



Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

**CARACTERISATION GEOLOGIQUE ET GEOSTATISTIQUE
DES PETITS GISEMENTS ET INDICES FERRIFERES DU
NORD EST ALGERIEN.**

Option : Géologie

Par

ALIMAT- HALIMI Fahima

DIRECTEUR DE THESE : Pr. MEZGHACHE Hamid

Univ. Badji Mokhtar - Annaba

DEVANT LE JURY

Président : Pr TOUBAL Abderrahmane Univ. Badji Mokhtar- Annaba

Examineurs :

- | | |
|--------------------------|------------------------------------|
| - Pr. CHAOUCHI Rabah | - Univ. M'hamed Bougara- Boumerdès |
| - Pr SAADAOUI Moussa | - Univ. M'hamed Bougara- Boumerdès |
| - Pr BOUZENOUNE Azzedine | - Univ. Med Seddik Benyahia- Jijel |
| - Dr. TLILI Mohamed | - Univ. Badji Mokhtar- Annaba |

Annaba - 2019

REMERCIEMENT

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu pour m'avoir donné la force et le courage de mener ce travail jusqu'au bout.

*Je tiens à remercier, en particulier, **Pr. MEZGHACHE Hamid**, mon directeur de thèse, pour m'avoir accepté dans son équipe et conduit mes premiers pas de recherche et ses orientations enrichissantes depuis le commencement jusqu'à la mise en forme de cette thèse.*

*Les membres du jury : **Pr. TOUBAL Abdelerrahmane**, qui ma fait l'honneur de présider mon jury de thèse ; **Pr BOUZENOUNE Azzedine** ; **Pr. CHAOUCHI Rabeh** ; **Pr. SAADAOUI Moussa** et le **Dr. TLILI Mohamed**, pour avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail.*

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé, conseillé, soutenu...durant la période de réalisation de ce travail.

*Je remercie mon mari **Adel** pour m'avoir soutenu supporté pendant cette période difficile.*

*Enfin, je terminerais par dédier ce modeste travail et exprimer toute ma reconnaissance à ma **mère et à mon père** qui se sont toujours dévoués pour leurs enfants et ce sont toujours inquiétés durant mes longues sorties de terrain et à mes **frères et sœurs** qui m'ont de tout temps soutenu.*

Fahima

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
---------------------	---

GENERALITES	3
--------------------	---

PARTIE I : GEOLOGIE

Chapitre 1 : GEOLOGIE DE LA CHAINE DES MAGHREBIDES ET DE L'ATLAS SAHARIEN ORIENTAL	10
---	----

1. 1. Géologie de la chaîne des maghrebides.....	10
--	----

1. 2. L'atlas saharien oriental.....	15
--------------------------------------	----

Chapitre 2 : GEOLOGIE DU GISEMENT D'ANINI	17
--	----

2. 1. Lithostratigraphie	17
--------------------------------	----

2. 2. Tectonique	20
------------------------	----

3. 3. Minéralisation.....	21
---------------------------	----

Chapitre 3 : GEOLOGIE DU GISEMENT DE CHÄABET EL BALLOUT	28
--	----

3. 1. Lithostratigraphie	28
--------------------------------	----

3. 2. Tectonique	31
------------------------	----

3. 3. Minéralisation	36
----------------------------	----

Chapitre 4 : GEOLOGIE DU GISEMENT DE KHANGUET EL MOUHAD	42
--	----

4. 1. Lithostratigraphie	42
--------------------------------	----

4. 2. Tectonique	47
------------------------	----

4. 3. Minéralisations	49
-----------------------------	----

PARTIE II : ANALYSE DE DONNEES ET GEOSTATISTIQUE

Chapitre 1 : METHODES D'ANALYSE DE DONNEES, GEOSTATISTIQUE ET LOGICIELS UTILISES	59
---	----

1. 1. Méthodes d'analyse de données.....	59
--	----

1. 2. Méthodes géostatistiques.....	66
-------------------------------------	----

1. 3. Logiciels utilisés.....	72
Chapitre 2 : GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES RESSOURCES DU GISEMENT D'ANINI	74
2. 1. Travaux de recherche et d'exploration réalisés sur le gisement	74
2. 2. Analyse de données d'exploration.....	74
2. 3. Estimation des ressources par méthodes conventionnelles.....	80
2. 4. Estimation des ressources par méthode géostatistiques.....	82
2.5. Conclusion.....	90
Chapitre 3 : GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES RESSOURCES DU GISEMENT DE CHÄABET EL BALLOUT	91
3. 1. Travaux de recherche et d'exploration réalisés sur le gisement.....	91
3. 2. Analyse de données d'exploration.....	92
3. 3. Estimation des ressources par méthodes conventionnelles	96
3. 4. Estimation des ressources par méthode géostatistiques.....	98
3. 5. Conclusion.....	114
Chapitre 4 : GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES RESSOURCES DU GISEMENT DE KHANGUET EL MOUHAD	115
4. 1. Travaux de recherche et d'exploration réalisés sur le gisement.....	115
4. 2. Analyse de données d'exploration.....	115
4. 3. Estimation des ressources par méthodes conventionnelles	117
4. 4. Estimation des ressources par méthode géostatistiques... ..	118
CONCLUSIONS GENERALES.....	119
BIBLIOGRAPHIE... ..	125
LISTE DES FIGURES.....	131
LISTE DES TABLEAUX.....	136

ملخص

إن الدراسات الجيولوجية و علم الإحصاء الجغرافي خصت المكامن الحديد الثلاثة الصغيرة موجودة في شمال شرق الجزائر. ومع ذلك ، فإن تقدير الموارد شمل كل من مكن عيني وشعبة البلوط

تقدير الموارد للخام من الحديد تم باستخدام الطرق التقليدية ولكن مع تطوير علم الإحصاء الجغرافي في المجال ألمنجمي منذ 1970 أصبحت هذه الأخيرة تفضل أكثر. طبقت هذه الأساليب الجيوإحصائية على مكامن الحديد الصغيرة لعيني وشعبة البلوط و قد تم اقتراح منهج خاص محدد لها.

يقع منجم الحديد عيني في شمال مدينة سطيف. تم استكشافه من قبل المكتب الوطني للأبحاث الجيولوجية والتعدينية (2009-2011) يتكون من أجسام خام <كارستية> و<عدسية> من اتجاه 135 شمال. تم تقدير موارد الحديد باستخدام طريقة الكتلة الجيولوجية من قبل المكتب الوطني للأبحاث الجيولوجية والتعدينية تم إعادة تقدير هذه الموارد بالطريقة الجيوإحصائية بواسطة الكريجاج العادي. بالإضافة إلى تبين الشكل ، أظهرت الدراسة الفريوغرافية وجود تموج في الاتجاهين الرئيسيين للتباين -135 شمال و 45 شمال. تم وضع بيان نموذجي للفاريوغرام في هذين الاتجاهين باستخدام نموذج كروي مع امتدادات من 288 م و 100 م ، على التوالي. يتطابق اتجاه المحور الرئيسي للتباين مع اتجاه الصدوع.

يقع مكن الحديد شعبة البلوط شمال شرق مدينة سوق أهراس. هذا المكن ينتمي إلى منطقة قشور سلاوة. تم استكشافه من خلال التنقيب في عام 1992 من قبل شركة للأبحاث المنجمية. أظهرت الدراسات الجيولوجية التي أجريت كجزء من هذه الرسالة وجود هيكل دوبلكس. تم إجراء تقدير موارد الحديد باستخدام أساليب القطع الجيولوجية العمودية. تم إعادة تقدير هذه الموارد بالطريقة الجيوإحصائية و المتمثلة في الكريجاج العادي ، ولكن مع مراعاة الهيكل المزدوج الذي يشكل المكن . فاريوغرامات "سمك الأفق الحامل للمعادن " و " معامل التمدن " تظهر نفس تبين منطقتين حيث محور رئيسي لديها اتجاه شمال 160 درجة ومحور ثانوي اتجاه شمال 70 تم تعديل المتغيرات الاتجاهية في هذين الاتجاهين باستخدام نماذج كروية. يتطابق اتجاه المحور الرئيسي للتباين مع اتجاه احتكاك الطبقات.

تمت مقارنة نتائج التقديرات الجيوإحصائية مع تلك التي تم الحصول عليها بالطرق التقليدية. و النتيجة تظهر الفرق الكبير بين الموارد المقدرة بالطرق التقليدية وتلك التي تم الحصول عليها عن طريق الكريجاج العادي هو بالتأكيد بسبب انقطاع الاجسام المعدنية:

- في حالة مكن عيني، الانقطاع بشكل منتظم ينعكس في الفريوغرام من خلال وجود تأثيرات التموجات. ولأخذ ذلك في الاعتبار، كان من الضروري استخدام معامل تصحيح وهو معامل التمدن المحسوب في المستوى الأفقي.

-في حالة مكن شعبة البلوط ، يكون التمدن منتظمًا في المستوى الأفقي ولكنه متقطع في المستوى العمودي بسبب البنية الهيكلية المزدوجة. تم حساب معامل تمدن في المستوى العمودي واتخذ بعين الاعتبار لتصحيح تقديرات الموارد. وبالتالي ، من أجل تحسين تقدير موارد للمكامن الكارستية والمنقطعة بالطرق الإحصائية ، من الضروري مراعاة معاملات التمدن التي تشبه معامل الاحتمال.

الكلمات المفتاحية: مكن الحديد ، كارست ، دوبلكس ، تقدير الموارد ، تأثير التموج ، معامل التمدن.

RESUME

Les études géologiques et géostatistiques ont porté sur trois petits gisements de fer situés dans le NE algérien. Cependant, seul le gisement d'Anini et Châabet El Ballout ont fait l'objet d'estimation de ressources.

L'estimation des ressources en minerai d'un gisement se faisait à l'aide de méthodes conventionnelles mais avec le développement de la géostatistique minière à partir des années 1970, ce sont les méthodes géostatistiques qui sont privilégiées. Ces méthodes géostatistiques ont été appliquées aux petits gisements de fer d'Anini et de Châabet El Ballout pour lesquels une approche spécifique a été proposée.

Le gisement de fer d'Anini est situé dans la partie Nord Orientale de la chaîne alpine de l'Algérie au Nord de la ville de Sétif. Le gisement a été exploré par l'Office National de la Recherche Géologique et Minière- ORGM (2009-2011). Il est constitué de corps de minerais de forme karstiques et lenticulaires de direction N135°. L'estimation des ressources en fer a été faite à l'aide de méthodes des blocs géologiques par l'ORMG. Ces ressources ont été réestimées par méthode géostatistique de krigeage ordinaire. En plus de l'anisotropie, la variographie a montré la présence d'effets de trou dans les deux principales directions d'anisotropie – N135 et N45. Les variogrammes expérimentaux directionnels dans ces deux directions ont été ajustés à l'aide d'un modèle sphérique de portées respectivement égales à 288m et 100m. La direction du grand axe d'anisotropie correspond à celle de la direction de la fracturation.

Le gisement de fer de Châabet El Ballout est localisé au Nord Est de la ville de Souk Ahras. Ce gisement appartient à la zone des écaïles de Sellaoua. Il a été exploré par sondages carottants en 1992 par l'Entreprise de Recherche Minière-EREM. Les études géologiques faites dans le cadre de cette thèse ont montré une structure en duplex. L'estimation des ressources en fer a été faite à l'aide de méthodes des coupes géologiques verticales par l'EREM. Ces ressources ont été réestimées par méthode géostatistique de krigeage ordinaire, mais en tenant compte de la structure en duplex. Les variogrammes de "l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation" (EHP) et "coefficient de minéralisation" (CM) montrent une même anisotropie zonale, où le grand axe a une direction N160° et le petit axe a une direction N70°. Les variogrammes directionnels dans ces deux directions ont été ajustés à l'aide de modèles sphériques. La direction du grand axe d'anisotropie correspond à celle de la direction du chevauchement.

Les résultats des estimations par méthodes géostatistiques ont été comparés à celles obtenues par méthodes conventionnelles. Le grand écart entre les ressources estimées par méthodes conventionnelles et celles obtenues par krigeage ordinaire est sûrement dû à la discontinuité de la minéralisation :

- Dans le cas du gisement d'Anini la discontinuité est régulière et reflétée dans le variogramme par la présence d'effets de trous. Afin d'en tenir compte, il a été nécessaire de faire appel à un coefficient correcteur qui est le coefficient de minéralisation calculé dans le plans horizontal.

- Dans le cas du gisement de Châabet El Ballout, la minéralisation est régulière dans le plan horizontal mais, discontinue dans le plan vertical à cause de la structure en duplex. Le coefficient de minéralisation a été calculé dans le plan vertical et il a été pris en considération pour la correction des estimations des ressources.

Ainsi, pour optimiser l'estimation des ressources de minerais des gisements de types karstiques et bréchique par méthodes géostatistiques, il est nécessaire de tenir compte des coefficients de minéralisations qui s'apparentent à un coefficient de probabilité.

MOTS-CLÉS: Gisement de Fer, Karst, duplex, Estimation géostatistique, effet de trou, coefficient de minéralisation.

ABSTRACT

Geological and geostatistical studies have focused on three small iron deposits located in NE Algeria. However, only the Anini and Châabet El Ballout deposits are subject to resource estimation.

The estimation of the resources in ore of a deposit was made by means of conventional methods but with the development of the mining geostatistics from 1970, geostatistical methods are preferred. These geostatistical methods were applied to the small iron deposits of Anini and Chaabet El Ballout for which a specific approach has been proposed.

The Anini iron ore deposit is located in the north-eastern part of the alpine chain of Algeria north of the town of Setif. the deposit was explored by the National Office of Geological and Mining Research - ORGM (2009-2011). It consists of karstic and lenticular ore bodies of direction N135 °. The estimation of iron resources was made using geological block methods by the ORGM. These resources have been re-estimated by geostatistical method of ordinary kriging. In addition to anisotropy, the variography showed the presence of hole effects in the two main directions of anisotropy - N135 and N45. The directional variograms in these two directions were adjusted using a spherical model with range of 288m and 100m, respectively. The direction of the major axis of anisotropy corresponds to that of the direction of fracturing. The iron deposit of Chaabet El Ballout is located north east of the town of Souk Ahras. This deposit belongs to the Sellaoua scale zone. It was explored by drilling holes in 1992 by the Research mining Company EREM. The geological studies carried out as part of this thesis showed a duplex structure. The iron resource estimate was made using vertical geological cutting methods by the EREM. These resources have been re-estimated by geostatistical method of ordinary kriging, but taking into account the duplex structure. The variograms of "Mineralization bearing horizon thickness" (EHP) and "mineralization coefficient" (CM) show the same zonal anisotropy, where the major axis has a direction N160 ° and the minor axis has a direction N70 °. The directional variograms in these two directions were adjusted using spherical models. The direction of the major axis of anisotropy corresponds to that of the direction of the overlap.

The results of geostatistical estimates were compared with those obtained by conventional methods. The large difference between the resources estimated by conventional methods and those obtained by ordinary kriging is surely caused by the discontinuity of the mineralization:

- In the case of the Anini deposit the discontinuity is regular reflected in the variogram by the presence of hole effects. To take this into account, it was necessary to use a correction coefficient which is the coefficient of mineralization calculated in the horizontal planes.

- In the case of the Chaabet El Ballout deposit, the mineralization is regular in the horizontal plane but discontinuous in the vertical planes because of the duplex structure. The mineralization coefficient was calculated in the vertical plane and was taken into consideration for the correction of the resource estimates. Thus, in order to optimize the estimation of ore resources from karst and breach deposits by geostatistical methods, it is necessary to take into account mineralization coefficients that are similar to a probability coefficient.

KEYWORDS: Iron deposit, karst, duplex, geostatistical estimation, hole effect, mineralization coefficient.

INTRODUCTION

Les indices de minéralisations ferrifères de l'Est algérien se localisent dans différents domaines géologiques de la chaîne des maghrébides (Fig. 1) mais aussi dans l'Atlas Saharien. Le contexte géologique de ces minéralisations ferrifères, à savoir la géologie de la Chaîne des Maghrébides a été étudié par de nombreux auteurs (Durand Delga, 1955; Boullin, 1979; Vila, 1980 ; Wildi, 1983 ; Kazi Tani, 1986; Chadi, 1990). Elle est constituée du Nord au Sud par : le domaine interne, domaine des flyschs, domaine externe de l'avant pays para-autochtone. Ces domaines renferment de petits gisements de fer tels que les gisements d'Anini et de Chaabet El Balout qui appartiennent respectivement à l'ensemble allochtone Sud-Sétifien et les écaillés des Sellaoua (Fig. 1).

Le gisement de Khanguet El Mouhad est localisé dans l'autochtone atlasique saharien.

Ces gisements sont généralement exploités pour satisfaire les besoins des cimenteries.

La recherche de nouveaux gisements de même type, l'estimation optimale des ressources et leurs exploitations rationnelles nécessitent une fine caractérisation géologique et géostatistique et c'est l'objectif fixé dans le cadre des travaux de recherches de cette thèse de doctorat.

Les études géologiques ont été faites sur la base d'une recherche bibliographique, de travaux de terrains et de travaux pétro-minéralogiques au laboratoire.

L'analyse de données a été faite à l'aide de méthodes mono et multivariée (Analyses en Composantes Principales - ACP). Ces méthodes ont permis, entre autres, de quantifier les relations entre les éléments chimiques et oxydes analysés.

Les méthodes géostatistiques ont été utilisées pour caractériser la variation spatiale des minéralisations ferrifères. Dans le gisement d'Anini ces méthodes ont été utilisées pour estimer les dimensions des karsts ainsi que les ressources en fer de ces karsts et « filons ». Une nouvelle approche a été proposée pour l'estimation des ressources de ce type de gisement.

Les résultats de l'ensemble des travaux de recherche sont présentés en deux grandes parties :

- La première partie est subdivisée en quatre chapitres, concernant l'étude géologique de ces trois gisements.
- La deuxième partie est subdivisée en quatre chapitres aussi. Elle porte sur l'analyse de données mono et multivariées et la caractérisation géostatistique – variographie, krigeage et

estimation des ressources. Cette étude géologique – géostatistique des trois petits gisements a permis de conclure sur la géologie, géologie et géostatistique.

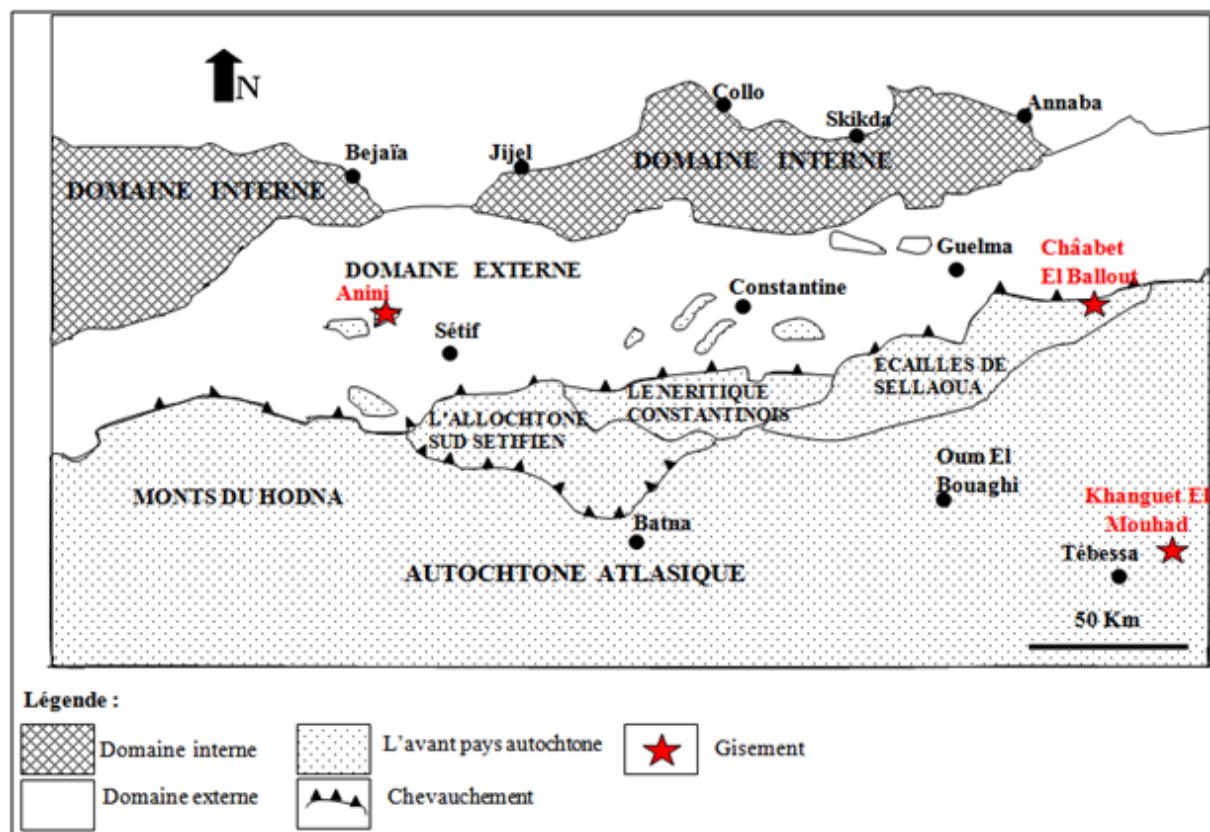


Fig. 1 - Esquisse structurale de l'Est algérien Wildi (1983) et situation des petits gisements de fer.

1. GENERALITE

1. 1. Le minerai de fer

Le fer est l'élément le plus abondant dans l'univers il compose 5 % en masse de la croûte terrestre. La majeure partie du fer dans la croûte est combinée avec l'oxygène, formant des minerais d'oxyde de fer, tels que l'hématite (Fe_2O_3), la magnétite (Fe_3O_4) et la limonite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), avec des teneurs en fer inférieures à 30 %, pour les minerais pauvres, des teneurs comprises entre 30 - 50% pour les minerais moyens et supérieure à 50% pour les minerais riches.

1. 2. Marché du minerai de fer

Les réserves mondiales constituent plus de 170 milliards de tonnes (Fig. 2). En 2015, la production mondiale était de 1,910 milliards de tonne de minerais, dont les cinq principaux producteurs de minerais de fer sont (Fig. 3) : la Chine, le Brésil, l'Australie, l'Inde et la Russie.

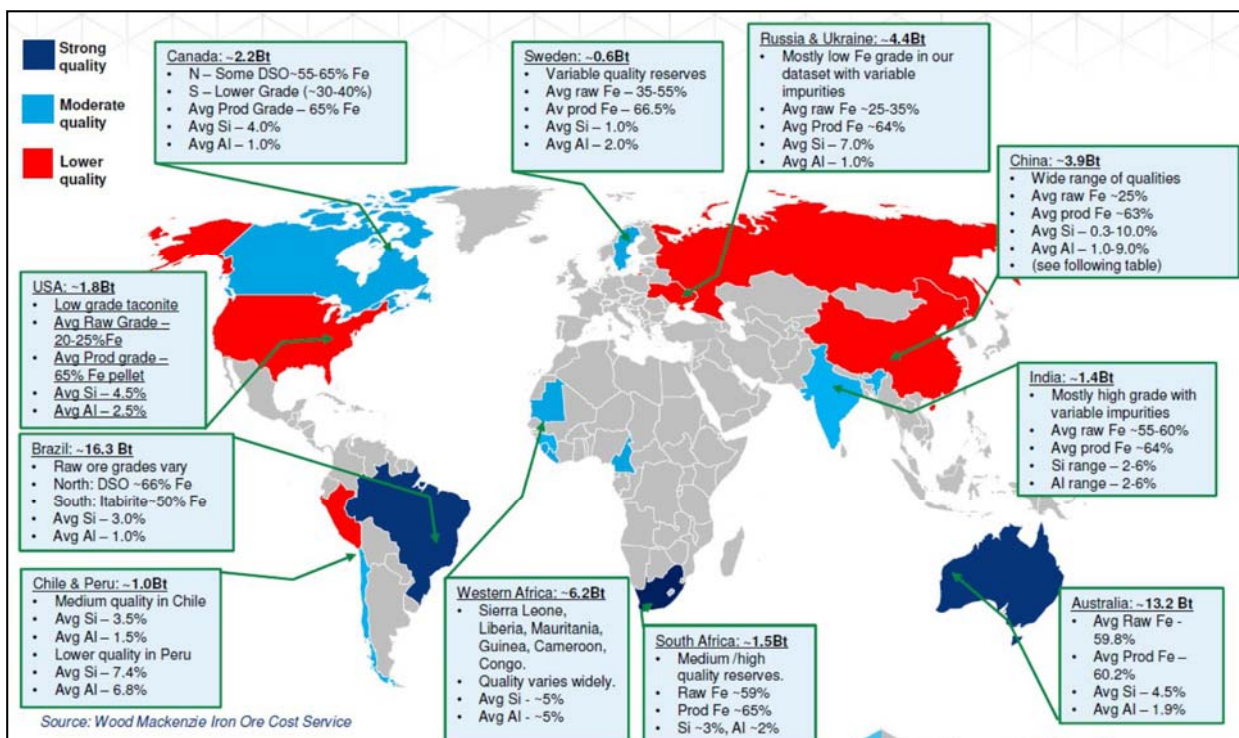


Fig. 2 - Réserves mondiales et estimation de la qualité du minerai de fer dans le monde (source : Wood Mackenzie iron ore cost service, 2015).

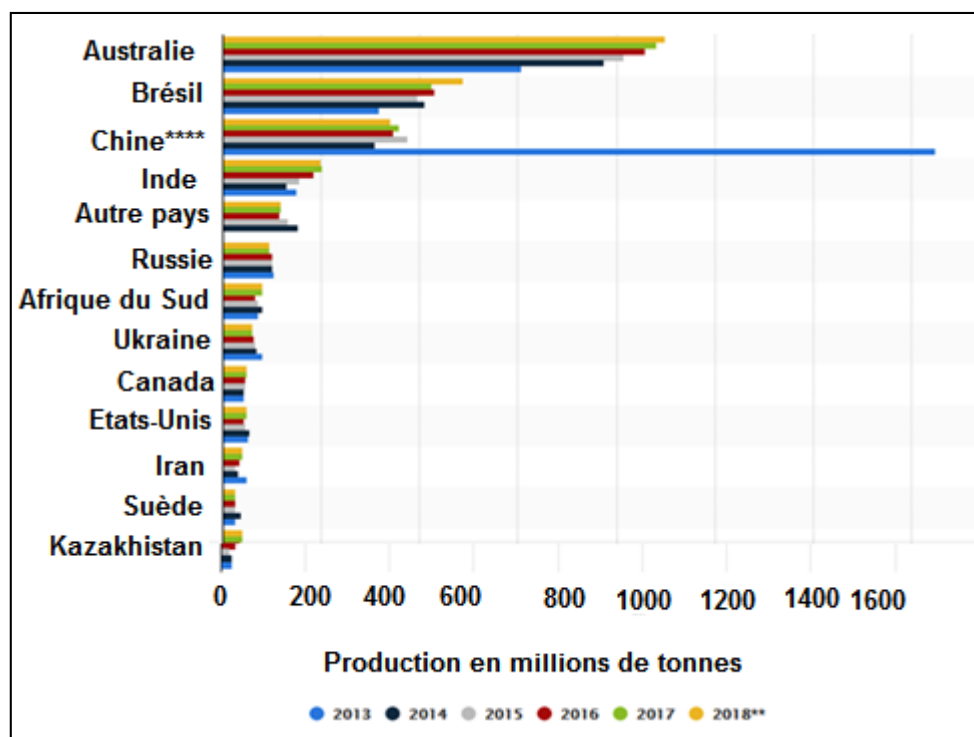


Fig. 3 – Les premiers pays producteurs de minerai de fer

(<https://fr.statista.com/statistiques/570421/production-de-minerai-de-fer-par-pays-2010/>, 30/03/2019).

La forte hausse des prix est due au développement et à la forte demande d'un certain nombre de pays dit émergents. Au cours de ces vingt dernières années, les prix de ce métal ont augmenté de plus de 200%, cependant les prix du minerai de fer se sont effondrés en 2014 (Fig. 4), à l'instar de ceux de la plupart des matières premières. Un facteur est responsable du déclin de celui du minerai de fer, l'inondation du marché par du minerai australien et brésilien à bas prix.

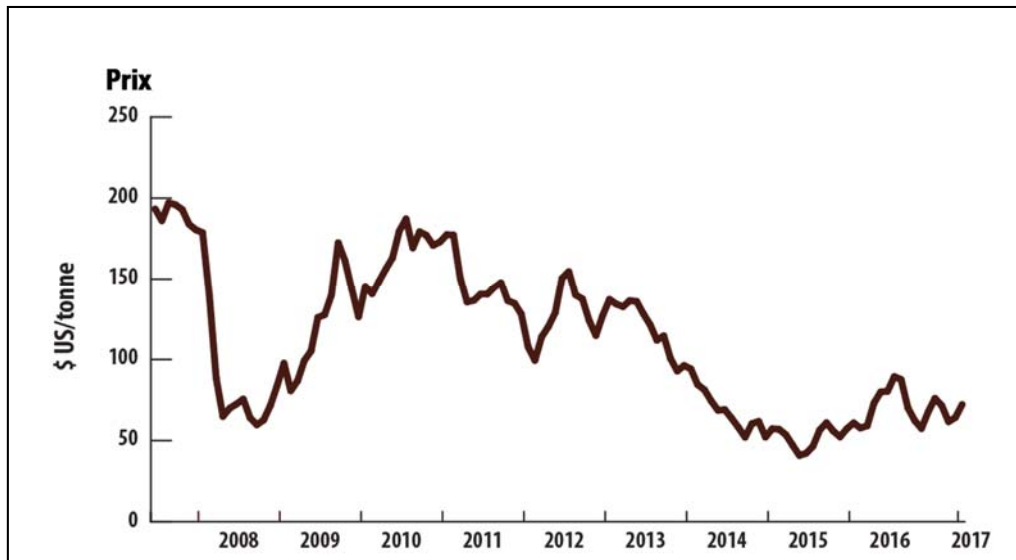


Fig. 4 - Evolution des prix du minerai de fer

(www.rncan.gc.ca/mines-materiaux/faits/minerai-fer/20594, 30/03/2019)

1. 3. Utilisation du minerai de fer

Le fer est largement utilisé dans la technologie et l'industrie sidérurgique généralement sous forme de fonte et acier. On le trouve dans la construction métallique (sous forme de barres dans les charpentes ou d'armatures dans le béton armé), dans l'outillage, dans la construction automobile (carrosserie de voiture), dans l'emballage (boîtes de conserve, canettes) et il est aussi utilisé en électronique pour fixer les informations analogiques sur des supports appropriés (bande magnétique, cassette audio et vidéo). Il est utilisé aussi par les cimenteries comme correcteur.

1. 4. Les gisements de fer en Algérie

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 (Bouaziz, 1992).
- 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 (Bouaziz, 1992). Cependant, ces derniers ne sont pas encore exploités car ils nécessitent de gros investissements. La forte demande a poussé vers le développement de

l'industrie minière de ce métal et la réouverture des petites mines. Les gisements de fer d'Anini, Châabet El Ballout, et khanguet El Mouhad en fait partie.

1. 4. 1. Typologie des gisements de fer

Il existe plusieurs types de gisement de fer tels que les gisements précambriens de type BIF, les gisements de fer oolithique et les gisements de fer dans les roches sédimentaires.

ZITZMANN et NEUMANN (1977) classent les gisements de fer en une dizaine de types, on distingue le type Erzberg et le type Bilbao qui se distinguent par la nature de l'encaissant, la composition chimique du minerai... Ces gîtes se développent essentiellement dans des calcaires ou des dolomies. Les corps minéralisés, le plus souvent oxydés en hématite dans la zone d'altération supergène, présentent des morphologies très variées : stratiforme, en amas plus ou moins lenticulaires, discordants sur les strates, en filons ou corps bréchiques. Les problèmes posés par leur genèse rappellent à bien des égards ceux encore imparfaitement résolus des concentrations de Pb, Zn, Ba, Cu des couvertures sédimentaires.

Le type Bilbao est représenté par les gîtes de la région de Bilbao en Espagne. Les corps minéralisés sont généralement stratiformes ou sous forme de lentilles, rangés suivant une direction NW-SE dans une série sédimentaire du Crétacé. Ils sont portés par des calcaires à faciès urgonien d'âge Albo-aptien riches en rudistes, polypiers (Madre, 1969 ; Gil, 1991). Le minerai composé essentiellement de sidérite et d'ankérite se développe surtout dans les volumes rocheux fracturés. Il contient aussi de la calcite, du quartz et des traces de sulfures, marcacite, chalcopryrite, galène, blende (Gil, 1991).

Popov (1976) a pu donner une classification aux gisements de fer de l'Algérie, en mettant en évidence le type génétique et surtout le domaine tectonique auquel ils appartiennent. Il distingue ainsi six (06) types de gisements distribués dans les principaux domaines.

- 1) Gisements de ségrégation associés aux roches volcaniques acides.
- 2) Gisements du type skarn à magnétite dans des terrains métamorphiques.
- 3) Gisements hydrothermaux filoniens (type filons à sidérite).
- 4) Gisements de substitution dans des roches carbonatées.
- 5) Gisements sédimentaires oolithiques

6) Gisements de remaniement, résiduels, ou dus aux eaux d'infiltration non thermale.

1. 5. Exigences industrielles

Les minerais de fer sont utilisés essentiellement en sidérurgie quand les teneurs sont élevées mais aussi dans les cimenteries quand les teneurs sont supérieures à 35%. Les Cimenteries et l'industrie sidérurgique ont des exigences qui doivent être respectées.

1. 5. 1. Les cimenteries

Les cimenteries utilisent le SiO_2 ou Al_2O_3 , et Fe_2O_3 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 SiO_2 ;
- bauxites pour Al_2O_3 ;
- minerais de fer pour Fe_2O_3 .

Pour que le ciment soit de meilleures qualités, il existe plusieurs normes à respecter sur CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , SO_3 , K_2O , Na_2O et F_2O_3 , ce dernier est exigé à teneur supérieure à 35%.

1. 5. 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 (SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5).

$$I_b = \frac{\% \text{CaO} + \text{MgO}}{\% \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5}$$

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

$$I_b = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2}$$

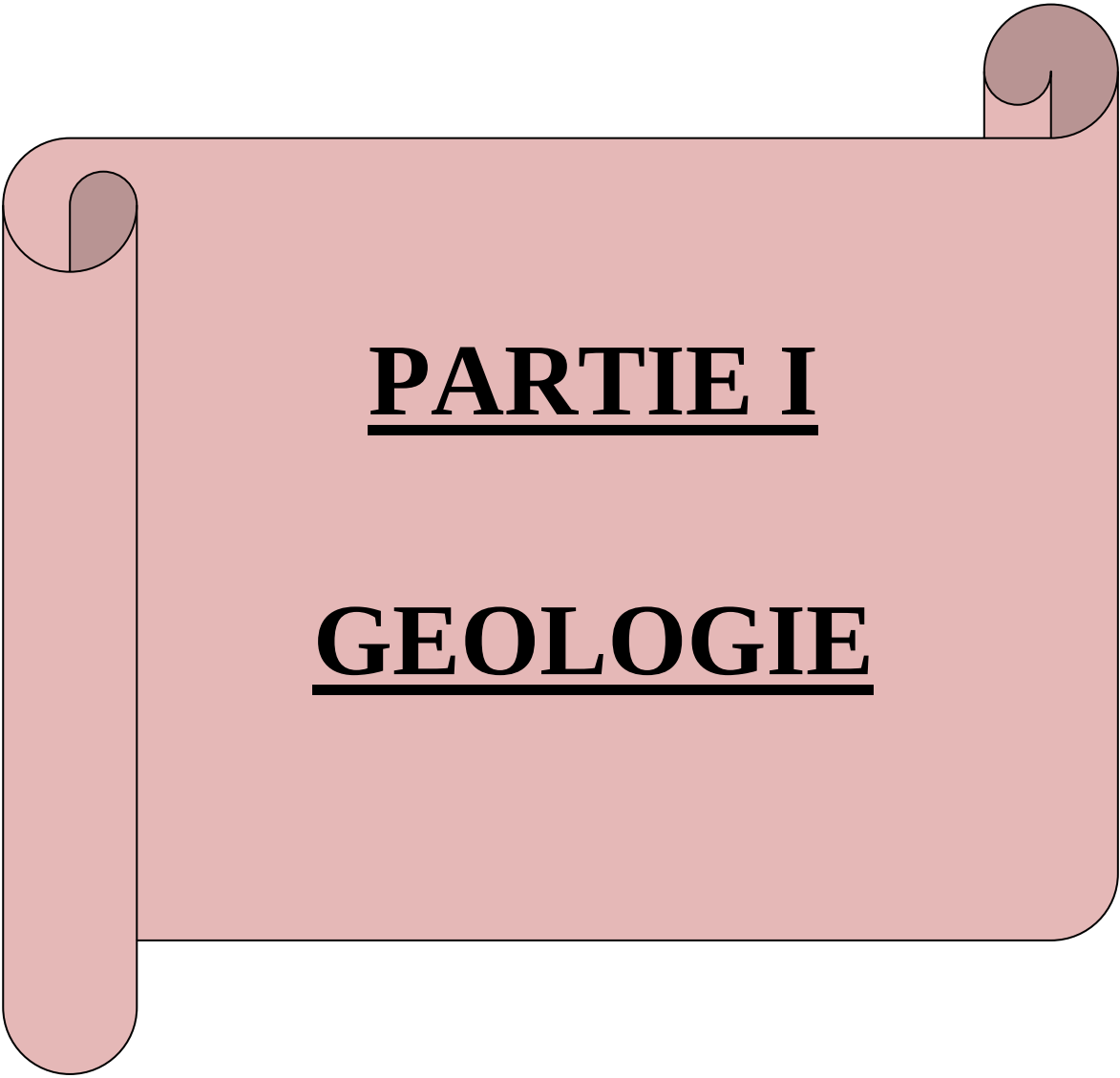
La teneur en fer demandée est égale à 48% avec un indice de basicité égale à 1. Ces deux paramètres sont les indices de qualité les plus importants et sur lesquels les utilisateurs peuvent intervenir pour les améliorer.

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, ci dessous présente l'impact des différentes impuretés contenues dans les minerais de fer sur la qualité de l'acier et les normes exigées.

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

Eléments chimiques nocifs	Effet de l'impureté	Le taux
Phosphore (P)	- 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.	nocif s'il est >0.3%
Plomb (Pb)	- 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	nocif s'il est >0.05%
Soufre (S)	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% -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.	nocif s'il est > 2%

Zinc (Zn)	Existe en faible quantité dans de nombreux minerais. 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. - Pénètre sous forme d'oxydes dans les joints du revêtement réfractaire et le détruit.	Nocif s'il est >0.1
Cuivre (Cu)	- 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)	- Passe en 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 épaisse.	Utilisé comme additif jusqu'à 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	nocif s'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.	nocif s'ils sont >0,3 %
Silice (SiO ₂)	- diminue la fusibilité du minerai	nocif s'il est >10 %



PARTIE I

GEOLOGIE

GEOLOGIE DE LA CHAÎNE DES MAGHREBIDES ET DE L'ATLAS SAHARIEN ORIENTAL

1. 1. Géologie de la chaîne des Maghrébides

La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogène alpin péri-méditerranéen (Durand-Delga, 1969) d'âge Tertiaire. Elle s'étend du détroit de Gibraltar jusqu'au Nord de la Calabre sur 2000 km de long (Figs. 1, 5 et 6).

1. 1. 1. Les domaines de la chaîne des Maghrébides

Cette chaîne, en forme d'anneau très aplati, est constituée classiquement des domaines suivants: domaine interne, domaine des flyschs, domaine externe et l'avant pays para-autochtone.

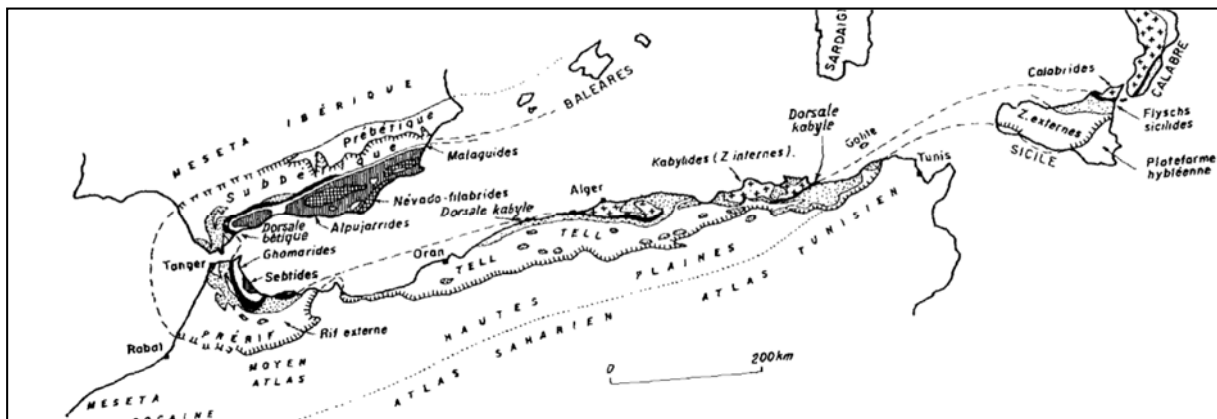


Fig. 5 - L'orogène alpin péri-méditerranéen (Durand-Delga, 1969).

a). Le domaine interne

Ce domaine interne est composé des massifs cristallophylliens métamorphiques (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes), d'un ensemble sédimentaire paléozoïque (Ordovicien à Carbonifère) peu métamorphique et de la dorsale calcaire ou dorsale kabyle. Le socle est par endroits recouvert, en discordance, par des dépôts détritiques (principalement des molasses conglomératiques) d'âge Oligocène supérieur-Miocène inférieur, appelés Oligo-Miocène Kabyle (OMK). Du point de vue lithologique, les formations de cette dorsale allant du Permo-Trias au Lutétien (Raoult, 1969). Du côté Sud, un contact anormal sépare la Dorsale kabyle du domaine des flyschs. Les formations du domaine interne chevauchent, vers le sud, le domaine des flyschs et le domaine externe tellien (Fig. 6).

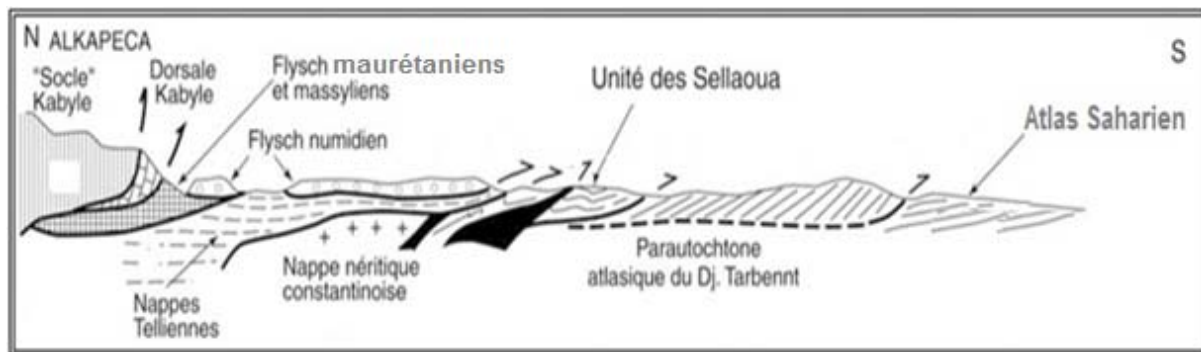


Fig.6 - Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien (région du constantinois) (Peybernes et al., 2002)

b). Le domaine des flyschs

Ce domaine est constitué par des nappes de flyschs crétacés-paléogènes qui affleurent dans les zones littorales sur 800 km de long, entre Mostaganem et Bizerte (Tunisie). Il s'agit essentiellement de dépôts de mer profonde mis en place par des courants de turbidités. On distingue trois grands groupes de flyschs: les flyschs maurétaniens au Nord, les flyschs massyliens au Sud et les flyschs numidiens qui recouvrent, entre autre, les deux premiers. Les flyschs numidiens d'âge Oligocène supérieur – Burdigalien inférieur sont les plus récents.

• Les flyschs maurétaniens

Ces flyschs sont composés d'alternances de bancs argileux, calcaires et gréseux. La série débute par des radiolarites rouges du Dogger-Malm et elle se termine par des niveaux conglomératiques du Paléocène (Gelard, 1969. Bouillin, 1977).

• Les flyschs massyliens

Ils sont représentés par une alternance de pélites et de grès d'âge Crétacé inférieur, surmontée par des niveaux de phtanites du Cénomaniens. Au sommet de la série, on y rencontre un ensemble marno-microbréchtique sableux d'âge Crétacé supérieur (Raoult, 1969. Bouillin, 1977).

• Les flyschs numidiens

Ils sont constitués par une trilogie de faciès qui sont de bas en haut (Vila, 1980) :

- Des argiles varicolores (argiles sous Numidiennes) à Tubotomaculum (Oligocène supérieur);
- Puis, des grès épais en gros bancs à quartz bien roulés ;
- Enfin, des formations supra numidiennes, marneuses, admettant des silexites, qui atteignent le Burdigalien ;

Ces flyschs reposent anormalement à la fois sur les zones internes et sur les zones externes.

c). Le domaine externe

Le domaine externe appelé aussi tellien est constitué par un empilement complexe de nappes allochtones surmontant au Sud l'autochtone présaharien. Il est formé principalement de marnes d'âge Crétacé moyen à Néogène et qui ont été charriées sur une centaine de km vers le Sud. On distingue du Nord au Sud :

- **Les nappes ultra-telliennes**

La dénomination d'ultra tellien a été proposée par Durand-Delga, (1969) aux formations bathyales du Crétacé et de l'Eocène et une série plus détritique au Sénonien et à l'Eocène, les nappes ultra-telliennes ne sont connues que dans l'Est algérien et en Tunisie.

- **Les nappes telliennes sensu-stricto (S.S)**

Ces unités telliennes reposent au Sud sur l'avant pays para-autochtone, et au Nord sont chevauchées par les nappes ultra-telliennes. L'ensemble telliens sensu-stricto Est formé de Lias de plate-forme surmonté de Jurassique plus marneux, puis par le Crétacé marneux à argilo-calcaire et enfin, l'Eocène aux marnes épaisses.

- **Les nappes péni-telliennes**

Généralement, elles sont surmontées tectoniquement par les nappes de l'unité tellienne S.S. Les nappes péni-telliennes sont composées des séries néritiques du Crétacé à l'Oligocène sont carbonatées et marneuses.

d). L'avant pays para-autochtone

Ce sont des séries localement écaillées qui supportent les nappes du tellien externe au Nord et qui surmontent l'autochtone Nord-aurésien. D'Ouest vers l'Est on distingue :

- **L'ensemble allochtone Sud-Sétifien**

Cette zone a été décrite par Vila (1980). Les terrains correspondants apparaissent en fenêtre tectonique sous les nappes du tellien au Nord ; c'est le cas des Djebel Guergour et Anini au Nord-Ouest de Sétif (Fig.1). Ces séries comportent un Jurassique inférieur qui devient carbonaté vers le Dogger et le Malm. Le Crétacé inférieur est calcaro-dolomitique pendant le Barrémien, marneux à Ammonites durant l'Aptien-albien. Le Sénonien inférieur est peu épais, le Sénonien supérieur est représenté par de minces niveaux sparitiques. L'Eocène est présent sous un faciès très littoral, avec des galets (In Chouabbi 1987).

- **Le néritique constantinois**

Il est constitué par le Trias à la base comportant des calcaires vermiculés et un ensemble grés-pélique. Puis, un Jurassique calcaro-dolomitique et un Crétacé calcaire devenant marneux au sommet. La série se prolonge par un Paléocène marneux et un Eocène marneux riche en Huîtres (In Chouabbi 1987).

1. 1. 2. Evolution géodynamique

Le domaine interne de la chaîne des Maghrébides faisait partie d'un micro- continent appelé AlKaPeCa (pour Alboran, Kabylies, Paloritain et Calabre qui sont les différents massifs internes de l'orogène péri- méditerranéen) qui était situé beaucoup plus au Nord et appartenait à la marge européenne (Fig. 7). La dorsale kabyle constituait la marge méridionale et le talus continental de ce bloc. Les flyschs se sont déposés dans le bassin océanique profond qui séparait la marge européenne (ou le bloc AlKaPeCa) et la marge africaine. Les flyschs maurétaniens se sont déposés au pied de la dorsale kabyle et sont alimentés par les zones internes. Les nappes telliennes correspondent à la couverture sédimentaire qui s'est déposée sur la marge Nord de la plaque africaine (Fig. 7). Les flyschs massyliens se sont déposés au pied de la marge africaine et sont alimentés par les zones externes.

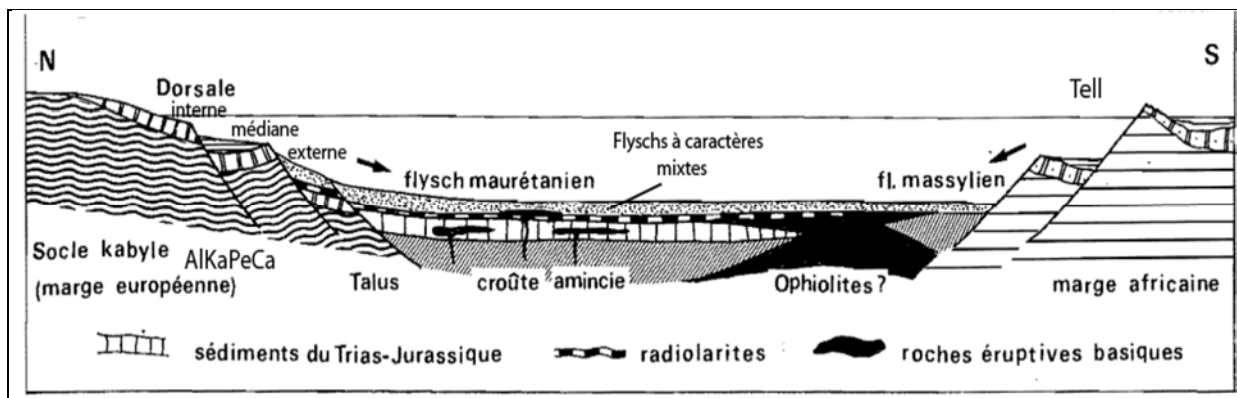


Fig. 7 - Reconstitution paléogéographique des différents domaines des Maghrébides au Crétacé inférieur (Bouillin, 1986).

Les deux domaines externe et interne se sont affrontés suite au rapprochement des plaques africaine et européenne. Ceci a conduit à la fermeture du bassin des flyschs, et celle du sillon tellien, l'écaillage de la dorsale kabyle et le déplacement des flyschs et des unités telliennes en nappes pelliculaires loin vers le Sud (Fig. 8).

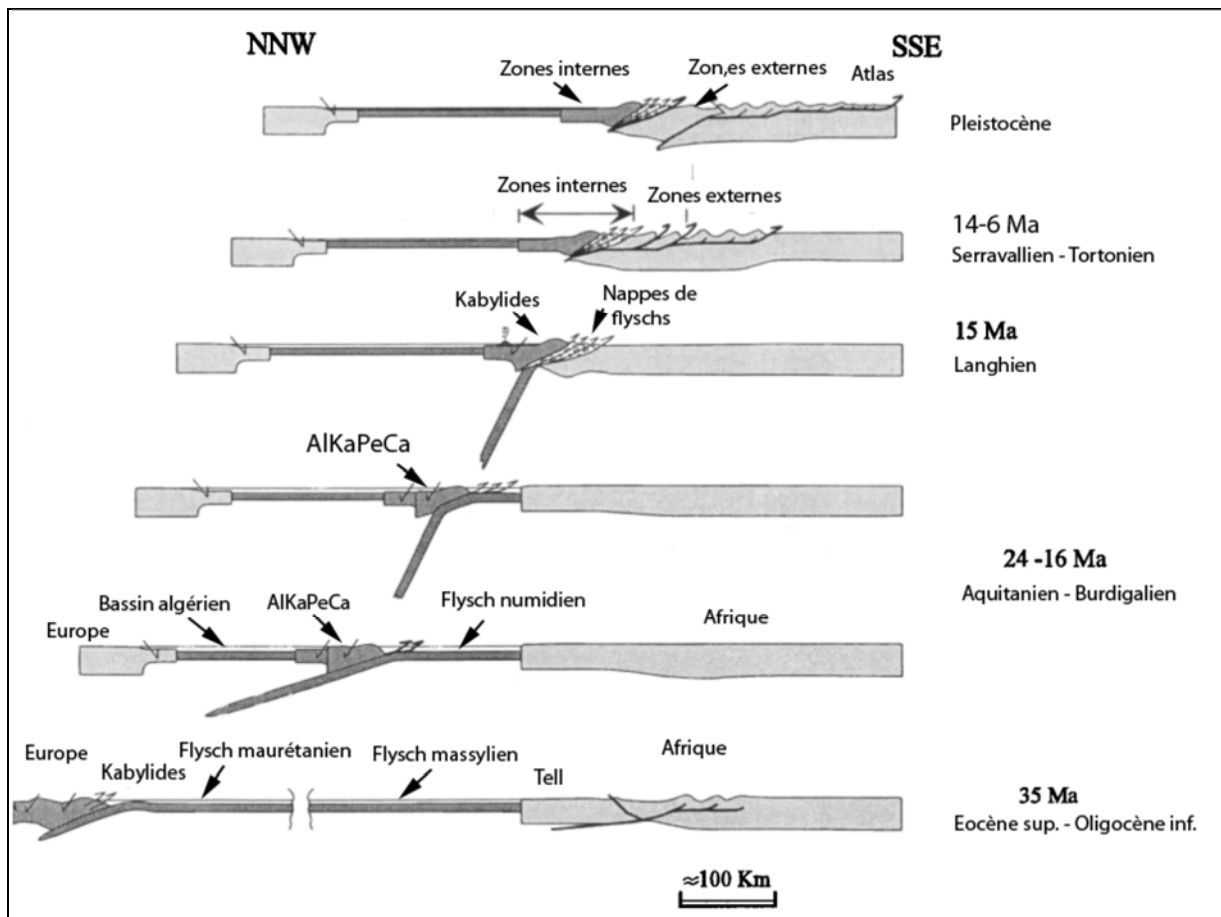


Fig. 8 - L'évolution de la Méditerranée Occidentale sur un transect NNO/SSE allant des Baléares à la plate-forme saharienne (Frizon de Lamotte et al., 2000).

1. 1. 3. Magmatisme

Ces roches magmatiques sont présentes dans les zones côtières à l'ouest d'Oran, dans les régions de Cherchell, Dellys et Thénia, autour de la baie de Bejaia, dans le massif de Collo, et entre Skikda et Annaba (Fig. 9).

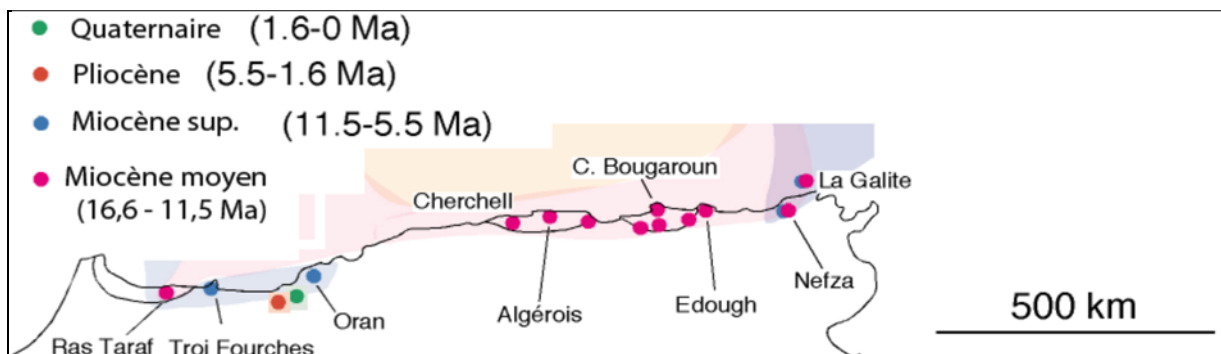


Fig. 9 - Répartition et âge du volcanisme récent en Afrique du Nord (Rosenbaum et al., 2002).

Aucune étude ne montre le rôle du magmatisme dans la mise en place des minéralisations ferrifères d'Anini, Chaabet El Ballout et Khanguet El Mouhad.

1. 2. L'atlas saharien oriental

L'atlas Saharien forme l'avant pays de la chaîne des Maghrébides, résultant de la fermeture de la Téthys (Bouillin 1986). Séparé dans sa partie méridionale de la plateforme Saharienne par l'accident Sud atlasique. Il est composé de trois faisceaux de plis organisés en échelons et formant du SW vers le NE ; les Monts des Ksour, le Djebel Amour, les Monts de Ouled Nail, les Aurès et les Monts de Mellègue (Lounis, 2003) (Fig. 10). Il est bordé par deux accidents majeurs ; l'accident Nord Atlasique et l'accident Sud Atlasique. L'atlas saharien oriental est constitué d'une suite d'anticlinaux et de synclinaux coffrés à flanc Sud très redressé et à fond plat. L'orientation de ces plis est ENE-WSW dans la région des Nemenchas et dans les Monts de Mellègue où se trouve le petit gisement de fer de Khanguet El Mouhad.

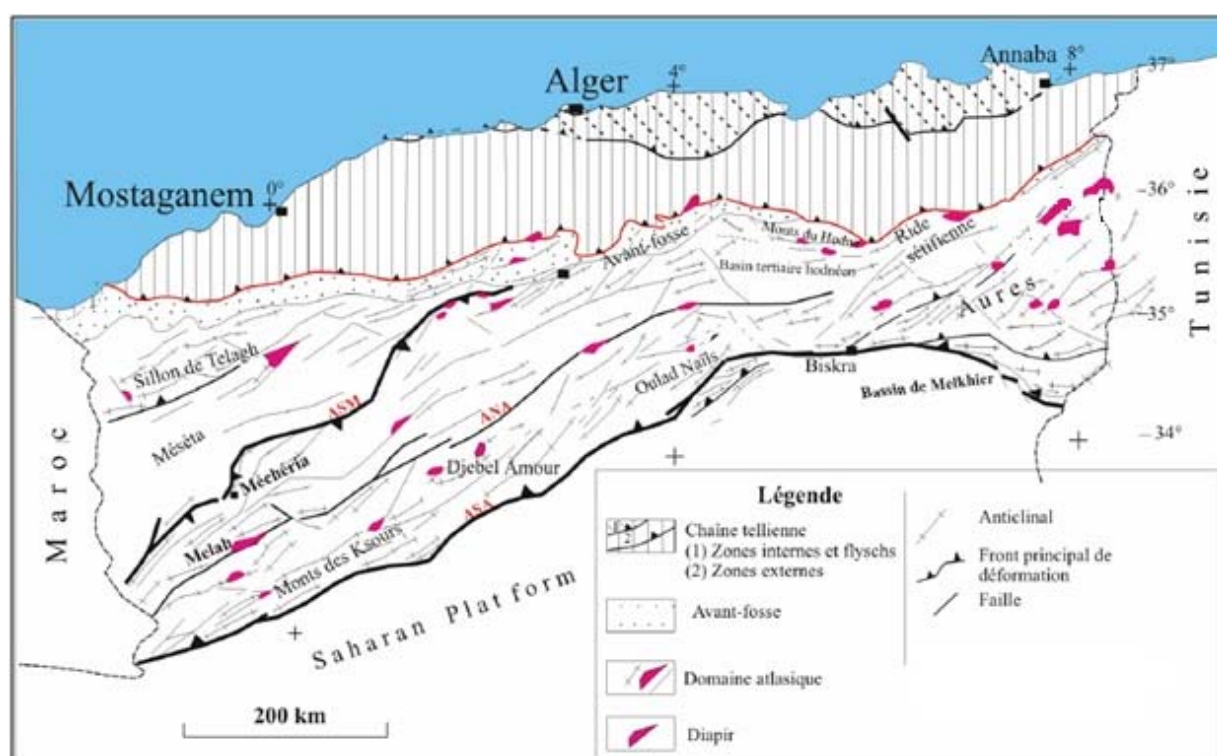


Fig. 10 - Principaux ensembles structuraux de l'Afrique du nord (Bracène *et al.*, 2002).

Il s'agit principalement de dépôts méso-cénozoïques et de divers recouvrements épicontinentaux et continentaux quaternaires. L'ensemble de ces formations est percé par les formations du Trias à faciès lagunaire (Fig. 11). Les manifestations magmatiques sont représentées par les ophites qui contiennent les formations évaporitiques du Trias.

		Lithologie	Epaisseur (m)	Description lithologique
CENOZOIQUE	Quaternaire		⑥ 10-30	Dépôts clastiques d'origine continentale.
	Néogène		⑤ 10-150	Conglomérats à grains variés avec un ciment carbonaté, grès quartzeux et calcaire sableux avec intercalations d'argilites.
	Eocène		200	Calcaires marneux à silex et intercalations de phosphates par endroits dans le mur.
	Paléogène		250-300	Calcaires gris clairs, calcaires crayeux et marnes argileuses avec intercalation d'argiles dans la partie supérieure.
			500-600	Marnes argileuses gris-foncées et des calcaires blancs dans la partie moyenne et supérieure.
			500-600	Marnes argileuses grises et grises bleuâtres.
			180-250	Calcaires en bancs, partiellement marneux à teinte noire et gris-foncée.
			900-1000	Marnes gris-verdâtres et grises dans la partie supérieure, avec intercalations de calcaires marneux.
			500-600	Marnes et marnes-argileuses avec intercalations de calcaires argileux et argilites.
			480-600	Marnes grises et gris-foncées, noires dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.
			100-200	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations de calcaires.
			300-600	1- Faciès clastique, marnes argileuses avec intercalations de marnes sableuses et grès calcaires. 2- Faciès carbonaté, calcaires organo-détritiques, bioclastes, ooclastes et interclastes.
			< 250	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès à Mesloula).
	Jurassique		?	?
	Trias		< 700	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins, dolomies et calcaires marno-dolomitique.

Fig. 11 - Colonne lithostratigraphique synthétique des monts du Mellègue et les périodes d'activités diapiriques. (Dubourdieu 1956, 1959; David 1956; Madre 1969; Fleury 1969; Thibieroz et Madre 1976; Chikhi 1980; Otmanine 1987; Bouzenoune 1993 et Vila et al.,)



Encaissant de la minéralisation de Khanguet Al Mouhad.

2. GEOLOGIE DU GISEMENT D'ANINI

Le gisement d'Anini fait partie de l'unité allochtone Sud Sétifienne, il est situé à une quarantaine de kilomètres au Nord-Ouest de la ville de Sétif, à 9 km à l'Est-Sud-Est de la ville de Bougaa et au Sud d'Ain Roua. (Fig. 12).

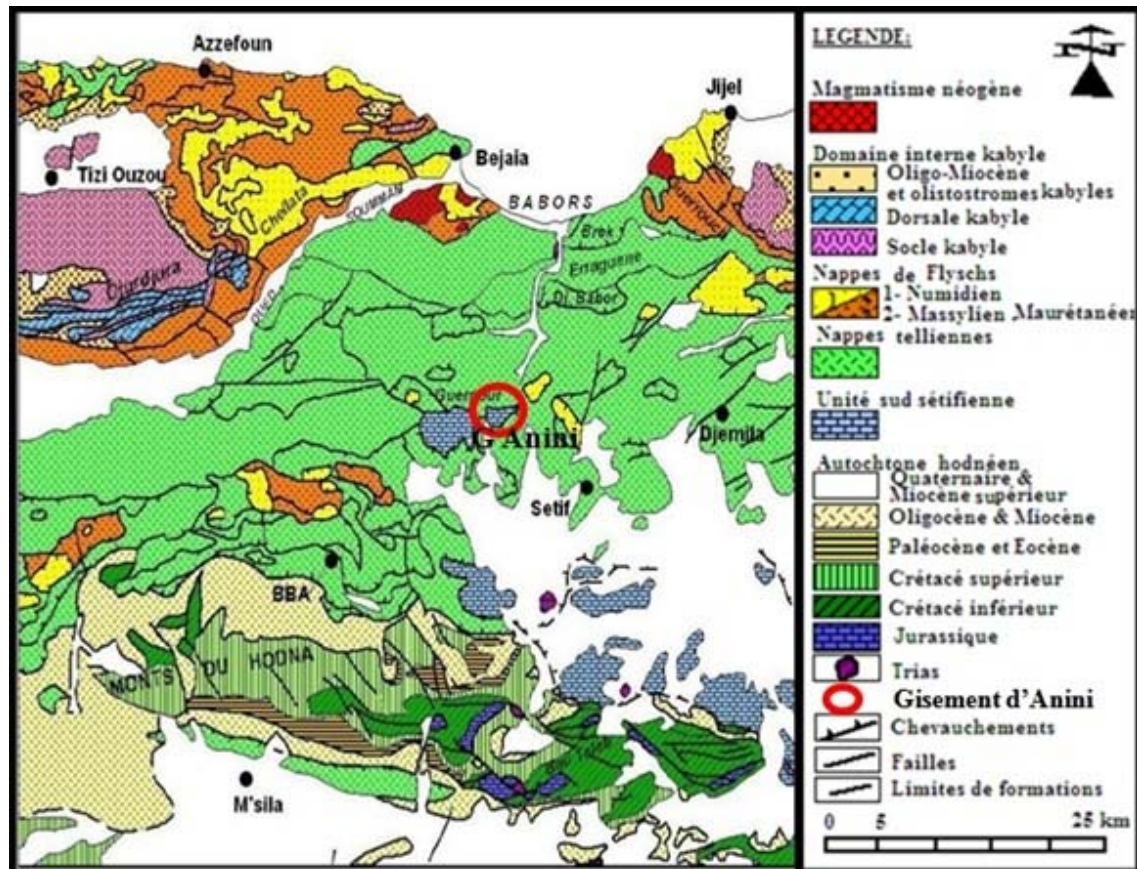


Fig. 12 - Carte structurale de la région nord orientale de la chaîne tellienne et situation du gisement d'Anini (d'après W. Wildi, 1983 simplifiée par A. Boutaleb, 2001).

2. 1. Lithostratigraphie

Le Djebel Anini fait partie des unités composant l'ensemble allochtone Sud Sétifien et il se présente sous forme d'anticlinal dont l'axe est orienté Est-Ouest (Glaçon, 1967 ; KaziTani, 1986; Popov, 1976; Vila, 1980) et les géologues de la SONAREM (Slavko et al. 1968 ; Mikrichiane, 1978) de l'EREM (Bujakowska et al.,1989) et de L'office National de Recherche Géologique et Minière (ORGM) (ORGM (1991)- Outemzabet (1994)- Ouahioune, et al. (2009-2011)) (Fig. 13).

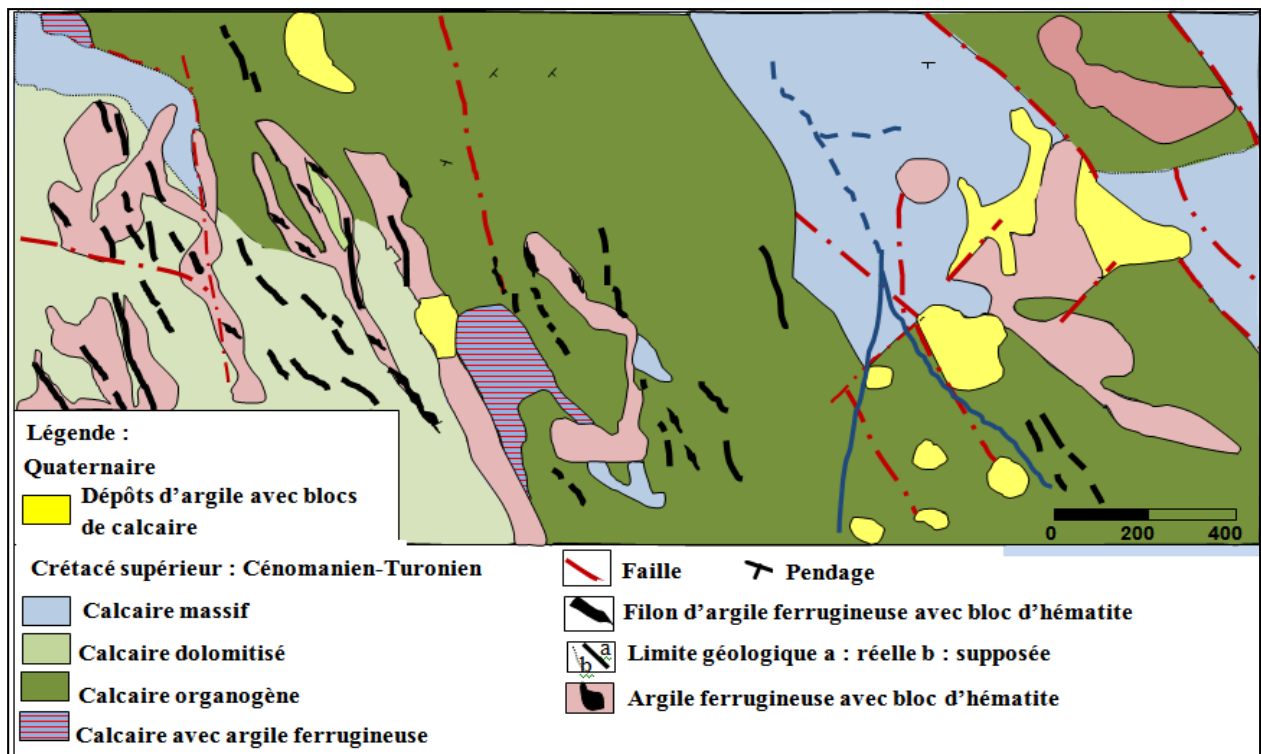


Fig. 13 - Carte géologique de la partie Nord Est du gisement d'Anini (Ouahioune et al 2009 ; 2011).

Le cœur est formé par des calcaires massifs turoniens à pendage de 10° à 25° vers le sud (Bendali, 1989). Les dépôts qui constituent le gisement sont des sédiments de la série néritique d'âge sénonien et quaternaire (Fig.14).

2. 1. 1. Jurassique

Il est représenté par une formation dolomitique, monotone, et azoïque de couleur pale, d'une puissance de 300 m environ, surmonté par des marnes valangiennes à Ammonites.

2. 1. 2. Crétacé inférieur

a- Néocomien : Il s'agit d'un ensemble complètement marneux, ou argileux à pélites schistosées intercalé de petits bancs de calcaires à calcaro-marneux, avec des Ammonites pyriteuses à la base.

b- Barrémien : le barrémien est constitué par des formations carbonatées : à la base des calcaires à Orbitoline. Au sommet, la formation marneuse est plus carbonatée.

c-Aptien : Il est formé de calcaires massifs à Orbitoline de 150m d'épaisseur.

d-Albien : Il est constitué par des formations marneuses jaunâtres et des intercalations marno-calcaires d'une épaisseur de 160m.

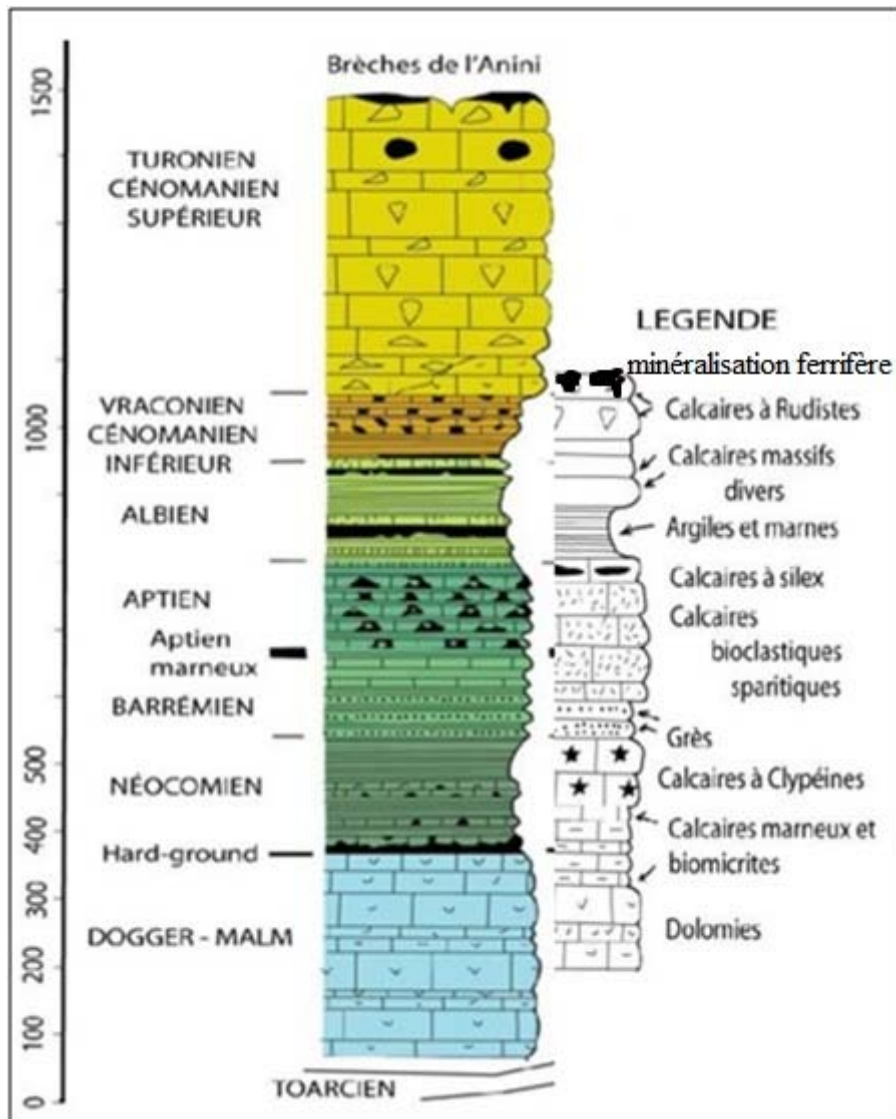


Fig. 14 - Colonne lithostratigraphique du Djebel Anini et Guergour (Vila, 1980).

2. 1. 3. Crétacé supérieur

a-Vraconien : Sa base est bien visible au NW du Djebel Anini, son épaisseur est de 50m, il est constitué de marnes de couleur noirâtre à grisâtre à la base, des calcaires et calcaires marneux vers le sommet.

b- Cénomaniens- Turonien : Sa puissance est d'environ 450m, le Cénomaniens correspond à une masse carbonatée riche en débris d'organismes, il est constitué de calcaire massif cristallin, dolomitique stratifié par endroits. La base de cette formation renferme des calcaires

massifs sparitiques et zoogènes contenant des Orbitolinaconica (Vila, 1980) et passe à des faciès micritiques à Nezzazata en haut, et plus haut encore la série correspond à la disparition des espèces cénomaniennes et l'apparition des Hippuritides indiquant le Turonien.

c- Sénonien : Il est formé d'une alternance de marnes et de calcaires marneux en bancs métriques, contenant des oxydes de fer et des brèches d'Anini Vila (1977).

2. 2. Tectonique

Le Djebel Anini affleure sous forme d'une fenêtre tectonique sous les dépôts de la nappe de Djemila (Fig.12).

Vila (1980), a défini deux types de déformations (Fig. 15) qui ont affecté ce massif :

a- Contacts anormaux plats

- Contacts anormaux entre les diverses nappes telliennes, qui sont purement tectoniques.
- La limite entre les carbonates du sud sétifien et les nappes telliennes.

b- Réseau de failles : classé en trois familles de failles subverticales

- Les plus récentes affectant toute la série, y compris le Mio-Pliocène continental.
- Celles qui sont contenues exclusivement dans les nappes allochtones et qui caractérisent les contacts anormaux plats.
- Enfin, celles qui n'affectent que la masse carbonatée d'Anini.

Glaçon (1967) a signalé que l'édification des karsts est dirigée globalement selon la direction de ce dernier système.

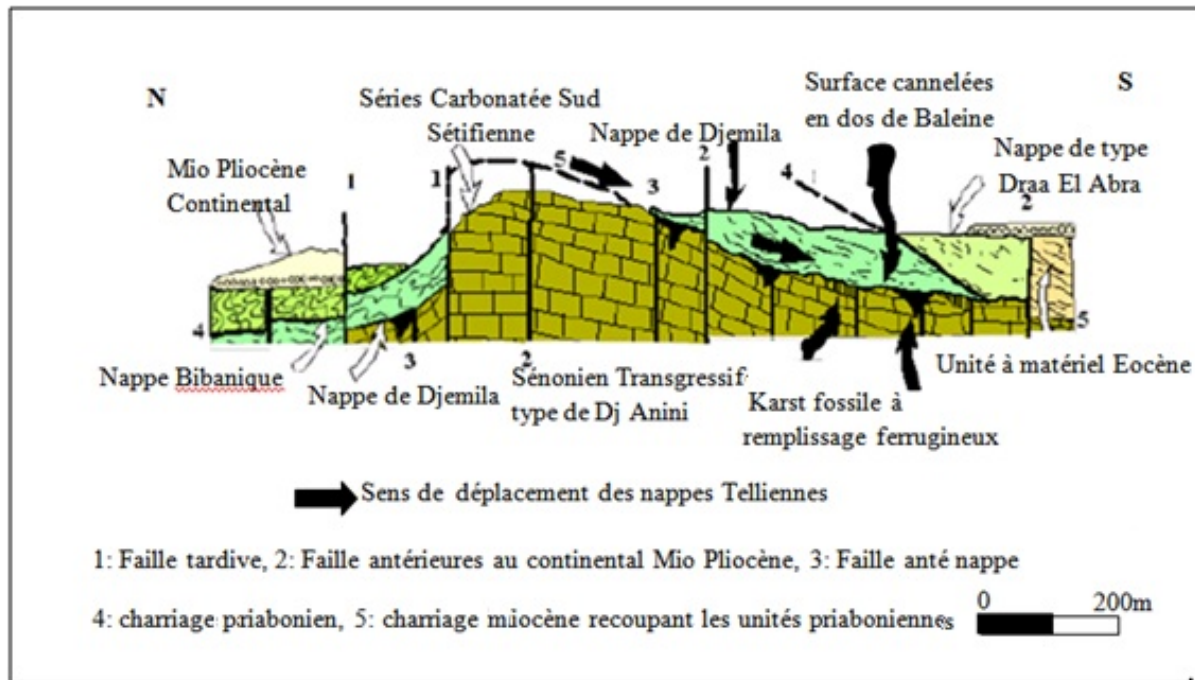


Fig. 15 – Coupe géologique simplifiée mettant en évidence les différents types d'accidents visibles dans le secteur des Djebels Guergour et Anini (Vila, 1980).

2. 3. Minéralisation

2. 3. 1. Composition minéralogique

La minéralisation de Djebel Anini présente des associations minérales simples à savoir macroscopiquement comme les hydroxydes et oxydes de fer « goethite, hématite », et des minéraux de gangus.

a). Les minéraux ferrifères

- **Hématite (Fe_2O_3)**: Elle est de couleur parfois gris foncé, ou noir, parfois rougeâtre, à éclat submétallique. Elle se rencontre souvent en masses homogènes (Fig. 16).

- **Goethite $\text{FeO}(\text{OH})$** : C'est le principal minéral du gisement, macroscopiquement de couleur sombre ou noir, à éclat submétallique, lisse au touché, dense, il apparait en différentes textures (mamelonnée, en stalagmites et stalactite ou parfois massive). Au microscopique, il se caractérise par ces réflexions internes rouges et sa texture collomorphe observée en sections polies (Fig. 17).

- **Limonite $\text{FeO}(\text{OH}), n\text{H}_2\text{O}$** : elle donne des ocres jaunes à orange, peu abondante sur le terrain.

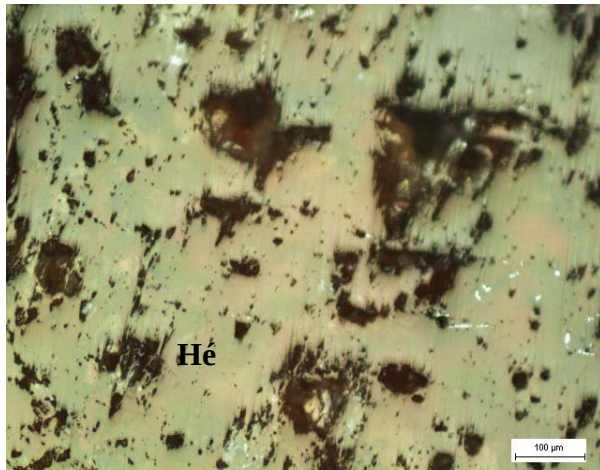


Fig. 16 – Hydroxyde de fer Hé : Hématite lumière réfléchie, LP.

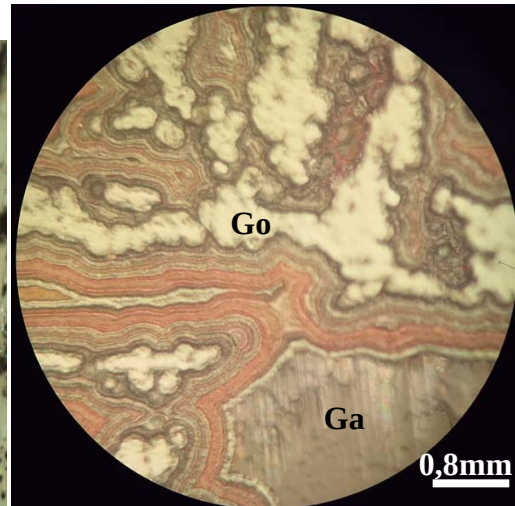


Fig. 17 -Texture collomorphe Go: Goethite Ga : Gangue, lumière réfléchie, LP.

b). Les sulfates

- **Barytine** : Elle a été observée à un seul niveau, elle est de couleur rosâtre associée à des oxydes-hydroxydes de fer (Fig. 18).

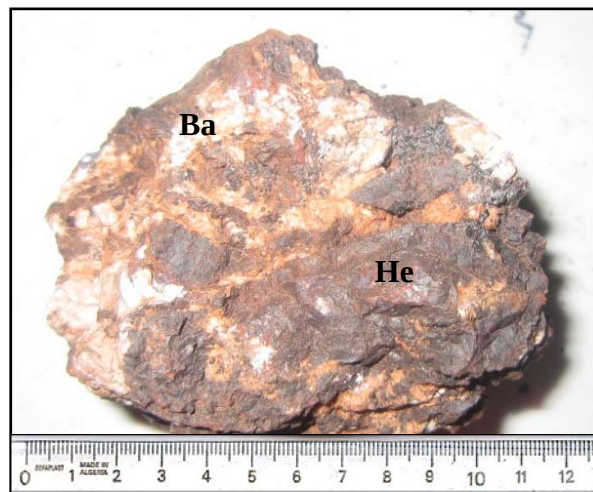


Fig. 18 - la barytine avec le minerai de fer.

Microscopiquement elle est caractérisée par son relief fort, de couleur blanche à grisâtre, se présente sous forme de gerbes (Fig. 19), elle est cimentée par les oxydes et hydroxydes de fer.

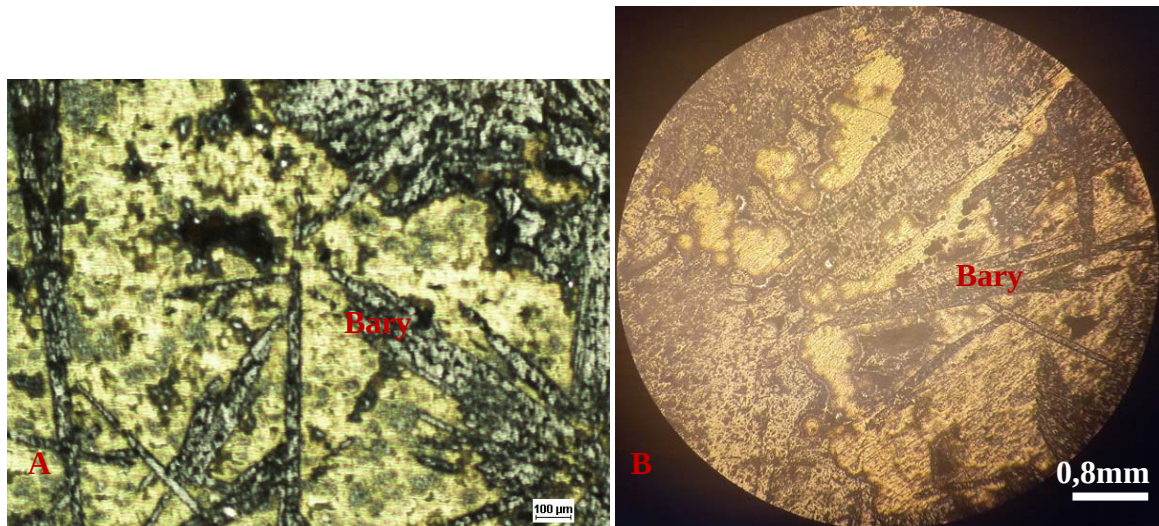


Fig. 19 (A, B) - Barytine (Bary) en gerbes. lumière réfléchie, LP.

c). Les sulfures

Ils sont très rares, les études antérieures ont mentionné l'existence de la pyrite et de la marcasite. On note probablement la présence de la stibine sur une section polie (Fig. 20) puisque (Bendali, 1989) a confirmé la présence de l'antimoine avec une teneur de 1% dans les analyses, donc il est recommandé de faire des analyses chimiques pour confirmer sa présence.

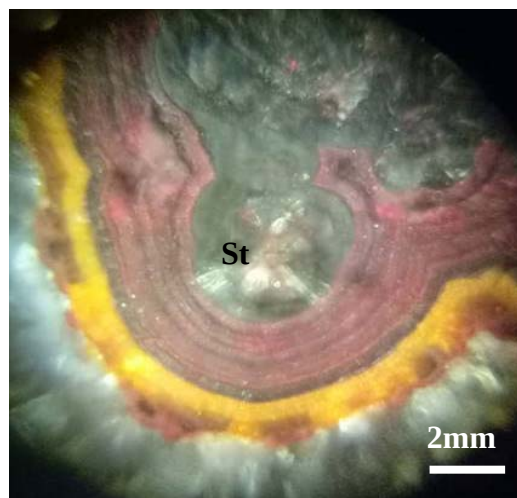


Fig. 20 – La stibine à l'intérieur de la goethite, St : stibine, lumière réfléchie.

d). Les minéraux de gangues

Les minéraux de gangue sont : le quartz et la calcite, et l'aragonite. La calcite est plus fréquente, elle se présente en gros cristaux rhomboédrique au sein des calcaires et du minerai en filon remplissant les fractures et les vides dans les calcaires.

2. 3. 2. Texture des minéralisations

Le gisement de fer du Djebel Anini est constitué par une série de karsts de forme lenticulaire étirée dans la même direction que celle des failles NNW-SSE. Ces corps de minerais karstiques sont le résultat du remplissage des fractures et failles (Fig. 21 et 22) par des solutions ferrugineuses.

Les textures de minerai sont diverses (Figs. 23, 24, 25), parmi les plus importantes : la texture massive, collomorphe (Fig. 23), rubanée, alvéolaire (Fig. 24), stalactites et stalagmites (Fig. 25), géodique, tachetée, veinulée.



Fig. 21- Filon de minerai de fer de direction NNW-SSE.



Fig. 22 - Karst de forme ovoïde à contour irrégulier.



Fig. 23 - Texture collomorphe.



Fig. 24 - Texture alvéolaire



Fig. 25 - (a, b) Texture en stalactite et stalagmite.

2. 3. 3. Encaissant de la minéralisation

La minéralisation est encaissée dans les formations d'âge Céno-mano-Turonien. L'étude de terrain a permis de déduire trois types de roches qui sont les dolomies saccharoïde, les calcaires sparitiques et calcaires micritiques.

a) Les dolomies: Ces dolomies sont plurimétriques, de couleur claire à jaunâtre, rouge violacé, renfermant des veines de calcites, elles disparaissent au fur et à mesure qu'on remonte dans la série Céno-mano-Turonienne. Au microscope, les dolomites sont équi-granulaires dont la taille des grains est presque la même (Fig. 26).

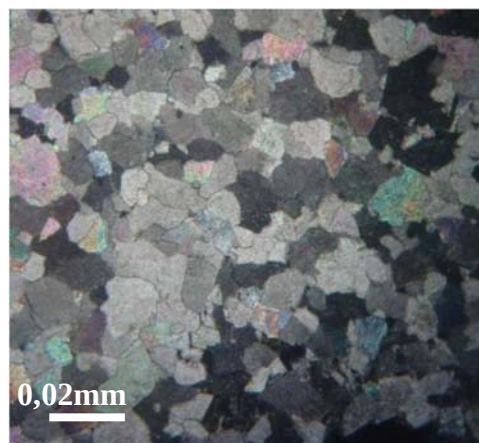


Fig. 26 - Dolomies à grain fin. PA.

b) Calcaire sparitique : Ces calcaires sont les plus répandus dans la série Céno-mano-Turonienne, de couleur gris clair, contenant des sections de gros fossiles à la surface (Fig. 27). Au microscope la microfaune est abondante: des Orbitolinides, prismes de radiolitides (Fig. 28).



Fig. 27- Calcaire sparitique riche en Rudistes

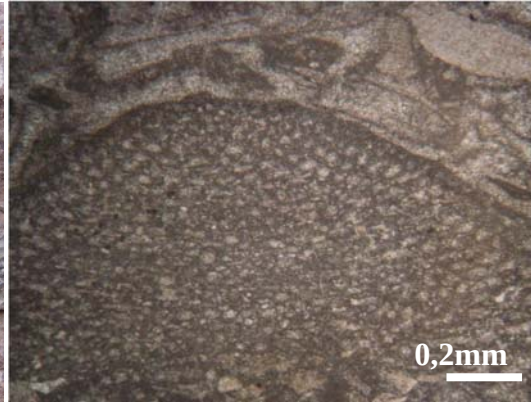


Fig. 28 - Orbitoline dans un calcaire grainstone. LP.

c) Calcaire micritique: Ces calcaires contiennent beaucoup de macrofaune. Au microscope la microfaune est abondante principalement des Miliolites et Textularias (Fig. 29), ces calcaires micritiques contiennent des veinules de calcites contenant des oxydes de fer (Fig. 30).

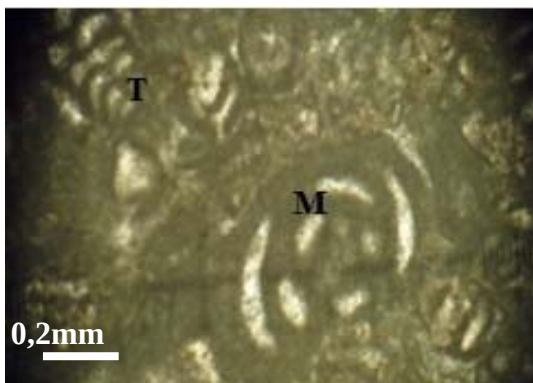


Fig. 29 - Calcaire micritique fin Miliolites et Textularias, LP.

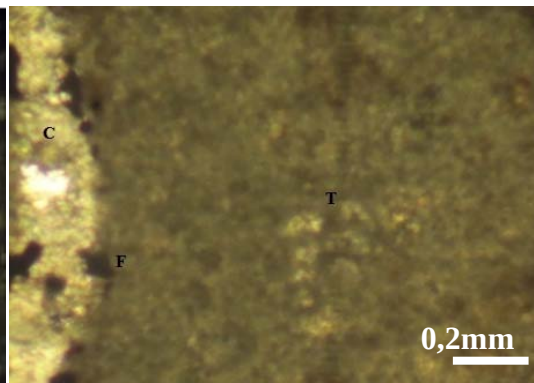


Fig. 30 - Calcaire micritique fin à Textularias contenant une veinule de calcite oxydée, LP.

2. 3. 4. Origine des minéralisations

La minéralisation est constituée par l'hématite, goethite, hydro goethite, les sulfures (pyrite et marcasite) et les sulfates (Barytine). Quant aux minéraux de gangue, ils sont constitués de calcite, dolomite, et quartz. La minéralisation est le résultat du remplissage de fractures et de vides karstiques par les fluides hydrothermaux déposant les minéralisations. Cependant il existe au moins deux hypothèses proposées sur le mécanisme de sa mise en place.

Glaçon, (1967) préconise que le remplissage s'est fait per descensum ou par imbibition d'une nappe phréatique très riche en fer, cette dernière aurait joué un rôle important dans la concentration de gisement par les fluctuations saisonnières.

L'EREM(1968) propose qu'après la fracturation des calcaires Cénomano-Turonien, les sulfures ont été déposés en premier lieu et avec le changement de l'environnement les fluides hydrothermaux chauds ont permis de mettre en place des oxydes de fer (hématite). Par la suite, les eaux météoriques ont hydraté l'hématite, altérés les sulfures et ont décarbonaté les calcaires pour donner de la goéthite et de l'argile ferrugineuse. Cette hypothèse est peu vraisemblable puisque les sulfures ne se formeraient pas dans un milieu oxydé. L'hypothèse de remplissage de la fracturation et la karstification par un minerai ferrugineux et argileux transporté par les solutions hydrothermales est beaucoup plus plausible.

3. GEOLOGIE DU GISEMENT DE CHÄABET EL BALLOUT

Le gisement de Châabet El Ballout fait partie des monts de la haute Medjerda David (1956) il se situe à l'extrémité orientale de la chaîne des Maghrébides et plus précisément entre le domaine tellien au Nord et l'atlas saharien au Sud (Fig. 31).

La géologie du gisement a été étudiée essentiellement par David (1956), Rudis (1972) et Kouzmine (1992).

3. 1. Lithostratigraphie

Le gisement est constitué par des formations d'âge Triasique, Crétacé supérieur, Oligocène, Miocènes inférieur et Quaternaire (Fig. 32 et 33).

3. 1. 1. Trias

Le Trias affleure dans la partie Nord Est du gisement. Il est caractérisé par des formations argileuses varicolores avec des passages gypseux broyés, 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 grès en deux variétés, à grains fins et grossier. Le gypse est accompagné souvent de soufre natif et de sel gemme.

Par manque, 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».

3. 1. 2. Crétacé

a) - Crétacé supérieur (Sénonien)

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 supérieure sont rencontrées.

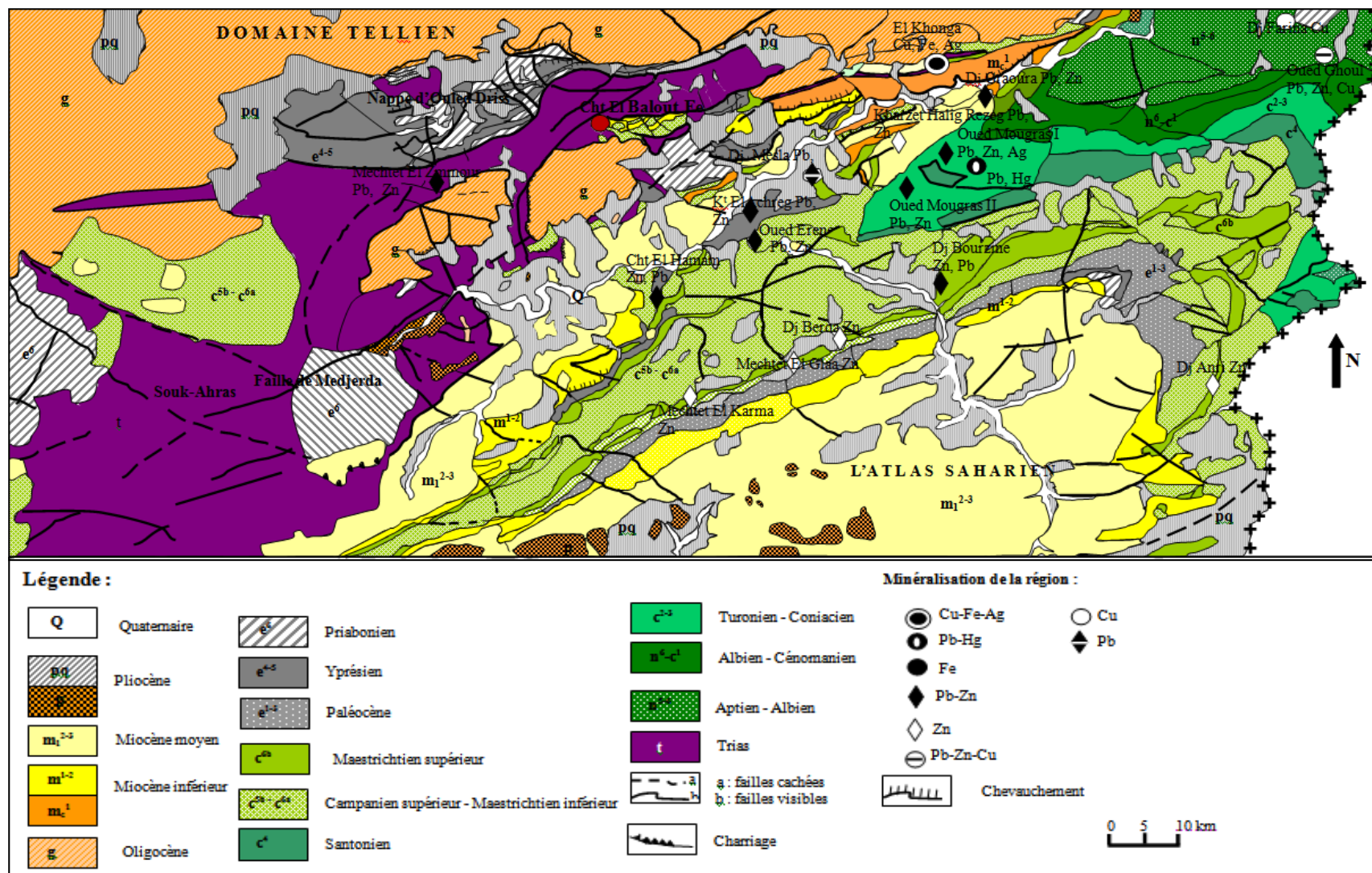


Fig. 31 – Carte géologique de la région de Souk Ahras - Oued Mougras d'après (Kriviakine et al. , 1990).

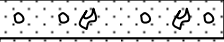
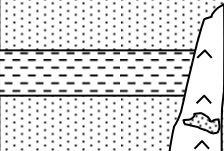
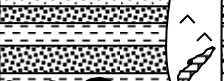
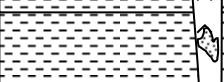
- La série inférieure de puissance dépassant les 100m, est essentiellement formée de marnes noires ou gris foncé ; fortement érodées souvent transformées en gravillons à passées de calcaire jaune contenant de la calcite.

- La série supérieure a 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. 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.

Série	Etage	Colonne	M	Caractéristique de roches
Quaternaire			20	alluvions, des travertins, des limons et cailloutis
Miocène	Inferieur		200	Grés, marnes argilites à Pélécypodes et foraminifère, grés, conglomérats, marnes.
Oligocène			100	Grés, argiles schisteuses et glauconites, marnes
Crétacé	Sénonien		30	de calcaires marneux gris foncé.
			50	calcaires massifs blancs
			50	marnes noires et grises et calcaires marneux
			100	marnes noires, gris foncées ; gravillons à passées de calcaire jaune contenant de la calcite.
Trias			??	Formation marno-gypsifère avec des brèches de calcaires et des grés

 Encaissant de la minéralisation

Fig. 32 - Colonne lithostratigraphique du Gisement de Châabet El Ballout.

3. 1. 3. Paléocène – Oligocène

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.

3. 1. 4. Néogène

– Miocène inférieur

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 calcaireux 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. La puissance de ces formations est de l'ordre de 200m.

3. 1. 5. Quaternaire

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

3. 2. Tectonique

Sur le plan structural, le gîte de Châabet El Ballout appartient au domaine des écaïlles, il est formé par trois structures complexes de nappes et chevauchements (Fig. 32), qui sont : la nappe tellienne, complexe triasique 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. 33).

- Un premier système de faille de direction Est-Ouest (N90°). 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 (N160°) ;
- Le troisième système est perpendiculaire au deuxième avec une direction de 30°N ;
- Le quatrième système de faille a une direction N180°.

Ces systèmes de failles ont subdivisé le gisement de Châabet El Ballout d'Ouest en Est en trois blocs (Fig. 33): le bloc Ouest, le bloc central et le bloc Est.

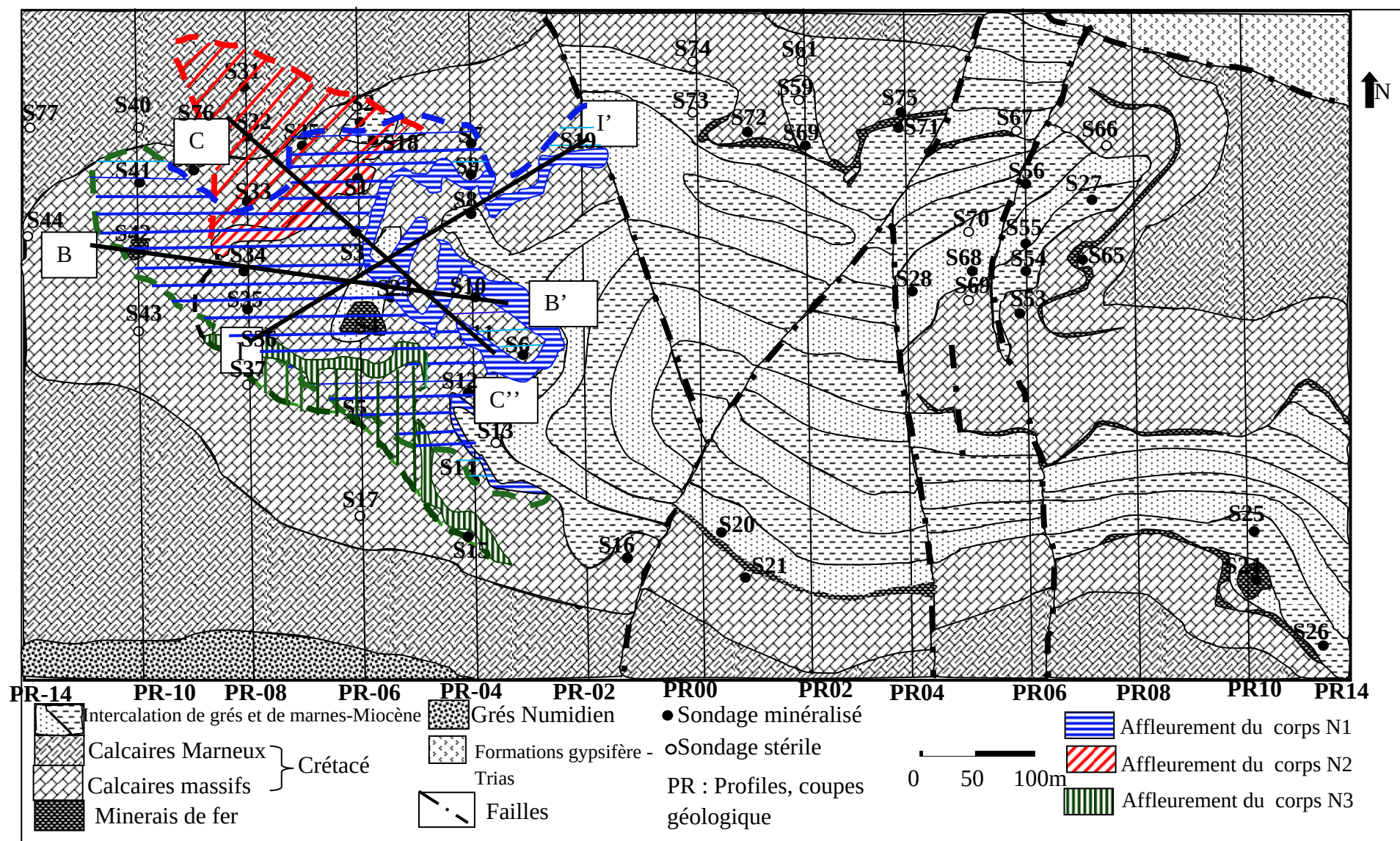


Fig. 33 – Carte géologique du gisement de fer de Châabet El Ballout (Krivakine et al. , 1990 ; Kouzmine 1992).

a) **Le bloc Ouest** Il est limité en Est par la faille (F1) N160° (Fig. 33). Il est constitué au Sud par la nappe numidienne qui repose sur le Trias et chevauche les sédiments du Crétacé, à pendage de 20° à 30° vers l'ouest.

La coupe géologique (Fig. 34) faite suivant la direction SW-NE, montre que les couches du Crétacé supérieur chevauchent celles du Miocène ce qui est d'une allure anormale. Par contre les formations du Crétacé sont érodées localement.

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

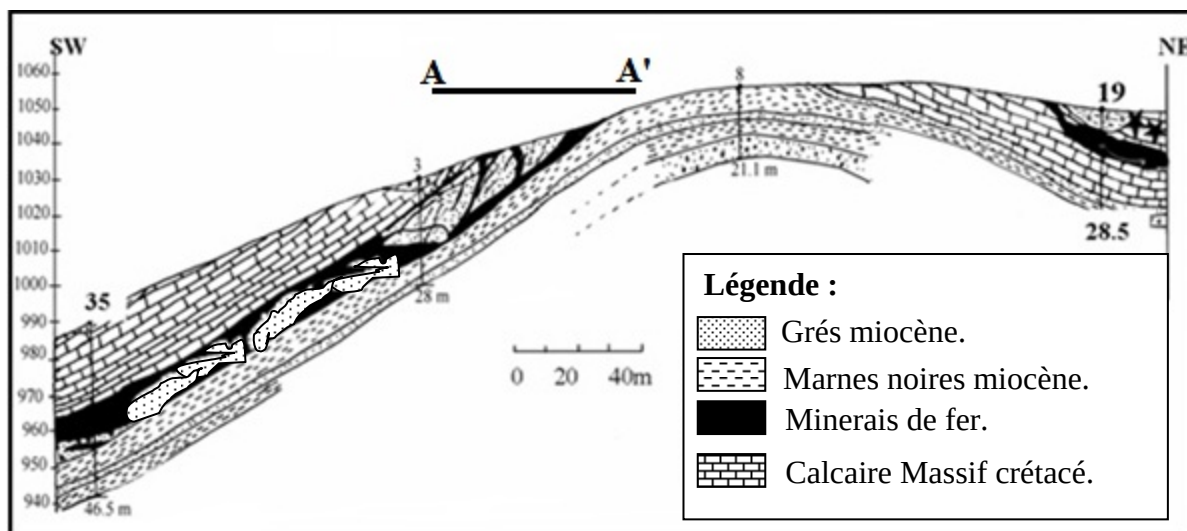


Fig. 34 - Coupe géologique du bloc Ouest suivant la ligne I-I' de la figure 33.

Une deuxième coupe géologique, faite à partir des gradins d'exploitation (Fig. 35) et l'étude de terrain, ont permis de déterminer une zone de broyage minéralisée de 40 m de large, de direction Nord Ouest - Sud Est et un angle de pendage de 30°. Le toit de cette zone est constitué de calcaires et le mur est constitué par les grès et les marnes du Miocène.

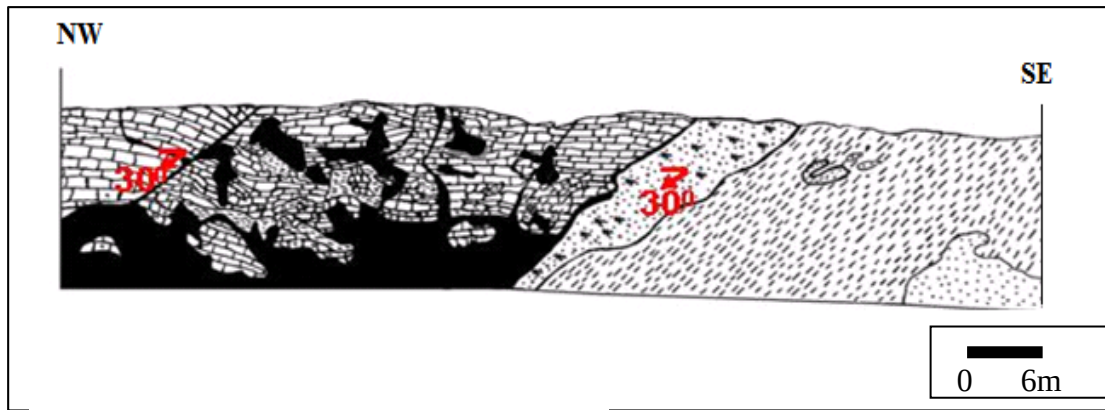


Fig. 35 – Coupe dans le front de carrière gradin N°:1020m - coupe suivant la ligne AA'- (voir légende de la figure 34).

Les coupes géologiques (Figs. 36 et 37) effectuées suivant la direction NW-SE montrent des structures en écaille chevauchante – en duplex (Boyer et al., 1982 ; Mitra et al., 1986).

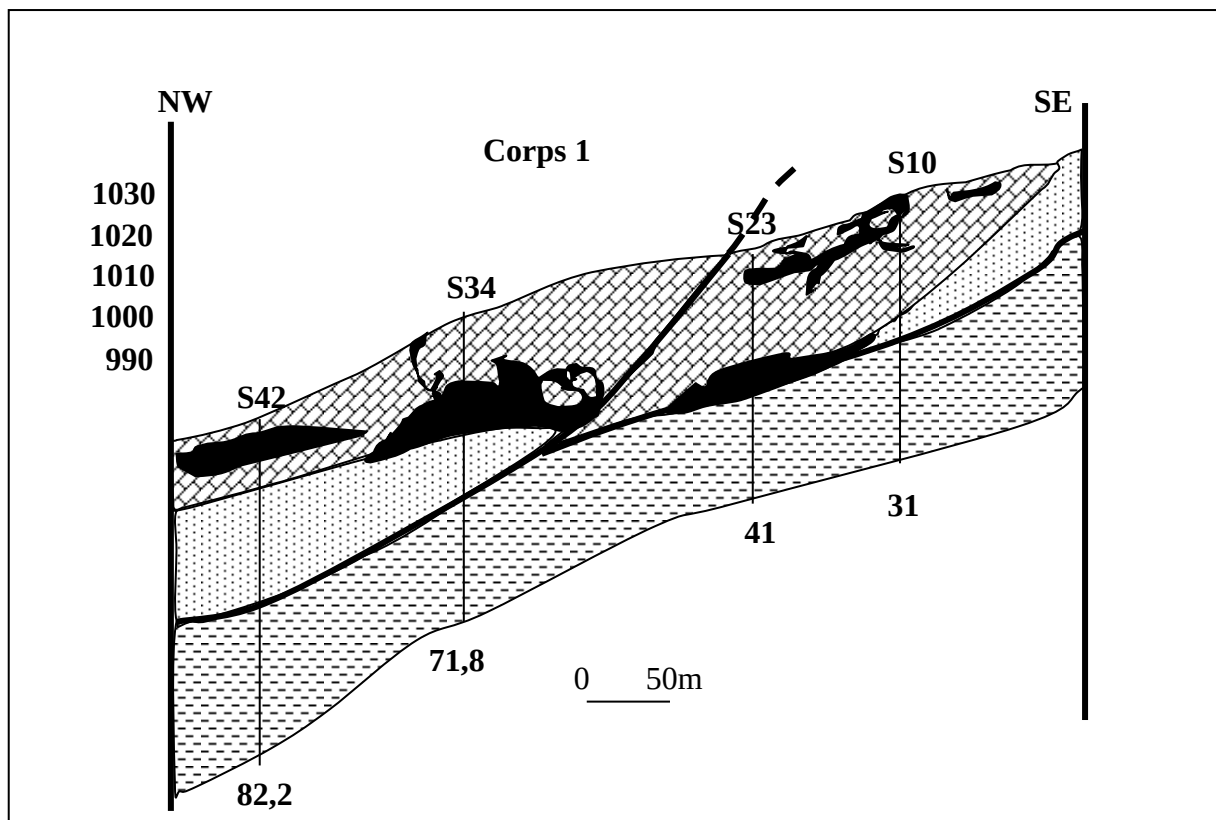


Fig. 36 - Coupe géologique suivant la ligne BB' de la figure 33 (voir légende de la figure 34).

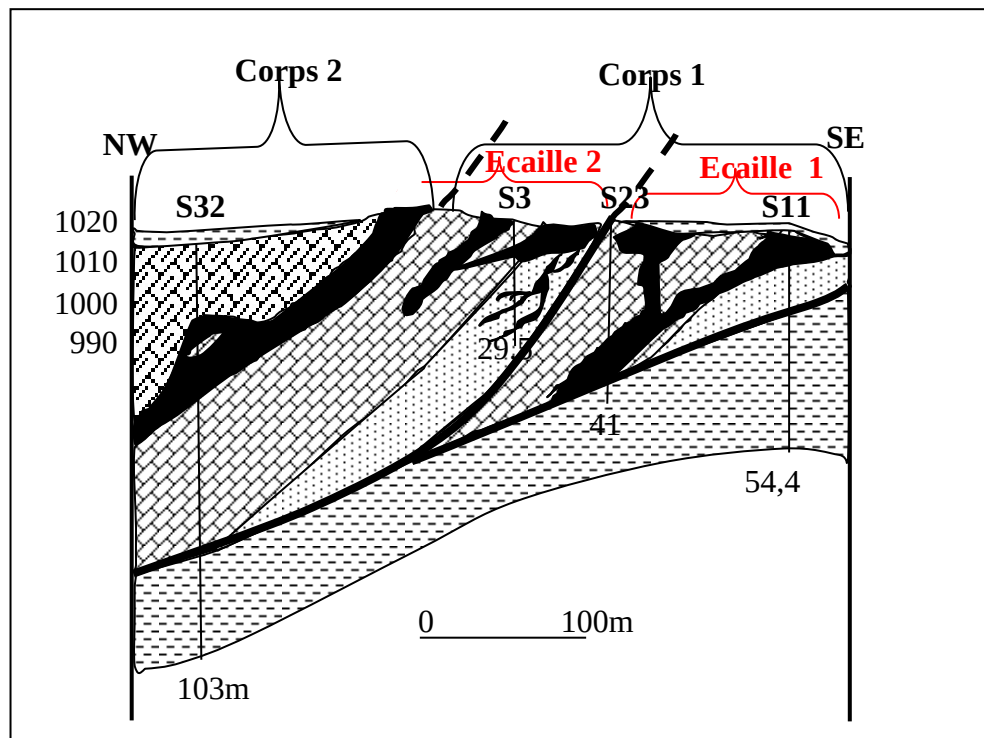


Fig. 37 - Coupe géologique suivant la ligne CC' de la figure 33 (voir légende de la figure 34). Ces chevauchements majeurs correspondent généralement à des décollements et sont réunis par plusieurs rampes au moins trois qui délimitent des volumes de roche (Fig. 36 et 37). Dans le gisement de Châabet El Ballout la base de ces rampes, structure en duplexe est constituée par des marnes (Fig. 36 et 37).

D'après ces coupes, la direction du chevauchement est NW - SE comme l'a proposé Kriviakine et al, (1990).

La minéralisation est distribuée d'une façon aléatoire. Elle se localise soit dans les calcaires fissurés du Crétacé supérieur soit dans les grès bréchifiés et les marnes du Miocène inférieur.

Voir conclusion

b) Le bloc central : Il est limité à l'Ouest par la faille (F1) N160°, et en Est par la Faille (F2) N 35°. Le bloc est constitué par des sédiments terrigènes du Miocène occupant le centre, et des sédiments carbonatés du Crétacé occupant les limites. Ce dernier est plus soulevé car les formations du Crétacé ont été érodées. (Fig. 33)

c) Le bloc Est : Il est limité à l'Ouest par la faille (F2) N35°, et il est formé par les sédiments du Crétacé supérieur qui sont sus-jacents aux sédiments terrigènes du Miocène, et par des formations triasiques jalonnant la faille Est-Ouest (Fig. 33).

3. 3. Minéralisation

La minéralisation du gisement de Châabet El Ballout est localisée essentiellement dans la zone de contact des grès du Miocène, des calcaires du Crétacé et aussi au contact de ces derniers parfois même dans les marnes (Fig. 35 et 36). Cette position présente une allure stratiforme, à l'échelle décamétrique mais un aspect discordant à l'échelle métrique (Fig. 38). Kouzmine (1992) considère que la minéralisation est stratiforme ; puisqu'elle est concordante à la stratification des couches encaissantes.

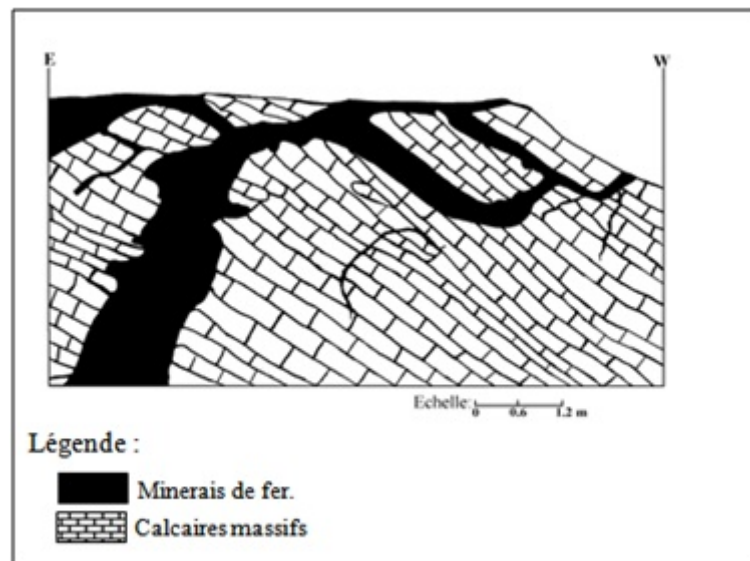


Fig. 38 – Aspect de la minéralisation à l'échelle métrique.

3. 3. 1. Composition minéralogique

Les minéralisations ferrières sont constituées essentiellement par un minerai hématitique (minerai oxydé) sous forme massive, 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.

Le minerai est accompagné de rares imprégnations de malachite, d'azurite (Fig. 39 et 40), de barytine ainsi que l'existence de sidérite, ankérite (Fig. 41), et de cuivre gris (Fig. 42).



Fig. 39 – Malachite et azurite dans le minerais de fer.

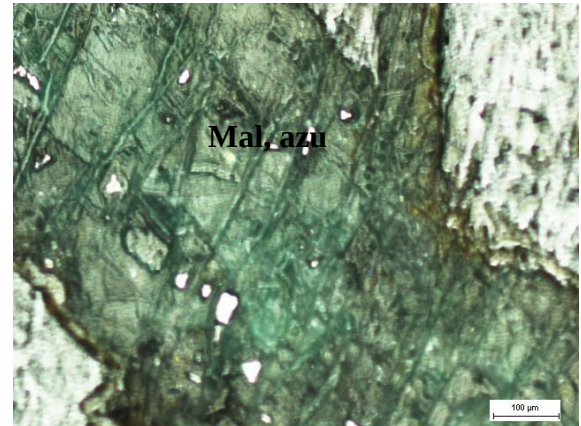


Fig. 40 – Mal : Malachite, azu : azurite, lumière réfléchie.

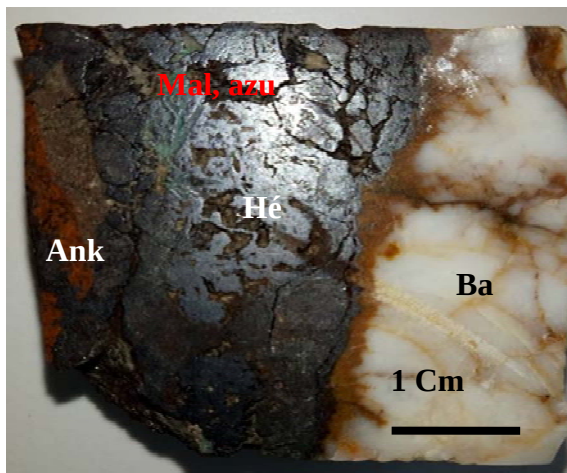


Fig. 41 – Malachite, azurite, et la barytine section polie.

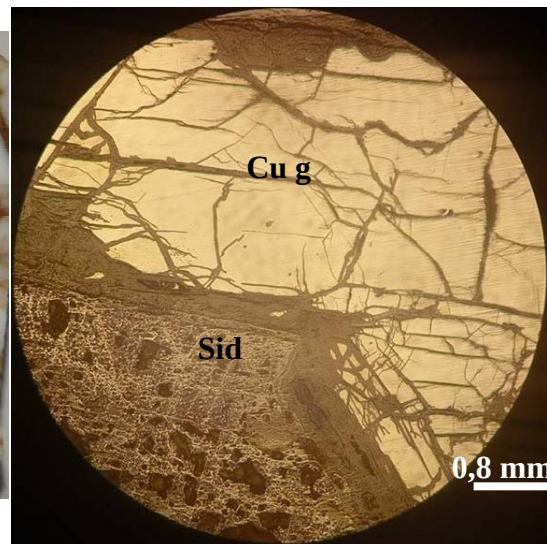


Fig. 42 – Cu g : Cuivre gris, sid : sidérite, lumière réfléchie.

3. 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:

➤ Veine et lentille de remplissage de vide

Ces formes sont rencontrées dans l'encaissant calcaire et grès bréchifiés et marnes formant ainsi des veinules minéralisées (Fig. 43 et 44). Le minerais est aussi rencontré dans les grès bréchifiés et les marnes qui sont cimentés partiellement par la limonite et l'hématite. Ils présentent beaucoup de vides résiduels dans lesquels s'est déposée la calcite (Fig. 45).

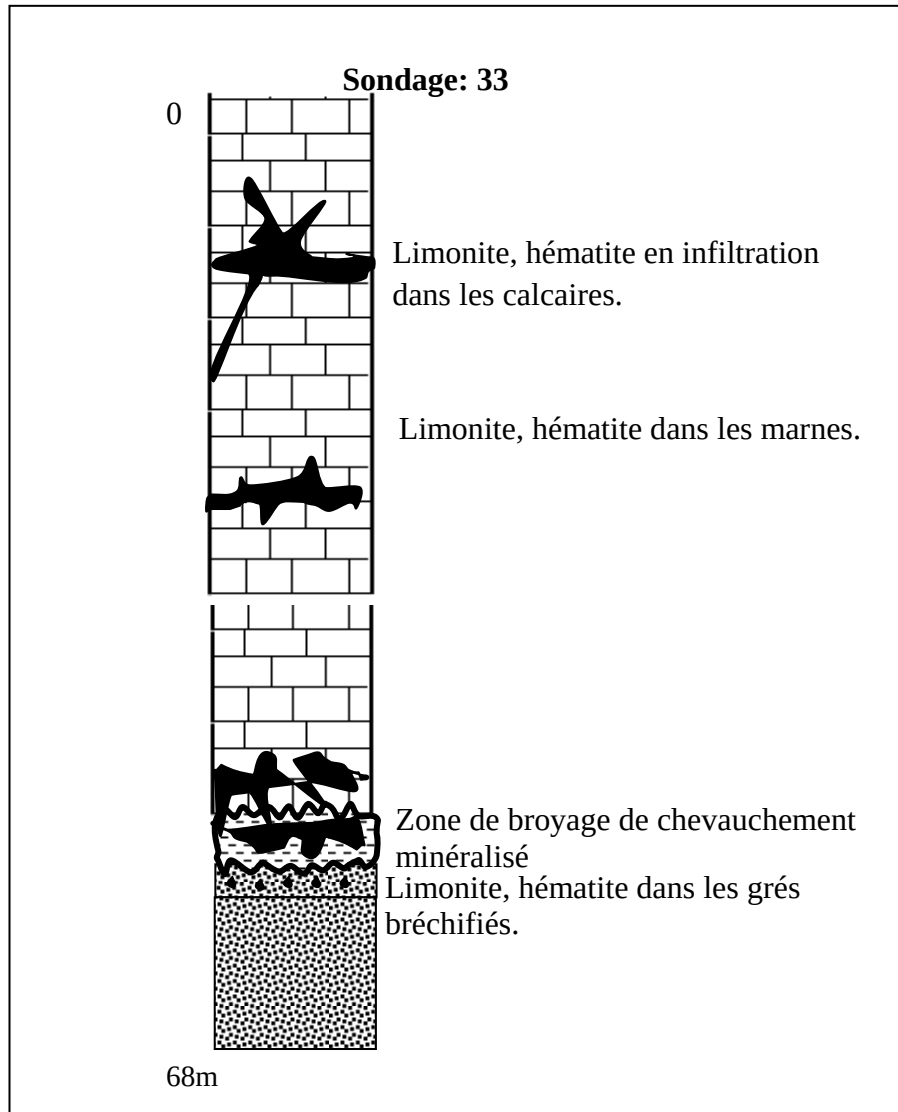


Fig. 43 – Schéma général de la distribution du minerai de fer dans les logs de sondage.

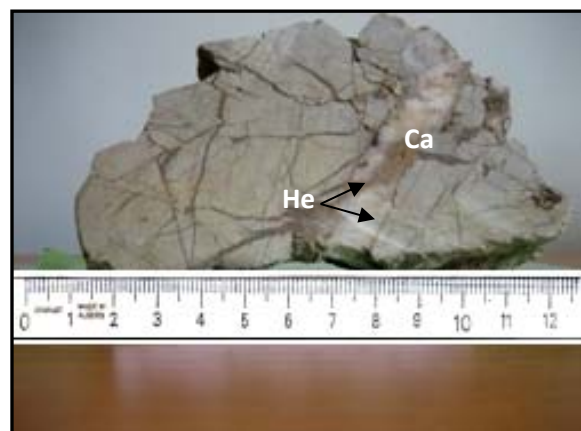


Fig. 44 - Bréchification veinulée (He) hématite, (Ca) calcite.

➤ **Zone de broyage du chevauchement**

La minéralisation est rencontrée aussi dans les calcaires grés bréchifiés qui sont en contact avec les marnes eux même bréchifiées et cimentés partiellement par la limonite et l'hématite (Fig. 43 et 45) : Il s'agit de la zone de broyage du chevauchement (sous nappe de charriage).

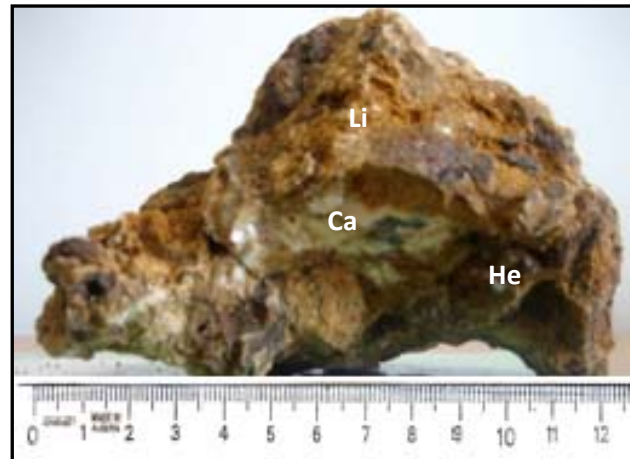


Fig. 45 - Brèche à éléments hétérométriques Ca (calcite), Li (limonite), He (hématite).

La minéralisation s'est déposée aussi dans les vides de formes irrégulières en couches concentriques sous forme irrégulière. Cette minéralisation est constituée de limonite et hématite (Fig.46).

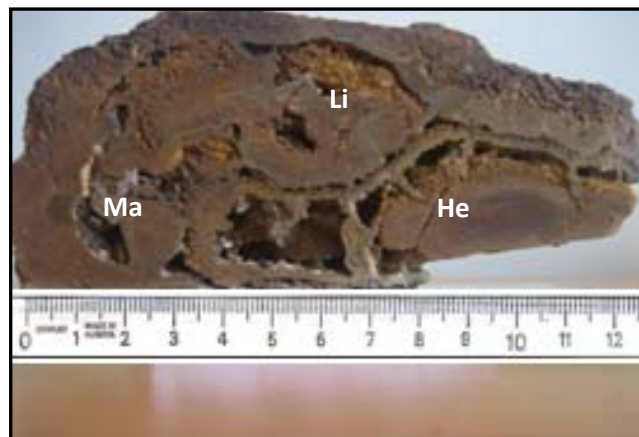


Fig.46 - Minéralisation par remplissage des vides.
Ma (marne), Li (limonite), He (hématite).

L'étude microscopique des calcaires Biomicrite à foraminifère planctonique, montre que le fer est présent aussi sous forme de dissémination (Fig. 47, 48).

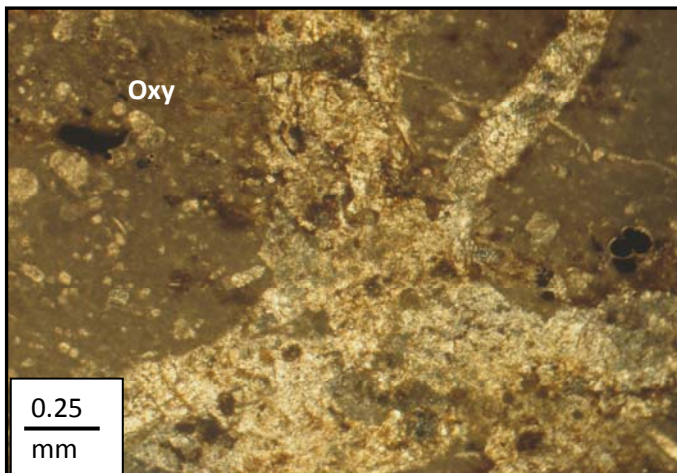


Fig. 47 - Biomicrite à foraminifère planctonique, avec une dissémination de fer dans le ciment.

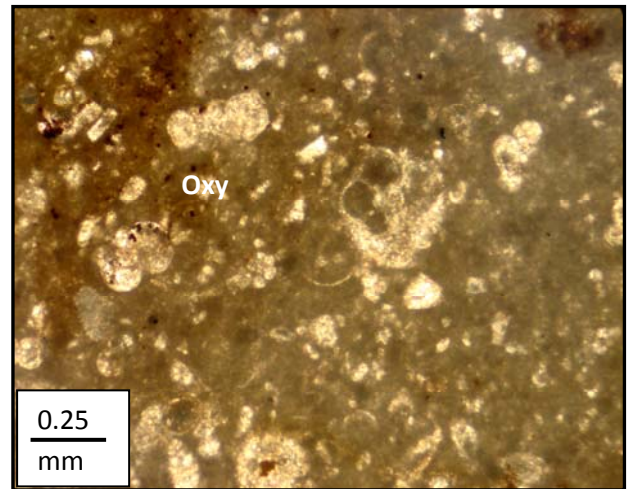


Fig. 48 - Biomicrite à foraminifère planctonique, avec une minéralisation disséminé et filonienne dans le ciment.

➤ Substitution

Ce phénomène est rencontré dans les grès ferrugineux où le ciment carbonaté est substitué par de l'hématite (Fig. 49). (Substitution de Ca par Fe). Les grès sont fortement imprégnés d'oxyde de fer et constituent parfois un véritable minéral siliceux. Au microscope, le minéral hématitique constitue de grandes plages dans lesquelles on observe des grains de quartz fins subarrondis (Fig. 49).

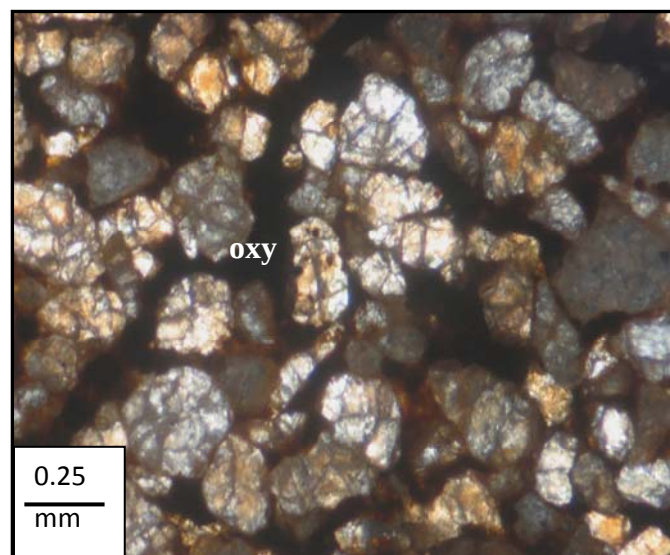


Fig. 49 – Grés à ciment ferrugineux.

➤ En amas

La minéralisation se présente aussi sous forme massive (Fig. 50).



Fig. 50 - Structure massive, He (hématite).

3. 3. 3. Genèse de la minéralisation

Les études faites sur le gisement avancent une hypothèse hydrothermale métasomatique sur l'origine de la minéralisation (Savornin, 1930). D'après Rudis (1972), la minéralisation est présente dans les calcaires crétacés et les grés tertiaires mais aussi dans les marnes. « Elle s'est effectuée au cours des processus tectoniques qui ont agi plus tard ». Cette déduction est expliquée par la présence de nombreuses stries tectoniques dans le minerai même.

La minéralisation ferrière du gisement de Châabet El Ballout est probablement d'origine hydrothermale métasomatique, d'âge post Miocène. Elle s'est formée à la suite de la circulation des fluides hydrothermaux dans les failles et zones de broyage dans les chevauchements, qui favorisent les échanges géochimiques (métasomatose).

Dans un premier stade l'interaction des solutions riches en fer avec les roches encaissantes (grés et calcaire) a permis la formation de la sidérite. Kouzmine (1992) signale la présence des reliques de sidérite dans le minerai hématitique : Ceci prouve l'altération de la sidérite en hématite. Il est à signaler aussi que les parties profondes recoupées par les sondages renferment d'avantage de sidérite car elles sont moins exposées à l'oxydation.

4. GEOLOGIE DU GISEMENT DE KHANGUET EL MOUHAD

Les gisements de fer des confins Algéro-tunisien, ont fait l'objet de plusieurs études géologiques (Madre, 1969 ; Popov, 1976 ; Smati, 1986 ; Othmanine, 1987 ; Pholetal, 1986 ; Bouzenoune, 1993, 2001, 2006).

Le gisement de Khanguet El Mouhad est localisé à environ 12 km à l'Est de Tébéssa. Il représente la limite Est du village de Bekkaria (Fig. 51)

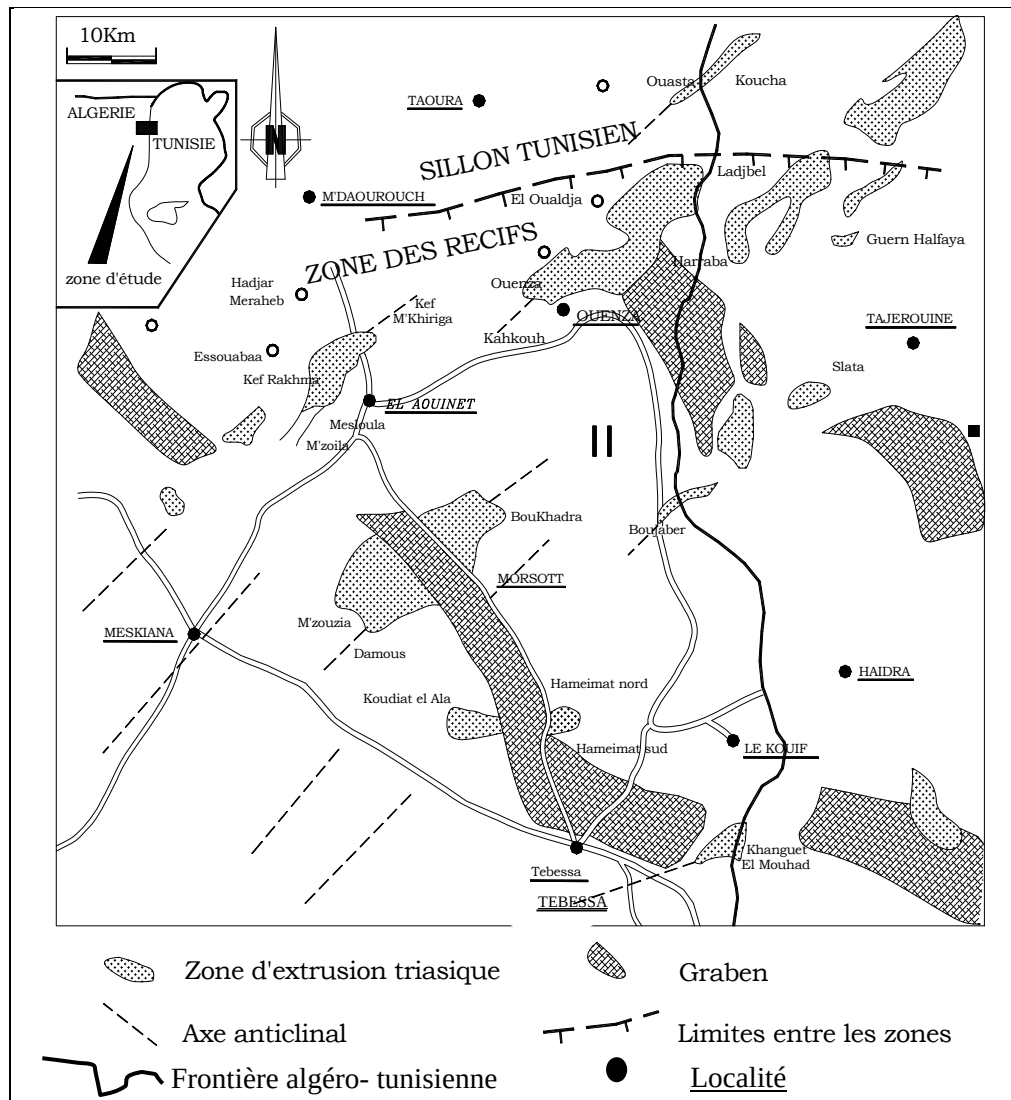


Fig. 51 – Situation géographique et schéma structural des confins algéro-tunisiens (D'après Aoudjehane (1991); modifiée).

4. 1. Lithostratigraphie

Le secteur de Djebel Djébissa, est formé essentiellement de sédiments mésozoïques, avec absence des terrains jurassiques (Durozoy, 1956; Charrière et al., 1996; Vila, 2001). Les

dépôts gypsifères dans le secteur, d'âge triasique, occupent une grande surface (Fig. 52). Ils sont profondément ravinés, ils laissent apparaître les marnes et les argiles bariolées dans plusieurs thalwegs. Ces derniers sont initiés sous l'effet combiné de l'érosion et de la tectonique.

4. 1. 1. Trias

L'ensemble des roches triasiques correspond aux faciès continentaux, lagunaires et évaporitiques bigarrés. Lithologiquement ces formations sont différenciées et se manifestent tectoniquement en diapirs au cœur des structures anticlinales. Elles sont donc très déformées et bréchiques. Tous les contacts entre les formations Triasiques et celles plus récentes sont de nature tectonique. Les principaux dépôts qui caractérisent le Trias sont des marnes, marnes – argileuses versicolores à gypse, le gypse, les dolomies, calcaire – dolomitisés et le sel gemme. La puissance des formations triasiques n'est pas déterminée.

4. 1. 2. Crétacé inférieur

a). Aptien

Le Djebel Djébissa contient que des formations de l'Aptien supérieur qui affleure au Nord-Est et forme l'essentiel des formations de la barre calcaire de versant Nord-Ouest. L'Aptien est caractérisé par des calcaires massifs, gris et roux à intercalations de marnes et de marnes calcaires métriques riches en orbitolines. Sa puissance fait 70m.

À Khanguet El Mouhad, l'Aptien est formé d'une succession de gros bancs massifs jaunâtres ou roux, à texture packstone, fortement minéralisés (ankérite, fer, galène barytine). La microfaune présente entre 80 et 100% des éléments figurés. Avec d'abondantes Orbitolines roulées, des petites arénacées coniques. Les niveaux de plus basse énergie sont des micrites à rares Ostracodes. Il s'agit de microfaciès habituels dans le Gargasien supérieur ou le Clansayésien (Charrière et al., 1996).

b). Albien

Il est décrit comme une association de carbonates généralement bioclastiques à la base et de marnes noires légèrement rubéfiées au sommet (Charrière et al., 1996).

À Khanguet El Mouhad, l'Albien est formé de deux faciès :

- L'Albien calcaire a été signalé dans la barre de la bordure Nord-Est, il est formé de calcaire bioclastique à grosse huitres, séparé par des calcaires noduleux.

- L'Albien marneux repose lui aussi, comme l'Aptien et l'Albien calcaire directement sur le Trias (Charrière et al., 1996). Cet Albien marneux affleure au Sud de la mine de Khanguet el Mouhad. Il est formé de marnes noires renfermant d'abondantes petites formes planctoniques indiquent l'Albien (Charrière et al., 1996).

c). Vraconien

Dans le secteur d'étude est généralement non décelable de l'Albien supérieur. Il forme un ensemble de marnes noires assurant la transition avec celles du Cénomanién (Charrière et al., 1996). Il n'affleure pas à Khanguet El Mouhad.

4. 1. 3. Crétacé supérieur

d). Cénomanién

Les dépôts du Cénomanién ont été repérés sur la bordure Sud-Est du massif de Djebel Djébissa (Durozoy, 1956; Charrière et al., 1996). Il a été décrit comme une série dominée à la base par des marnes noires à débris d'organismes littoraux, suivies par de gros bancs de lumachelles à ostréidés. A ses marnes noires, fait suite une épaisse série de marnes jaunes à abondantes lumachelles à Ostreidés et marno-calcaires. Le Cénomanién affleure à Khanguet El Mouhad.

a). Turonien

Il est formé de constante corniche massive de calcaire beige ou rosé et de calcaire dolomitique l'ensemble est entièrement dolomitique à silex à leurs parties supérieures. Le turonien supérieur épais de 150 m formé de marnes noires gypsifères, de marno-calcaires gris en plaquettes à altération blanchâtre, au sommet, ces marnes noires sont souvent lumachelliques. Parmi les dépôts du Crétacé supérieur, seuls les dépôts du Turonien affleurent à Khanguet el Mouhad.

c). Campanien

Les formations du Campanien ont une épaisseur d'environ 60m de calcaires marneux blanc crayeux.

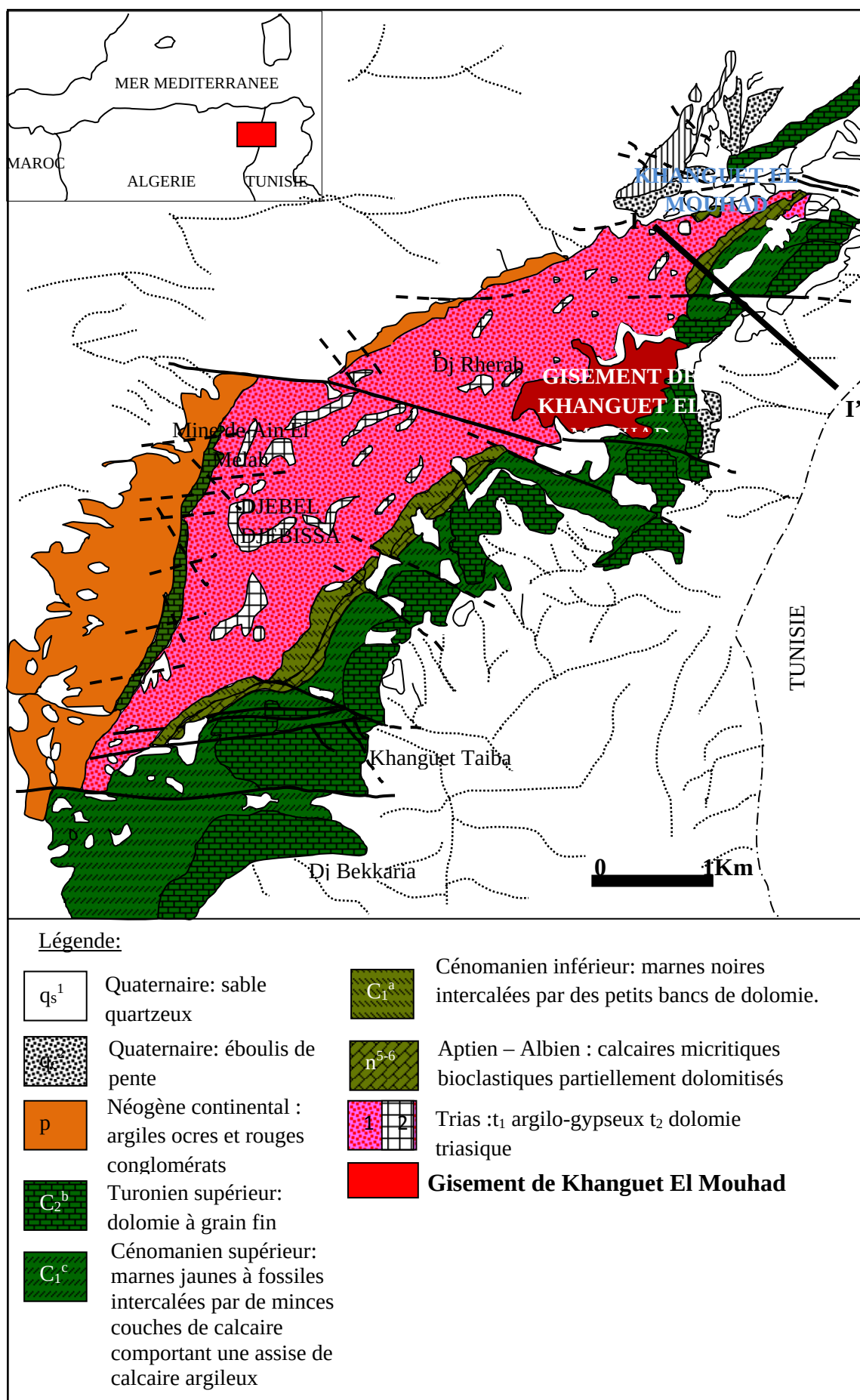


Fig. 52 – Carte géologique schématique du diapir du Djebel Djébissa (Durozoy (1956), des levés partiels de J.M Vila et A. charrière (1992) et de J.M Vila(1993), modifiée).⁴⁵

d). Maestrichtien

Il est constitué d'une assise de calcaire blanc massif bien lité à nombreuses empreintes d'Inocérames. Sous cet assise subsiste des marnes grises souvent masquées par des éboulis aux piedmonts des reliefs formés par l'assise du Campanien (Durozoy, 1956).

4. 1. 4. Paléogène**a). Eocène- Paléocène**

Djebel Djébissa est formé par une puissante série de marnes noires ou jaunes quelque fois gypseuse ou pyriteuse, à rare petit bancs marno-calcaires du Dano-Montien (300m). Sur ce dernier, ce développent des marnes et calcaire marneux à silex renfermant plusieurs couches phosphatées du Thanétien. L'Eocène supérieur est formé de calcaire en banc massif à silex de 50 à 60m de puissance.

4. 1. 5. Néogène**a). Miocène**

Il est formé par une série de grés continentaux transgressifs sur tous les terrains antérieurs. Sa base est marquée par un poudingue très siliceux et ferrugineux, admettant rarement des passages de marne jaune ou verte ensuite une série conglomératiques très dures.

Son épaisseur atteint 150m. Au sommet les formations sont principalement des marnes rouges continentales parfois bariolées n'affleurant que rarement. Leur puissance est supérieure à 100m, repose en discordance angulaire faible (20° à 25°) sur les dépôts du Crétacé supérieur (Turonien Maestrichtien) (Charrière et al., 1996).

Les dépôts du Miocène n'affleurent pas dans le périmètre de Khanguet El Mouhad.

b). Pliocène

Il est constitué d'une série formée d'argiles rouges compactes, de conglomérats bien cimentés et de sables quartzeux, ces derniers n'existent que près du village de Bekkaria. Son épaisseur est de 400m (Durozoy, 1956). À Khanguet El Mouhad les formations du Pliocène sont représentées par des couches redressées à la verticale.

4. 1. 6. Quaternaire

Il forme la plus grande partie des terrains qui assurent le comblement du fossé de Tébéssa. En générale, c'est une série formée de conglomérats et d'argiles rouges d'une épaisseur de 171 m

(Durozoy, 1956). Dans le Dj. Djébissa ces formations sont visibles le long du piedmont du versant NW. Ce sont des dépôts continentaux ocre et bruns à décharges conglomératiques grossières, formés d'éléments de terrains Crétacé variés. Ces dépôts sont en alternance avec des marnes de couleur souvent rose-saumon. Ils sont souvent verticaux contre les terrains crétacés du flanc NW et sub-verticales au contact du Trias dans la partie NW du massif (Charrière et al., 1996).

4. 2. Tectonique

Le Djebel Djébissa est l'anticlinal à cœur triasique le plus proche de Tébessa. Il appartient au domaine à vrais diapirs (Vila, 1994 ; Charrière et al., 1996 ; Vila, 2001). L'anticlinal s'allonge, sur une douzaine de kilomètres, suivant la direction NE-SW. Il offre une allure sigmoïde assurée par deux terminaisons périclinales (Fig. 53) : La première au NE (Khanguet El Mouhad) et l'autre au Sud (Khanguet Bekkaria) pas nette (Charrière et al., 1996).

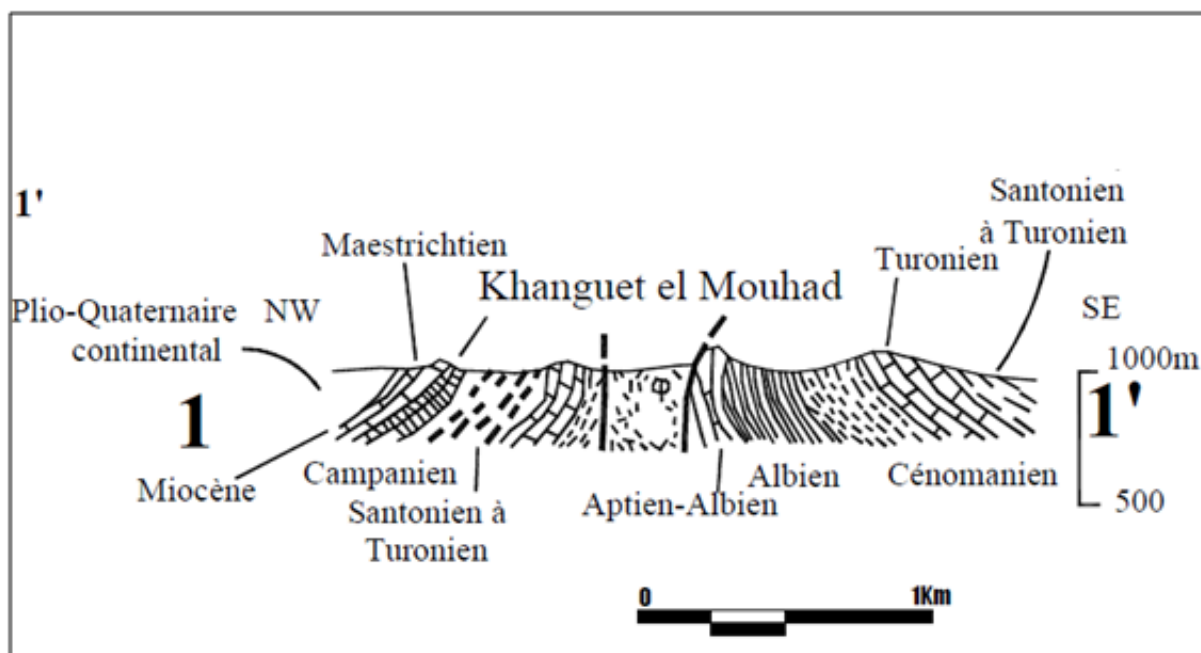


Fig. 53 - Coupe interprétative de la terminaison périclinale Nord-Est (Charrière et al., 1996) suivant la ligne ii' de la figure 52.

4. 2. 1. Tectonique souple

Le secteur d'étude présente une structure d'un pli anticlinal, allongé en direction NE-SW; il se place sur la terminaison d'un important accident cassant de même direction, qui passe par la partie axiale de Dj Djébissa.

Le noyau du horst est formé du Trias et les flancs sont essentiellement constitués des dépôts du Crétacé (Figs. 52, 53)

4. 2. 2. Tectonique cassante

Dans la région d'étude il existe trois systèmes de failles principales de direction :

- **N90°-N100° (E-W, ESE-WNW)** : ce système de failles constitue un nombre important d'accident, qui affectent tous les terrains du Crétacé, ainsi que les dépôts dauphroïques. Ces failles profondes sont d'anciens accidents majeurs du Crétacé inférieur (Jauzein, 1967), bien visible sur image satellitaire. Un de ces accidents limite le gisement de Khanguet El Mouhad au Sud Est (Fig. 54).



Fig. 54 - Image satellite montrant le linéament qui limite le gisement de Khanguet au sud Est (google earth).

- **N140°-N150° (NW-SE)** : Cette série de faille présente la plus grande concentration sur les deux flancs de Dj. Djébissa

- **N30°-N50° (NE-SW)** : l'accident le plus important se manifeste le long de la charnière de l'anticlinal, actuellement occupé par le matériel triasique (Litvinenko, 1978). C'est une faille normale avec soulèvement du compartiment sud à rejet vertical est estimé à 400m.

4. 2. 3. Les fossés d'effondrement

Les fossés d'effondrement sont orientés NW- SE (cf Fig. 51). Ils résultent de mouvements tectoniques (distension et compression) accompagnées d'épisodes de percement et d'ascension des formations triasiques depuis l'Aptien jusqu'à l'Actuel (Salmi-Laouar, 1998). Ils sont bordés par des accidents majeurs à failles normales ayant un rejet différent d'un fossé à un autre. Ce rejet est évalué de 100 à 400 m dans le fossé de Tébessa – Morsott. (Dubourdieu *et al.* 1950).

Ces fossés sont comblés ultérieurement par des dépôts quaternaires. Cette phase distensive a aussi donné naissance aux bassins subsidents (Kowalski et Hamimed, 2000).

4. 3. Minéralisations

Le secteur de Djébissa constitue un vrai diapir qui est rattaché à la province métallogénique de l'Atlas Saharien, particulièrement connue par ses nombreux affleurements d'évaporites triasiques. C'est une zone où les concentrations minérales présentent une étroite relation avec ces structures géologiques (Rouvier *et al.*, 1985).

Le massif de Djébissa présente deux types de minéralisation : une à Ba-Pb (Ain El Mellah) et une autre ferrière celle de Khanguet El Mouhad objet de notre étude.

Le gisement de Fer de Khanguet El Mouhad occupe la partie NE de l'anticlinal de Dj. Djébissa (Fig. 55). Il est formé de cinq corps minéralisés :

« **A** », « **B** », « **C** », « **D** » et « **E** ». Quatre d'entre eux sont proches l'un de l'autre (**A**, **B**, **C**, **E**) et se trouvent à une distance de 300-500 m (Fig. 55). Le cinquième amas « **D** » se localise au Nord-Est de ce groupe, à 1,5 km environ. Actuellement il ne reste que les deux corps A et C intéressant du point de vue économique (Remichi *et al.*, 2008).

- **Le gîte C** : Il s'étend presque à l'horizontale sur 430m de long et 280m de large l'amas minéralisé est stratiforme et se localise au sein des marnes de l'Albien (Remichi *et al.*, 2008).

- **Le gîte A** : Il est subdivisé en deux corps A1 et A2 par une dénivelée de 28m qui est due à une faille de 20m de rejet orientée en direction NW- SE.

➤ Le corps A₁

Le corps A₁ occupe la partie centrale du gisement, il s'étend sur une longueur de 400m, mais il n'en reste qu'un peu moins de 180m dans sa partie SW ; la partie NE étant totalement épuisée. (Fig. 55). Il a une forme ovale de dimension atteignant plus de 90 m de longueur et de 20 à 60 m de largeur et plonge vers le SW par un lambeau d'hématite et hématite –sidérite constituant une part du gradin inférieur, puis par un amas d'environ 60 m de longueur et 20 m de largeur. Ce dernier semble étroitement lié à une zone intensément fracturée au sein des roches sidéritiques et sidérite-hématitiques. Le minerai ferrique est généralement hématitique brun-noir et noir intensément fissuré, souvent poudreux et pulvérulent, renfermant parfois des fragments isolés de minerai massif et à grain fin à moyen.

➤ Le corps A₂

Ce corps constitue en réalité la continuité du corps A₁ vers le Sud. Il est formé de deux sous-secteurs contigus dont un occupe la partie la plus à l'Est. Il est entièrement découvert (Fig.56). Le second par contre est à 90% couvert par les anciens déblais de la mine et n'offrant que deux affleurements dont l'un, situé dans la partie Ouest, est mis à jour par les travaux d'exploitation sur le gradin le plus bas. Il est couvert par des marnes et argiles sur environ 2.0m surmontées par un calcaire ferruginisé et sidéritique à aspect bréchique de 6.0m totalisant ainsi au moins 8.0 m de puissance et s'étend en direction subméridionale sur environ 85m en disposition subhorizontale. Sa puissance moyenne ferait 5,0m et tend à s'amincir dans sa partie Sud sur la dernière dizaine de mètres. Très rarement de petites intercalations lenticulaires ou en minces strates de dimensions limitées, d'argile verdâtre sont observées au sein du corps hématitique.

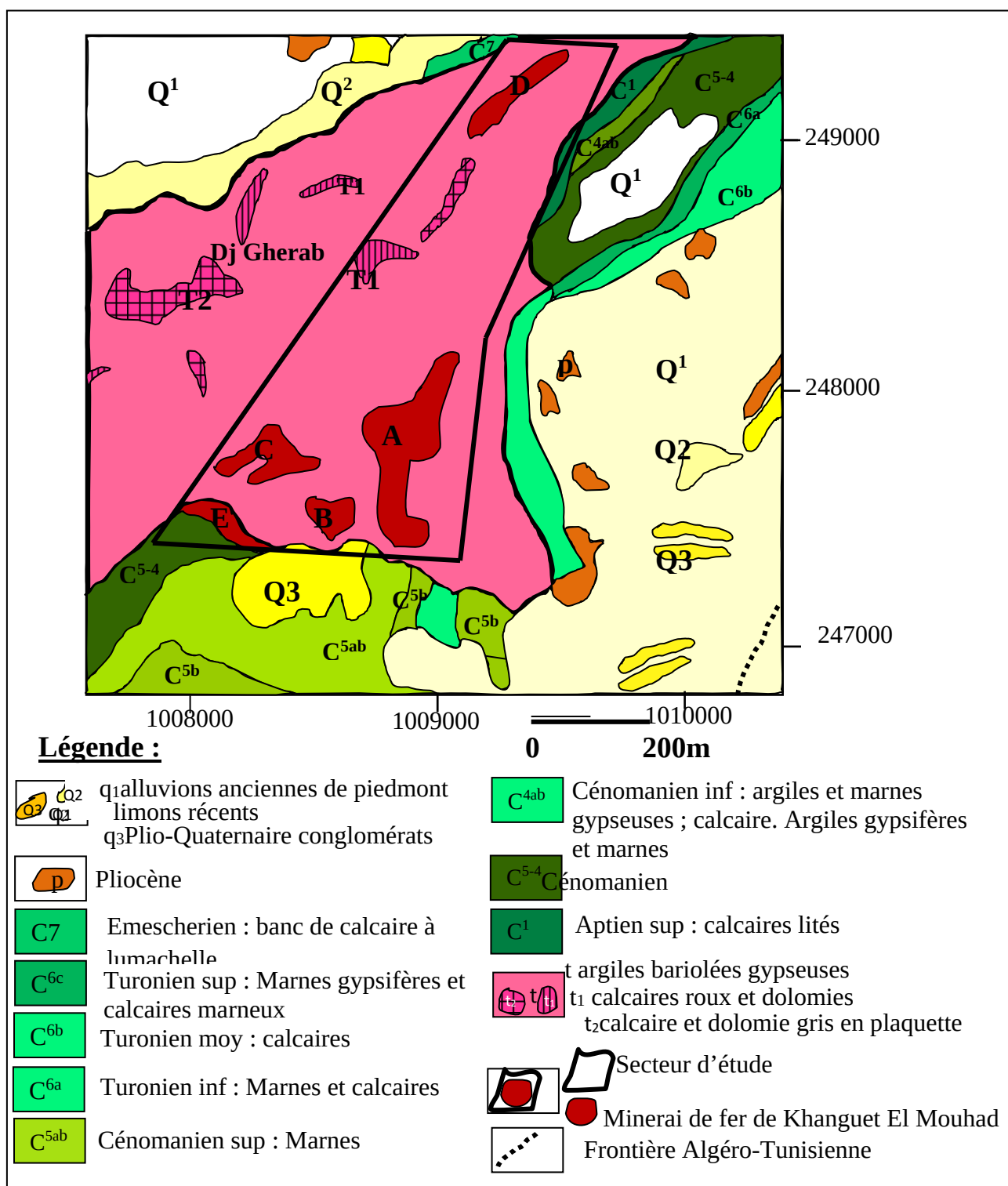


Fig. 55 – Carte géologique schématique de Khanguet El Mouhad avec localisation des gîtes (Litvinenko 1979).

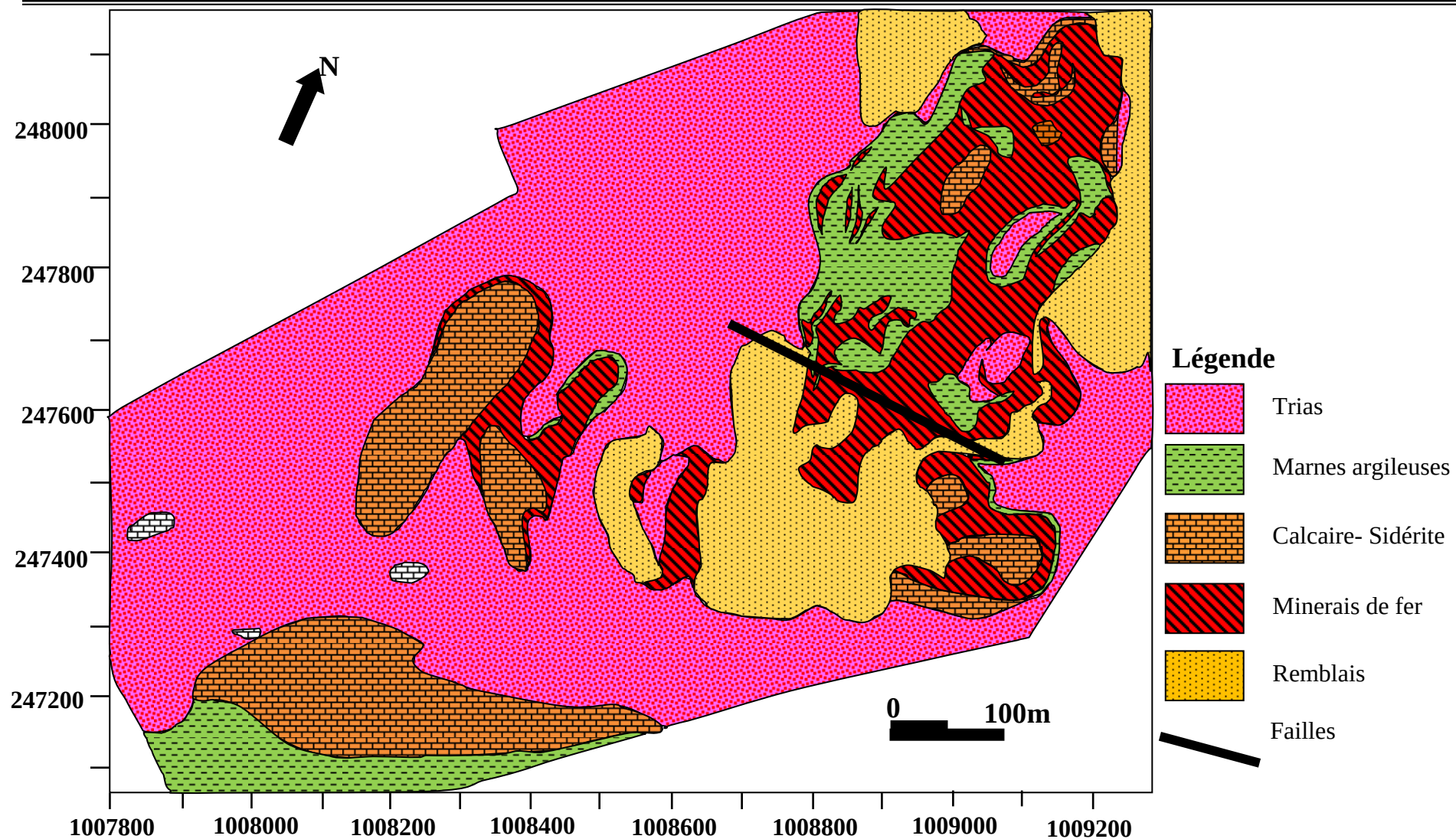


Fig. 56 – Carte géologique du corps A du gisement de Khanguet El Mouhad (Remichi et al., 2008).

4. 3. 1. Composition minéralogique

La minéralisation ferrifère est composée essentiellement d'hématite (Fig. 57), limonite et accessoirement du cuivre gris et rarement la barytine (Remichi et al ., 2008), ainsi que la présence de la sidérite (Fig. 58).

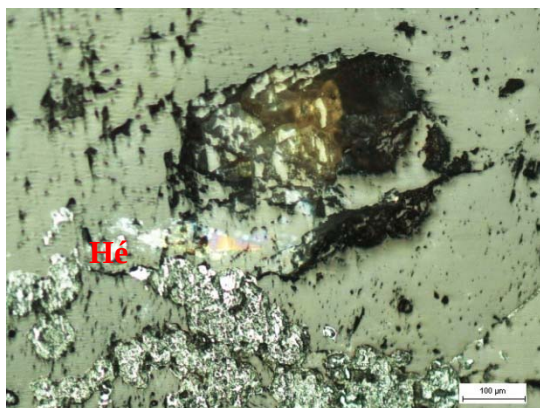


Fig. 57 – L'Hématite au contact du calcaire, lumière réfléchie.

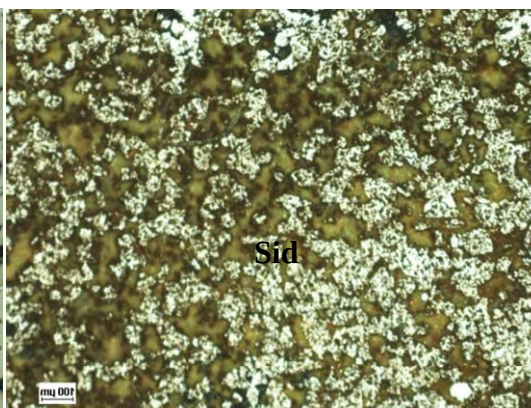


Fig. 58 – La sidérite : Sid, lumière réfléchie.

Afin de déterminer la composition minéralogique des échantillons ont été concassés, puis broyés et analysés séparément au moyen du diffractomètre automatique à l'université de Biskra, les résultats sont représentés sous forme de graphes (Fig. 59 et 60).

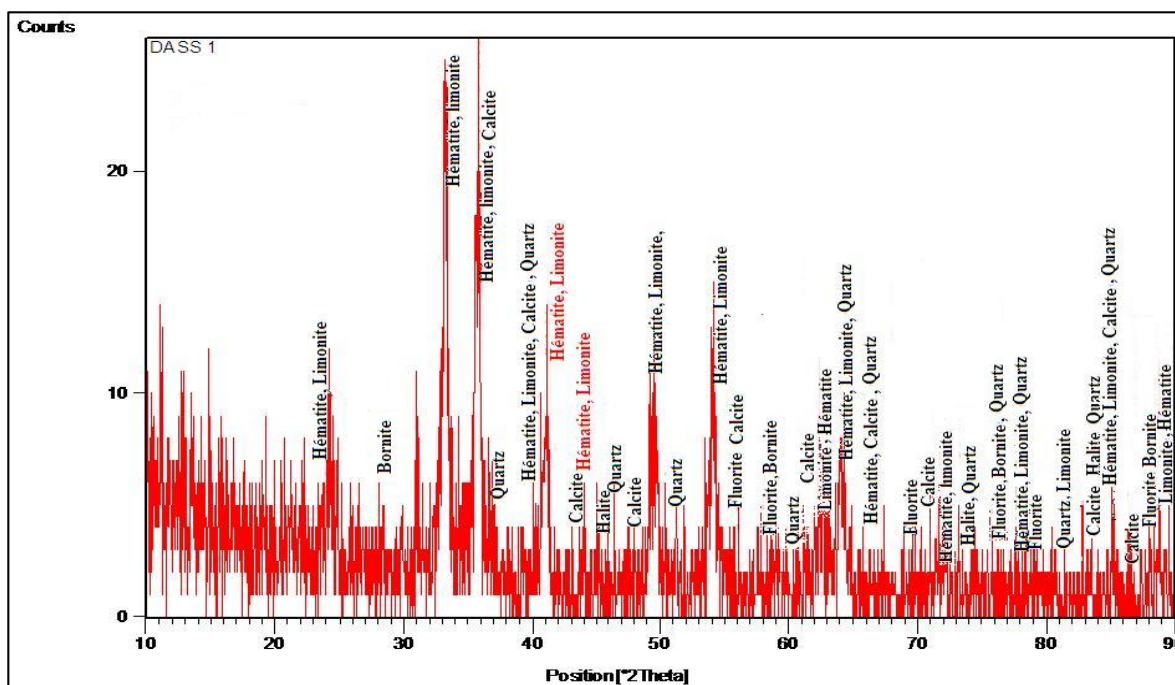


Fig. 59 - Diffractogramme aux RX montrant les phases minéralogiques existantes dans l'échantillon N:1.

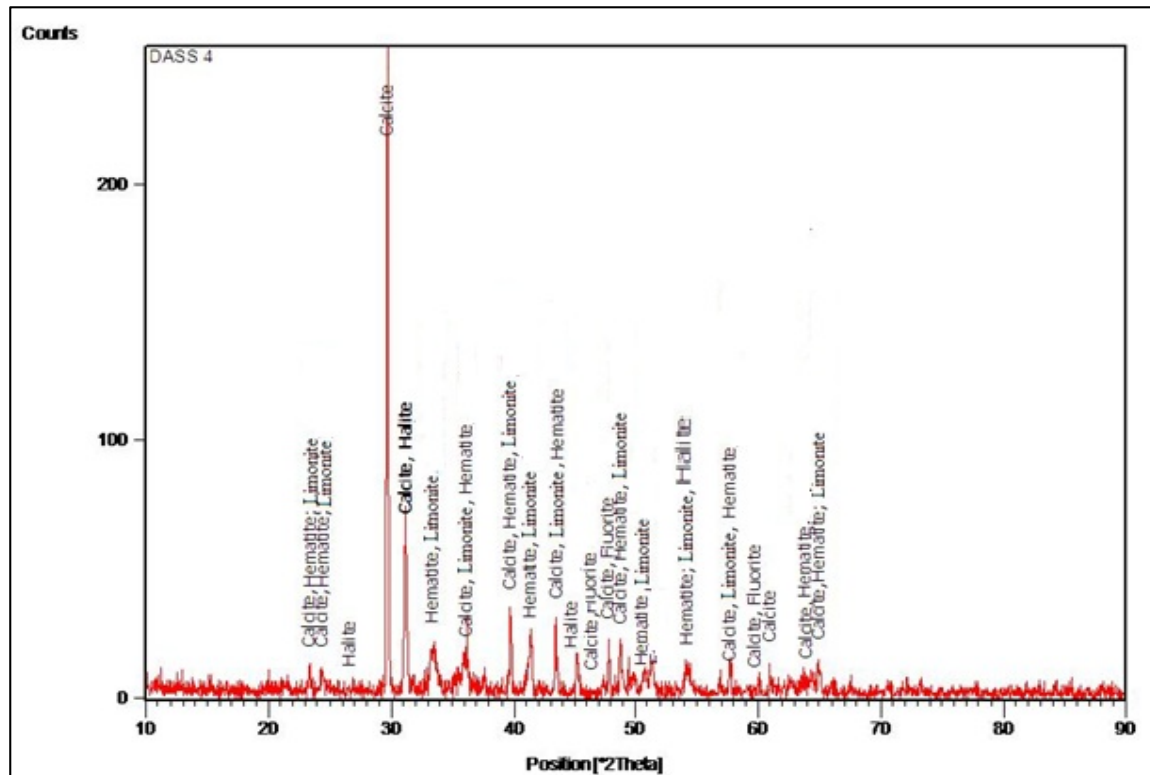


Fig. 60 - Diffractogramme aux RX montrant les phases minéralogiques existantes dans l'échantillon N:4.

Le résultat de la DRX montre que les échantillons sont formés d'hématite, limonite, calcite, fluorite, halite, quartz.

4. 3. 2. Morphologie du corps de minerais

Dans la classification morphologique de (Rouvier et al., 1985 et Aoudjehane, 1991) la minéralisation ferrière de Khanguet El Mouhad présente deux types morphologiques :

- amas d'imprégnation et remplissage de cavité au contact diapir-couverture ;
- amas d'imprégnation et remplissage de vide dans les calcaires.

Elle se présente aussi sous forme stratoïde plissée (Fig. 61)

4. 3. 3. Encaissant de la minéralisation

Les minéralisations sont encaissées dans les calcaires, marnes (Figs. 62 et 64) de l'Aptien supérieur Albien et argile, gypse du Trias (Fig. 63).



Fig. 61- Corps de minerai sous forme stratoide plissé.



Fig. 62 - Minéralisation ferrifère au contact du calcaire.



Fig. 63- Minéralisation ferrifère au contact de l'assise gypsifère.



Fig. 64 - Vue panoramique d'un front de gradin du corps A2 montrant les différents encaissants de la minéralisation.

L'étude microscopique de l'encaissant calcaire a montré qu'il se présente en deux types : calcaire dolomitisé (Figs. 65, 66) et calcaire micritique (Fig. 67, 68).

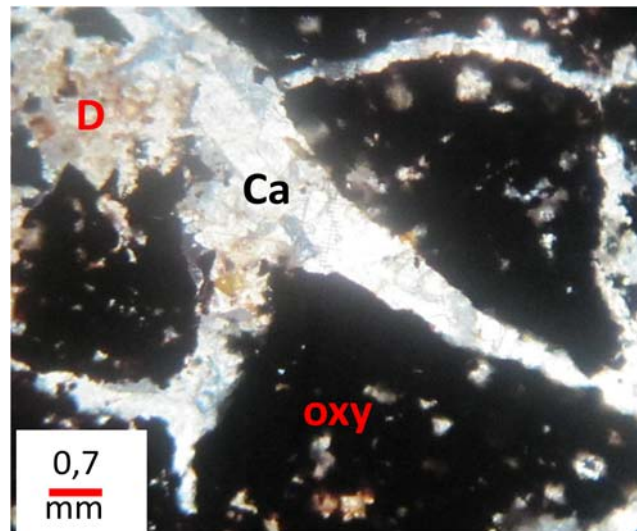


Fig. 65 - Calcaire micritique minéralisé renfermant des veinules de calcite contenant de la dolomite Zonée LPNA.

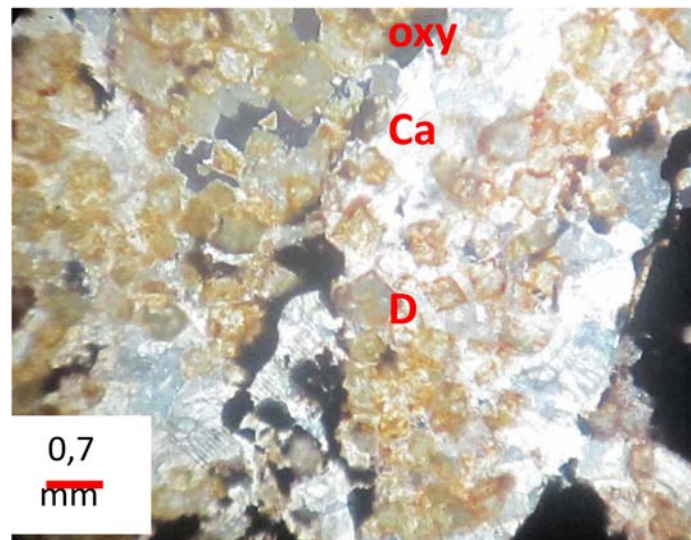


Fig. 66 - Calcaire dolomitisé oxydé LPNA.

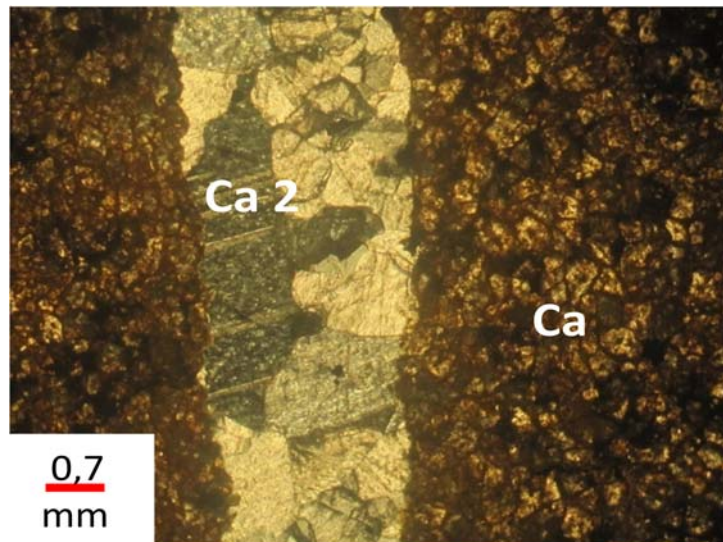


Fig. 67 - Calcaire micritique oxydé Ca2 : prisme rempli de calcites.

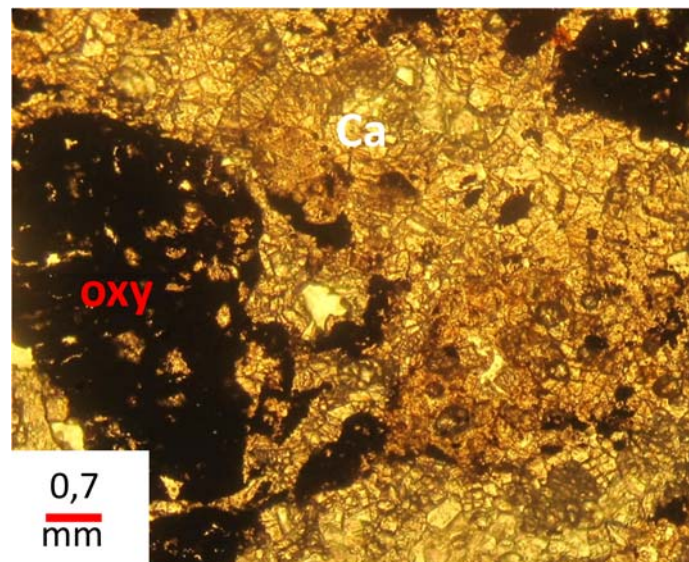


Fig. 68 - Calcaire micritique oxydé.

4. 3. 4. L'origine de la minéralisation

Le gisement de Khanguet El Mouhad présente les mêmes caractéristiques du gisement d'Ouenza du point de vue encaissant, composition minéralogique et contexte géologique. C'est un gisement de substitution dans les roches carbonatées Popov (1976).

L'origine de la minéralisation ferrifère est hydrothermale. La transformation des calcaires en carbonates de fer est essentiellement due à la substitution de Ca par du Fe pour donner la sidérite et l'ankérite ayant cristallisés dans les vides et les fissures, l'oxydation de cette minéralisation primaire a donné un minerai riche en hématite, limonite.

PARTIE II
ANALYSE DE
DONNEES ET
GEOSTATISTIQUE

1. METHODES D'ANALYSE DE DONNEES, GEOSTATISTIQUE ET LOGICIELS UTILISES

1. 1. Méthodes d'analyse de données

Toute étude géostatistique et estimation des ressources 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. 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. 1. 2. Analyse bivarié

Le traitement statistique bivarié consiste à étudier deux variables aléatoires en même temps, et de définir la liaison entre elles (deux éléments chimiques analysés) à l'aide de plusieurs paramètres dont la covariance, le coefficient de corrélation simple et la régression linéaire simple.

- **La covariance entre deux éléments (X, Y)**

La covariance entre deux variables X et Y est définie comme :

$$Cov(X,Y) = E(XY) - E(X).E(Y)$$

Où E (XY)-Espérance mathématique du produit (X, Y).

E(X) - Espérance mathématique de X.

$E(Y)$ - Espérance mathématique de Y .

➤ **Le coefficient de corrélation simple** : Le coefficient de corrélation simple entre deux variables X et Y est désigné par ρ , il quantifie le lien entre ces deux variables et il est égal à :

$$\rho_{(x,y)} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

Exemple : La corrélation entre deux éléments chimiques Pb et Zn est calculé par :

$$\rho_{(Pb,Zn)} = \frac{\text{cov}(Pb,Zn)}{\sigma_{Pb} \cdot \sigma_{Zn}}$$

Généralement la signification du coefficient de corrélation simple dépend du nombre de données (Tableau 2).

Exemple: si $n = 200$; coefficient de corrélation n'est significatif que s'il supérieur ou égale à 0.14

Si $\rho \longrightarrow 0$ - la corrélation est nulle : quand la valeur de x croît celle de y peut aussi bien diminuer qu'augmenter.

Si $\rho \longrightarrow +1$ - la corrélation est positive : quand la valeur de x croît celle de y aussi.

Si $\rho \longrightarrow -1$ - la corrélation est négative : d'une façon générale quand la valeur de x croît celle de y diminue.

La signification du coefficient de corrélation est calculée à l'aide de la formule empirique (Baccini2010) : Si R positif significatif si :

$$R_{(x,y)} \geq \frac{2}{\sqrt{N-1}} \quad \text{Et } R \text{ négatif significatif si } : R_{(x,y)} \leq \frac{-2}{\sqrt{N-1}}$$

Tableau 2 - Signification du coefficient de corrélation en tenant compte du nombre d'échantillon.

N	ρ	N	ρ	N	ρ
3	0.997	15	0.514	47	0.288
4	0.950	16	0.497	52	0.273
5	0.878	17	0.482	62	0.250
6	0.811	18	0.468	72	0.232
7	0.754	19	0.466	82	0.217

8	0.707	20	0.444	92	0.205
9	0.666	21	0.433	102	0.195
10	0.632	22	0.423	200	0.140
11	0.602	27	0.381	400	0.095
12	0.576	32	0.340	600	0.082
13	0.553	37	0.325	800	0.071
14	0.532	42	0.304	1000	0.063

- **Régression linéaire simple** : Elle quantifie la relation linéaire entre deux variables X et Y et elle permet aussi d'estimer l'une à partir de la mesure de l'autre.

$$Y = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X^2} \cdot X + (Moy.Y - \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X^2} \cdot Moy(X))$$

1. 1. 3. Analyse multivariée

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. 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.

Lors des descriptions des tableaux, les méthodes d'analyse de données jouent le rôle d'instrument d'observation. « Comme pour le microscope qui sert à observer l'infiniment petit, le multidimensionnelle doit, pour être déchiffré, être soumis à ces programmes de calculs (analogie à une observation radiographique et préparation du sujet) ». Il s'agit alors de procéder à un éventuel recodage des données ou de transformer celles-ci. Le tirage des résultats ne constitue pas la tâche la plus délicate. L'interprétation des résultats nécessite une grande expérience du praticien (Géologues et autres).

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.

➤ Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales se propose de fournir la synthèse de l'ensemble des valeurs numériques des analyses chimiques sous forme de tableaux et de graphes (Morineau, 1988).

Cette méthode utilise 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 et surtout de représenter les données initiales d'un Tableau $R(n,p)$ par un nombre plus petit sans perdre l'information (Chamussy et al, 1994).

Soit un tableau (matrice) $R(n,p)$ où n est le nombre de lignes et p le nombre de colonnes (Tableau 3).

Tableau. 3 - Données géochimiques.

Ech	Ag	Pb	Cu	Hg	Zn	Au
1	100	25	30	10	6	5
2	150	50	60	20	9	10
3	120	10	10	30	11	15
.	.	.	.	.	.	.
N ₍₁₀₀₀₎	.	.	.	.	.	.

- Représentation géométrique

Les données peuvent être représentées graphiquement en nuage de points-ligne (Représentation R^p) et/ou en nuage de point variables (Représentation dans R^n) (Fig. 69).

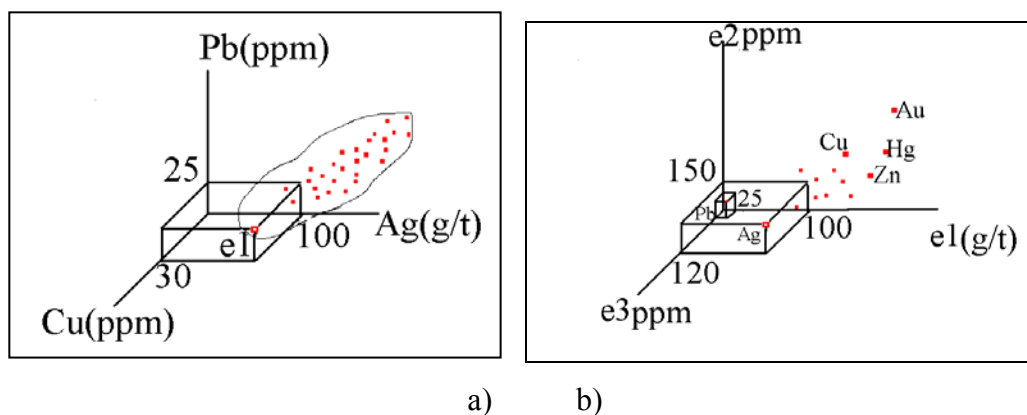


Fig. 69 - Représentation géométrique des données : a)- point-lignes R^p et b) point-variables R^n

Dans R^n , chaque point est défini par n coordonnées. Deux points- lignes apparaissent proches l'un de l'autre, si les deux lignes ont des mesures semblables des variables ou individus et éloignés l'un de l'autre si les mesures sont différentes.

En présence d'un nuage de points dans un espace à n dimensions, on cherchera à saisir et comprendre la dispersion des points c'est-à-dire la signification des différents allongements des nuages de points.

L'analyse en Composantes Principales ACP est l'une des plus anciennes méthodes de l'analyse factorielle. Elle est utilisée pour l'analyse des données qui sont représentées sous formes de tableaux de n individus et p variables. Soit $R(n, p)$ ce tableau de données de terme générale r_{ij} .

En ACP, ce qui importe c'est la forme du nuage des points par rapport aux axes (droites) qui passent par le centre de gravité du nuage. Il s'agit donc de rechercher les droites qui respectent au mieux l'ensemble des carrés des distances entre couples : C'est celles qui passent par le centre de gravité. D'où la nécessité de procéder à un changement de repère en centrant les variables de la matrice de données initiales. Si de plus les unités des variables sont différentes alors il est préférables de les réduire pour supprimer l'effet unité c'est-à-dire échelle:

$$x_{ij} = \frac{r_{ij} - \bar{r}_j}{\sqrt{n} \cdot \sigma_j}$$

Ainsi après cette transformation (changement), la matrice d'inertie ne serait autre que la matrice de corrélation linéaire simple: $C = X^T X$

On appelle inertie du point $N(I)$ par rapport au point P (Fig. 70) ou l'expression suivante:

$$InP(I) = \sum_{i=1}^n m_i \|X_i - P\|^2$$

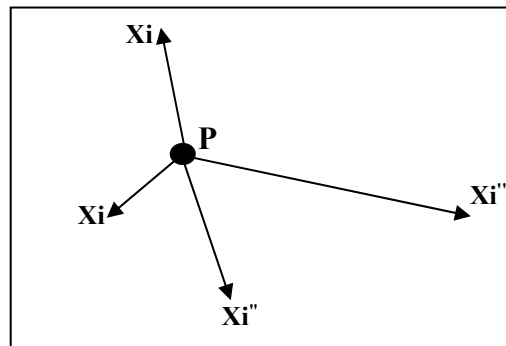


Fig. 70 - Représentation géométrique d'inertie des points X_i ($i=1$ à n) par rapport au point P .

Après le calcul de C, il est nécessaire de calculer l'inertie du nuage de point dans les principaux axes d'allongement désignés par F_i ($i=1$ à N) (Fig. 71) en diagonalisant – c'est à dire en recherchant les premières valeurs propres (variances) et les vecteurs propres correspondants.

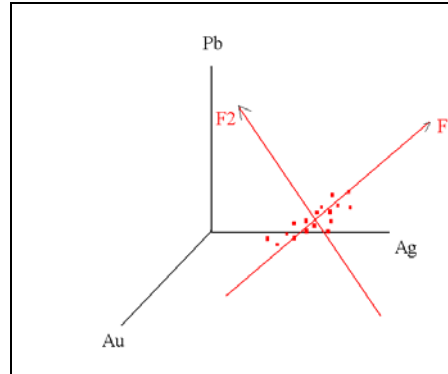


Fig. 71 - Représentation d'un nuage de points et les principaux axes d'allongement (Axes factoriels)

La diagonalisation de la matrice C (matrice d'inertie) permet d'obtenir les p vecteurs propres U_α et les p valeurs propres λ_α . Le vecteur U_α est connu par ses coordonnées dans l'espace R^p . Les coordonnées des points X^i sur les axes factoriels qui sont obtenus par:

$$F_\alpha(i) = X^i U_\alpha$$

$$F_\alpha(i) = \sum_{j=1}^k U_{\alpha j} X_{ij}$$

$F_\alpha(i)$ est le facteur de rang α associé à l'individu i : $F_\alpha(i)$ est la coordonnée de l'individu (échantillon) i sur l'axe factoriel U_α . Ce dernier a autant de composantes que de variables j . Dans la pratique l'inertie expliquée par l'axe factoriel :

$$T_\alpha = \frac{\lambda_\alpha}{\ln(I)} = \frac{\lambda_\alpha}{\sum_{\alpha=1}^p \lambda_\alpha}$$

Où $\ln(I)$ est l'inertie totale du nuage de points.

Les coordonnées des points variables sur l'axe α sont obtenues par la formule suivante

$$F_\alpha(j) = U_{\alpha j} \sqrt{\lambda_\alpha}$$

$F_\alpha(j)$ est appelé facteur de charge.

Généralement les résultats d'une ACP sont représentés sous forme de tableau (Tableau 4) et de graphique (Fig. 72).

Ex : Variances : F1= 66,52%, F2= 15,24%, F3= 9,06%

Variances cumulées = F1+F2+F3=90.82% : Les 3 facteurs représentent 90.82% de l'information totale.

Tableau. 4 - Exemple de facteurs de charge

Elément	F1	F2	F3
K	-0.48	0.41	0.71
Φ	-0.92	0.24	0.06
SH	-0.85	0.26	0.38
Sw	0.85	-0.26	-0.38
VCLAY	0.96	0.14	-0.05

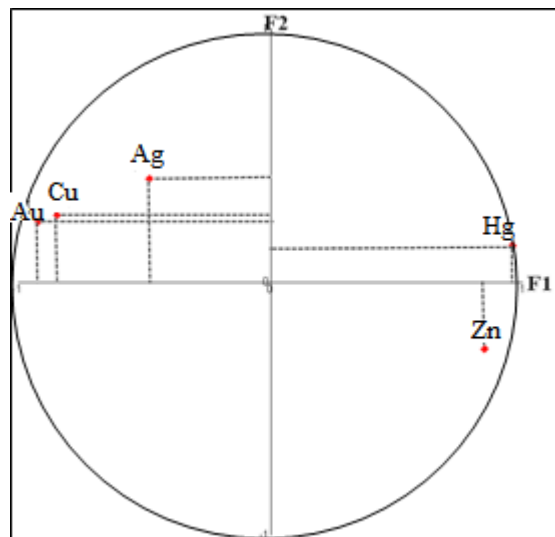


Fig. 72 - Représentation des facteurs de charge d'une ACP normée.

1.2. Méthodes géostatistiques

Actuellement, l'estimation des ressources/réserves minières se fait essentiellement à l'aide de méthodes géostatistiques. Cette méthode est basée sur la théorie des variables régionalisées et des fonctions aléatoires (Matheron, 1971, Armstrong et Carignan, 1997, Journel et Huijbregts, 1978, Chauvet, 1999). Elle consiste à procéder à l'étude de l'autocorrélation et la variabilité spatiale – variographie - Les résultats de cette variographie sont utilisés dans différents domaines et entre autre pour minimiser les erreurs d'estimations des ressources/réserves.

1. 2. 1. Les outils et modèles de la géostatistique

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 général 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.

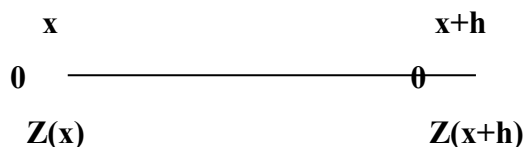
- Moment d'ordre 1 - $E[Z(x)] = m(x)$ qui est l'Espérance mathématique

- Moment d'ordre 2 - $2\gamma(x, h) = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\}$ appelé variogramme

ou

$$C(x, h) = E\{[Z(x+h) - m(x+h)][Z(x) - m(x)]\} \quad \text{appelé covariance}$$

Les deux moments quantifient chacun l'autocorrélation entre les valeurs $Z(x)$ au point x et $Z(x+h)$ au point $x+h$.



- Dans le cas de stationnarité les deux premiers moments seront :

$$E[Z(x)] = m$$

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

$$E[Z(x+h) \cdot Z(x)] - m^2 = C(h) = C(-h)$$

➤ Variogramme expérimental

Dans le cas de stationnarité, le variogramme $\gamma(x, h)$ ne dépend que du vecteur h (module et direction) **Hypothèse intrinsèque.**

En pratique, on ne dispose que d'une seule réalisation $[Z(x+h)-Z(x)]$ mais ces hypothèses permettent d'avoir plusieurs couples et le variogramme expérimental sera estimé par la formule :

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

Où $N(h)$ est le nombre de couples $[z(x), z(x+h)]$, séparé par une distance h suivant une direction θ . Les résultats obtenus peuvent être représentés sous forme graphique (Fig. 73).

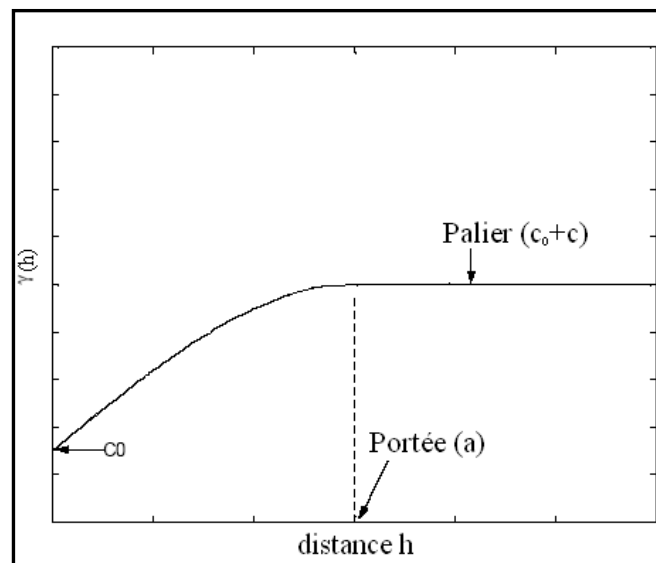


Fig. 73 - Les caractéristiques du graphe $\gamma(h)$ en fonction de h .

• Propriétés du variogramme

- **palier $\sigma^2 = C_0 + C$** : En général le palier correspond à la variance de la VA.
- **Portée a** : Distance où deux observations ne sont plus auto corrélées, elles ne sont plus liées ($\gamma(h) = c$) linéairement. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire.
- **Effet de pépité C_0** : Variation à très courte échelle, échelle d'observation, erreurs d'analyse et précisions analytiques et qualités d'échantillonnages.
- **Anisotropies** : Le variogramme est calculé pour tout couple de points, et il révèle dans certaines 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 différentes.

Selon l'existence ou non d'un palier et le comportement à l'origine les variogrammes expérimentaux sont ajustés à l'aide de modèles théoriques (Chauvet 1999), parmi lesquels les schémas à palier (Fig. 74), schémas sans palier (Fig. 75) et schémas à effets de trous (Fig. 76).

- **Schémas à palier :** Ce sont des variogrammes présentant un palier C.

➤ **Un comportement linéaire à l'origine:**

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

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

➤ **Un comportement parabolique à l'origine:**

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

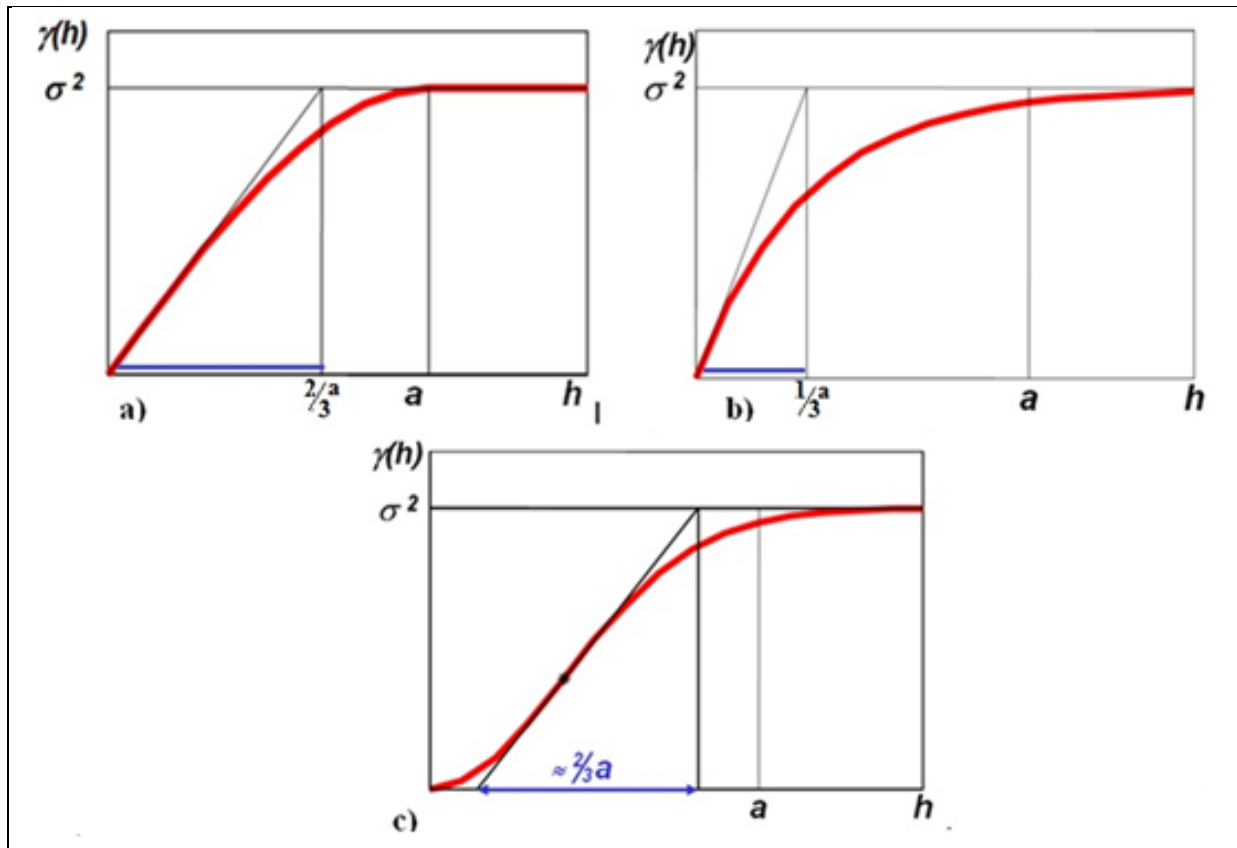


Fig. 74 - Schémas théoriques à palier d'ajustement des variogrammes.

- **Schéma sans palier:**

- Puissance (cas particulier : linéaire) : $\gamma(h) = \omega h^\lambda$ où $0 < \lambda < 2$

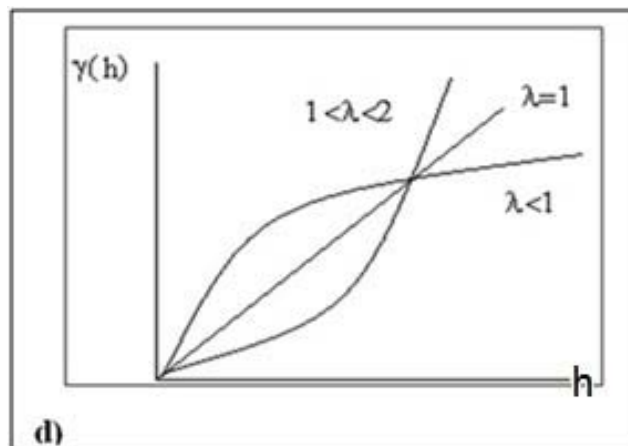


Fig. 75 - Schémas théoriques sans palier d'ajustement des variogrammes.

• Schéma à effet de trou

On dit qu'un variogramme $\gamma(h)$ présente un effet de trou si sa croissance n'est pas monotone (Fig. 76). Les graphes à effet de trou montrent une forme sinusoïdale au palier. L'effet de trou reflète une pseudo-périodicité de la variable régionalisée et qui est dû à la présence d'alternance de zones riches et pauvres (cf Fig. 43).

Il peut être estimé par: $\gamma(h) = 1 - \frac{\sin(h)}{h}, \forall h > 0$.

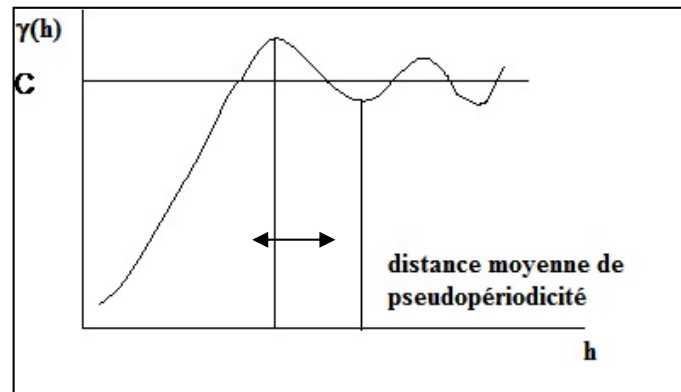


Fig. 76 - Schéma d'un Variogramme à effet de trou.

1. 2. 2. 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 :

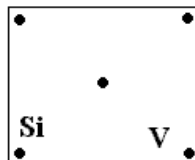
- Moyenne, $b = E \{[Z - Z^*]\}$, quand cette moyenne est nulle ($b=0$), on dit que l'estimation est sans biais sinon l'estimation est biaisée.

- 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 représentée par N sondages :



On démontre que la variance d'estimation s'écrit alors, en annotation symbolique:

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

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 $\sum_i \lambda_i = 1$.

1. 2. 3. Procédures de Krigeage ordinaire

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.

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** : Il suffit d'imposer la condition $\sum_{i=1}^N \lambda_i m_i = m \rightarrow \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$

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 :

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

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

Propriétés et remarques à propos du krigeage :

1 - Le système de krigeage est un système à $N+1$ équations à $N+1$ inconnues qui sont les N pondérateurs λ_i et μ qui est le paramètre de Lagrange.

2 - Le krigeage est un estimateur linéaire sans biais. C'est un interpolateur exact.

3 - Le système et la variance de krigeage rendent compte des 4 faits suivants :

a - de la géométrie du domaine à estimer - terme de $\bar{\gamma}(V, V)$.

b - de la géométrie entre estimant et estimateur - terme de $\bar{\gamma}(V, v_i)$

c - de la géométrie interne de l'information - terme de $\bar{\gamma}(v_j, v_i)$

d - de la structure sous jacente - terme de $\gamma(h)$.

Ce concept permet donc de calculer la variance d'estimation d'un volume V à partir de différents géométries et dispositifs. Nous allons donc utiliser cette propriété pour calculer les variances d'estimation de différentes configurations et avoir une idée sur la maille de prospection.

1. 3. Logiciels utilisés

Le traitement des données nécessite l'utilisation systématique de technique faisant appel à l'ordinateur.

Pour l'analyse des données nous avons utilisé des logiciels dont les principaux sont : Geostat tool box, et Surfer 08, Statgé, Statistica -2008 et Variowin pour le traitement géostatistique (variographie) .

• Logiciel "SURFER8"

C'est un logiciel à multiples utilisations, il a été utilisé pour l'établissement des cartes d'iso valeurs, la visualisation des résultats de krigeage et de cartographie automatique. Ce logiciel a été acquis par le Laboratoire de Géologie – UBMA (LRG) en 2009.

• Logiciel "StatGeo"

Ce logiciel a été développé par Mezghache (1989). Il a été utilisé essentiellement dans la gestion des données et pour le traitement statistique multivariable (calcul des matrices de corrélation, facteurs de charges, valeurs propres - ACP).

• Logiciel Statistica-2008

Ce logiciel a été utilisé pour le traitement statistique multivariés, bivarié et multivarié (statistiques descriptives, représentation graphique histogrammes et graphes de probabilités,

calcul des matrices de corrélations, calcul des facteurs de charges, valeurs propres - ACP). Tous les outils analytiques de la gamme *STATISTICA* sont des composantes intégrées du logiciel.

- **Logiciel Geostatistical Tool Box**

Geostatistical tool box a été utilisé pour le calcul des variogrammes 3D et le krigeage.

- **Logiciel Variowin**

C'est un logiciel de géostatistique permettant le calcul des variogrammes de surface, et les variogrammes directionnels avec une tolérance choisie. Ces derniers sont ajustés à l'aide de modèles théorique.

2. GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES RESSOURCES DU GISEMENT D'ANINI

2. 1. Travaux de recherche et d'exploration réalisés sur le gisement

La minéralisation ferrifère de Djebel Anini a été découverte au 19^{ème} siècle. Plusieurs travaux de recherche et prospection ont été effectués dans cette région. Les premières cartes géologiques (Sétif-Bousselam) et études géologiques et minières détaillées ont été faites durant la période de 1909 à 1967 par Savornin et Glaçon. D'autres études géologiques ont été effectuées plus tard par Vila (1980), Bujakowska (1989), l'O.R.G.M (1991) et Ouahioune, AEK et al. (2009, 2011).

- La cartographie géologique au 1/1000 a été établie, ainsi que les travaux de forages (31 forages) et d'échantillonnages. Cinq zones minéralisées (I, II, III, IV, V) et 19 filons ont été localisés (Fig. 77). Les ressources des zones I et II ont été estimées par Ouahioune, AEK et al. (2009).

- Quarante sondages carottés ont été réalisés (Ouahioune, AEK et al., 2011). Un total de 264 échantillons de carottes ont été prélevés durant ces deux campagnes. Les échantillons de carottes ont été analysés par colorimétrie sur Fe_2O_3 et FeT .

Ceci a permis de localiser de nouveaux corps de minerai de fer désignés par A, B et F (Fig. 77). les ressources de ces corps ainsi que celles des zones minéralisées III, IV et V (Fig. 77) ont été estimées (Ouahioune, AEK et al., 2011).

2. 2. Analyse de données d'exploration

2. 2. 1. Statistiques des données de carottes des campagnes d'exploration

L'ensemble des données de carottes des campagnes de prospections, a été analysé par monovariante et multivariante pour l'étude géostatistique.

a). Analyse monovariante

Au total 264 échantillons de carotte de 3m de longueur, ont été prélevés. Ces échantillons de carotte ont été analysés sur Fe_2O_3 , FeT , CaO et SiO_2 . Les paramètres statistiques de ces éléments ont été calculés. (Tableau. 5).

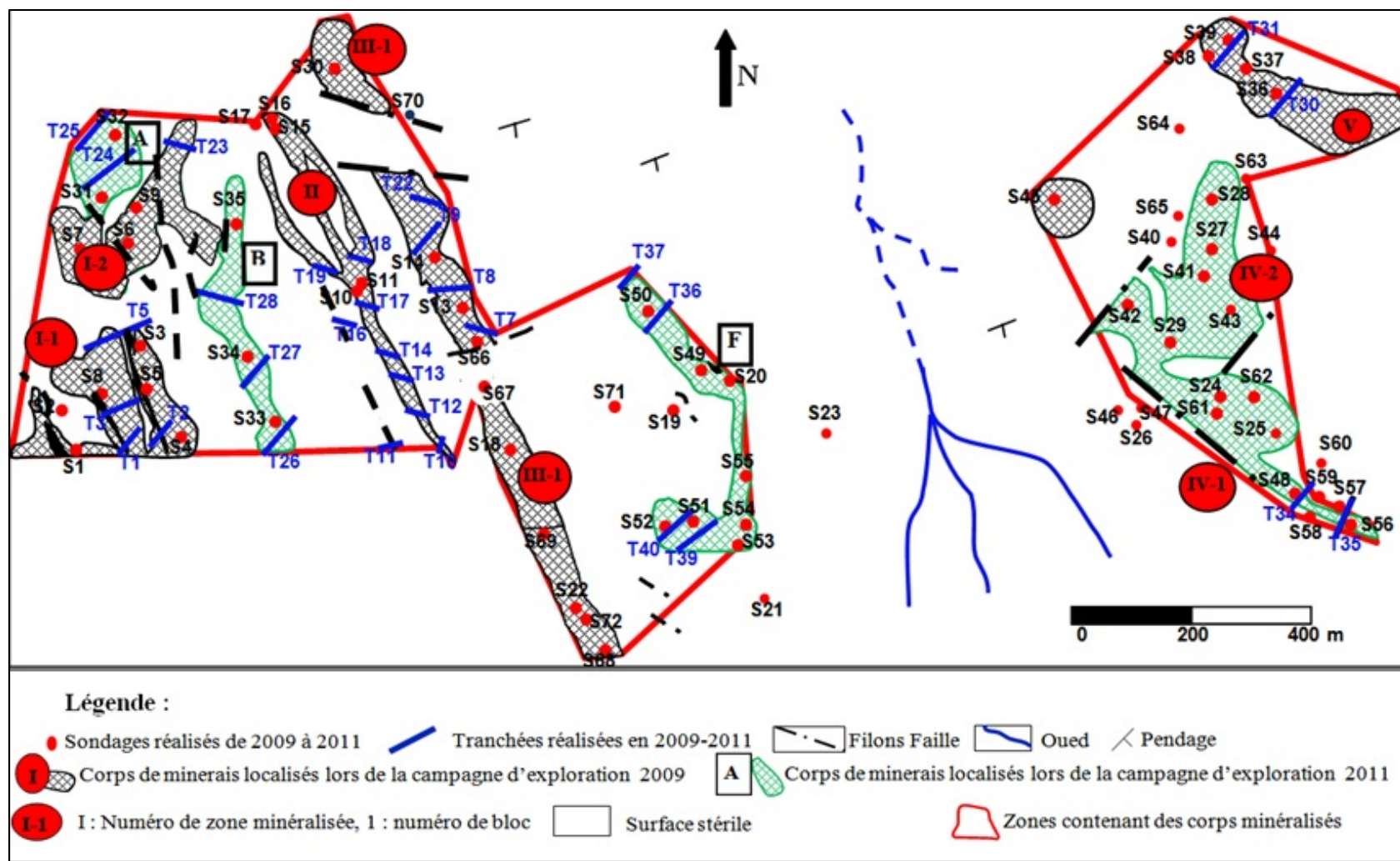


Fig. 77 - Délimitation des zones et corps de minerais établis par Ouahioune, AEK et al. (2009-2011).

Tableau. 5 – Statistique de l'ensemble des échantillons.

Elément	Moyenne	Ecart type	T min	T max	N
SiO ₂	21.90	14.90	0.03	50.35	264
CaO	7.02	13.62	0.05	52.74	264
FeT	27.45	13.65	0.37	66.14	264

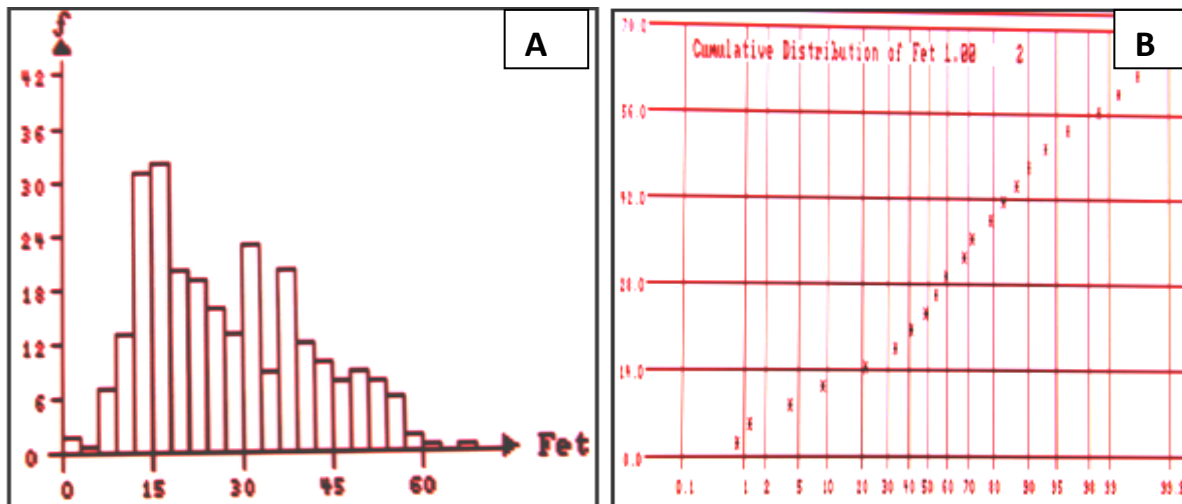
T min : teneur minimale, **T max** : teneur maximale, **N**: nombre des échantillons.

Les histogrammes et les graphes de probabilités de Fe₂O₃ et FeT ont été tracés.

-FeT : La courbe des fréquences cumulées de FeT (Fig. 78) montre un point d'inflexion qui divise la totalité des échantillons en deux sous populations; la première est celle des échantillons dont les teneurs varient de 0 à 30%, et la deuxième celle des échantillons dont la teneur est supérieure à 30%.

Sur le plan géologique : La première sous population représente les échantillons prélevés dans les argiles ferrugineuses.

La deuxième sous population est celles des échantillonnages prélevés du minerai de fer hématitique.



A : Histogramme des teneurs en FeT de l'ensemble des données des carottes dans le massif d'Anini.

B : Graphe de probabilité en FeT de l'ensemble des données des carottes dans le massif d'Anini.

Fig. 78 – Statistique des teneurs en FeT de l'ensemble des données des carottes dans le massif d'Anini.

b). Statistique bivariée

La matrice de corrélation linéaire simple a été calculée sur un ensemble de 264 données pour les différents oxydes analysés (Tableau. 6), afin de déterminer les corrélations qui existent.

Tableau. 6 - La matrice de corrélation des différents oxydes analysés.

	SiO ₂	CaO	FeT
SiO ₂	1	-0.62*	-0.47*
CaO	-0.62*	1	-0.28*
FeT	-0.47*	-0.28*	1

La matrice de corrélation montre que tous les oxydes sont corrélés négativement entre eux.

* Calcul de la signification des coefficients de corrélation linéaire simples.

Le nombre d'échantillon de carotte N=264. Alors on tient : $R(x,y) \geq \frac{2}{\sqrt{N-1}} = 0.12$

2. 2. 2. – Statistique des teneurs moyennes des sondages et tranchées

a). Statistique mono variable

Le traitement statistique a été effectué sur les 106 échantillons de carottes et tranchées. Ces échantillons ont été analysés sur FeT, CaO, SiO₂ et La masse volumique a été mesurée. Les paramètres statistiques de ces variables ont été calculés. (Tableau. 7).

Tableau. 7 - Statistiques élémentaires des teneurs moyennes des sondages.

Paramètres	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	N
SiO ₂	22.87	11.87	00.03	42.82	106
CAO	07.73	11.48	00.17	42.73	106
FeT	26.03	09.10	10.80	54.09	106
P	05.58	04.71	0.20	28.42	106
D	03.85	00.35	02.89	04.69	26

D : masse volumique, **P**: l'épaisseur du corps de minerai (m) **Min**: la teneur minimale - **Max**: la teneur maximale - **N**: le nombre des sondages, **Moyenne**: la teneur moyenne des sondages- **Ecart-Type**: l'écart-type des teneurs des sondages.

b) Statistique bivariée

Dans le cas du gisement d'Anini (D) n'a pas été mesuré systématiquement. Cependant l'étude statistique bivariée faite sur les valeurs des teneurs en fer total (FeT) et D, qui sont au nombre de 26 a permis d'établir une relation linéaire entre ces deux paramètres. Le coefficient de corrélation linéaire simple (R) a été calculé et il est égal à 0,49, la corrélation est positive et significative. La droite de régression linéaire simple par la méthode des moindres carrés a été calculée.

$$D = 3,020 + 0,024 * \text{FeT}$$

Cette relation a permis d'estimer D en fonction de FeT.

c). Statistique multivariée

Le calcul de la matrice de corrélation de l'ensemble des 106 données (Tableau. 6) et les facteurs de charge ont été calculés (Tableau. 8) et les cercles de corrélation ont été tracés (Fig. 79).

Tableau. 8 - Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement d'Anini.

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
Variance (%)	53,64	35,74	7,45
variance cumulée (%)	53,64	89,39	96,83
valeurs propres	2,15	1,43	0,30
FeT	0,82	-0,49	0,16
D	0,88	-0,27	-0,37
SiO₂	-0,79	-0,50	-0,31
CaO	0,26	0,93	-0,19

La représentation graphique des corrélations entre les variables 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 présentent une association entre la masse volumique et le FeT corrélée positivement au facteur F1 et négativement au facteur F2. Elle montre que la masse volumique dépend des teneurs en fer total.

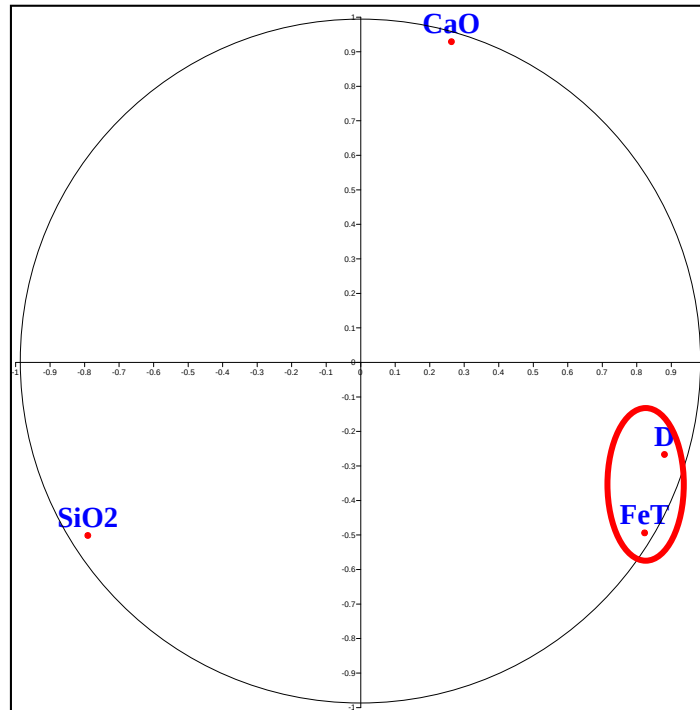


Fig. 79 – Cercle de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des données du gisement d'Anini.

2. 3. Estimation des ressources par méthodes conventionnelles

2. 3. 1. Méthodologie d'estimation pour l'estimation des ressources

L'estimation des ressources minières consiste à donner un tonnage de minerais ou de métal à partir de la combinaison d'un certain nombre de données mesurées (sondages, échantillons). Il existe plusieurs méthodes, Cependant l'une des méthodes la plus utilisée est celle des blocs géologiques. Elle est basée sur le principe de la délimitation des blocs à partir des travaux de prospection et d'exploitation (tranchées, affleurements géologiques et sondages). Les ressources en minerais sont calculées pour chaque corps de minerais à l'aide de la formule suivante:

$$Q_{\text{minerais}} = SPD \quad (1)$$

Où : S est la surface du corps de minerais,

P est l'épaisseur de ce corps de minerais,

D est la masse volumique qui varie en fonction des teneurs dans le corps de minerais.

Le contour du bloc doit correspondre à des limites naturelles de corps de minerai ou des lignes passant par des ouvrages miniers et/ou forages.

2. 3. 2. Paramètres géologo-économiques

L'estimation des ressources par méthodes conventionnelles a été effectuée par Ouahioune, AEK et al. (2009 ; 2011) à l'aide de la méthode de blocs géologiques. Les contours des blocs dégagés sont délimités en surface par les tranchées et affleurements géologiques (*cf* Fig. 77). En profondeur, ils ont été délimités par forages. La teneur moyenne minimale en fer total (FeT) pour l'estimation des ressources est de 25% et l'épaisseur minimale exploitable est de 3m. Les ressources en minerai ont été calculées pour chaque corps de minerai (Tableau. 9) à l'aide de la formule (1) : $Q = S \times P \times D$

Tableau. 9 - Récapitulatif des ressources en minerai de fer estimées par méthode conventionnelle (Ouahioune, AEK et al., 2009 ; 2011).

Zone m (Fig.77)	Blocs (Fig.77)	O . M délimitant ou appartenant aux corps de minerais	$\bar{X}$ (%)	S (m ²)	$\bar{P}$ (m)	V (m ³)	D (t/m ³)	Q. Minerai (t)
I	I-1	S1, S3, S4, S5, S8, T1, T2, T3, T4, T5	42,85	10100	4,09	41309	2,89	119383
	I-2	S6, S7, S9, T6, T23	49,51	8600	8,89	76454	2,89	220952
II	II	S10, S11, S15, T10, T12, T13,	45,09	5900	7,07	41713	2,89	120551
A	A	S31, S32, T24, T25	45,62	6200	3,34	20708	3,76	77862
B	B	S33, S34, S35, T26, T27, T28,	31,70	6900	8,33	57477	3,63	208642
F	F	S49, S50, S51, S53, S54, S55,	30,35	8400	9,44	79296	3,99	316391
III	III-1	S13, S14, S30, S70,T8,T9,T22	47,06	11000	5,42	59620	3,29	196150
	III-2	S18,S22, S69	27,74	6600	6,75	44550	3,29	146570

IV	IV-1	S24, S25, S48, S56, S61, S62,	26,66	13700	12,64	173168	3,78	654575
	IV-2	S28, S29, S41, S42, S43	36,14	11400	10,57	120498	3,40	409693
V	V	S37, S39, T30, T31	27,52	8600	3,43	29498	3,69	108848
Ressources globales (C1) année 2011 à teneur de calcul de 25% en Fe-T								2579616

Légende : **Zone m (Fig.77) :** zones minéralisées, **Blocs (Fig.77) :** partie de la zone minéralisée, **O. M. délimitant ou appartenant aux corps de minerais :** Ouvrage Minier délimitant de minerais, $\bar{X}\%$: teneur moyenne en fer, $S (m^2)$: superficie des corps minéralisés, $\bar{P}(m)$: extension verticale moyenne, **V (m^3) :** volumes, **D (t/m^3) :** masse volumique, **Q Minerais (t) :** quantité de minerai.

Les ressources du gisement d'Anini ont été estimées à 2,5 millions de tonnes de minerai classées dans la catégorie C1 (Tableau. 9).

2. 4. Estimation des ressources par méthode géostatistiques

- Choix de la variable régionalisée (PxD)

Les ressources en minerai d'un bloc V de surface S sont égales au produit $S \times P \times D$. Où S: la surface du corps de minerai (m^2), P: l'épaisseur du corps de minerai (m) et D: est la masse volumique (Kg/m^3).

Dans le cas du minerai de fer d'Anini P du corps de minerai varie d'un sondage à un autre c'est donc une variable régionalisée. Il en est de même pour la masse volumique (D) qui varie en fonction des teneurs, ainsi au lieu d'utiliser les deux variables P et D séparément il est préférable d'étudier le Produit Px D.

2. 4. 1. Variographie

Les variogrammes de surface et expérimentaux directionnels dans le plan horizontal de la variable régionalisée PD et des teneurs en FeT des carottes de forages ont été calculées et ajustées (Tableau. 10). Ils montrent une anisotropie où le grand axe a une direction $N135^\circ$ et le petit axe a une direction $N45^\circ$ (Figs. 80, 81 et 82).

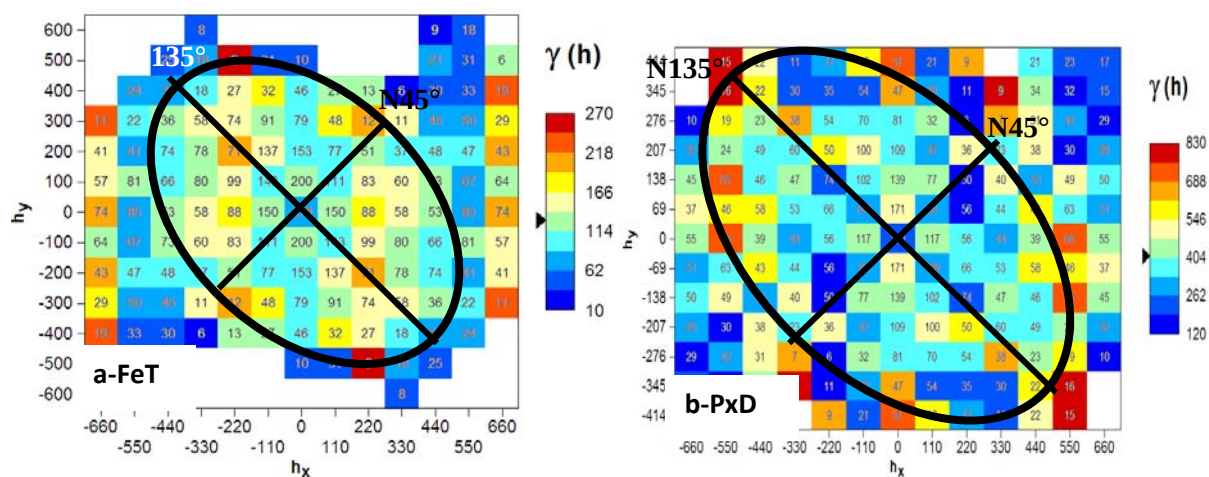


Fig. 80 - Variogrammes de surface des teneurs en FeT et de PxD.

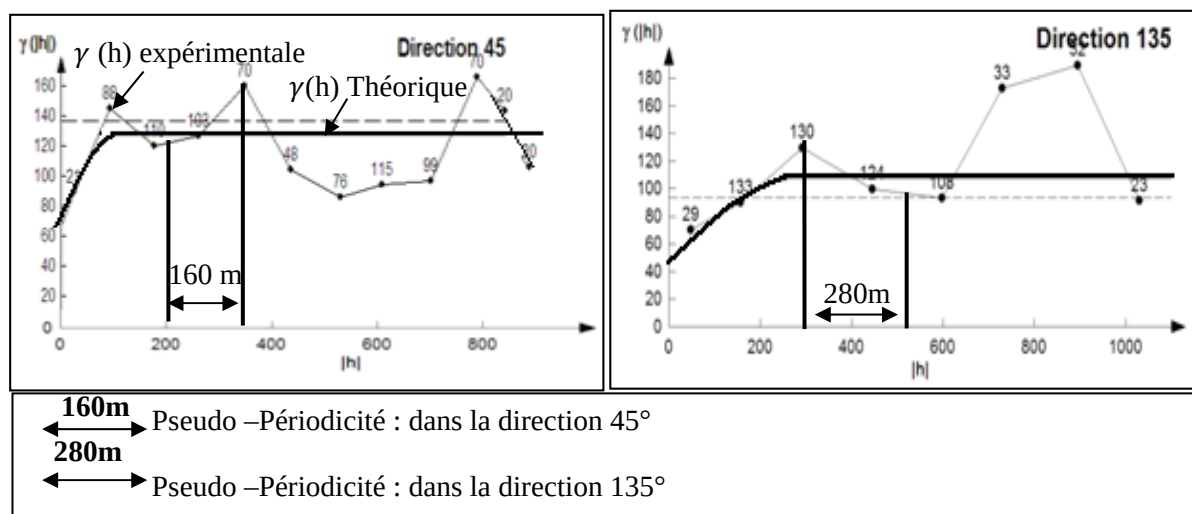


Fig. 81 - Variogrammes expérimentaux directionnels des teneurs en FeT et leurs ajustements.

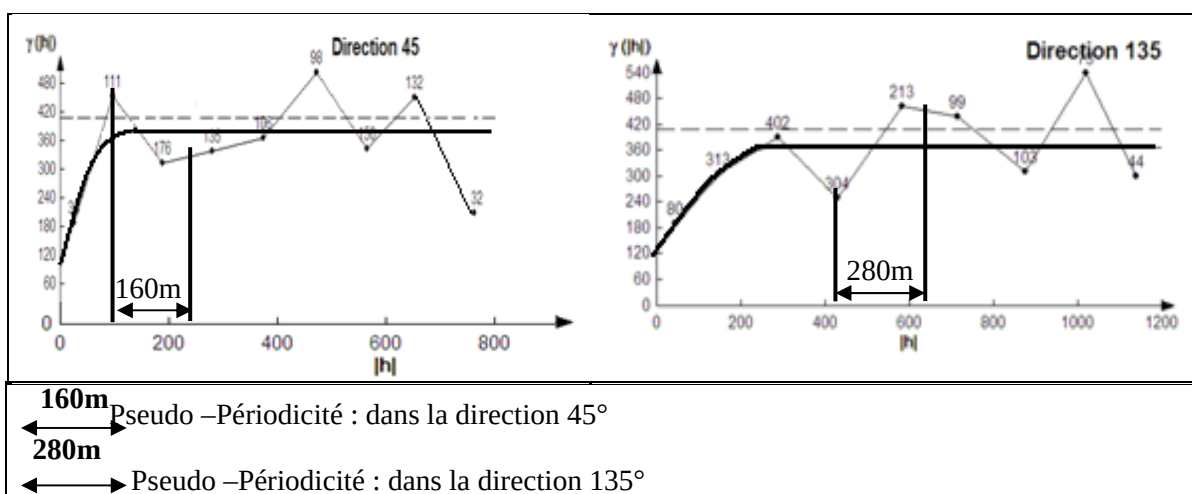


Fig. 82 - Variogrammes expérimentaux directionnels de PxDet leurs ajustements.

Tableau. 10 - Paramètres d'ajustement des variogrammes de FeT et de Px.D.

Variable régionalisés	Direction (°)	Tolérances (°)	Portée (m) (m)	Effet de Pépité (%) ²	Palier (%) ²	Modèle
FeT	45	20	102	67,2	61,6	Sphérique
	135	25	286	47	61,1	Sphérique
PxD	45	20	100,3	94,3	287	Sphérique
	135	25	288	127,1	241,9	Sphérique

Les variogrammes de FeT et du produit montrent un effet de trou dans toutes les directions latérales. L'amplitude de l'effet de trou dans la direction du grand axe est 280m en moyenne et il est de 160m en moyenne dans la direction du petit axe. Sur le plan géologique, l'effet de trou serait dû à une alternance de zone minéralisée et zone stérile. Les pseudo-périodicités ont été mesurées sur les graphes des variogrammes directionnels et de surfaces (Figs. 80, 81 et 82). Elle est de 280m dans la direction N135° et elle est égale à 160m dans la direction N45. Les valeurs de pseudo-périodicité sont différentes suivant les directions. La forme des karsts et donc lenticulaire et ces valeurs de pseudopériodicité représentent leurs longueurs et largeurs moyennes (Fig. 83).

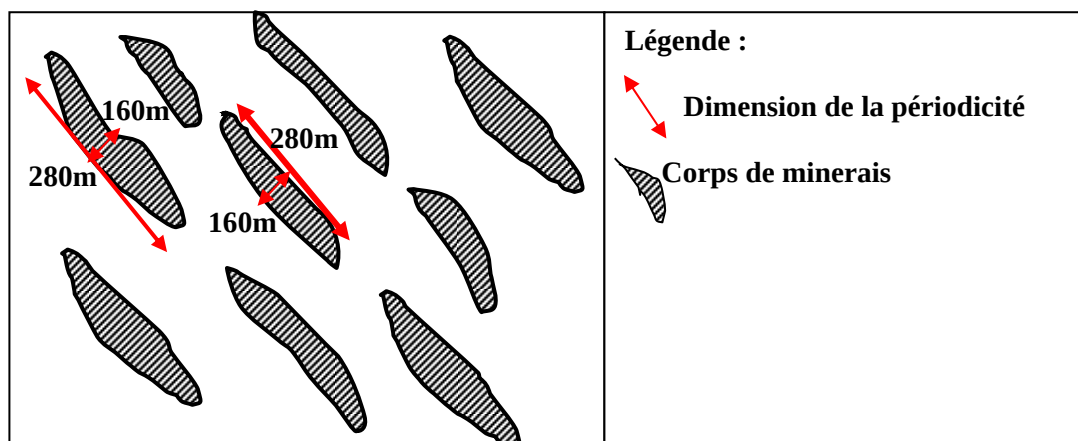


Fig. 83 – Schéma montrant la relation de l'effet de trou et la morphologie des corps de minerais.

Dans le cas de gisement karstique deux cas peuvent se présenter (Fig. 84) : La pseudo-périodicité en moyenne est régulière :

- Elle reflète la morphologie sphérique des corps de minerais (Fig. 84 -a).
- la pseudo-périodicité est irrégulière - elle varie selon les directions d'allongement des corps minéralisés et reflète la morphologie lenticulaire des karsts (Fig. 84 -b).

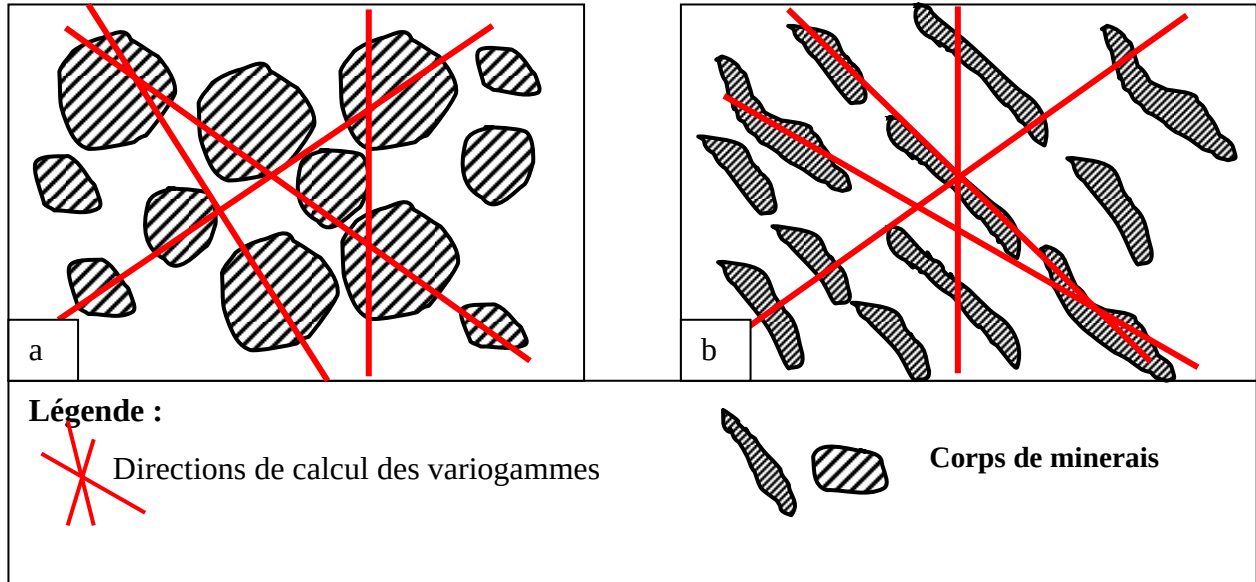


Fig. 84 – Différente forme de minéralisation Karstique.

2. 4. 2. Krigeage ordinaire, estimation des ressources et cartographie

- **Krigeage ordinaire**

Le krigeage des teneurs en FeT et les valeurs du Produit (Px D) des blocs de surface 20x20m, a été effectué (Tableau. 11).

Tableau. 11 - Paramètre des blocs du krigeage de FeT et Px D.

Axes	Minimum	Maximum	Dimension des blocs	Nombre de blocs
X	0	1300	20	65
Y	0	760	20	38

- **Estimation des ressources**

La quantité de minerai d'un bloc de surface 20x20 m est donc:

$$Q_{\text{minerai}} = (Px D)_{\text{krigé}} \times (20 \times 20)$$

Les ressources de l'ensemble des blocs krigés (Tableau 12) sont égales à 7,6 millions de tonnes de minerai.

Tableau. 12 – Résultats de krigeage de FeT et Px.D.

Teneur en FeT %				PxD t/m²				Quantité mineral (Tonnes)
Classe de teneurs		Nombre de bloc N	Moyenne	Classe de valeurs		Nombre de bloc N	moyenne	
Min	Max			Min	Max			
23,00	25,09	75,00	23,23	4000	8000	260	17,69	1839760
25,09	30,00	290,00	27,80	8000	12000	310	23,88	2961120
30,00	35,00	208,00	32,50	12000	16000	102	33,70	1374960
35,00	48,00	174,00	39,26	16000	24400	75	47,55	1426500
		Total = 747	30,70			Total = 747	30,70	Total = 7602340

Un grand écart a été noté entre les ressources calculées par les deux méthodes conventionnelles et géostatistique: 2,5 millions de tonnes de minerais par la méthode de blocs géologiques contre 7,6 millions de tonnes de minerais par méthode géostatistique de krigeage.

Même en essayant de corriger par la variance d'estimation (Tableau 12). Il en ressort que quelle que soit la valeur de la variance d'estimation petite ou grande, il existe une surestimation. Cette dernière est due au fait que le krigeage ne tient pas compte de la discontinuité de la minéralisation qui est reflétée dans le variogramme $\gamma(h)$ par l'effet de trou : des surfaces – volumes ont été estimées par krigeage par simple extrapolation alors qu'ils sont stériles d'après les données de prospection. Pour y remédier au moins partiellement à cette surestimation, dans l'estimation par méthode géostatistique, il faut éliminer les surfaces supposées minéralisées alors qu'elles sont stériles et qui se trouvent entre les corps de minerais délimités par les travaux de prospection effectués en 2009-2011. Pour cela il est fait appel au coefficient de minéralisation. Ce coefficient est égal au rapport de la surface minéralisée sur la surface totale : $C_m = \frac{S_m}{S_t}$

Où C_m : coefficient de minéralisation;

Sm: surface minéralisée;

St: la surface totale du gisement.

Dans le gisement d'Anini, le coefficient de minéralisation a été calculé et il est égale en moyenne à 0,30. Les ressources de ce gisement estimées à l'aide de la méthode géostatistique de krigeage et après correction par ce coefficient de minéralisation (Tableau. 13), sont égales à 2,28 millions de tonnes de minerais. Cette quantité est très proche de celle obtenue par la méthode conventionnelle. Cependant, cette façon de faire ne corrige pas totalement cette surestimation puisque les variations de la masse volumique ne sont pas prise en considération.

Tableau. 13 – Tableau comparatif de l'effet de la prise en compte des variances et du coefficient de minéralisation.

Q. minerais (Tonnes)	Q. minimale en minerais (Tonnes)	Q. maximale en minerais (Tonnes)	$\overline{Cm}$ Coefficient de minéralisation	Q. minerais corrigée (Tonnes)
7602340	4541956	10672633	0,30	2280702

Légende: Q. minerais : quantité de minerais calculée par krigeage en tonne;

Q. minimale en minerais : quantité de minerais calculée par krigeage en tenant compte des variances minimales en tonne;

Q. maximale en minerais : quantité de minerais calculée par krigeage en tenant compte des variances maximales en tonne.

Q. minerais corrigée : quantité de minerais calculée par krigeage multipliée par le coefficient de minéralisation.

- **Cartographie**

Les valeurs krigées et leurs variances ont été cartographiées (Figs. 85, 86, 87 et 88).

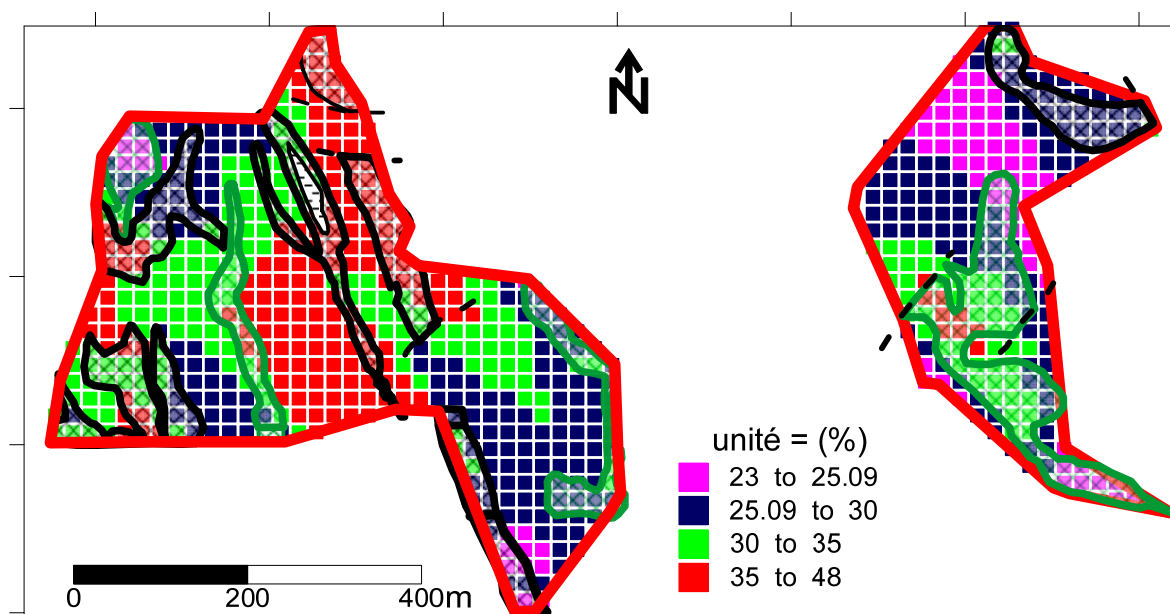


Fig. 85 - Carte des teneurs krigées en FeT dans les blocs de surface 20X20 m².

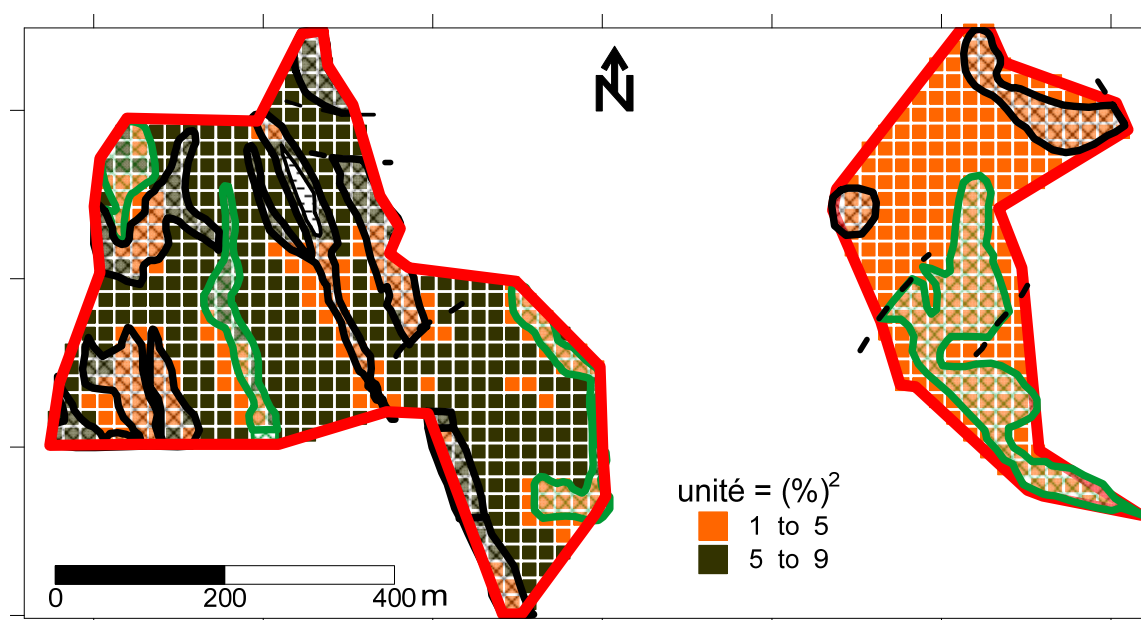


Fig. 86 - Carte des variances de krigeage de FeT dans les blocs de surface 20X20 m².
Légende voir (Fig. 85).

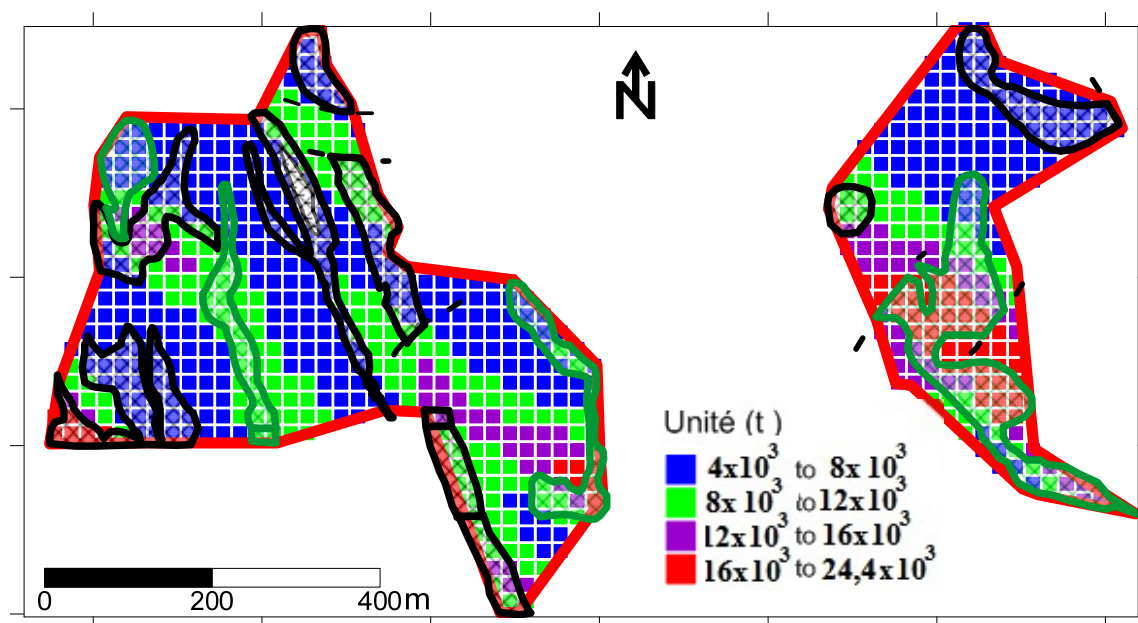


Fig. 87 - Carte du potentiel des ressources en FeT en tonne par unité de surface. Légende voir (Fig. 85).

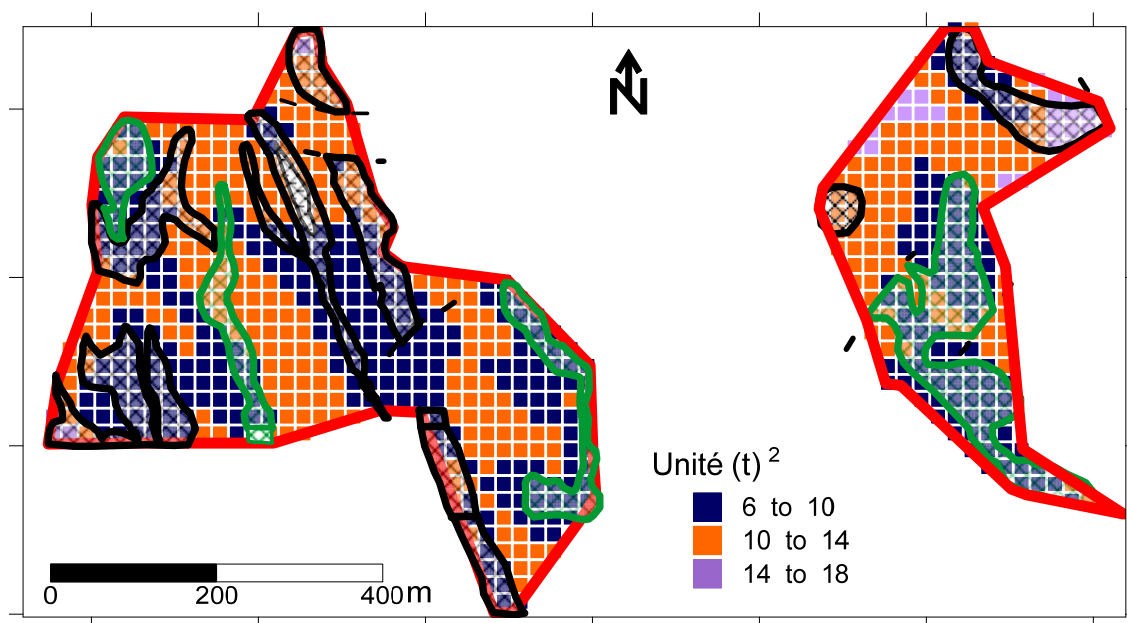


Fig. 88 - Carte des variances du potentiel en ressources dans les blocs de surface 20X20 m². Légende voir (Fig.85).

2. 5. Conclusions

- L'analyse statistique monovariée faite sur les teneurs de FeT, SiO₂, CaO des échantillons de carottes montre que le minerai présente une teneur moyenne de 26.03% en FeT, 22.87% en SiO₂, et 07.73% en CaO.
- L'analyse statistique multivariée a permis de déterminer les relations entre les différents oxydes et l'établissement de la droite de régression linéaire simple par la méthode des moindres carrés a été calculée. $D = 3,020 + 0,024 * FeT$
- Les ressources estimées par l'ORGM à l'aide de la méthode conventionnelle de blocs géologiques étaient de 2,5 millions de tonnes de minerai classées dans la catégorie C1.
- Les variogrammes expérimentaux de surface et directionnels du produit PxD et des teneurs en FeT dans les carottes de forages, ont été calculés. Ces derniers ont été ajustés à l'aide de modèles théoriques. Ces variogrammes montrent une anisotropie où le grand axe a une direction N135° et le petit axe a une direction N45°. L'effet de trou est visible dans toutes les directions. La pseudo-périodicité est de 280m dans la direction N135° et elle est de 160m dans la direction N45°. Ces valeurs de pseudo-périodicité n'étant pas les mêmes, la forme des karsts est donc lenticulaire. Ces valeurs représentent les dimensions moyennes de ces karsts.
- La quantité de minerais a été estimée, dans un premier temps, par la méthode géostatistique de krigeage à 7,6 millions de tonnes.
- Il est à noter une surestimation par la méthode géostatistique de krigeage qui est due principalement au fait que la discontinuité de la minéralisation reflétée par l'effet de trou sur les variogrammes, n'a pas été prise en compte.
- Pour y remédier au moins partiellement à cette surestimation, il était nécessaire d'éliminer les surfaces supposées minéralisées alors qu'elles sont stériles et qui se trouvent entre les corps de minerais délimités par les travaux de prospection. Pour cela, une correction des ressources estimées par méthodes géostatistiques a été faite à l'aide du coefficient de minéralisation. Après correction, ces ressources ont été estimées à 2,28 millions de tonnes de minerais. Cette dernière quantité est très proche de celle obtenue par la méthode conventionnelle. Cependant cette façon de faire ne corrige pas totalement la surestimation puisque les variations de la masse volumique ne sont pas entièrement prises en considération. Cette estimation corrigée peut être complétée par une simulation objet du gisement.

3. GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES RESSOURCES DU GISEMENT DE CHÂABET EL BALLOUT

3. 1. Travaux de recherche et d'exploration réalisés sur le gisement

Les premiers travaux sur gisement de Châabet-El-Ballout ont eu lieu en 1898(Kouzmine 1992). Les tentatives d'exploitation ont été 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 rentables 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 (SGAM) 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 climatiques et depuis aucune tentative de reprise des recherches n'a été entamée. Après l'indépendance de l'Algérie en 1962, le gisement de Châabet El Ballout a été exploré en détail par deux campagnes de prospection FERPHOS en 1989 et L'EREM en 1990.

- Kouzmine en 1990 a effectué des itinéraires de recherche au 1/1000 qui ont été réalisés suivant des profils parallèles de direction NS équidistant de 100m. A l'issue de ces travaux une carte géologique au 1/10000 a été établie.

- La prospection magnétique du secteur ouest du gisement a été réalisée par (Kouzmine 1990) à l'échelle 1/1000, suivant les profils du levé géologique, la prospection a été menée suivant deux phases.

- 68 sondages verticaux et inclinés ont été réalisés (Kouzmine 1990) suivant une maille de 100x50m (Fig. 33), ces sondages sont réparties en 43 sondages dans la zone ouest, 22 dans la zone centrale et 3 dans la zone Est.

- Les échantillons ont été prélevés à partir des carottes de sondage, au total 240 échantillons ont été soumis à l'analyse chimique sur les oxydes suivants : FeO, CaO, SiO₂.

3. 2. Analyse de données d'exploration

L'étude statistique et géostatistique du gisement de Châabet-El-Ballout n'a été effectuée que sur sa partie Ouest. La partie Est n'a pas été suffisamment reconnue – 58 échantillons sur une surface de 36 hectares.

L'ensemble des données de carottes des compagnes de prospections, a été analysé par méthodes monovariante et multivariante pour l'étude géostatistique.

3. 2. 1. Analyse monovariante

Le traitement statistique a été effectué sur les 182 échantillons de carottes prélevés de 31 sondages. Ces échantillons ont été analysés sur FeO (Fig. 89). CaO et SiO₂ (Tableau 14).

Tableau. 14 – Statistique de l'ensemble des échantillons.

Elés.	FeO	SiO ₂	CaO
N	182	182	182
Min (%)	1.38	1.67	0.96
Max (%)	56.58	85.72	55.36
$\bar{X}$ (%)	31.60	24.31	10.50
σ^2 (%) ²	243.43	563.28	124.50

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

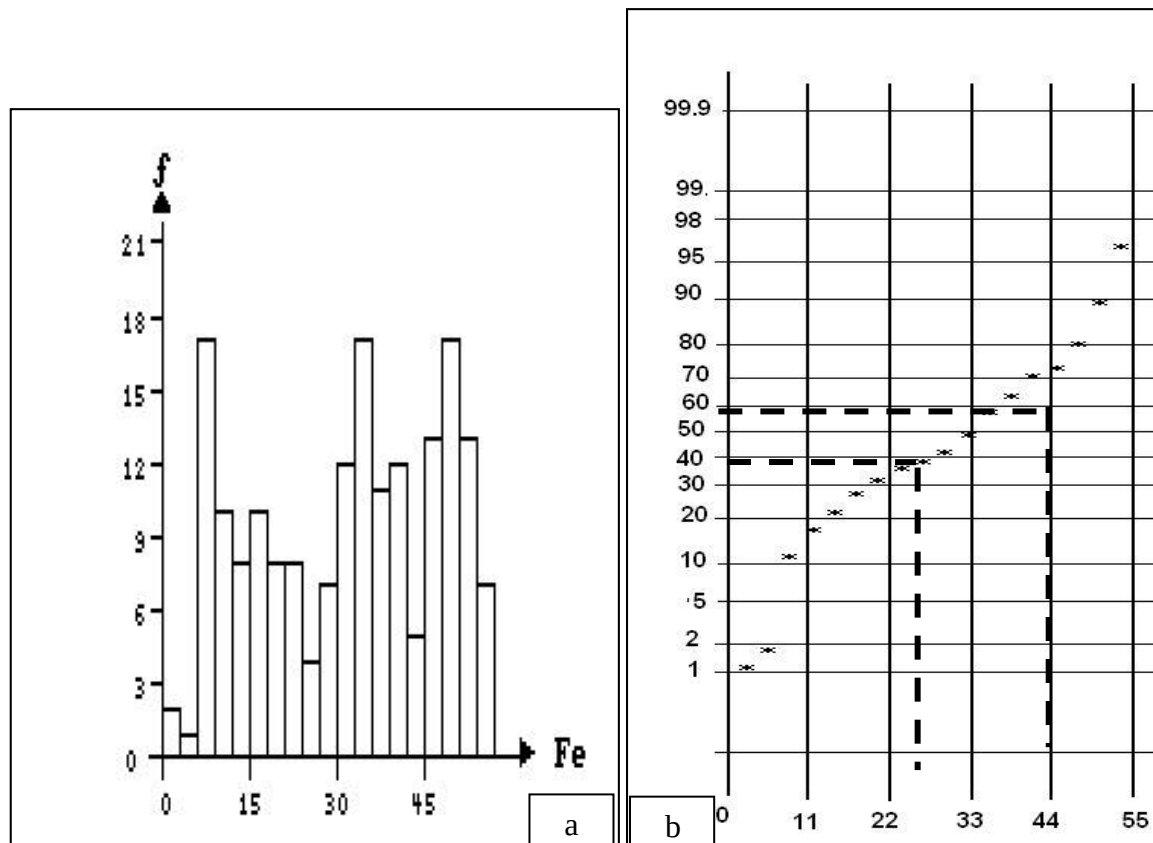


Fig. 89 – a : Histogramme, b : Fonction de répartition de l'ensemble des données des teneurs en fer.

La courbe des fréquences cumulées du FeO (Fig. 89-b) montre deux points d'inflexions qui divisent la totalité des échantillons en trois sous populations :

- Une sous population de minerai pauvre en FeO dont la teneur varie de 1.38% à 25% représentée par 40% des échantillons et qui correspond au minerai localisé dans les grès bréchifiés (Fig. 90).
- Une sous population de minerai dont la teneur en FeO varie de 25% à 44%. Cette sous population représente d'environ 30% du gisement et elle correspond au minerais d'hématite localisé dans les marnes ou zone de broyage de chevauchement (Fig. 90).
- Une troisième sous population riche en FeO (teneur >44 %). représentée par 30% du gisement et qui correspond au minerai localisé dans les zones d'infiltration des calcaires (Fig. 90). Cependant certaines fortes teneurs (>44%) peuvent appartenir au minerai localisé dans les marnes ou zone de broyage de chevauchement.

* - Statistique de FeO

Un traitement statistique des données de chacun des trois faciès a été effectué (Tableau 15).

Tableau. 15 - 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
] 1.38-25]	37.63	13.74	43.60	17.61	67	Dans les grés bréchifié
]25 - 44]	4.39	35.54	16.52	9.37	65	Minerais d'hématite dans les marnes ou zone de broyage de chevauchement
]44-56.58]	9.96	50.53	8.55	3.95	51	Infiltrations dans les calcaires

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

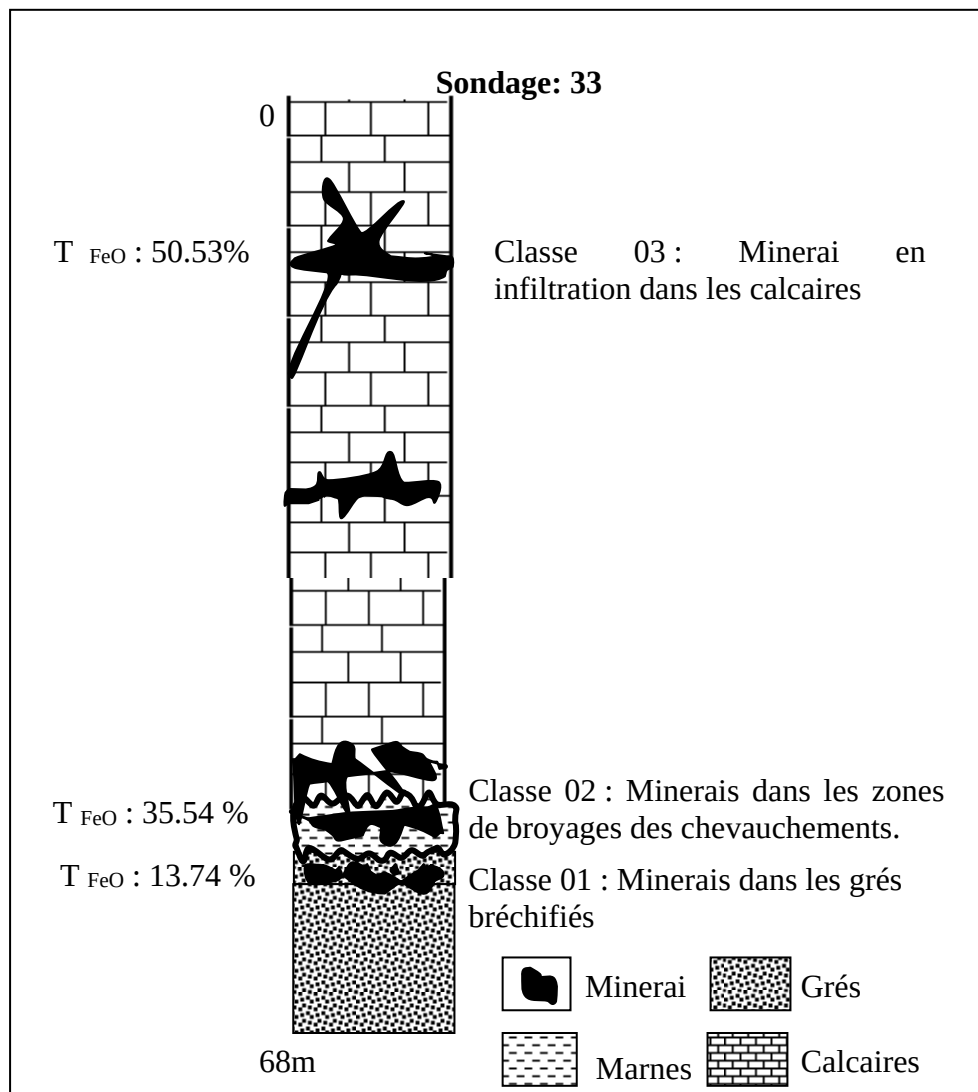


Fig. 90 – Distribution des classes des teneurs en fer dans les logs de sondage.

3. 2. 2. Analyse multivariable - Analyse en Composantes Principales (ACP)

Une ACP a été faite sur l'ensemble des données chimiques des carottes de sondages. La matrice de corrélations linéaires simples (Tableau. 16) montre que le FeO est corrélé négativement à CaO et SiO₂.

Tableau. 16 - Matrice de corrélation des oxydes calculée sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement de Châabet El Ballout.

Oxydes	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 (Tableau. 16), les facteurs de charge ont été calculés (Tableau. 17) et les cercles de corrélation ont été tracés (Fig. 91).

Tableau. 17 - Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement de Châabet El Ballout.

Elément	F1	F2	F3
Valeurs propres	L1 =1.68	L2= 2.95	L3= 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

♦ Interprétation des résultats de l'ACP

Les cercles de corrélations montrent une association constituée de CaO. SiO₂ (Fig. 91) elle est caractérisée par une corrélation positive avec le facteur F1 et pratiquement nulle avec le facteur F3. Elle représente l'encaissement du minerai: les grès et marnes du Miocène et/ou le

calcaire du crétacé supérieur. Cette ACP permet de confirmer le caractère épigénitique et de déduire que les solutions hydrothermales n'étaient ni siliceuses ni carbonatées.

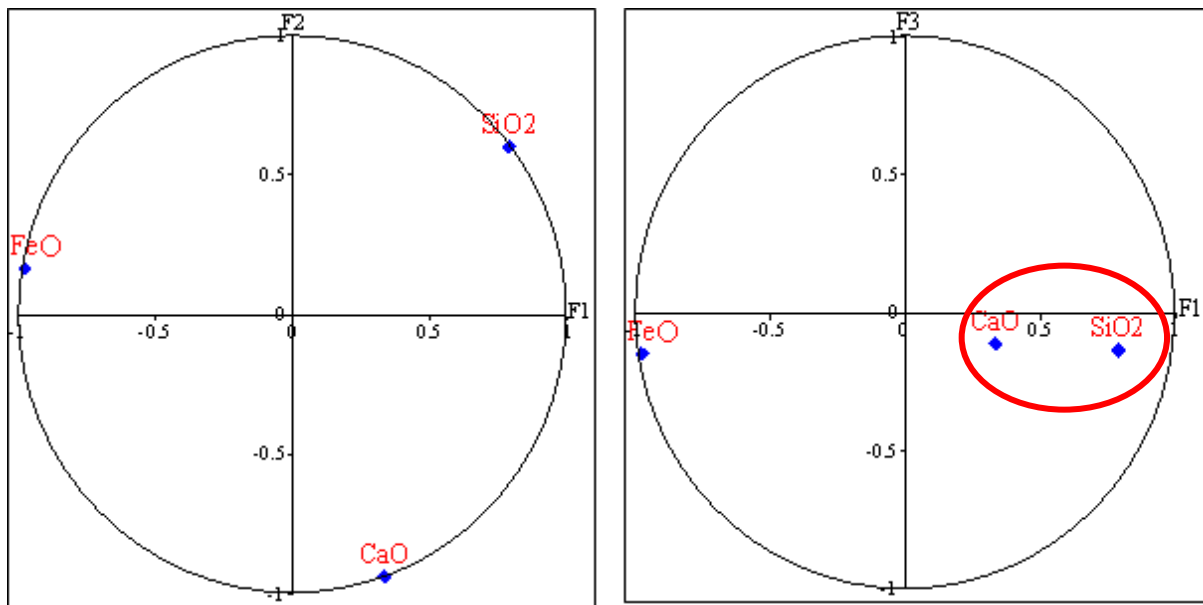


Fig. 91 – Les cercles de corrélations de l'ACP sur l'ensemble des données de sondages du gisement de Châabet El Ballout.

3. 3. Estimation des ressources par méthodes conventionnelles

3. 3. 1. Méthodologie utilisée pour l'estimation des ressources

L'estimation des ressources en minerai de fer du gisement de Chaabet El Ballout a été effectuée par la méthode des coupes géologiques verticales (Kouzmine, 1992) qui est essentiellement utilisée pour l'estimation des ressources des gisements de formes complexes prospectées à l'aide d'ouvrages miniers et sondages permettant l'établissement de coupes géologiques verticales. Le gisement est divisé en blocs limités chacun par deux coupes parallèles verticales. Le volume du bloc est calculé en multipliant la surface moyenne minéralisée dans les deux coupes par la distance séparant ces deux coupes.

Dans le gisement de Chaabet El Ballout le volume (V) d'un bloc délimité par deux coupes de directions N-S de surfaces S1 et S2 distantes de l (cf Fig. 33) est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$V = \frac{S1 + S2}{2} . l$$

Si $\frac{S1+S2}{S1} \cdot 100$ est supérieur à 40, alors le volume du bloc est calculé à l'aide de la formule

suivante :

$$V = \frac{S1 + S2 + \sqrt{S1 \cdot S2}}{3} \cdot l$$

3. 3. 2. Paramètres géologo-économiques

Kouzmine (1990) a procédé au calcul des ressources à l'aide de la méthode des coupes géologiques verticales. La délimitation des corps de minerais exploitables a été faite sur la base des paramètres géologo économiques suivant :

- Teneur de coupure en FeO = 20%
- Puissance minimale d'exploitation : 2.0m
- Epaisseur maximale des couches stériles et minerais non exploitable : 3.0m

Les ressources du gisement de Châabet El Ballout ont été estimées à 2.93 millions de tonnes (Tableau. 18).

Tableau. 18 - Récapitulatif des ressources en minerais de fer estimées par méthode conventionnelle Kouzmine et al. (1992).

N Corps	Blocs	O . M appartenant aux corps de minerais	$\bar{X}$ (%)	S (m ²)	$\bar{P}$ (m)	V (m ³)	D (t/m ³)	Q. Minerais (t)
Corps N01	1	S41. S42	42.30	1965	100	196500	2.8	275100
	2	S42. S34. S35. G21. G25	45.2	1152	100	115200	2.8	322560
	3	S01. S03. G36. G39	42.72	490	100	49000	2.8	137200
	4	S34. S35. S04. S05. G08. G11. G16	47.29	1184	100	118400	2.8	331520
	5	S01. S03. S07. G36. G40	42.03	555	100	55500	2.8	155400
	6	S04. S05. S11. S12	45.15	1099	100	109900	2.8	307720
	7	S16. S15	46.64	310	100	31000	2.8	86800
	8	S07. S19. G38	43.82	503	100	50300	2.8	140840
	9	S11. S12. S06	44.60	1246	36.65	45670	2.8	127876
	10	S16. G02. G04	46.79	433	100	43300	2.8	121240

	11	S19. G38	43.97	856	50	42800	2.8	119840
	12	S14. S16	44.98	308	130	40040	2.8	112110
	13	S14. G01	46.52	173	50	8650	2.8	24220
Corps N02	14-15	S32. S33. G32. G31. G42	53.06	1515	50	75750	2.8	212100
	16-17	S32. S33. S18. S01. G35	45.37	1255	85	106750	2.8	298900
Corps N03	18	S36. G20. G22. G23. G24. G26	43.99	75	100	7500	2.8	21000
	19	S36. S05. G23. G30	42.59	141	100	14100	2.8	39480
	20	S05. S15. S150	41.51	442	78	34500	2.8	96600
Ressources globales (C1+C2) année 1992								2930506

Légende : NO1 Corps: corps de minerai. Blocs: partie de la zone minéralisée. O. M . appartenant aux corps de minerais : Ouvrage Minier délimitant de minerais. $\bar{X}\%$: teneur moyenne en fer. S (m^2) : superficie des corps minéralisés. $\bar{P}(m)$: extension verticale moyenne. V (m^3) : volumes. D (t/m^3) : masse volumique. Q Minerai (t) : quantité de minerai.

Kouzmine (1992) considère que la minéralisation est stratiforme ; puisqu'elle est concordante à la stratification des couches encaissantes. Etant donné que la structure géologique est en duplex, la répartition de la minéralisation est très irrégulière, avec une très grande discontinuité, elle remplit les zones fissurées et bréchifiées dans les calcaires, les grès et parfois dans les zones de broyages des chevauchements majeurs formées par les marnes (Fig. 36 et 37).

3. 4. Estimation des ressources par les méthodes géostatistiques

- Rappelons que la minéralisation est relativement continue dans le plan horizontal mais elle est discontinue et irrégulière dans le plan vertical à cause de la structure en duplex. Cette discontinuité et irrégularité ne permettent pas de mesurer l'épaisseur totale du minerai dans le sondage.
- De plus les minerais de fer sont ferromagnétiques alors que l'encaissant ne l'est pas. Ces caractéristiques permettent d'envisager une séparation magnétique.
- L'estimation des ressources dans des structures morphologiques complexes, très irrégulières et avec une très grande discontinuité cause un problème de surestimation.

Pour les raisons sus citées, deux approches ont été envisagées pour l'estimation globale.

3. 4. 1. Première approche

a). Variables régionalisées utilisées et statistiques

Cela a consisté à ramener l'ensemble des données à 2D. (Fig.33). Dans cette approche, l'épaisseur du minerai (EPM) a été estimée en multipliant l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation (EHP) par le coefficient de minéralisation (CM) calculé dans le plan vertical- épaisseur de la couche (Fig. 92). Il est à rappeler que la minéralisation dans le plan horizontal est continue. Le coefficient de minéralisation n'a donc été calculé que dans le plan vertical à l'aide de la formule linéaire comme définie dans le gisement d'Anini.

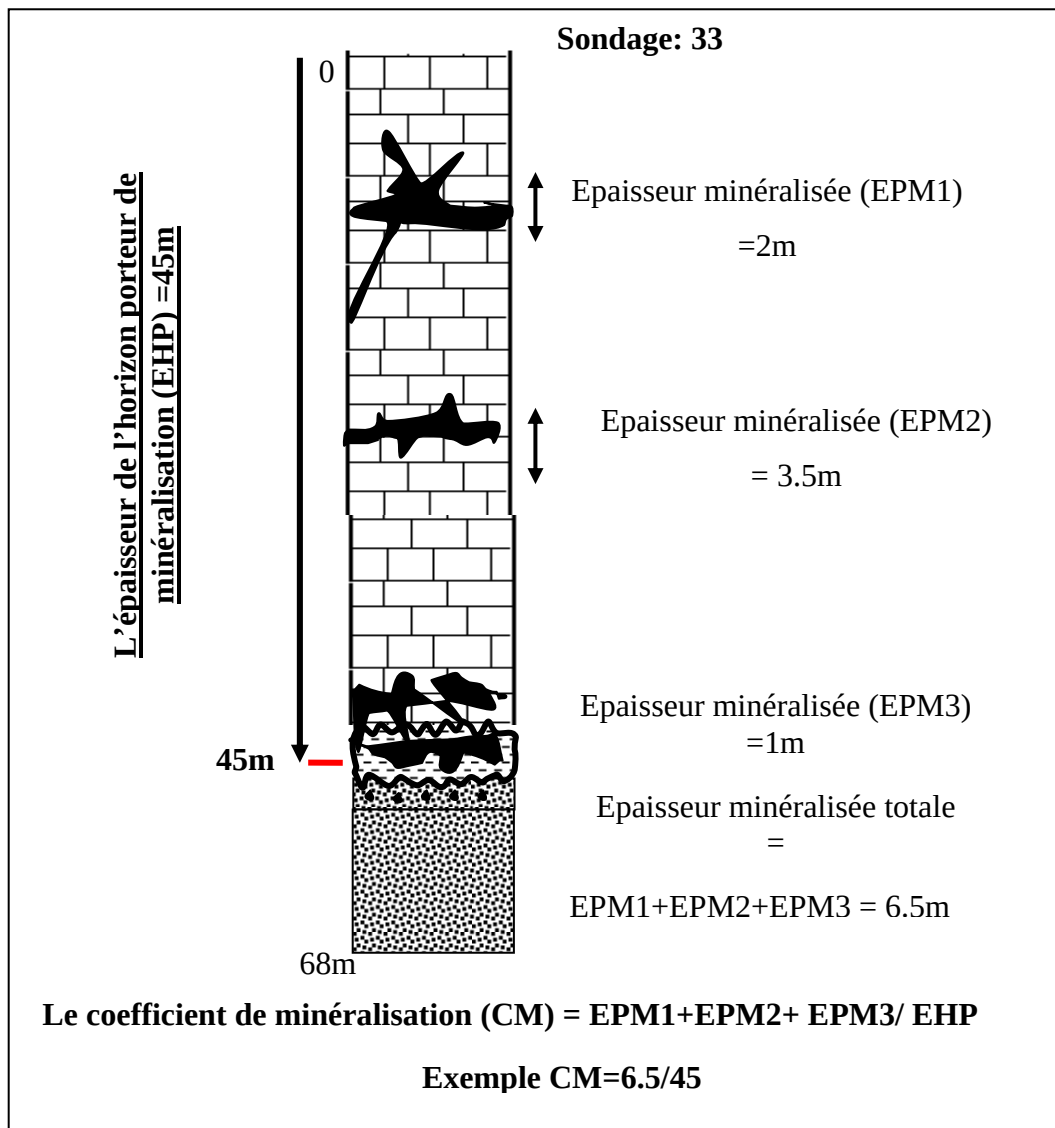


Fig. 92 - Schéma explicatif du calcul du coefficient de la minéralisation dans les sondages.

- **Statistiques des variables régionalisées**

Un traitement statistique monovarié a été effectué sur 31 données de chaque variable régionalisée (Tableau 19).

Tableau. 19 – Statistique d'EHP et CM.

Variable	EHP (m)	CM
N	31	31
Min	10.80	0.09
Max	67.50	0.78
$\bar{X}$	33.43	0.28
σ^2	269.14	0.046
σ	16.40	0.21
Cv	49.07	67.03

- **N**: le nombre des sondages. **Min**: valeur minimale. **Max**: valeur maximale. $\bar{X}$: la valeur moyenne σ : l'écart-type des sondages. **Cv** : coefficient de variation.

b). Variographie

Les variogrammes de surface (Figs. 93, 94) et expérimentaux directionnels des variables régionalisées : Epaisseur de l'horizon porteur de minéralisation (EHP) et coefficient de minéralisation (CM) ont été calculés et ajustés (Fig. 95, 96) (Tableau. 20).

- Les variogrammes de l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation (Fig. 95) et du coefficient de minéralisation (Fig. 96) montrent une anisotropie zonale, où le grand axe a une direction N160° et le petit axe a une direction N70°.

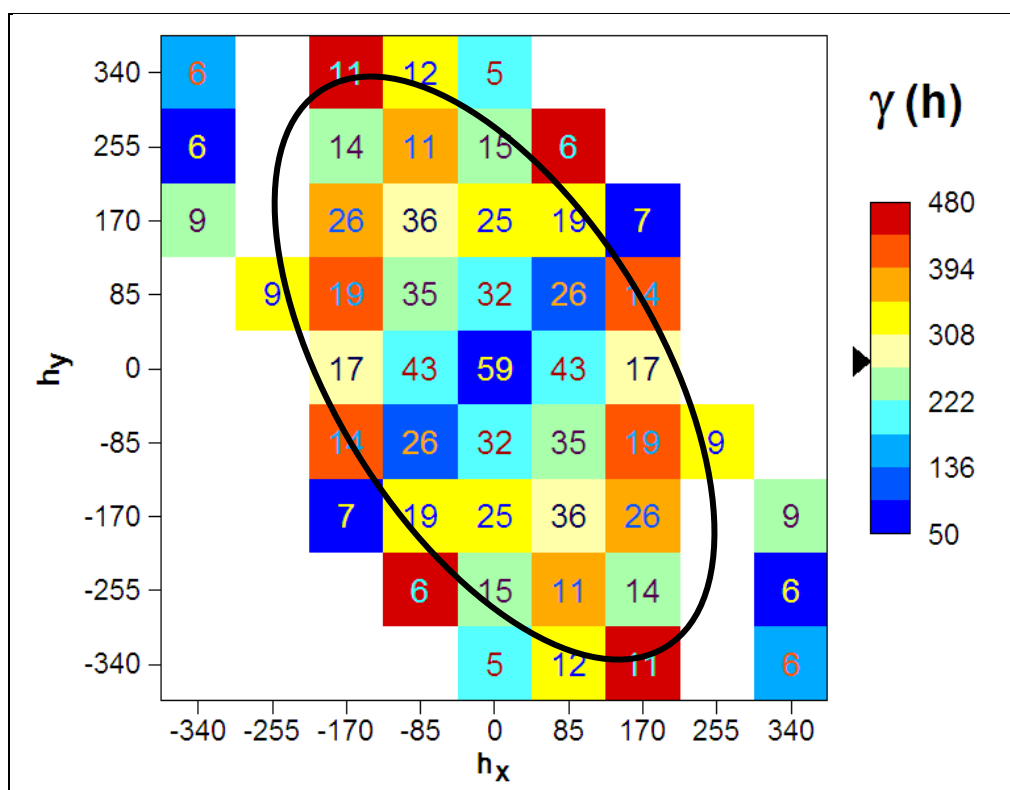


Fig. 93 - Variogramme de surface de l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation (EHP).

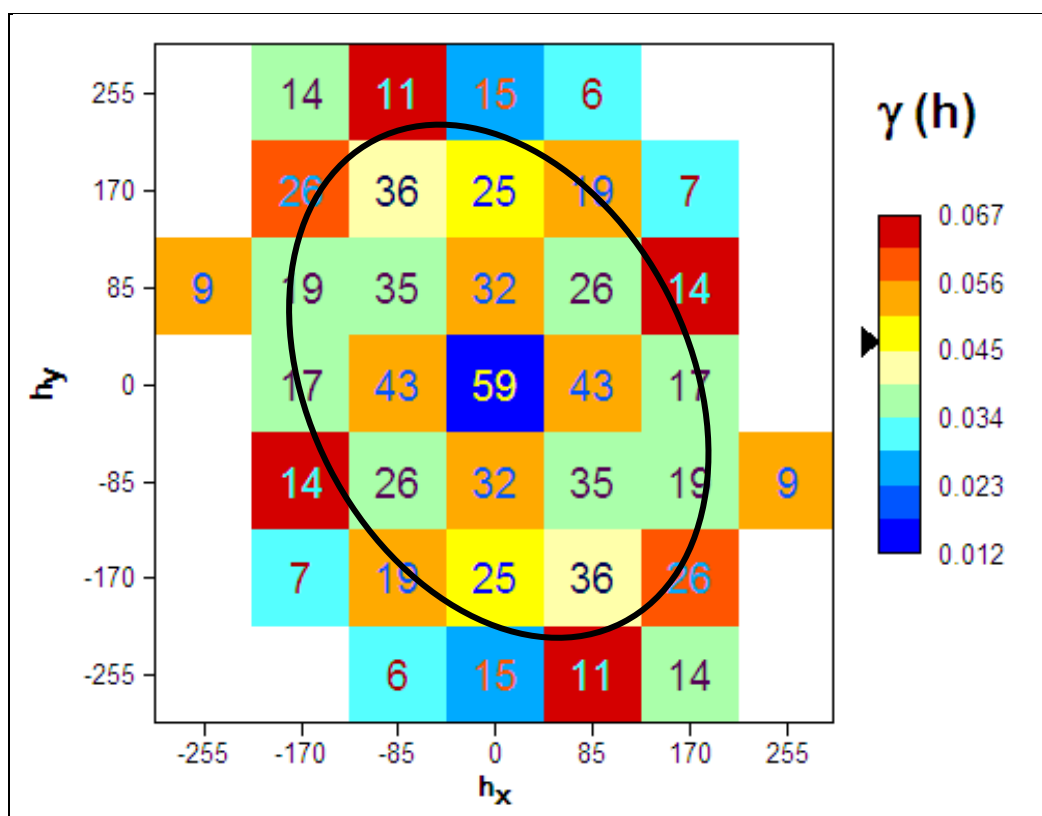


Fig. 94 - Variogramme de surface du coefficient de minéralisation (CM).

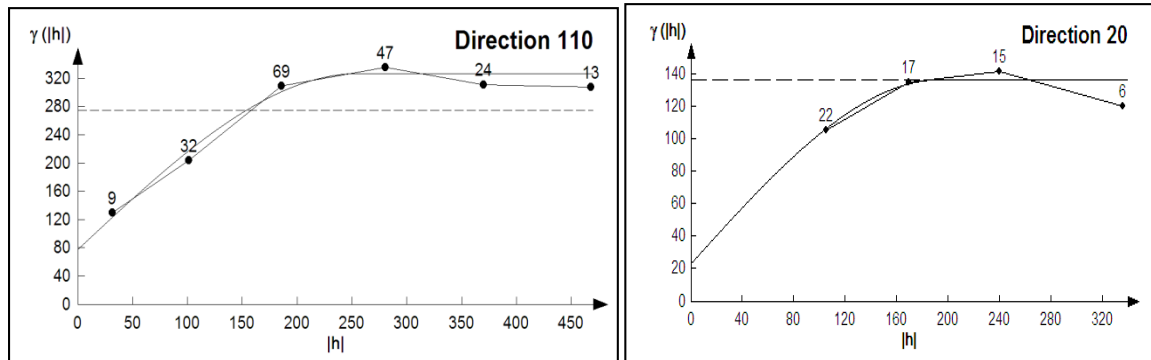


Fig. 95 - Variogrammes expérimentaux directionnels de l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation (EHP) et leurs ajustements.

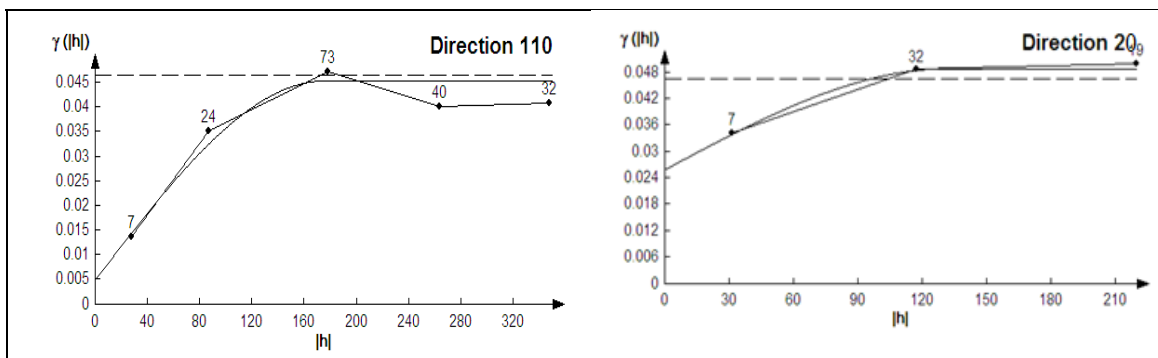


Fig. 96 - Variogrammes expérimentaux directionnels du coefficient de minéralisation (CM) et leurs ajustements.

Tableau. 20 - Paramètres d'ajustement des variogrammes de CM et EHP.

Variable régionalisés	Direction (°)	Tolérances (°)	Portée (m)	Effet de Pépité	Palier	Modèle
EHP	20	25	194	23.8	113.4	Sphérique
	110	20	257	78.39	249.2	Sphérique
CM	20	25	132	0.026	0.023	Sphérique
	110	25	175	0.005	0.0405	Sphérique

c). Krigeage ordinaire, estimation des ressources et cartographie

• Krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire a été effectué par le logiciel surfer08. Dans un premier temps, les valeurs moyennes des variables régionalisées EHP et CM, des blocs de surface 20x20m² (Tableau. 21) ont été krigées.

Tableau. 21- Paramètre des blocs du krigage des deux variables CM et EHP.

	Axe X (m)	Axe Y (m)	Taille du bloc (m)	Nombre de blocs
Début	86260	53880	20	23
Fin	86700	54340	20	24

Dans un deuxième temps l'épaisseur minéralisée (EPM) a été calculée; en utilisant la formule suivante :

$$EPM = CM_{\text{krig}} \times PMT_{\text{krig}}$$

Où - EPM : L'épaisseur minéralisée du bloc de (20x20m²);

- CM_{krig} : Le coefficient de minéralisation krigé;
- PMT_{krig} : L'épaisseur minéralisée totale krigée.

• Estimation des ressources

L'estimation des ressources en minerai de fer de chacun des blocs a été faite en multipliant les variables krigées EHP, CM la surface du bloc du modèle (20x20m²) et la masse volumique.

$$Q_{\text{minerai}} = EHP \times CM \times D \times (20 \times 20)$$

$$\text{Sachant que } EPM = EHP \times CM \text{ alors } Q_{\text{minerai}} = EPM \times D \times (20 \times 20)$$

Où- D : la masse volumique ;

Dans le gisement de Châabet El Ballout il existe 5.6 millions de tonnes de roche minéralisée contenant 1.9 million de tonnes de minerai de fer (Tableau. 22).

Tableau. 22 – Récapitulatif des ressources en fer et quantité de l'encaissant minéralisé.

EHP					EPM				
Classe des		N bloc	Moyenne (m)	Q encaissant minéralisé (t)	Classe de		N bloc	Moyenne	Q Minerai (t)
Mi n	Max				Min	Max			
0	20	2	18.40	35331.80	0	10	79	7.50	664012.90
20	40	127	32.30	3938800.20	10	15	79	12.76	1129491.80
40	60	36	42.92	1621814.70	15	20	7	16.62	130317.86
		Total=165	31.20	5595946.70			Total=165	12.29	1923822.60

• Cartographie

Les valeurs de l'épaisseur du minerai calculée des deux variables EHP. CM Krigées et leurs variances ont été cartographiées (Figs. 97 à 101).

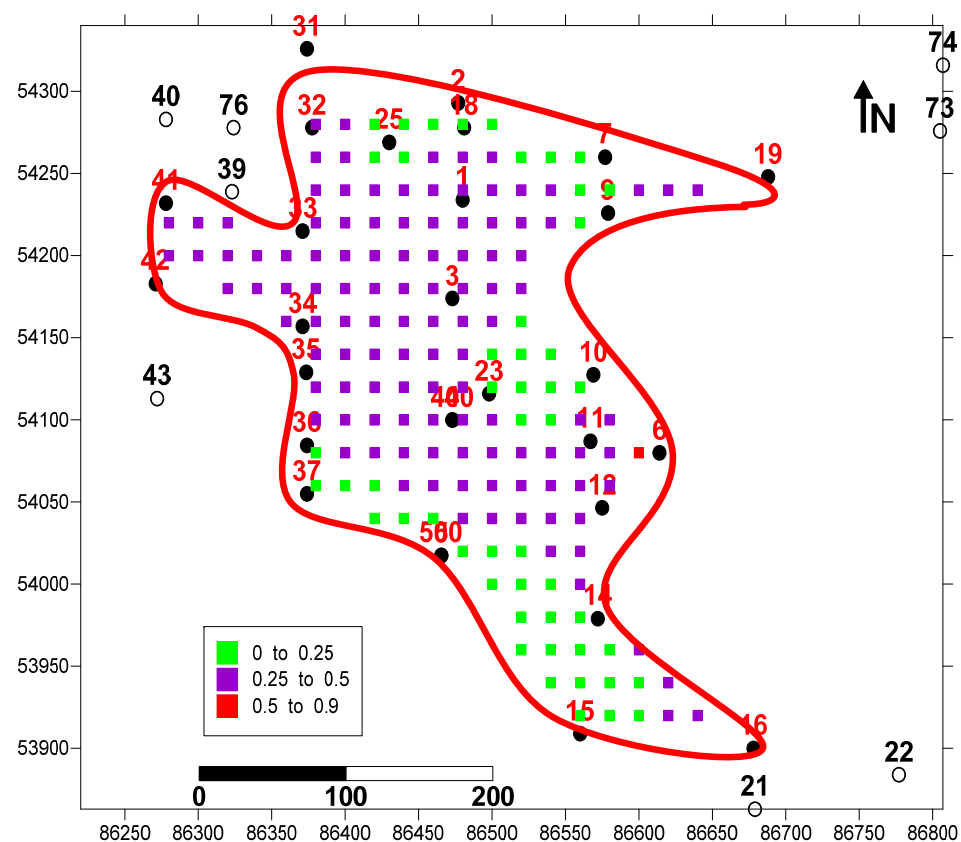


Fig. 97 - Carte du coefficient de minéralisation (CM) krigées des blocs de surface 20X20 m².

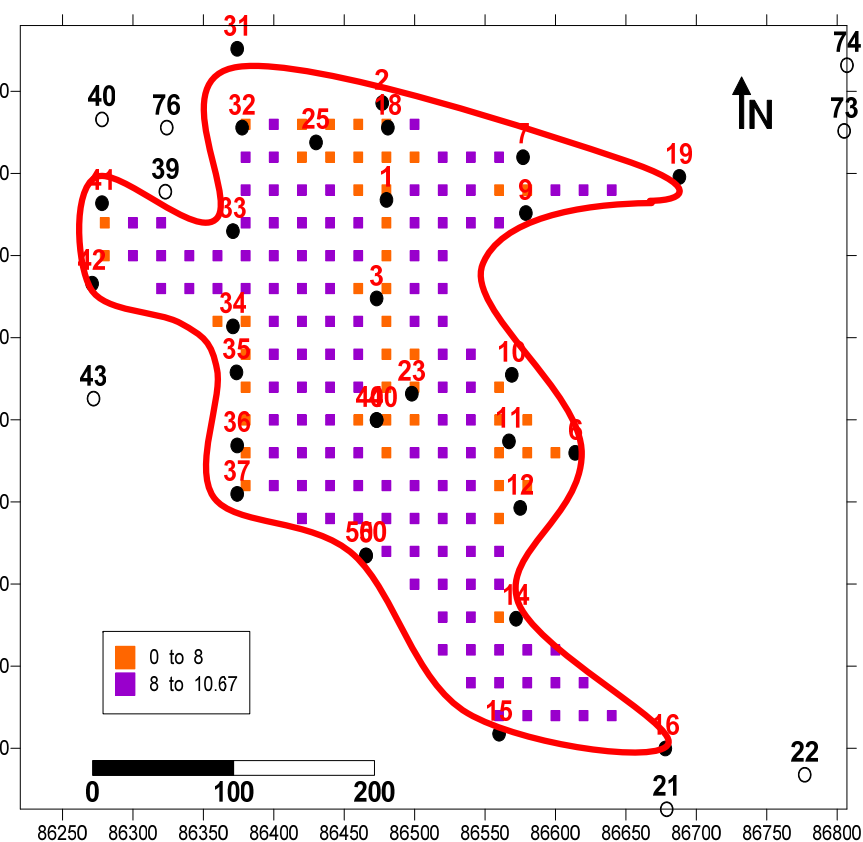


Fig. 98 - Carte des variances du coefficient de minéralisation (CM) krigées des blocs de surface 20X20 m².

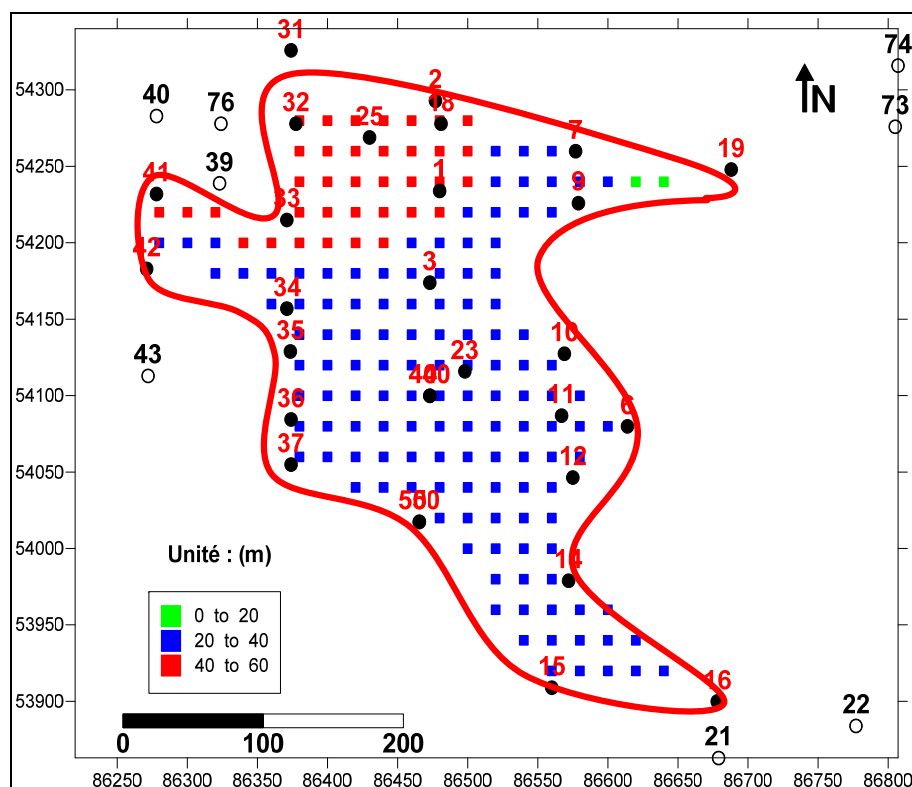


Fig. 99 - Carte des épaisseurs de l'horizon porteur de minéralisation krigées dans les blocs de surface 20X20 m².

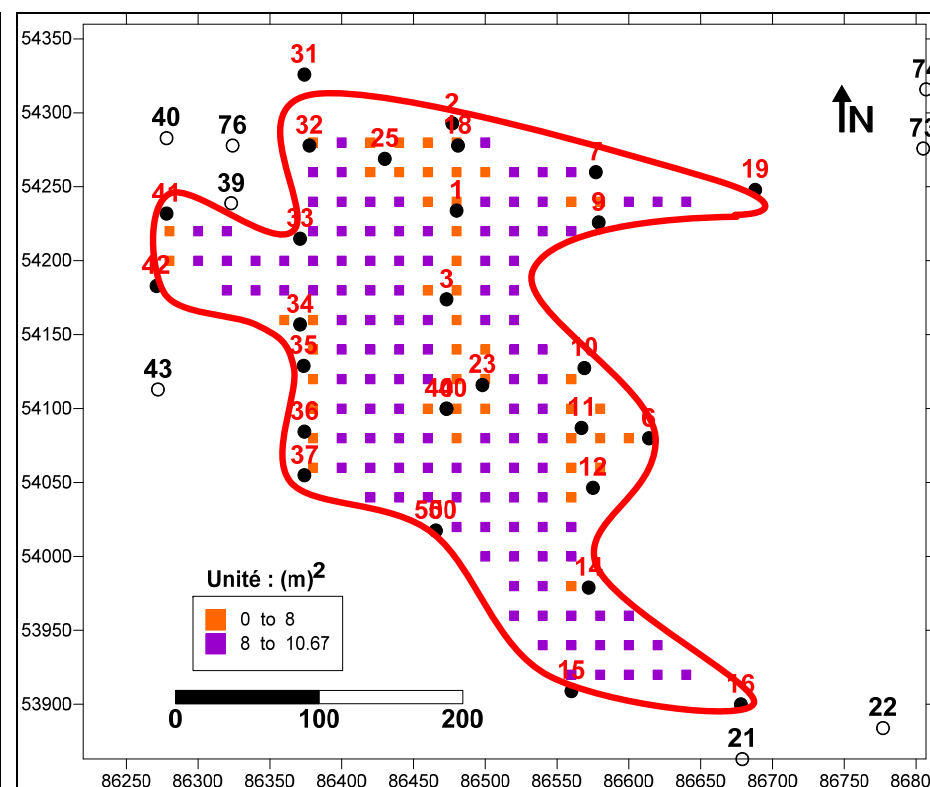


Fig. 100 - Carte des variances des épaisseurs de l'horizon porteur de minéralisation dans les blocs de surface 20X20 m².

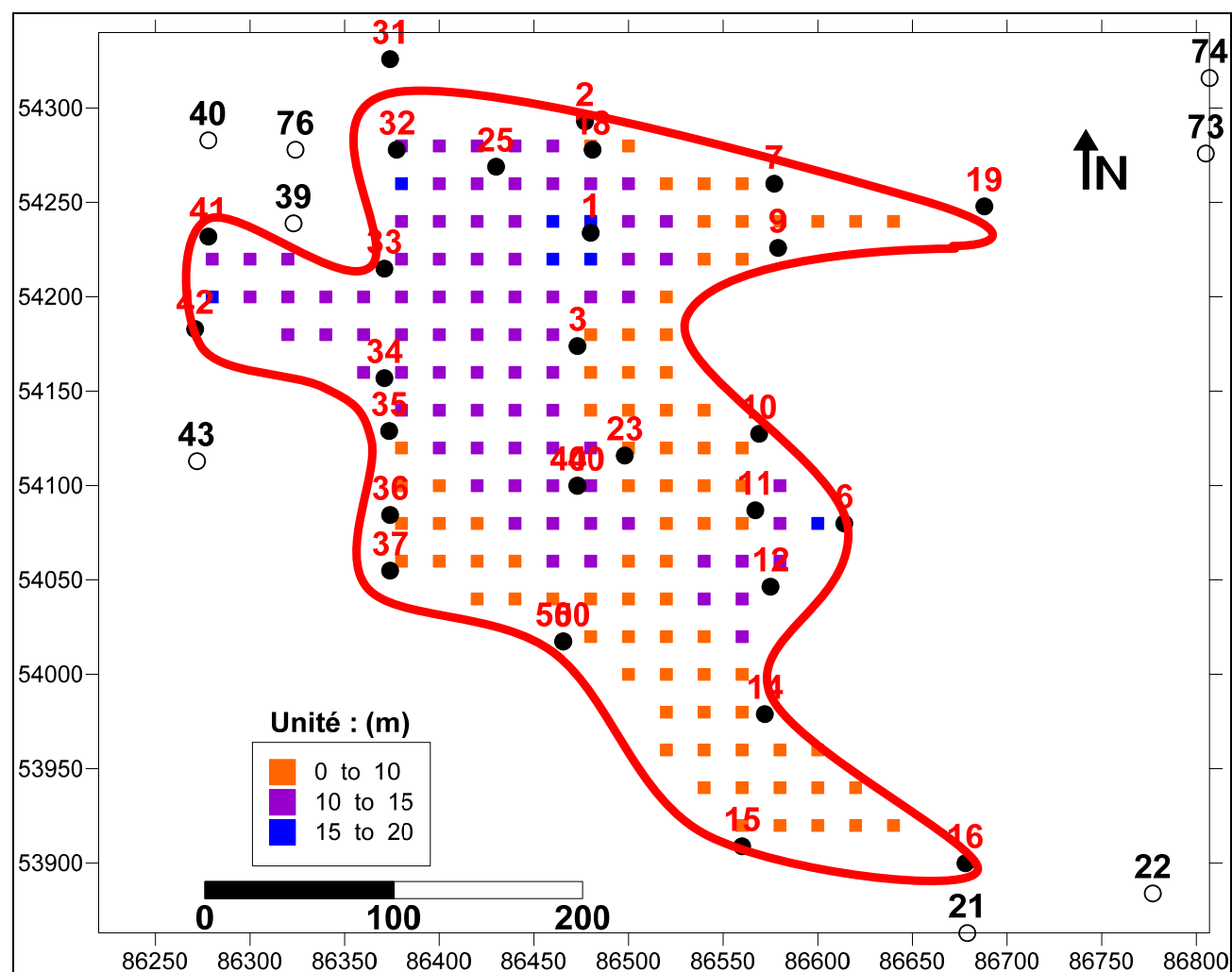


Fig. 101 - Carte de l'épaisseur minéralisée calculée dans les blocs de surface 20X20 m².

3. 4. 2. Deuxième approche

Elle a consisté à estimer les teneurs en FeO en utilisant une variographie 3D qui a servi à kriger les valeurs moyennes des blocs de 20x20X10. Pour l'estimation des ressources, il a fallu tenir compte du coefficient de minéralisation.

a). Variographie

Avant de procéder au calcul des variogrammes expérimentaux 3D de la variable régionalisée des teneurs en FeO, il faut préparer le fichier pour calculer les couples des teneurs distants de h (Tableau. 23).

Tableau. 23 - Paramètres utilisés pour la construction des variogrammes expérimentaux des teneurs de FeO.

	Axe X (m)	Axe Y (m)	Axe Z (m)
Début	86270	53913	896
Fin	86688	54326	1043.40
Pas maximal	150	150	20

- 182 échantillons retenus par le programme sur 182 échantillons.
- 8874 couples calculés.

Le calcul de variogrammes expérimentaux a été fait en 3D dans le plan de la couche, ainsi que leurs ajustements.

- **Variogramme vertical**

Le variogramme vertical expérimental des teneurs en FeO (Fig. 102. Tableau. 24) a été construit à partir des données de sondages et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 9$ (m), d'un effet de pépité $C_0 = 128(\%^2)$ et d'un palier $C = 113(\%^2)$.

$$\gamma(h) = 128 + 113sph_9(h)$$

Tableau. 24 – Données du variogramme vertical des teneurs en FeO.

Pas	Couples	Distance (m)	$\gamma(h) (\%^2)$
1	168	1.80	170.76
2	148	4.38	200.14
5	132	7.52	243.43
4	92	10.45	249.14
5	89	13.44	243.46

6	73	16.23	220.05
7	46	19.30	228.82
8	31	22.48	218.64
9	42	25.67	178.82

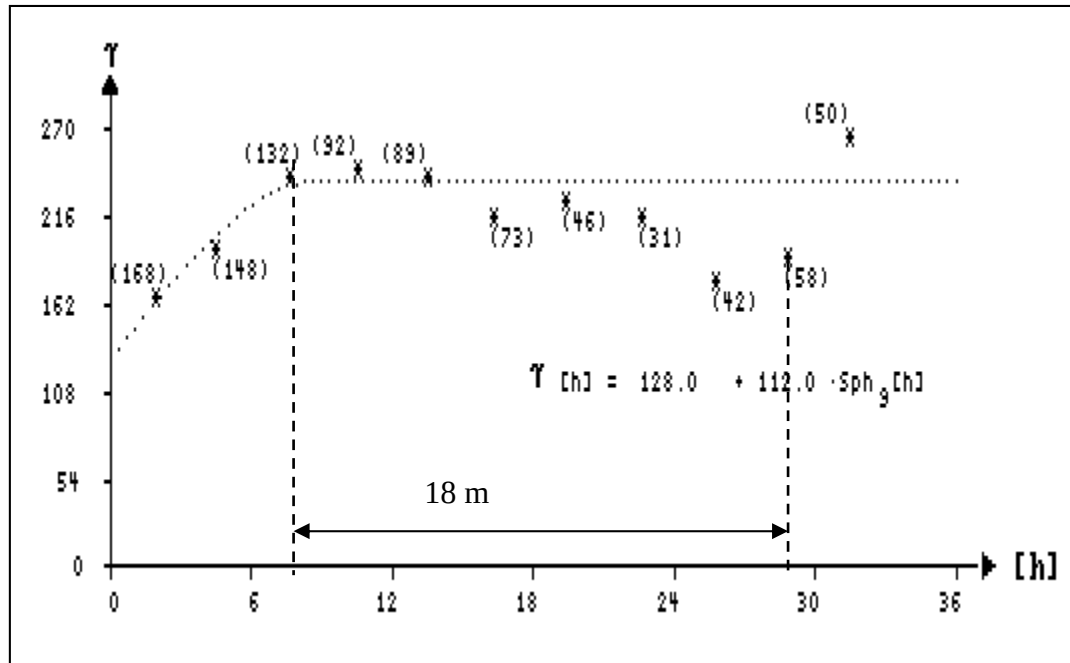


Fig. 102 - Variogramme vertical des teneurs en FeO angle vertical : $90^0 \pm 0^0$.

- Le variogramme vertical montre que l'épaisseur du stérile intercalant les corps de minerais peut aller jusqu'à 18m d'épaisseur.

- **Variogramme horizontal**

Le variogramme horizontal expérimental des teneurs en FeO dans le plan de la couche (Fig. 103. Tableau. 25). a été construit à partir des données de sondages et ajusté par un modèle sphérique de portée $a = 66$ (m), d'un effet de pépité $C_0 = 30$ ($\%^2$), et d'un palier $C = 50$ ($\%^2$).

$$\gamma(h) = 30 + 50sph_{66}(h)$$

Tableau. 25 - Paramètre du variogramme horizontal moyen des teneurs en FeO.

Pas	Couples	Distance (m)	$\gamma(h)$ ($\%^2$)
1	41	27.78	60.87
2	230	56.49	78.72
3	288	105.27	81.08

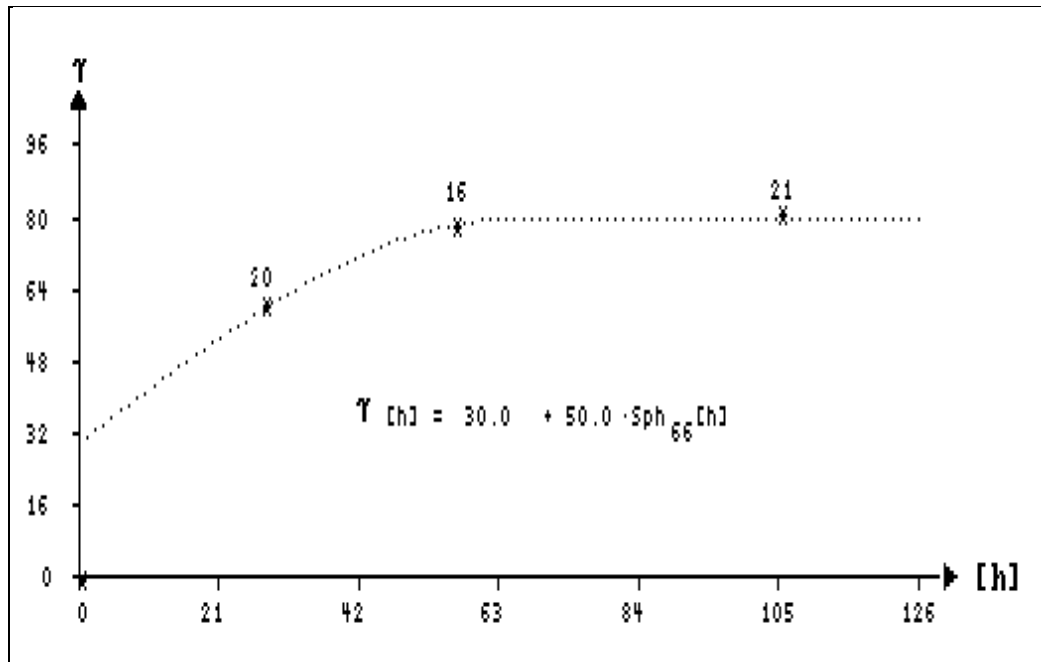


Fig. 103 - Le variogramme horizontal moyen des teneurs en FeO Direction : $0^0 \pm 90^0$
Angle vertical : 0 ± 10^0 .

Ces variogrammes montrent une anisotropie entre le plan horizontal et le plan vertical.

b). Krigeage ordinaire, estimation des ressources et cartographie

- **Krigeage ordinaire**

Le krigeage ordinaire a été effectué à l'aide de certains paramètres décrits dans le Tableau. 26. Afin d'estimer les teneurs en FeO dans les blocs d'exploitations ($20 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$).

Tableau. 26 - Paramètre de krigeage.

	Axe X (m)	Axe Y (m)	Axe Z (m)
Var	X	Y	Z
Origine	86270	53913	900
Taille des blocs	20	10	10
Nombre de blocs	22	41	15
Rayon de recherche	$R_1 = 66 \text{ m}$	$R_2 = 66 \text{ m}$	$R_3 = 9 \text{ m}$

Le krigeage ordinaire des teneurs en FeO a été calculé sur l'ensemble des échantillons de carottes de sondages pour donner les résultats du Tableau. 27.

Tableau. 27 - Statistique de krigeage de FeO.

Oxyde	$\bar{X}$ (%)	$S^2(\%)^2$	$\sigma_k^2(\%)^2$	N
FeO	30.68	50.78	53.22	1171

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

N : nombre de bloc.

- **Estimation des ressources**

La quantité de minerai d'un bloc de volume $20 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$ est donc:

$$Q_{\text{minerai}} = D \times S \times P$$

Les ressources globales en fer du gisement de Châabet El Ballout sont égales à 6.56 millions de tonnes de minerais (Tableau. 28).

Tableau. 28 – Récapitulatif des ressources en fer du gisement de Châabet El Ballout.

		FeO					Q minerai (T)
N :	Niv	Min	Max	$\bar{x}$	S^2 (%)	Nb	
13	920	23.08	38.94	29.97	62.31	18	100800
12	930	22.94	38.95	30.51	56.89	38	212800
11	940	21.21	41.62	31.32	46.78	43	240800
10	950	24.66	39.85	30.74	50.70	44	246400
09	960	16.08	38.81	32.15	51.90	93	520800
08	970	10.98	48.15	33.20	51.89	118	666800
07	980	11.78	49.22	38.08	52.59	166	929600
06	990	13.69	45.75	32.68	54.29	185	1036000
05	1000	12.71	43.83	33.54	53.03	159	890400
04	1010	4.55	44.05	31.65	53.98	131	733600
03	1020	12.96	29.26	31.68	54.77	91	509600
02	1030	19.22	40.66	32.68	54.76	51	285600
1	1040	24.41	55.11	33.85	74.84	34	190400
Ressource totale							6563600

Afin d'éliminer le stérile contenu dans ces ressources, il faut tenir compte du coefficient de minéralisation. Le coefficient de minéralisation est le rapport de la somme de toutes les épaisseurs du minerai dans les 31 sondages et l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation dans les sondages. Au gisement de Châabet El Ballout il est égal à 0.28.

$$CM = \frac{EPM}{EHP}$$

Où cm est le coefficient de minéralisation calculé à partir des sondages ;

EPM : La somme des épaisseurs du minerai dans les 31 sondages ;

EHP : La somme l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation dans les 31 sondages.

Les ressources en FeO du gisement de Châabet El Ballout après correction sont égales à 1.83 million de tonne

- **Cartographie**

La cartographie des teneurs krigées et leurs variances dans les blocs d'exploitation de volume (20x10x10m³) a été effectuée pour chaque niveau de dix mètre à part (Fig. 104 et 105).

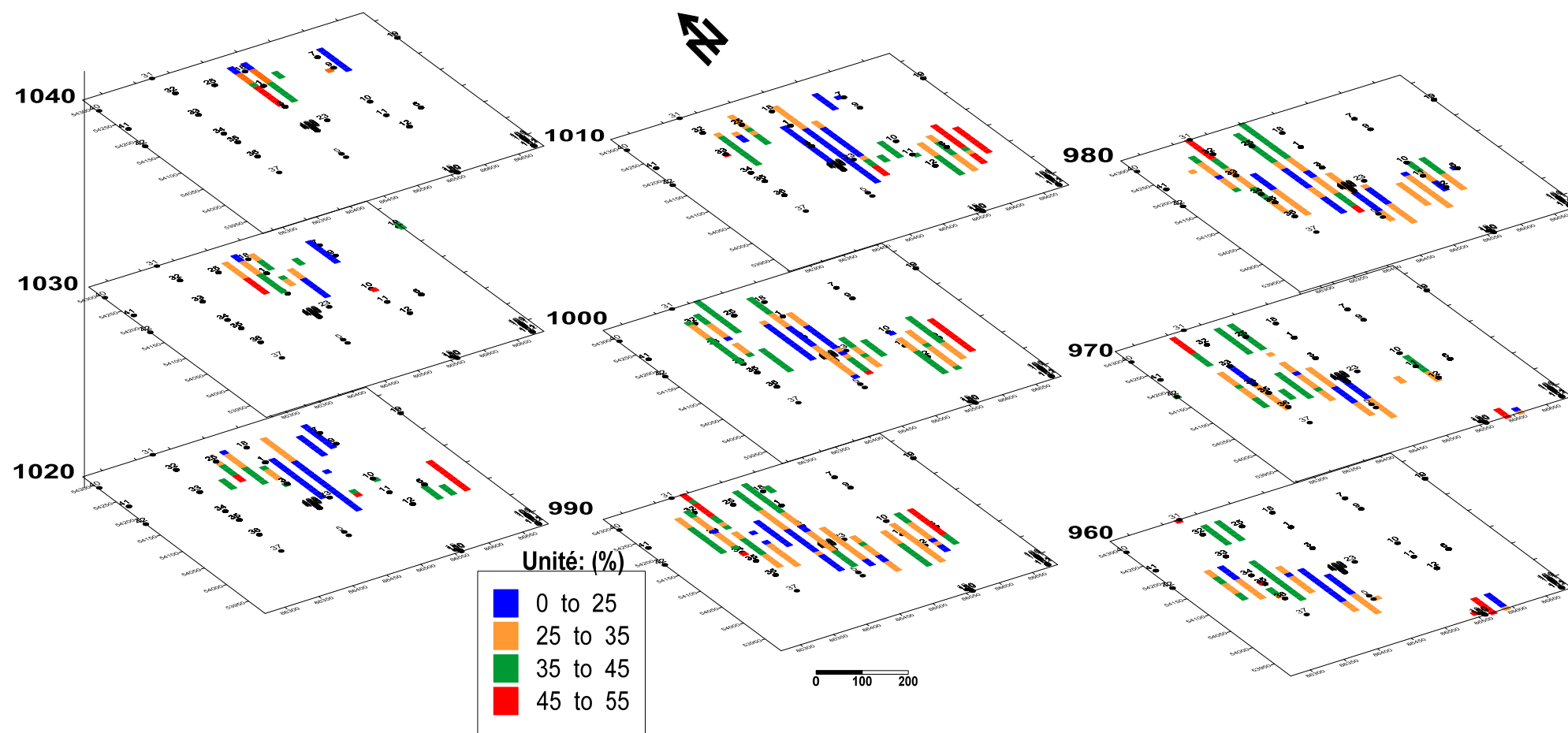


Fig. 104 - Cartes des teneurs krigées en FeO dans les blocs d'exploitation des 09 niveaux.

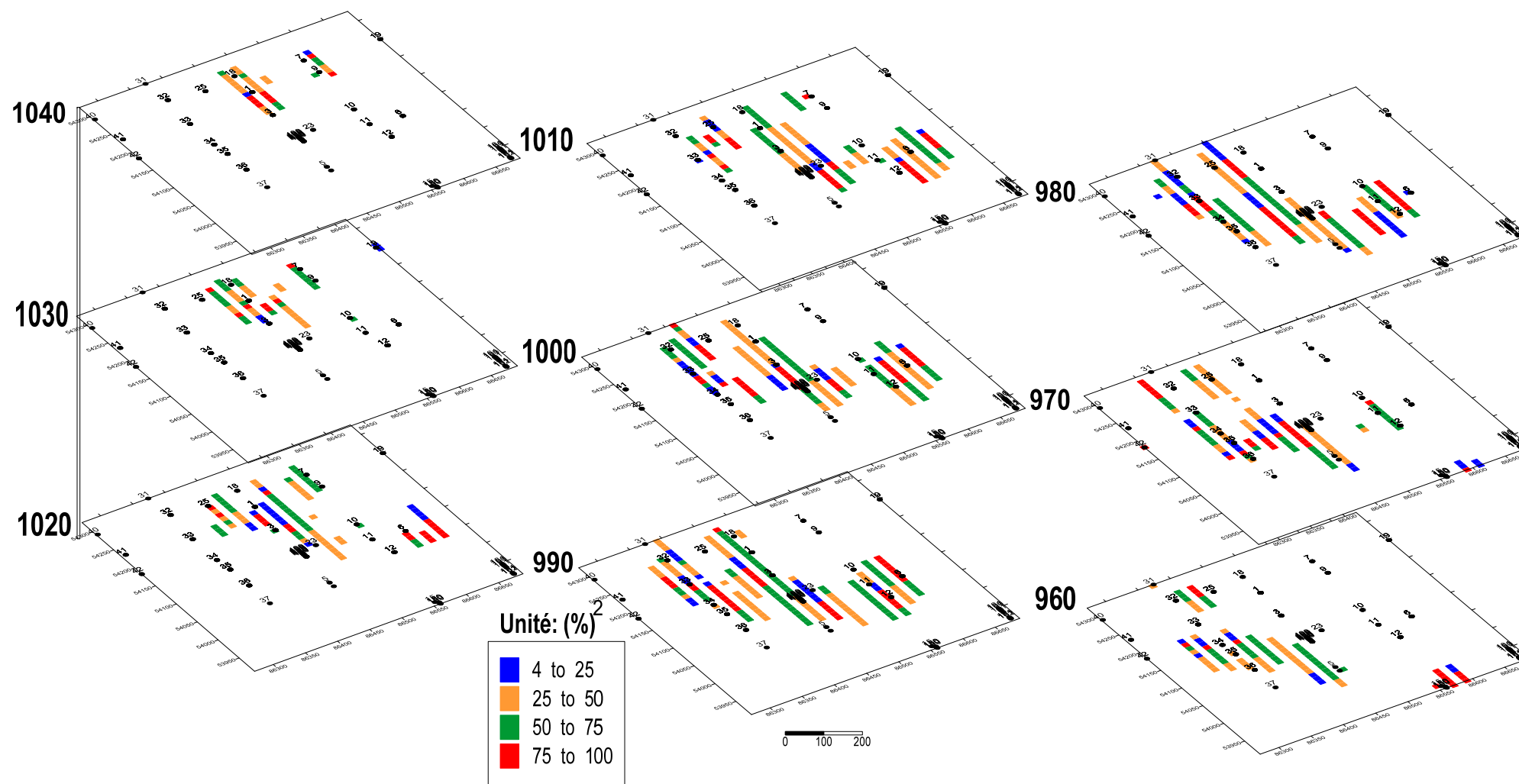


Fig. 105 – Carte des variances de krigeage des teneurs en FeO dans les blocs d'exploitation des 09 niveaux.

3. 5. Conclusions

- Les échantillons de carottes montrent que le minerai présente une teneur moyenne de 31.60% en FeO, 24.31% en SiO₂ et 10.50% en CaO.
- ACP a permis de démontrer 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 l'encaissant : des grès ou marnes du Miocène et/ou le calcaire du Crétacé supérieur.
- Les ressources estimées par l'ORGM à l'aide de la méthode conventionnelle de coupes géologiques étaient de 2.93 millions de tonnes. Etant donné que la structure géologique est en duplex, la répartition de la minéralisation est très irrégulière avec une très grande discontinuité.

a- Approche 1 :

- Les variogrammes de “l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation” (EHP) et “coefficient de minéralisation” (CM) montrent une même anisotropie zonale, où le grand axe a une direction N160° et le petit axe a une direction N70°. Les variogrammes directionnels dans ces deux directions ont été ajustés à l'aide de modèles sphériques. La direction du grand axe d'anisotropie correspond à celle de la direction du chevauchement.
- Dans le gisement de Chaabet El Ballout il existe 1.9 millions de tonnes de minerai de fer. Contenus dans 5.6 millions de tonnes de calcaire et grès et marnes minéralisés

b – approche 2 :

- Elle a consisté à kriger les teneurs en fer dans les blocs de 20x10x10 m et de multiplier par le coefficient de minéralisation. Pour tenir compte du taux de stérile et la discontinuité verticale. Les ressources sont égales à 1.83 millions de tonnes.
- Les résultats obtenus par cette 2^{ème} approche viennent confirmer ceux obtenus par la première puisque les quantités des ressources sont pratiquement les mêmes.

4. GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES RESSOURCES DU GISEMENT DE KHANGUET EL MOUHAD

4. 1. Travaux de recherche et d'exploration réalisés sur le gisement

L'exploitation du gisement de Khanguet El Mouhad a commencé en 1917 (Remichi et al., 2009). Les travaux miniers ont été effectués et les réserves ont été évaluées à environ 6 millions de tonnes durant la campagne de prospection (1926 -1929).

La première carte géologique à 1/1000 du gîte a été dressée, au total 31 sondages ont été effectués ainsi qu'une étude géophysique par la méthode magnétométrique à 1/2000. Ces travaux ont été réalisés par le géologue Litvinenko de la division Recherches de la SONAREM en 1979, pour la mise en évidence de zones minéralisées perspectives sur le gisement de fer de Khanguet.

La cartographie géologique au 1/1000 a été établie, ainsi que les travaux de forages (09 forages) et d'échantillonnages. Ces travaux ont concerné les gîtes « A-1 », « A-2 » et « B » et les réserves ont été estimées à 3,42 Mille tonne de minerai par Remichi et Menidjel A., (2009).

4. 2. Analyse de données d'exploration

L'ensemble des données de carottes des campagnes de prospections, a été analysé par méthodes monovariante et multivariante.

4. 2. 1. Analyse monovariante

Le traitement statistique a été effectué sur les 122 échantillons de carottes prélevés de 20 sondages. Ces échantillons ont été analysés sur FeO, CaO, SiO₂ (Tableau. 29).

Tableau 29 - Statistique du corps A.

	FeO	CaO	SiO ₂	EP
Tmin	1,20	0,70	0,20	0,20
Tmax	57,91	55,60	51,70	4,20
M	33,41	9,26	13,18	1,52
S₂	227,56	80,42	157,00	0,618
S	15,09	8,97	12,53	0,79

Cv	45,10	96,8	95,1	51,6
NECH	122	122	122	

4. 2. 2. Analyse multivariable

La matrice de corrélation a été calculée sur l'ensemble des 122 échantillons prélevés des carottes de 20 sondages (Tableau. 30) et les facteurs de charge ont été calculés (Tableau. 31) et les cercles de corrélation ont été tracés (Fig. 105)

Tableau. 30 – La matrice de corrélation des différents oxydes analysés.

	FeO	SiO ₂	CaO
FeO	1,00	-0,25	-0,75
SiO ₂	-0,25	1,00	-0,36
CaO	-0,75	-0,36	1,00

La matrice de corrélation montre que tous les oxydes sont corrélés négativement entre eux. Sur le plan géologique cette corrélation négative montre que ces oxydes n'ont pas les mêmes conditions de formation.

* Calcul de la signification des coefficients de corrélation linéaire simple.

Le nombre d'échantillon de carotte N=122. Alors on tient : $R=2/(\sqrt{n-1})=0.18$

Tableau. 31 - Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement de Kanguet El Mouhad.

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
Variance (%)	54,60	41,86	3,53
variance cumulée (%)	54,60	96,46	100
valeurs propres	1,63	1,25	0,10
FeO	-0,90	-0,41	-0,20
SiO₂	-0,15	0,98	-0,15
CaO	0,96	-0,23	-0,20

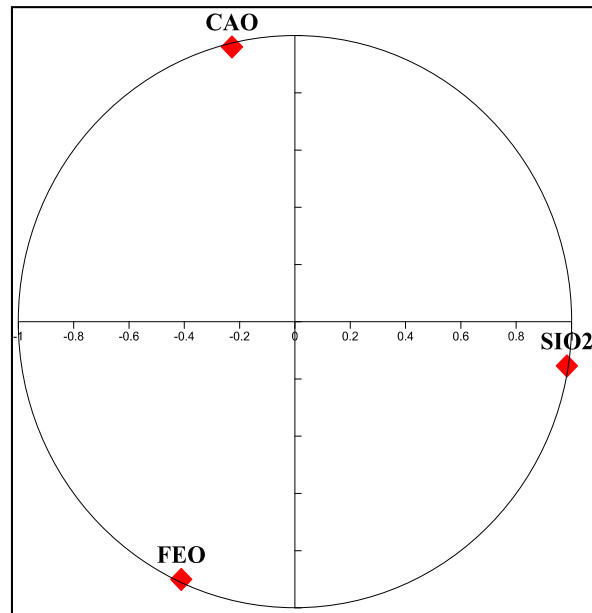


Fig. 106 – les cercles de corrélations de l’ACP sur l’ensemble des données du gisement de Khanguet El Mouhad.

4. 3. Estimation des ressources par méthodes conventionnelles

4. 3. 1. Méthodologie d’estimation

L’estimation des ressources par méthodes conventionnelles a été effectuée par (Remichi et al., 2009) à l’aide de la méthode des blocs géologiques, ces derniers ont été délimités par les ouvrages miniers des deux compagnes de prospections (1978 et 2009).

4. 3. 2. Paramètres géologo-économiques

L’estimation des ressources a été effectuée selon des exigences industrielles suivantes :

- Teneur minimale ou teneur limite d’exploitation est 25%
- Puissance minimale des bancs minéralisés est égale à 1.0 m.
- Puissance maximale des roches stériles est égale à 2.0 m

D) Poids Volumique égal à 2.65 T/m³

Les ressources ont été estimées à 3.42 milles tonnes de minerai (Tableau. 32)

Tableau 32 - Récapitulatif des ressources en minerai de fer estimées par méthode conventionnelle Remichi et al. (2009).

Gîte	Bloc	Teneur Moyenne par Bloc			S (m ²)	P (m)	V (m ³)	D (T/m ³)	Q minerai (T)
		Classe 1 (30-40%)	Classe 2 (40-45%)	Classe 3 (>45%)					
A-1	I-C1	-	-	48,8	3956,9	2,8	11 079,3	2,65	29 360,01
	II-C1	-	-	49,6	1003,9	2,6	2 610,1	2,65	6 916,70
Total gîte "A-1"									36 276,71
A-2	I-C1	-	-	46,7	13631,75	1,86	25 355,05	2,65	67 190,89
	I-C1	38,9	-	-	13631,75	1,98	26 990,86	2,65	71 525,79
	II-C2	-	43,06	-	4053,6	1,8	7296,48	2,65	19 335,70
Total gîte "A-2"									158 052,38
B	I-C1	-	43,3	-	3 290,5	2,3	7 568,15	2,65	20 055,60
	II-C1	-	-	49,16	8 524,75	2,9	24 721,8	2,65	65 512,70
Total gîte "B"									85 568,30
C	V-C1	25,5	-	-	6887	3,4	23415,8	2,65	62 051,90
Total gîte "C"									62 051,90
Total A-1 + A-2 + B + C									341 949,29

4. 4. Estimation des ressources par méthode géostatistiques

L'étude géostatistique n'a pas été faite a cause du nombre insuffisant de données.

CONCLUSIONS GENERALES

Les études géologiques et géostatistiques ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- **Gisement d'Anini**

- Les dépôts qui constituent le gisement appartiennent à la série néritique d'âge Sénonien, et quaternaire. Le secteur est affecté par trois systèmes de failles qui ont une direction de : (N065°), (N095° à N105°), et (N135° à N165°). Ce dernier système traverse le massif d'Anini et la nappe de Djemila, étant le plus important car il contrôle les minéralisations ferrugineuses.

- La minéralisation ferrière est le résultat du remplissage de fractures et de vides karstiques par les fluides hydrothermaux déposant les minéralisations dans les calcaires céno-manoturonien. La minéralisation est constituée par l'hématite, goethite, hydro goethite, les sulfures (pyrite et marcasite) et les sulfates (Barytine). Quant aux minéraux de gangue, ils sont constitués de calcite, dolomite et quartz.

- Les échantillons de carottes prélevées dans le minerai présentent des teneurs moyennes de 26.03% en FeT, 22.87% en SiO₂ et 07.73% en CaO.

- Les ressources estimées par l'ORGM à l'aide de la méthode conventionnelle de blocs géologiques étaient de 2,5 millions de tonnes de minerai classées dans la catégorie C1.

- Les variogrammes expérimentaux de surface et directionnels du produit PxD et des teneurs en FeT dans les carottes de forages, ont été calculés et ajustés à l'aide de modèles théoriques. Ces variogrammes montrent une anisotropie avec un grand axe de direction N135° et un petit axe de direction N45°. L'effet de trou est visible dans toutes les directions. La pseudo-périodicité est de 280m dans la direction N135° et elle est de 160m dans la direction N45°. Ces valeurs de pseudo-périodicité n'étant pas les mêmes, la forme des karsts est donc lenticulaire. Ces valeurs représentent les dimensions moyennes de ces karsts.

- La quantité de minerais a été estimée, dans un premier temps, par la méthode géostatistique de krigeage ordinaire à 7,6 millions de tonnes.

- Ce résultat montre un fort écart avec ceux de l'estimation par la méthode conventionnelle (2,5 millions de tonnes). Cette surestimation par la méthode géostatistique de krigeage ordinaire est sûrement due au fait que la discontinuité de la minéralisation reflétée par l'effet de trou sur les variogrammes, n'a pas été prise en compte lors du krigeage ordinaire. Pour y remédier au moins partiellement à cette surestimation, il a été nécessaire d'éliminer les surfaces supposées minéralisées alors qu'elles sont stériles et qui se trouvent entre les corps de minerais délimités par les travaux de prospection. Pour cela, il a été fait appel à une

correction des ressources à l'aide du coefficient de minéralisation (= 0,30). Après correction, ces ressources ont été estimées à 2,28 millions de tonnes de minerais. Cette dernière quantité est très proche de celle obtenue par la méthode conventionnelle. Cette estimation corrigée peut être complétée par une simulation objet du gisement.

- **Gisement de Châabet El Ballout**

- La minéralisation se localise soit dans les calcaires fissurés du Crétacé supérieur soit dans les grès bréchifiés et les marnes du Miocène inférieur.
- 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 ferrière du gisement de Châabet El Ballout est donc d'origine hydrothermale métasomatique, d'âge post Miocène.
- La documentation des fronts de carrière montre, la présence d'une zone de broyage minéralisée de 40m d'épaisseur, de direction NW-SE et un angle de pendage de 30°.
- Les coupes géologiques effectuées suivant la direction de la zone de broyage montrent des structures chevauchantes en duplex. Ces chevauchements majeurs correspondent généralement à des décollements réunis par plusieurs rampes. La base de ces rampes est constituée par des marnes.
- Les coupes montrent que la direction du chevauchement est NW – SE, comme l'a proposé Kriviakine et al, (1990). La zone de broyage du chevauchement (sous nappe) peut être confondue avec une couche stratiforme.
- L'étude structurale du gisement, a permis de préciser l'orientation des profils de prospection. Ces derniers doivent être perpendiculaires à la structure, donc orientés dans la direction Sud Ouest- Nord Est.
- Les échantillons de carottes montrent que le minerai présente des teneurs moyennes de 31.60% en FeO, 24.31% en SiO₂, et 10.50% en CaO.
- L'ACP a permis de démontrer une association constituée de (CaO et SiO₂), qui est caractérisée par une corrélation positive avec le facteur F1 et pratiquement nulle avec le facteur F3. Elle représente l'encaissement du minerai: des grès ou marne du Miocène et/ou le calcaire du crétacé supérieur.

- Les ressources estimées par Kouzmine (1992) à l'aide de la méthode conventionnelle de coupes géologiques étaient à 2,93 millions de tonnes. Il considérait que la minéralisation est stratiforme puisqu'elle est concordante à la stratification des couches encaissantes. Cependant et étant donné la structure géologique en duplex, la répartition de la minéralisation est très irrégulière, avec une très grande discontinuité dans le plan vertical pour cela l'estimation des ressources à l'aide de méthodes géostatistiques a été faite de deux façons :

a- Approche 1 : elle a consisté à estimer les ressources en fer en krigeant l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation (EHP) et le coefficient de minéralisation (CM) dans le plan vertical.

Par cette approche les ressources ont été estimées à 1,9 millions de tonnes de minerai de fer. Contenus dans 5,6 millions de tonnes de calcaire et grès et marnes minéralisés.

b – Approche 2 : elle a consisté à kriger les teneurs en fer dans les blocs de 20x10x10 m et de multiplier par le coefficient de minéralisation, pour tenir compte du taux de stérile et la discontinuité verticale. Les ressources sont égales à 1,83 millions de tonnes.

- Les résultats obtenus par cette 2^{ème} approche viennent confirmer ceux obtenus par la première puisque les quantités des ressources sont pratiquement les mêmes. Les méthodes géostatistiques montrent donc une légère sousestimation par rapport à l'estimation par la méthode conventionnelle.

Pour l'optimisation de l'estimation des ressources de minerais karstiques et bréchiques par méthodes géostatistiques, il est nécessaire de tenir compte des coefficients de minéralisations qui s'apparentent à un coefficient de probabilité.

- **Gisement de Khanguet El Mouhad**

Le gisement de Khanguet El Mouhad appartient au Djebel Djebissa qui est un anticlinal de direction NE-SW, à cœur triasique intrusif considéré comme vrai diapir. Les formations qui le constituent sont d'âge Albien à Aptien.

Les études de terrain et de laboratoire ont permis de confirmer les résultats obtenus ultérieurement par les recherches géologiques :

- La minéralisation ferrifère se présente en amas stratiformes et plissés ou lenticulaire au contact des calcaires, marnes, Trais. Elle est composée essentiellement d'hématite, limonite et accessoirement de cuivre gris, la barytine et la sidérite.

- Cette minéralisation ferrifère serait d'origine hydrothermale. La transformation des calcaires en carbonates de fer est essentiellement due à la substitution de Ca par du Fe pour donner la sidérite et l'ankérite ayant cristallisé dans les vides et les fissures. L'oxydation de cette minéralisation primaire a donné un minerai riche en hématite, limonite.

- Les ressources ont été estimées à 342 milles tonnes de minerai par la méthode des blocs géologiques. Cependant le nombre de données est très faible (122 échantillons au total) et il n'a pas permis de faire une bonne étude géostatistique.

Les tableaux ci-dessous résument tous les résultats obtenus.

Tableau. 33 - Conclusions géologiques.

Caractérisation géologique					
Gite	Minéralisation	Encaissant		Tectonique	Type génétique
		Roche	Age		
Anini	- Limonite, - Hématite, - Goethite, - barytine.	-Dolomies saccaroïde et calcaire	Cénomanién, Turonien	- Fenêtre tectonique - Anticlinale EW - Systèmes de failles et karst contrôlant la minéralisation de direction : (N135° à N165°)	Hydrothermal – Remplissage de fractures et de vides karstiques par les fluides hydrothermaux déposant les minéralisations.
Châabet El Ballout	- Sidérite, - Ankérite - Limonite, - Hématite, -Cuivre gris - Malachite - Azurite - Barytine.	- Calcaire, Grés et marnes.	- Crétacé supérieur, Miocène inférieur	- Structure en duplexe de directions NW-SE: (N160°).	Hydrothermale métasomatique
Khangou et El Mouhad	- Sidérite, - Ankérite - Limonite, - Hématite, -Cuivre gris - Malachite - Barytine.	Calcaire, marnes, gypse.	-L'aptien supérieur, Albien et Trias	Anticlinale à cœur diapirique 3 Systèmes de failles N90°-N100° N140°-N150° N30°-N50° - Les fossés d'effondrements	Hydrothermale métasomatique

Tableau. 34 - Conclusions géostatistiques.

Caractérisation géostatistiques						
Gite	Données d'exploration	Corrélations entre élément chimique	Association multivariée	Variographie	Estimation des Ressources	
					Méthodes conventionnelles	Méthode géostatistique
Anini	- 264 échantillons - 71 sondages - 35 tranchées	$R_{FeT/D}=0.49$ $R_{FeT/SiO_2}= - 0.47$ $R_{FeT/CaO}= -0.28$	- Une association entre D et FeT elle montre que les valeurs de D dépendent des teneurs en FeT.	- Une anisotropie : grande axe direction N135° et le petit axe a une direction N45°. - Un effet de trou dans toutes les directions. - Pseudo périodicité = 280m dans la Direction 135°. - Pseudo périodicité =160m dans la direction 45°. - 280m et 160m représentent les dimensions moyennes de ces karsts.	- Méthode des blocs géologiques - Les ressources =2,5 millions de tonnes C1.	- Krigeage ordinaire. - Les ressources = 7,6 millions de tonnes. - $\overline{Cm}$ horizontale =0, 30 - Ressources après correction =2,28 millions de tonnes de minerais.
Châabet El Ballout	- 182 échantillons - 31 sondages	$R_{FeT/SiO_2}= 0,66$ $R_{FeT/CaO}= -0.45$ $R_{SiO_2/CaO}= - 0.26$	- Une association constituée de CaO, SiO ₂ , Elle représente l'encaissant des grés ou marnes et/ou le calcaire.	- Les variogrammes de (EHP) et du (CM) montrent une anisotropie zonale, où le grand axe a une direction N160° et le petit axe a une direction N70°.	Méthode des coupes géologiques. - Les ressources estimées par l'ORGM = 2,9 millions de tonnes.	- Krigeage ordinaire - en utilisant le CM les ressources en fer =1.9 million de tonnes contenu dans 5,6 millions de tonnes d'horizon porteur.
Khangu et El Mouhad	- 122 échantillons - 20 sondages	$R_{FeT/SiO_2}= - 0.25$ $R_{FeT/CaO}= -0.75$	Aucune association chimique	Insuffisance de données	Méthode des blocs géologiques : Les réserves ont été estimées à 342 Mille de minerai	Insuffisance de données

BIBLIOGRAPHIE

- AOUDJEHANE, M. 1991.** Distribution des gîtes à Pb-Zn et fer sidéritique dans le NE algérien. In : Source, Transport and Deposition of metals. Pagel & J. Leroy (eds), Belkema, Rotterdam, pp. 419-422.
- ARMSTRONG, M, CARIGNAN, J . 1997.** Géostatistique linéaire, application minière. Les presses de l'école des Mines Paris, 115p.
- BACCINI, A. 2010.** Cours de statistique descriptive élémentaire. Institut de mathématique, Univ. Paul Sabatier- Toulouse, 40p.
- BENDALI, M. 1989.** Rapport sur les travaux géologique effectués au Djebel Anini en 1989. Rapport inédit d'EREM.
- BOUAZIZ, L. 1992.** Etude et valorisation des réserves du minerai de fer pauvre de l'Ouenza, mémoire de Magister. UBMA, 96p.
- BOUILLIN, J.P, 1977.** Géologie alpine de la Petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia (Algérie). Thèse Sc., Univ., Paris VI, 551p.
- BOUILLIN, J.P, 1979.** La transversale de Collo et d'El Milia (Petite Kabylie) : une région clef pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. Mem. Soc. Géol. Fr. , nouv. Série, t.t VII, n° 135, p. 1-84, 51 Fig., 1carte h.t.
- BOUILLIN J.P, 1986.** « Le bassin maghrébin » ; une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'Ouest des alpes. Bull. Soc. Géol. Fr, (8), t, n°4. p547-558.
- BOUTALEB, A. 2001.** Les minéralisations à Pb-Zn du domaine Sétifien-Hodna ; gîtologie, pétrographie des dolomies, microthermométrie et implication métallogéniques. Thèse doctorat d'état. USTHB (Alger), 400p.
- BOUZENOUNE, A, 1993.** Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie oriental).Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie (Paris VI),1Vol. 207p.
- BOUZENOUNE, A, 2001.** Problématique de la structure des corps triasiques de la frontière algéro-tunisienne. Conséquences métallogéniques. Communication orale au 1er séminaire sur la géologie du grand constantinois (S.G.G.C-1), 6 et 7 novembre 2001, Univ. Constantine.
- BOUZENOUNE, A. ROUVIER, H. ET THIBIEROZ, J. 2006.** Chronologie relative et conditions de mise en place des minéralisations du massif de l'Ouenza (Algérie NE). Bull. Serv. Géol. ational Vol. 17, n°1, pp. 3-27.
- BOYER, S. E. et ELLIOT, D., 1982.** Thrust systems, Bull. Am. Ass. Petrol. Gol., 66, p. 1196-1230.

- BRACENE, R. FRIZON DE LAMOTTE, D. 2002.** Origine of intraplate déformation in the system of the western and central Algéria : from rifting to Cenozoic-Quaternary inversion, *Tectonophysics*, 357p. 207-226.
- BUJAKOWSKA, K. MODLINSKI, Z. KHARNENE, A. et SOKOTOWSKI, A. 1989.** Résultats de la prospection du minerai de fer effectuée en Djebel Hellel et Dj Anini ; 30P Rapport inédit d'EREM.
- CHADI, M. 1990.** Evolution tertiaire de la plate-forme crétacée externe de la chaîne alpine d'Algérie orientale. In : Abstr. 15th Colloq. African Géot, . Nancy. C.I.F.E.G., Orléans, p443.
- CHAMUSSY, H. CHARRE., Dumolard J.P., DURAND M. G., Le BERRE, M. 1994.** Initiation aux pratiques statistiques en géographie. *Edition Masson*, 245p.
- CHARRIERE, A. VILA, JM. ANDREU, B. KHECHID-BENKHIROUF, F. 1996.** Nouvelles données stratigraphiques et structurales sur le Djebel Djébissa, près de Tébessa (frontier algéro-tunisienne): reconstitution d'un dôme de sel en contexte distensif chaud au crétacé inférieur-moyen. *Bulletin du service géologique de l'Algérie*. Vol, 7, N°2, pp 109-132, 11 Fig.
- CHAUVET, P. 1999.** Aide mémoire de géostatistique linéaire application du domaine minier. Les Presses de L'Ecole des Mines de Paris, pp140.
- CHIKHI-AOUIMEUR, F. 1980.** Les Rudistes de l'Aptien supérieur de djebel Ouenza (algérie NE). Paléontologie, Contexte stratigraphique et paléogéographie. *Thèse 3ème cycle, USTHB, Alger*, 114 p.
- CHOUABBI, A. 1987.** Etude géologique de la région de Hammam N'bails (SE Guelma, Constantine, Algérie) Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, Toulouse, pp 123.
- DAVID, L. 1956.** Etude géologique des Monts de la Haute Medjerda. Service de la carte géologique de l'Algérie, n°11. Alger, 289p.
- DUBOURDIEU G., Durozoy G. 1950.** Observations tectoniques dans les environs de Tébessa et de l'Ouenza (Algérie) *Bulletin du Service Géologique de France*, 5^{ème} série, XX, pp 257-266.
- DURAND DELGA, M. 1955.** Etude géologique de l'Ouest de la chaîne Numidique. Publ.Serv. Carte géol. Algérie. Bull. n°24. 533p., 143 fig., 16 pl., 10pl. ht
- DURAND DELGA, M. 1969.** Mise au point sur la structure du Nord Est de la Berberie. Pub. Serv. Carte géol. Algérie. ..S. .° 39 p. 896 131. Alger.
- DUROZOY, G. 1956.** Carte géologique de l'Algérie à 1/50000, feuille n° 206, Tébessa, avec notice explicative détaillée. Publications du Service de la Carte géologique de l'Algérie, Alger.

EREM (ex-SONAREM) (1968) : Rapport sur le minerai de Fer du Djebel Anini. Proposition de recherche. Rapport inédit.

FLEURY J. J. (1969): Stratigraphie du Crétacé et de l'Eocène (Aptien à Lutétien) de la feuille 1/50 000 Morsott, N° 178. Publ. Serv. Géol. Alg., Nlle Série, Bull. n°39, pp. 145-157.

FRIZON DE LAMOTTE, D. SAINT BEZAR B, BRACENE R, MERCIER, E. 2000. The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean. *Tectonics* 19, 740–761.

GIL, P.P. 1991. Las mineralizaciones de hierro en el anticlinal de Bilbao: Mineralogia, geoquímica y metalogenia. Thesis Doct., Univ. Pais Vasco, Bilbao, 343 p.

GLACON, J. 1967. Recherche sur la géologie et gites métallifères du Tell sétifien. Publ. Serv. géol. Algérie. Bulletin n°32, 751p.

JAUZEIN, M. L. (1967): Sulfur isotopes and mineral genesis. In: H. L. Barnes (Editeur), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Holt, Rinehart et Winston, New York, pp.143-165.

JOURNAL, AG et HUIJBREGTS, CH J. 1978. Mining geostatistics. Academic Press, London, U. K, 600p.

KAZI-TANI, N .1986. Evolution géodynamique de la bordure Nord Africaine: intraplate nord algérienne: approche méga séquentielle. Thèse du troisième cycle, Université de Pau. 881p.

KOWALSKI , WM. HAMIMED, M. 2000. Diapirisme polyphasé ou glacier de sel albien? Dilemme du matériel triasique des confins algéro-tunisiens. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie. Vol.11, n°1 pp.29-60, 12 fig.,2000.

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 N° : 01 concernant le gisement de fer de Châabet El Ballout. 102p.

KRIVIAKINE, B. KOVALENKO, E. VNOUTCHKOV, V. DERESKI, B. 1990. Rapport final sur les résultats de l'étude complémentaire des feuilles N° : 77 Souk-Ahras, N° : 78 Oued Mougras, N° : 100 M'Daourouche à l'échelle : 1/500000, EREM Rapport inédit.

LITVINENKO, A. 1978. Rapport sur les travaux de prospections effectués sur Djebel Djébissa. EREM.

LOUNIS, S. 2004. Contribution à l'étude géologique et géochimique des minéralisations Pb-Zn-Ba-F dans la région de Meskiana: Exemple des indices d'Essouabaa et de M'khiriga (Atlas Saharien oriental, Algérie). Thèse de Magister, USTHB, Alger.

- MADRE, M. 1969.** Contribution à l'étude géologique et métallogénique du Djebel Ouenza (Est-algérien). Thèse de 3^{ème} Cycle, Université de Paris, 90 p.
- MATHERON, G. 1971.** The theory of regionalized variables and its applications. The specifications CMM5. Paris ENSMP, pp212.
- MEZGHACHE, H. 1989.** Cartographie automatique et interprétation géostatistique d'une campagne de prospection géochimique sur sol-application à la zone mercurielle Nord Numidique (Algerie). Thèse de Doctorat-Nouvelle; CNRS-CRPG-INPL. Nancy – France; 178p.
- MITRA, G. et BOYER, S. E. 1986.** Energy balance and deformation mechanisms of duplexes,]. Struct. Geol., 8, p. 291-304.
- MKRICHIANE, G. VOLSKY, Z. KOUKOUCHKINE, D et PAKHMOURNT, J. 1977-1978.** Rapport sur des travaux de recherche au 1/50 000 réalisés par l'équipe de Sétif à la surface de la feuille « Ain Roua » (N° 69). Rapport inédit de SONAREM.
- MORINEAU, A. 1988.** Analyse en Composantes Principales. Edition CISIA. Ceresta, France, 198p.
- OTHMANINE, 1987.** Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et Fe sidéritique autour du fossé de Tebessa-Morsott. Relation entre la paléogéographie albo-aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. P. et M. Curie, Paris VI, n°87-56, Paris, 220p.
- ORGM. 1991.** Rapport sur les résultats de la prospection du gisement de Fer Djebel Anini (avec calcul de réserves), (Tizi Ouzou). Rapport inédit 100p.
- OUAHIOUNE, AEK. TOUCHAL, T et BOUSSAID, F. 2009.** Rapport Final sur les travaux de prospection réalisés sur le gisement de fer de Dj Anini. Rapport inédit ORGM.76p.
- OUAHIOUNE, AEK TOUCHAL, T et BOUSSAID, F. 2011.** Sur les travaux de prospection complémentaire réalisés en 2011 pour la détermination des potentialités du gisement de fer de Djebel Anini. Wilaya de Sétif. Rapport inédit ORGM.67p.
- OUTEMZABET, L. 1994.** Rapport final sur les travaux de prospection réalisés sur les secteurs de Kef Semmah, Ain Sedjra, Dj Hellel, Boukhdéma, Ain Roua et Ain-El-Hamra Vol I. Rapport inédit d'ORGM, 110p.
- PANNATIER, Y. 1996.** Variowin Software for Spatial Data Analysis in 2D. Springer verlag, pp91. ISBN 0-387-94679-9.
- PEYBERNES, B. CHOUABI, A. VILA, JM. PALEVOL, CR. 2002.** Reconstitution du substratum jurassique-crétacé basal du domaine des sellaoua (marge sud-téthysienne, Algérie nord orientale) à partir des galets du bassin mio-pliocène d'Hammam N'bails.

- POHLETAL, W. AMMOURI, M. KOLLI, O. SCHEFFER, R. ZACHMANN, D. 1986.** A new genetic model for the North African metasomatic siderite deposits. *Mineral. Deposita*, 21, pp.228-233.
- POPOV, A. 1976.** Les gisements de Fer en Algérie, in : ZITZMANN. A. Vol. I, Rapport inédit de SONAREM, pp83-89.
- RAOULT, J.F. 1969.** Nouvelles données sur les flyschs du Nord du Kef Sidi Dris et dans la zone du Coté des Oliviers (Nord du Constantinois. Algérie). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), t. XI, p. 516-543, 2 fig.
- REMICHI, A. ; MENIDJEL, A. 2008.** Rapport sur l'estimation des ressources/réserves du gisement de Khanguet ElMouhad Tébessa, Rapport inédit. 47p.
- ROSENBAUM, G. LISTER , G. S. et DUBOZ, C. 2002.** Reconstruction of the tectonic evolution of the western Mediterranean since the Oligocene. 23p.
- ROUVIER, H.; PERTHUISOT, V. & MANSOURI, A. 1985.** Pb-Zn deposits and salt bearing diapirs in southern Europe and North Africa. *Econ. Geol.*, vol. 80, pp.666-687.
- 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.
- SALMI-LAOUAR S. (1998):** Le Massif de Boujaber (NE Algérien): Sédimentologie, biostratigraphie et contribution des isotopes du soufre à la reconnaissance du mode de mise en place des masses triasiques et minéralisation à Pb-Zn-Ba. Thèse de Magister, Université de Annaba, Algérie. 92p.
- SALMI-LOUAR, S. 2004.** Contribution a l'étude géologique et géochimie des isotopes stables (S,O,C) des minéralisations polymétalliques (Zn-Pb-F-Ba-Fe-Hg) de la zone des diapirs du nord de Tébessa (NE Algérien).
- SLAVKO, P et REGUIBI, A. 1968.** Rapport sur le minerai de Fer du Djebel Anini. Proposition de recherche. Rapport inédit SONAREM, 56p.
- SMATI, A. 1986.** Les gisements de Pb-Ba et de Fe du Djebel Slata (Tunisie du Centre-Nord) : Minéralisations épigénitiques dans le Crétacé néritique de la bordure d'un diapir de Trias. Gisements de Sidi Amor ben Salem et de Slata fer. Thèse Doct. 3ème cycle, Lab. Géol. Appl., Univ. P. et M.Curie, Paris VI, 250p.
- SOKOTOWSKI, A. 1989.** Résultats de la prospection du minerai de fer effectuée en Djebel Hellel et Dj Anini ; 30P Rapport inédit d'EREM.
- THIBIEROZ J. et MADRE M. 1976.** Le gisement de sidérite du Dj. Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golf de mer aptienne. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du nord*, 67, 3-4, pp.

VILA, J, M. 1980. La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse de Doctorat Es Sciences Université, Paris VI. pp628.

VILA, J.M. 1994. Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasiques des confins algéro-tunisiens Trias allochtone « Glacier de sel » sous marin et vrai diapirs. Mémoire du ser géol. De l'Algérie N°6 PP 105-152.

VILA, J.M. 1994. Première étude de surface d'un grand « Glacier de sel » sous marin : l'est de la structure Ouenza-Ladjabel-Meridef (confins algérotunisiens). Proposition d'un scénario de mise en place et comparaisons Bull. Soc. Géol. France 1 N° 66 PP. 149.

VILA, J.M. 2001. Les avantages d'une approche multi-source (biostratigraphie, sédimentologie, forages, profils sismiques et gravimétrie) pour l'étude de l'holocène crétacée ("glaciers de sel", tectonique en radeaux et dômes de sel) et de l'halotectonique tertiaire (plissement des "glaciers de sel", genèse des dômes de sel-plis) des confins algéro-tunisiens. Bull. Serv.Géo.Algérie, vol 12, n°2, pp.129-167.

WILDI, W. 1983. Chaîne tello-Rif (Algérie - Maroc - Tunisie): Structure et évolution stratigraphique du Trias au Miocène. Rev. De géol. Dynamique. Et géo. Physics, Vol. 24, édition spéciale, pp. 201-297.

ZITZMANN, A. NEUMANN-REDLIN, Chr. 1977. The iron ore deposits of Spain. In H.W. Walther & A.Zitzmann (eds): The iron ore deposits of Europe and adjacent areas, vol. 1, pp. 269-278.

[https:// www.rncan.gc.ca/mines-materiaux/faits/minerai-fer/20594.](https://www.rncan.gc.ca/mines-materiaux/faits/minerai-fer/20594)

[\(https://fr.statista.com/statistiques/570421/production-de-minerai-de-fer-par-pays-2010/](https://fr.statista.com/statistiques/570421/production-de-minerai-de-fer-par-pays-2010/),

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Fig. 1- Esquisse structurale de l'Est algérien Wildi (1983) et situation des petits gisements de fer.	2
Fig. 2 - Réserves mondiale et estimation de qualité du minerai de fer dans le monde.	3
Fig. 3 – Les premiers pays producteurs de minerai de fer (site internet).	4
Fig. 4 - Evolution des prix du minerai de fer.	4
Fig. 5 - L'orogène alpin péri-méditerranéen (d'après Durand-Delga, 1969).	10
Fig. 6 - Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien (région du Constantinois)	11
Fig. 7 - Reconstitution paléogéographique des différents domaines des Maghrébides au Crétacé inférieur (Bouillin, 1986).	13
Fig. 8 - L'évolution de la Méditerranée Occidentale sur un transect NNO/SSE allant des Baléares à la plate-forme saharienne (Frizon de Lamotte et al., 2000).	14
Fig. 9 - Répartition et âge du volcanisme récent en Afrique du Nord (d'après Rosenbaum et al., 2002).	14
Fig. 10 - Principaux ensembles structuraux de l'Afrique du nord (D'après Caire, 1967).	15
Fig. 11 - Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue et les périodes d'activités diapiriques..(Dubourdiou 1956, 1959; David 1956; Madre 1969; Fleury 1969; Thibieroz et Madre 1976; Chikhi 1980; Otmanine 1987; Bouzenoune 1993 et Vila et al., 2000).	16
Fig. 12 - Carte structurale de la région nord orientale de la chaîne tellienne et situation du gisement d'Anini (d'après W. Wildi, 1983 simplifiée par A. Boutaleb, 2001).	17
Fig. 13 - Carte géologique de la partie Nord Est du gisement d'Anini (Ouahioune et al 2009 ; 2011).	18
Fig. 14 - Colonne lithostratigraphique du Djebel Anini et Guergour (Vila, 1980).	19
Fig. 15 – Coupe géologique schématique montrant en évidence les différents types d'accidents visibles dans le secteur des Djebels Guergour et Anini (Vila, 1980).	21
Fig. 16 – Hydroxyde de fer Hé : Hématite Section polie, LP Grx100.	22
Fig. 17-Texture collomorphe Go: Goethite Ga:Gangue Section polie, LP Grx20.	22
Fig. 18 - La barytine avec le minerai de fer.	22
Fig. 19 (A,B) - Barytine (Bary) en gerbes. Section polie, LP (A :Grx100 B :Grx20).	23
Fig. 20 - La stibine à l'intérieur de la goethite, St : stibine, section polie Gr X 50.	23
Fig. 21 - Filon de minerai de fer de direction NNWSSE.	24

Fig. 22 - Karst de forme ovoïde à contour irrégulier.	24
Fig. 23 - Texture collomorphe.	24
Fig. 24 - Texture alvéolaire	24
Fig. 25 - (a, b) Texture en stalactite et stalagmite.	25
Fig. 26 - Dolomies à grain fin. PA, Grx05.	25
Fig. 27 - Calcaire sparitique riche en fossiles.	26
Fig. 28 - Orbitoline dans un calcaire grainstone. LP, Grx05.	26
Fig. 29 - Calcaire micritique fin Miliolites et trilobites, LP, Grx05.	26
Fig. 30 - Calcaire micritique fin à trilobites contenant une veinule de calcite oxydée, LP, Grx05.	26
Fig. 31 – Carte géologique de la région de Souk Ahras - Oued Mougras d'après (Kriviakine, 1990).	29
Fig. 32 - Colonne lithostratigraphique du Gisement de Châabet El Ballout.	30
Fig. 33 – Carte géologique du gisement de fer de Châabet El Ballout.	32
Fig. 34 - Coupe géologique du bloc Ouest suivant la ligne II' de la figure 33.	33
Fig. 35 – Géologie du front de carrière, (coupe AA' - Fig.34) gradin N° :1020m.	33
Fig. 36 - Coupe géologique suivant la ligne BB' de la figure 33.	34
Fig. 37 - Coupe géologique suivant la ligne CC' de la figure 33.	35
Fig. 38 – Aspect de la minéralisation à l'échelle métrique.	36
Fig. 39 - Malachite et azurite dans le minerai de fer.	37
Fig. 40 – Mal : Malachite, azu : azurite, section polie Gr X 20.	37
Fig. 41 – Malachite, azurite, et la barytine section polie.	37
Fig. 42 – Cu g : Cuivre gris, sid : sidérite, section polie Gr X 20.	37
Fig. 43 – Schéma général de la distribution du minerai de fer dans les logs de sondage.	38
Fig. 44 - Bréchification veinulée (He) hématite, (Ca) calcite.	38
Fig. 45 - Brèche à éléments hétérométriques Ca (calcite), Li (limonite), He (hématite).	39
Fig. 46 – Minéralisation par remplissage des vides. Ma (marne), Li (limonite), He (hématite).	39

Fig. 47 - Biomicrite à foraminifère planctonique, avec une dissémination de fer dans le ciment.	40
Fig. 48 - Biomicrite à foraminifère planctonique, avec une minéralisation disséminé et filonienne dans le ciment.	40
Fig. 49 - Grés à ciment ferrugineux.	40
Fig. 50 - Structure massive, He (hématite).	41
Fig. 51 - Situation géographique et schéma structurale des confins algéro-tunisiens (D'après Aoudjehane (1991); modifiée)	42
Fig. 52 - Carte géologique schématique du diapir du Djebel Djébissa (Durozoy (1956), des levés partiels de J.M Vila et A. charrière (1992) et de J.M Vila, modifié).	45
Fig. 53 - Coupe interprétative de la terminaison périclinale Nord-Est (Charrière et al., 1996) suivant la ligne ii' de la figure 52.	46
Fig. 54 - Image satellite montrant le linéament qui limite la mine de Khanguet au Sud Est (google earth).	47
Fig. 55 - carte géologique schématique de Khanguet El Mouhad avec localisation des gites (Litvinenko 1979).	51
Fig. 56 - Carte géologique du corps A du gisement de Khanguet El Mouhad (Remichi et al., 2008).	52
Fig. 57 - L'Hématite au contact du calcaire, section polie Gr X 100.	53
Fig. 58 - La sidérite : Sid, section polie Gr X 100.	53
Fig. 59 - Diffractogramme aux RX montrant les phases minéralogiques existante dans l'échantillon N: 1.	53
Fig. 60 -Diffractogramme aux RX montrant les phases minéralogiques existante dans l'échantillon N: 4.	54
Fig. 61- Corps de minerai sous forme stratoïde plissé.	55
Fig. 62 - Minéralisation ferrière au contact du calcaire.	55
Fig. 63 - Minéralisation ferrière au contact de l'assise gypsifère.	55
Fig. 64 - Vue panoramique d'un front de gradin du corps A2 montrant les différents encaissant de la minéralisation	56
Fig. 65 - Calcaire micritique minéralisé renfermant des veinules de calcite contenant de la dolomite Zonée LP, objectif x10.	57
Fig. 66 - Calcaire dolomitisé oxydé LP objectif x10.	57
Fig. 67 - Calcaire micritique oxydé Ca ² : filons remplis de calcites objectif x10.	58
Fig. 68 - Calcaire micritique oxydé objectif x10.	58
Fig. 69 - Représentation géométrique des données : a)- point-lignes R ^p et b) point-variables R ⁿ	62
Fig. 70 - Représentation géométrique d'inertie des points X _i (i=1 à n) par rapport au point P.	63
Fig. 71 - Représentation d'un nuage de points et les principaux axes d'allongement (Axes factoriels)	64

Fig. 72 - Représentation des facteurs de charge d'une ACP normée.	65
Fig. 73 - Les caractéristiques du graphe $\gamma(x, h)$ en fonction de h.	67
Fig. 74 - Schémas théoriques à palier d'ajustement des variogrammes.	68
Fig. 75 - Schémas théoriques sans palier d'ajustement des variogrammes.	69
Fig. 76 - Schéma d'un Variogramme à effet de trou.	69
Fig. 77 - Délimitation des zones et corps de minerais établis par Ouahioune, AEK et al. (2009-2011).	75
Fig. 78 - Statistique des teneurs en FeT de l'ensemble des données des carottes dans le massif d'Anini.	77
Fig. 79 - Cercle de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des données du gisement d'Anini.	80
Fig. 80 - Variogrammes de surface des teneurs en FeT et de Px.D.	83
Fig. 81 - Variogrammes expérimentaux directionnels des teneurs en FeT et leurs ajustements.	83
Fig. 82 - Variogrammes expérimentaux directionnels de Px.D et leurs ajustements.	83
Fig. 83 - Schéma montrant la relation de l'effet de trou et la morphologie des corps de minerais.	84
Fig. 84 - Différente forme de minéralisation Karstique.	85
Fig. 85 - Carte des teneurs krigées en FeT dans les blocs de surface 20X20 m ² .	88
Fig. 86 - Carte des variances de krigeage de FeT dans les blocs de surface 20X20 m ² . Légende voir (Fig.84).	88
Fig. 87 - Carte du potentiel des ressources en FeT en tonne par unité de surface. Légende voir (Fig.84).	89
Fig. 88 - Carte des variances du potentiel en ressources dans les blocs de surface 20X20 m ² . Légende voir (Fig.84).	89
Fig. 89 – a : Histogramme, b : Fonction de répartition de l'ensemble des données des teneurs en fer.	93
Fig. 90 – Distribution des classes des teneurs en fer dans les logs de sondage.	94
Fig. 91 - les cercles de corrélations de l'ACP sur l'ensemble des données de sondages du gisement de Châabet El Ballout.	96
Fig. 92 - Schéma explicatif du calcul du coefficient de la minéralisation dans les calcaires.	99
Fig. 93 - Variogramme de surface de l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation (EHP).	101
Fig. 94 - Variogramme de surface du coefficient de minéralisation (CM).	101
Fig. 95 - Variogrammes expérimentaux directionnels de l'épaisseur de l'horizon porteur de minéralisation (EHP) et leurs ajustements.	102
Fig. 96 - Variogrammes expérimentaux directionnels du coefficient de minéralisation (CM) et leurs ajustements.	102

Fig. 97 - Carte du coefficient de minéralisation (CM) krigées des blocs de surface 20X20 m ² .	104
Fig. 98 - Carte des variances du coefficient de minéralisation (CM) krigées des blocs de surface 20X20 m ² .	104
Fig. 99 - Carte des épaisseurs de l'horizon porteur de minéralisation krigées dans les blocs de surface 20X20 m ² .	105
Fig. 100 - Carte de variance des épaisseurs de l'horizon porteur de minéralisation dans les blocs de surface 20X20 m ² .	105
Fig. 101 - Carte de l'épaisseur minéralisée calculée dans les blocs de surface 20X20 m ² .	106
Fig. 102 - Variogramme vertical des teneurs en FeO angle vertical : 90 ⁰ ±0 ⁰ .	108
Fig. 103 - Le variogramme horizontal moyen des teneurs en FeO Direction : 0 ⁰ ± 90 ⁰ Angle vertical : 0±10 ⁰ .	109
Fig. 104 - Cartes des teneurs krigé en FeO dans les blocs d'exploitation des 13 niveaux.	112
Fig. 105 – Carte des variances de krigeage des teneurs en FeO dans les blocs d'exploitation des 13 niveaux.	113
Fig. 106 – les cercles de corrélations de l'ACP sur l'ensemble des données du gisement de Khanguet El Mouhad.	117

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau. 1 - Impact des différentes impuretés contenues dans les minerais de fer sur la qualité de l'acier d'après Bouaziz (1992) modifiée.	07
Tableau. 2 - Signification du coefficient de corrélation en tenant compte du nombre d'échantillon.	60
Tableau. 3 - Données géochimiques.	62
Tableau. 4 - Exemple de facteurs de charge	65
Tableau. 5 – Statistique de l'ensemble des échantillons.	76
Tableau. 6 – La matrice de corrélation des différents oxydes analysés.	78
Tableau. 7 - Statistiques élémentaires des teneurs moyennes des sondages.	78
Tableau. 8 - Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement d'Anini.	79
Tableau. 9 - Récapitulatif des ressources en minerai de fer estimées par méthode conventionnelle Ouahioune, AEK et al. (2009 ; 2011).	81
Tableau. 10 - Paramètres d'ajustement des variogrammes de FeT et de PxD.	84
Tableau. 11 - Paramètre des blocs du krigeage de FeT et PxD.	85
Tableau. 12 – Résultats de krigeage de FeT et PxD.	86
Tableau. 13 – Tableau comparatif de l'effet de la prise en compte des variances et du coefficient de minéralisation.	87
Tableau. 14 – Statistique de l'ensemble des échantillons.	92
Tableau. 15 – Paramètres statistiques de l'ensemble des classes.	94
Tableau. 16 - Matrice de corrélation des oxydes calculée sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement de Châabet El Ballout.	95
Tableau. 17 - Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement de Châabet El Ballout.	95
Tableau. 18 - Récapitulatif des ressources en minerai de fer estimées par méthode conventionnelle Kouzmine et al. (1992).	97
Tableau. 19 – Statistique de PCM et CMC.	100
Tableau. 20 - Paramètres d'ajustement des variogrammes de CMC et PCT.	102
Tableau. 21- Paramètre des blocs du krigeage Des deux variables CM et EHP.	103
Tableau. 22 – Récapitulatif des ressources en fer et quantité de l'encaissant minéralisé.	103

Tableau. 23 - Paramètres utilisés pour la construction des variogrammes expérimentaux des teneurs de FeO.	107
Tableau. 24 – Données du variogramme vertical des teneurs en FeO.	107
Tableau. 25 - Paramètre du variogramme horizontal moyen des teneurs en FeO.	108
Tableau. 26 - Paramètre de krigeage.	109
Tableau. 27 - Statistique de krigeage de FeO.	110
Tableau. 28 – Récapitulatif des ressources en fer du gisement de Châabet El Ballout.	110
Tableau 29 - Statistique du corps A.	115
Tableau. 30 - La matrice de corrélation des différents oxydes analysés.	116
Tableau. 31 - Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement de Kanguet El Mouhad.	116
Tableau. 32 - Récapitulatif des ressources en minerai de fer estimées par méthode conventionnelle Remichi et al. (2009).	118
Tableau. 33 - Conclusions géologiques	123
Tableau. 34 - Conclusions géostatistiques	124