



UNIVERSITE CADY AYYAD
FACULTE DE SCIENCE ET TECHNIQUE GUELIZ
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

Mémoire de fin d'études

**Etude géophysique et géologique de la zone avale du
corps central du gisement de Hajar (massif des
Guemassa, Maroc)**

Réalisé par : Assma Bouiji

Encadré par :

Mr. Mohammed Jaffal (Professeur à FSTG)

Mr. Mohamed Hibti (Professeur à FSTG)

Mr. A. Khalifa (Cadre géologue CMG, Managem)

Date de soutenance : 27 /04/2016

Année universitaire : 2015 / 2016

Dédicaces

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A ma sœur et à mon frère.

A tous mes professeurs : Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A tous mes amis et mes collègues : Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

Remerciement

Avant de commencer la présentation de ce travail, je profite de l'occasion pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études. Je tiens à exprimer mes vifs remerciements pour mon grand et respectueux professeur, M. Mohamed Jaffal, d'avoir accepté de m'encadrer pour mon projet de fin d'études, ainsi que pour son soutien, ses remarques pertinentes et son encouragement. Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et toutes mes pensées de gratitude à M. Abdellali Khalifa, qui m'a accompagné de près durant tout ce travail, pour sa disponibilité, pour la confiance qu'il a su m'accorder et les conseils précieux qu'il m'a prodigués tout au long de la réalisation de ce projet et durant le stage. Je tiens à remercier aussi les membres de jury de m'avoir honoré en acceptant de juger notre modeste travail. Veuillez trouver ici le témoignage de notre respect le plus profond. Mes remerciements vont aussi à tous mes professeurs, enseignants et toutes les personnes qui m'ont soutenus jusqu'au bout.

Sommaire

INTRODUCTION (PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF DE L'ETUDE).....	6
I- CONTEXTE D'ETUDE	8
I.1- SITUATION GEOGRAPHIQUE	9
I.2- HISTORIQUE DE LA MINE DE HAJAR.....	10
I.3- CADRE GEOLOGIQUE DU GISEMENT DE HAJAR.....	11
I.3.1- Lithostratigraphie.....	13
I.3.2- Structuration.....	15
I.3.3- Métamorphisme.....	16
I.4- LE GISEMENT POLYMETALLIQUE DE HAJAR.....	17
I.4.1- Morphologie gisement.....	17
I.4.2- Altérations hydrothermales.....	18
I.4.3- Minéralisation sulfurée de Hajar.....	18
II- ETUDE GEOLOGIQUE ET METALLOGENIQUE.....	21
II.1.1- Description macroscopique du sondage.....	22
II.1.2-Etude microscopique	25
II.2- ETUDE METALLOGENIQUE.....	28
II.2.1-Etude des échantillons	28
II.2.1-Conclusion.....	30
III- ETUDE GEOPHYSIQUE.....	31
III.1- MODELISATION MAGNETIQUE.....	32
III.2- SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE.....	35
III.2.1- Généralités sur la susceptibilité magnétique.....	35
III.2.2- Réalisation des mesures de susceptibilité magnétique.....	37
III.2.3- Résultats et interprétation.....	39
IV- CONCLUSION ET PERSPECTIVE.....	48

Listes des figures

Figure I.1 : Situation géographique du gisement Hajar

Figure I.2 : Anomalie aéro-magnétique de Hajar

Figure I.3: Localisation du gisement polymétallique de Hajar dans le domaine des Guemassa (Extrait de la carte géologique d'Amezmiz 1/100 000)

Figure I.4 : Log synthétique du gisement Hajar (*document interne CMG*)

Figure II.a : les domaines structuraux au Maroc (*Michard, 1976*)

Figure II .b : (a) Localisation du massif Jebilet en Afrique (b) carte géologique générale des affleurements hercyniennes des Jebilet-Guemassa avec localisation des principaux gisements d'amas sulfurés, d'après Huvelin 1977 ; modifiée

Figure II.1.1 : Aspect macroscopique des faciès volcaniques et pélitiques observés dans le sondage 251

Figure II.1.1.a : Vue en coupe du sondage 251

Figure II.1.1.b : Le log lithologique du sondage FGC251

Figure II.1.1.c : Vue sur plan de sondage FGC251 (-78°)

Figure II.1.1 : Pérites gréseux à pyrrhotite disséminée affectées de veines et veinules à quartz

Figure II.1.2 : Disséminations d'oxydes de fer

Figure II.2.1.a : Pyrrhotite à inclusions de chalcopryrite observée dans la minéralisation

Figure II.2 .1.c : Cristaux de pyrite poussant sur l'association chalcopryrite – pyrrhotite

Figure II.2 .1.c : Cristaux de pyrite poussant sur l'association chalcopryrite - pyrrhotite

Figure III.1 : Interprétation de l'anomalie magnétique de Hajar par un prisme rectangulaire

Figure III.2 : Calcul de l'effet d'un bloc magnétique effondré à différentes profondeurs en aval du gisement de Hajar

Figure III.3 : Mesure de la susceptibilité magnétique à l'aide d'un Susceptibilimètre.

Figure III.4 : Emplacement des trois corps minéralisés de Hajar par rapport à l'anomalie magnétique qu'ils génèrent

Figure III.5 : Sondages utilisées pour l'étude par susceptibilité magnétique

Figure III.6 : Logs de susceptibilité des sondages FGC251, EC64 et GHC1

Figure III.7 : Logs de susceptibilité magnétique, géologie et géochimie des sondages FGC130 et FGC28

Figure III.8 : Représentation en perspective 3D illustrant les variations de la susceptibilité magnétique et l'emplacement des cinq sondages étudiés par rapport aux trois corps minéralisés de Hajar

Figure III.9 : Coupe N-S illustrant les variations de la susceptibilité magnétique et l'emplacement des cinq sondages étudiés par rapport au corps central du gisement de Hajar

Figure III.10 : Coupe N-S illustrant les variations de la susceptibilité magnétique et l'emplacement des cinq sondages étudiés par rapport au corps central du gisement de Hajar et au modèle magnétique calculé par inversion

INTRODUCTION (PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF DE L'ETUDE)

Les massifs hercyniens de la région de Marrakech (Guemassa et Jebilet) constituent l'une des plus importantes provinces métallogéniques du Maroc. Ces massifs abritent de nombreux gisements de sulfures massifs de type VMS (Hajar, Draa Sfar, Kettara, etc.). Au niveau des Jebilet, la découverte de tels gisements a été principalement guidée par les indices de surface que représentent les chapeaux de fer qui coiffent la plupart de ces gisements. Cependant, dans le domaine des Guemassa et du Haouz ces gisements sont souvent masqués par une importante pile sédimentaire plio- quaternaire et leur découverte à partir des chapeaux de fer associés devient quasi impossible, comme c'est le cas du gisement de Douar Lahjar (ou Hajar). En effet, ce gisement est masqué par moins de 120 mètres de recouvrement sédimentaire récent. Il n'aura pas vu le jour sans ses fortes teneurs en pyrrhotine responsable de l'importante anomalie magnétique qui lui est associée. C'est le contrôle par sondage de cette anomalie qui a conduit à la découverte du gisement de Hajar, d'où l'importance de la magnétométrie dans l'exploration minière à l'échelle de la province métallogénique des Guemassa-Jebilet et d'où l'intérêt qu'on pourrait porter à la susceptibilité magnétique en tant que propriété physique des roches étudiée en prospection magnétique.

Le gisement polymétallique caché de Hajar est de type volcano-sédimentaire hydrothermal. Il est encaissé dans les formations du viséen supérieur de la partie orientale du massif des Guemassa. Dans le cadre des travaux d'exploration visant la reconnaissance des extensions latérales et avale de ce gisement, une réinterprétation quantitative par inversion 3D de l'anomalie magnétique de Hajar a été récemment réalisée. Cette modélisation a permis de calculer une source magnétique de forme ovoïdale plus ou moins aplatie qui s'étend en profondeur au-delà des trois corps minéralisés reconnus par exploitation de ce gisement, à savoir les corps central, ouest descendier et nord-est.

Suite à cette modélisation, un sondage de reconnaissance ciblant le cœur la partie avale du corps magnétique ovoïdal calculé ont été réalisés. Ce sondage n'a pas intercepté de minéralisations sulfurées et n'a donc pas permis d'expliquer les résultats de la modélisation. L'objectif de cette étude est d'analyser les résultats de ce sondage de point de vue géologique (lithologie, minéralogie et métallogénie) et géophysique (susceptibilité magnétique). Pour ce faire, nous avons prélevés des échantillons à plusieurs niveaux de ce sondage et d'autres plus anciens en vue de la réalisation des sections polies pour étude métallogénie. Nous avons également mené une campagne de mesures de susceptibilité magnétique sur les carottes de cinq sondages incluant celui réalisé récemment.

Première partie : Contexte de l'étude

I- CONTEXTE DE L'ETUDE

I.1- SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le gisement polymétallique de Hajjar se situe dans la plaine du Haouz, à 35 Km au Sud de Marrakech. Il est localisé dans une zone où le socle paléozoïque est masqué par une importante couverture sédimentaire mio-pliocène et n'affleure que localement sous forme de boutonnières. Dans cette partie du Haouz, le paysage morphologique est constitué d'un ensemble de petites collines dont l'altitude moyenne varie de 600 à 800m (Fig. I.1).

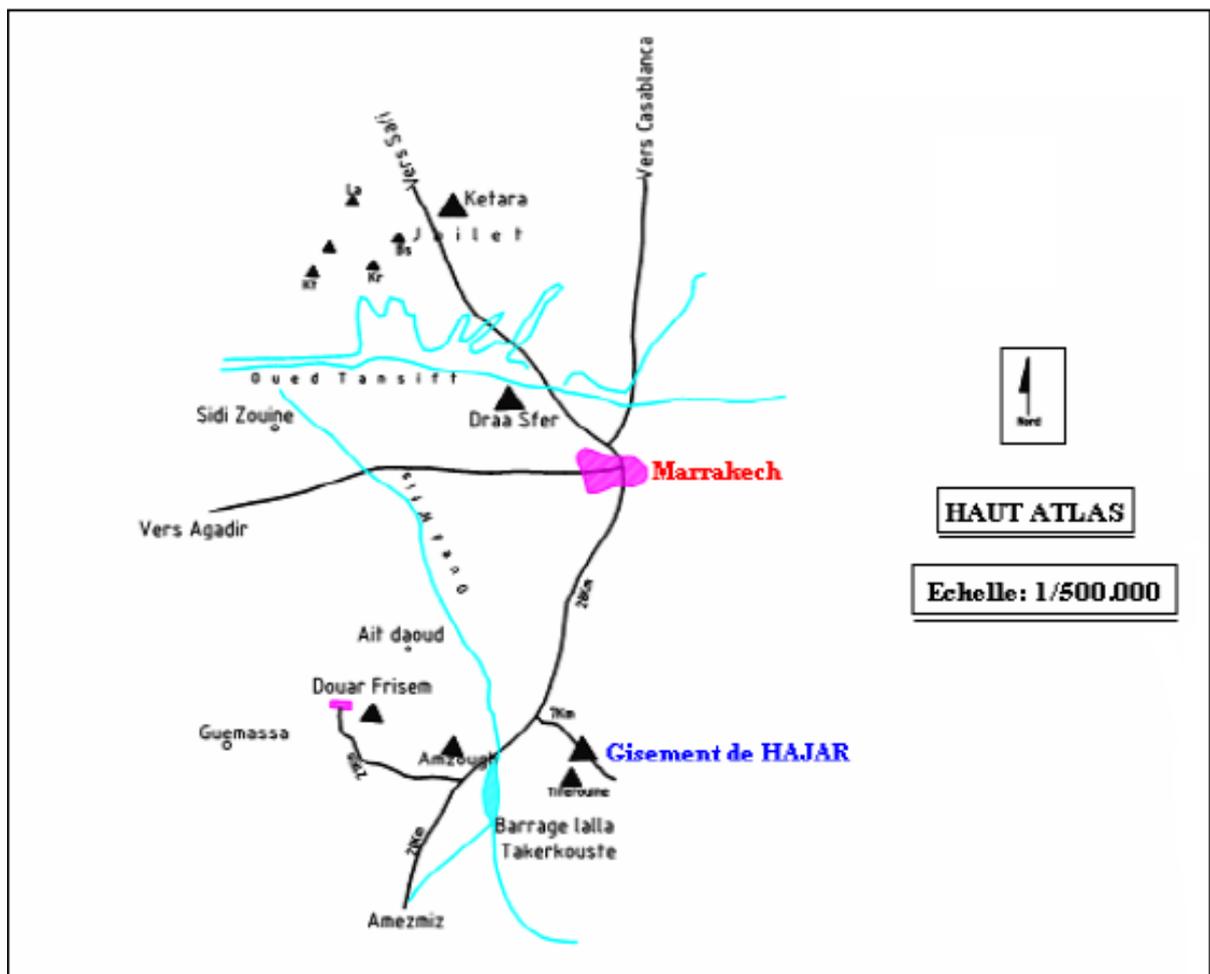


Figure I.1 : Situation géographique du gisement Hajjar

I.2- HISTORIQUE DE LA MINE DE HAJAR

Depuis la découverte du gisement de Kettara, la province des Jebilets et de Guemassa a connu plusieurs travaux d'exploration visant la recherche d'autres gisements. En effet cette région a été le siège de plusieurs campagnes géophysiques depuis les années 1930 ; dans le cadre de programmes lancés par la direction de la géologie du ministère de l'énergie et des mines, BRPM et par BRGM.

L'anomalie magnétique de Hajjar a été mise en évidence pour la première fois en 1968 grâce à un levé aéroporté (Fig. I.2). Cette anomalie a été contrôlée au sol dans le cadre d'un programme d'exploration géologique mené au début des années 1980. Le premier sondage de contrôle (HS1), réalisé en 1984, a recoupé 118 m de sulfures massifs sous une couverture sédimentaire 158 m. Depuis cette découverte et jusqu'au début de l'année 1988, le Bureau de Recherche et Participation Minière (BRPM) a multiplié et intensifié les travaux de recherche (sondages carottés et travaux miniers), dans le but de:

- Comprendre le contexte géologique général ;
- Cerner la géométrie du corps minéralisé ;
- Préciser sa composition et ses réserves.

La compagnie minière des Guemassa (CMG), créée en février 1988, a repris les travaux miniers de reconnaissance. Elle a réalisé l'étude de faisabilité puis elle a lancé les travaux d'infrastructure en parallèle avec le démarrage d'une usine pilote. La production a démarré en novembre 1992 à raison 2400 tonnes par jour.

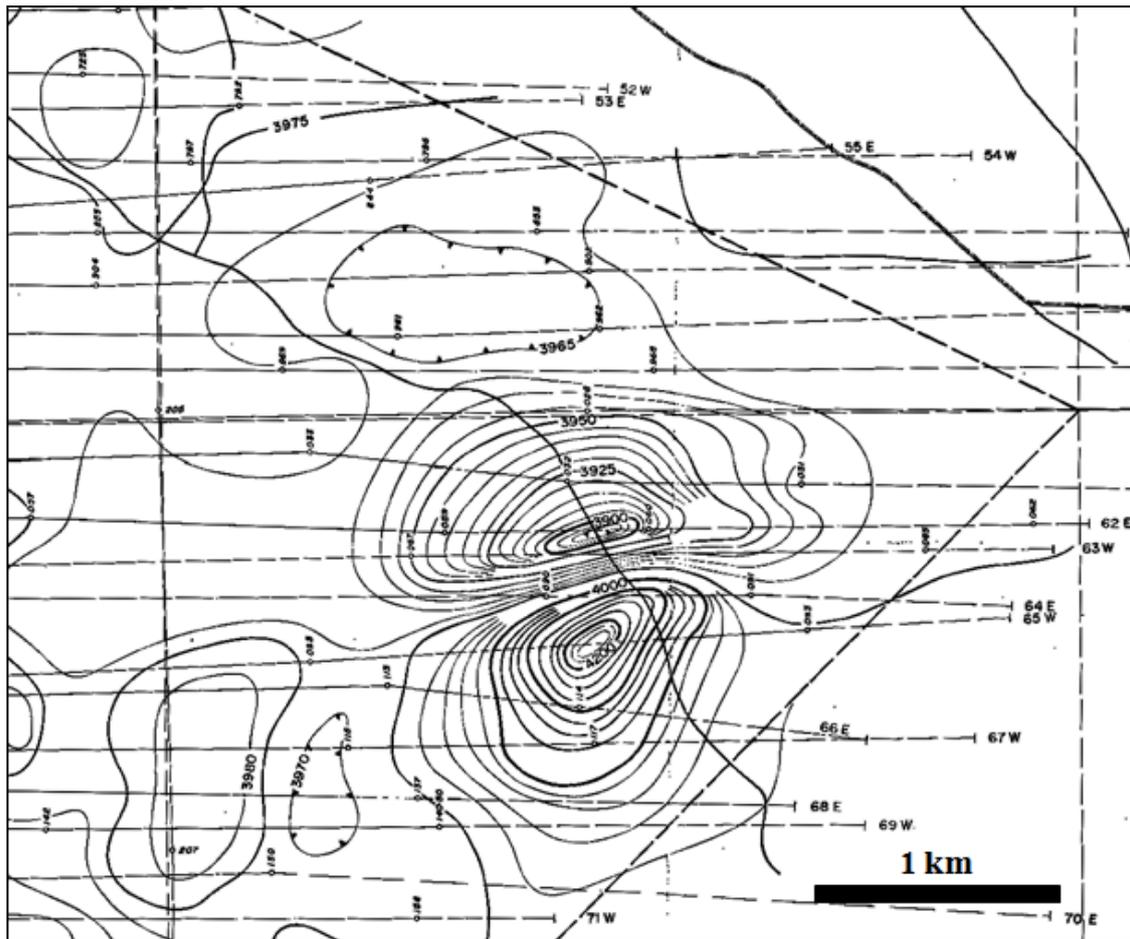


Figure I.2 : Anomalie aéro-magnétique de Hajar

I.3- CADRE GEOLOGIQUE DU GISEMENT DE HAJAR

Le gisement polymétallique de Hajar se situe dans le domaine des Guemassa orientales ou domaine d'Imarine qui fait partie de la Meseta occidentale (Fig. I.3). Ce gisement est encaissé dans un socle paléozoïque recouvert en discordance par des séries méso-cénozoïques non déformées. D'après les données stratigraphiques et tectoniques, le massif de Guemassa appartient à la meseta marocaine occidentale, caractérisée par une sédimentation quasi continue du Cambrien au Westphalien et par une phase tectono- métamorphique intra westphalienne qui s'intensifie le long des zones de cisaillement. Dans ce massif, le socle d'âge viséen n'affleure que sous forme de boutonnière au sein d'une couverture miopliocène et quaternaire. Le degré de métamorphisme, dans le domaine des Guemassa, indique un contexte épizonal, ce

métamorphisme régionale montre une paragenèse à quartz, chlorite, albite et muscovite (Boummane 1987, Soulaïmani 1991). Quant au magmatisme, il se présente sous forme d'intercalations de roches acides en lames et/ou en sills (volcanisme effusif et fissural), rarement sous forme de tufs et tuffites acides (Maier et al 1986 ; Gros et al 1986). Le domaine d'Imarine est constitué d'une série tuffitique mise en place par écoulement turbiditique au pied d'un talus.

Le gisement polymétallique de Hajar est situé sous 120 mètres environ de couverture mio-pliocène et quaternaire. La mise en place de ce gisement est associée à une activité volcanique qui se manifeste par des roches, de nature essentiellement felsique, affectées par une bréchification hydroclastique indiquant une mise en place dans un milieu sous aquatique. Parmi ces roches, on distingue : des laves Rhyolitiques, des brèches volcaniques, des faciès volcanoclastiques incluant des tufs acides et des coulées pyroclastiques.

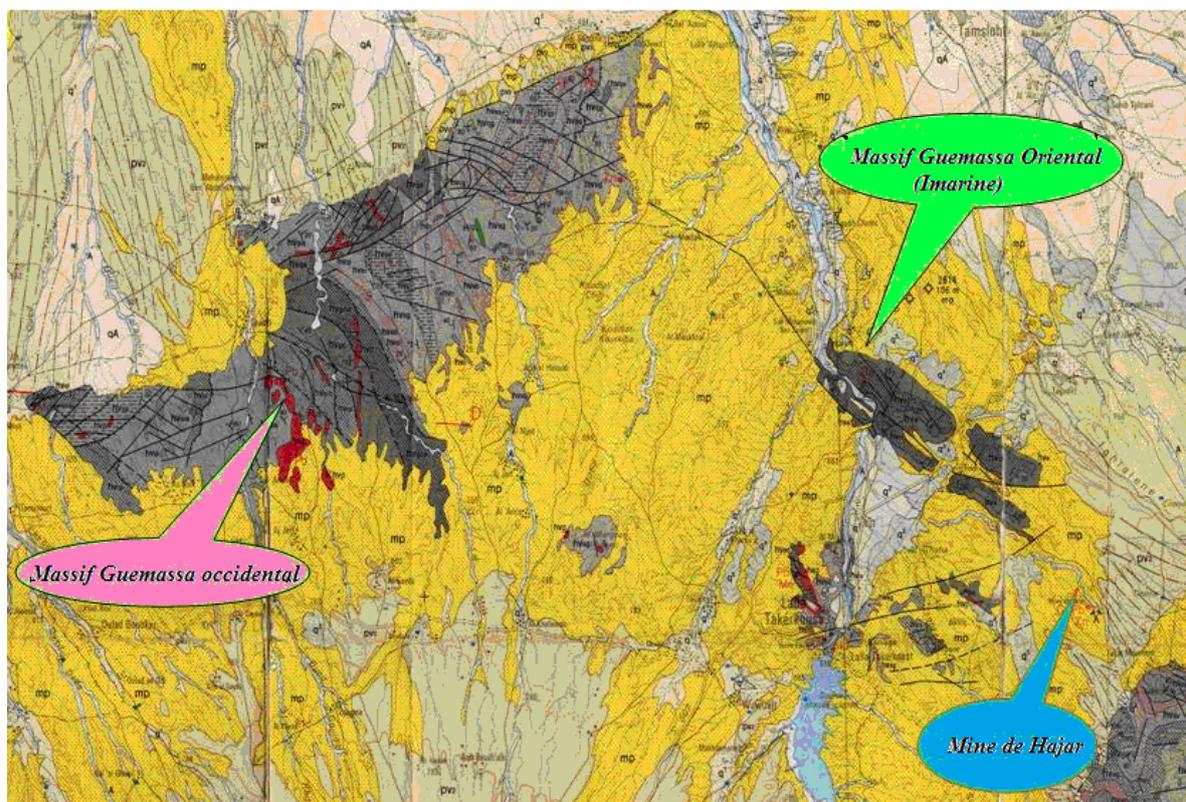


Figure I.3: Localisation du gisement polymétallique de Hajar dans le domaine des Guemassa (Extrait de la carte géologique d'Amez Miz 1/100 000).

I.3.1- Lithostratigraphie

Le log stratigraphique du secteur minier de Hajjar montre la succession de trois unités lithologiques qui sont de bas en haut (Fig. I.4) :

- **Une unité basale** à caractère volcanique et volcano sédimentaire (mur de la minéralisation), elle peut atteindre 400m. Ce complexe volcanique est très puissant dans sa partie centrale alors que sa puissance est variable latéralement (passage aux pélites noirs très fines et à disséminations de sulfures). Il est recouvert par une formation volcano sédimentaire constituée d'une alternance silto-gréseuse et pyroclastique avec des passées de brèches volcaniques de puissance variable (centimétrique à métrique). Les sulfures sous forme de lentilles litées et disséminées, sont très abondants dans cette unité.

- **Une unité médiane** représentée par le corps minéralisé et les sédiments exhalatifs associés. C'est un amas massif dans lequel apparaissent des lambeaux d'encaissant sédimentaire de dimensions très variables (centimétriques à pluri métrique). Latéralement, on note la disparition de la minéralisation, et par conséquent l'unité basale passe verticalement à l'unité sommitale. La minéralisation sulfurée repose au niveau de la partie centrale de l'unité médiane sur une zone bréchique (50 à 80m) constituant le stockwork. Sous l'amas massif et latéralement apparaissent des sédiments exhalatifs (chlorite, biotite et grenatite).

- **Une unité sommitale** de nature détritique représentant le toit de la masse minéralisée. Elle est puissante d'environ 200mètres et formée d'un terme grésosilteux à intercalations de lentilles calcaires à organismes. Dans sa partie orientale, elle présente des récurrences pyroclastiques, le tout est coiffé par des calcaires gréseux.

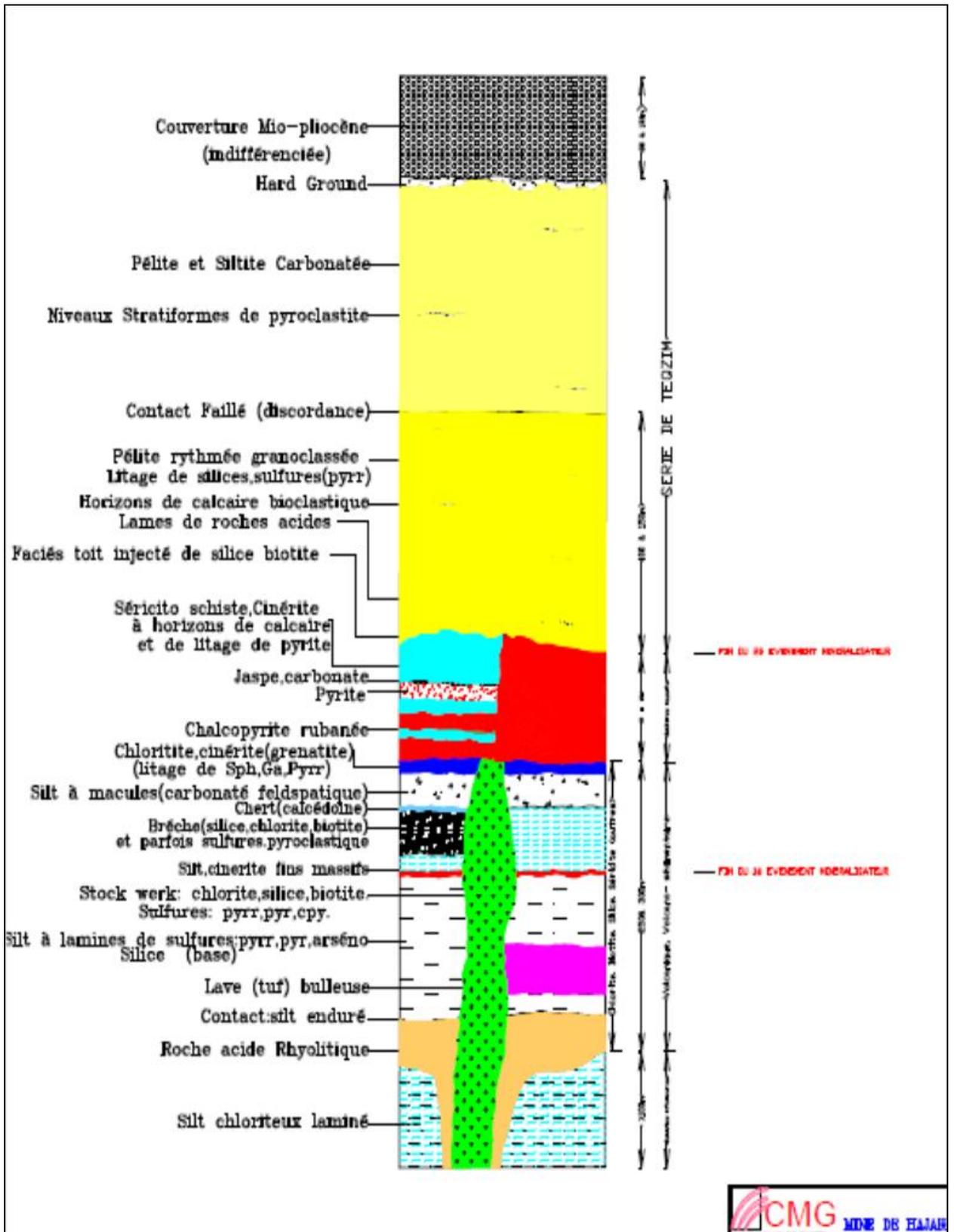


Figure I.4 : Log synthétique du gisement Hajar (document interne CMG)

I.3.2- Structuration

Les études tectoniques menées dans le domaine des Guemassa ont permis d'identifier plusieurs structures et microstructures dont l'analyse révèle l'existence de trois phases principales de déformation superposées (Soulaimani, 1991 ; Hibti, 1993, Hmeurras, 1997). Ces phases ont joué un rôle majeur dans la configuration actuelle des corps minéralisés qui constitue le gisement de Hajar (Fig. I.5) :

- Une première phase antéschisteuse D0 qui se matérialise par la présence de failles normales de direction subméridienne (NS à NE-SW). Les slumps et les flexures donnent à cette phase un caractère synsédimentaire.
- Une phase majeure D1 responsable de la structuration principale de l'amas sulfuré et générant des plis P1 localisés surtout dans la série basale. Elle affecte aussi bien le niveau minéralisé que l'encaissant sédimentaire et développe une schistosité de flux S1 de direction sub-méridienne soulignée par l'étirement des sulfures au niveau du minerai et au niveau de l'encaissant.
- Une phase synschisteuse D2 plicative et cassante caractérisée par des plissements P2 de direction NE-SW affectant la schistosité S1. Ce sont des plis isoclinaux qui engagent à la fois le minerai et l'encaissant.

La phase D2 développe une schistosité de fracture S2 de direction moyenne NE-SW avec un fort pendage vers l'ouest, matérialisée par la réorientation des sulfures étirés lors de la phase D1.

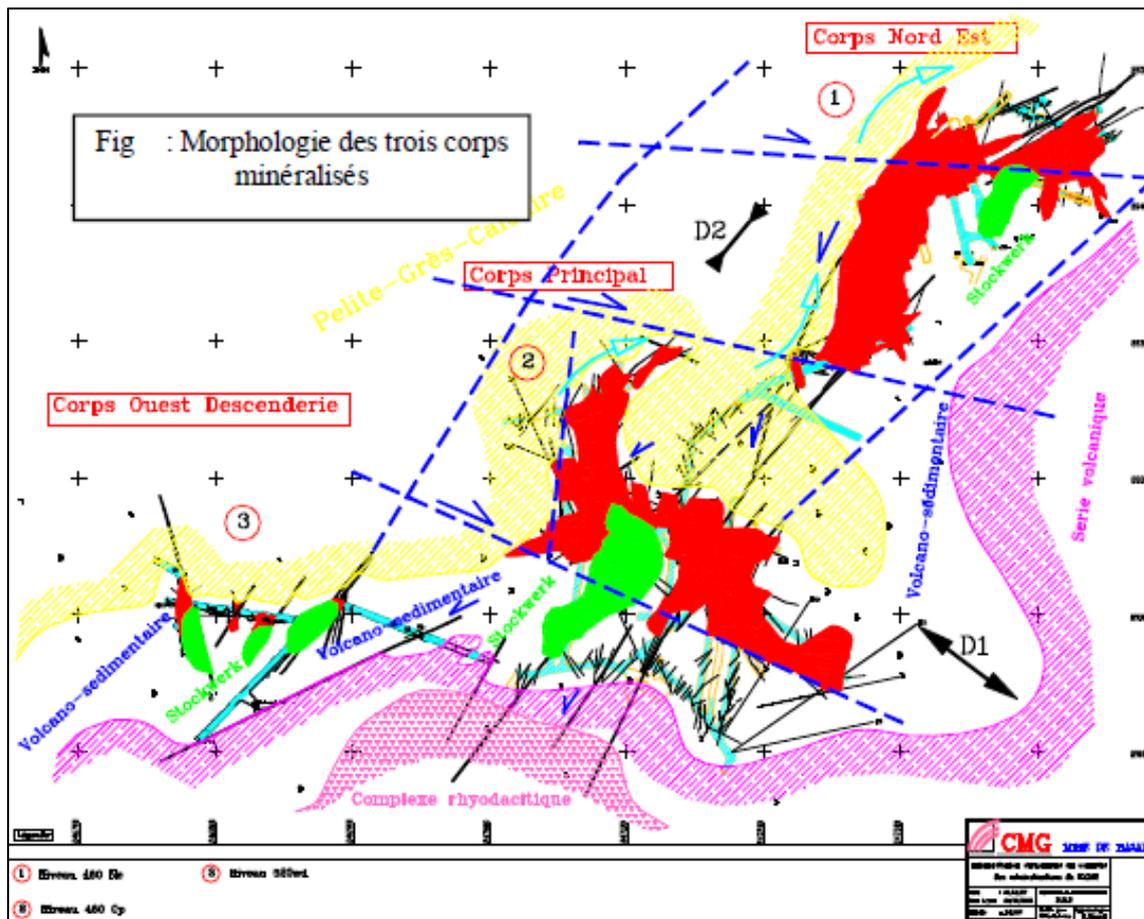


Figure I.5 : Morphologie des trois corps minéralisés (document interne de CMG)

I.3.3- Métamorphisme

L'ensemble des travaux ayant porté sur le domaine de N'fis (Haimeur 1988 ; Soulaïmani, 1991 ; Hibti, 1993) montrent que ce domaine a connu un métamorphisme général de type épizonal dont la paragenèse est essentiellement à quartz, chlorite, albite et muscovite. Cependant l'existence d'un métamorphisme de contact reste encore sujette à discussion. Les indices de ce type de métamorphisme sont la présence des biotites et de taches non identifiées. En liaison probable avec ce métamorphisme de contact à Hajjar on note :

- le développement de la biotite au dépend d'un chlorite précoce.
- la présence d'amphibole de type cummingtonite localisée et poussant sur les chloritites à sulfures. (Hibti, 2001)

- la présence d'anthophyllite (Zouhry, 1998), également statique se développant sur les chlorites et les sulfures associés.

I.4- LE GISEMENT POLYMETALLIQUE DE HAJJAR

Le gisement polymétallique de Hajjar est le premier de ce type (VMS) au Maroc. Il est classé parmi les dix premiers gisements de Zn au monde (Hibti, 2001). Le modèle admis pour ce gisement est celui d'un amas sulfuré massif enraciné sur son stockwork, avec une zonalité caractéristique à l'intérieur de l'amas. Ce modèle est caractérisé d'une part par une prédominance du Zn et du Pb latéralement et au sommet du gisement. Le modèle amas sulfuré centré sur son stockwork ainsi que la zonalité ne sont pas toujours évidents à cause de la complexité des dépôts et de la morphologie.

I.4.1- Morphologie gisement

Le gisement de Hajjar est constitué de trois corps minéralisés baptisés :

- corps principal,
- corps ouest descendierie
- et corps nord-est.

Le corps principal est un amas puissant d'environ 50 à 90 m, occupant la charnière d'une mégastructure plissée pendant la phase D2. Il est allongé en direction NW-SE sur 250 à 350m et étendu sur plus de 300m avec un pendage d'environ 45° à 55° vers le Nord (Hibti ; 1993). La minéralisation présente essentiellement une structuration en amas ou en lentilles intercalées dans des sédiments exhalatifs. La minéralisation massive occupe presque toute la partie orientale alors que la minéralisation lenticulaire est localisée au niveau de la partie occidentale.

I.4.2- Altérations hydrothermales

Le gisement de Hajjar est caractérisé par des altérations hydrothermales qui se traduisent par une chloritisation, une biotitisation et une silicification au mur de l'amas sulfuré ainsi que dans les zones de stockwork. Le toit de l'amas est marqué par une séricitisation. (Hibti ,2001)

I.4.3- Minéralisation sulfurée de Hajjar

En plus de la minéralisation stratiforme, les faciès encaissants, surtout ceux qui sont situés au mur de la minéralisation, sont très riches en sulfures. Ils se présentent sous plusieurs aspects : lités, disséminés ou en remplissage de fractures tardives. La minéralisation est observée dans la quasi-totalité des faciès encaissants, elle se présente sous plusieurs aspects :

- ❖ Microstructures millimétriques à centimétriques et parfois réorientées suivant les plans de schistosité.
- ❖ Minéralisation à pyrrhotite et sphalérite, rarement à galène et chalcopryrite, ainsi que quelques cristaux automorphes d'arsénopyrite, en mouches millimétriques ou en microlits plissés matérialisant la stratification dans l'encaissant.
- ❖ Minéralisation filonienne essentiellement pyriteuse accompagnée parfois de chalcopryrite.

Après la mise en place de la minéralisation et suite aux événements tectoniques ultérieurs (hercynien majeur et atlasique), l'amas sulfuré de Hajjar a subi un basculement d'environ 45° à 55° vers le nord. De même, une zonalité d'altération a été développée et se traduit par :

- une zone d'oxydation : on y assiste à une oxydation des sulfures et principalement la pyrite. C'est une zone très riche en minéraux d'oxydation (oxydes et hydroxydes de fer) en particulier les ocre (rouges et jaunes), cette zone a une puissance de 25 à 35 mètres, sa base est marquée par des teneurs élevées en Cu (3,9%), Pb (12,8%) et Ag (138 à 370g/t).

- une zone de cémentation : ou zone d'enrichissement secondaire, installée sous la zone d'oxydation. Elle est enrichie en éléments métalliques (pyrite et métaux de base) transportées lors du lessivage supergène, elle présente une puissance d'environ 10 à 15 mètres.
- un protore : c'est la partie la plus développée du gisement, elle s'enracine sur plus de 200 mètres. La minéralisation est constituée principalement de pyrrhotite (environ 75 à 95% du minerai) avec d'autres phases telles que la sphalérite, la chalcopyrite, la galène, la pyrite et l'arsénopyrite.

Cette minéralisation primaire est caractérisée par cinq types de minerai (Hibti, 2001) :

- Minerai massif à structure rubanée : c'est la minéralisation la plus intéressante du point de vue économique, elle est constituée essentiellement de pyrrhotite, pyrite, sphalérite, galène, chalcopyrite et arsénopyrite. Ces minéraux s'organisent en rubans de puissance variable (millimétrique à plurimétrique) et continue sur une dizaine de mètres. Les minéraux de gangue tels que la biotite, le talc, la muscovite, la chlorite et des traînées de quartz recristallisées sont aussi étirés parallèlement à la schistosité.
- Minerai recristallisé ou à gros cristaux : localisé particulièrement au voisinage des structures faillées NE-SW, il est formé de cristaux de sphalérite et de galène dont la taille peut atteindre plusieurs centimètres.
- Minerai lité : constitué de lits de sulfures de puissance variable (millimétrique à centimétrique) parfois microplissés. En fonction de la minéralogie, deux types peuvent être distingués :
- Minerai pyriteux : localisé à la base de la masse minéralisée et au niveau de la partie ouest du gisement, en plus de la pyrite, on note l'existence de pyrrhotite, chalcopyrite et rarement de sphalérite et galène. Ce type de minerai localisé au sommet de la masse minéralisée, constitué par une dominance de sphalérite et de galène et par endroits de la pyrrhotite et de la chalcopyrite.

- Minerai bréchifié : décrit au niveau de la partie orientale du gisement. Il s'agit de fragments de 0,5 à 3 cm de minerai à pyrrhotite, chalcopyrite et /ou à sphalérite et galène.

Le gisement de Hajjar est qualifié de type VMS compte tenu de l'ensemble de ses caractéristiques, en particulier la nature du volcanisme associé, le type d'hydrothermalisme, les zonalités ainsi que les altérations hydrothermales (chloritisation, séricitisation, silicification, etc.).

*Deuxième partie : Etude
géologique et métallogénie*

II.1.1-DESCRIPTION MACROSCOPIQUE DU SONDAGE 251 :

Conformément à ce qui a été souligné précédemment notre travail concerne l'étude géologique du sondage carotté FGC251 / (-78°) réalisé au niveau 400/CP. Ce sondage, réalisé du côté nord-ouest du corps, a pour objectif de définir l'évolution de la minéralisation en aval et en même temps de tester l'hypothèse de l'effondrement du corps principal.

Description lithologique :

Sur le plan lithologique le sondage étudié montre la succession de formation pélitique avec des récurrences volcaniques (Fig. II.1.1.a). A la côte 453.00m le sondage est encore dans les pélites noires.



Figure II.1.1 : Aspect macroscopique des faciès volcaniques et pélitiques observés dans le sondage 251.

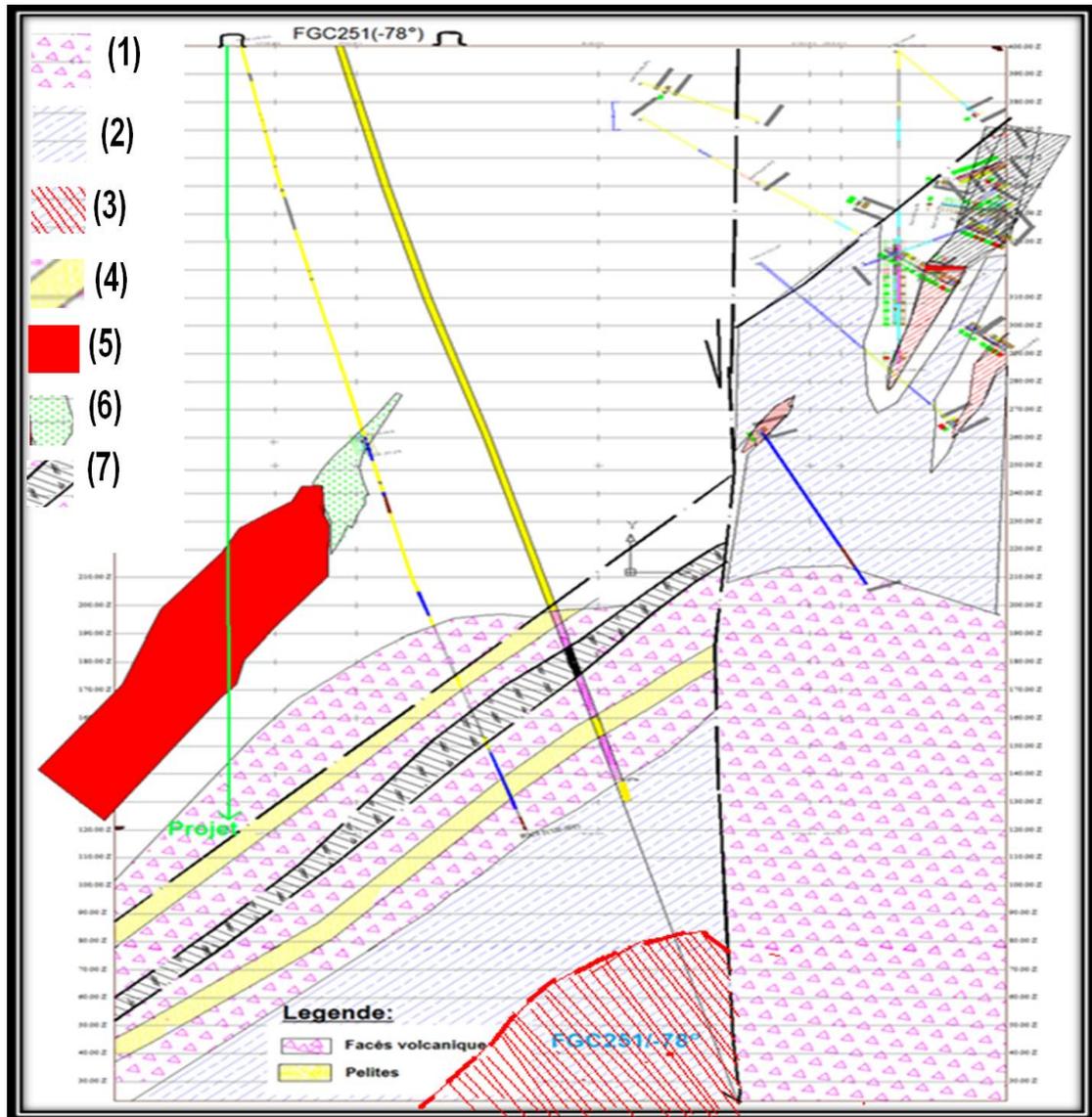


Figure II.1.1.a : Vue en coupe du sondage 251(légende : (1) Faciès volcanique ,(2) schistes chloriteux , (3)et (5) Minerai massif , (4) Pélites , (6) Stok-work , (7) Remblai mécanique)

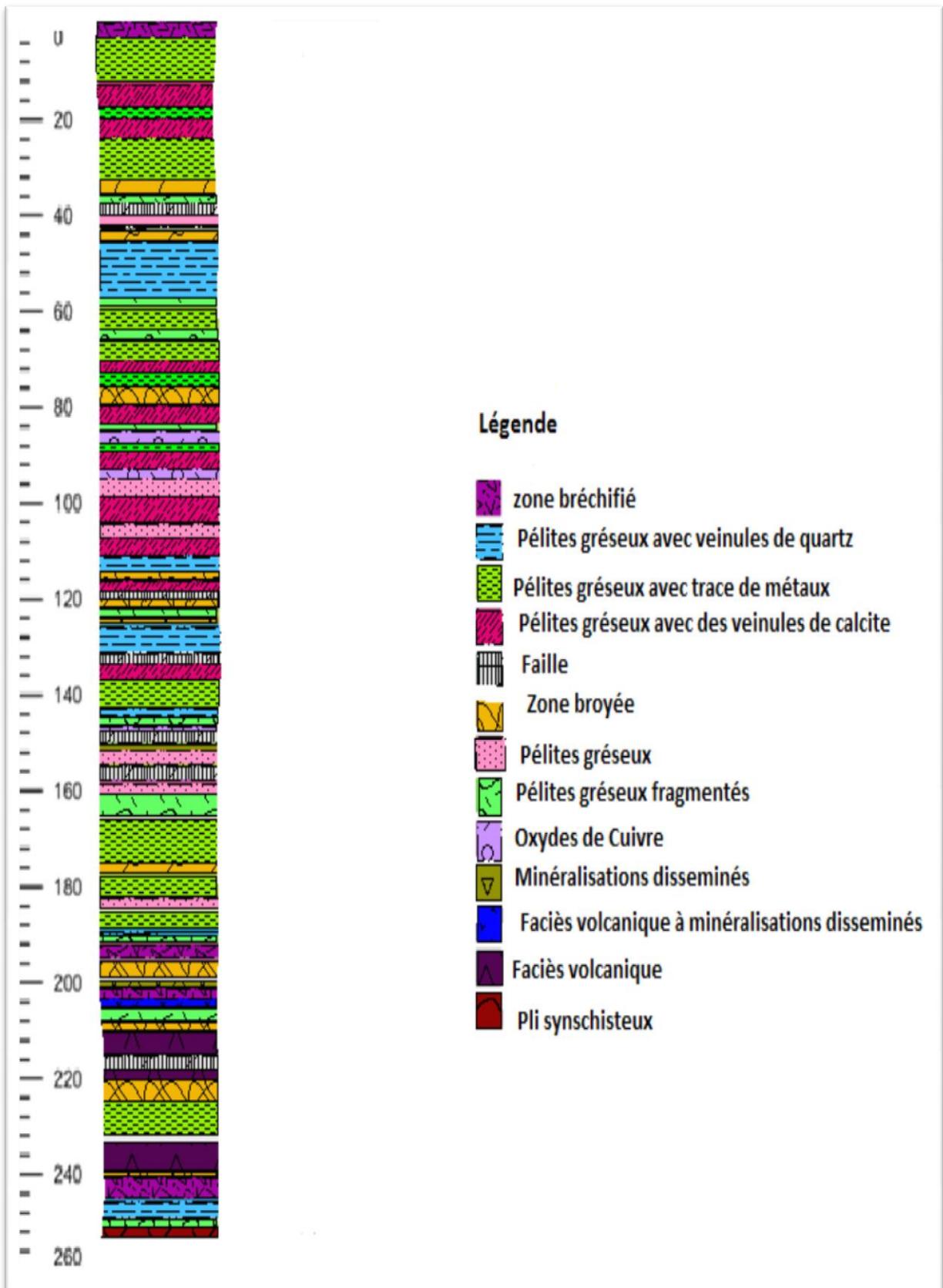


Figure II.1.1.b : Le log lithologique du sondage FGC251

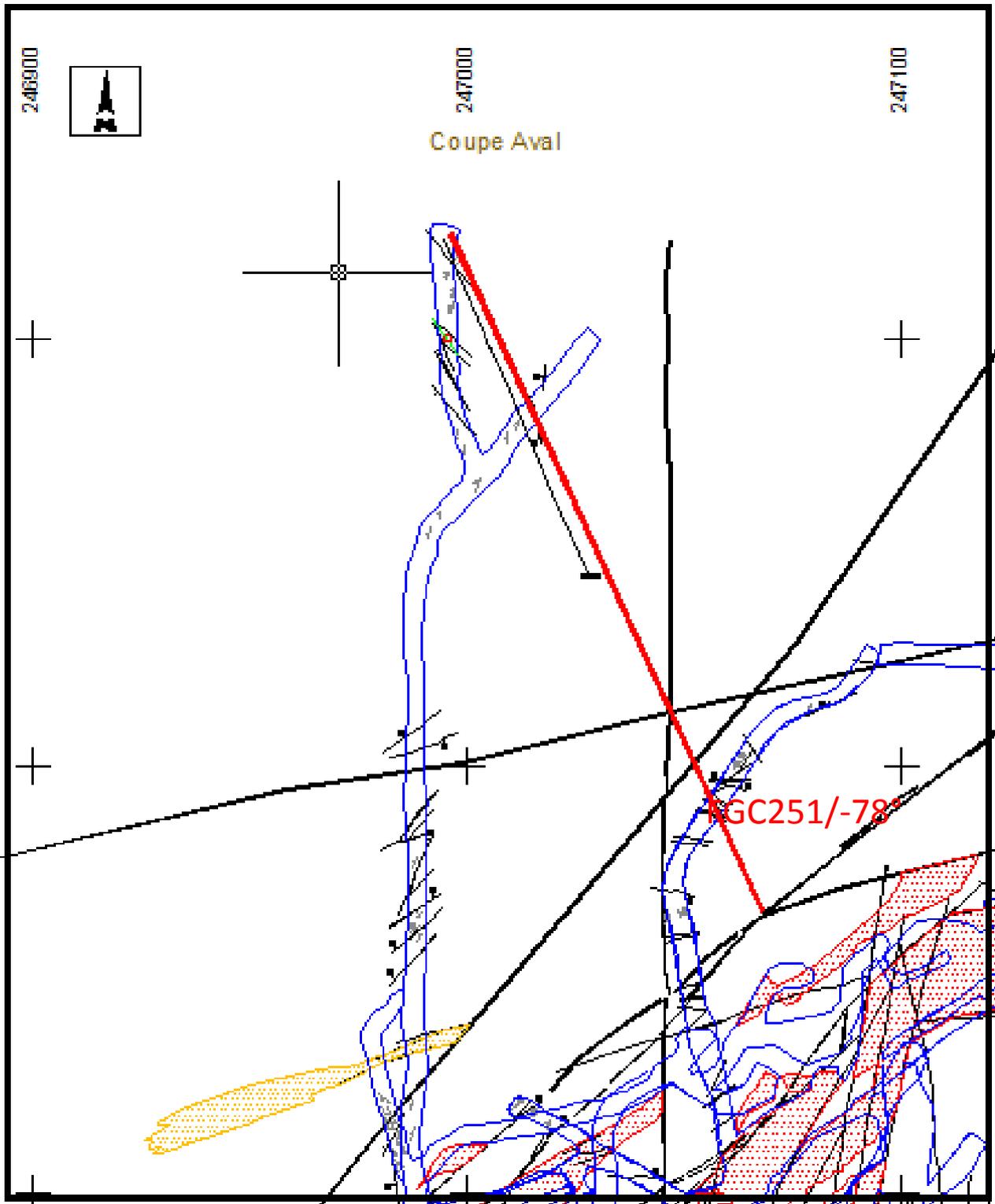


Figure II.1.1.c : Vue sur plan de sondage FGC251 (-78°)

L'étude macroscopique des différents échantillons révèle l'existence d'une monotonie de faciès, représentés principalement par des pélites gréseuse .En comparant cette description à la série encaissante on note la présence du même faciès au niveau de la partie basale de cette dernière.



Figure II.1.1 : Pélites gréseux à pyrrhotite disséminée affectées de veines et veinules à quartz.

II.1.2-Etude microscopique :

L'étude réalisée au cours de ce travail a pour objectif de voir l'aspect macroscopique et microscopique de différents faciès échantillonnés au niveau du sondage FGC251, en fonction de leurs différentes susceptibilités.

-Echantillon 40 du sondage FGC251 (173-174m) :

L'examen macroscopique de cet échantillon montre qu'il s'agit d'une minéralisation remobilisée.

L'étude minéralogique de cet échantillon montre la présence d'une paragenèse à pyrrhotite, associée localement à de la chalcopryrite en fines inclusions. Localement, on observe des fissures fines à quartz.

-Echantillon 41 du sondage FGC251 (178-179m) :

Cet échantillon montre une paragenèse similaire au précédent. Il est dominé par la pyrrhotite en plages millimétriques étirées selon la direction de la déformation régionale . Certaines plages de pyrrhotite renferment des inclusions de chalcopryrite.

-Echantillon 48 du sondage FGC251 (213-214m) :

Il s'agit d'une minéralisation disséminée dans laquelle la minéralogie comporte la chalcopryrite, la pyrrhotite et la pyrite.

-Echantillon 54 du sondage FGC251 (234-235 m) :

Cet échantillon est caractérisé par une minéralisation disséminée très pauvre dominée par les oxydes et hydroxydes de fer. Localement, des mouches très fines de chalcopryrite apparaissent également disséminées avec la pyrite.

-Echantillon 55 du sondage FGC251 (238-239 m) :

Dans cet échantillon on remarque de fortes disséminations d'oxydes et hydroxydes de fer.

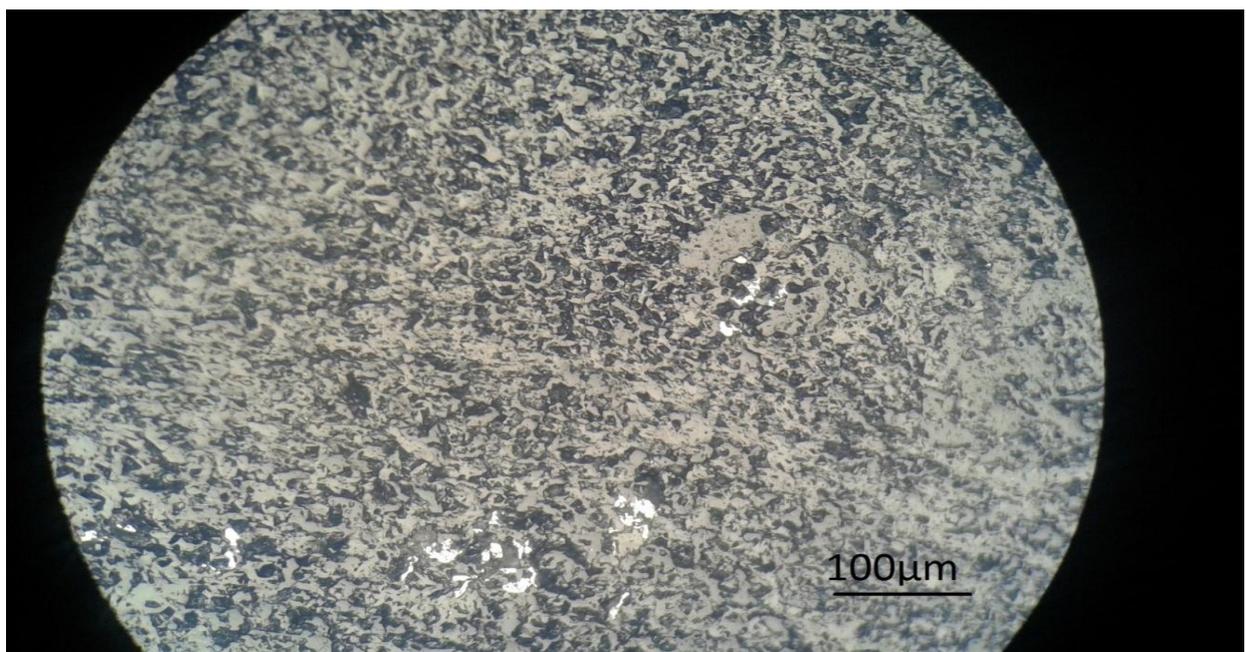


Figure II.1.2 : Disséminations d'oxydes de fer

II.2-ETUDE METALLOGENIQUE

L'étude métallogénique a été réalisée sur des sections polies, confectionnées à partir des échantillons prélevés sur des sondages carottés au niveau de quelques zones où la susceptibilité est variable.

II .2 .1-Etude des échantillons

L'étude menée sur les sondages carottés EC64,FCG130 et FGC251, et l'analyse microscopique ont montré une paragenèse dominée par la pyrrhotite et la chalcopryrite auxquelles s'associent la pyrite et la sphalérite. La gangue dominée par le quartz, la chlorite et les fragments de pélites. Dans certaines zones on note la présence de veines et veinules à quartz.

La pyrrhotite :

La pyrrhotite est la phase métallique principale de ce minerai puisqu'elle représente approximativement la quasi-totalité du minerai rencontré. Elle représente le composant principal des sulfures dans le secteur d'étude. Généralement elle est massive. Au microscope, la pyrrhotite apparaît remobilisée selon la schistosité régionale. Elle forme généralement des plages millimétriques à micrométriques où on retrouve souvent des inclusions de chalcopryrite et de sphalérite. Localement, la pyrite apparaît tardive par rapport à la pyrrhotite. Figure (II.2.1.a).

La chalcopryrite : Elle est moins abondante que la pyrrhotite et se présente, le plus souvent en inclusions dans les autres espèces minérales, parfois associée intimement à la pyrrhotite. Figure (II.2 .1.b)

La sphalérite : Elle a été rarement rencontrée sous forme d'inclusions très fines au sein de la chalcopryrite et/ou la pyrrhotite.

La pyrite :Ce sulfure de fer est moyennement représenté au niveau des sections. La pyrite se présente généralement sous forme de cristaux xénomorphes poussant sur les autres sulfures. L'examen des relations texturales atteste d'un caractère tardif de la pyrite Figure (II.2 .1.c).

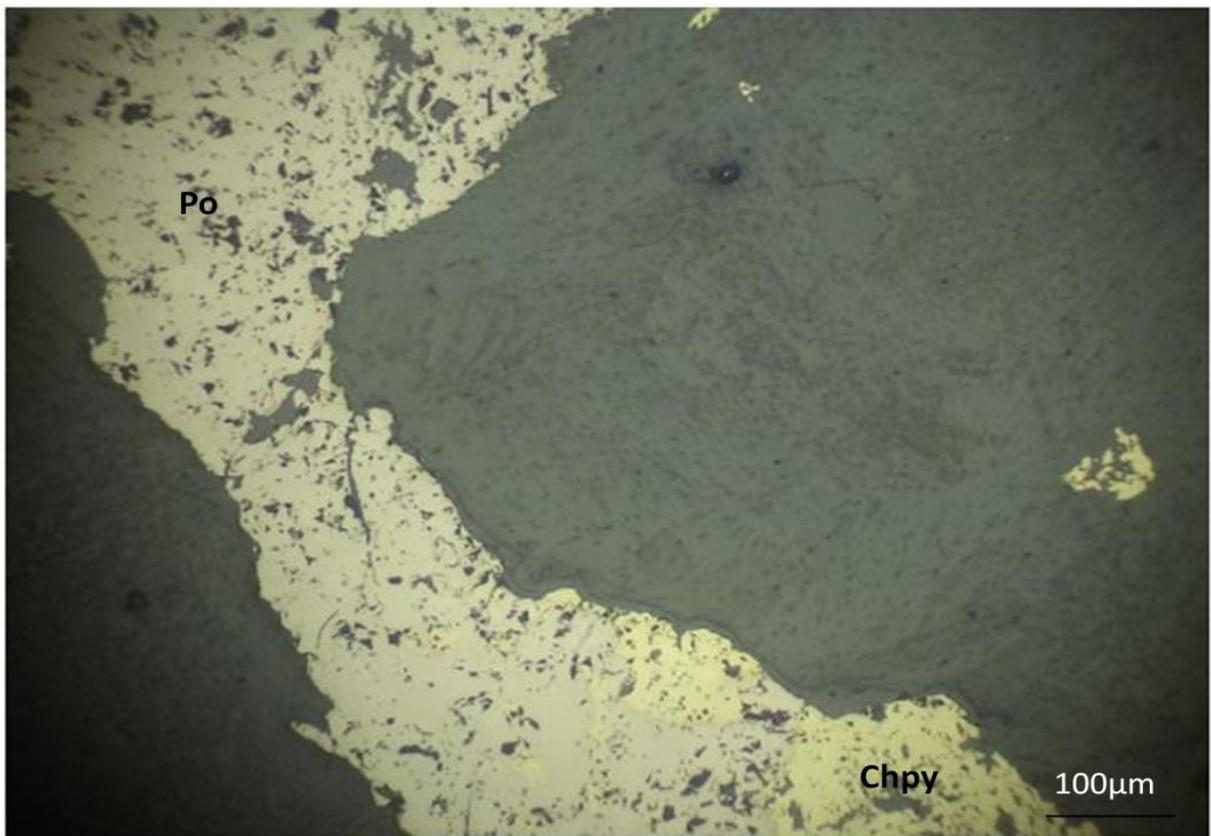


Figure II.2.1.a : Pyrrhotite à inclusions de chalcopyrite observée dans la minéralisation.

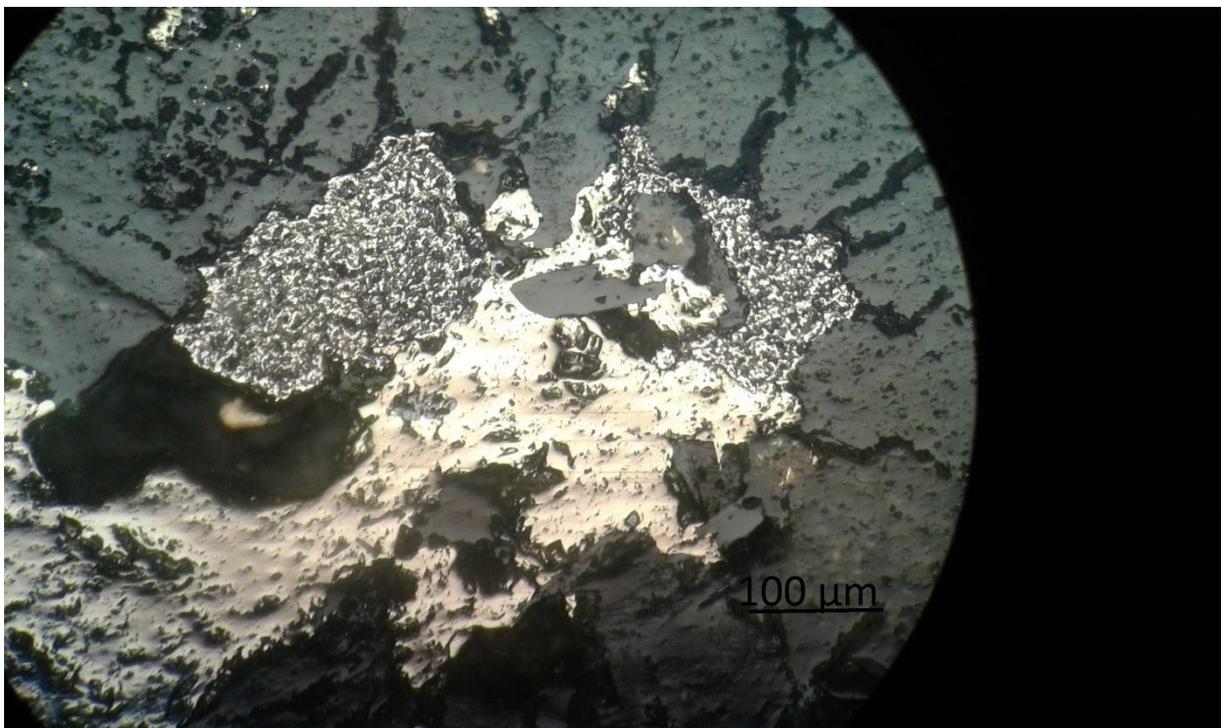


Figure II.2 .1.c : Cristaux de pyrite poussant sur l'association chalcopyrite - pyrrhotite

Conclusion :

L'étude minéralogique réalisée sur les échantillons minéralisés du sondage FGC251 montre les minéralisations montrent une paragenèse dominée par la pyrrhotite à laquelle s'associent la chalcopirite et la pyrite. La sphalérite a été également observée mais en très faibles quantités.

Les relations texturales relevée attestent de la présence de deux paragenèse:

- Une paragenèse précoce à pyrrhotite, chalcopirite et sphalérite ;
- Une paragenèse tardive à pyrite et oxydes et hydroxydes de fer.

*Troisième partie : Etude
géophysique*

III- ETUDE GEOPHYSIQUE

Dans cette partie de notre étude, on essaie d'apporter des éléments de réponse à la problématique posée, qui rappelons-le, concerne l'explication de l'extension en profondeur du modèle magnétique 3D calculé par inversion au-delà des limites avales actuelles des corps minéralisés du gisement de Hajar. Cette partie comprend deux volets différents : la modélisation magnétique selon l'approche directe et l'exploitation des données de susceptibilité magnétique.

III.1- MODELISATION MAGNETIQUE

Le fait que le nouveau sondage carotté réalisé récemment suite aux résultats de la modélisation inverse 3D n'a pas intercepté de minéralisation sulfurée en aval du gisement de Hajar n'exclut pas son existence en profondeur sous forme de bloc(s) effondré(s) que le sondage n'aurait pas atteint. Afin de vérifier cette hypothèse, on propose d'utiliser la modélisation magnétique directe pour calculer l'effet magnétique d'une telle minéralisation.

Pour ce faire, nous avons commencé par modéliser le gisement de Hajar en considérant un prisme rectangulaire dont l'effet théorique permet d'expliquer globalement l'anomalie de Hajar en termes d'amplitude et de longueur d'onde (Fig. III.1). Ensuite, nous avons ajouté un second corps de même taille pour représenter l'extension aval du gisement. L'effondrement de cette extension éventuelle en profondeur de la minéralisation est représenté par différentes positions verticales du deuxième corps magnétique selon un pas de 100 m. Pour chaque position l'effet théorique des deux corps est calculé et comparé à celui du premier prisme seul. La première position du sommet du deuxième corps, considérée à 650 m, permet de positionner le deuxième corps dans la continuité du premier pratiquement sans effondrement. Les autres positions permettent de simuler des effondrements progressifs du sommet du second corps à 700 m, 800 m, 900 m et 1000 m (Fig. III.2).

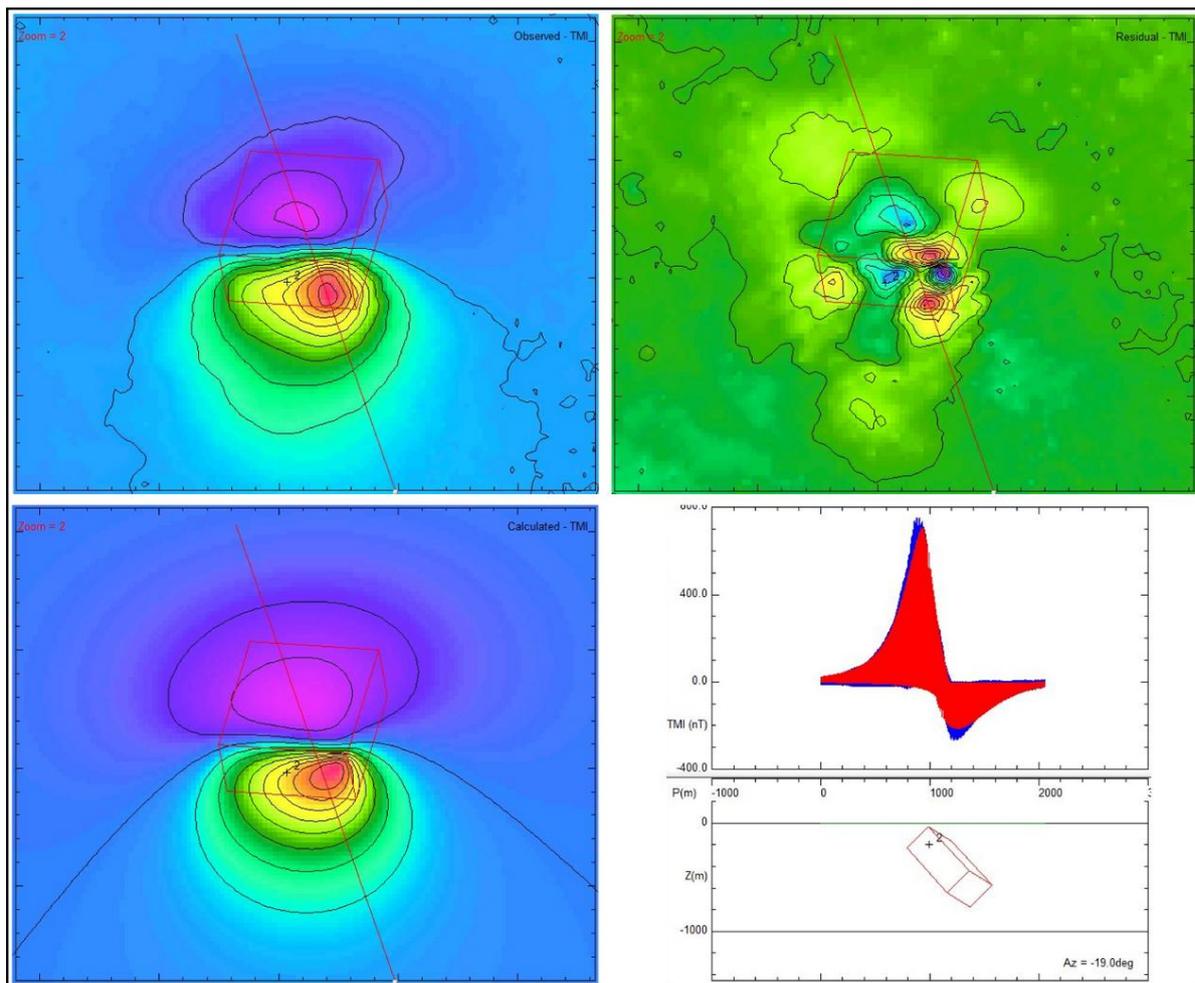


Figure III.1 : Interprétation de l'anomalie magnétique de Hajar par un prisme rectangulaire.

L'analyse des résultats de cette modélisation permet de constater que l'introduction du deuxième corps magnétique affecte que le lobe négatif de l'anomalie magnétique engendrée par le premier corps. Ceci s'explique par la localisation en plan du second corps au nord du premier. La valeur de 20 nT indiquée sur la colonne D de la figure III.2 correspond à l'écart en profil qu'on peut lire entre les minima de l'anomalie observée de Hajar et celle calculée pour le prisme représentant ce gisement. Sur la colonne B de la même figure sont notées les variations de cet écart engendrées par l'effet combiné des deux corps. Ces valeurs obtenues varient de 30 nT lorsque le second corps est enfoui à 1000 m de profondeur jusqu'à 50 nT quand celui-ci est situé à 650 m. Il en résulte une variation de 10 à 30 nT par rapport à l'état initial avec un seul corps. Une telle variation demeure très

faible par rapport à l'amplitude de l'anomalie de Hajar qui avoisine les 1000 nT. Bien entendu, on peut facilement admettre que cette variation deviendrait davantage plus faible voire nulle si le deuxième corps étaient de taille plus réduite.

En conclusion, cette étude montre que la présence d'un bloc minéralisé effondré en aval du gisement de Hajar entre les profondeurs de 650 m et 1000 m n'affecterait pas significativement la forme de l'anomalie associée au gisement lui-même.

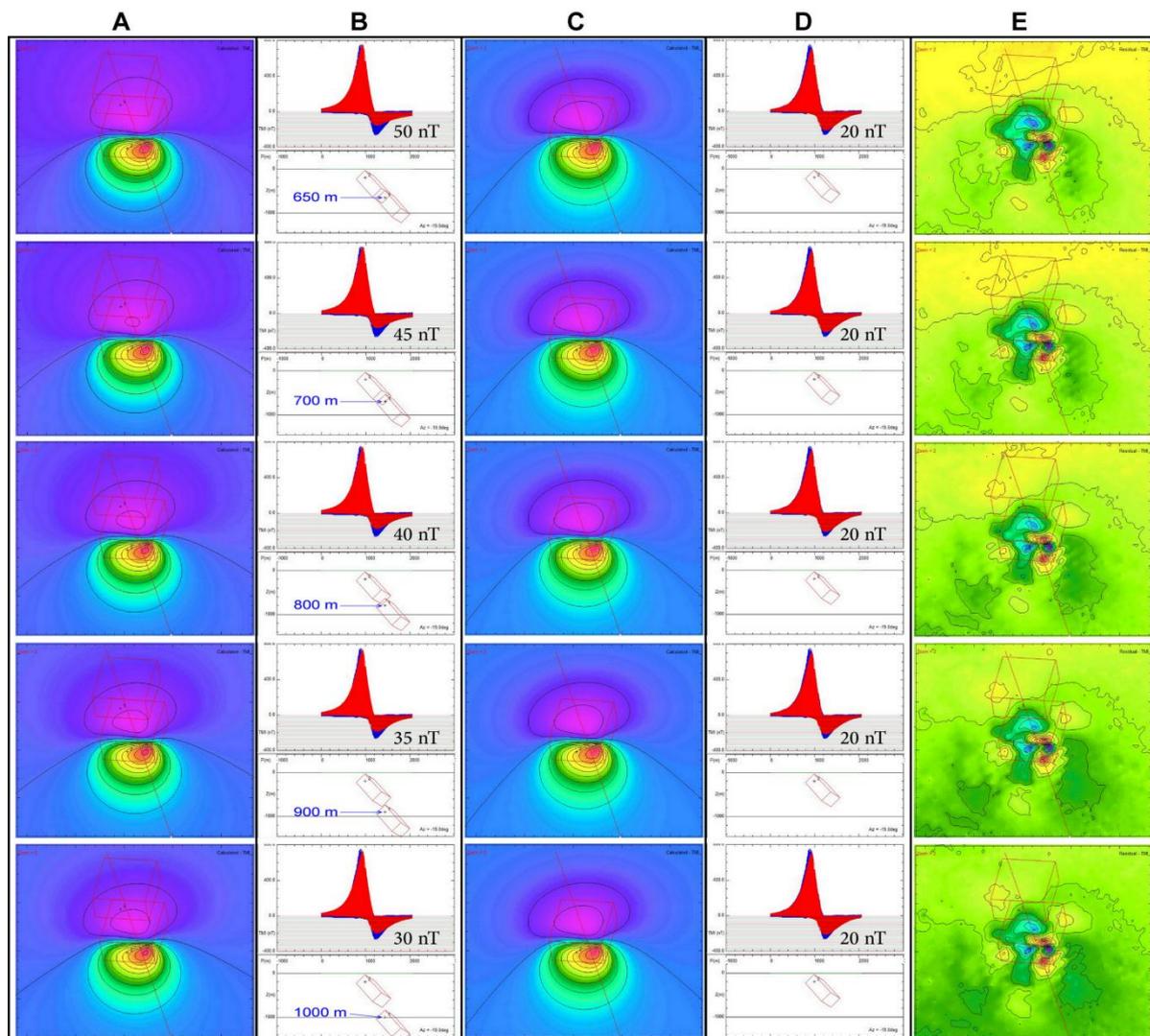


Figure III.2 : Calcul de l'effet d'un bloc magnétique effondré à différentes profondeurs en aval du gisement de Hajar. A et B : Anomalie due à l'effet conjoint des bloc de Hajar et celui effondré en plan et en profil ; C et D : Effet du bloc de Hajar en plan et en profil ; E. Anomalie résiduelle (différence entre l'anomalie observée et l'effet des deux blocs). Les valeurs en nanotesla (nT) indiquent l'écart entre les minima des anomalies observée et calculée.

III.2- SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE

III.2.1- Généralités sur la susceptibilité magnétique

En magnétisme, la structure la plus simple est le dipôle magnétique qui caractérisé par son moment M . Les boussoles, les barres aimantées et les spires de courant sont des exemples type de dipôles magnétiques. Lorsque l'on coupe un aimant en deux, chaque fragment devient un dipôle magnétique possédant un nombre égal de pôles Nord et Sud associés en paires. Si on continue de couper l'aimant jusqu'à atteindre les particules élémentaires : électrons, protons et neutrons qui forment les atomes, nous observerons que ces particules correspondent à des dipôles magnétiques auxquels sont associés des moments élémentaires.

En présence d'un champ magnétique externe H (comme le champ magnétique terrestre), les moments magnétiques des atomes associés à la rotation des particules élémentaires chargées (électrons/protons) de certains matériaux s'alignent de façon similaire à des aiguilles aimantées. Le matériau acquiert une aimantation dite « induite » J_i , Cette aimantation est orientée parallèlement au champ externe H et lui est également proportionnelle telle que :

$$J_i = kH$$

Le coefficient de proportionnalité k est appelé susceptibilité magnétique. Elle exprime l'habilité des matériaux à se polariser sous l'influence d'un champ magnétique externe. La conversion des valeurs de k du système d'unité internationale (SI) au système (cgs) se fait à l'aide de la relation :

$$K (SI) = 4\pi.k (cgs)$$

Un corps soumis à l'action d'un champ magnétique devient lui-même magnétique. Tous les effets magnétiques peuvent s'expliquer en termes de moments

magnétiques à l'échelle des atomes. L'aimantation dans la matière résulte de l'existence d'une densité de ce genre moments qui sont liés à des mouvements de particules électriquement chargées (électrons) au niveau des atomes. D'une façon générale, la matière présente cinq comportements distincts en présence d'un champ magnétique:

➤ **Le diamagnétisme**

Une matière est dite diamagnétique lorsque sa susceptibilité est négative ($k < 0$). Cela revient à dire que l'aimantation induite par un champ externe H est orientée en sens opposé à H , c'est-à-dire que le mouvement orbital des électrons se fait dans un sens tel que l'aimantation qu'il produit s'oppose à H . Pour les matériaux géologiques, cette aimantation demeure toutefois très faible en par conséquent dans grande influence sur la prospection magnétique. (Exemples : Quartz, carbonate de calcium, etc.)

➤ **Le paramagnétisme**

Par définition, tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques, sont paramagnétiques ($k > 0$). Dans ce type de matériaux, chaque atome a un moment magnétique propre non nul en l'absence de champ externe. Sous l'action d'un champ externe, ces moments magnétiques s'orientent et provoque une augmentation du champ H . Les atomes se comportent comme de petits aimants indépendants les uns des autres. Le champ extérieur aura tendance à les orienter comme s'il agissait sur une aiguille aimanté. L'aimantation acquise est proportionnelle au champ appliquée. (Exemples : les sels, la biotite et la pyrite).

➤ **Le ferromagnétisme**

Les atomes sont aimantés et groupés. L'aimantation est beaucoup plus forte que le paramagnétisme ou le diamagnétisme et surtout il y a un phénomène de

rémanence. Les atomes se comportent comme des petits aimants mais ils ne sont pas indépendants les uns des autres: l'interaction magnétique entre ces atomes et les groupes d'atomes est si forte qu'il y a un alignement des moments dans des petits domaines appelés domaines de Weiss. Les matériaux ferromagnétiques sont caractérisés par une forte susceptibilité magnétique. (Exemple : le fer pur, le nickel, le cobalt ou le chrome).

➤ **L'antiferromagnétisme**

Lorsque la somme des moments magnétiques des sous-ensembles parallèles et antiparallèles est nulle dans un matériau qui autrement serait considéré comme ferromagnétique, la susceptibilité résultante sera très faible, de l'ordre des substances paramagnétiques. Ces substances sont nommées antiferromagnétiques. (Exp : Hématite).

➤ **Le ferrimagnétisme**

Caractérise des matériaux dans lesquels les domaines magnétiques sont subdivisés en régions et peuvent être alignés dans des sens opposés les uns par rapport aux autres, mais dont le moment magnétique résultant n'est pas nul lorsque le champ externe est nul. Il se distingue donc à la fois de l'antiferromagnétisme, pour lequel le moment magnétique résultant est nul, et du ferromagnétisme, pour lequel l'aimantation spontanée résulte au niveau microscopique d'un arrangement parallèle des moments magnétiques. (Exemples : La pyrrhotine).

III.2.2- Réalisation des mesures de susceptibilité magnétique

Les mesures de la susceptibilité magnétiques ont été effectuées sur les carottes de cinq sondages qui ont ciblé la partie avale du corps central du gisement de Hajar. Ces mesures ont été mises en œuvre à l'aide d'un susceptibilimètre de type KT9

manufacturé par de la société Exploranium (Fig. III.3), selon un intervalle de profondeur d'un mètre au niveau de l'encaissant et de 50 cm au sein des zones minéralisées. Les mesures se font de façon répétitive avec à chaque fois une première lecture d'initialisation (ou remise à zéro) en pointant le capteur de l'appareil dans l'air à plus de 30 cm de tout objet magnétique, suivie de la mesure proprement dite de l'échantillon après y avoir collé l'appareil. Au terme de notre stage, nous avons constitué une base de données de susceptibilité magnétique comprenant un total de 1080 lectures relevées sur les carottes des cinq sondages choisis.



Figure III.3 : Mesure de la susceptibilité magnétique à l'aide d'un kappamètre (A : Initialisation, B : Lecture) ; C : Susceptibilimètre KT9 utilisé lors de la présente étude.

III.2.3- Résultats et interprétation

Comme il a été indiqué en introduction, le gisement de Hajar est constitué de trois corps minéralisés appelés : corps central, corps ouest descenderie et corps nord-est. La figure III.4 l'emplacement de ces corps par rapport à l'anomalie magnétique qu'ils engendrent selon une vue en plan (A) et deux vues en perspective d'ouest en est (B) et du nord vers le sud (C).

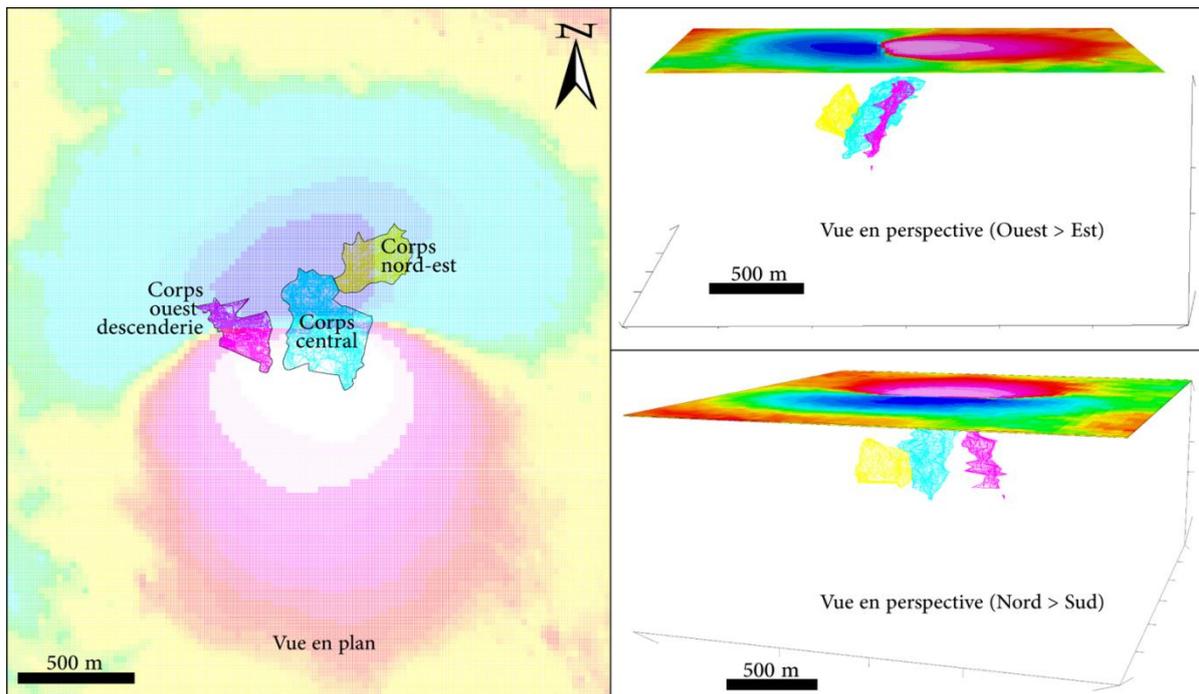


Figure III.4 : Emplacement des trois corps minéralisés de Hajar par rapport à l'anomalie magnétique qu'ils génèrent.

Les mesures de la susceptibilité magnétiques ont été effectuées sur les carottes de cinq sondages représentés sur la figure III.5 selon deux angles d'observation différents qui montrent la succession des trois corps suivant les deux directions N-S (A) et E-W (B). La vue du nord vers le sud montre que les sondages choisis ne ciblent que le corps central. Les mesures de susceptibilité magnétiques recueillies à l'issue de cette étude représentent un total de 1080 lectures qui ont été intégrées à la base de données géologique et géochimique correspondante mise à notre disposition par la CMG. Ensuite, pour faciliter l'analyse de ces données, nous les avons

représentées graphiquement sous forme de log de susceptibilité - géologie - géochimie et de bloc-diagramme en perspective 3D incluant aussi les tracés des sondages et les trois corps minéralisés.

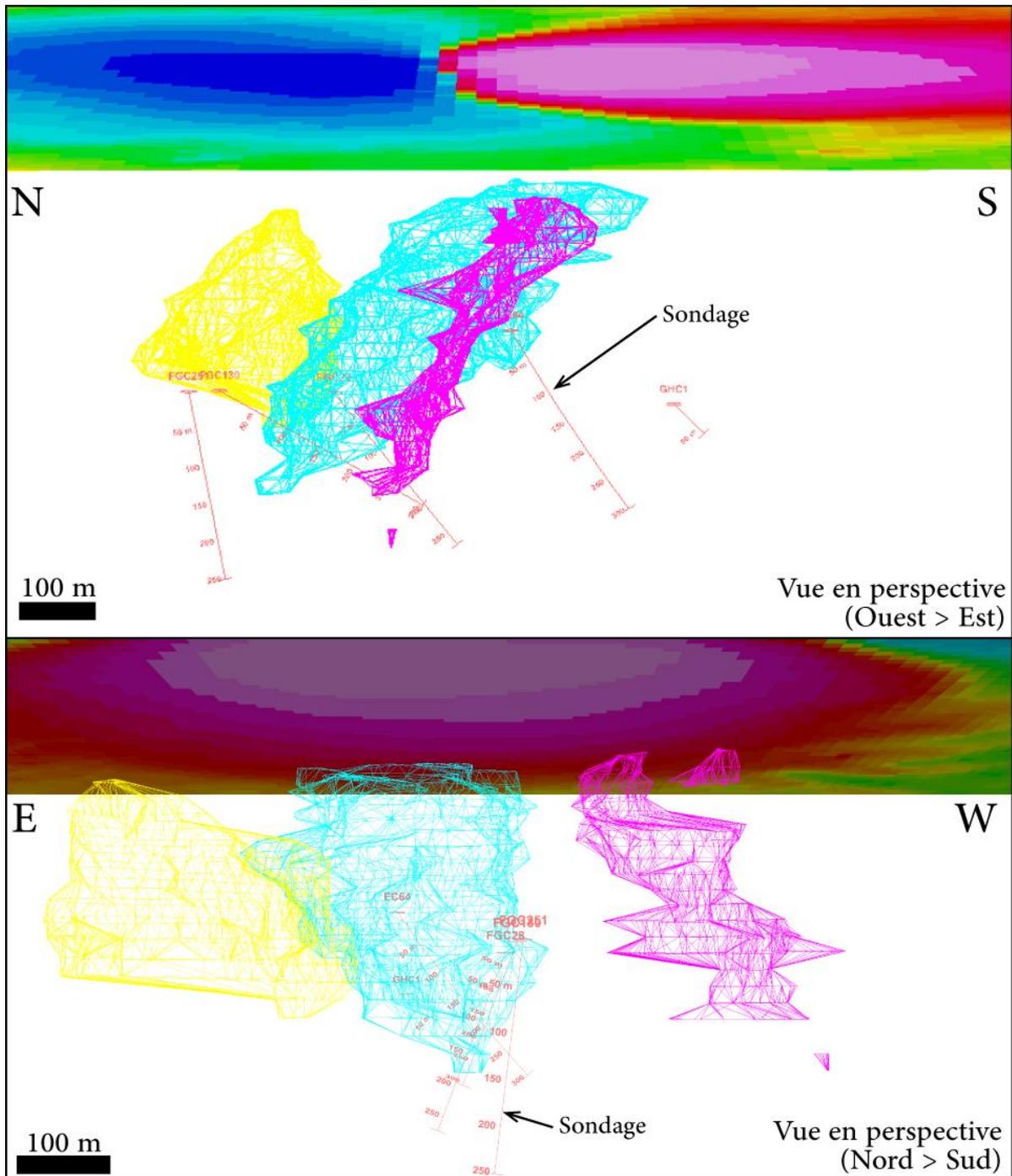


Figure III.5 : Sondages utilisées pour l'étude par susceptibilité magnétique

a- Logs de susceptibilité

La représentation sous forme de logs permet de visualiser les variations verticales de la susceptibilité magnétique en fonction de la lithologie et de la géochimie. La figure III.6 montre les résultats obtenus au niveau des sondages FGC251, EC64 et GHC1 pour lesquels les analyses géochimiques ne sont pas disponibles. L'examen de ces résultats montre que les variations observées mettent en évidence quelques horizon ou zones magnétiques définies par des pics isolés ou des places de valeurs élevées de la susceptibilité magnétique par rapport à un niveau de fond moyen de l'ordre de 0.2 à 0.4×10^{-3} SI. Pour le sondage GHC1, les mesures ont été effectuées sur 64 mètres seulement et les valeurs se situent enregistrées se situent autour 0.3×10^{-3} SI. Ce résultat met en évidence le caractère non magnétique des rhyolites qui représentent le principal faciès recoupé par ce sondage. Le log du sondage EC64 révèle l'existence de deux zones magnétiques avec une valeur maximale de la susceptibilité de 13.6×10^{-3} SI. La première zone se situe entre 0 et 20 m de profondeur et correspond essentiellement à des silts. La seconde, localisée à 80 m, coïncide avec un faciès verdâtre intercalé au sein des laves à bulles. Les résultats du sondage FGC251 sont caractérisés par la présence de quatre pics ponctuels dont l'amplitude varie de 2 et 6×10^{-3} SI.

Les hausses de susceptibilité magnétique observées au niveau des trois sondages précités demeurent très faibles par rapport aux valeurs observées au niveau de la minéralisation massive de Hajar qui selon le degré d'enrichissement en pyrrhotite permet d'enregistrer des valeurs de susceptibilité qui peuvent atteindre 100×10^{-3} SI.

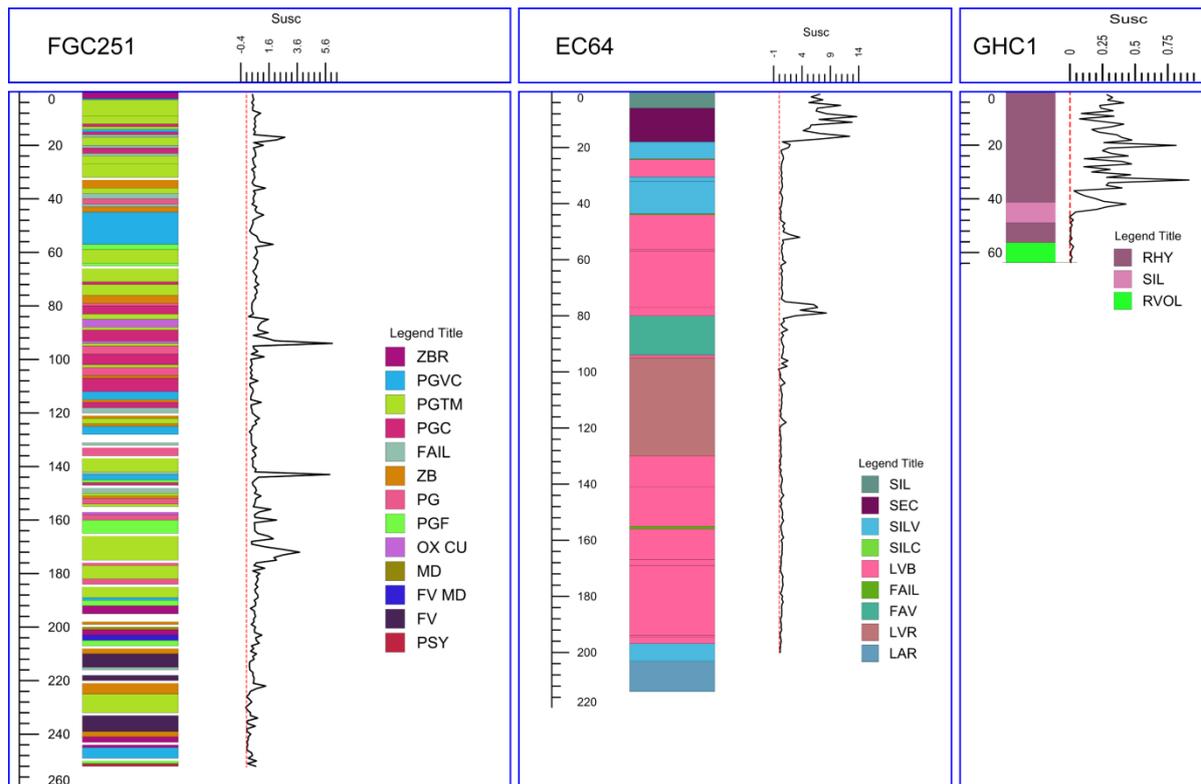


Figure III.6 : Logs de susceptibilité des sondages FGC251, EC64 et GHC1

Abréviations :

- RHY** : Rhyolite **PG** : Pélites gréseux
SIL : Silt **FAIL** : Faille
ZBR : Zone bréchifié
SEC : Schistes chloriteux **LVR** : Laves rhyolitique
LVB : Laves à bulles
RVOL : Roches volcaniques
ZB : Zone broyée
PGVC : Pélites gréseux à veines de calcite
PSY : Pli synschisteux
MD : Minéralisations disséminés
SILV : Silt verdâtres
PGTM : Pélites à traces de métaux
MD : Faciès volcaniques à minéralisations disséminés
OX CU : Oxydes de cuivre
PGF : Pélites gréseux fragmenté
FAV : Faciès verdâtres

Pour les sondages FGC130 et FCG28, les résultats des analyses géochimiques disponibles sont représentés graphiquement avec les logs de susceptibilité magnétiques (Fig. III.7). Le sondage FGC130 montre que la tranche de profondeur située entre les côtes 110 m et 290 m dominé par le faciès des tufs est marquée par des fluctuations de la susceptibilité dont le maximum atteint 30×10^{-3} SI. De telles variations témoignent de la présence d'hétérogénéités magnétique au niveau de la série traversée par le sondage FGC130, en particulier la zone concernée par les analyses géochimiques. Les niveaux de minéralisation sulfurée observés au niveau de cette zone expliqueraient en partie les fluctuations de la susceptibilité magnétique.

Le log de susceptibilité du sondage FCG28 montrent deux zones plus magnétiques situées au début et à la fin de celui-ci, avec des maxima respectifs de 18 et 35×10^{-3} SI. La zone intermédiaire à dominance de silts chloriteux est caractérisée par un niveau de fond légèrement plus élevé de l'ordre de 5×10^{-3} SI. Cette hausse de la susceptibilité peut s'expliquer par la présence de minéralisation sulfurée qui a été interceptée à plusieurs niveaux par le sondage FGC28.

Du point de vue géochimique, les analyses disponibles couvrent des portions très limitées aux impacts minéralisés. Les résultats de ces analyses montrent que les hausses de susceptibilité magnétique se corrèlent plus avec les fortes teneurs en fer, ce qui peut s'expliquer par le caractère magnétique de la pyrrhotine connue en abondance au niveau du gisement de Hajar. Les hausses des teneurs de Pb ou de Zn qui accompagnent parfois celle du Fe seraient liées à l'association de la pyrrhotine avec les sulfures contenant ces métaux (galène et sphalérite).

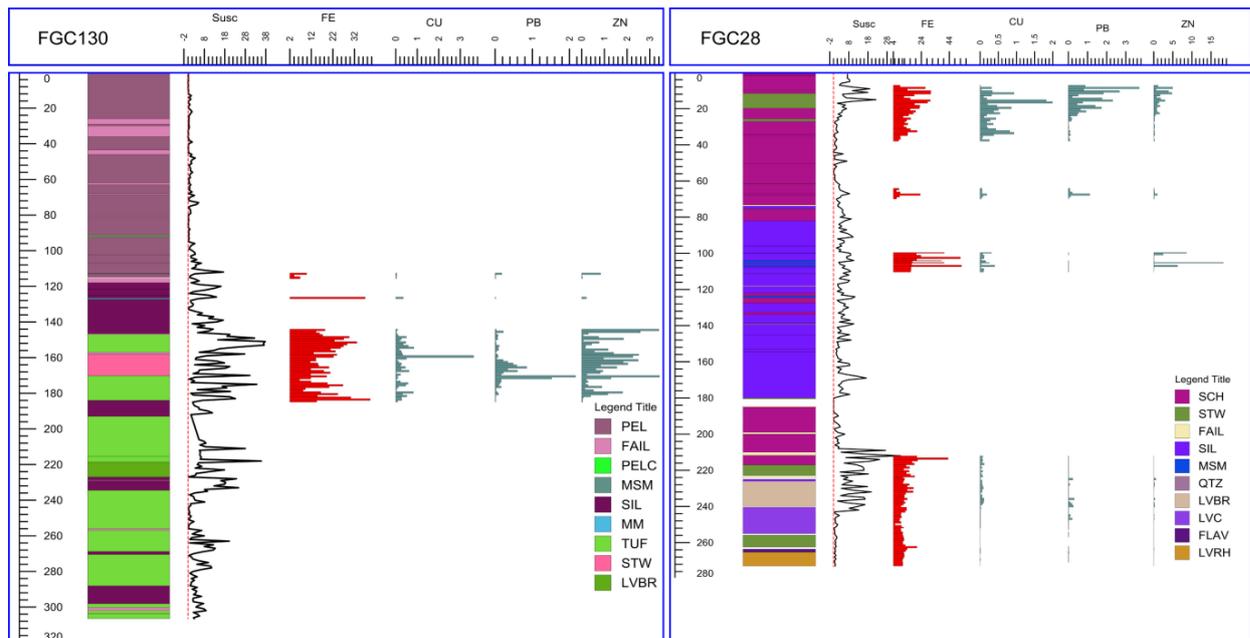


Figure III.7 : Logs de susceptibilité magnétique, géologie et géochimie des sondages FGC130 et FGC28

Abréviations :

- | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| PEL : Pérites noir | FAIL : Faille | MSM : Minerai sub massif |
| SIL : Silt | MM : Minerai massif | TUF : Tufs |
| STW : Stock Work | Qtz : Quartz | LVBR : Laves bréchifiées |
| FLAV : Faciès laviques | SCH : Schistes chloriteux | |
| PELC : Pérites carbonatés | | |

b- Bloc diagramme en perspective 3D

Une représentation en perspective 3D des données de la susceptibilité magnétique superposées aux traces des sondages et aux corps minéralisés de Hajar est illustrée sur la figure III.8. Ce type de représentation donne une vision d'ensemble sur la zone étudiée et sur la variation de la susceptibilité au sein de celle-ci. Son intérêt réside dans la possibilité de basculer le modèle dans toutes les directions de l'espace ou de le mettre en mouvement continu (animation) afin de pouvoir situer dans l'espace par rapport aux corps minéralisés les différentes mesures de susceptibilité.

Afin d'illustrer plus clairement les variations de la susceptibilité magnétique par rapport à la zone avale du corps central ciblé principalement par la présente étude, la figure III.9 présente une vue détaillée en coupe N-S à travers le corps central et l'ensemble des cinq sondages. Les données de susceptibilité magnétique

sont représentées sur cette figure, le long des traces de sondages, sous forme de bandes de couleurs obtenue par interpolation et également sous forme de bâtonnets. La figure III.10 donne une vue d'ensemble selon le même direction de coupe du corps minéralisé central, des cinq sondages avec les données de susceptibilité et du modèle magnétique calculé par inversion 3D de l'anomalie de Hajar.

Les deux figures III.9 et III.10 permettent de constater que les deux sondages FGC130 et FGC28 qui concernés par les analyses géochimiques et qui traverse la bordure du corps central, montrent des valeurs de susceptibilité relativement élevées aussi bien au sein du corps minéralisé qu'en dessous de celui-ci. Il en résulte que l'encaissant de la minéralisation et en particulier le mur de celle-ci ou série basale serait aussi sensiblement magnétique et pourrait expliquer la grande surface enveloppe qui délimite le modèle 3D issue de l'inversion.

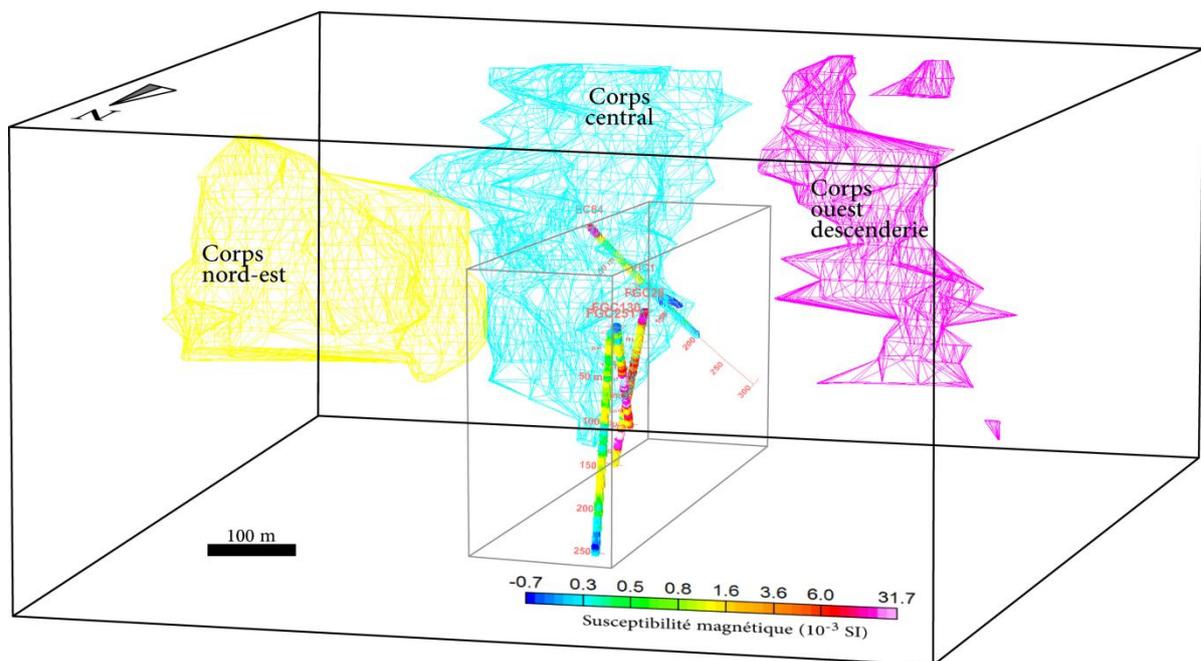


Figure III.8 : Représentation en perspective 3D illustrant les variations de la susceptibilité magnétique et l'emplacement des cinq sondages étudiés par rapport aux trois corps minéralisés de Hajar

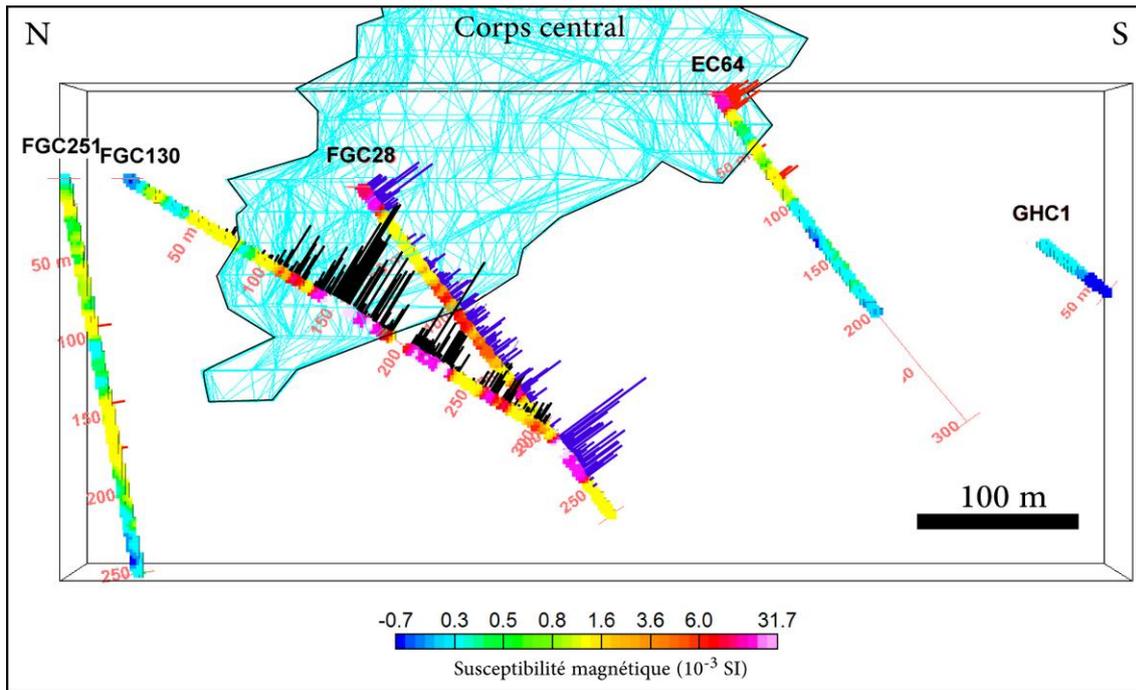


Figure III.9 : Coupe N-S illustrant les variations de la susceptibilité magnétique et l'emplacement des cinq sondages étudiés par rapport au corps central du gisement de Hajar

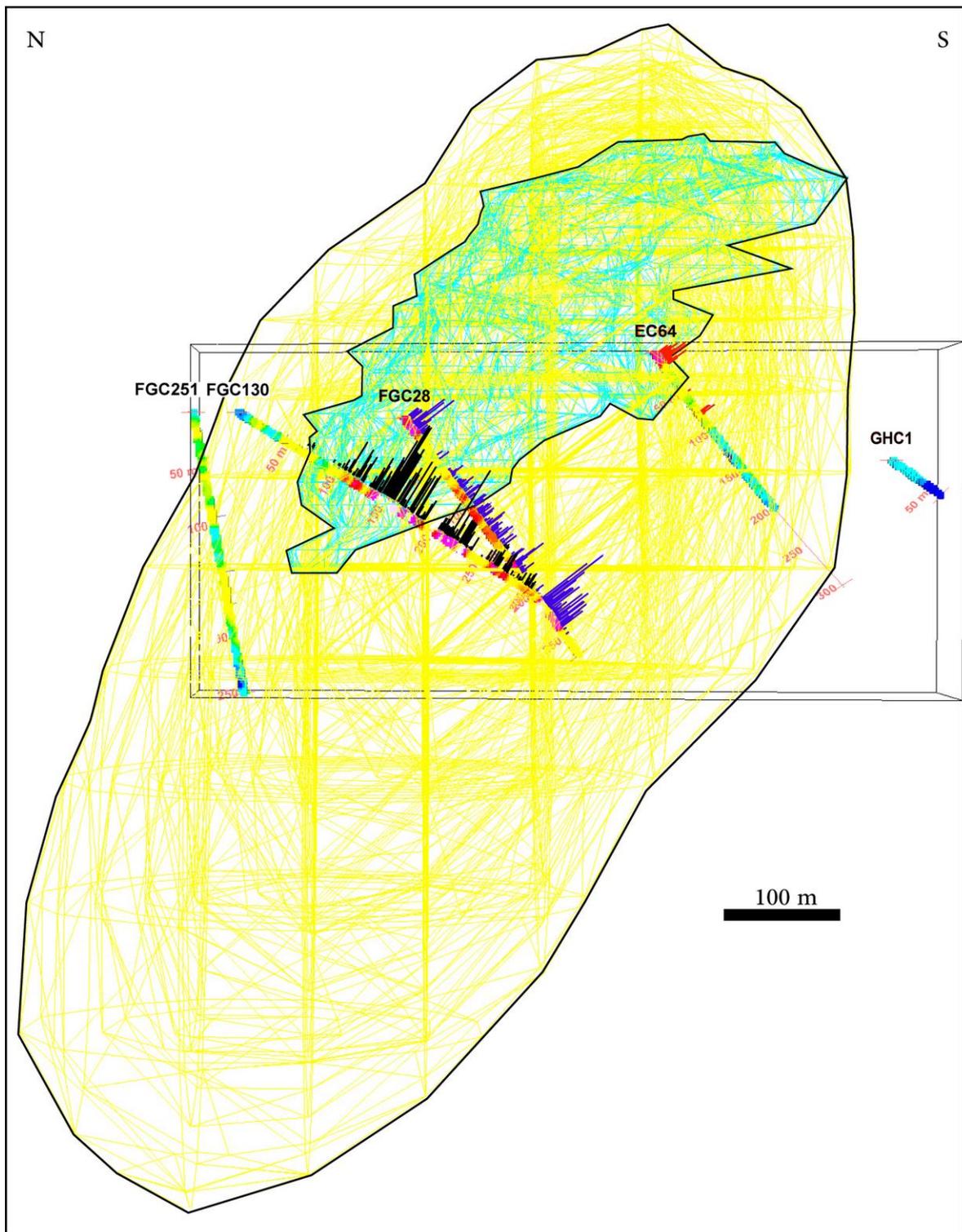


Figure III.10 : Coupe N-S illustrant les variations de la susceptibilité magnétique et l'emplacement des cinq sondages étudiés par rapport au corps central du gisement de Hajar et au modèle magnétique calculé par inversion.

IV- CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Le gisement polymétallique de Hajar engendre une importante anomalie magnétique qui a été à l'origine de sa découverte. Cette anomalie a récemment fait l'objet d'une modélisation magnétique qui a permis de calculer une source qui s'étend en profondeur bien au-delà des de l'amas de Hajar. Des sondages carottés qui traversent ce modèle magnétique ont fait l'objet de mesures de susceptibilité magnétique, d'observations macroscopiques et microscopiques. Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

Etude géologique :

- L'étude minéralogique réalisée sur les échantillons minéralisés du sondage FGC251 montre les minéralisations montrent une paragenèse dominée par la pyrrhotite à laquelle s'associent la chalcopyrite et la pyrite. La sphalérite a été également observée mais en très faibles quantités.
- Les relations texturales relevée attestent de la présence de deux paragenèse :
 - Une paragenèse précoce à pyrrhotite, chalcopyrite et sphalérite ;
 - Une paragenèse tardive à pyrite et oxydes et hydroxydes de fer.

Etude géophysique

- Des essais de modélisation directe ont montré que la présence d'un bloc minéralisé effondré en aval du gisement de Hajar entre 650 et 1000 m passerait quasi inaperçu pour des mesures en surface.
- Les données de susceptibilité magnétiques montre que seule deux sur les cinq sondages analysées montre des valeurs relativement élevées tant au niveau de la minéralisation qu'elle traverse qu'au sein de l'encaissant. Ceci laisse supposer que le modèle magnétique

calculé par inversion inclurait la signature d'une partie de la série de base qui serait relativement magnétique.

Perspectives

- Il est recommandé de réaliser des levés géophysique en forage (magnétisme et électromagnétisme) qui pourraient apporter des éléments de réponse au problème posés.

Référence bibliographique

- Bernard, A.J. (1985)** : Analyses des carottes minéralisées des sondages de Douar El Hajar en vue de la valorisation des minerais. Mission de A.J. BERNARD (4-11 juin 1985). Rapport BRPM, inédit.
- Boummane, M.H. (1987)**. Les déformations hercyniennes superposées dans le Sud de la Méséta marocaine l'exemple des séries paléozoïques du Horst de Guemassa (Haouz de Marrakech). Thèse de 3ème cycle, Université de Marrakech, 212 pp.
- Gros, & al. (1986)** : Evolution dynamique de l'ensemble des Guemassa. Recherche de structures précoces pouvant guider les minéralisations sulfurées. Rapport BRPM, inédit.
- Haimeur, J. (1988)**. Contribution à l'étude de l'environnement volcano-sédimentaire du minerai de Douar Lahjar (Guemassa, Maroc), lithologie, paléo-volcanisme, géochimie, métallogénie. Thèse 3ème cycle, ENCG, Nancy, 51 p.
- Hibti M. (1993)**. L'amas sulfuré de Hajar : contexte géologique de mise en place et déformations superposées (Haouz de Marrakech, Meseta Sud-occidentale, Maroc). Thèse de 3ème cycle. Université Cadi Ayyad Marrakech, 197 p.
- Hibti M. (2001)**. Les amas sulfurés des Guemassa et des Jebilet (Meseta Sud-occidentale, Maroc) : témoins de l'hydrothermalisme précoce dans le bassin mesetien. Thèse de doctorat Es- Sciences. Université de Marrakech.
- Hmeurras M. (1997)**. Les amas sulfurés du Maroc .chapitre 2.la VMS province de jebilet Guemassa mines géologie et énergie Rabat in rapport sur les résultats des travaux des experts russes dans la région des jebilet Maroc. RP.interne CMG.
- Huvelin, P. & Snoep, J.P. (1965)**. Prospection des filons à pyrrhotine dans les Jebilets centrales (Maroc). Mines et géologie, Rabat, n° 23, p. 21-26.
- Huvelin, P. (1977)**. Etude géologique du massif hercynien des Jebilets -Maroc occidental-. Notes et Mémoires du Serv. Geol. du Maroc, n° 232 bis.
- Maier, & al. (1986)**. Le gisement polymétallique hydrothermal sédimentaire de Douar Lahjar, Rapport BRPM, inédit.
- Maier, O.W. & El Hakkour, A. (1984)**: Les amas sulfurés volcano-sédimentaires des Jebilet centrales. Journées Nationales du Soufre, Rabat 11-12 octobre 1984.
- Matte, Ph. (1986)**. Tectonics and plates tectonics models for the Variscan belt of Europe.
- Michard, A. (1976)**. Eléments de géologie marocaine. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 252, 408.

Piqué A. et Michard A. (1989). Moroccan hercynides a synopsis. The Palaeozoic sedimentary and tectonic evolution at the northern margin of west Africa .Am .J.Sci .298 : 286-330.

Soulaimani A. (1997). L'évolution structurale des affleurements paléozoïques du Haouz de Marrakech (Guemassa -N'Fis, Maroc). Thèse 3ème cycle. Université de Marrakech.

Soulaimani A., 1991 ; L'évolution structurale des affleurements paléozoïques du Haouz de Marrakech (Guemassa-Nfi's, Maroc). Thèse troisième cycle université de Marrakech.

Zouhry, S (1999). Étude métallogénique d'un amas sulfuré viséen à Zn Pb Cu : cas de Hajar, Guemassa, Maroc. Thèse de l'école polytechnique de Montréal.