

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عنابة

Faculté des sciences de la Terre
Département de Géologie

Année 2007

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister

**ETUDE GETOLOGIQUE ET GEOSTATISTIQUE DES
MINERALISATIONS A Fe – Cu DU GISEMENT DE DOUAMIS
(OUENZA – ALGERIE)**

Option

Prospection des Ressources minérales et énergétiques

Par

BEGUIRET Lilia

DIRECTEUR DE MEMOIRE : DR H. MEZGHACHE

Maître de conférences (UBMA)

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : D. HAMMOR

Maître de conférences (UBMA)

EXAMINATEURS : A. TOUBAL
L. BOUABSA

Maître de conférences (UBMA)
Maître de conférences (UBMA)

INVITÉ M. TLILI

Chargé de cours (UBMA)

MAI 2007

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements s'adressent en particulier et avant tout au *DIEU* qui m'a mis sur la bonne voie, et m'a aidé à la réalisation de ce mémoire.

Mes vifs remerciements s'adressent également à :

- ❖ Monsieur *MEZGHACHE*, mon promoteur qui m'a beaucoup aidé durant la période de la préparation de ce mémoire, ainsi que pour ses précieux conseils.
- ❖ Aux membres du jury, Dr *D. HAMMOR*, Dr *A. TOUBAL*, Dr *L. BOUABSA* qui ont accepté de consacrer du temps précieux, pour la critique de ce travail.
- ❖ Monsieur *TLILI*, pour son aide appréciable et ses orientations.
- ❖ Messieurs *HERRI* et *MSAADIA*, de *MITTAL STEEL - TEBESSA*, qui m'ont aidé lors de la collecte des données sur site.
- ❖ Monsieur *LAZIZI*, pour ses prodigués conseils sur terrain.
- ❖ Monsieur *MAMINE*, le topographe de la direction d'études et de développement (*D.E.D*) - *OUENZA*, pour son aide infinie, ainsi qu'à tous les personnels de cette dernière.
- ❖ La famille *BOUCHOUCHA*, pour son chaleureux accueil, durant la période de stage.
- ❖ Ma famille, qui m'a préparé les conditions convenables pour la réalisation de ce travail, ainsi que pour son aide aurifère.
- ❖ Mes amis, surtout pour le soutien moral: *Samira, Wahiba, Nadjette, Saida, Chams, Sabrina, Zina, Chiraz, Nawel, Amel, Fahima, Adel, Mehdi, Hichem, Lasaâd, Nabil, Zoheir, Haroune et Belkacem.*

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

- Mes parents;
- Mon frère et mes sœurs;
- La mémoire de ma grand-mère;
- Toute la famille Hamida, et ma seconde famille Bouchoucha;
- Mes amis (es);
- Ma copine préférée, avec laquelle j'ai partagé les bons et les mauvais moments:
Wahiba;
- La fille miracle, que j'aime plus que tout au monde: Yousra Alae.

RESUME

En Algérie, le gisement de fer de l'Ouenza représente une des sources principales en matière d'approvisionnement en minerai de fer de la sidérurgie nationale. Ces minerais sont orientés vers l'usine sidérurgique d'El Hadjar où leur transformation conduit à l'élaboration de la fonte et l'acier répondant aux exigences de l'industrie sidérurgique moderne. L'écrouissage effectué par les français à l'époque coloniale ainsi que l'exploitation sélective des quartiers de l'Ouenza ont favorisé un appauvrissement des réserves. Cependant la qualité de la matière première chargée dans les hauts fourneaux doit avoir une teneur minimale en fer (45%) et répondre à certaines exigences en matière de teneurs en d'autres éléments chimiques. Ces minerais pauvres sont de plusieurs types. Parmi ces types il y a celui à minéralisation à Fe-Cu qui est rencontré dans le gisement de Douamis. Ce type de minerais peut être utilisé comme matière première pour les hauts fourneaux s'il répondait aux exigences en matière de teneur en Cu comme il peut être utilisé comme source possible pour le métal cuivre si le prix de revient le permettait.

Etant donné l'intérêt économique que présente le type de minerais à minéralisation à Fe-Cu, des études géologiques, pétro-minéralogiques et géostatistiques ont été entreprises au niveau du gisement de Douamis. Ces études ont été faites sur la base des teneurs des carottes de prospection et des échantillons prélevés lors du stage effectué sur site.

- L'étude géologique a permis de montrer ou de confirmer que le secteur de Douamis se présente en antiforme. Sa lithostratigraphie ne diffère guère de celle du massif de l'Ouenza : elle est constituée des roches du Trias et du Crétacé inférieur - Aptien.

- L'étude sédimentologique a confirmé la présence des calcaires à Orbitholines, à Polypiers, à Rudistes, à Miliolites et des calcaires bioclastiques.

- L'étude minéralogique a confirmé la présence de deux types de minéralisation dans le secteur de Douamis : Ferrifère représentée par la sidérite, l'hématite, la goéthite et la limonite et la minéralisation polymétallique représentée généralement par le cuivre gris et la galène.

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

- L'analyse statistique monovariée faite sur les teneurs de carottes (1363) montre que le minerai présente une teneur moyenne de 50,98% en Fe et 0,224% en Cu. Le traitement

bivarié et l'ACP montrent une corrélation négative significative entre Fe et les autres éléments analysés, qui sont Cu, SiO₂, S et CaO.

- Les variogrammes expérimentaux horizontaux et verticaux en 3D des teneurs en Fe, Cu et Si ont été calculés, tracés et ajustés. Les teneurs en Fe Total et Cu des blocs de 25m x 25 m x15 m dans quinze niveaux différents ont été estimées par krigeage, en utilisant les variogrammes calculés et ajustés. Au total les teneurs de 5292 blocs de 25x25x15m ont été krigées. Les variances de krigeage ont été calculées.

- La cartographie des teneurs krigées en Fe Total et Cu, et de leurs erreurs d'estimation (Variance de krigeage) a été faite dans chaque niveau. Ce ci a permis la visualisation de la répartition de ces variables dans les différents blocs et la localisation des zones les plus riches.

- Les réserves locales ont été estimées par krigeage à 45 Millions de tonnes (45 MT) pour les teneurs TFe>45%, contenant 133406 de tonnes de Cu et 71211 tonnes de Cu pour une teneur de coupure de 0,4% en Cu. Les réserves estimées sont classées selon l'ordre croissant de l'erreur relative (racine carré de la variance d'estimation) comme suit : La catégorie A : 17.41% ; La catégorie B : 55.08%, la catégorie C : C₁: 27.36% et C₂: 0.14%.

- L'estimation des réserves a été faite sans tenir compte des quantités déjà extraites à ce jour. Etant donné les faibles quantités en Cu, il ne serait pas rentable de les extraire, et afin d'obtenir une fonte à une teneur en Cu < 0.1%, il serait nécessaire de mélanger le minerai de fer cuivreux à un minerai de fer «sans cuivre». Les taux de mélange seront déterminés en fonction des teneurs en FeT et Cu de chacun des blocs d'exploitation.

Mots clés: Minéralisation ferrifère, Cuivre gris, Statistique, Géostatistique, Krigeage, Cartographie automatique, réserves locales.

Abstract

In Algeria, the layer of iron of the Ouenza represents one of the main sources concerning provision in ore of iron of the national steel industry. These ores are oriented toward the iron factory of El Hadjar, where their transformation drives to the development of melting and steel answering the requirements of the modern steel-making industry. The skimming done at the time by the French colonial as well as the selective exploitation of the districts of the Ouenza encouraged an impoverishment of the reserves. However the quality of the raw material charged in the high furnaces must have a minimal content made of iron (45%) and to answer some requirements concerning contents in other chemical elements. These poor ores are of several types. Among these types has the one to mineralization in Fe-Cu that is met in the layer of Douamis. This type of ores can be used like raw material for the high furnaces if it answered the requirements in matters of content in Cu as it can be used like possible source for metal coppers if the price of comes back permitted it.

Considering the economic interests that present the type of ores to mineralization in Fe-Cu, the geological, petro-mineralogical and geostatistical studies have been undertaken to the level of the layer of Douamis. These studies have been made on the basis of the contents of the carrots of prospecting and samples appropriated at the time of the practicum done on site.

- The geological survey permitted to show or to confirm that the sector of Douamis presents itself in antiforme. Her lithostratigraphy hardly defers the one of the massif of the Ouenza: it is constituted of the rocks of the Trias and the Cretaceous lower - Aptien.

- The sedimentary survey confirmed the presence of the limestones to Orbitholines, in Polypiers, in Rudistes, in Miliolites and the chalky bioclastiques.

- The mineralogical survey confirmed the presence of two types of mineralization in the sector of Douamis: iron represented by the siderite, hematite, the goethite and the limonite and the polymetallic mineralizations generally represented by the gray copper and galena.

- The statistical and geostatistical studies permitted to succeed to the following findings:

- The monovariate analysis statistical made on the contents of carrots (1363) watch that ore presents a middle content of 50,98% in Fe and 0,224% in Cu. The bivariate treatment and the ACP show a meaningful negative interrelationship between Fe and the other elements analyzed, that are Cu, SiO₂, S and CaO.

- The horizontal and vertical experimental variogrammes in 3D contents in Fe, Cu and If have been calculated, drawn and adjusted. The contents in Fe Total and Cu of the blocks of 25m x 25 m x15 m in fifteen different levels has been estimated by krigage, while using the calculated variogrammes and adjusted. To the total the contents of 5292 blocks of 25x25x15m were kriged. The variances of krigage have been calculated.

- The cartography of the contents kriged in Fe Total and Cu, and of their evaluation mistakes (Variance of krigage) has been made in every level. This permitted the visualization of the distribution of these variables in the different blocks and the localization of the richest zones.

- The local reserves have been estimated by krigage to 45 Millions tons (45 MT) for the TFe>45% contents, containing 133406 of tons of Cu and 71211 tons of Cu for a content of cut of 0,4% in Cu. The valued reserves are classified according to the increasing order of the relative mistake (root squared of the evaluation variance) as follows: The A category: 17.41%; The B category: 55.08%, the C category: C1: 27.36% and C2: 0.14%.

- The evaluation of the reserves has been made without taking account of the quantities already extracted on this day. Considering the weak quantities in Cu, it would not be profitable to extract them, and in order to get a melting to a content in Cu <0.1%, it would be necessary to mix the ore of iron- copper to an ore of iron "without copper". The rates of mixture will be determined according to the contents in FeT and Cu of each of the exploitation blocks.

Key words: Iron mineralization, Gray copper, Statistics, Geostatistics, Krigage, Automatic cartography, Local reserves,

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION	04
CARACTERES GEOGRAPHIQUES.....	05

PARTIE I : ETUDE GEOLOGIQUE

CHAPITRE I : GEOLOGIE REGIONALE

I. 1. - GEOLOGIE REGIONALE.....	06
I. 1. 1. - INTRODUCTION.....	06
I. 1. 2. - LITHOSTRATIGRAPHIE.....	07
I. 1. 3. - CADRE STRUCTURAL	12
I. 1. 3. 1. - La subsidence	14
I. 1. 3. 2. - Le diapirisme	14
I. 1. 3. 3. - Les plissements	15
I. 1. 3. 4. - La tectonique cassante	15
I. 1. 3. 5. - Les fossés d'effondrements	16
I. 1. 4. - EVOLUTION PALEOGEORAPHIQUE.....	16

CHAPITRE II : GEOLOGIE DU SECTEUR D'ETUDE

II. 1. - GEOLOGIE DU SECTEUR DE DOUAMIS.....	19
II. 1. 1. - INTRODUCTION.....	19
II. 1. 2. - LITHOSTRATIGRAPHIE.....	20
II. 1. 3. - TECTONIQUE.....	22
II. 1. 4. - ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE	22
II. 1. 5. - MINERALISATIONS	25
II. 1. 5. 1. - Minéralisation ferrifère	25
II. 1. 5. 2. - Minéralisation polymétallique	28
II. 1. 6. - GENESE DE LA MINERALISATION	30
II. 1. 6. 1. - Hypothèse sédimentaire ou syngénétique.....	30
II. 1. 6. 2. - Hypothèse hydrothermale.....	30

PARTIE II : ETUDE GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES RESERVES LOCALES

CHAPITRE I : METHODOLOGIE ET TRAITEMENT DES DONNEES DE PROSPECTION

I. 1. - METHODOLOGIE DE PROSPECTION.....	32
I. 1. 1. - TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES.....	32
I. 1. 2. - TRAVAUX MINIERs, FORAGE ET ECHANTILLONNAGE DE CAROTTES	32
I. 2. - STATISTIQUE DES DONNEES DE PROSPECTION DU GISEMENT DE DOUAMIS.....	33
I. 2. 1. - TRAITEMENT MONOVARIABLE.....	34
I. 2. 2. - TRAITEMENT BIVARIE.....	37
I. 2. 3. - TRAITEMENT MULTIVARIE.....	39

CHAPITRE II : GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES RESERVES

II. 1. - GEOSTATISTIQUE.....	41
II. 1. 1. - INTRODUCTION.....	41
II. 1. 2. - LES PROCEDURES GEOSTATISTIQUES DU KRIGEAGE.....	43
II. 1. 2. 1- Krigeage ordinaire	43
II. 1. 2. 2- Propriétés de krigeage ordinaire.....	44
II. 1. 3. - RESULTATS OBTENUS DANS LE GISEMENT DE DOUAMIS.....	45
II. 1. 3. 1. - Variographie des variables regionalisees.....	45
II. 1. 3. 2. - Variographie des teneurs en « Fe, Cu et Si » du gisement de Douamis.....	49
II. 2. – KRIGEAGE, CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE ET ESTIMATION DES RESERVES EN Fe et Cu PAR NIVEAU.....	56
II. 2. 1. - KRIGEAGE DES TENEURS EN Fe, Cu et Si.....	56
II. 2. 2. - STATISTIQUES DES RESULTATS DE KRIGEAGE DE CHAQUE NIVEAU.....	57

II. 2. 3. - CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE DES VARIABLES KRIGÉES...	57
II. 2. 4. - ESTIMATION DES RESERVES.....	60
CONCLUSIONS	62
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	64
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1- Localisation géographique de la région d'étude.
- Fig. 2- Principaux ensembles structuraux de l'Afrique du nord et situation de la région d'étude (Caire, 1967).
- Fig. 3- Carte géologique régionale (Dubourdiou, 1956, modifiée).
- Fig. 4- Colonne stratigraphique synthétique de monts de Mellègue (d'après :Dubourdiou 1956, 1959 ; David 1956; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thibieroz et Madre 1976 ; Chikhi, 1980 ; Otmanine 1987, Bouzenoune 1993 et Vila et al, 2000).
- Fig. 5- Position des extrusions triasiques par rapport aux fossés d'effondrements et la répartition des principaux gisements (Aoudjehane, 1991, modifiée).
- Fig. 6- Délimitations des trois domaines triasiques dans les confins algéro-tunisiens (Vila et al, 1993-2000).
- Fig. 7- Carte paléogéographique de la Tunisie et des confins algéro-tunisiens durant l'Aptien (in Memmi, 1999).
- Fig. 8- Carte géologique du massif de l'Ouenza (Dubourdiou, 1956; modifiée).
- Fig. 9- Coupe schématique montrant l'anatomie de l'Ouenza (Bouzenoune, 1993, simplifiée).
- Fig. 10- Profil lithostratigraphique du gisement de Douamis.
- Fig. 11- Microphotographie de calcaires à Orbitholines (Or) en lame mince (**LN**).
- Fig. 12- Microphotographie de calcaires à Polypiers (Po) en lame mince (**LN**).
- Fig. 13- Microphotographie de calcaires (Ca) à Rudistes (Ru) en lame mince (**LN**).
- Fig. 14- Microphotographie de calcaires à Miliolites en lame mince (**LN**).
- Fig. 15- Microphotographie de calcaires bioclastiques en lame mince (**LN**). (Bi): Bioclaste.
- Fig. 16- Minerai de fer hématite (Hé) et limonite (Li) recoupé par un filon de barytine (Ba) (Benlamri et Brahimou, 1998).
- Fig. 17- Minerai de produits d'altération de cuivre : azurite (Az) (Benlamri et Brahimou, 1998).
- Fig. 18- Minéralisation stratiforme guidée par un stylolite.
- Fig. 19- Microphotographie de quartz automorphe (Qz) dans une matrice formée de calcaire (Ca) en lame mince (**LN**).
- Fig. 20- Microphotographie de goethite (Go) associée à l'hématite (Hé) en section polie (**LP**).
- Fig. 21- Microphotographie de limonite (Li) associée à l'hématite (Hé) en section polie (**LP**).
- Fig. 22- Minéralisation filonienne à barytine (Ba) (Benlamri et Brahimou, 1998).
- Fig. 23- Microphotographie de cuivre gris en section polie (**LP**).
- Fig. 24- Microphotographie de la galène (Ga) associée à la barytine (Ba) en section polie (**LP**).

Fig. 25- Microphotographie de la malachite (Ma) associée à l'azurite (Az) en section polie (**LP**)

Fig. 26- Microphotographie de l'hématite (Hé) associée à la malachite (Ma) et l'azurite (Az) en section polie (**LP**).

Fig. 27- Plan de situation de tous les forages réalisés au niveau du gisement de Douamis.

Fig. 28- Histogramme et graphe de probabilité de Fe (%).

Fig. 29- Histogramme et graphe de probabilité de Cu (%).

Fig. 30- Histogramme et graphe de probabilité de SiO₂ (%).

Fig. 31- Histogramme et graphe de probabilité de S (%).

Fig. 32- Histogramme et graphe de probabilité de CaO (%).

Fig. 33- Cercles de corrélations de l'ensemble des éléments chimiques.

Fig. 34- Répartition des données.

Fig. 35- Graphe d'un variogramme.

Fig. 36- Répartition du plan d'échantillonnage

Fig. 37- Variogramme expérimental horizontal moyen (3D) des teneurs en Fe du gisement De Douamis.

Fig. 38- Variogramme expérimental vertical moyen en 3D des teneurs en Cu de gisement de Douamis.

Fig. 39- Variogramme expérimental horizontal moyen (3D) des teneurs en Cu de gisement de Douamis.

Fig. 40- Variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs en Fe du gisement de Douamis.

Fig. 41- Variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs en Cu de gisement de Douamis

Fig. 42- Variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs en Si du gisement de Douamis.

Fig. 43- Variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs en Fe du gisement de Douamis.

Fig. 44- Variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs en Cu du gisement de Douamis.

Fig. 45- Variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs en Si du gisement de Douamis.

Fig. 46- Cartographie des teneurs en fer et en cuivre krigées par niveau.

Fig. 47- Cartographie des teneurs en fer krigées et de l'erreur d'estimation par niveau.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau. 1- Paramètres statistiques des éléments chimiques des données de sondages du gisement de Douamis.
- Tableau. 2- Matrice de corrélations simples des éléments.
- Tableau. 3- Nombre des échantillons des éléments chimiques.
- Tableau. 4- Les équations de la régression linéaire simple.
- Tableau. 5- Résultats de l'ACP sur l'ensemble des données de sondages du gisement de Douamis.
- Tableau. 6- Paramètres du variogramme expérimental horizontal moyen (3D) des teneurs des carottes en Fe.
- Tableau. 7- Paramètres du variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs des carottes en Cu.
- Tableau. 8- Paramètres du variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs des carottes en Cu.
- Tableau. 9- Paramètres du variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs des carottes en Fe.
- Tableau. 10- Paramètres du variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs des carottes en Cu.
- Tableau. 11- Paramètres du variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs des carottes en Si.
- Tableau. 12- Paramètres du variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs des carottes en Fe.
- Tableau. 13- Paramètres du variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs des carottes en Cu.
- Tableau. 14- Paramètres du variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs des carottes en Si.
- Tableau. 15- Paramètres et plan type de krigeage ordinaire dans le gisement de Douamis.
- Tableau. 16- Résultats de krigeage ordinaire dans le gisement de Douamis.
- Tableau. 17- Résultats de krigeage ordinaire par niveau dans le gisement de Douamis.
- Tableau. 18- Tonnage des réserves en fer et en cuivre du gisement de Douamis.
- Tableau. 19- Catégorisation des réserves du gisement de Douamis.

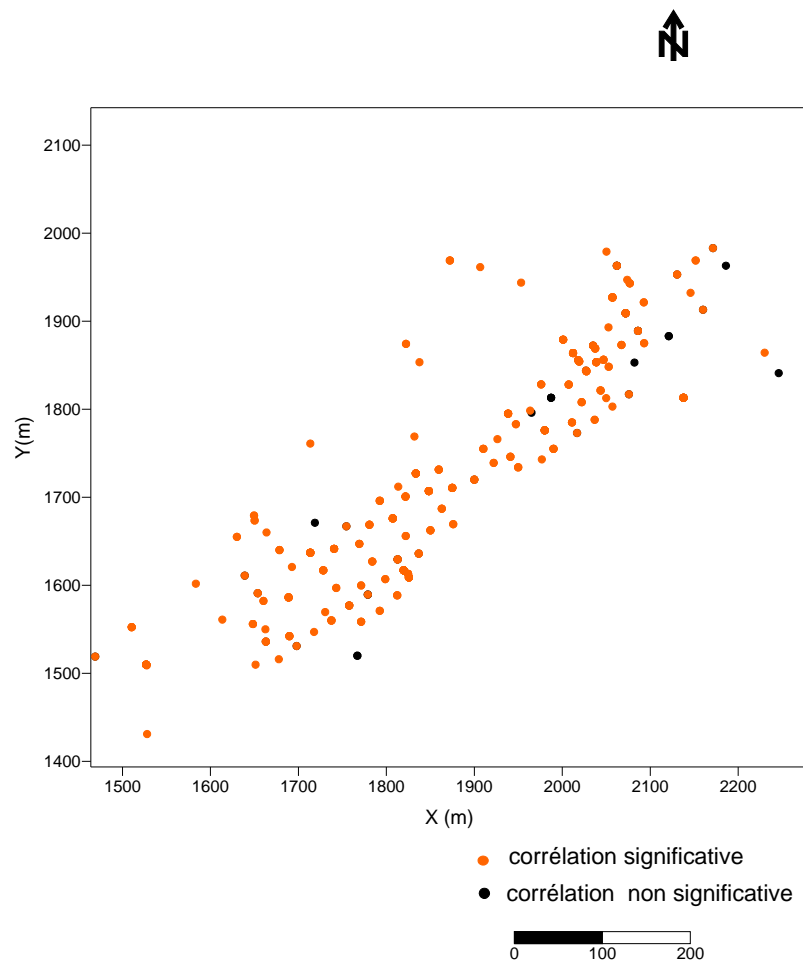


Fig répartition spatiale des deux classes

Z	Niv	N bloc	Fe				Cu				Si			
			Tmin (%)	Tmax (%)	Tmoy (%)	Var	Tmoy (%)	Tmax (%)	Tmoy (%)	Var	Tmin (%)	Tmax (%)	Tmoy (%)	Var
494	1	138	29,66	57,65	42,17	77,56	0,07	0,41	0,16	0,02	0,07	4,85	_	_
509	2	232	26,61	54,27	39,46	31,33	0,03	0,39	0,23	0,005	2,47	10,78	5,46	7,10
524	3	346	25,35	58,44	39,95	31,85	0,01	0,57	0,18	0,02	0,22	16,39	7,75	14,37
539	4	404	20,94	58,44	42,73	28,29	0,01	0,79	0,20	0,03	0,54	11,85	3,66	5,00
554	5	441	29,79	58,42	46,25	31,18	0,02	,061	0,35	0,13	0,87	10,43	3,32	2,97
569	6	445	31,90	57,18	48,38	19,33	0,02	1,63	0,47	0,13	0,83	0,15	3,31	2,01
584	7	449	31,63	59,14	49,93	26,05	0,02	1,65	0,44	0,11	0,61	8,51	3,33	2,08
599	8	476	31,31	58,44	51,81	23,09	0,03	1,23	0,24	0,46	0,60	8,99	3,43	2,95
614	9	496	29,51	59,05	51,80	26,53	0,02	0,64	0,17	0,01	0,45	14,44	3,57	4,81
629	10	506	34,20	57,56	51,64	19,00	0,02	0,85	0,18	0,02	0,90	15,44	3,73	5,96
644	11	489	35,51	58,28	50,72	17,49	0,02	0,81	0,24	0,02	1,02	15,00	4,38	6,93
659	12	423	32,51	58,28	49,72	9,62	0,03	0,68	0,29	0,02	1,38	14,86	5,11	8,48
674	13	298	43,12	54,19	48,96	4,89	0,03	0,71	0,34	2,02	1,31	13,51	5,23	9,46
689	14	112	26,48	54,13	44,31	48,94	0,07	0,48	0,30	0,01	0,77	12,71	4,80	17,62
704	15	37	28,42	40,63	28,34	4,49	/	/	/	/	0,07	1,27	1,20	0,004

INTRODUCTION

L'expansion de la sidérurgie algérienne s'appuie en grande partie sur l'utilisation de toutes les ressources en fer. En Algérie, le gisement de fer de l'Ouenza présente la source principale en matière d'approvisionnement en minerai de fer de la sidérurgie nationale: Les minerais de fer extraits du massif de l'Ouenza sont orientés vers l'usine sidérurgique d'El Hadjar où leur transformation conduit à l'élaboration de la fonte et l'acier répondant aux exigences de l'industrie sidérurgique moderne. L'écémage effectué par les français à l'époque coloniale ainsi que l'exploitation sélective des quartiers de l'Ouenza ont favorisé un appauvrissement des réserves. La qualité de la matière première chargée dans les hauts fourneaux doit avoir une teneur minimale en fer et répondre à certaines exigences en matière de teneurs en d'autres éléments chimiques. Ces minerais pauvres sont de plusieurs types parmi lequel celui à minéralisation à Fe-Cu qui est rencontré dans le gisement de Douamis. Ce type de minerais peut être utilisé en qualité de matière première pour les hauts fourneaux s'il répondait aux exigences en matières de teneur en Cu comme il peut être utilisé comme source possible pour le métal cuivre. Ce dernier occupe, en tonnage, la troisième place après l'acier et l'aluminium. Actuellement ses réserves mondiales se situent aux alentours de 300 Mt pour une teneur de coupure économique de 0,5 % en cuivre. Etant donné l'intérêt économique que présente le type de minerais à minéralisation à Fe-Cu, il a été jugé nécessaire de procéder à son étude géologique, pétro-minéralogique et géostatistique au niveau du gisement de Douamis. Cette étude a été faite sur la base des teneurs des carottes de prospection et des échantillons prélevés lors du stage effectué sur site. Etant donné le grand nombre de données, il a été très utile d'utiliser l'outil informatique. Les résultats obtenus sont présentés dans le présent mémoire qui est subdivisé en deux grandes parties : La partie géologique et la partie géostatistique et estimation des réserves locales.

APERCU GEOGRAPHIQUE

Le massif de l'Ouenza est situé dans le Nord-Est algérien. Il se trouve à 160 km au Sud de la ville de Annaba, dans l'Atlas saharien oriental, près des frontières Algéro-tunisiennes. La distance entre ce massif et la ville de Tébessa dont il est rattaché administrativement atteint 72 km (Fig. 1). Les principales voies de communications sont représentées par un réseau routier reliant l'Ouenza aux villes voisines ; Tébessa, Souk-Ahras et Annaba. Une ligne de chemin de

fer relie la mine de l'Ouenza au complexe sidérurgique d'El Hadjar où s'effectue le traitement du minerai de fer.

La topographie est très caractéristique de celle de l'Atlas saharien. Son relief est assez accidenté. L'altitude maximale signalée à Djebel Ouenza est de 1206m à Chagoura.

La région présente un climat semi désertique : hiver relativement froid et un été chaud et sec, avec une précipitation annuelle moyenne de 400 mm. Les principaux cours d'eau sont : Oued Mellègue, Oued Harraba et Oued El Ksab, dont les débits sont irréguliers et varient selon la saison et la quantité de précipitation. La couverture végétale est pauvre ; elle est représentée par de petites forêts de pins. La population vit généralement de l'activité minière et de l'élevage d'ovins et de caprins.

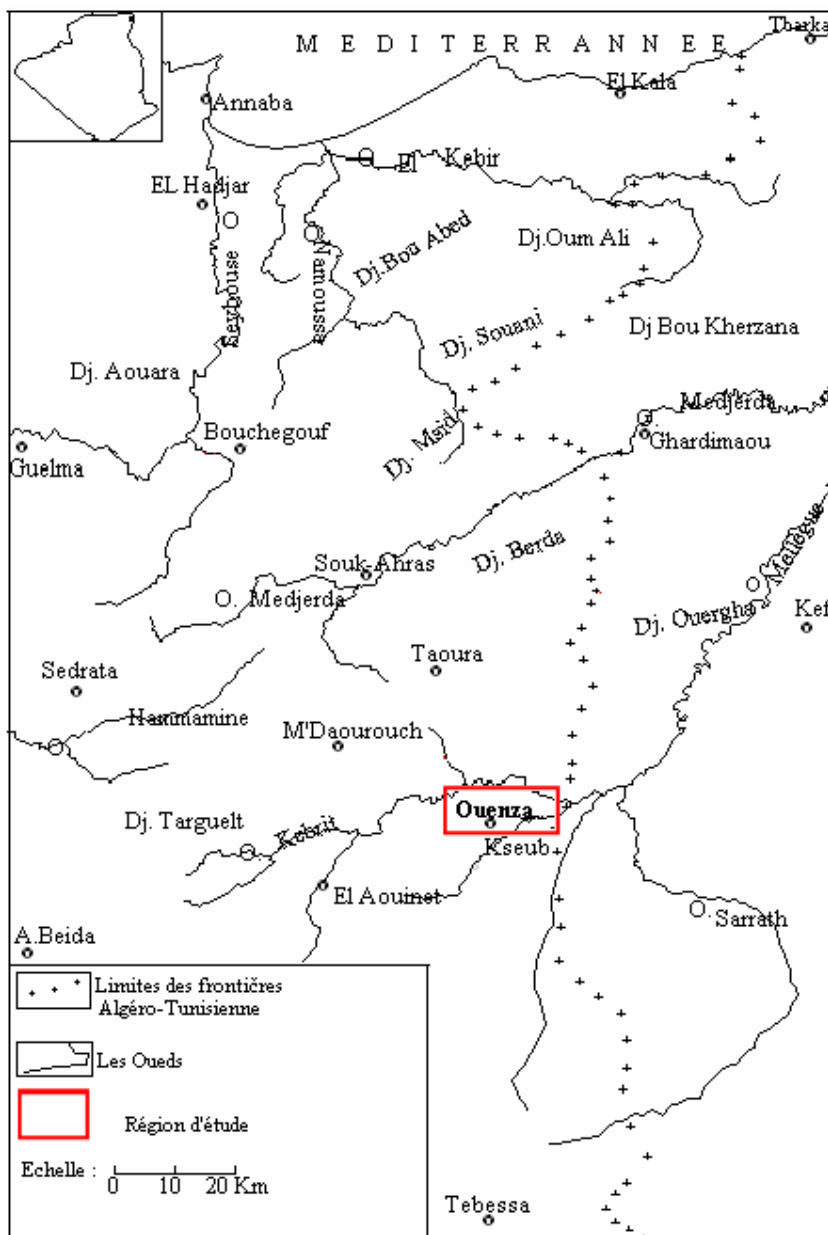


Fig. 1 - Localisation géographique de la région d'étude

I. 1. - GEOLOGIE REGIONALE

I. 1. 1. - INTRODUCTION

Les Monts de Mellègue font partie intégrante de l'Atlas saharien, qui se poursuit en Tunisie par l'Atlas tunisien. Il est composé de trois faisceaux de plis organisés en échelons et formant du Sud-Ouest vers le Nord-Est ; Monts des Ksour, Djebel Amour, Monts de Ouled Nail, les Aurès et les Monts de Mellègue (Fig. 2).

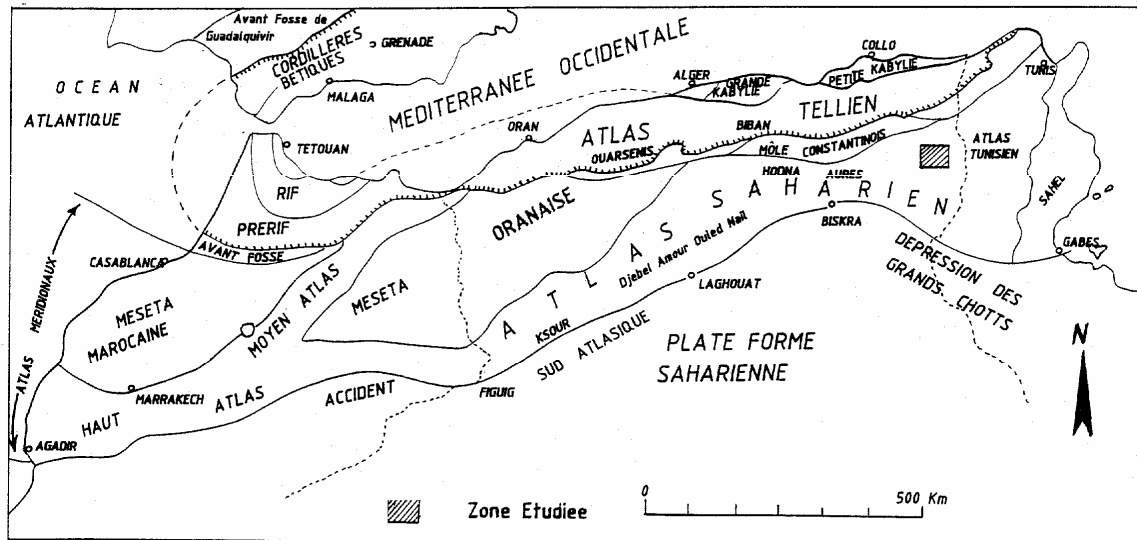


Fig. 2 - Principaux ensembles structuraux de l'Afrique du Nord et situation de la région d'étude (Caire, 1967).

Plusieurs études ont été réalisées dans la région des confins algéro-tunisiens, considèrent les formations triasiques comme des diapirs polyphasés liés aux phases compressives depuis l'Aptien jusqu'au Quaternaire (Dubourdiou, 1956; Thibièroz et Madre, 1976; Rouvier et al., 1985; Othmanine, 1987; Perthuisot et al., 1988; Aoudjehane et al., 1992; Bouzenoune, 1993; Bouzenoune et al., 1995; Kowalski et Hamimed, 2000). Certains auteurs rattachent une relation entre la mise en place des diapirs à des phases tectoniques distensives permettant la mise en place des formations triasiques en surface par une éventuelle halocinèse à caractère diapirique classique (Laatar, 1980; Orgeval et al., 1986; Smati, 1986; Chikhaoui, 1988; Hatira, 1988; Perthuisot et al., 1988). Quant à Vila (1994, 1995, 1996, 2001; Vila et Charrière, 1993; Vila et al., 1994; Vila et al., 1996), ils considèrent les formations triasiques comme d'importantes lentilles empruntées des fractures ouvertes qui vont être resédimentées et interstratifiées au sein des séries crétacées, à la manière de "glaciers de sel" sous-marins.

I. 1. 2. - LITHOSTRATIGRAPHIE

La géologie de Mellègue a fait l’objet de plusieurs études déjà publiées (Dubourdiou, 1956; Rouvier, 1977; Perthuisot, 1978 et Perthuisot, 1992), qui ont noté la présence d’une zone large qui s’étend sur une centaine de kilomètres dite: «zone des diapirs » entre les Monts du Mellègue au Nord et la flexure saharienne au Sud.

Le caractère lithologique de faciès sédimentaires et la subdivision stratigraphique ont été établis à la base des travaux de plusieurs géologues parmi lesquels (Dubourdiou ; 1956, Chikhi ; 1980 et Vila ; 1994). Il s’agit de formations de dépôts mésozoïques - cénozoïques allant de Trias au Quaternaire (Figs. 3 et 4). En intégrant la lithostratigraphie de quelques formations du massif de l’Ouenza, encaissant généralement des minéralisations ferrifère et polymétallique, nous distinguons :

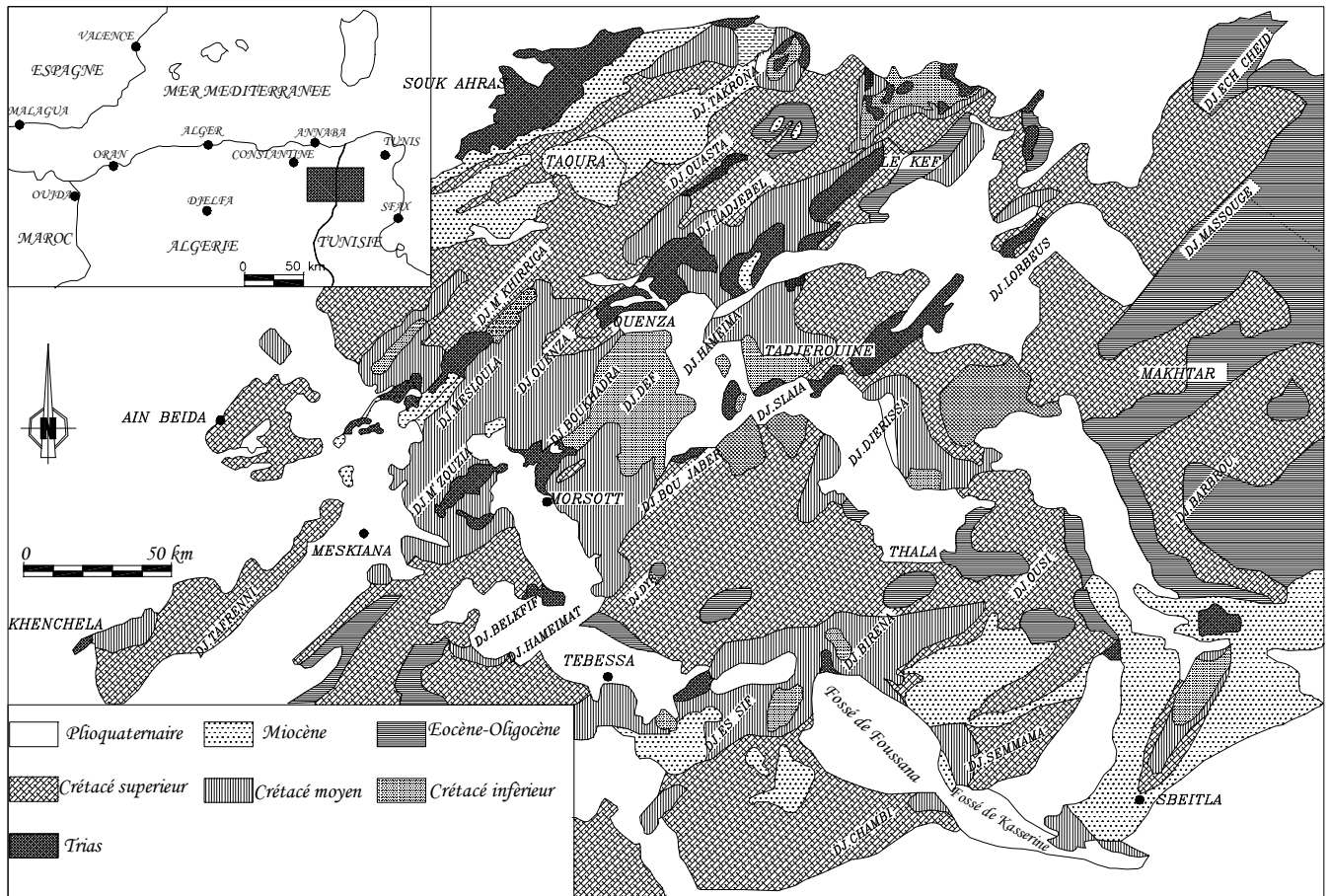


Fig. 3 - Carte géologique régionale (Dubourdiou, 1956).

		Lithologie	Epaisseur (m)	Description lithologique							
CENOZOIQUE	Quaternaire		⑥ 10-30	Dépôts clastiques d'origine continentale.							
	Néogène	Miocène		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.						
	E	U	R	I	E	U	R	Maest.		250-300	Calcaires gris clairs, calcaires crayeux et marnes argileuses avec intercalation d'argiles dans la partie supérieure.
								Campan.		500-600	Marnes argileuses gris-foncées et des calcaires blancs dans la partie moyenne et supérieure.
								Con-Sant.		500-600	Marnes argileuses grises et grises bleuâtres.
								Turo		180-250	Calcaires en bancs, partiellement marneux à teinte noire et gris-foncée.
								Cénom.		900-1000	Marnes gris-verdâtres et grises dans la partie supérieure, avec intercalations de calcaires marneux.
								Vracon.		500-600	Marnes et marnes-argileuses avec intercalations de calcaires argileux et argilites.
								Albien		480-600	Marnes grises et gris-foncées, noires dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.
Clans									100-200	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations de calcaires.	
Aptien									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.	
Barrém									< 250	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès à Mesloul).	
M	E	S	R	I	E	U	R	Jurassique		?	
								Trias		< 700	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins, dolomies et calcaires marno-dolomitique.

Fig. 4 - Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue (d'après :Dubourdiou 1956, 1959 ; David 1956; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thibieroz et Madre 1976 ; Chikhi, 1980 ; Otmanine 1987, Bouzenoune 1993 et Vila et al, 2000).

A - Trias

Le Trias des Monts de Mellègue est considéré comme diapirique depuis les travaux de Flandrin en 1932. Il affleure à la faveur d'extrusions et occupe généralement la partie centrale des structures anticlinales (Perthuisot et Rouvier, 1992; Aoudjehane et al. 1990; 1992).

Les affleurements les plus importants sont ceux de l'Ouenza, de Boukhadra, de Mesloula, de Hameimat Nord et de Hameimet Sud.

Le Trias est constitué de marnes bariolées à gypse, de dolomies, de calcaires dolomitiques, de grès et des fragments de roches qui constituent les formations typiques du Trias en Algérie (Dubourdiou, 1956).

Un signe caractéristique du Trias est la présence de grains de pyrite et de petits cristaux de quartz bipyramidal.

B - Jurassique

Il est absent en affleurement et dans les sondages pétroliers des confins algéro-tunisiens (Dubourdiou, 1956; Chevenine et al., 1989).

C - Cretace

C. 1- Crétacé inférieur

Le Crétacé inférieur est représenté par les étages suivants:

Barrémien

Il affleure dans l'anticlinal de Sidi Embareka au Nord-Est de Djebel Ouenza (Dubourdiou, 1956). Il est constitué de marnes grises et jaunes non fossilifères, intercalés par des calcaires argileux, noduleux. Sa puissance est de 200m en moyenne (Dubourdiou ; 1956).

Aptien

Il affleure sur des vastes surfaces, et de ce fait il devient le plus remarquable dans la région. Les dépôts de l'Aptien sont distribués surtout dans les bandes soulignées par les diapirs, dans le noyau des anticlinaux, et dans d'autres horsts de la région. Ils sont étudiés en détail par rapport à leur rôle de milieu encaissant pour la mise en place de minéralisations polymétallique et ferrifère.

L'étude lithostratigraphique de l'Aptien effectuée dans le massif de l'Ouenza a montré la succession suivante:

- **L'Aptien marneux**

Il est remarquable par la dominance des marnes verdâtres qui se forment des pseudo-bancs. Elles représentent les termes les plus anciens de l'Aptien (Masse et Thieuloy,

1979) d'âge Aptien inférieur à moyen. Ces marnes alternent avec des calcaires gréseux ou des grès sur une vingtaine de mètres. Les grès sont à ciment sparitique et à oxydation partielle. L'ensemble est surmonté par des bancs de calcaires d'une épaisseur moyenne de 30m;

- **L'Aptien calcaire**

Il surmonte l'Aptien marneux, renfermant le plus souvent des Miliolites, des Rudistes, des Orbitholines et des Lamellibranches (Chikhi-Aouimeur, 1980). Ces niveaux sont caractérisés par l'abondance du quartz automorphe, avec une épaisseur qui varie entre 108m et 172m. Ces calcaires sont considérés comme un métallotectite lithologique puisqu'ils encaissent l'essentiel de la minéralisation ferrifère et/ou polymétallique (Dubourdieu, 1956; Bouzenoune, 1993);

- **Clansayésien**

Il affleure dans divers anticlinaux de la région étudiée, il s'agit des marnes grises, jaunes à Ammonites avec des calcaires gréseux (Dubourdieu, 1956). Sa puissance est de 100 à 200m.

La formation aptienne présente une épaisseur totale qui varie de 250 à 600m (Dubourdieu, 1956).

Albien

L'Albien est marqué par une faune riche en Ammonites. Durant l'Albien supérieur, la couverture albo-aptienne est percée par le Trias, entraînant le redressement des couches et la complexité des structures (plis évasés, plis en champignon, etc.), généralement scellées par le Vraconien: Ouenza, M'zouzia, Boukhadra (Nedjari-Belhocène et Nedjari, 1984 ; Othmanine, 1987 et Bouzenoune, 1993).

L'Albien se caractérise par des marnes argileuses dans la partie inférieure, des calcaires argileux dans la partie moyenne et des marnes noires dans la partie supérieure.

Dubourdieu, (1956) a étudié plusieurs massifs de la région de l'Ouenza. Il a démontré que les calcaires aptiens sont surmontés par des marnes datées de l'Albien inférieur par des Ammonites. Vila et al (1994) ont signalé la présence d'une barre carbonatée albienne qui s'individualise à l'Ouenza, de part et d'autre de la côte 1288m. Ces calcaires deviennent plus marneux vers la terminaison périclinale et présentent la même association microfaunique qu'à la base de l'Albien de Djebel Boujaber. La puissance des dépôts albiens est d'environ 400 – 500 m.

Vraconien

Il est généralement transgressif sur le Trias à l'Ouenza (Thibieroz et Madre, 1976) et sur l'Aptien au Djebel Slata (Smati, 1986) et au Djebel Hmeimet (Othmamine, 1987). Il est composé totalement de marno- calcaires gris, bleus, séparant des petits bancs de calcaires et vers le bas des marno- calcaires très gréseux de 500m d'épaisseur.

C. 2 - Crétacé supérieur

Il comprend les étages suivants : Cénomaniens, Turonien et Sénonien.

Cénomaniens

Il est constitué de marnes argileuses verdâtres, caractérisées par des intercalations de la calcite fibreuse.

Dubourdiou. (1959) a distingué la présence de deux assises : L'assise inférieure qui est formée par des marnes jaunes avec des marno-calcaires blancs feuilletées, et l'assise supérieure constituée des calcaires argileux, gris blancs avec quelques niveaux de calcaires gris noirs. La puissance du Cénomaniens est de 600 à 900 m.

Turonien

Les formations du Turonien n'affleurent qu'à Koura Ouenza aux environs de l'Ouenza. Elles constituent les flancs des grands anticlinaux et synclinaux. Elles sont présentées par des calcaires marneux en plaquettes gris- foncé à noir , et à la base, avec de la matière organique et de rares concentrations pyritiques et marcacitiques.

Ces calcaires caractérisent stratigraphiquement le Cénomaniens supérieur et le Turonien inférieur. Le Turonien supérieur est caractérisé par le développement des faciès marno-calcaires. La puissance totale du Turonien est de 150 à 250 m.

Sénonien

Le Sénonien est représenté dans les régions de Souk Ahras et de Morsott, par un Sénonien inférieur (Coniacien-Santonien), représenté par des calcaires marneux et des marnes avec une puissance ne dépassant pas les 300m, (Dubourdiou, 1959); et un Sénonien supérieur (Campanien-Maastrichien), qui affleure au Sud de Tébessa et représenté par la succession des calcaires marneux du Campanien, des marnes gypsifères et enfin des calcaires massifs à rognons de silex riches en Inocérames avec une épaisseur comprise entre 200 à 500m..

D - Tertiaire

Les dépôts tertiaires sont présentés par: l'Eocène, le Miocène inférieur et moyen et le Mio-pliocène (David, 1956).

L'Eocène

L'Eocène inférieur et moyen sont représentés par des calcaires à silex et des calcaires à Nummulites, près des périmètres des Monts de Mellègue, avec une puissance de 200 m.

Miocène inférieur et moyen

Le Miocène inférieur et moyen présentent des dépôts qui reposent transgressivement sur les formations d'âge albien-sénonien et même sur le Trias. Il s'agit d'une puissante accumulation de marnes et de grès. Son épaisseur peut atteindre dans le bassin de Ouled Soukiès (Nord-Ouest de l'Ouenza) 1000 m (Dubourdiou, 1956; Kowalski et Hamimed, 2000). A leur base, les formations miocènes comportent des conglomérats contenant des éléments de calcaires variés, de silex gris, des galets ferrugineux et des éléments empruntés au Trias, témoignant d'une activité diapirique (Bouzenoune, 1993), avec une épaisseur moyenne de 150m (Dubourdiou, 1956).

Mio-pliocène

Il est distribué surtout dans la moitié Nord de la région d'étude. Il est présenté par des conglomérats bariolés, grès et sables, argiles et calcaires lacustres. Sa puissance est de 150m.

E - Quaternaire

Il est caractérisé par des dépôts qui se répartissent dans les parties basses des reliefs et couvrent des surfaces importantes. Il renferme des croûtes de calcaires, limons, éboulis, cailloutis et poudingues avec une épaisseur de 10 à 30 m dans les fossés (Dubourdiou; 1956).

I. 1. 3. - CADRE STRUCTURAL

Deux directions structurales majeures caractérisent la région des confins Algéro-tunisiens (Fig. 5). La première NE-SW est marquée par les extrusions triasiques et la deuxième NW-SE à WNW-ESE, marquée par les fossés d'effondrements, d'où l'existence d'une continuité des grands ensembles structuraux de part et d'autre de la frontière, où leurs minéralisations arrivent obliquement sur la frontière (Rouvier *et al.*, 1990).

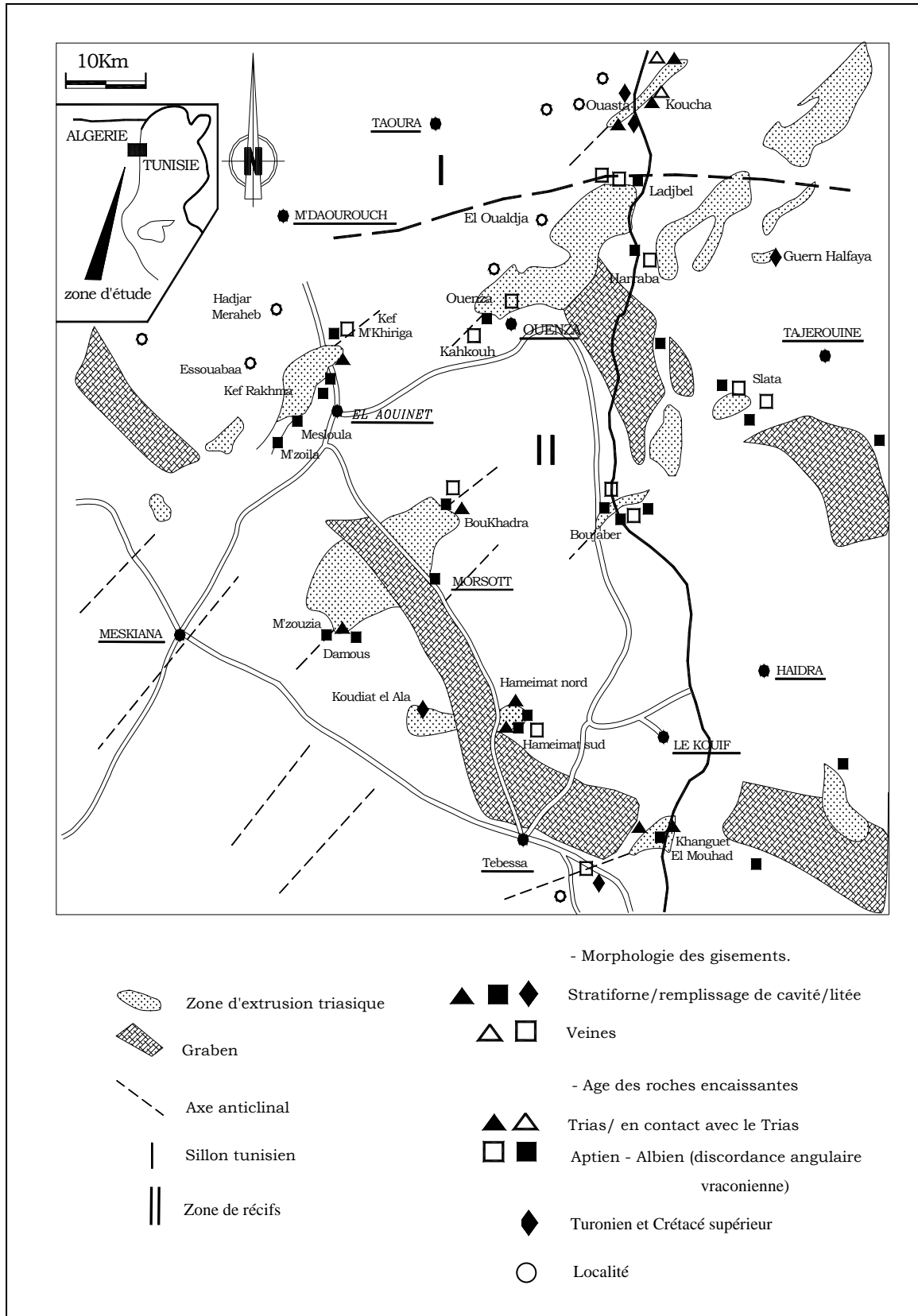


Fig. 5 - Position des extrusions triasiques par rapport aux fossés d'effondrements et la répartition spatiale des principaux gisements (Aoudjehane, 1991).

Les principaux traits structuraux de la région sont représentés par la subsidence, le diapirisme, les plissements, les failles et les fossés d'effondrements.

I. 1. 3. 1. - La subsidence

Au cours de Crétacé la tendance générale qui caractérise le bassin de l'Atlas Saharien est une subsidence considérable, rapide et continue (près de 5000m de sédiments post-aptiens) entraînant des poussées horizontales de direction NE- SW. Cette subsidence est suivie d'un bombement sous marin formant des hauts- fonds de direction NE- SW qui sont induits par l'activité diapirique à partir des fractures profondes du socle Masse et al, (1982) et Bouzenoune, (1993).

I. 1. 3. 2. - Le diapirisme

Les diapirs représentent l'une des principales caractéristiques de l'Atlas saharien oriental. A l'affleurement ils sont allongés sur une bande de 80 km environ, de direction NE-SW. Le diapirisme est contrôlé par le fluage et l'ascension (Perthuisot, 1988).

➤ LE FLUAGE

L'écoulement fluide des évaporites est d'autant plus important que la température soit élevée, il est pratiquement réalisé aux alentours de 300° C pour le sel gemme et à des températures plus basses pour les sels potassiques ou les sulfates hydratés.

➤ L'ASCENSION

Elle est assurée par la densité, il s'agit d'une migration verticale du matériel plastique jusqu'à une altitude qui dépend du rapport des densités. Cette migration ne peut se faire sauf si la densité du matériel plastique est inférieure à la densité globale de la couverture, on appelle ce phénomène « Halocinèse ».

En Algérie, la série triasique n'est connue que partiellement en surface. Des roches du Trias affleurent à la faveur d'extrusions soit , sous forme de masses chaotiques où dominant le gypse, les argiles et les dolomies, soit organisées en unités stratifiées localisées plutôt sur les plans des structures.

Les chlorures, signalés dans le salifère principal du Nord-Est saharien (Busson et Cornet, 1989), sont présents dans la région du Mellègue dans la partie enracinée du diapir de l'Ouenza. Les pointements triasiques, très nombreux dans la région, sont localisés dans la partie Nord-Est de l'Ouenza, (Dubourdieu, 1964 et Madre, 1969) et Sud-Ouest de Boukhadra et au coeur de Djebel Mesloul.

En 1994, Vila a subdivisé le Trias des confins algéro-tunisiens en trois domaines (Fig. 6), qui sont :

- ✓ Un domaine du Trias allochtone sous forme de grandes accumulations tectoniques au front de nappes qui se localise dans la région de Sedrata et Souk Ahras;
- ✓ Un domaine à " glaciers de sel " sous-marins de matériel triasique resédimenté, il est observé à Djebel Ladjebel, Ouenza, Ouesta, M'khirga, Mesloula, Boukhadra, M'zouzia, Boujaber et en Tunisie Nord occidentale;
- ✓ Un domaine à "vrais diapirs" situé au Sud de Tébessa.

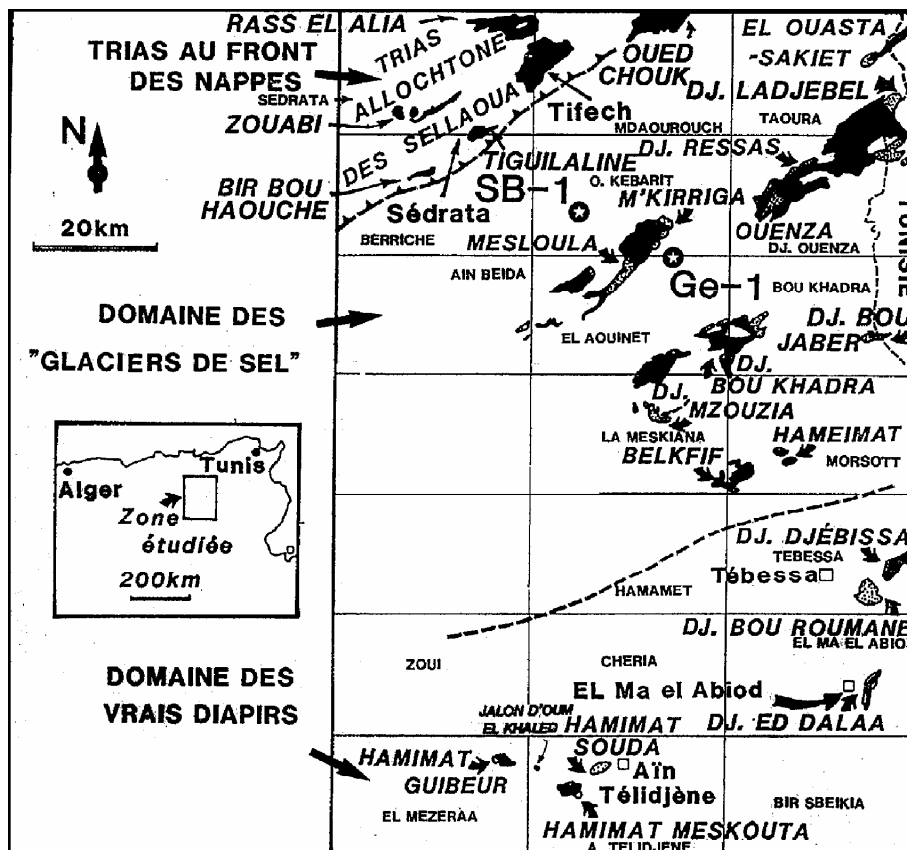


Fig. 6- Délimitations des trois domaines triasique dans les confins algéro-tunisiens (Vila et al., 1993-2000).

Cependant cette hypothèse reste discutable et n'est pas partagée par tous.

I. 1. 3. 3. - Les plissements

L'ensemble des formations sédimentaires a été plissé suivant une direction NE-SW. Ces plis anticlinaux souvent percés dans leurs charnières par le Trias-diapirique. Ils sont généralement relayés par des vastes structures synclinales. D'après (Dubourdiou, 1956), la série du Mellègue a été plissée au cours du Paléogène (Eocène supérieur-Oligocène).

I. 1. 3. 4. - La tectonique cassante

En dehors des accidents de faible ampleur et de directions diverses, les structures anticlinales sont recoupées par deux systèmes de failles:

- Le premier système est constitué par des failles principales ou bien ce qu'on appelle les failles majeures orientées, en principe, subparallèlement aux axes des anticlinaux sous l'effet du plissement. Les couches tendres se plissent et les couches dures se cassent au niveau des pendages des roches qui sont subverticaux à inverses. Ce système est orienté suivant deux directions tectoniques majeures : Nord-Est (30°-60°) et Nord-Ouest (280°-320°).

- Les failles du deuxième ordre, sont caractérisées par des rejets importants et des pendages de l'ordre de 60° de direction Est-Ouest. Elles sont presque perpendiculaires aux failles principales, et parfois, elles les regroupent, ce qui favorise des concentrations métallifères.

I. 1. 3. 5. - Fossés d'effondrements

Les confins algéro-tunisiens, sont représentés par des fossés d'effondrements de direction NW-SE et E-W, qui sont bordés par des accidents majeurs, et qui sont formés par des dépôts plio-quadernaires avec une puissance de 170m dans le fossé de Tebessa-Morsott (Dubourdieu et al., 1950) et environ 300 m dans celui de Kasserine (Zouari, 1984).

Durozoy, (1950) ; Castany, (1951 et 1954) ; Dubourdieu, (1956); David, (1956); Kazi Tani (1986); Othmanine (1987), ont considéré ces fossés d'effondrements comme étant le résultat d'une intense activité tectonique distensive post-miocène inférieur. Alors que les premières manifestations sont enregistrées au Crétacé et l'effondrement majeur a eu lieu au Pliocène, selon Bismuth, (1973); Chihi, (1984); Chihi et al., (1984 et 1991); Ben Ayad et al., (1991).

I. 1. 4. - EVOLUTION PALEOGEORAPHIQUE

L'histoire paléogéographique des monts de Mellègue a commencé au Trias par une série puissante de dépôts salifères et argilo-gypsifères dans les bassins lacustres et lagunaires (Chavenine et al., 1989). Une légère transgression est enregistrée au Trias moyen (Muschelalk), dont les traces sont conservées en intercalation de calcaires noirs stratifiés (Dubourdieu, 1956).

Les dépôts du Jurassique sont absents dans la région en question (Dubourdieu, 1956) mais ils ont été recoupés par des sondages pétroliers en dehors des zones diapiriques (Beghoul, 1974).

Les grès du Barrémien représentent les plus anciennes roches d'âge Crétacé affleurant dans la région. Ils sont observés au Sud-Ouest de Djebel Mesloul. Cela témoigne des conditions de sédimentation en mer peu profonde.

A l'Aptien, la mer était plus étendue qu'au Barrémien. Le fait marquant est le développement des faciès urgoniens sur des hauts fonds correspondant aux extrusions diapiriques. Autour de ces hauts fonds s'est développée une puissante série marneuse de mer ouverte (Fig. 7).

A l'Albien, la sédimentation est transgressive (Ammouri, 1986 ; Chavenine, 1989).

Au Cénomaniens, dans des conditions abyssales, une intense sédimentation marno-argileuse à intercalation de calcaires peu développés a eu lieu. Dans la région du Mellègue cette période est caractérisée par des décrochements traduisant un raccourcissement NE- SW (Othmanine, 1987).

Au cours du Turonien inférieur, les conditions profondes changent vers un milieu néritique chaud, où s'installent d'importantes masses carbonatées. A partir du Turonien supérieur, une assise marneuse a été accumulée dans une mer relativement profonde, parfois rompue par des intercalations calcaires. Ce même régime continue jusqu'au Campanien inférieur (Chavenine et al., 1987).

Le Campanien et le Maestrichien sont marqués par des conditions de mer peu profonde et une prédominance des calcaires crayaux rarement récifaux. La sédimentation Crétacée marine s'arrête à la fin du Maestrichien inférieur.

Le remaniement de silex réputé d'âge Yprésien à la base du Miocène, où se dépose une sédimentation marine durant l'Eocène et le Miocène inférieur et moyen.

A partir du Miocène supérieur, une phase de régression commence. Toutes les formations post-miocènes sont continentales et continuent jusqu'au Quaternaire donnant naissance aux plaines et vallées actuelles.

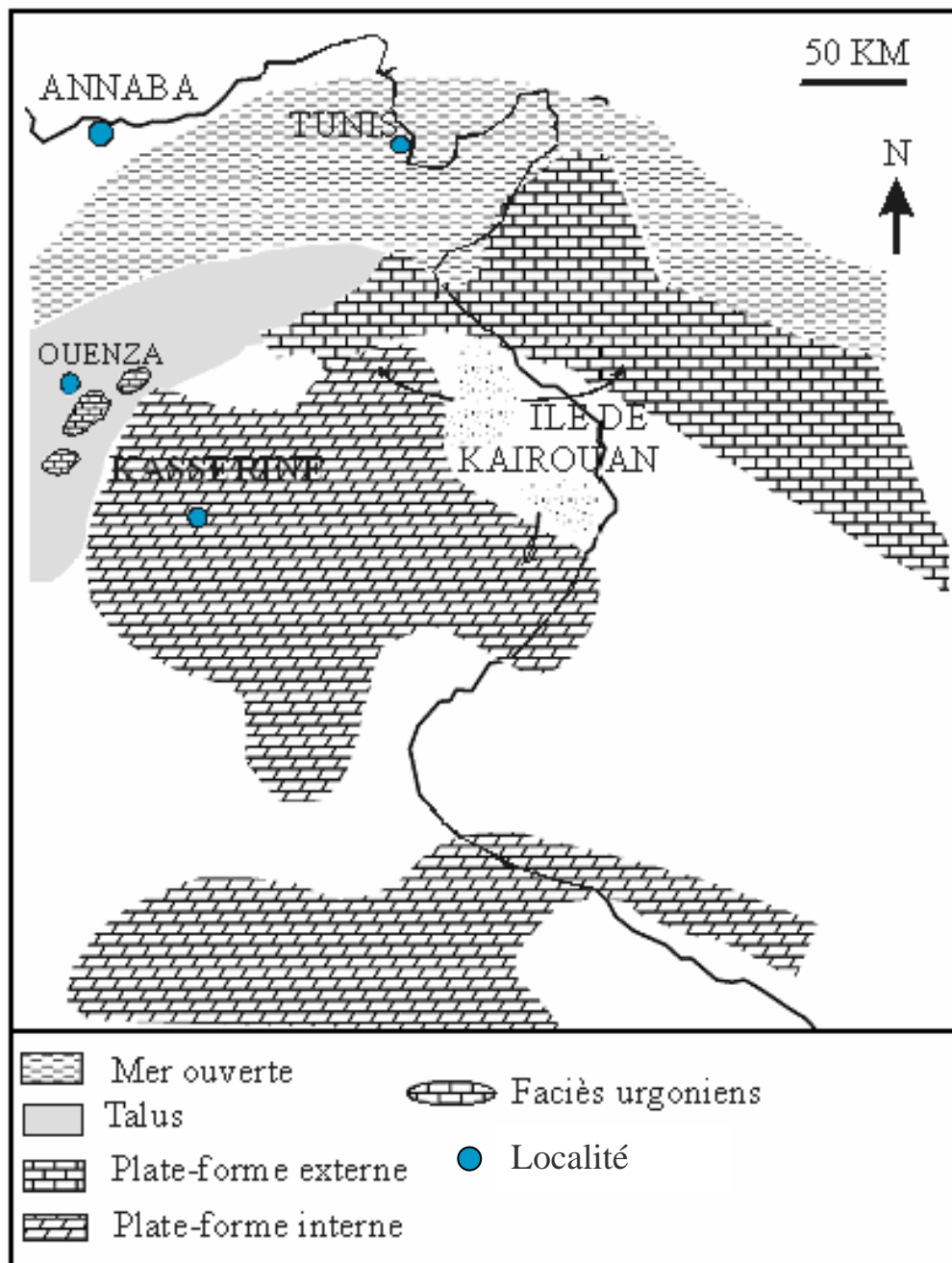


Fig. 7 - Carte paléogéographique de la Tunisie et des confins algéro-tunisiens durant l'Aptien (in Memmi, 1999).

CHAPITRE I : METHODOLOGIE ET TRAITEMENT DES DONNEES DE PROSPECTION

I. 1. - METHODOLOGIE DE PROSPECTION

Le gisement de Douamis a fait l'objet de nombreuses campagnes de prospection et d'exploration par sondages et par galeries. Ces travaux ont été précédés par des itinéraires de recherche et des travaux topographiques.

I. 1. 1. - TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES

La réalisation du fond topographique ainsi que les plans de la mine aux échelles 1/10000 et 1/5000 ont été réalisés sur la base des points trigonométriques de la mine (Fig. 26). La méthode de polygométrie a permis la mise en place d'un réseau de points d'observation locaux. Les têtes des forages ont été rattachées et la même procédure a été suivie pour les pistes et les itinéraires de prospection.

I. 1. 2. - TRAVAUX MINIERS, FORAGE ET ECHANTILLONNAGE DE CAROTTES

Au niveau du secteur de Douamis, des sondages mécaniques verticaux, horizontaux et même inclinés ont été réalisés. La maille principale d'exploration par forage est de l'ordre de 50mx50m. Cependant la zone centrale a été prospectée à l'aide d'un nombre plus important de sondages avec une maille plus serrée de 25mx25m en moyenne. Au total 332 sondages ont été réalisés et seulement 259 (Fig. 27) ont recoupé la minéralisation à Fe-Cu. Des galeries ont été creusées parallèlement à l'axe du corps minéralisé à divers niveaux : 550, 598, 634 et 670. Des recoupes ont été creusées dans l'ensemble du gisement à des distances de 50m, à l'exception d'une vingtaine qui sont creusées à des distances de 12m dans la partie centrale. Au total 1363 échantillons de carottes de 5 m de longueur en moyenne ont été prélevés. Les échantillons du carottes ont été analysés sur : FeT (fer total), Cu, SiO₂, CaO et S.

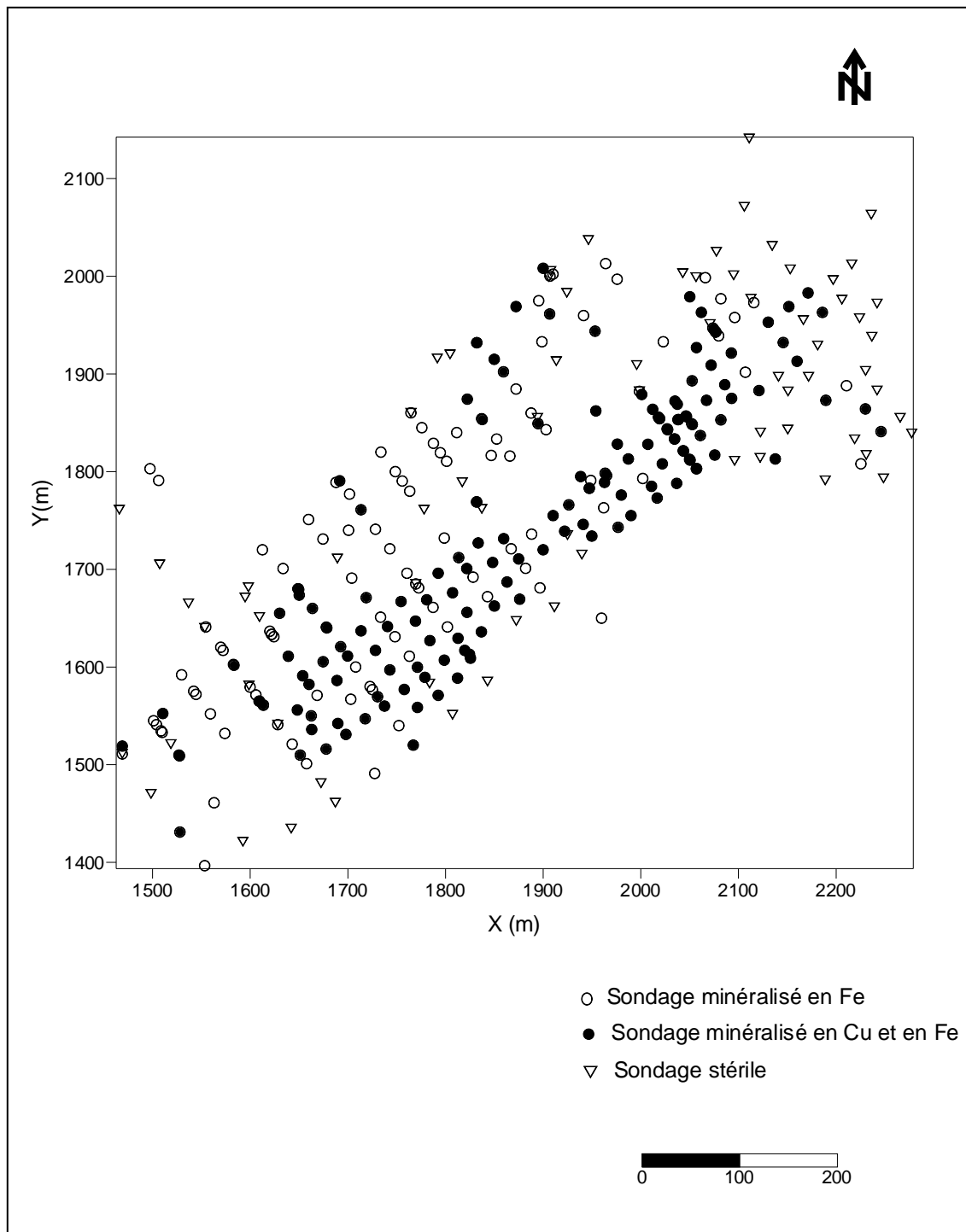


Fig. 27 - Plan de situation de tous les forages réalisés au niveau du gisement de Douamis

I. 2.- STATISTIQUE DES DONNEES DE PROSPECTION DU GISEMENT DE DOUAMIS

Les données géologiques et géochimiques et les résultats d'analyses chimiques disponibles ont été saisis dans des fichiers informatiques. Ces données ont subi un

traitement statistique monovarié, bivarié et multivarié à l'aide de l'outil informatique et les logiciels : Géoeas et Statistica.

L'ensemble des données chimiques collectées est représenté par les éléments FeT, Cu, SiO₂, CaO et S.

I. 2. 1. -TRAITEMENT MONOVARIABLE

Les principaux paramètres statistiques ont été calculés (Tableau 1). Les histogrammes et les graphes de probabilité ont été tracés (Fig. 28, 29, 30, 31 et 32).

Tableau. 1- Paramètres statistiques des éléments chimiques des données de sondages du gisement de Douamis

Eléments	FeT	Cu	SiO ₂	S	CaO
Nombre des échantillons	1363	481	1094	84	41
Teneur moyenne (%)	50.98	0.224	3.07	0.11	2.76
Médiane (%)	53.66	0.05	1.84	0.01	2.20
Teneur maximale (%)	62.54	6.00	26.80	2.18	11.68
Teneur minimale (%)	7.44	0.01	0.10	0.003	0.01
Ecart – type (%)	8.72	0.602	3.45	0.34	2.76
Variance (%)²	76.06	0.285	11.50	0.11	7.19
Coefficient de variation	17.10	237.81	110.30	299.69	97.15

Il est à noter que les coefficients de variation les plus élevés sont ceux de Cu, SiO₂ et S ce qui laisse suspecter un mélange de données de différents faciès (hétérogénéité des données).

❖ Interprétation des résultats

Les histogrammes et les graphes de probabilités montrent que l'ensemble des éléments chimiques suit, en général, la loi de distribution log normale. Cependant ces graphes montrent aussi une hétérogénéité des données. En appliquant le principe suivant lequel il y'a autant de population composante que de modes (Mezghache; 1989).

Fe - Le graphe de probabilité montre un point d'inflexion correspondant à la teneur de 35%. L'ordonnée de cette dernière est égale à 8%. La première population composante est donc représentée seulement par 8% des échantillons, dont la teneur en fer varie de 7.44%

à 35% de l'ensemble et 92% des échantillons analysés représentent la deuxième population composante dont la teneur varie de 35% à 62.54 %.

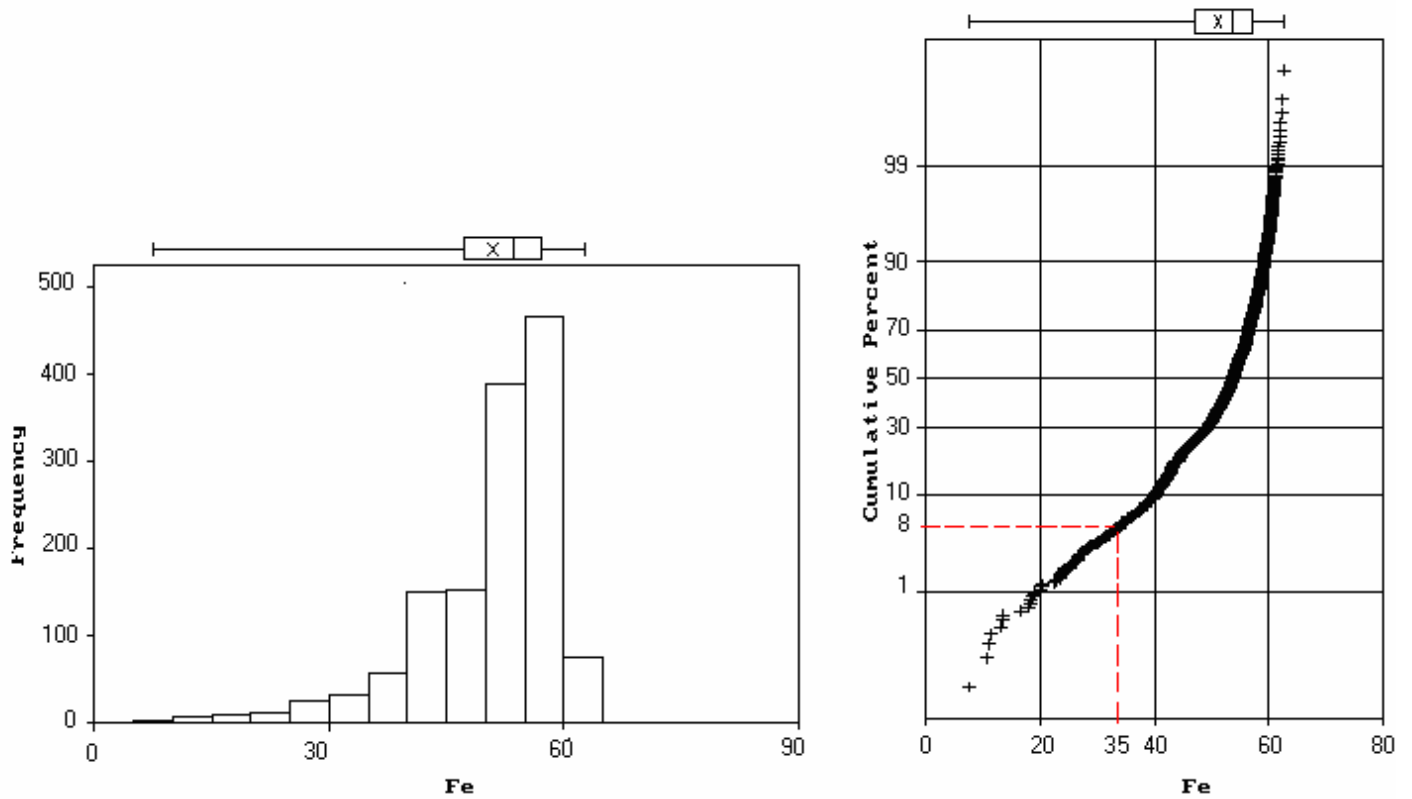


Fig. 28- Histogramme et Graphe de probabilité de Fe (%)

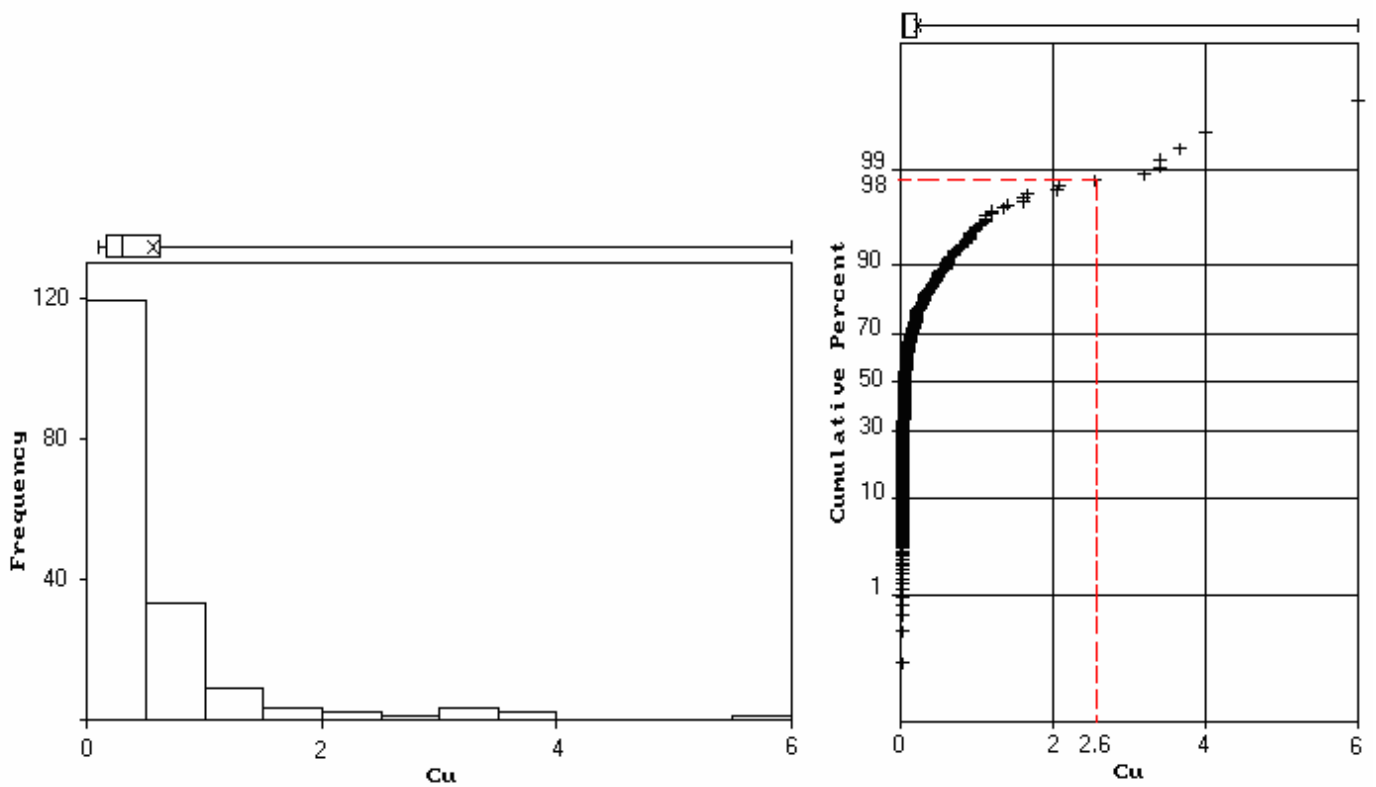


Fig. 29- Histogramme et Graphe de probabilité de Cu (%)

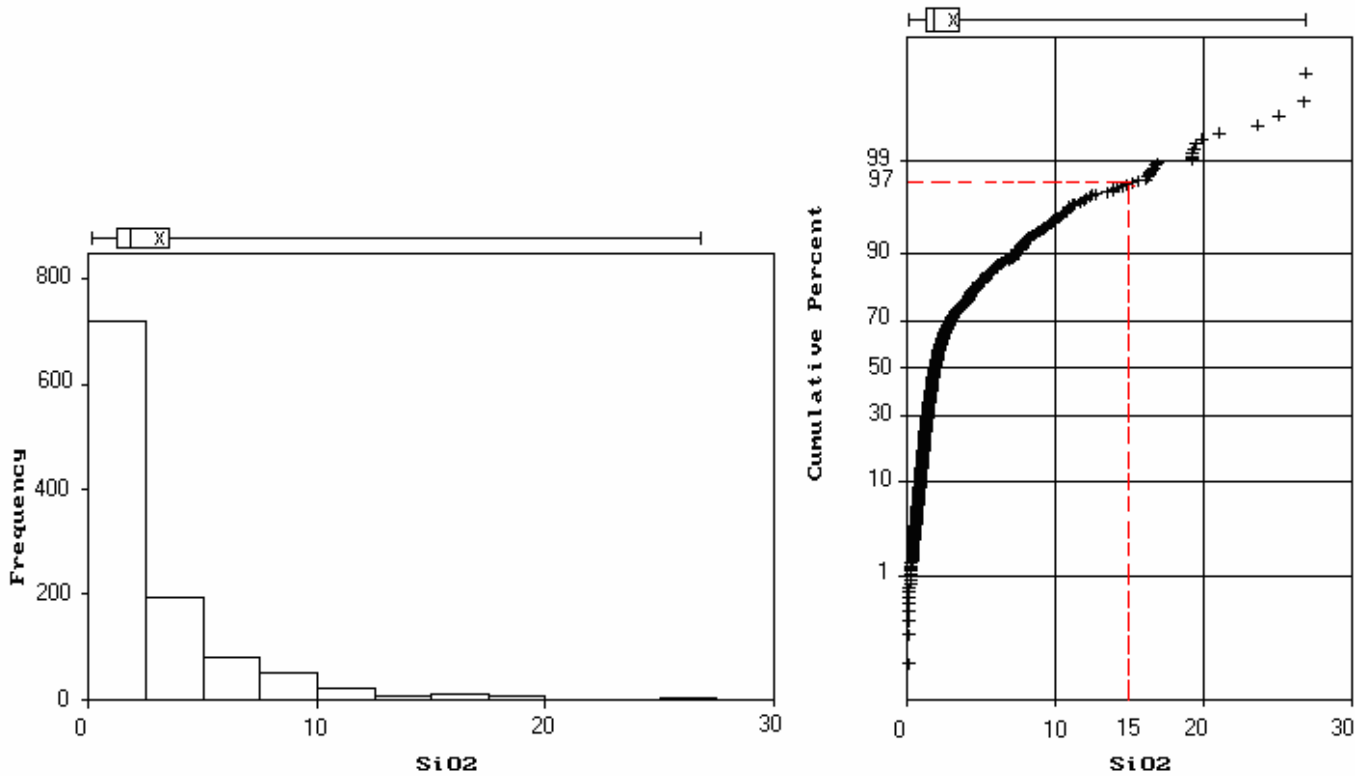


Fig. 30- Histogramme et Graphe de probabilité de SiO₂ (%)

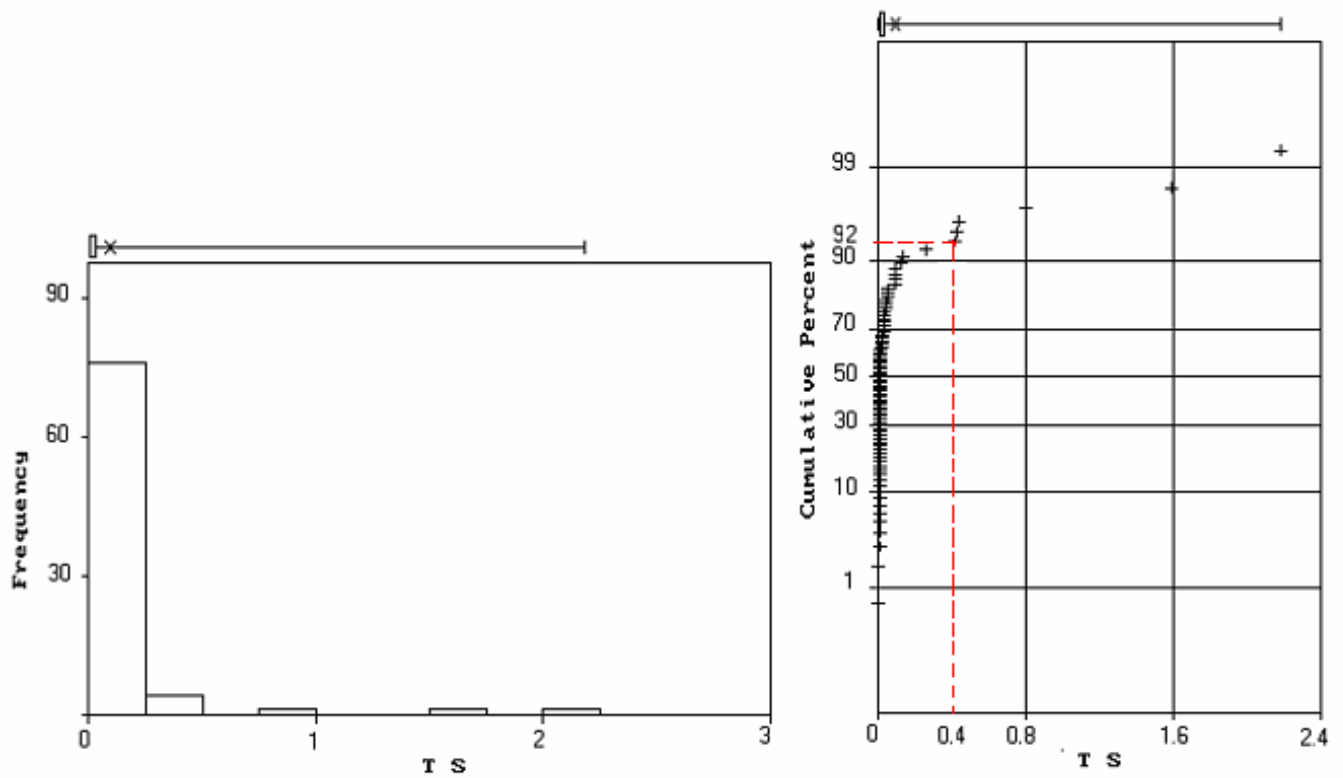


Fig. 31- Histogramme et Graphe de probabilité de S (%)

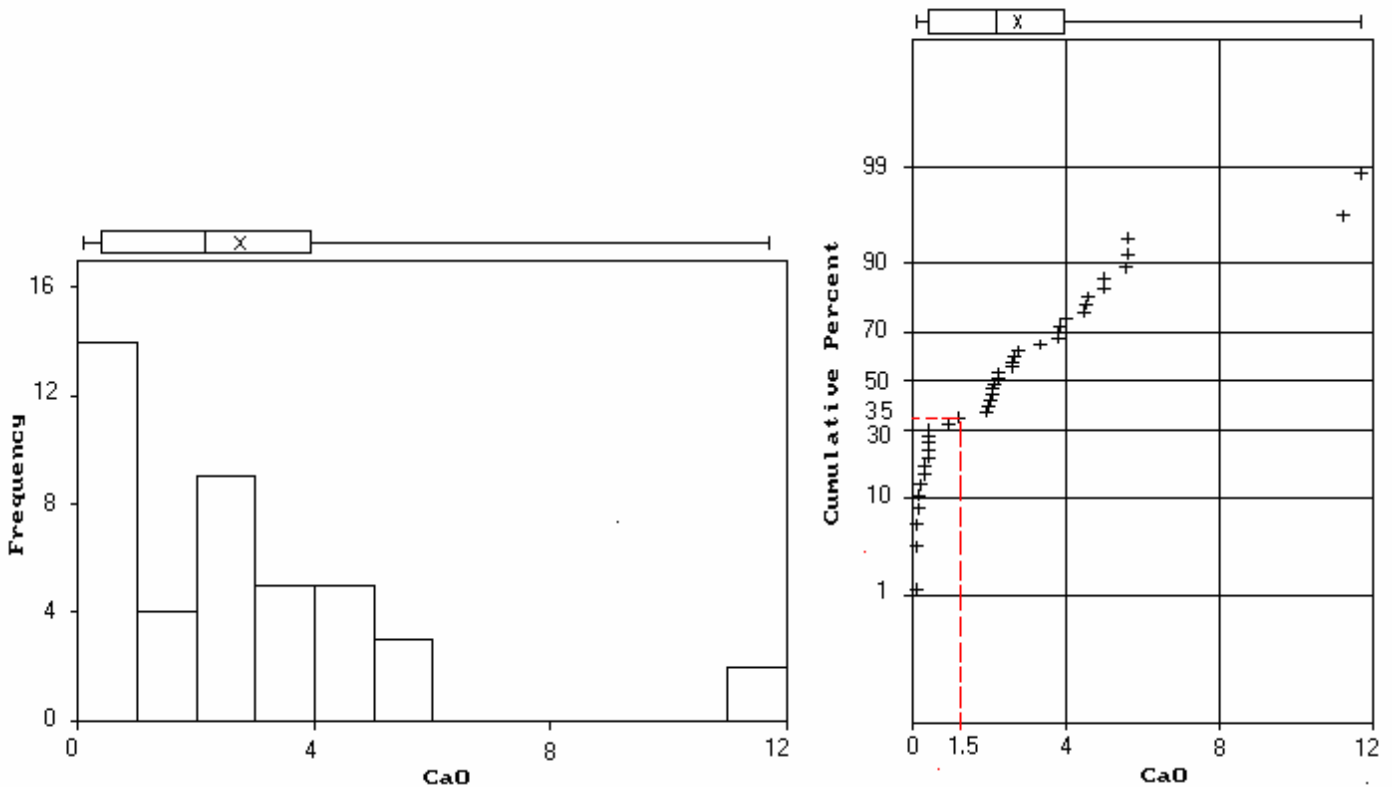


Fig. 32- Histogramme et Graphe de probabilité de CaO (%)

Cu - Le graphe de probabilité montre la présence d'un point d'inflexion à la teneur 2.6% et une fréquence cumulée de 98%. Les échantillons de carottes proviendraient de deux faciès géologiques différents. Le premier aurait des teneurs en Cu qui varient de 0.01% à 2.6% au maximum. Ce faciès est représenté par 98% des échantillons de carottes. Le deuxième lui représenté par le 2% restants et dont les teneurs varient de 2,6% à 6%. Le taux d'échantillons provenant du 2^{ème} type est sûrement plus important sauf qu'il est souvent difficile de discriminer les différents types de minerais s'ils accusaient les mêmes teneurs.

SiO₂ - Le graphe de probabilité montre un point d'inflexion correspondant à une teneur de 15% et une fréquence cumulée de 97% : 3% des échantillons des carottes représente donc la deuxième sous population composante ont accusé une teneur supérieur à 15 %,

S - Pour le soufre, 92 % des échantillons montrent des teneurs inférieures à 0.4 %.

CaO - présente un point d'inflexion correspondant à une teneur de 1.5 % et une fréquence cumulée de 35% : 35 % des échantillons ont des teneurs inférieure à 1.5 % et la partie restante 65 %, présente des teneurs varient entre 1.5 et 12 %.

I. 2. 2. - TRAITEMENT BIVARIE

Les covariances ainsi que les coefficients de corrélations simples (Tableau. 2) ont été calculés à l'aide du logiciel STATISTICA.

Tableau. 2- Matrice de corrélations simples des éléments chimiques du gisement de Douamis.

	Fe	SiO ₂	S	CaO	Cu
Fe	1.00				
SiO ₂	-0.42*	1.00			
S	-0.39*	0.38*	1.00		
CaO	-0.42*	-0.14	Abs D.	1.00	
Cu	-0.33*	0.22*	0.43	- 0.05	1.00

* - Coefficient de corrélation significatif ;

Abs. D.- Insuffisance de données.

Il est à rappeler que la signification est calculée à l'aide du rapport : $2/\sqrt{n-1}$ où n est le nombre de données utilisées pour le calcul du coefficient de corrélation (Tableau. 3).

- Si $R \leq 2/\sqrt{n-1}$ ou $R \geq 2/\sqrt{n-1}$ alors il serait significatif à un niveau de confiance de 95%.

Les nombres de données utilisées pour le calcul des coefficients de corrélation sont reportés dans le tableau 3.

Tableau. 3- Nombre des échantillons des éléments chimiques

	Fe	SiO ₂	S	CaO
SiO ₂	1094			
S	84	84		
CaO	41	34	2	
Cu	481	406	19	21

❖ Interprétation des résultats

Les résultats de traitement bivarié montrent une corrélation négative significative entre Fe et tous les autres éléments chimiques et oxydes (SiO₂, S, CaO et Cu). Notant aussi que SiO₂ est corrélé positivement avec Cu et S. Cependant SiO₂ ne montre pas de corrélation significative avec CaO. CaO ne présente aucune corrélation apparente avec le Cu.

Le faible nombre des échantillons utilisés pour le calcul du coefficient de corrélation entre CaO et S n'a pas permis de calculer le coefficient de corrélation entre ces deux éléments. Les équations des droites de régression linéaire simple par la méthode des moindres carrés pour

les éléments corrélés significativement négativement avec FeT, ont été calculées (Tableau. 4) à l'aide de la formule suivante:

$$Y = b + a X_2$$

Le coefficient "a" est calculé comme suit : $a = \text{cov}(xy) \sigma_x^{-2}$

et le terme constant "b" est égale $b = \text{moy.}Y - a \text{ moy.} X$

Tableau. 4 - Equation des droites de régression linéaire – méthode des moindres carrés

Eléments	Coeff « a »	Coeff « b »	Equation
Cu / Fe	- 0.221	1.38	Cu = 1.38 – 0.0221x Fe
SiO₂ / Fe	- 0.191	13.05	SiO ₂ = 13.05 – 0.191 Fe
S/Fe	- 0.0125	0.696	S = 0.696– 0.0125Fe
Fe / CaO	- 0.196	12.6	CaO = 12.6 – 0.196 Fe.
SiO₂ / CaO	- 0.203	3.7	CaO = 3.7 – 0.203 SiO ₂

Le tableau 1 montre que sur les 1363 carottes analysées sur Fe, seules 481 carottes ont accusé des teneurs assez élevées. Ce ci confirme qu'il y a deux types de minéralisation au niveau de Douamis, l'une primaire généralement hématitique et l'autre secondaire à Fe – Cu, c'est cette dernière qui a permis d'obtenir un coefficient de corrélation significatif.

I. 2. 3 - TRAITEMENT MULTIVARIE

L'analyse en composantes principales normée a été utilisée pour la détermination des différentes associations entre les différents éléments chimiques.

❖ Analyse en Composantes Principales (ACP) Normée

L'ACP est une méthode très efficace pour l'analyse de données quantitatives se présentant sous la forme de tableaux à M observations / N variables. Elle permet de :

- visualiser et analyser rapidement les corrélations entre les k variables ;
- visualiser et analyser les M observations initialement décrites par N variables sur un graphique à deux ou trois dimensions, construit de manière à ce que la dispersion entre les données soit aussi bien préservée que possible ;
- construire un ensemble de P facteurs non corrélés ($P \leq N$) qui peuvent ensuite être réutilisés par d'autres méthodes (la régression par exemple).

A partir des matrices de corrélation de l'ensemble des éléments analysés, on a calculé les facteurs de charge (Tableau. 5) en diagonalisant celle-ci; puis les cercles de corrélation ont été tracés (Fig. 33).

Tableau. 5 - Résultats de l'ACP normée sur l'ensemble des données chimiques de carottes des sondages du gisement de Douamis – Variances et facteurs des variables (de charge)

Variables	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
Valeur propre	2.52	2.19	1.71
Variance relative %	41.95	36.51	11.78
Variance cumulée %	41.95	78.46	90.24
Toit	-0.52	0.83	0.16
Mur	-0.51	0.83	0.18
Fe	0.66	0.59	-0.18
Si	-0.70	-0.15	-0.66
S	-0.87	0.00	-0.06
Cu	-0.55	-0.66	0.41

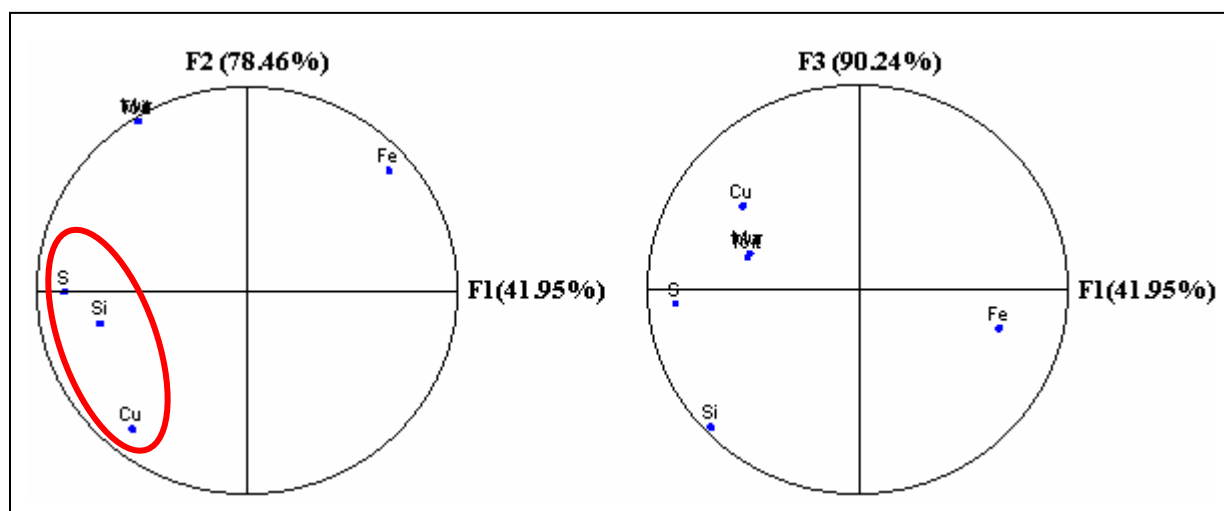


Fig. 33- Cercles de corrélations de l'ensemble des éléments chimiques.

Les cercles de corrélations montrent que les éléments chimiques et oxydes (Cu, SiO₂ et S) forment une association chimique : Ils sont tous corrélés négativement au facteur F1. Cette association s'oppose à l'élément fer qui est lui est corrélé positivement à F1.

II. 1. - GEOLOGIE DU SECTEUR DE DOUAMIS

II. 1. 1. - INTRODUCTION

Le massif de l'Ouenza auquel appartient le secteur de Douamis, correspond à un anticlinal allongé, de direction NE-SW (Fig. 8), au cœur duquel affleure un Trias à piston halitique (Fig. 9) (Bouzenoune, 1993; Bouzenoune et al.1995). La mise en place halocinétiq, au moins dès l'Aptien de ces formations évaporitiques a eu lieu dans le contexte distensif du Crétacé (Thibiéroz et Madre, 1976). La remontée du Trias est réactivée par les compressions paléogène et néogène.

L'anticlinal de l'Ouenza, présente dans sa partie SW une fermeture périclinale (cf. Fig. 8). Ce périclinal est recoupé par de nombreuses failles décrites par Dubourdiou (1956). Les plus importantes sont celles orientés N-S à NE-SW (faille du Pic, faille de Kef el Ahmar).

Le massif de l'Ouenza s'étend sur une longueur de 12 Km avec une largeur de 5Km. Il est partagé en zones dites "quartiers". On distingue, du Nord- Est au Sud-Ouest, les quartiers Douamis, Hallatif, Conglomérats, 6 mai (Ex Sainte Barbe), Ilot, Chagoura Nord, Chagoura Sud, Pic, Koudiat Kahkouh, Koura Ouenza au Nord, et Koudiat Ez Zerga au Sud.

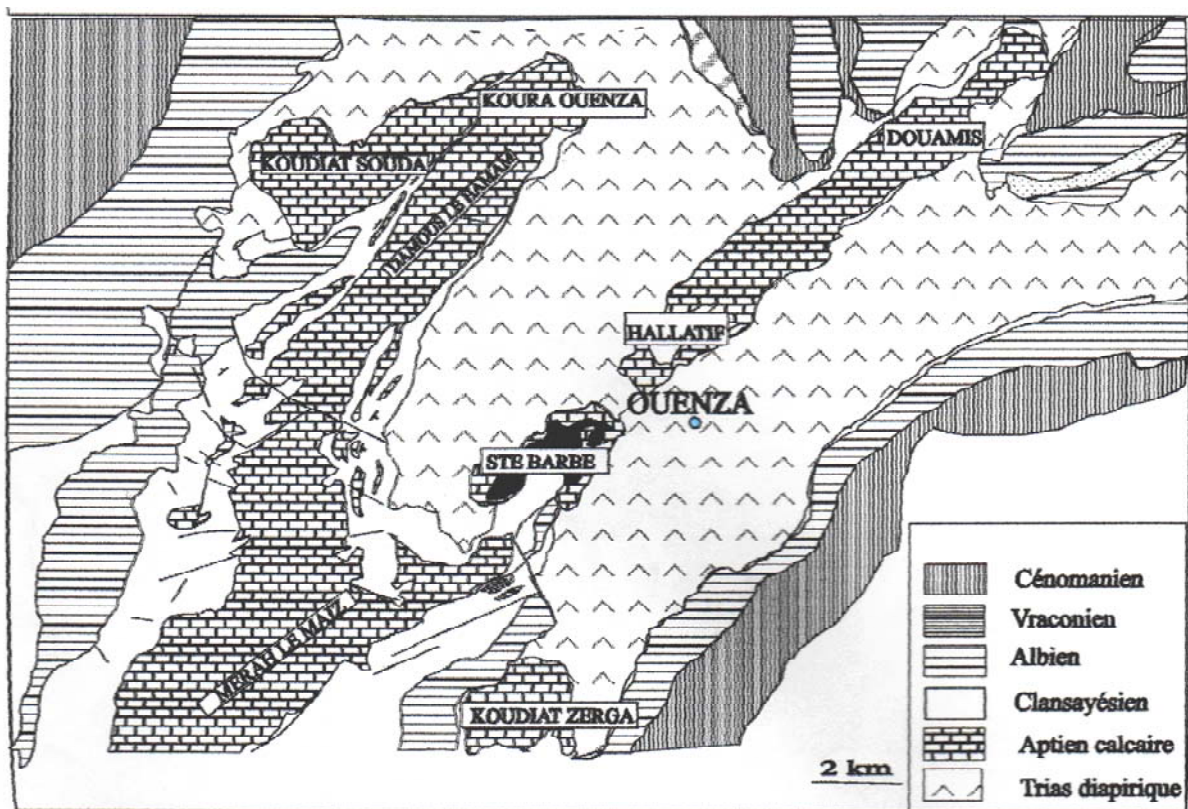


Fig. 8- Carte géologique du massif de l'Ouenza (Dubourdiou, 1956).

Le quartier ou le gisement de Douamis est situé dans la terminaison Nord-Est de l'anticlinal de Djebel Ouenza (cf. Fig. 8). Il présente une structure compliquée en antiforme et il s'étend sur plus de 800m du Sud-Ouest au Nord-Est avec une largeur de 450m environ. Le gisement de Douamis renferme une minéralisation en fer cuivreux. Il est exploité à ciel ouvert et en souterrain.

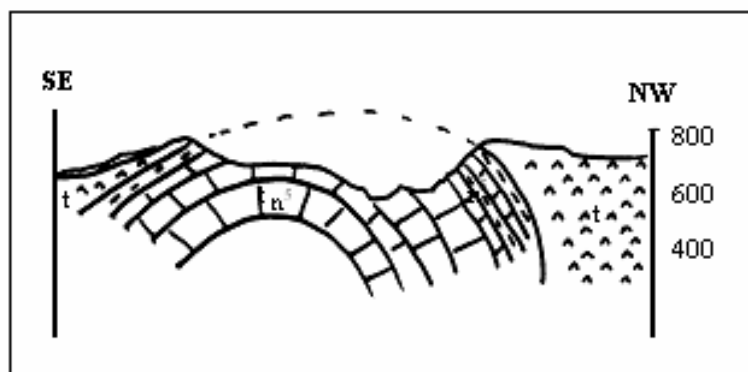


Fig. 9 - Coupe schématique montrant l'anatomie de l'Ouenza
(Bouzenoune, 1993, simplifiée)

II. 1. 2. - LITHOSTRATIGRAPHIE

D'une manière générale, la géologie du gisement ne diffère pas beaucoup de celle de la région dans laquelle il se situe.

L'analyse lithostratigraphique prise âge par âge et par ordre chronologique au niveau du gisement de Douamis, a permis de connaître les formations successives qui le composent et qui sont : le Trias, le Crétacé inférieur. Ce dernier est représenté uniquement par l'Aptien (Fig. 10).

A - Trias

Le Trias du gisement de Douamis est semblable dans toute la région. Ces anciennes formations sont représentées par des gypses et des marnes bariolées, des dolomies grises et des formations gypseuses salées.

B - Aptien

Il est toujours l'élément le plus remarquable dans la région. La série aptienne est constituée d'une alternance de marnes et de calcaires de différentes natures ;

- Calcaires à Huîtres ;
- Calcaires à Polypiers ;
- Calcaires micritiques à Rudistes et à Miliolés;
- Calcaires bioclastiques à débris roulés.

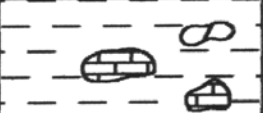
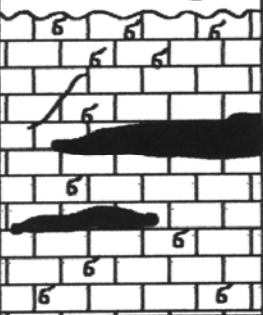
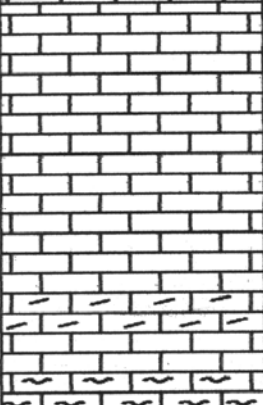
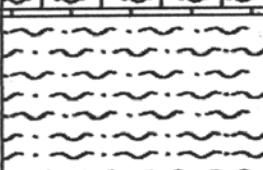
Stratigraphie	Profil Lithologique	Puissance (m)	Caractère lithologique	
Quaternaire		10-15	Eboulis de calcaires Remblais et sols altérés	
C R E T A C E	Aptien		60-80	Calcaire à Miliolés et Rudistes de couleur grise et gris-claire fissures à remplissage de calcite si le facies porteurs de la minéralisation ferrifères.
			80-100	Calcaires bioclastiques fortement fissurés à remplissage d'argiles par endroits et calcaires marneux à la base.
			20-30	Marnes grises

Fig. 10 - Profil lithostratigraphique du gisement de Douamis (in Zouaoui, 1999).

II. 1. 3. - TECTONIQUE

Le secteur de Douamis est très tectonisé. Il comporte plusieurs plis et il est affecté par de nombreuses cassures qui pourraient être dues aux contrecoups des failles principales ou du renversement de la série.

➤ DEFORMATION SOUPLE

La région de Douamis se présente sous forme d'un anticlinal dont l'axe est orienté Sud-Ouest, Nord-Est. La voûte de cet anticlinal présente des couches subhorizontales sur les flancs. Le pendage est faible avec toutefois une accentuation sur le flanc Sud-Est.

➤ DEFORMATION CASSANTE

Trois types de déformations cassantes ont été rencontrés dans le secteur de Douamis :

1- Faille longitudinale: Il existe un premier système de failles de direction Sud-Ouest-Nord-Est. Leurs rejets ne dépassent pas quelques mètres. A ce système appartient la faille dite du Pic et qui passe par le gisement de Douamis. Ce système est un facteur structural important, contrôlant la minéralisation et favorisant la remontée du matériel triasique.

2- Failles transverses: elles sont secondaires, orientées Nord-Sud. Elles sont dues aux contrecoups des failles principales. Elles se présentent sous forme de cassures minéralisées et elles comportent le phénomène de bourrage.

3 - Diaclases: Ces déformations affectent les calcaires à Rudistes et Miliolles avec trois types qui sont:

- des diaclases suivant la stratification ;
- des diaclases perpendiculaires à la stratification ;
- des diaclases obliques par rapport à la stratification, qui présentent le type le plus répandu dans la région étudiée.

II. 1. 4. - ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE

La série Aptienne dans cette région est subdivisée en deux grands ensembles sédimentaires :

- 1- un ensemble marno-gréseux à passées carbonatées;
- 2- un ensemble carbonaté à faciès très diversifié.

Le secteur de Douamis est représenté par l'ensemble carbonaté qui comprend une alternance de marne, de grès et de calcaires récifaux, d'où la définition de plusieurs sous unités :

- ✓ marno-gréseux à intercalation de calcaires récifaux bioclastiques et micritiques;
- ✓ marno-gréseux à intercalation de calcaires graveleux et bioclastiques.

❖ DESCRIPTION DES FACIES

L'ensemble sédimentaire de secteur de Douamis comporte plusieurs groupes de faciès ;

➤ Calcaires à Orbitholines et Foraminifères planctoniques

Ce type de faciès est attribué à la plate forme externe. Les calcaires sont bioclastiques présentant une texture biosparite de type Grainstone à Packstone (Fig. 11).

Les marnes sont pauvres en organismes, elles renferment souvent des intercalations de calcaires gréseux ;

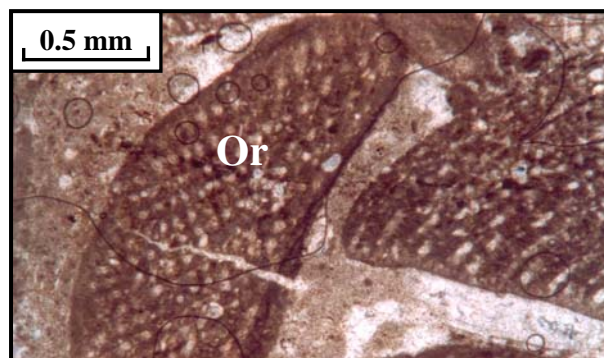


Fig. 11- Microphotographie de calcaires à Orbitholines
(Or) en lame mince (LN)

➤ **Calcaires construits à Polypiers et calcaires oolithiques**

C'est un faciès de type barrière vu la présence des Polypiers (Fig. 12). Le plus souvent des lentilles bioclastiques sont insérées dans les calcaires laminaires ;

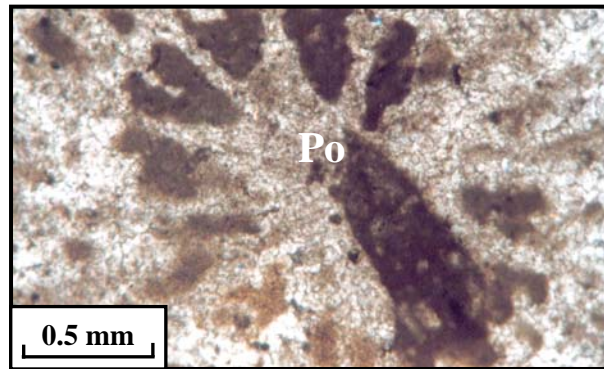


Fig. 12- Microphotographie de calcaires à Polypiers
(Po) en lame mince (LN).

➤ **Calcaires à Rudistes**

Ce faciès est attribué à un environnement de barrière protégée. Il est formé essentiellement des Rudistes entiers ou en débris (Fig. 13) associés à des Foraminifères benthiques et des Ostracodes. Elles sont d'ordre métrique et de texture biomérite. Ce faciès se présente en bancs stratifiés ;

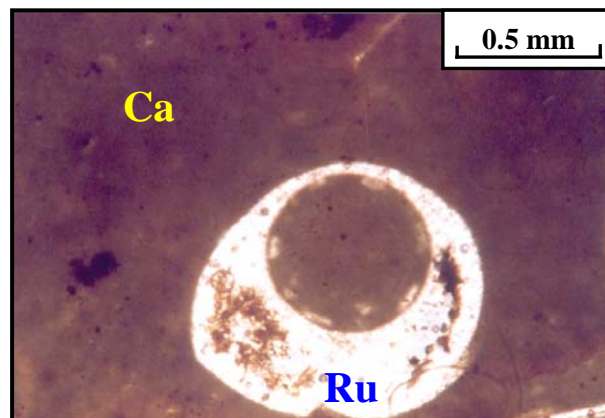


Fig. 13- Microphotographie de calcaires (Ca)
à Rudistes (Ru) en lame mince (LN).

➤ **Calcaires à Miliolles**

Ce faciès est attribué à un environnement de Lagon. Il est très riche en Foraminifères benthiques (Miliolles, Pseudocyclommina, Ovalvoelina et de rare Orbitholines). Ce faciès est très fin, de couleur beige (Fig. 14).

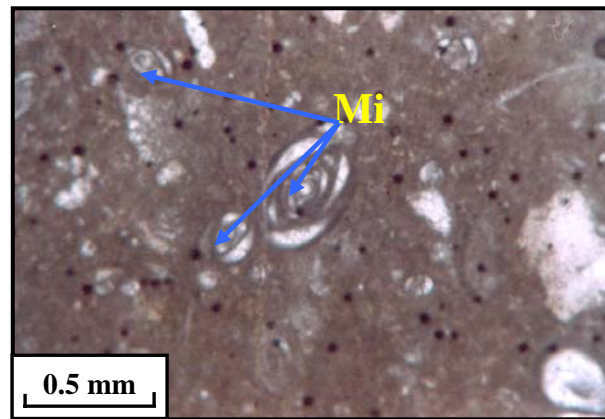


Fig. 14- Microphotographie de calcaires à Miliolites en lame mince (LN).

➤ **Calcaires bioclastiques**

Ce faciès est attribué à un environnement d'arrière récif (Back reef), cela est traduit par la présence de Biomicrides à débris de Polypiers, Echinides, Algues rouges et Bivalves (Fig. 15). Ces bancs de calcaires sont d'ordre décimétrique à métrique.

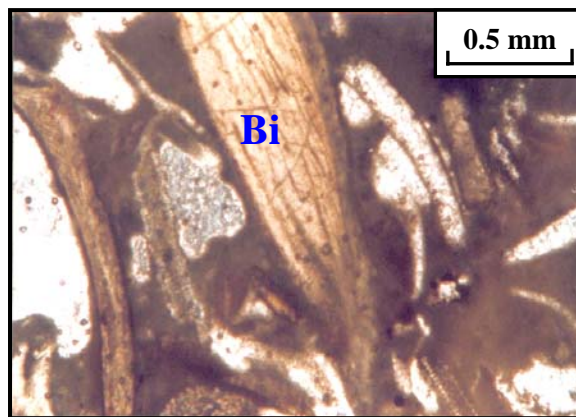


Fig. 15- Microphotographie de calcaires bioclastiques en lame mince (LN). (Bi): Bioclaste

II. 1. 5. - MINERALISATIONS

Le gisement de Douamis, renferme deux types de minéralisations: ferrifère et polymétallique (Figs. 16 et 17).

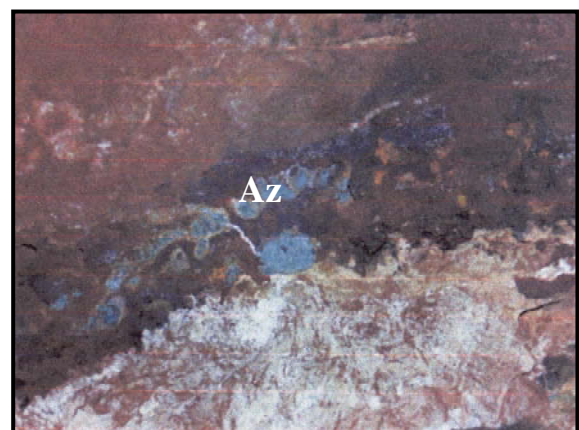
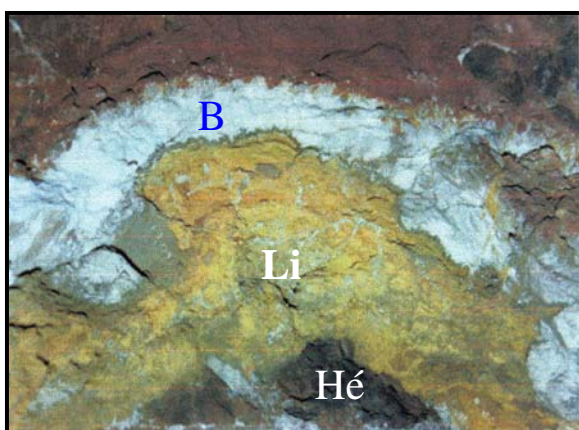


Fig. 16- Minerai de fer hématite (Hé) et limonite (Li) recoupé par un filon de barytine (Ba). (Benlamri et Brahimou, 1998).

Fig. 17- Minerai de produits d'altération de cuivre : azurite (Az) (Benlamri et Brahimou, 1998).

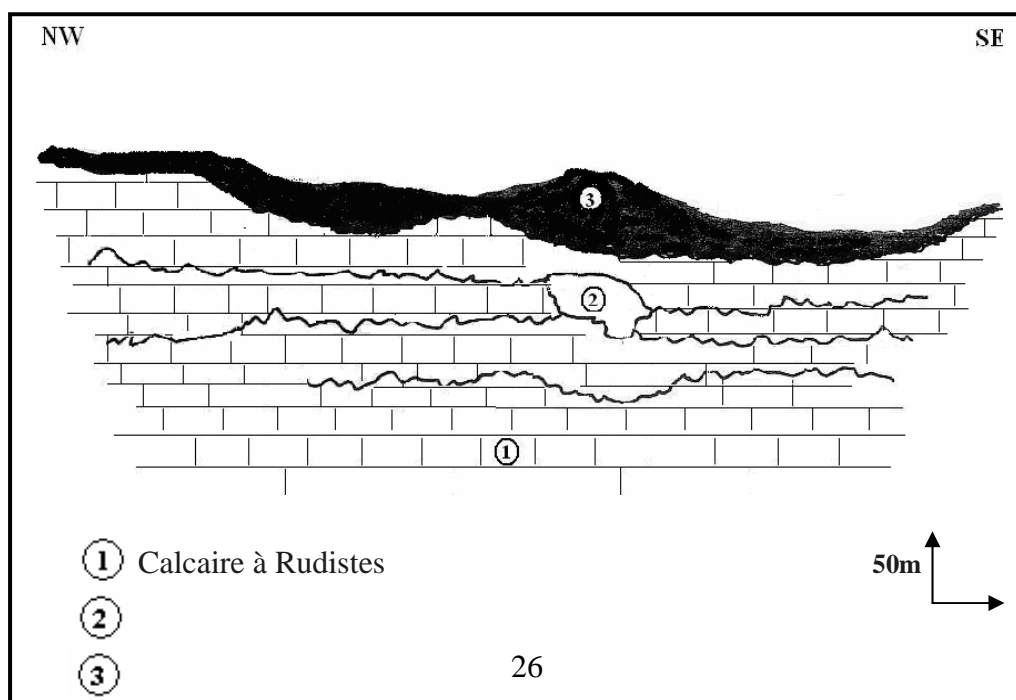
Une étude minéralogique et pétrographique sur l'ensemble des échantillons prélevés des galeries et de surface, a été faite. Elle a permis de confirmer la constitution des minéralisations.

II. 1. 5. 1. - MINERALISATION FERRIFERE

La minéralisation ferrifère au niveau du secteur de Douamis est représentée par la sidérite, l'hématite, la goethite et la limonite.

La minéralisation ferrifère présente deux types morphologiques; stratiforme et filonien. La minéralisation stratiforme est en liaison avec des joints stylolitiques qui soulignent, pour la plupart, la stratification (Fig. 18). Cette minéralisation est parfois liée à la tectonique et de ce fait, de nombreuses diaclases sont minéralisées. Parfois la combinaison des contrôles stratigraphique et tectonique donne une minéralisation en forme d'escalier.

Le second type est représenté par la minéralisation filonienne. Il est observable au niveau des galeries du gisement de Douamis (niveau 600).



Minéralisation à hématite et cuivre gris

50m

Poche de minerai (hématite et cuivre gris) liée à un stylolite

Fig. 18- Minéralisation stratiforme guidée par un stylolite.

La minéralisation ferrifère est représentée par deux types de minerai ; primaire carbonaté et un minerai secondaire oxydé hématitique (Bouzenoune, 1993).

Le minerai carbonaté du secteur de Douamis contient rarement de la calcite avec l'existence du quartz automorphe, qu'il est présenté par de fines aiguilles (Fig. 19), incluses dans la minéralisation. En plus, certaines coquilles de Rudistes sont recristallisées en calcite. Il est noté l'abondance de la sidérite (FeCO_3) qui est le résultat de la transformation de la calcite (Bouzenoune, 2006).

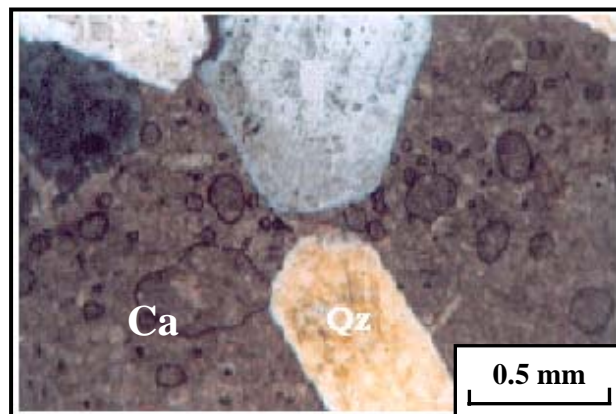


Fig. 19- Microphotographie de Quartz automorphe (Qz) dans une matrice formée de calcaire (Ca) en lame mince (LN).

Le minerai oxydé est représenté par l'hématite, la goethite et la limonite, dont l'hématite (Fe_2O_3) représente un minerai riche. Elle provient dans un stade tardif de l'oxydation de la sidérite. La minéralisation est généralement pulvérulente comme elle peut être sous forme des masses ternes ou sous forme d'un minerai homogène avec l'apparition d'une trame rhomboédrique héritée du minerai carbonaté.

La goethite $\text{FeO}(\text{OH})$, qui est un produit d'oxydation de minerai de fer, se trouve associé à l'hématite et à la limonite ($2\text{Fe}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$) (Figs. 20 et 21). Elle forme généralement des encroûtements à la surface mamelonnée et souvent pulvérulente.

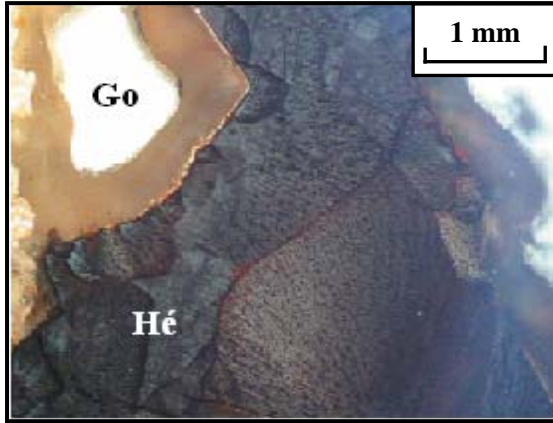


Fig. 20- Microphotographie de goethite (Go) associée à l'hématite (Hé) en section polie (LP).

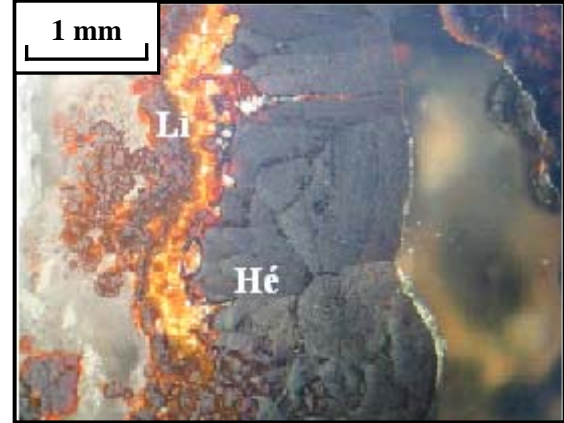


Fig. 21- Microphotographie de limonite (Li) associée à l'hématite (Hé) en section polie (LP).

Quant à la minéralisation karstique, elle se trouve surtout dans les failles et les fissures ouvertes de Douamis. Cette minéralisation tardive présente une relation étroite avec la tectonique. La calcite karstique se trouve en bordure des failles limonitisées. Cette minéralisation se trouve aussi dans les cavités d'effondrement. En effet on trouve des fragments de minerai de fer cimentés par de la calcite karstique qui constitué aussi un ciment d'une brèche minéralisée.

II. 1. 5. 2. - MINERALISATION POLYMETALLIQUE

La minéralisation polymétallique est très développée au niveau du secteur de Douamis. Elle est composée de cuivre gris, galène, malachite, azurite et de la barytine.

La minéralisation polymétallique suit généralement les directions structurales dominantes à Djebel Ouenza (Sud-Ouest, Nord-Est). Elle est limitée par les deux failles principales.

De même que la minéralisation ferrifère, celle en cuivre gris se présente sous deux formes ; stratiforme et filonienne (Fig. 22). Pour les corps stratiformes, leur relation avec l'encaissant est diffuse alors que la concordance avec la stratification est présente dans l'ensemble. Les corps filoniens sont liés généralement à des diaclases.



Fig. 22- Minéralisation filonienne à barytine (Ba)
(Benlamri et Brahimou, 1998)

La minéralisation polymétallique est assez importante. Elle est cuprifère, représentée par le cuivre gris à pôle tétraédrite (Cu_3SbS_3), qui est abondant dans le gisement de Douamis. Microscopiquement, le cuivre gris se présente sous forme de cristaux automorphes à sub-automorphes très caractéristique (Fig. 23).

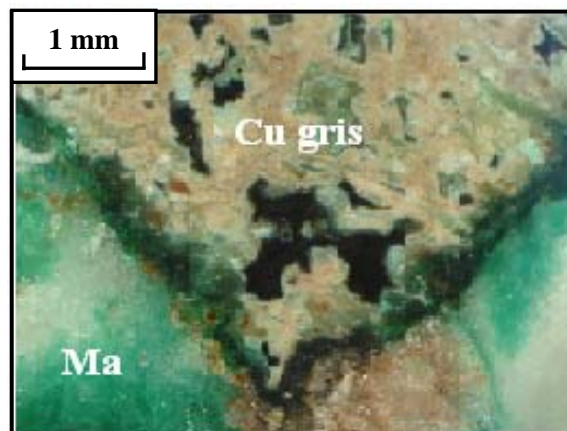


Fig. 23- Microphotographie de cuivre gris
en section polie (LP).

La galène (PbS) se présente sous de petits cristaux cubiques disséminés dans le minerai, associée souvent avec la barytine (Ba SO_4) (Fig. 24), qui est très ré pondue au niveau de Douamis, elle se présente sous forme de fines aiguilles de couleur blanche envahissant les fissures du minerai de fer. Elle se trouve dans les fractures orientées NE-SW, affectant les calcaires aptiens renversés et présente un ciment bréchique ou remplissage non basculés de cavités de dissolution (Akrou et al., 1991).



Fig. 24- Microphotographie de la galène
(Ga) associée à la barytine (Ba)
en section polie (LP).

Le cuivre se présente aussi sous forme carbonatée malachite $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ et azurite $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ (Fig. 25) et s'associe souvent à la barytine. Il est présent dans les fissures d'ouvertures centimétriques affectant un minerai oxydé hématitique (Fig. 26), ou sous forme de grains disséminés dans les espaces intergranulaires et à fluorine incolore. Ce cuivre gris recoupe la sidérite et la fluorine, il est donc le plus tardif.

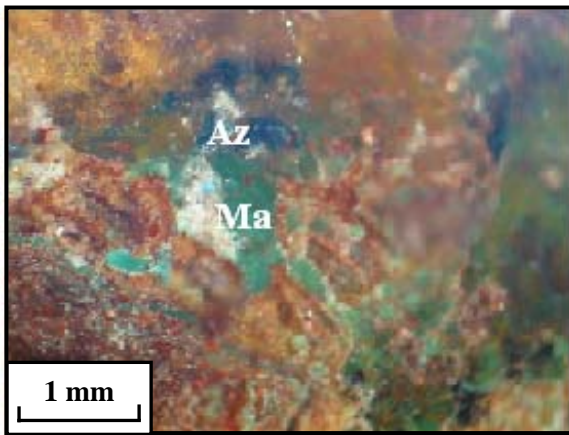


Fig. 25- Microphotographie de la malachite
(Ma) associée à l'azurite (Az) en
section polie (LP).

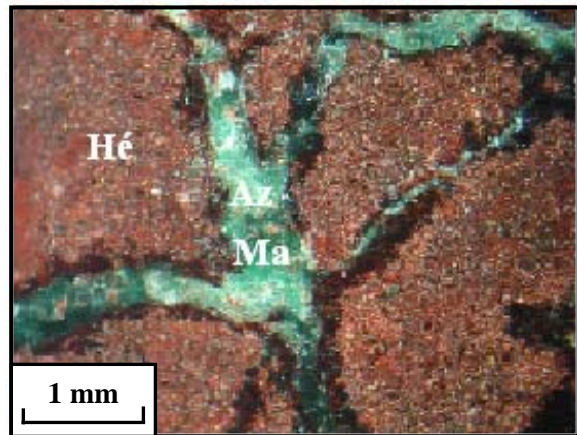


Fig. 26- Microphotographie de l'hématite (Hé)
associée à la malachite (Ma) et
l'azurite (Az) en section polie (LP).

II. 1. 6. - GENESE DE LA MINERALISATION

Deux hypothèses ont été proposées pour la mise en place des minéralisations au niveau du massif de l'Ouenza, l'une sédimentaire et l'autre hydrothermale.

II. 1. 6. 1. - Hypothèse sédimentaire ou syngénétique

Madre, (1969) démontre l'étroite relation entre les calcaires fins à Miliolites de l'Aptien et la minéralisation ferrifère. Il donne comme arguments :

- La concentration du fer dans les zones bien précises de calcaires à Miliolites et Rudistes;
- La minéralisation est contrôlée par un golf de la mer aptienne qui apparaît dans une zone émergée à substratum triasique, en plus de l'existence des roches volcaniques et plutoniques dans la région;
- La disparition de la minéralisation en s'éloignant de domaine récifal;
- Les failles non minéralisantes passant dans les calcaires.

II. 1. 6. 2. - Hypothèse hydrothermale

Plusieurs auteurs considèrent que toutes les minéralisations dans le massif de l'Ouenza : ferrifère, polymétallique et à célestine, y compris celles du gisement de Douamis, sont épigénétiques.

Cette théorie est basée sur la nature des veines minéralisantes, qui se manifestent sous forme de petits filons de goethite et de limonite aux abords réguliers en dehors des zones minéralisées.

Ces veines minéralisantes comblent les fractures des formations qu'elles traversent (marnes, calcaires grès...etc). Ce qui incite Dubourdieu à expliquer que le fer a été transporté par des fluides essentiellement la sidérite dans les fractures sécantes.

A l'échelle décimétrique, les corps minéralisés présentent une morphologie stratiforme, au contraire à l'échelle métrique, le minerai ferrifère est discordant sur son encaissant calcaire et renferme souvent des reliques calcaires qui témoignent de son installation par substitution (Thibiéroz et Madre ; 1976).

Les minéralisations polymétalliques, se localisent toujours dans des fractures affectant les calcaires et que la dissémination de galène dans l'encaissant montrent des figures de remplacement du calcaire par les sulfures.

Les minéralisations à célestine sont localisées dans les fissures affectant les dolomies litées au Trias et contiennent des reliques anhydritiques témoins des précurseurs au dépend desquels la célestine s'est formée. (Bouzenoune et al.; 2006).

L'absence de toute manifestation magmatique ainsi que de terres émergées dans la région permet d'exclure, particulièrement pour métaux, une origine endogène ou une origine exogène directe par altération continentale. Par contre pour le soufre et le carbone on a

souvent recours à la source la plus immédiate : les évaporites du Trias et l'encaissant carbonaté (Bouzenoune, 1993).

CHAPITRE II : GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES RESERVES

II. 1 - GEOSTATISTIQUE

II. 1. 1 - INTRODCUTION

La géostatistique est une science physique qui étudie des phénomènes naturels répartis dans l'espace (phénomènes régionalisés), comme par exemple la répartition des éléments chimiques dans un gisement et/ou dans le temps (pluviométrie). Elle est venue pour parer aux insuffisances de la statistique classique, qui ne tient pas compte de la continuité spatiale des phénomènes naturels (continuité d'un corps de minerais), donc de l'auto-corrélation spatiale d'une variable spatiale ou variable régionalisée (Fig. 34).

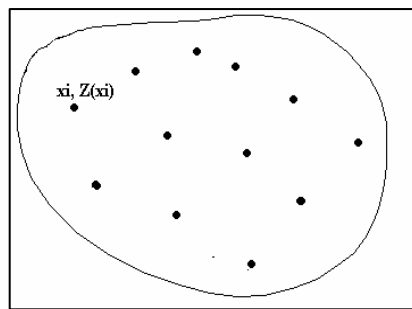


Fig. 34.- Répartition des données

Rappelons qu'il y'a deux principaux modèles en géostatistique (Chauvet, 1999).

- **La géostatistique transitive** : qui opère directement sur la variable régionalisée $Z(x)$. Cette dernière est considérée comme réalisation unique au point (x_i) , lors de l'étude de sa corrélation spatiale ainsi que sa structure spatiale.
- **La géostatistique intrinsèque** : modèle topo-probabiliste, par opposition à la géostatistique transitive, $Z(x)$ est prise comme une variable aléatoire et l'ensemble des variables aléatoires $Z(x)$ aux différents points x_i dans l'espace de définition forme une fonction aléatoire $Z(X)$.

Dans le cas où les moyennes des variables aléatoires aux points (x_i) sont égales, on dit que le phénomène est stationnaire: C'est la **Géostatistique Stationnaire** sinon c'est la **Géostatistique non stationnaire**.

L'outil de base de la géostatistique c'est le variogramme ou la covariance. Ils décrivent et quantifient la continuité et la structure mathématique de la variabilité du phénomène. La variographie est donc une étape essentielle de toute étude géostatistique. C'est la caractérisation des structures des variabilités spatiales des grandeurs considérées. Teneurs en Fe, Cu et SiO₂ dans notre cas.

Dans le présent travail, c'est la minéralisation de fer cuivreux qui représente le phénomène régionalisé à étudier au travers les teneurs en Fe, Cu et en SiO₂ qui ne sont connues qu'en certains points dans le gisement. A partir de ces quelques données ainsi que l'information qualitative existante sur la variable, la géostatistique doit aider à décrire le comportement de cette dernière sur l'ensemble du site étudié.

Les variables régionalisées choisies sont donc les teneurs en Fe, Cu et en SiO₂.

Le variogramme est défini :

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

Afin d'estimer le variogramme, on est amené à admettre l'hypothèse intrinsèque: Le variogramme ne dépend pas de la localisation (x), mais seulement de h en module et en direction. Il est alors possible de calculer le variogramme expérimental à l'aide de l'expression suivante :

$$2\gamma^*(h) = \frac{\sum [Z(x+h) - Z(x)]^2}{N(h)}$$

Où : $Z(x)$ est la valeur de la variable régionalisée au point (x) et $Z(x+h)$ est la valeur de la variable régionalisée au point ($x+h$).

(h) étant le vecteur entre (x) et ($x+h$). et $N(h)$ le nombre de pas (couples) distants de h .

Théoriquement et généralement tout variogramme (Fig. 35) présente les caractéristiques suivantes:

- ✓ Il croît avec le module " h " jusqu'à un certain niveau de variabilité où il se stabilise, autour d'une valeur désignée par C ; c'est le *Palier*. La distance correspondante désignée par a est appelée: *Porté*. Cette dernière représente « la zone d'influence » du mineur. Elle peut être différente d'une direction à une autre. Dans le cas où elle est la même, le phénomène est dit isotrope sinon il est anisotrope.
- ✓ Dans la pratique, le degré de continuité ainsi que la régularité de variables est responsables de l'allure du comportement de variogramme à l'origine qui peut ne pas commencer à zéro mais à partir d'une valeur C_0 par $h=0$; c'est *l'effet de pépité*.

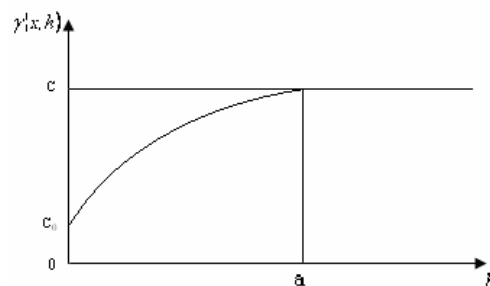


Fig. 35- Graphe d'un variogramme

Le variogramme expérimental doit être ajusté à l'aide d'un des schémas théoriques existants dont les plus utilisés sont : le sphérique, l'exponentiel et le gaussien.

Rappelons les principaux schémas existants ;

- *schéma à palier* : sphérique et exponentiel présentent un comportement linéaire à l'origine, et gaussien lui un comportement parabolique à l'origine ;
- *schéma sans palier* ; logarithmique et en puissance ;
- *schéma à effet de trou*.

II. 1. 2. - LES PROCEDURES GEOSTATISTIQUES DU KRIGEAGE

Le krigeage est une procédure d'interpolation qui fournit, à partir des données disponibles, une estimation optimale de la variable étudiée.

Les avantages de krigeage par rapport aux autres méthodes d'interprétation plus classique sont :

- le krigeage intègre, dans son processus d'estimation, la structure spatiale des données sous forme d'un modèle de variogramme.
- C'est un interpolateur exact
- Il fournit une information sur l'erreur d'estimation, permettant donc d'évaluer la précision de l'estimation en chaque point du domaine étudié.

Les méthodes de krigeage se subdivisent en : linéaires et non linéaires.

- Le krigeage linéaire englobe dans le cas stationnaire : Le krigeage ordinaire dont « m » est inconnue et le krigeage simple dont « m » est connue. Le cas non stationnaire « m » est fonction du point « x » est représenté par le krigeage universel.
- Le krigeage non linéaire : le krigeage des indicatrices, le krigeage lognormal et le krigeage disjonctif.

II. 1. 2. 1- Krigeage ordinaire

Sous stationnarité d'ordre 2, la moyenne « m » est inconnue. On krige une valeur ponctuelle Z_v^* en x_0 .

- L'estimateur linéaire est défini comme suit :

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

Où λ_i : Coefficient de pondération de krigeage.

Le krigeage ordinaire consiste donc à calculer les pondérateurs λ_i sous deux conditions qui sont:

1- La condition de non- biais qui est assuré par la condition $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

2- La condition de minimum de la variance de l’erreur d’estimation

$$Var[Z_0 - Z_0] = E[Z_0 - Z_0]^2 \min$$

Le formalisme de Lagrange permet de calculer les pondérateurs λ_i à l’aide du système d’équation dit système de krigeage et qui est le suivant :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{\gamma}(v_i, v_j) - \mu = \bar{\gamma}(V, v_i) \\ \sum \lambda_j = 1 \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Et alors :

$$\sigma_{k_0}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(V, v_i) - \bar{\gamma}(V, V) + \mu$$

Le système de krigeage peut s’écrire sous forme matricielle :

$$[K][\lambda] = [M_2] \Rightarrow [\lambda] = [K]^{-1}[M_2]$$

- La variance de krigeage peut s’écrire sous forme matricielle :

$$\sigma_k^2 = [K]^t \cdot [M_2] - \bar{\gamma}(v, v)$$

II. 1. 2. 2- Propriétés de krigeage ordinaire

Le système de krigeage est un système de $(N + 1)$ équations linéaires à $(N + 1)$ inconnus qui sont les N pondérateurs λ_i de N informations (Z_i) et paramètre de lagrange μ . On démontre que le système de krigeage est toujours régulier, c’est-à-dire qu’il fournit toujours une solution unique.

Le système de krigeage ainsi que la variance d’estimation de krigeage tiennent compte de :

- Géométrie du domaine à estimer : $\bar{\gamma}(V, V)$ de σ_k^2
- Distances entre l’estimé et l’estimant : $\bar{\gamma}(v_i, V)$.
- Géométrie interne de l’information : $\bar{\gamma}(v_i, v_j)$
- Degré de continuité du phénomène étudié, au travers de l’utilisation de son demi variogramme caractéristique $\gamma(h)$.

II. 1. 3. - RESULTATS OBTENUS DANS LE GISEMENT DE DOUAMIS

II. 1. 3. 1. - Variographie des variables régionalisées

Pour Fe comme pour Cu, les variogrammes élémentaires directionnels ont été calculés, tracés et ajustés.

- **Fe** : dans un premier temps, vu le grand nombre de données (1363) et la capacité des moyens de calcul et du logiciel, le variogramme moyen de Fe a été calculé par regroupement de sept variogrammes calculés (Tableau 6) au niveau du plan d'échantillonnage qui se répartie en sept blocs (Fig. 36).

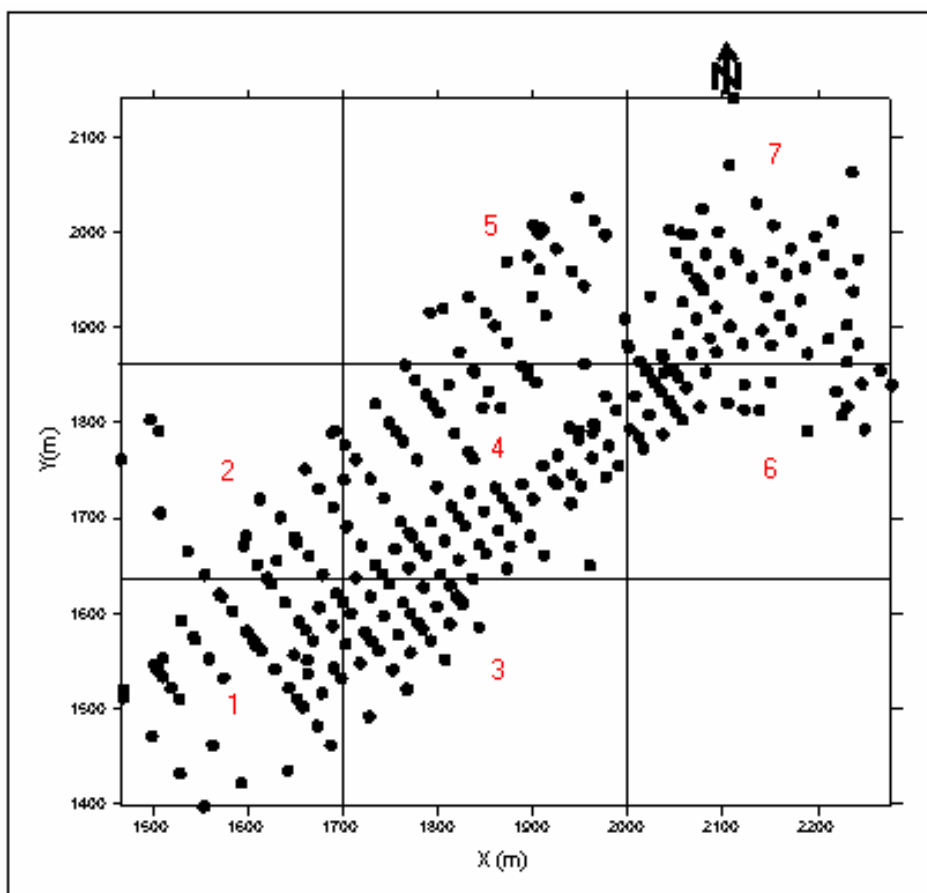


Fig. 36- Répartition du plan d'échantillonnage.

Avant de calculer le variogramme moyen, on a calculé les variogrammes directionnels pour l'ensemble des blocs dans les quatre directions préférentielles : $10\pm 5^\circ$, $60\pm 10^\circ$, $100\pm 10^\circ$ et $145\pm 10^\circ$.

Les variogrammes directionnels obtenus présentent pratiquement la même tendance, ce qui confirme l'existence d'une isotropie.

Tableau .6- Paramètres du variogramme expérimental horizontal moyen (3D) des teneurs des carottes en Fe.

dist moy	pairs		γ (h)		pairs		γ (h)		pairs		γ (h)		pairs		γ (h)		pairs tot	γ (h) moy
15,9	102	13,71	35	15,33	360	7,183	366	15,22	154	15,2	327	12,79	178	19,53	1522	13.199		
35,46	305	18,7	47	11,83	680	11,79	1000	16,37	141	35,31	579	14,47	363	22,09	3115	16.698		
57,66	277	16,4	56	11,45	629	14,21	1000	17,29	93	50,04	260	18,2	239	23,1	2554	18.135		
87,46	215	17,9	1	6,301	395	18,61	1000	18,77	97	53,48	42	17,9	107	26,24	1857	20.854		
108,9	320	18,47	4	12,42	191	17,26	1000	17,24	240	23,59	33	15,15	53	36,22	1841	18.781		
138,7	282	24,21	5	11,37	80	22,4	1000	20,05	55	32,42	0	0	18	22,89	1440	21.472		

Le variogramme moyen est ajusté à l'aide d'un modèle sphérique. Il montre un effet de pépité de 10 %², un palier de 11 %² et une portée de 94 m (Fig. 37).

$$\gamma(h) = 10 + 11sph_{94}(h)$$

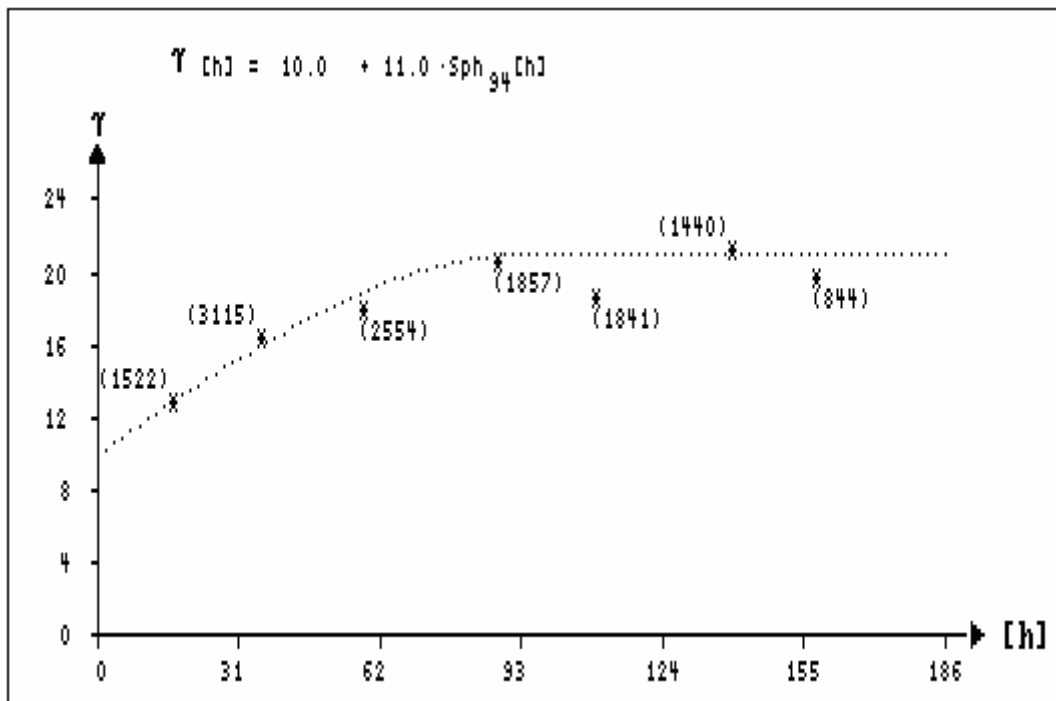


Fig. 37- Variogramme expérimental horizontal moyen (3D) des teneurs en Fe du gisement de Douamis.

- **Cu:** Les 481 données en Cu ont été utilisées pour le calcul des variogrammes directionnels. Le variogramme horizontal de cuivre est calculé pour les paramètres suivants: un angle d'azimut de 0 +/- 90° et un angle de pendage de 0 +/- 20 (Tableau. 7).

Tableau. 7- Paramètres du variogramme expérimental horizontal moyen (3D) des teneurs des carottes en Cu

N° du pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$
1	17.12	441	0.0546
2	35.17	1000	0.0657
3	58.61	1000	0.0730
4	83.62	1000	0.0893
5	109.78	1000	0.0648
6	136.72	962	0.0703
7	159.28	673	0.0629
8	180.00	343	0.0647

Le variogramme moyen horizontal est ajusté à l'aide d'un modèle exponentiel. Il montre un effet de pépité de $0.0027\ \%^2$, un palier de $0.056\ \%^2$ et une portée de $100\ \text{m}$ (Fig. 38).

$$\gamma(h) = 0.0027 + 0.056 \exp_{100}(h)$$

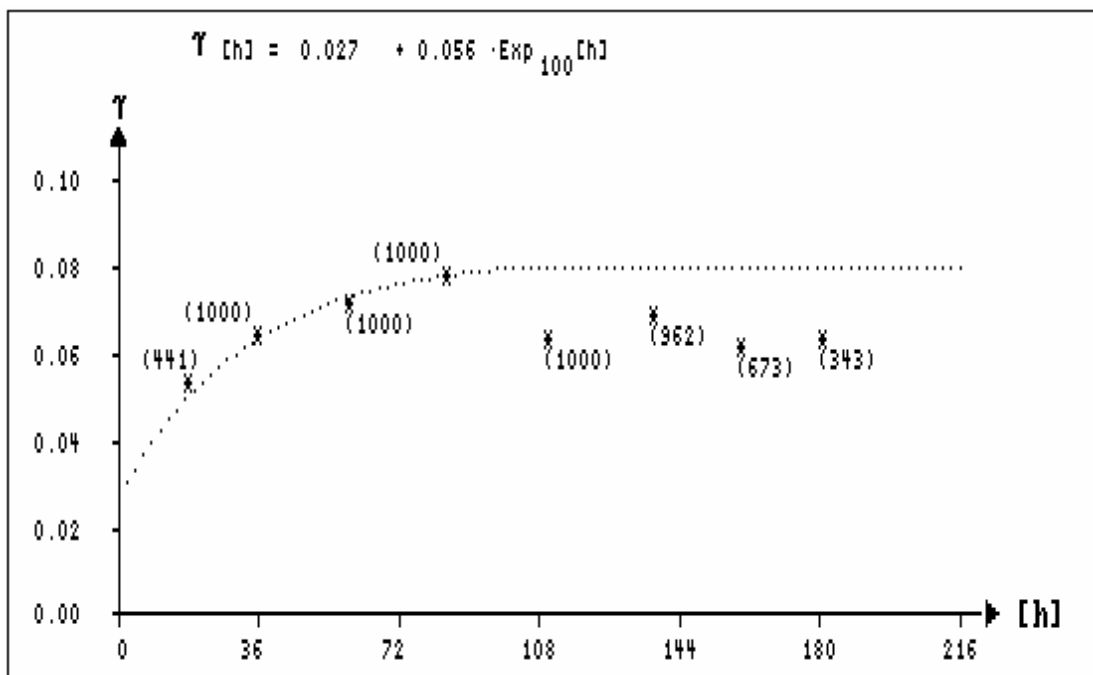


Fig. 38- Variogramme expérimental horizontal moyen (3D) des teneurs en Cu du gisement de Douamis

Le variogramme expérimental vertical de Cu, a été calculé sur la base des paramètres suivants : un angle d'azimut de 0 +/- 90° et un angle de pendage de -90 +/- 40° (Tableau. 8)

Tableau. 8- Paramètres du variogramme expérimental vertical moyen (3D) des teneurs des carottes en Cu

N° du pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$
1	3.68	134	0.0493
2	5.97	261	0.0674
3	12.37	189	0.0740
4	17.37	235	0.0770
5	22.35	224	0.0830
6	27.52	187	0.0748
7	32.75	379	0.0771
8	37.48	383	0.0838
9	42.43	380	0.1013
10	47.33	312	0.1073

L'ajustement de ce variogramme est fait à l'aide d'un modèle exponentiel. Il montre un palier de 0.048 %², une portée de 20 m et un effet de pépité de l'ordre de 0.036 %² (Fig. 39).

$$\gamma(h) = 0.036 + 0.048 \cdot sph_{20}(h)$$

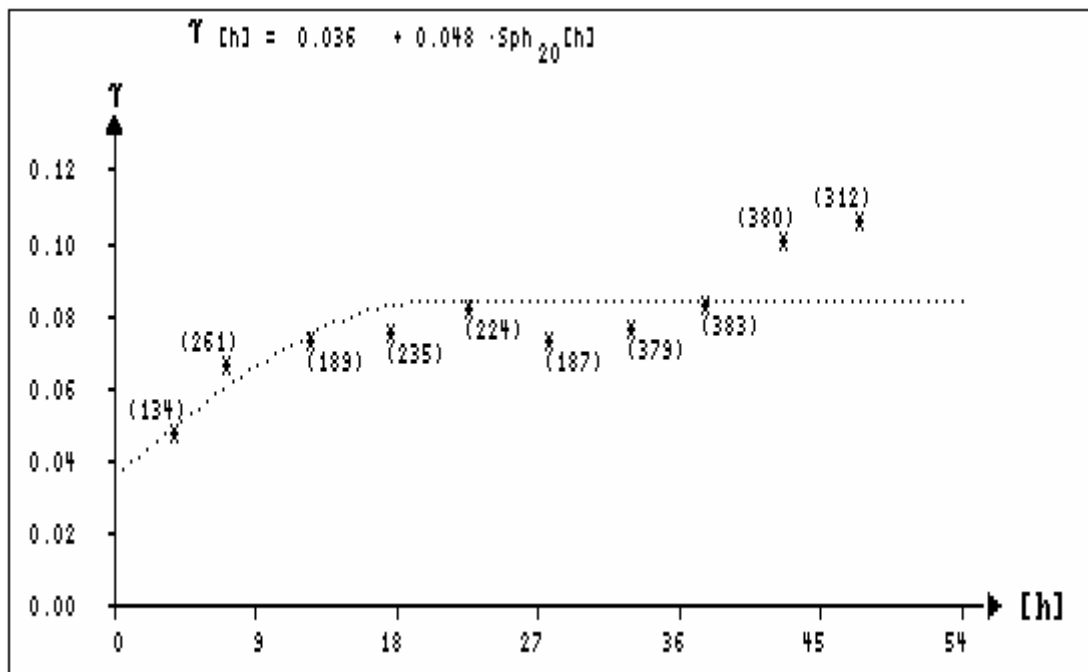


Fig. 39- Variogramme expérimental vertical moyen (3D) des teneurs en Cu du gisement de Douamis

II. 1. 3. 2. - VARIOGRAPHIE DES TENEURS EN « Fe, Cu et Si » DU GISEMENT DE DOUAMIS

Après l'étude de l'ensemble des données pour chaque élément à part, la variographie de chacune des trois variables Fe, Cu et Si a été refaite sur un ensemble de 406 données chimiques des échantillons de carottes qui furent analysées sur ces trois variables.

▪ Variogrammes horizontaux des teneurs en Fe, Cu et Si

Les variogrammes horizontaux pour les trois éléments sont calculés sur la base des paramètres suivants: un angle d'azimut de 0 +/- 90° et un angle de pendage de 0+/-20 avec un pas de 25 mètres (Tableaux. 9, 10 et 11).

L'ajustement est réalisé à l'aide d'un modèle sphérique pour Fe et Si, alors que le Cu est ajusté à l'aide d'un modèle exponentiel (Fig. 40, 41 et 42) en donnant les résultats suivants:

- **Fe:** un effet de pépite de 25 %², un palier de 28 %² et une portée de 85 m ;

$$\gamma(h) = 25 + 28sph_{85}(h)$$

- **Cu:** un effet de pépite de 0.027 %², un palier de 0.056 %² et une portée de 100 m ;

$$\gamma(h) = 0.027 + 0.056 \exp_{100}(h)$$

- **Si:** un effet de pépite de 1.35%², un palier de 6.2 %² et une portée de 120 m.

$$\gamma(h) = 1.35 + 6.2sph_{120}(h)$$

▪ Variogrammes verticaux des teneurs en Fe, Cu et Si

Les variogrammes verticaux pour le Fe, Cu et Si ont été construit respectivement en se basant sur les paramètres suivants: un angle d'azimut de 0 +/- 90° et un angle de pendage de -90+/-40 ° avec un pas de 5 m (Tableaux. 12, 13 et 14).

L'ajustement est réalisé à l'aide d'un modèle sphérique pour le Fe, Cu et Si (Figs. 43, 44 et 45) en donnant les résultats suivants;

- **Fe:** un effet de pépite de 12 %², un palier de 36 %² et une portée de 35 m ;

$$\gamma(h) = 12 + 36sph_{35}(h)$$

- **Cu:** un effet de pépite de 0.033 %², un palier de 0.055 %² et une portée de 20 m ;

$$\gamma(h) = 0.033 + 0.055sph_{20}(h)$$

- **Si:** un effet de pépite de 1.7 %², un palier de 4.8 %² et une portée de 56 m.

$$\gamma(h) = 1.7 + 4.8sph_{56}(h)$$

Tableau. 9- Paramètres du variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs des carottes en Fe

N° du pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$
1	18.52	311	37.273
2	35.80	831	41.827
3	60.28	995	51.260
4	84.87	1000	51.032
5	110.54	980	46.710
6	136.39	832	40.210
7	159.58	642	51.532
8	179.40	286	52.305

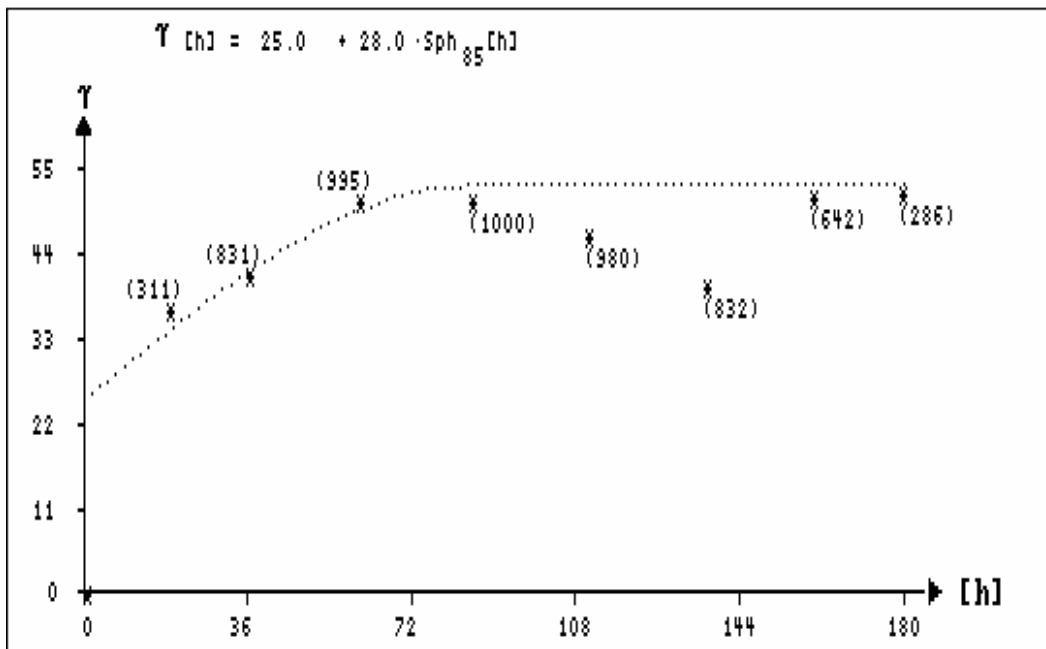


Fig. 40- Variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs en Fe du gisement de Douamis

Tableau. 10- Paramètres du variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs des carottes en Cu

N° du pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$
1	18.41	303	0.0523
2	37.78	819	0.0668
3	60.20	975	0.0769
4	85.13	1000	0.0845
5	110.50	969	0.0683
6	136.42	824	0.0736
7	159.57	630	0.0646
8	179.42	283	0.0754

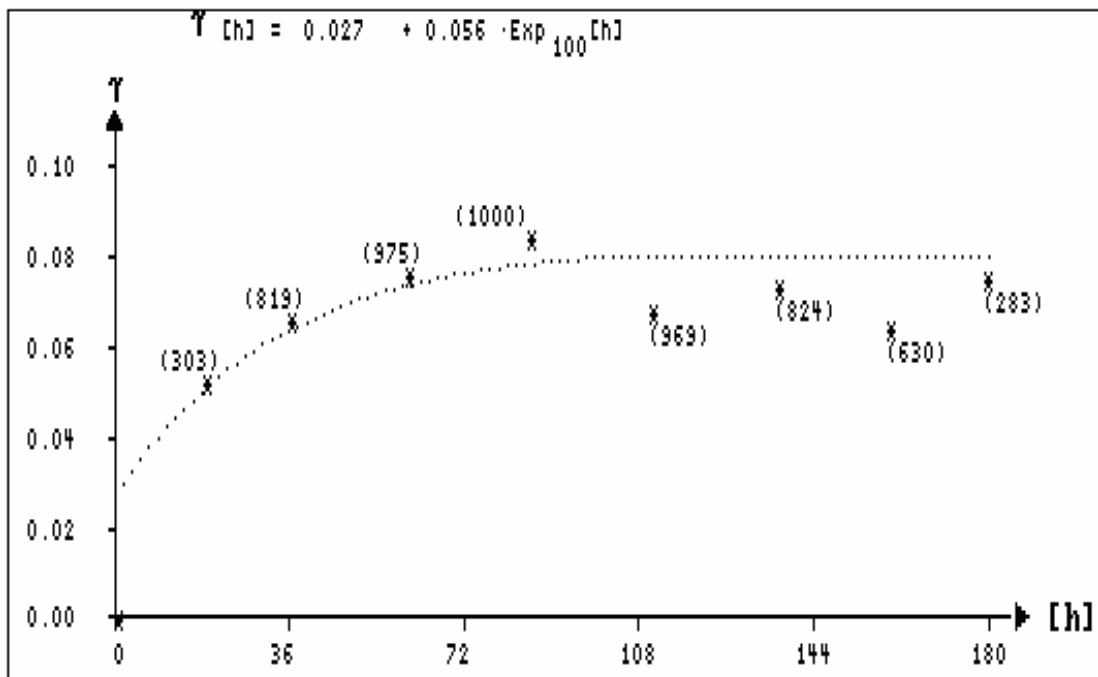


Fig. 41- Variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs en Cu de gisement de Douamis

Tableau. 11- Paramètres du variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs des carottes en Si

N° du pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$
1	18.48	309	3.10
2	35.80	831	3.80
3	60.28	995	5.69
4	84.87	100	6.87
5	110.54	980	9.05
6	136.39	832	7.03
7	159.58	642	8.36
8	179.40	286	8.23

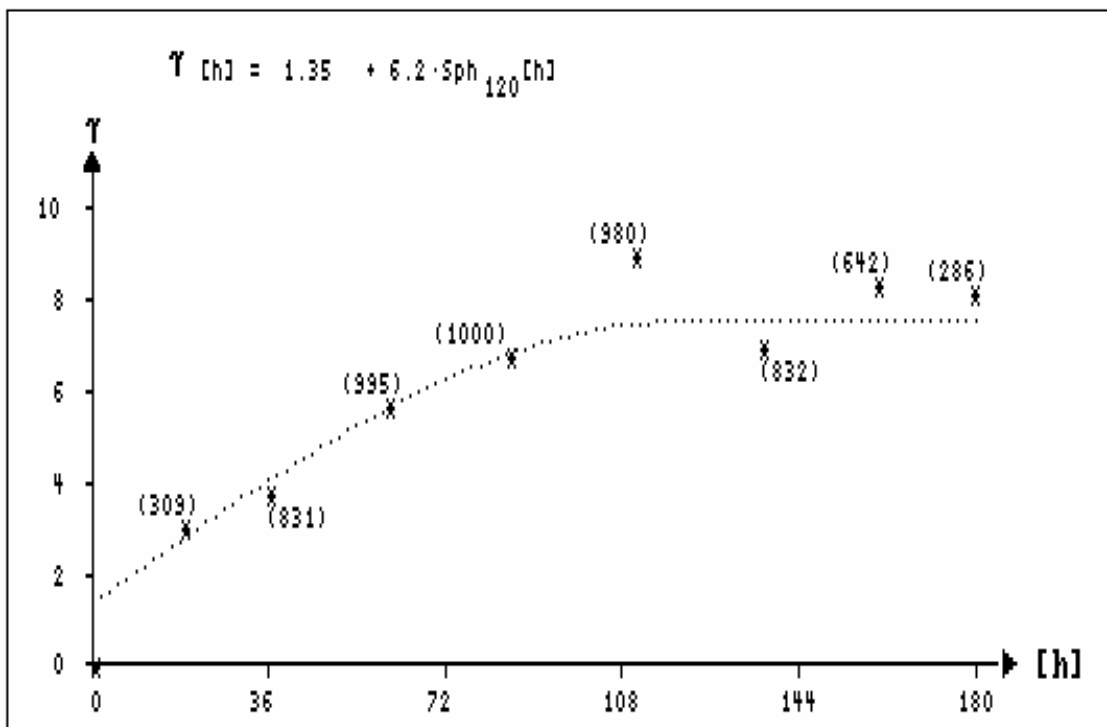


Fig. 42- Variogramme expérimental horizontal (3D) des teneurs en Si du gisement de Douamis

Tableau. 12- Paramètres du variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs des carottes en Fe

N° du pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$
1	5.23	232	22.88
2	12.20	278	31.89
3	19.96	261	40.25
4	20.37	259	49.51
5	35.99	462	46.84
6	43.84	433	49.94
7	51.36	222	47.32
8	59.76	110	67.28
9	66.79	57	89.09

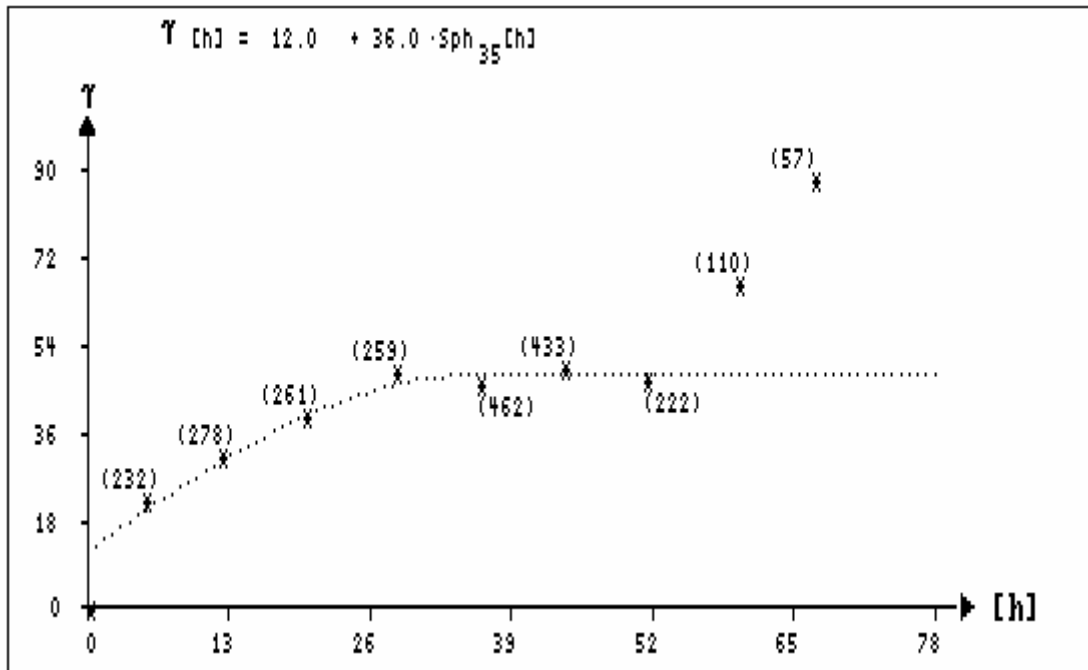


Fig. 43- Variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs en Fe du gisement de Douamis

Tableau. 13- Paramètres du variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs des carottes en Cu

N° du pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$
1	4.14	86	0.0516
2	6.76	186	0.0684
3	12.16	170	0.0767
4	17.36	179	0.0870
5	22.36	167	0.0817
6	27.56	130	0.0790
7	32.74	267	0.0859
8	37.50	282	0.0938
9	42.49	281	0.1340
10	47.38	223	0.1384

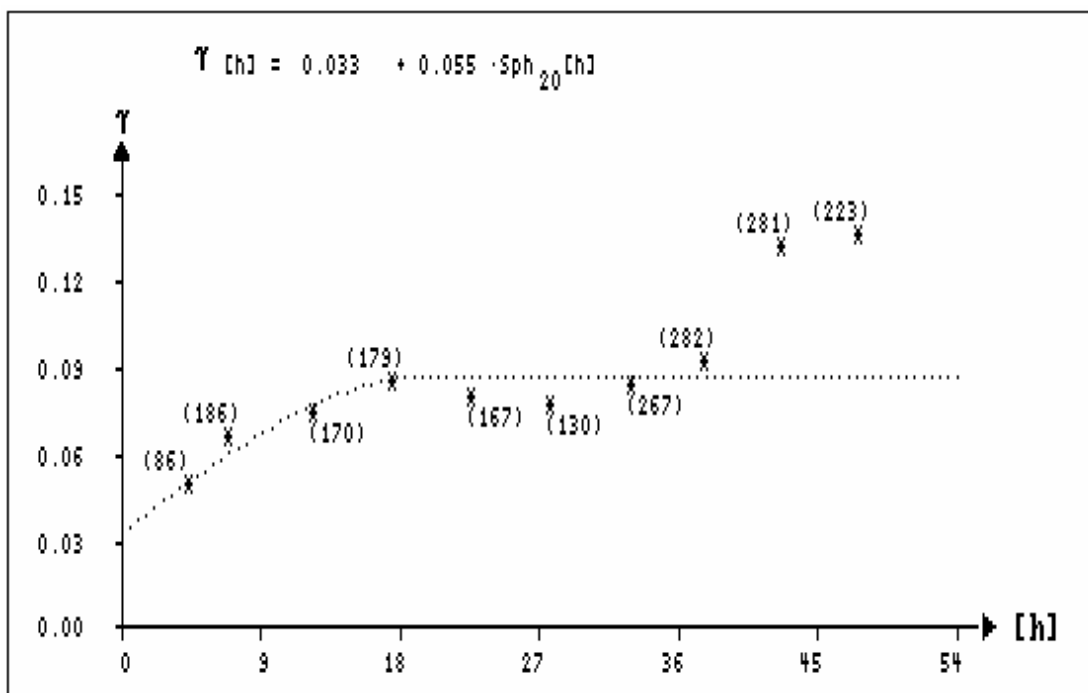


Fig. 44- Variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs en Cu du gisement de Douamis

Tableau. 14- Paramètres du variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs des carottes en Si

N° du pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$
1	5.22	228	2.65
2	12.21	274	3.48
3	19.96	261	3.59
4	28.34	263	5.06
5	35.99	262	5.84
6	43.84	433	6.32
7	51.36	222	7.45
8	59.76	110	6.14
9	66.79	57	7.96

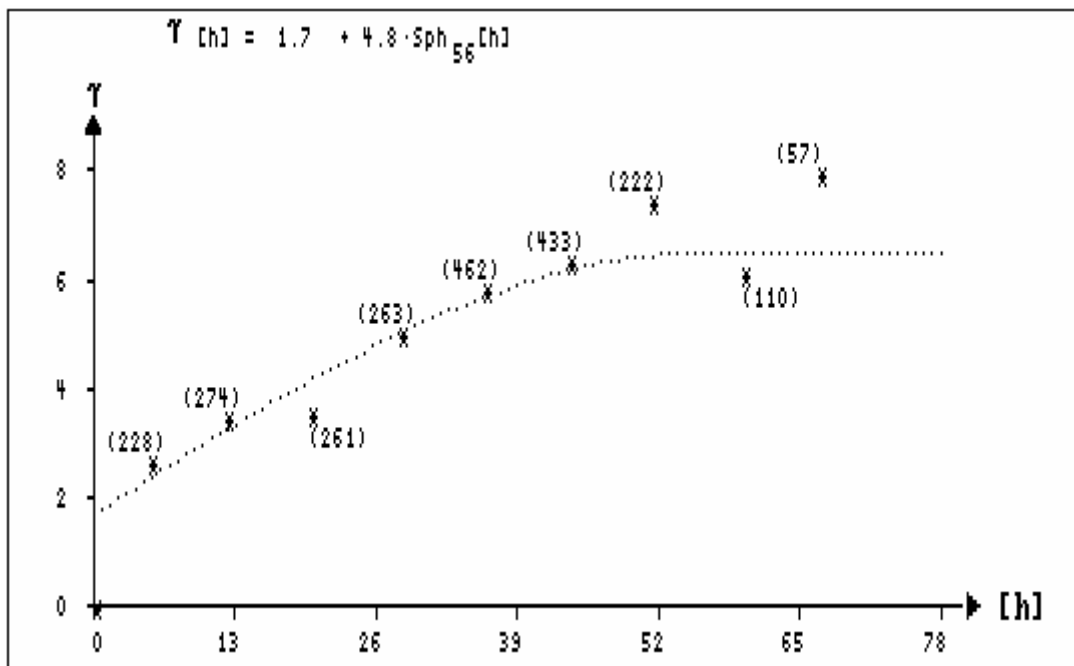


Fig. 45- Variogramme expérimental vertical (3D) des teneurs en Si du gisement de Douamis

II. 2. – KRIGEAGE, CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE ET ESTIMATION DES RESERVES EN Fe et Cu PAR NIVEAU

II. 2. 1. - KRIGEAGE DES TENEURS EN Fe, Cu et Si

Les résultats de la variographie furent utilisés pour le krigeage de Fe, Cu et Si par bloc de 25m x 25m x15m (Tableau 15). Le nombre de mailles en X est 33, et en en Y de 29 sur 15 niveau de 15m.

Tableau. 15- Paramètres et plan type de krigeage ordinaire dans le gisement de Douamis

Input file : dms4.ddh Output file : Kriging type : Ord. block kriging Variogram models : set Missing data flag : -1	BLOCK NETWORK DEFINITION X axis Y axis Z axis Var : X Y Z Origin : 1460 1396 494 Size : 25 25 15 Number : 33 29 15
VARIABLE SELECTION FOR KRIGING NS No Fe Yes SiO2 Yes S No CaO No Cu Yes X No Y No Z No	SEARCH ELLIPSOID Radius R1 : 100 " R2 : 100 " R3 : 100 Azimuth : 0 Dip : 0 Min. data/ellipsoid : 4 Max. data/octant : 4

Le krigeage ordinaire est effectué en utilisant le programme KRIGE 3, qui a donné les résultats suivants (Tableau 16).

Tableau. 16- Résultats de krigeage ordinaire dans le gisement de Douamis

Elément	Moyenne(%)	Variance (%) ²	Variance de krigeage (%) ²	N de blocs
Fe	46.044	123.686	38.818	5292
Cu	0.275	0.061	0.049	2956
Si	3.660	6.716	5.969	4.386

Les teneurs en SiO₂ dans les blocs krigés varient de 0,07% à 16,35% avec une moyenne de 3,66%. Il faudra donc tenir compte de cette teneur pour répondre aux exigences sidérurgiques au travers l'indice de basicité (B).

$$B = \left(\frac{\%MgO + \%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \right)$$

II. 2. 2. - STATISTIQUES DES RESULTATS DE KRIGEAGE DE CHAQUE NIVEAU

Le krigeage tridimensionnel a permis de répartir le bloc des teneurs krigées en 15 niveaux distant de 15 m. Ces niveaux totalisent 5292 blocs de 25 x 25 x 15 m (Tableau 17), qui sont cartographiés par la suite. Une étude statistique de ces niveaux est très importante pour mieux comprendre l'état de ces blocs afin d'atteindre un certain niveau de précision et de même pour pouvoir réaliser un échantillonnage sélectif dans les zones riches.

Tableau. 17- Résultats de krigeage ordinaire par niveau dans le gisement de Douamis

Z	Niv	N bloc	Fe				Cu				Si			
			Tmin (%)	Tmax (%)	Tmoy (%)	Var (%) ²	Tmin (%)	Tmax (%)	Tmoy (%)	Var (%) ²	Tmin (%)	Tmax (%)	Tmoy (%)	Var (%) ²
494	1	138	29,66	57,65	42,17	77,56	0,07	0,41	0,16	0,02	–	–	–	–
509	2	232	26,61	54,27	39,46	31,33	0,03	0,39	0,23	0,005	2,47	10,78	5,46	7,10
524	3	346	25,35	58,44	39,95	31,85	0,01	0,57	0,18	0,02	0,22	16,39	7,75	14,37
539	4	404	20,94	58,44	42,73	28,29	0,01	0,79	0,20	0,03	0,54	11,85	3,66	5,00
554	5	441	29,79	58,42	46,25	31,18	0,02	1,61	0,35	0,13	0,87	10,43	3,32	2,97
569	6	445	31,90	57,18	48,38	19,33	0,02	1,63	0,47	0,13	0,83	8,15	3,31	2,01
584	7	449	31,63	59,14	49,93	26,05	0,02	1,65	0,44	0,11	0,61	8,51	3,33	2,08
599	8	476	31,31	58,44	51,81	23,09	0,03	1,23	0,24	0,46	0,60	8,99	3,43	2,95
614	9	496	29,51	59,05	51,80	26,53	0,02	0,64	0,17	0,01	0,45	14,44	3,57	4,81
629	10	506	34,20	57,56	51,64	19,00	0,02	0,85	0,18	0,02	0,90	15,44	3,73	5,96
644	11	489	35,51	58,28	50,72	17,49	0,02	0,81	0,24	0,02	1,02	15,00	4,38	6,93
659	12	423	32,51	58,28	49,72	9,62	0,03	0,68	0,29	0,02	1,38	14,86	5,11	8,48
674	13	298	43,12	54,19	48,96	4,89	0,03	0,71	0,34	0,02	1,31	13,51	5,23	9,46
689	14	112	26,48	54,13	44,31	48,94	0,07	0,48	0,30	0,01	0,77	12,71	4,80	17,62
704	15	37	28,42	40,63	28,34	4,49	/	/	/	/	0,07	1,27	1,20	0,004

II. 2. 3. - CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUES DES VALEURS KRIGEES

Les résultats obtenus sont utilisés en cartographie automatique des variables krigées, qui sont Fe, Cu et « l'erreur d'estimation » de Fe (Figs. 46 et 47). Les cartes des teneurs krigées des blocs ont été effectuées par niveau pour mieux visualiser la répartition des variables dans les différents blocs et pour la détection des zones les plus riches.

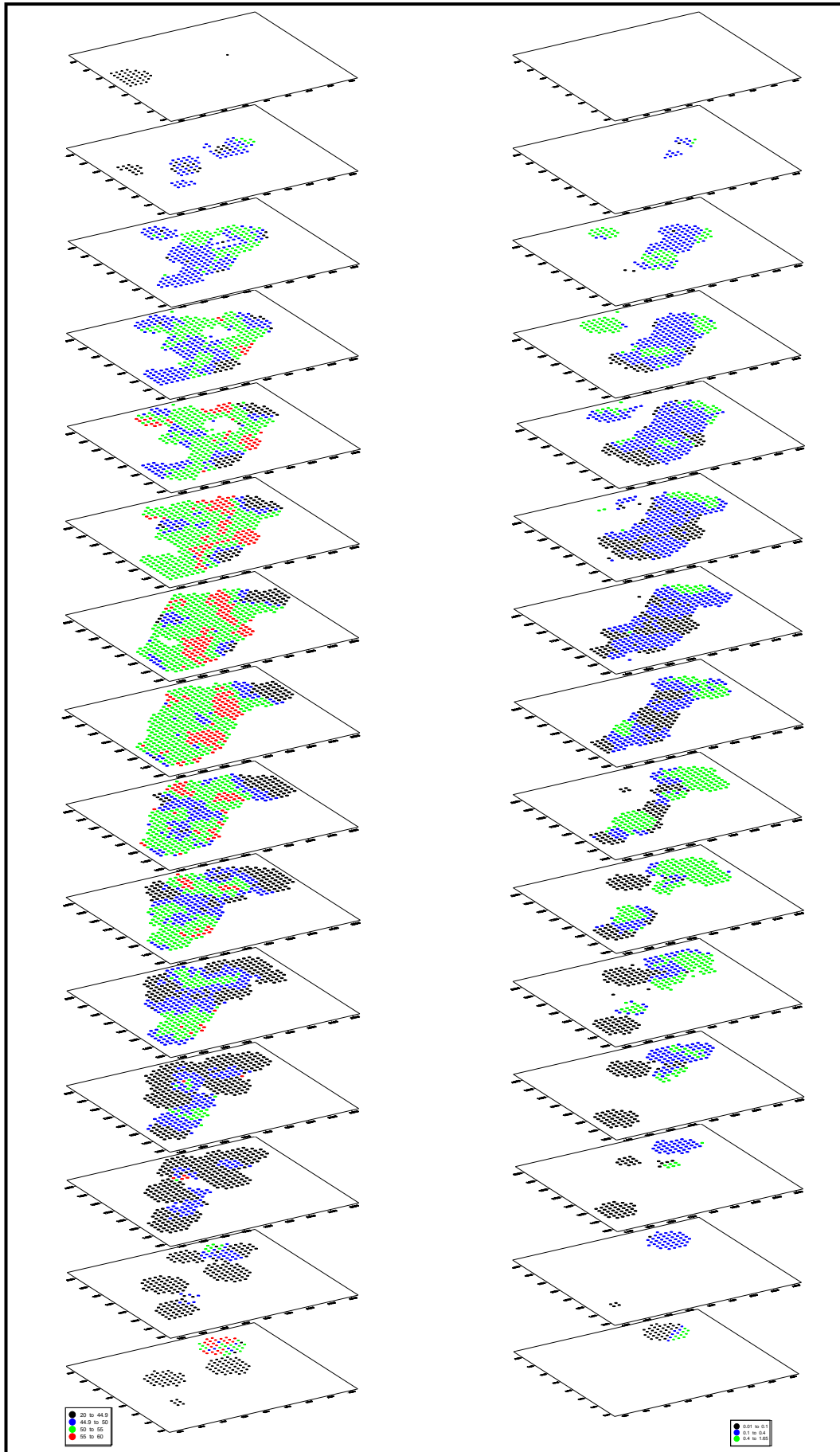


Fig 46. Cartographie des teneurs en fer et en cuivre krigées par niveau

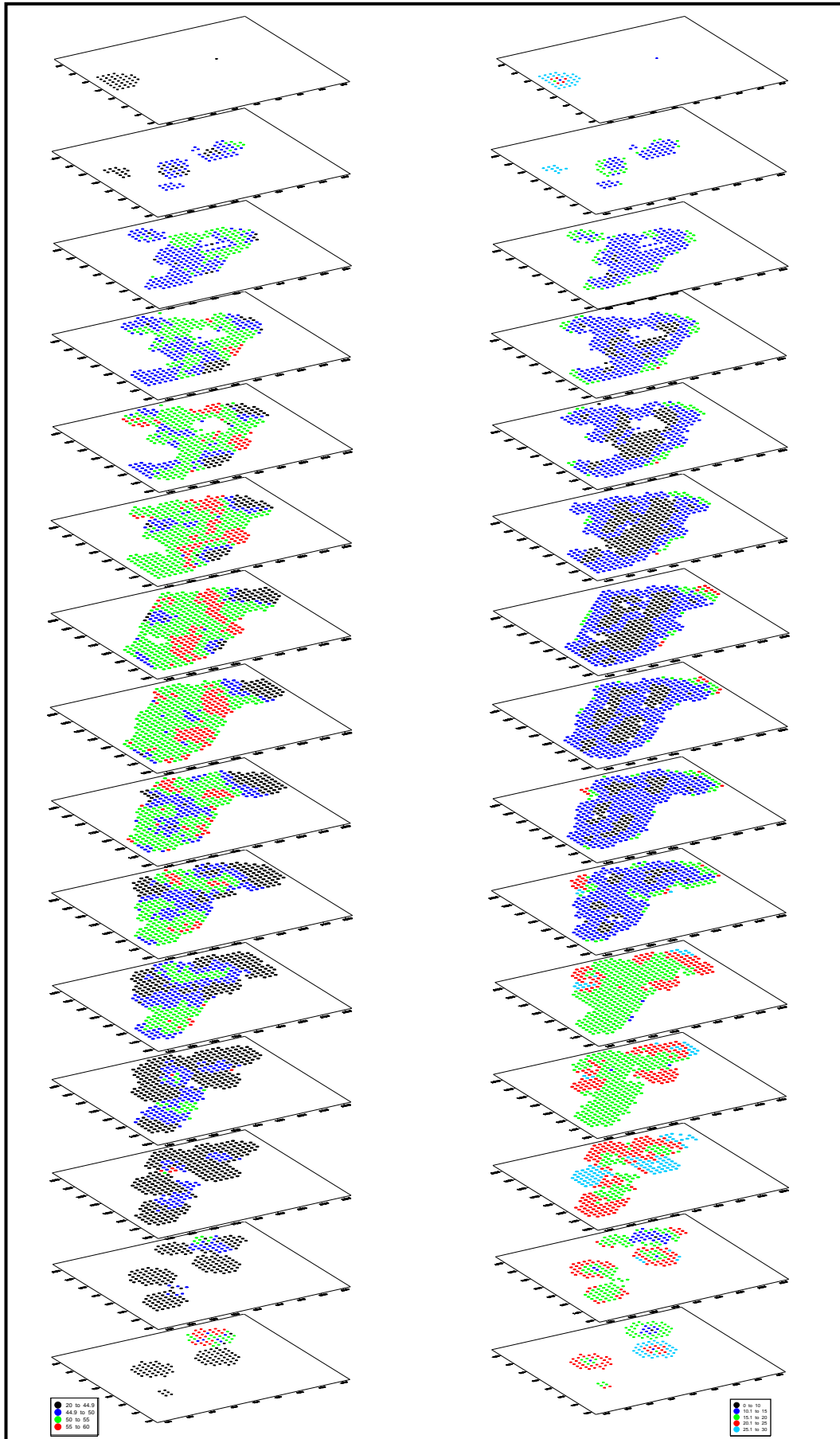


Fig 47. Cartographie des teneurs en fer krigées et de l'erreur d'estimation par niveau

II. 2. 4. - ESTIMATION DES RESERVES

Les résultats de krigeage ordinaire sont utilisés pour le calcul du tonnage des réserves globales au niveau du gisement de Douamis. Les teneurs de coupures sont de l'ordre de 45% pour le fer et 0.4% pour le cuivre (Tableau.18). En se basant sur la formule suivante ;

$$Q_{\min} = V \times d \times T_{\text{moy}}/100$$

d'où : Q_{\min} : Quantité de minerai.

V : Volume = 25m x 25m x 15m.

d : poids volumétrique du minerai = 2,6.

T moy : Teneur moyenne.

Tableau. 18- Tonnage des réserves en fer et en cuivre du gisement de Douamis

Niv	Z (m)	N blocs	N blocs: TFe>45%	T moy Fe (%)	Quantité FeT (tonnes)	T moy Cu(%)	Quantité Cu :TFe>45% (tonnes)	Quantité Cu :TCu>0,4% (tonnes)
1	494	494	47	53,56	613570	0,15	1782	1003
2	509	232	36	48,07	433511	0,23	1848,75	0
3	524	347	64	46,79	741349	NA	-	-
4	539	404	142	48,09	1664461	NA	-	-
5	554	441	283	49,7	3428126	0,25	12697	8830
6	569	445	330	54,92	4107901	0,41	22369,9	18438,6
7	584	449	384	51,62	4843844	0,39	23468,2	19180,8
8	599	476	436	52,99	5644674	0,23	16446,7	7876,2
9	614	496	489	51,08	6100909	0,16	15540,4	2873,7
10	629	506	431	52,75	5554261	0,16	12770	2185,9
11	644	490	373	52,82	3643801	0,23	12576,9	2871
12	659	423	351	50,26	3643801	0,3	18666,9	10151,8
13	674	298	263	49,13	3161462	0,34	13033,7	6981,7
14	689	105	69	47,78	815338	NA	-	-
15	704	37	0	/	/	/	/	/
		5643	3698	50,68	45065564		133406	71211
					Total en Mt=45Mt			

Remarque : L'estimation de réserves locales effectuée n'a pas tenu compte des quantités déjà extraites à ce jour.

Les anciennes estimations n'ont été faites que jusqu'au niveau 570, qui est considéré comme dernier niveau d'exploitation à ciel ouvert.

Une fois les réserves globales calculées, on les classe selon l'ordre croissant de la variance relative (Tableau 19). D'après KREITER, la marge d'erreur sur l'évaluation des

réserves est variables ; pour les gisements métallifères elle est approximativement égale à : La catégorie A : +/-20% ; La catégorie B : +/-30% - 60% et la catégorie C : +/-60% - 90%.

Tableau. 19- Catégorisation des réserves du gisement de Douamis

Catégorie des réserves	Erreur relative (%)	Nombre de blocs	Réserves (%)
Catégorie A	0-20 (%)	889	17.41
Catégorie B	20-30 (%)	2812	55.08
Catégorie C₁	30-60 (%)	1397	27.36
Catégorie C₂	≥ 60 (%)	7	0.14

Etant donné les faibles quantités en Cu, il ne serait probablement pas rentable de les extraire, cependant afin d'obtenir une fonte à une teneur en Cu < 0.1%, il serait nécessaire de mélanger le minerai de fer cuivreux à un minerai de fer «sans cuivre».

CONCLUSIONS

Le présent travail a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le secteur de Douamis se trouve dans la terminaison Nord-Est du Djebel Ouenza. Il présente une structure en antiforme. La géologie du secteur de Douamis ne diffère guère de celle du massif de l'Ouenza. Il est composé du Trias, du Crétacé inférieur qui est représenté uniquement par l'Aptien.
- Le gisement de Douamis est affecté par des déformations souples et cassantes.
- L'étude sédimentologique a permis de confirmer la présence des différents faciès, qui sont : Calcaires à Orbitholines, à Polypiers, à Rudistes, à Miliolites et des calcaires bioclastiques.
- Deux types de minéralisation caractérisent le secteur de Douamis : Ferrifère qui est représentée par la sidérite, l'hématite, la goéthite et la limonite et la minéralisation polymétallique qui est représentée généralement par le cuivre gris et la galène.
- L'analyse statistique monovariée faite sur les teneurs de (1363) échantillons de carottes montre que le minerai présente une teneur moyenne de 50,98% en Fe et 0,224% en Cu. Le traitement bivarié et l'ACP montrent une corrélation négative significative entre Fe et les autres éléments analysés, qui sont Cu, SiO₂, S et CaO.
- Les variogrammes expérimentaux horizontaux et verticaux en 3D des teneurs en Fe, Cu et Si ont été calculés, tracés et ajustés par les modèles théoriques suivants :

Modèles d'ajustement	Variogrammes des teneurs en Fe		Variogrammes des teneurs en Cu		Variogrammes des teneurs en Si	
	Horizontal	vertical	Horizontal	vertical	Horizontal	vertical
Sphérique	/	/	/	/	/	/
Exponentiel			/			

- Les variogrammes théoriques d'ajustement ont été utilisés pour l'estimation des réserves locales par krigeage, des blocs de 25m x 25 m x 15 m. dans quinze niveaux différents. Au total les teneurs en Fe et en Cu de 5292 blocs de 25m x 25m x15m ont été krigées. Les variances de krigeage ont été calculées.
- La cartographie automatique des teneurs krigées en Fe, Cu, et de leurs erreurs d'estimation (Variance de krigeage) a été faite par niveau, ce qui a permis de mieux visualiser la répartition de ces variables dans les différents blocs et la localisation des zones les plus riches.

- Les réserves locales ont été estimées par krigeage à 45 Millions de tonnes (45 MT) pour les teneurs TFe>45%, contenant 133406 de tonnes de Cu et 71211 tonnes de Cu pour une teneur de coupure de 0,4% en Cu.
- Les réserves estimées sont classées selon l'ordre croissant de la variance relative comme suit : La catégorie A : 17.41% ; La catégorie B : 55.08%, la catégorie C : C₁ : 27.36% et C₂: 0.14%.
- Le calcul de réserves effectué n'a pas tenu compte des quantités déjà extraites à ce jour.
- Les anciennes estimations n'ont été faites que jusqu'au niveau 570, dernier niveau d'exploitation à ciel ouvert.
- Vu les faibles quantités en Cu, il ne serait pas rentable de les extraire, et afin d'obtenir une fonte à une teneur en Cu < 0.1%, il serait nécessaire de mélanger le minerai de fer cuivreux à un minerai de fer «sans cuivre».

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Amouri, M. (1986): Le gisement de Bou Jaber (Atlas Tunisien Central). Un exemple de minéralisation Pb-Zn-F-Ba dans un Paleokarst. *Rev. Sc. Terre. Tunisie. Vol 4. p p. 87-113.*

Akrour, H; Aoudjehane, M.; Thibiéroz, J.; Otmanine, A. et Touahri, B. (1991): Gîtes et indices de fluorine d'Algérie du Nord : Inventaire et réflexions. *Bull. Off. Nat. Géol. Algérie, vol.2, n°1, pp.11-28.*

Aoudjehane, M. (1990): Structures et gîtologie des concentrations de Zn-Pb et Fe dans le Nord-Est algérien. Exemple des gîtes de l'Ouenza, Ouasta et Boujaber. Analyses et recommandations de recherches. *Rapport de mission Nord-Est algérien, n°2, CRD/EREM, Boumerdes, Algérie, 54p.*

Aoudjehane M. (1991): Distribution des gîtes à Pb-Zn et fer sidéritique dans le N-E algérien. *In M. Pagel et J. Loroy (eds): Source, Transport and deposition of metals. Belkema, Rotterdam, pp. 419-422.*

Aoudjehane M., Bouzenoune A, Rouvier H. et Thibiéroz J. (1992): Halocinèse et dispositifs d'extrusions du Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE algérien). *Gèol. Médit., Marseille, XIX, pp, 273-287.*

Aoudjehane, M; Bouzenoune, A; Rouvier, H. et Thibiéroz, J. (1992): Halocinèse et dispositifs d'extrusion du Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE algérien), *Gèol. Médit., Marseille, XIX, 273-287.*

Beghoul, M. (1974): Etude géologique de la région des Hamimat (SE Constantinois). Application à la recherche pétrolière des confins algéro-tunisiens. *Thèse Doct. Ing., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, France. 140p. (inédit).*

Benlamri, L ; Brahimou, A: Contribution à l'étude géologique et gitologique de la partie Nord - Est de Djebel Ouenza (Secteur Hallatif- Douamis). *Mémoire Ing., Univ Badji Mokhtar, Annaba, Algérie. 95p.*

Bouzenoune, A. (1993): Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire : les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale). *Thèse Doct, d'Univ. Paris IV. P 206.*

Bouzenoune, A.; Rouvier, H.; Thibieroz, J. (1995): Trias de l'Ouenza : contexte diapirique, zonation minéralogique et conséquences métallogéniques. *Bull. Serv. Géol. Algérie, vol 6, n°1, pp3-24.*

Bouzenoune, A.; Rouvier H; Thibieroz, J. (2006): Chronologie relative et conditions de mise en place des minéralisations de massif de l'Ouenza (Algérie NE). *Bull. Serv. Géol. Algérie, vol 17, n°1, pp3-27.*

Castany, G. (1951): Etude géologique de l'Atlas tunisien oriental. *Annales Mines Géol., Tunis, n°8, 2 vol.*

Chauvet, P. (1999) : Aide mémoire de géostatistique linéaire. Application au domaine minier. *Les presses de l'école de Paris. 123p.*

Chevenine A., Popov Y., Douha Dj. et Benzeroual M. (1989): Rapport sur les résultats de l'étude géologique complémentaire des feuilles 124 (Oued Kebarite), 125 (Ouenza), 150 (El Ouinet) et 151

(Boukhadra) pour la préparation à l'édition des cartes géologiques au 1/50.000. *Partie 1, texte (1987-1988) O.R.G.M. Algérie (Rapport inédit).*

Chihi, L.; Dlala, M. et Ben Ayed, N. (1984): Manifestations tectoniques et polyphasées d'âge Crétacé moyen dans l'Atlas tunisien central (Région de Kasserine). *C.R. Acad. Sci. Paris, t. 298, série II, n°4, pp. 141-146.*

Chihi, L. et Ben Ayed, N. (1991): Le rôle de la fracturation précoce sur la distribution des structures récentes le long du décrochement de Kasserine. *Annales tectoniques, vol. V, n°1, pp.64-73.*

Chihi, L. (1984): Etude tectonique et microtectonique du graben de Kasserine (Tunisie centrale) et des structures voisines : J. Selloum et J. Maargaba. *Thèse 3^{ème} cycle, Géol. Struct. , Paris XI, 116 p.*

Chikaoui M. (1988): Succession distension-compression dans le sillon tunisien. Secteur de Nebeur, El Kef, Tunisie centre nord. *Thèse Sc. de la Terre, Univ. Nice, France, 143 p.*

Chikhi-Aouimeur, F. (1980): Les rudistes de l'Aptien supérieur de Djebel Ouenza (Algérie NE). *Paléontologie. Contexte stratigraphique et paléogéographique. Thèse 3^{ème} cycle, USTHB, Alger, 114p.*

David, L. (1956): Etude géologique des monts de la haute Medjerda. *Thèse Sci. Paris. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, n.s, Bull, n°11, 189p.*

Dubourdiou, G. (1956) : Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). *Thèse Sci. Paris. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, n.s, Bull., n°10, 659p.*

Dubourdiou, G. (1959): Esquisse géologique du Djebel Mesloula (Algérie orientale). *Publ. Serv. Carte géol. Algérie, n.s, Bull., n°21, 162p.*

Dubourdiou G. et Durozoy G. (1950): Observations tectoniques dans les environs de Tebessa et de l'Ouenza (Algérie). *Bulletin du Service Géologique de France, 5^{ème} série, t. XX, pp.257-266.*

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.*

Hatira, N. (1988) : Les concentrations de Zn, Pb, Sr, (Ba), dans le cortex des diapirs de Trias salifère; exemple du diapir de Sakièt-Koucha (Tunisie septentrionale). Comparaison avec d'autres massifs tunisiens et avec les cap-rocks de la Golf Coast (U.S.A). *Thèse Doct. Univ. Paris VI, 212p.*

Kazi Tani, N. (1986): Evolution géodynamique de la bordure nord-africaine : le domaine intraplaque nord-algérien. Approche mégaséquentielle. *Thèse Doct.ès Sciences, Univ. Pau et des pays de l'Adour, 2 tomes.*

Kowalski, W.M. et Hamimed, M. (2000): Diapirisme polyphasé ou glacier de sel albien ? Dilemme du Matériel triasique des confins algéro-tunisiens. *Bull. Serv. Géol. Algérie, vol 11, n°1, pp 29-60.*

Laatar, E. (1980): Gisement de Pb-Zn et diapirisme du Trias salifère en Tunisie septentrionale : Les concentrations péri-diapiriques du district minier de Nefate-Fedj el Adoum. *Thèse 3^e Cycle, Paris VI. 280p.*

- Madre, M. (1969):** Contribution à l'étude géologique et métallogénique du Djebel Ouenza (Est-algérien). *Thèse 3^{ème} cycle, Paris, France, 98p.*
- Masse, P. et Chikhi-Aouimeur, F. (1982):** La plate-forme carbonatée de l'Ouenza (Sud constantinois, Algérie). Organisation et dynamique durant l'Aptien supérieur. *Géol. Méditer., Marseille, vol. IX, n°3, pp. 259-267.*
- Masse P. et Thieuloy J.P. (1979):** Précisions sur l'âge des calcaires et des formations associées de l'Aptien Sud-constantinois (Algérie). Conséquences paléogéographiques. *Bull. Soc. Géol. Fr., vol. 7, n°1, pp.65-71.*
- Mezghache, H. (1989):** Cartographie automatique et interprétation géostatistique d'une campagne de prospection géochimique sur sol, application à la zone mercurielle Nord Nummidique (Algérie). *These de doctorat de L'INPL, institut national polytechnique de Lorraine, 178p*
- Nedjari-Bellahcene, S. et Nedjari, A. (1984):** Le Boukhadra : esquisse paléogéographique aptienne. *5^{ème} séminaire National des Sciences de la Terre, Alger, pp.102.*
- Orgeval, J.J; Giot, D; Karoui, J.; Monthel, J. et Sahli, R. (1986):** Le gisement de Zn-Pb de Bou Grine (Atlas tunisien). Description et historique de la découverte. *Chron. Rech. Min., n°482, pp. 5-32.*
- Othmanine, A. (1987) :** les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tébessa-Morsott. Relation entre la paléogéographie albo-aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. *Thèse Doct. 3^{ème} cycle, Univ. P. et M. Curie, Paris VI, n°87-58, Paris, 220p.*
- Perthuisot, V. (1978):** Dynamisme et pétrogenèse des extrusions triasiques en Tunisie septentrionale. *Trav. Labo. de Géol., ENS, Paris, n° 9, 312 p.*
- Perthuisot, V. et Rouvier, H. (1988):** Les relations métal-soufre-eau-hydrocarbures-microorganismes et la genèse des concentrations de sulfures et de soufre des diapirs évaporitiques. In : H. Péliissonnier & J.F. Sureau (éds) : Mobilité et concentration des métaux de base dans les couvertures sédimentaires : Manifestations, mécanismes, prospection. *Document du BRGM, n°183, pp. 269-278.*
- Perthuisot V. (1992):** Les diapirs du Maghreb central et oriental: Des diapirs variés, résultats d'une évolution structurale et pétrogénétique complexe. *Bull. Soc. Géol., France, t. 163, n°6, pp. 751-760.*
- Rouvier, H. (1977):** Géologie et l'extrême –Nord tunisien : tectoniques et paléogéographies superposés à l'extrémité orientale de la chaîne nord-maghrébine. *Thèse Un. P. et M. Curie, Paris. France. 898 p.*
- Rouvier, H.; Perthuisot, V. et Mansouri, A. (1985):** Pb-Zn deposits and salt bearing diapirs in Southern Europe and North Africa. *Econ. Geol., vol. 80, pp.666-687.*
- Rouvier, H. (1990):** Les concentrations polymétalliques liées aux diapirs évaporitiques des confins algéro-tunisiens. *Rapport interne EREM, Boumerdes-Algérie, 71 p.*
- Smati, A. (1986):** Les gisements de Pb-Ba et de Fe du djebel Slata (Tunisie du Centre-Nord) : Minéralisations épigénétiques dans le Crétacé néritique de la bordure d'un diapir de Trias. Gisement de Sidi Amor Ben Salem et de Slata fer. *Thèse Doct. 3^{ème} cycle, Lab. Géol. Appl., Univ. P. et M. Curie, Paris VI, 250 p.*

Thibiéroz, J. et Madre, M. (1976): Le gisement de sidérite du Djebel El Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golfe de la mer aptienne. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique du nord, Alger, t.67, fasc. 3-4, pp. 126-150.*

Vila, J.M. (1980): La chaîne alpine d'Algérie nord-orientale et des confins algéro-tunisiens. *Thèse Doct d'Etat, Univ. P. et M. Curie, Paris VI, 665p.*

Vila, J.M. (1994): Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasiques des confins algéro-tunisiens : Trias allochtone, « glaciers de sel » sous-marins et vrais diapirs. *Mém. Serv. Géol. Algérie, n°6, pp. 105-152.*

Vila, J.M. (1996): Halocinèse distensive albienne à « glacier de sel » sous-marin et plissements tertiaires du secteur Ouenza-Ladjabel-Méridéf. *Bull. Serv. Géol. Algérie, vol 7, n°1, pp3-34.*

Vila, J.M.; Benkhérouf, F; Charrière A. (1994): Interprétation du matériel triasique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens): un vaste « glacier de sel » sous-marin albien, à l'image des structures *off-shore* d'Aquitaine. *C.R. Acad. Sci. Paris, t. 318, série II, pp. 109-116.*

Vila J. M. et Charrière A. (1993): Découverte d'Albien calcaire et du Trias resédimenté au Dj. Boujaber (partie ouest Algérie); corrélation avec les forages et conséquences sur l'organisation du Crétacé inférieur des confins algéro-tunisiens. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, t.316, Série II, pp. 243-249.*

Vila J.M., Ben Youssef M., Charrière A., Chikhaoui M., Ghanmi M., Kamoun F., Peybernès B., Saadi J., Souquet P. et Zarbout M. (1994): Découverte en Tunisie, au SW du Kef, de matériel triasique interstratifié dans l'Albien: extension du domaine à "glaciers de sel" sous-marins des confins algéro-tunisiens. *C.R. Acad.Sci.Paris, t.318, sér.II, n°12, pp.1661-1667.*

Vila J. M., Ben Youcef M., Chikhaoui M. et Ghanmi M. (1996): Inversion tectonique tertiaire d'un "glacier de sel" sous-marins albien associé à un bloc basculé: le Jebel Slata (Tunisie). *6^{ème} RST, Orléans, 10-12 avril 1996. Soc. Géol., Fr., edit. Paris, Résumés, p. 141.*

Vila J. M., Ben Youcef M., Chikhaoui M., Ghanmi M. et Kechid-Benkhérouf F. (1996): Les grands <glaciers de sel > sous-marins albiens des confins algéro-tunisiens. *Entreprise Tunisienne d'Activités Pétrolières. Tunisie. Mém. N°10, p 273-322, 13fig.15 pl.*

Vila J. M., Ghanmi M. et Kechid-Benkhérouf F. (1996): Données nouvelles sur l'anticlinal d'el Ouasta-Sakiet (frontière est-algérienne) et interprétation de son Trias comme un "glacier de sel" sous-marin albien le long d'un bloc basculé, plissé au tertiaire. *C. R. Acad. Sci. Paris, sér. II a, t. 323, n°12, pp.1035-1042*

Vila, J.M. (2001): Les avantages d'une approche multi-source (biostratigraphie, sédimentologie, forages, profils sismiques et gravimétrie) pour l'étude de l'halocinèse 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-plies) des confins algéro-tunisiens. *Bull. Serv. Géol. Algérie, vol 12, n° 2, pp 129-167.*

Zouari, M. (1984): Etude structurale du jebel Chambi (Tunisie centrale). Relation entre la minéralisation et la structure. *Thèse Doct. 3^{ème} cycle. Univ Besançon, France, 93 p.*

Zouaoui, N. (1999) : Estimation locale des réserves en fer à l'aide de krigeage ordinaire du gisement de Douamis (Ouenza). *Mémoire Ing..Univ Badji Mokhtar, Annaba, Algérie. 44p.*