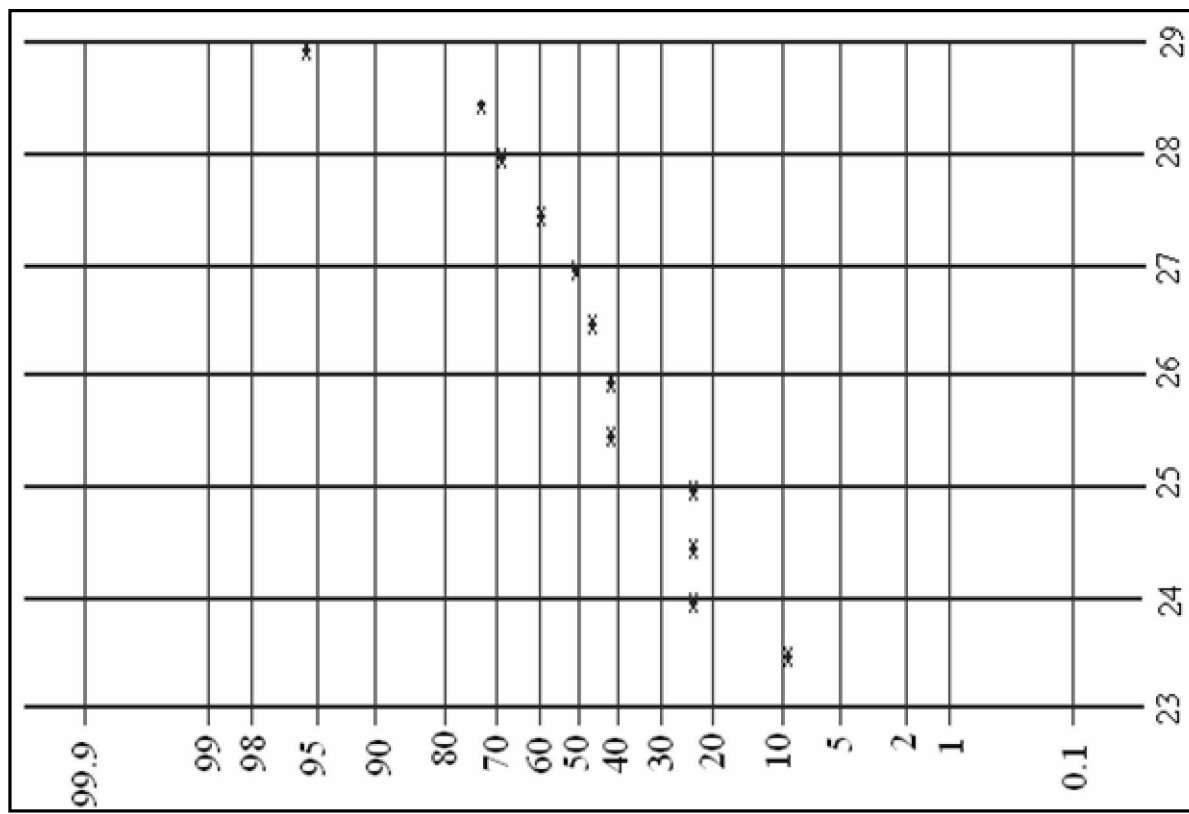


Fig. 42 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 23.00-29.52] des teneurs de FeO

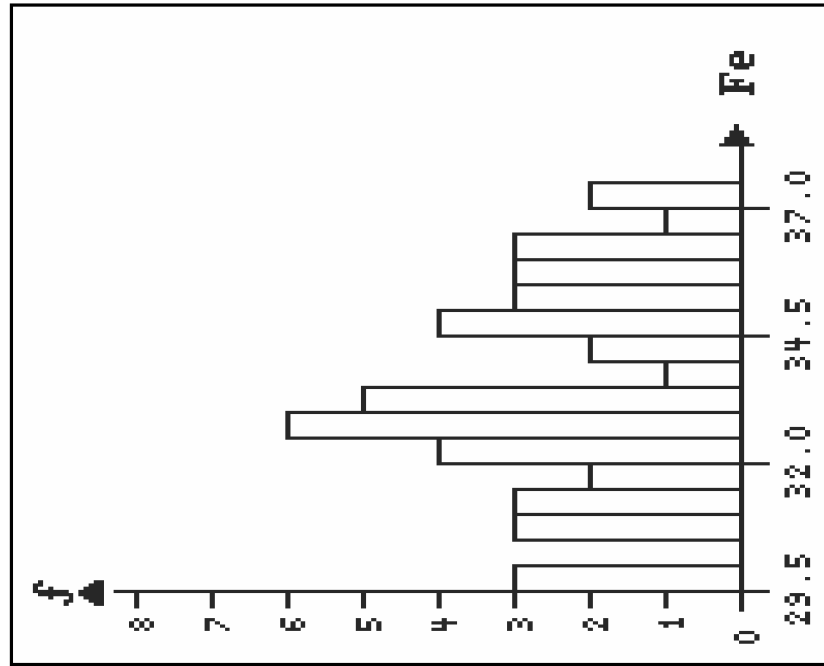


Fig. 45– Histogramme de la classe] 29.52-37.20] des teneurs de FeO

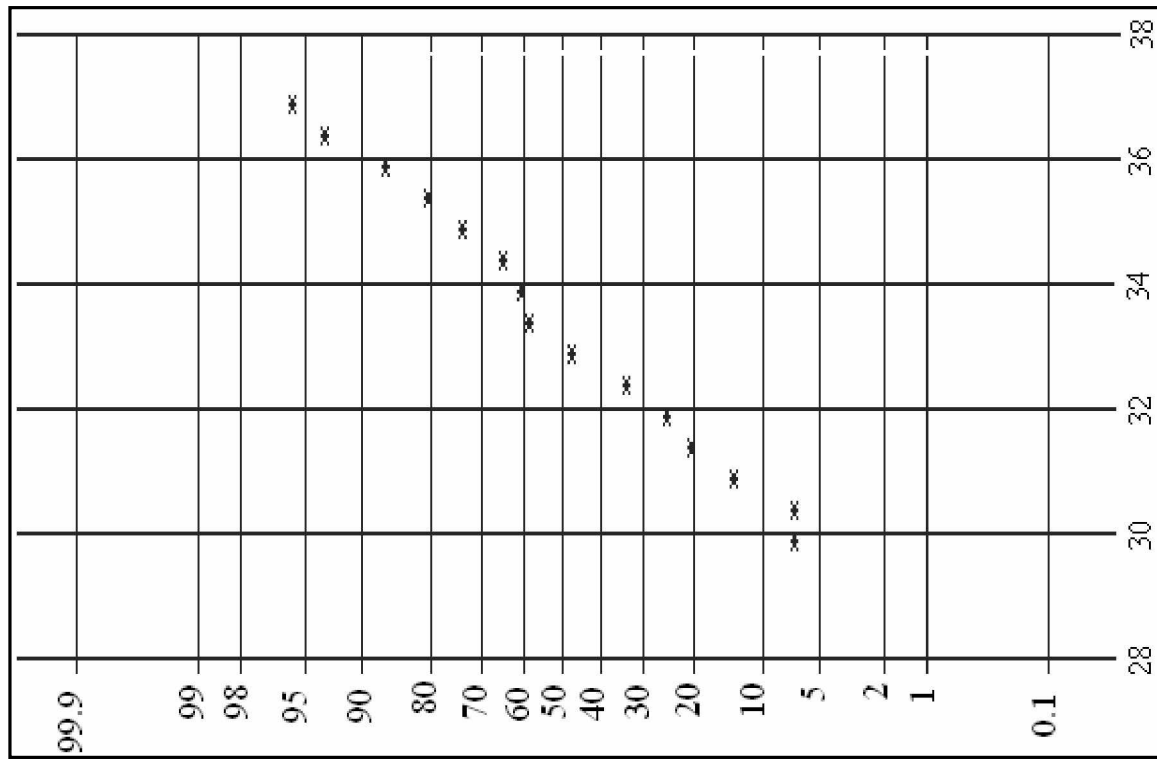


Fig. 44 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 29.52-37.20] des teneurs de FeO

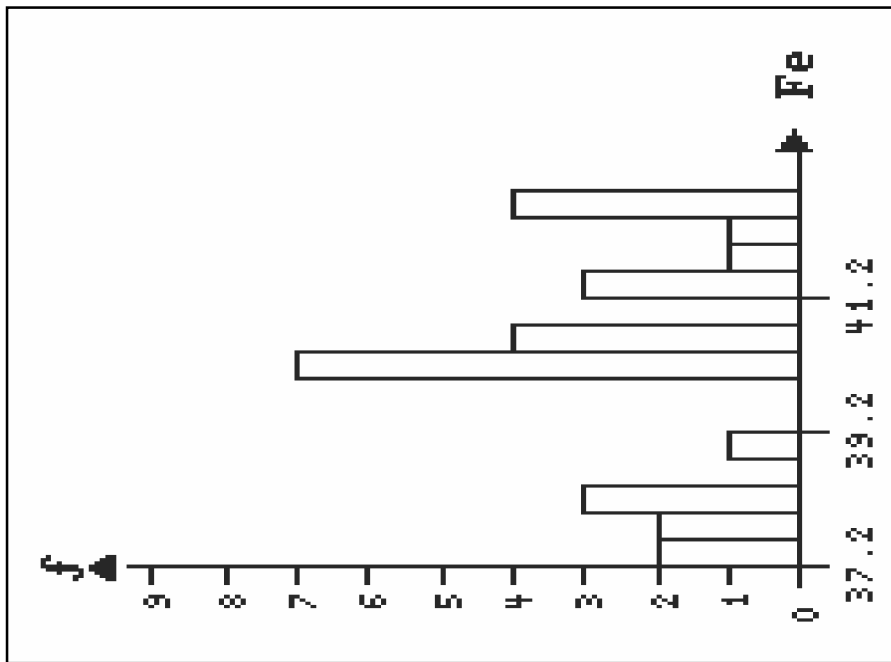


Fig. 47 – Histogramme de la classe] 37.22-43.01] des teneurs de FeO

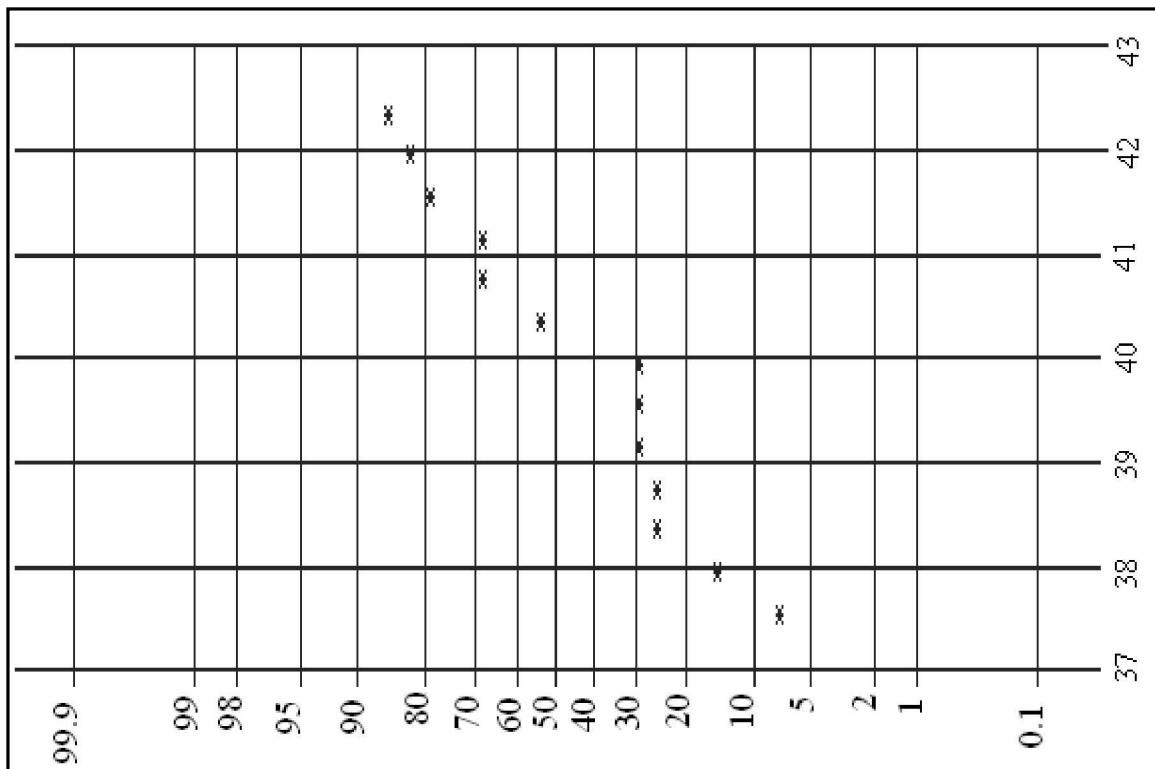


Fig. 46 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 37.22-43.01] des teneurs de FeO

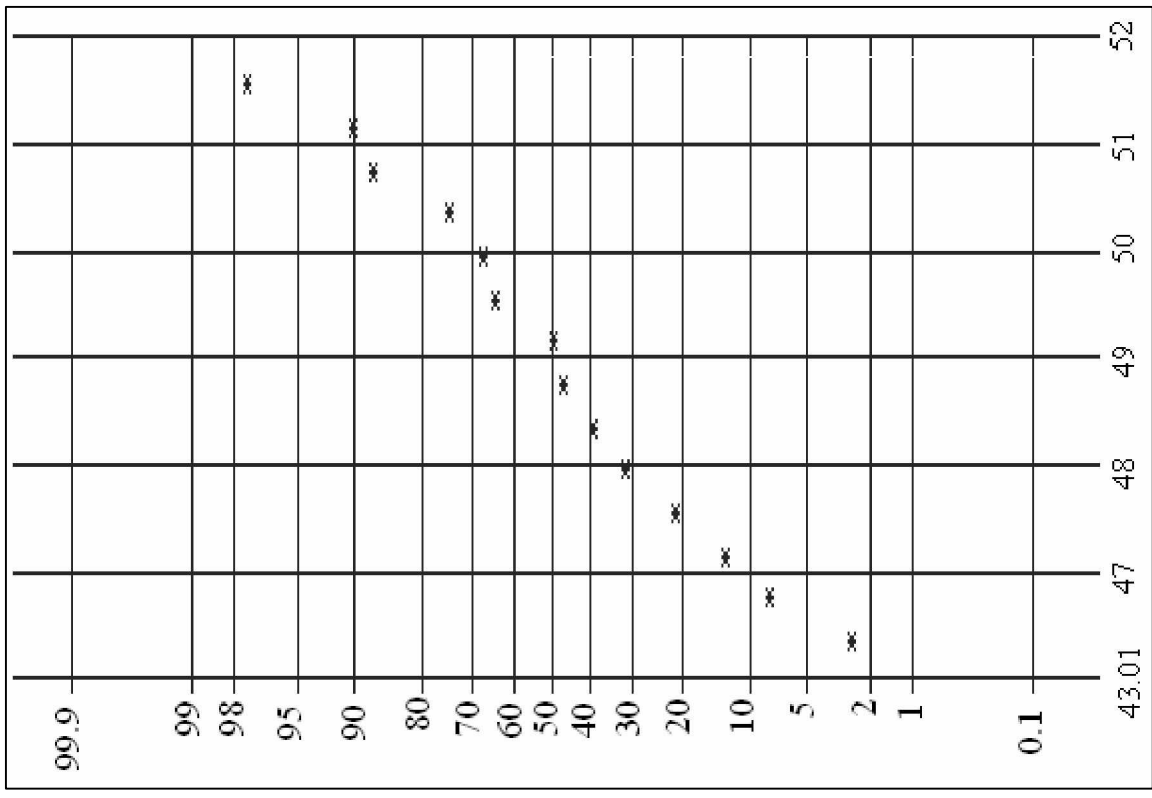


Fig. 48 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 43.01-52.08] des teneurs de FeO

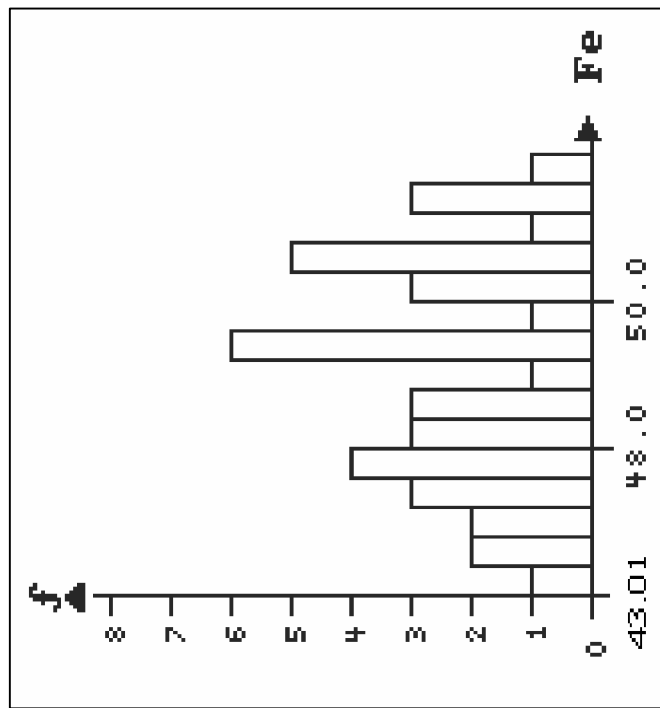


Fig.49- Histogramme de la classe] 43.01-52.08] des teneurs de FeO

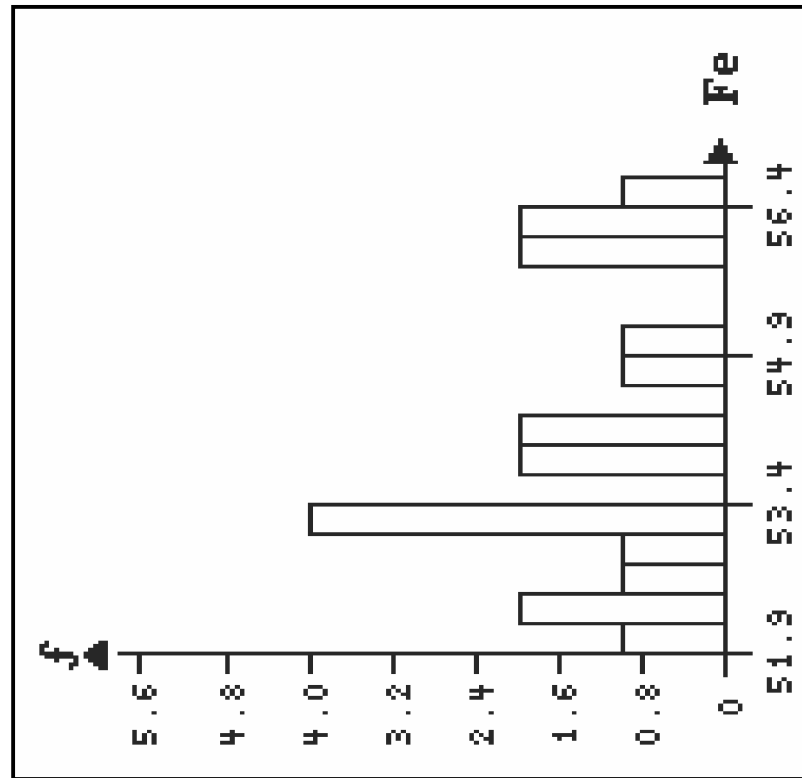


Fig. 51 – Histogramme de la classe] 52.08-56.58] des teneurs de FeO

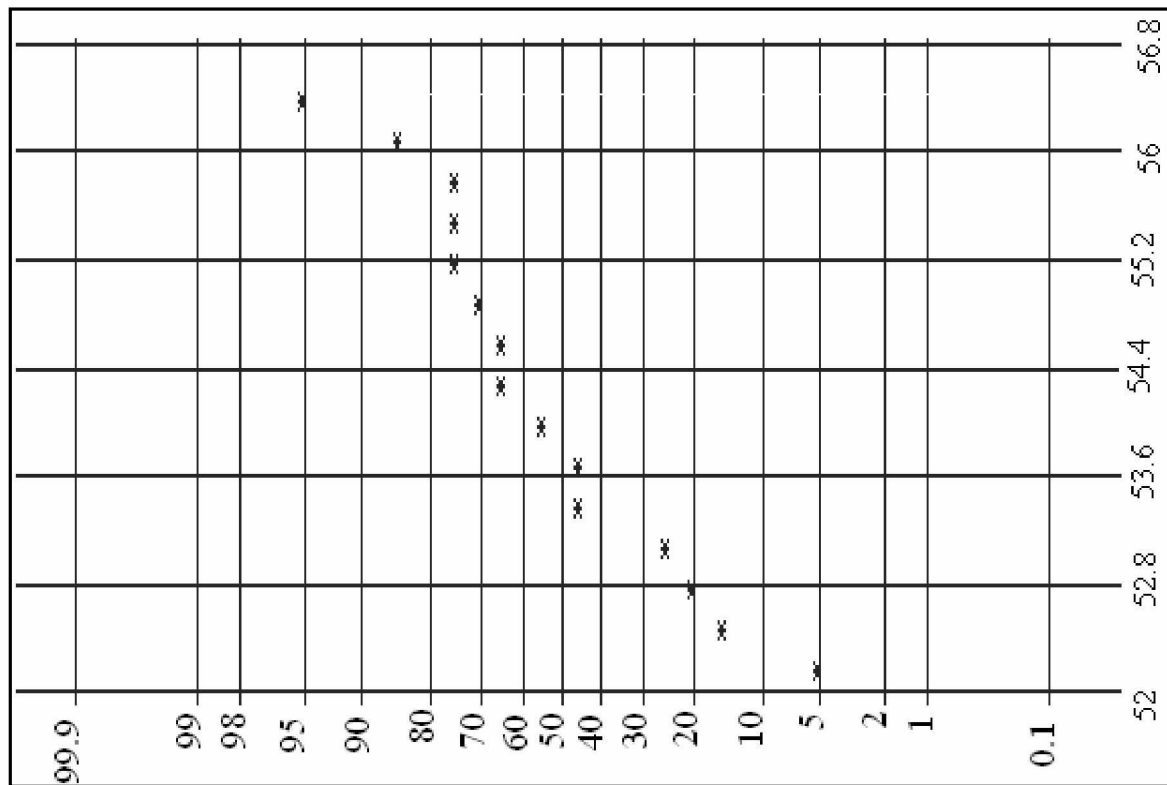


Fig. 50 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 52.08-56.58] des teneurs de FeO

BIBLIOGRAPHIE

- **Armstrong, M., Carignan J. (1997)** - Géostatistique linéaire, application au domaine minier. Les presses de l'école des Mines de Paris, 115p.
- **Baillargeon, S. (2005)** - Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations », Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en statistique pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.), 128p.
- **Bouaziz, L. (1992)** - Etude et valorisation des réserves du minerai de fer Pauvre de l'Ouenza, 96p.
- **Chauvet, P. (1999)** - Aide mémoire de géostatistique linéaire. Ecole de mine de paris. Edition les Presses.
- **Chamussy, H., Charre., Dumolard J.P., Durand M. G., Le Berre M. (1994)** - Initiation aux pratiques statistiques en géographie. *Edition Masson, 245p.*
- **David, L. (1956)** - Etude géologique des Monts de la Haute Medjerda. Service de la carte géologique de l'algérie, Alger, 289p.
- **Journel, A. G., Huijbregts (1978)**: Mining geostatistics. *Academic Press, London, U. K, 600p.*
- **Marcotte, D. (1997)** - Géostatistique minière. Ecole polytechnique, Lorraine, France, 230p.
- **Matheron, G. (1971)** - La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers des CMM5. Paris ENSMP, 212p.
- **Matheron, G. (1973)** - The Intrinsic random functions and their application. In *Advances in Applied Probability*. Dec. 1973, n°3, pp439-468.
- **Michel, D. (1990)** - Nested indicator approach for ore reserve estimation in highly variable mineralization

- **Morineau, A. (1988)** - Analyse en Composantes Principales. *Edition CISIA. Ceresta, France, 198p.*
- **Kouzmine, G. (1992)** - Rapport final concernant les des travaux de recherche géologique du gisement de fer de Châabet El Ballout. 160p
- **Kouzmine, G. (1992)** - Annexe N⁰ : 01 concernant le gisement de fer de Châabet El Ballout. 102p.
- **Kriviakine, B., Kovalenko, E., Vnouchkov, V., Dereski, B. (1990)** - Rapport final sur les résultats de l'étude complémentaire des feuilles N⁰ : 77 Souk-Ahras, N⁰ : 78 Oued Mougras, N⁰ : 100 M'Daourouche à l'échelle : 1/500000.
- **Rudis (1972)** - Rapport géologique détaillé, carte N⁰ :77 SouK-Ahras. Carte N⁰ : 78 Oued Mougras. N⁰ :100 M'Daourouche. N⁰ : 124 Oued Kébarite.T₁, T₂. Service géologique, 430p.
- **Vila, J. M. (1993)** - Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasique des confins algéro-tunisiens : Trias allocthone, « galciens de sel » sous-marines et vrais diapirs. Trias'93 mémoires du service géologique de l'Algérie n^o :6, 159p

Liste des figures

| Figure | Page |
|---|-----------|
| Fig. 1 – Situation géographique du gisement de fer CHâabet El Ballout. | 03 |
| Fig. 2 - Colonne lithostratigraphique de la région d'Oued Mougras modifier. | 07 |
| Fig. 3 - Carte géologique de la région d'Oued Mougras D'après Kriviakine (1990) complétée par l'auteur. | 08 |
| Fig. 4 - Délimitations des trois domaines triasique dans les confins Algéro-tunisiens (Vila <i>et al</i> , 1993-2000) | 11 |
| Fig.5 –Carte géologique du gisement de Châabet El Ballout. | 17 |
| Fig.6 - Coupe géologique de la Zone Ouest. | 18 |
| Fig.7 - Coupe géologique à travers les fronts de niveau. | 18 |
| Fig.8 - Coupe géologique de la Zone Ouest et centrale. | 19 |
| Fig.9 - Aspect de la minéralisation à l'échelle métrique. | 20 |
| Fig.10 - Bréchification veinulée à hématite et calcite. | 21 |
| Fig.11 - Brèche à éléments hétérométriques Ca (calcite), li (limonite), Hé (hématite). | 21 |
| Fig.12 - Minéralisation par remplissage des vides. Ma (marne), Li (limonite), He (hématite). | 22 |
| Fig.13 - Biomicrite à foraminifère planctonique, avec une dissémination de fer dans le Biomicrite à foraminifère planctonique, avec une oxydation du ciment. | 22 |
| Fig.14 - Biomicrite à foraminifère planctonique, avec une minéralisation disséminé et filonienne dans le ciment. | 22 |
| Fig.15 - Grés à ciment ferrugineux. | 23 |
| Fig. 16 - Texture massive. Hé (hématite). | 23 |
| Fig.17 – fonction de répartition de l'ensemble des données des teneurs en fer. | 32 |
| Fig.18 - Histogramme de l'ensemble des données des teneurs en fer. | 32 |
| Fig. 19 – schéma général de la distribution du minerai de fer dans les logs de sondage. | 36 |
| Fig. 20 – les cercles de corrélations de l'ACP sur l'ensemble des données de sondages du gisement de Châabet El Ballout. | 38 |
| Fig. 21 - procédure de calcul des couples des teneurs des échantillons des sondages pour la construction des variogrammes expérimentaux 3D. | 39 |
| Fig. 22 - Le variogramme vertical moyen des teneurs en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$. | 40 |
| Fig. 23 - Le variogramme horizontal moyen des teneurs en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $0^0 \pm 30^0$. | 41 |
| Fig. 24 - Le variogramme vertical moyen des teneurs en SiO ₂ Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$. | 42 |
| Fig. 25 - Le variogramme horizontal moyen des teneurs en SiO ₂ Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $0^0 \pm 30^0$. | 43 |
| Fig. 26 - Le variogramme vertical moyen des teneurs en CaO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$. | 44 |
| Fig. 27 - Le variogramme horizontal moyen des teneurs en CaO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $0^0 \pm 30^0$. | 45 |

| | |
|--|---------------|
| Fig. 28 – carte des teneurs en FeO dans les blocs d’exploitation des 10 niveaux du gisement. | 52 |
| Fig. 29 – Carte des variances de krigeage des teneurs de FeO dans les blocs d'exploitation des 10 niveaux du gisement. | 52 |
| Fig. 30 – cartes des teneurs en SiO ₂ dans les blocs d’exploitation des 10 niveaux du gisement | 53 |
| Fig.31 – carte des teneurs en CaO dans les blocs d’exploitation des 10 niveaux du gisement | 53 |
| Fig.32 – carte de l’indice de basicité. | 54 |
| Fig. 33 - Le variogramme vertical moyen des valeurs d’indicatrice I(35%) en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$. | 56 |
| Fig. 34 - Le variogramme horizontal moyen des valeurs d’indicatrice I(35%) en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$. | 57 |
| Fig. 35 - Le variogramme vertical moyen des valeurs d’indicatrice I(40%) en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$. | 57 |
| Fig. 36 - Le variogramme horizontal moyen des valeurs d’indicatrice I(40%) en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$. | 58 |
| Fig. 37 - Le variogramme vertical moyen des valeurs d’indicatrice I(45%) en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$. | 59 |
| Fig. 38 - Le variogramme horizontal moyen des valeurs d’indicatrice I(45%) en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$, Angle vertical : $90^0 \pm 30^0$. | 59 |
| Fig. 39 -Répartition des blocs du niveau 1010 en fonction du pourcentage de volume pour une teneur de coupure donnée a), b), c). a) Carte des blocs qui ont 75% du volume dont la teneur est >40%. b) Carte des blocs qui ont 50% du volume dont la teneur est >40% c) Carte des blocs qui ont 25% du volume dont la teneur est >40% | 63 |
| Fig. 40 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 1.38-22.75] des teneurs de FeO | Annexe |
| Fig. 41 – Histogramme de la classe] 1.38-22.75] des teneurs de FeO | |
| Fig. 42 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 23.00-29.52] des teneurs de FeO. | |
| Fig. 43 – Histogramme de la classe] 23.00-29.52] des teneurs de FeO | |
| Fig. 44 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 29.52-37.20] des teneurs de FeO | |
| Fig. 45 – Histogramme de la classe] 29.52-37.20] des teneurs de FeO | |
| Fig. 46 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 37.22-43.01] des teneurs de FeO | |
| Fig. 47 – Histogramme de la classe] 37.22-43.01] des teneurs de FeO | |
| Fig. 48 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 43.01-52.08] des teneurs de FeO | |
| Fig. 49 – Histogramme de la classe] 43.01-52.08] des teneurs de FeO | |
| Fig. 50 - Fonction de répartition cumulée de la classe] 52.08-56.58] des teneurs de FeO | |
| Fig. 51 – Histogramme de la classe] 52.08-56.58] des teneurs de FeO | |

Liste des tableaux

| Tableau | Page |
|--|-------------|
| Tableau 1 - Impact des différentes impuretés contenues dans les minerais de fer sur la qualité de l'acier. | 29 |
| Tableau 2 - Composition chimique du minerai de fer à hématite du gisement de Châabet El Ballout | 31 |
| Tableau 3 - Statistique de l'ensemble des échantillons. | 33 |
| Tableau 4 - Paramètres statistiques de l'ensemble des classes. | 33 |
| Tableau. 5 - Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement de Châabet El Ballout. | 37 |
| Tableau. 6 - Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement de Châabet El Ballout. | 37 |
| Tableau.7 - paramètres utilisés pour la construction des variogrammes expérimentaux des teneurs de Fe, SiO ₂ , CaO | 39 |
| Tableau 8 – données du variogramme vertical moyen des teneurs en FeO. | 40 |
| Tableau 9 – paramètres du variogramme horizontal moyen des teneurs en FeO. | 41 |
| Tableau 10 – paramètres du variogramme vertical moyen des teneurs en SiO ₂ . | 42 |
| Tableau 11 – paramètres du variogramme horizontal moyen des teneurs en SiO ₂ . | 43 |
| Tableau 12 – paramètres du variogramme vertical moyen des teneurs en CaO. | 44 |
| Tableau 13 – paramètres du variogramme horizontal moyen des teneurs en CaO. | 45 |
| Tableau 14 - Paramètre de krigeage. | 46 |
| Tableau.15 - Statistique de krigeage tous les oxydes. | 47 |
| Tableau. 16 : Paramètres statistiques des teneurs en FeO, CaO, SiO ₂ des blocs krigés pour chaque oxyde. | 48 |
| Tableau.17 - calcul des réserves du gisement de Châabet El Ballout avec Tc=25%. | 49 |
| Tableau-18- catégorisation des réserves du gisement de Châabet El Ballout. | 50 |
| Tableau.19 - calcul des réserves du gisement de Châabet El Ballout avec SiO ₂ <15% | 50 |
| Tableau 20 - exemple de codage des teneurs en fer | 55 |
| Tableau. 21. - Paramètre de krigeage. | 60 |
| Tableau. 22. – statistiques du krigeage d'indicatrice. | 60 |
| Tableau.23. – statistique des blocs des niveaux 10, 9, 8, 7, 6, pour les teneurs de coupures 35%, 40%, 45%. | 61 |
| Tableau.24. – statistique des blocs des niveaux 5, 4, 3, 2, 1, pour les teneurs de coupures 35%, 40%, 45%. | 61 |