



Université Cadi Ayyad

Faculté des Sciences et Techniques
Département des Sciences de la Terre
*Laboratoire Géoressources-
Unité Associée au CNRST (URAC42)*



**Compagnie Minière
de Guemassa**
Groupe Managem

Projet DE FIN D'ETUDES

Licence Sciences et Techniques
Géologie Appliquée aux Ressources Minières
(LST-GARM)

*Etude lithologique, minéralogique et
géophysique de la zone de Tiferouine
(Guemmassa, domaine de N'Fis, Maroc)*

Réalisé par : Laila BOUBKARI & Ouafa BENAOUA

Dirigé par : **encadrant universitaire : Pr Mohammed HIBTI**, Faculté
des sciences et techniques, Marrakech.

Encadrant universitaire : Pr Mohammed Jaffal, Faculté des sciences
et techniques, Marrakech.

Encadrant professionnel : Mr abdel ali khalifa,

Soutenu le : 16 juin 2015

Devant un jury composé de :
Abdellatif SAIDI

Liste des figures

Figure I.1: situation géographique du secteur de Tiferouine (Document interne C.M.G)

Figure I.2: Situation géographique et géologique des massifs paléozoïques des Rehamna, Jebilet et Guemassa (HUVELIN, 1977).

Figure I.3: domaines structuraux du massif de Guemassa(HAIMEUR , 1989)

Figure II .1: Localisation des sondages carottés utilisés dans le secteur de Tiferouine (Tif15, Tif14, Tif10, Ts1, Ts2, Ts4, Ts5, Tif9) (Document interne C.M.G)

Figure II.2: Log stratigraphique synthétique du sondage Tif 16.

Figure II .3: Log stratigraphique synthétique du sondage Tif10.

Figure II.4: Log stratigraphique synthétique du sondage Tif14.

Figure II.5: Log stratigraphique synthétique du sondage Ts4.

Figure II.6: Log stratigraphique synthétique du sondage Ts1.

Figure II I.7: Log stratigraphique synthétique du sondage Tif9.

Figure II.8: Log stratigraphique synthétique du sondage Tif 15.

Figure II.9: Log stratigraphique synthétique du sondage Ts2.

Figure II. 10: Log stratigraphique synthétique du sondage Ts5.

Figure II .11 : Position des coupes géologiques réalisées dans le secteur de Tiferouine(Document interne C.M.G modifié).

Figure II.12 : coupe géologique (A) N-S réalisée à parties des sondages 15,14 et 10.

Figure II.13: coupe géologique (B) N-S réalisée à parties des sondages 9, 3 et 1.

Figure II.14 : coupe géologique (C) E-W réalisée à parties des sondages 5, 4, 2, 3,16.

Figure IV.1a: Représentation du champ magnétique terrestre principal (dipolaire).

Figure IV.1b: Les composantes du vecteur champ magnétique terrestre.

Figure IV.2: Grille du levé magnétique du secteur de Tiferouine .

Figure IV.3: Carte magnétique de Tiferouine, contours du champ total après soustraction d'un niveau de base de 40000 nT.

Figure IV.4: Carte du champ magnétique réduit au pôle.

Première partie
Introduction générale

I.1. Objectif et méthodologie de travail

Objectif

Le présent travail s'intègre dans le cadre des projets d'exploration autour du gisement de Hajjar (domaine de N'Fis). Il vise l'explication géologique des anomalies géophysiques relevées au sud du gisement et plus particulièrement celles relevées au niveau du secteur de Tiferouine. Dans cette optique notre travail tentera d'expliquer la signification géologique des différentes anomalies en se basant sur les différentes approches de la géologie notamment lithostratigraphique, structurale et gîtologique. Les résultats obtenus seront comparés à ceux décrits dans le gisement de Hajjar.

Méthode de travail

A fin d'aboutir aux objectifs suscités, plusieurs méthodes ont été utilisées à savoir :

- des études lithostratigraphiques à partir des logs des sondages exécutés sur Tiferouine ;
- Un levé géologique du sondage Tif 16 ;
- Un échantillonnage systématique des différents faciès formant la série ainsi que les différents horizons minéralisés interceptés par sondage ;
- Une étude minéralogique (lames minces et sections polies) sur une dizaine d'échantillon ;
- une interprétation des données géophysiques relatives à la zone étudiée.

I.2. Cadre géographique

Le secteur de Tiferouine est situé à environ 40 km au sud-ouest de Marrakech. Il fait partie du secteur des Guemassa orientale (domaine de n’Fis) qui constitue lui-même le prolongement sud de la partie centrale des Jebilet (**Fig. I.1**). La morphologie de la région est relativement modérée, se manifestant en quelques collines dont l’altitude varie de 400 à 800m.

Le secteur de Tiferouine comme la plupart des régions de la plaine de Haouz est caractérisé par un climat aride, chaud en été, froid et sec en hiver.

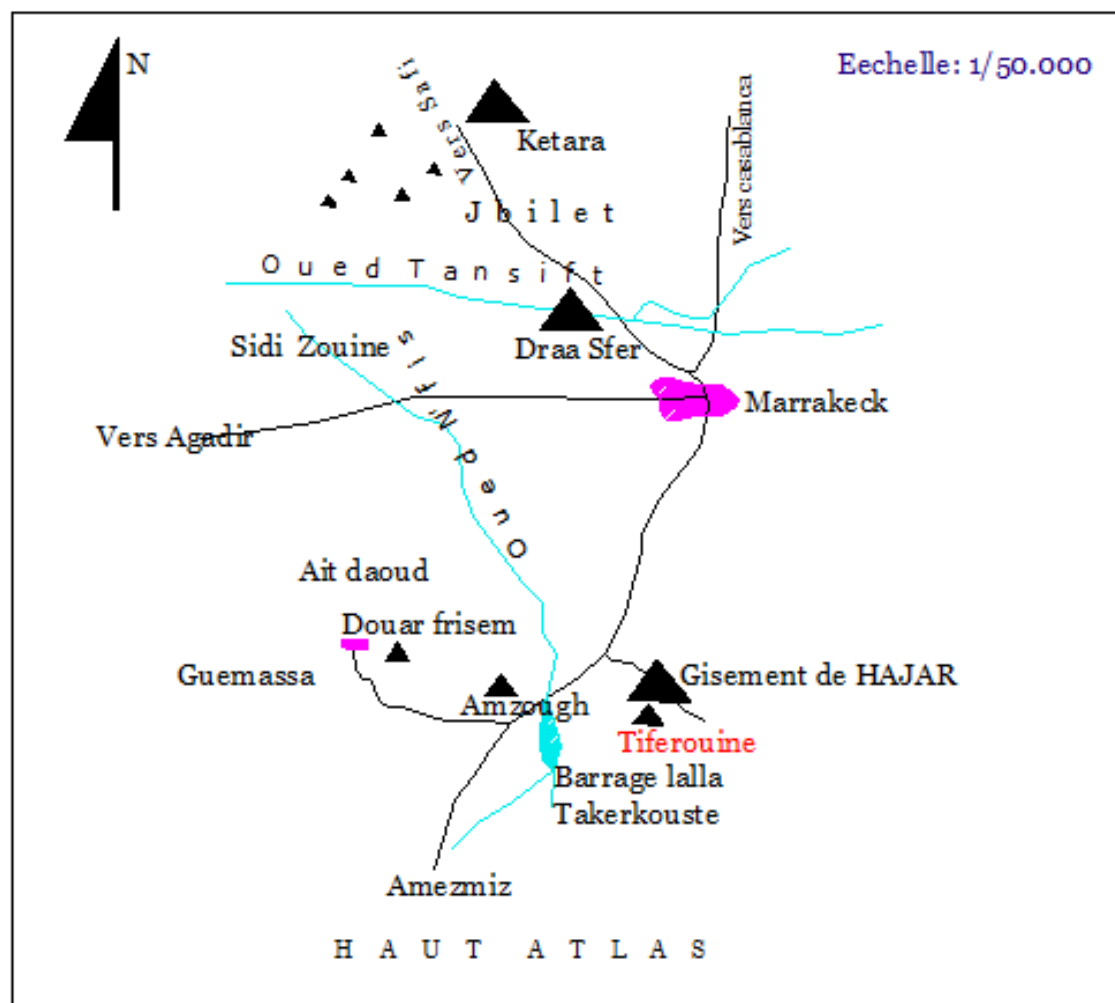


Figure I.1 : situation géographique du secteur de Tiferouine (Document interne C.M.G)

2014/2015

I.3. Cadre géologique

Le Maroc est principalement divisé en trois domaines structuraux : le domaine rifain, le domaine atlasique et mesetien, le domaine anti-atlasique et son prolongement saharien.

Par rapport à ces trois grands domaines géologiques du Maroc, le massif de Guemassa se situe dans le domaine Atlaso-mesetien limité au Nord par les fronts de charriages rifains, et au Sud par l'accident Sud-Haut Atlasique.

Le massif de Guemassa constitue le prolongement de l'unité centrale des Jebilets (**Fig. I.2**). Ce massif est subdivisé en deux domaines : domaine des Guemassa au sens strict et domaine de N'fis. Ce dernier comporte une multitude de blocs à savoir le bloc d'Amzough, le bloc d'Oukhribane-Akhlig, et le bloc d'Imarine. Chaque bloc est caractérisé par sa propre succession lithologique peu différente des autres (**Fig. I.3**).

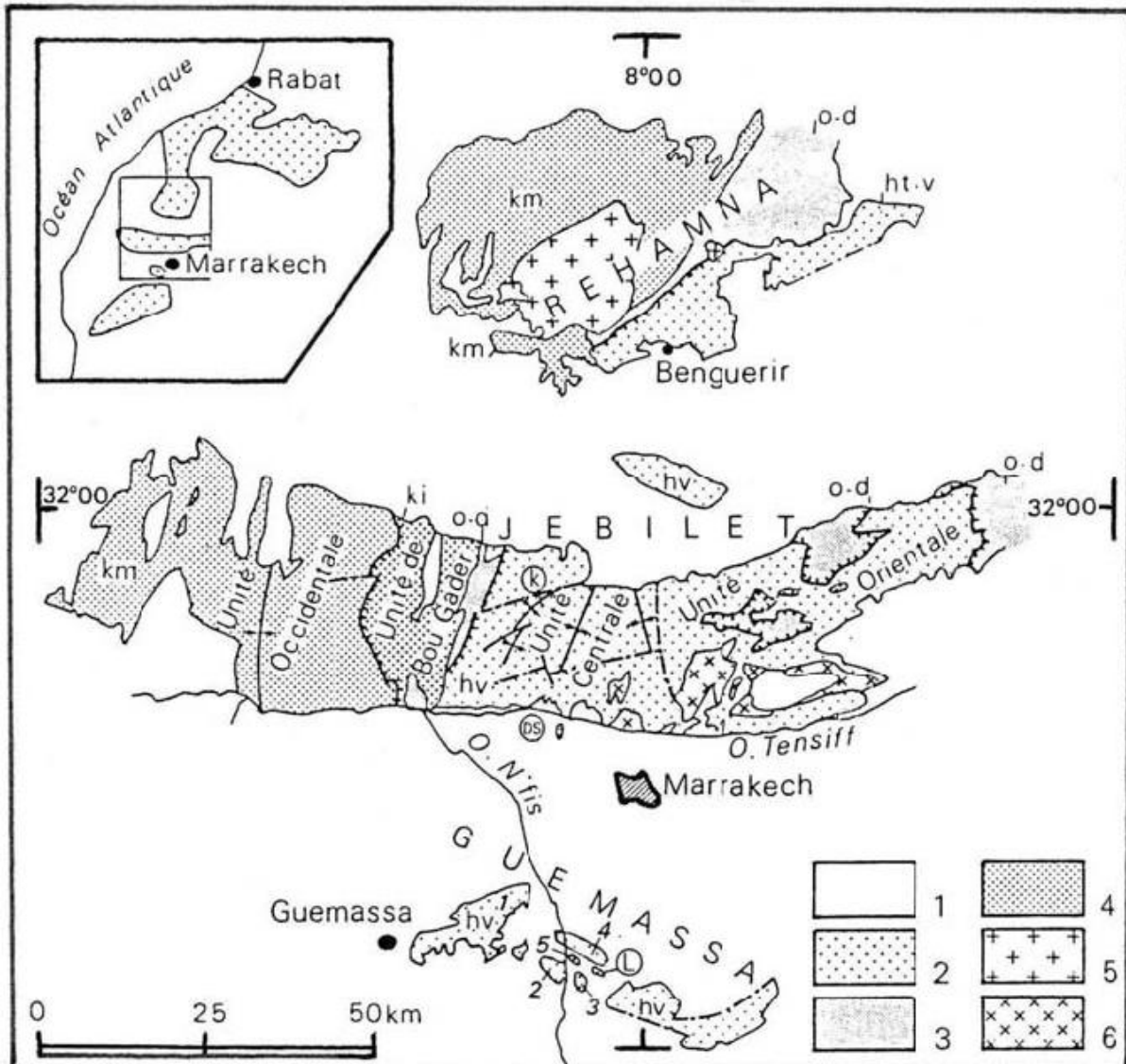


Figure I.2 : Situation géographique et géologique des massifs paléozoïques des Rehamna, Jebilet et Guemassa (HUVELIN, 1977). 1, Couverture ; 2, Carbonifère ; 3, Ordovicien-Dévonien ; 4, Cambrien ; 5 et 6, granites hercyniens des Rehamna et Jebilet.

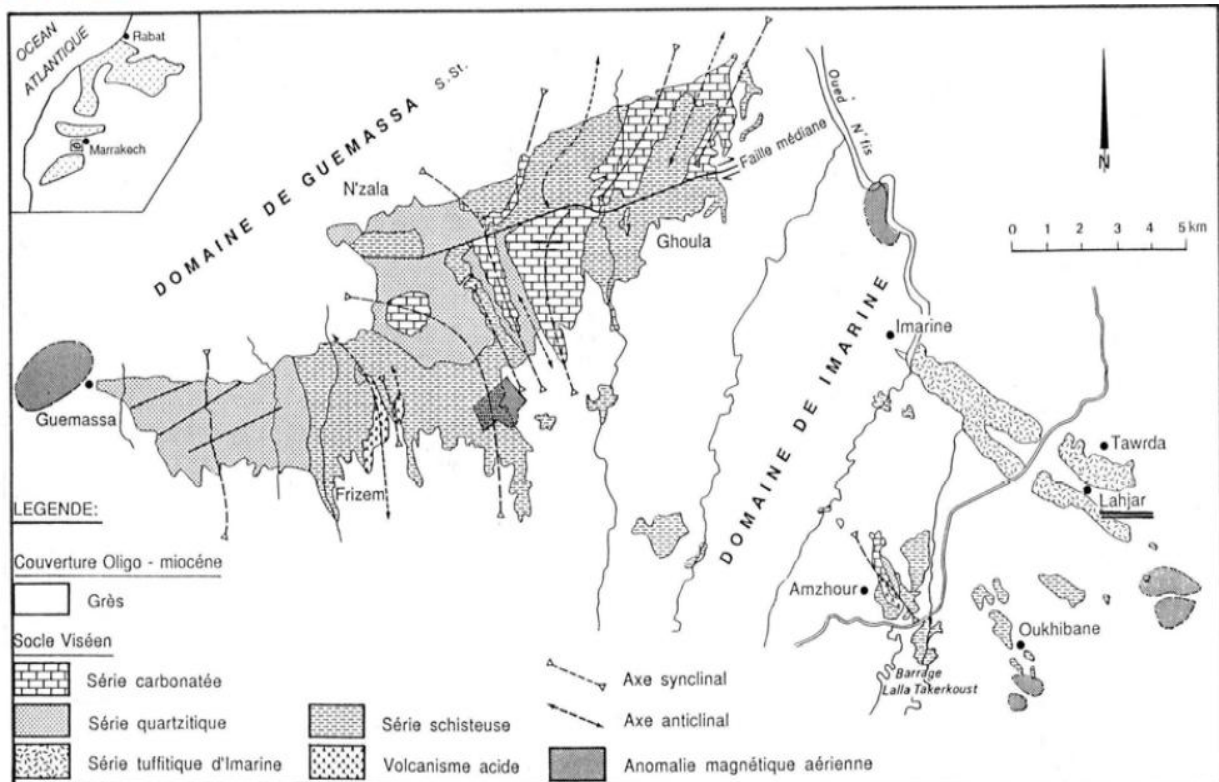


Figure I.3 : domaines structuraux du massif de Guemassa (HAIMEUR , 1989)

Deuxième partie
Étude lithologique

II. 1. Introduction

Cette partie a pour objectif principal la définition des différentes formations lithologiques qui caractérisent le secteur de Tiferouine et leur évolution verticale.

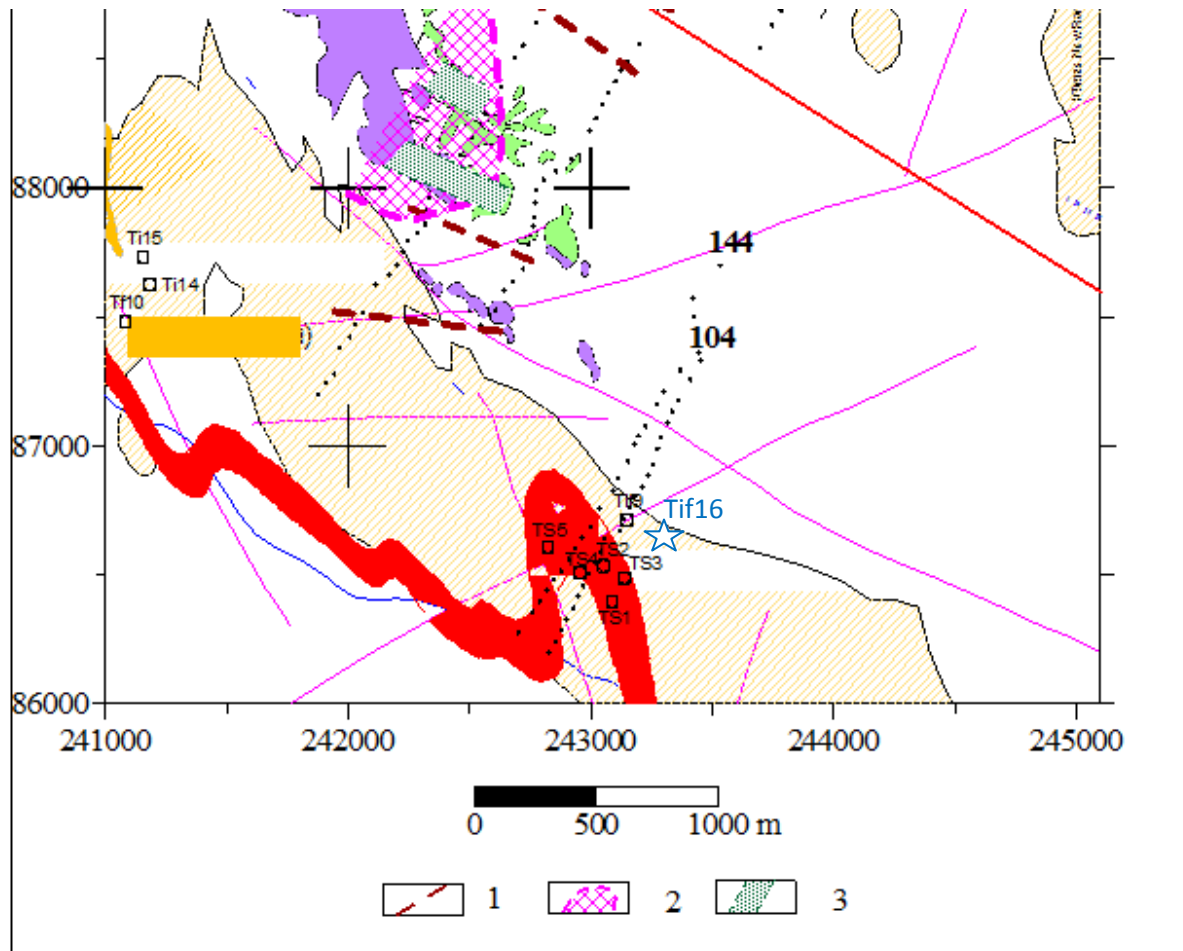
Le secteur de Tiferouine couvre une superficie de plusieurs kilomètres carrés. Il a fait l'objet de plusieurs travaux d'exploration notamment géophysique et par sondage carottés. Pour notre part et dans le cadre de notre stage de fin d'étude nous avons travaillé sur un seul sondage (Tif 16). Ainsi, les levés lithostratigraphiques de base seront tirés à partir de ce sondage.

II. 2. Lithostratigraphie

L'étude lithostratigraphique que nous avons réalisé a été basée sur le levé du sondage carotté Tif 16. La position de ce sondage ainsi que les autres sondages utilisés est présentée dans (**Figure II.1**).

La lithologie relevée sur le sondage TIF16 est représentée principalement par des pélites noirâtres, localement carbonatés (**Figure II.2**). Ces pélites, de couleur grisâtre à noirâtres présentant un aspect chloritisé. Par endroit, ces pélites sont bréchifiées et rubanées. Ce rubanement est matérialisé soit par des calcaires quartzeux, soit par des sulfures. C'est un faciès détritique finement laminé et très schistosé.

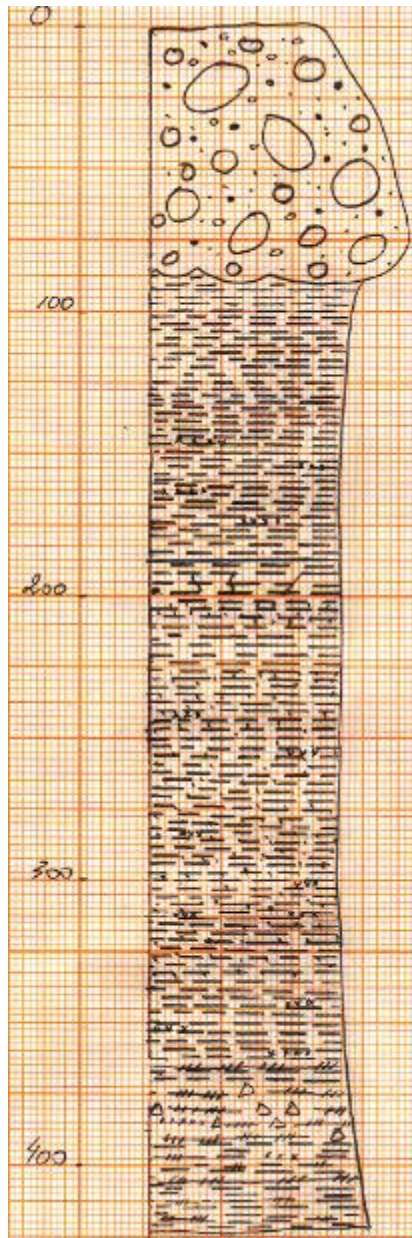
Dans le sondage TIF16 la couverture mio-pliocène et quaternaire est composée par des grès rouges et des conglomérats polygéniques.



**Figure II .1 : Localisation des sondages carottés utilisés dans le secteur de Tiferouine
(Tif15, Tif14, Tif10, Ts1, Ts2, Ts4, Ts5, Tif9)**

Log

Description



Couverture moi-pliocène.

Pélite carbonaté avec des injections siliceuses (so : 70).

Pelite carbonaté stratifié.

Pelite noire fracturation, brèche de faille.

Pelite noir avec intercalation de carbonates ; fracturations brèche de faille S1 :5°, s0 :70°.

Pelite gréseux stratifié s0 :130°.

Pelite noir stratifié a chlorite par endroit.

Pelite gréseux fracturé avec des veines de quartz plus au moins altérées.

Pelite gréseux a veines de quartz.

Dissémination de pyrrhotite avec des traces de sphalérite et de chalcopryrite et veines de quartz.

Pelite noir carbonaté avec des oxydations de pyrrhotite et sphalérite, veines de quartz.

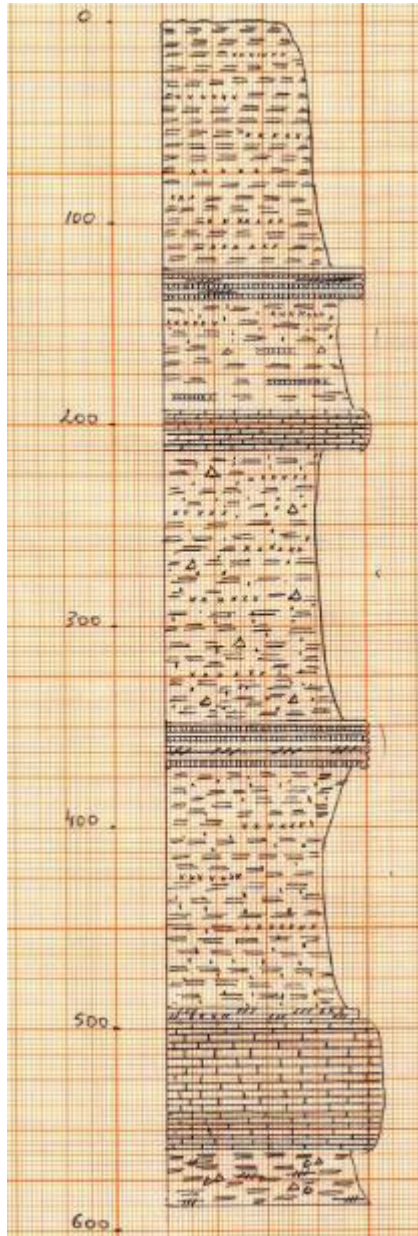
Figure II.2 : Log stratigraphique synthétique du sondage Tif 16

D'autres levés de sondages Tif 10, Tif14, Ts4, Ts5, TS2, TS3, TS1, Tif15 et Tif9, nous ont été fournis par le service géologique de la CMG pour pouvoir comparer nos résultats avec ceux réalisées par la CMG.

Pour notre part, des logs stratigraphiques ont été dressés à partir des descriptions géologiques fournies par le service géologique de la CMG (**Figure III.3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10**).

Log

Description



Silt décoloré lité a veinules de Quartz, biotite.

Silt gréseux micacés a litage, veinules de Quartz, biotite.

Chlorite imprégnée de pyrrhotite avec trace d'As et de Co.

Silt gréseux à veinules de quartz et biotite accompagné de chloritisation.

Calcaire lité stérile.

Silt gréseux fin lité a veinules de Qz, biotite, trace de sulfure.

Chlorite a faible disséminations de pyrrhotite zone altérée.

Silt gréseux, altéré par endroit fissuré à veinules de Quartz, épidote.

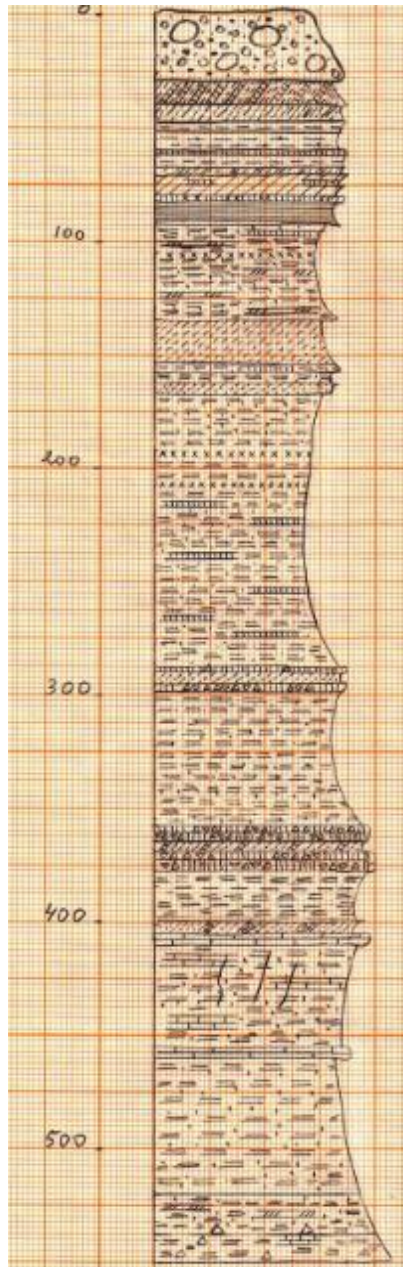
Faciès silicifié décoloré à Quartz, muscovite et ankérite.
Calcaire lité stratifié stérile.

Silt noire fin a lamines espacées de pyrrhotite et pyrite.

Figure II .3 : Log stratigraphique synthétique du sondage Tif 10

Log

Description



Couverture Mio-pliocène.

Schiste fracturé à hématite.

Pélite rougeâtre localement micacé et sericitisé hématitisé.

Argile rouge.

Silt verdâtre gréseux localement chloriteux et siliceux.

Schiste broyé faille.

Silt verdâtre gréseux chloritisé à intercalation de quartz.

Silt gréseux.

Chlorite à magnétite avec des traces de pyrite et pyrrhotite.

Silt noir pélitique.

Silt noir gréseux traversé par des fissures à remplissage carbonaté.

Silt noir gréseux.

Silt gréseux pélitique localement silicifié avec trace de pyrite.

Figure II.4 : Log stratigraphique synthétique du sondage Tif 14

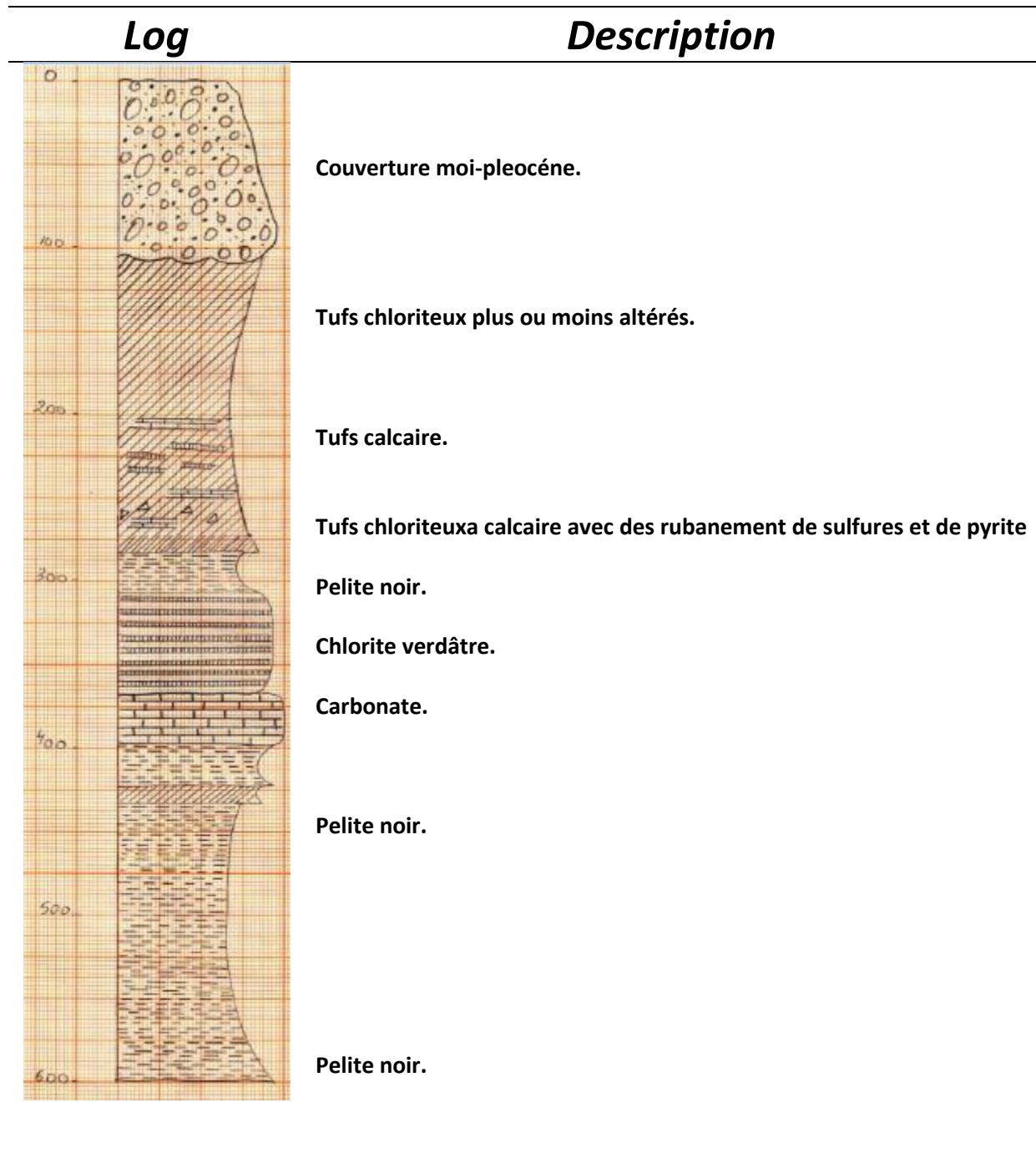
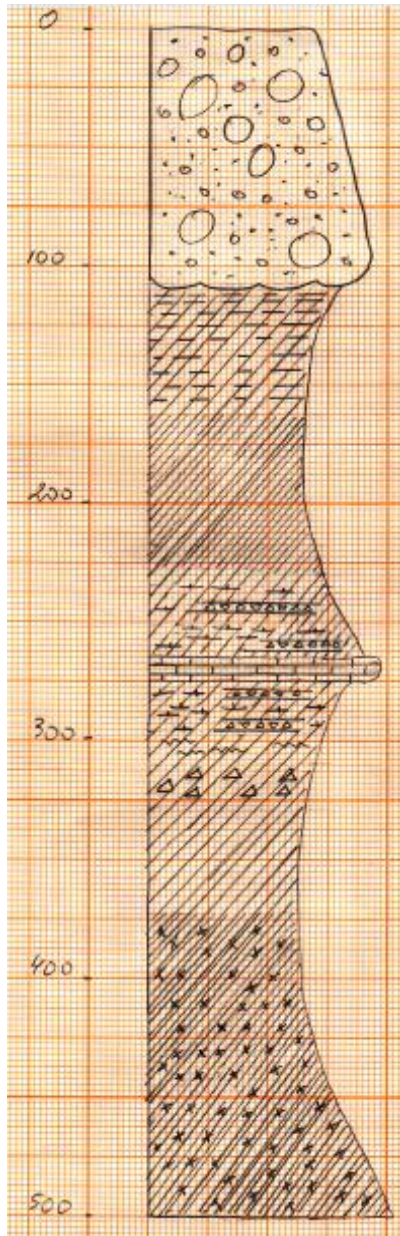


Figure II.5 Log stratigraphique synthétique du sondage Ts 4

Log

Description



Couverture moi-pliocène.

Tufs plus pélite.

Tufs vers plus au moins fins.

Zone de tufs a magnétite intercalée par des pelitesséricitisées.
Calcaire bioclastique.

Faciès de tufs à magnétite.

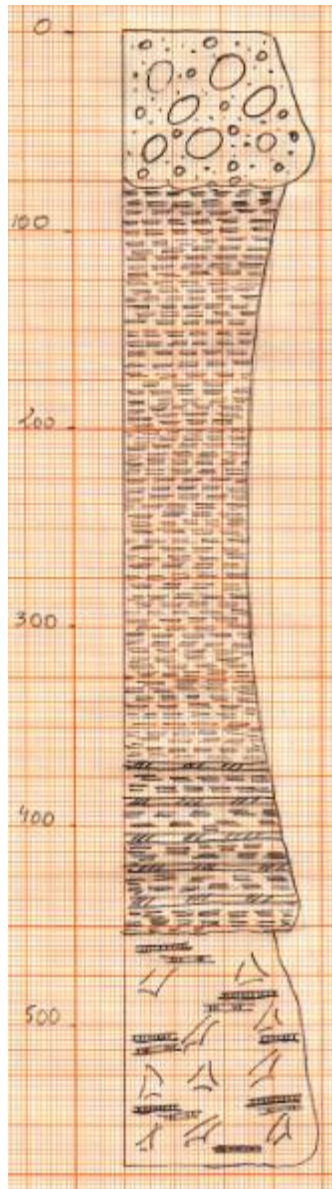
Tufs grossier a dissémination de sulfures.
Tufs grossiers.

Tufs fin plus au moins quartzitique.

Figure II.6 : Log stratigraphique synthétique du sondage LOG Ts 1

Log

Description



Couverture moi-pliocène.

Silt altéré.

Silt grisâtre.

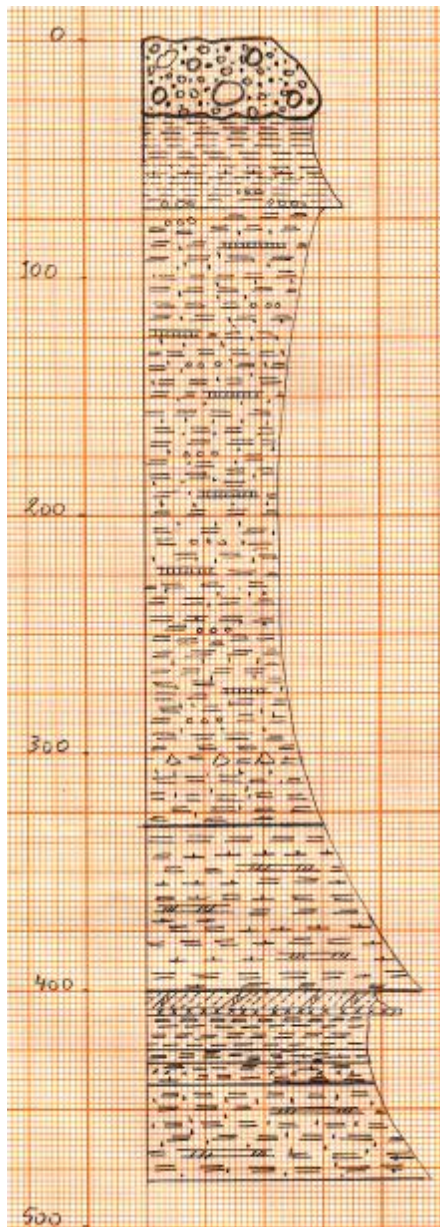
Silt grisâtre désorganisé à litage millimétrique à centimétrique.

Faciès hydrothermalisé (chloritisé, silicifié, albitisé).

Figure II.1.7 : Log stratigraphique synthétique du sondage Tif 9

Log

Description



Couverture mio-pliocène.

Pelite jaunâtre altéré et fracturé.

Pelite verdâtre localement gréseux et siliceux a circulation d'hématite dans les fractures.

Silt verdâtre gréseux localement hématitisé et chloritisé.

Niveau de trace de pyrrhotite.

Faïlle.

Silt verdâtre blanchâtre, siliciteux, localement siliceux.

Schiste vert sericiteux.

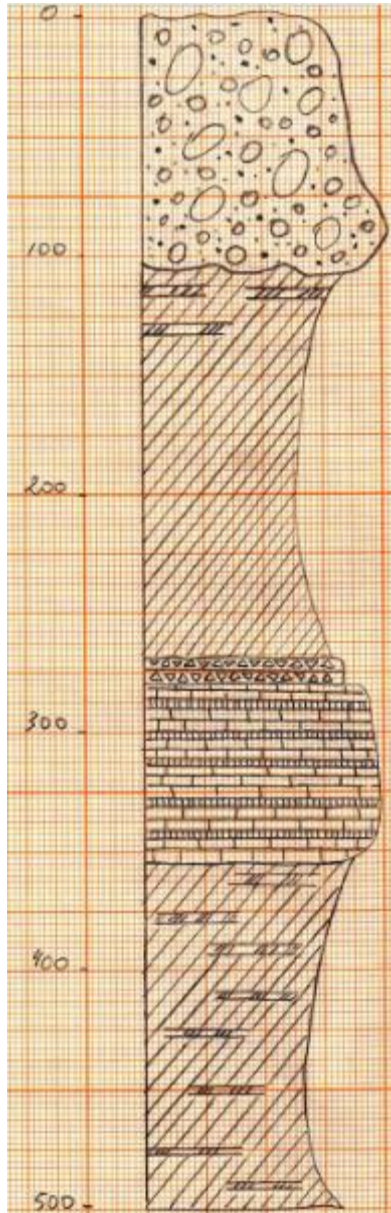
Silt pelitique zone de failles.

Silt noir plus au moins gréseux a veinules de silice.

Figure II.8 : Log stratigraphique synthétique du sondage Tif 15

Log

Description



Couverture mi-pléocène.

Tufs siliceux gris verdâtre plus au moins altéré.

Tufs gris verdâtre à biotite.

Magnétite.

Chlorite carbonaté.

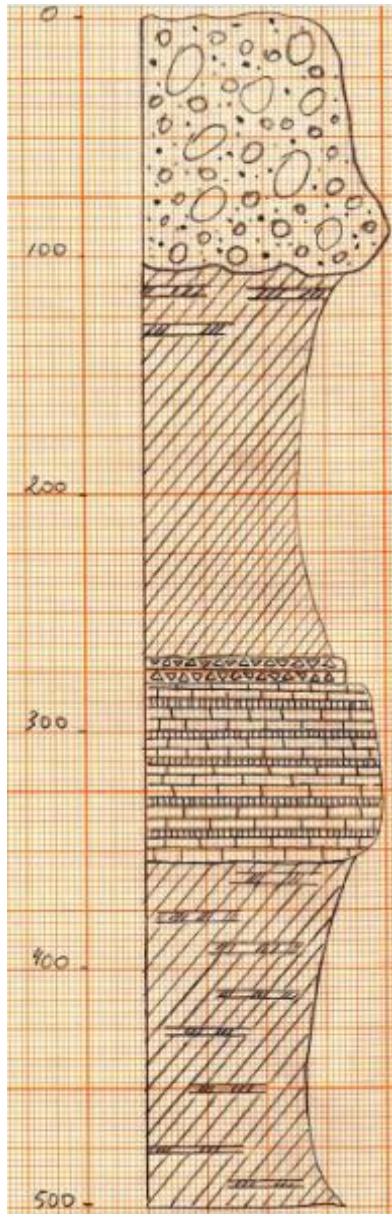
Tufs chloriteux gris vert avec un litage fréquent.

Tufs chloriteux gris vert.

Figure II.9 : Log stratigraphique synthétique du sondage Ts2

Log

Description



Couverture mio-pliocène.

Silt faillé et altéré.

Silt fin schistosé.

Silt chloritisé.

Pyrrhotite chlorite amphibolite albite calcareuse.

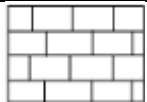

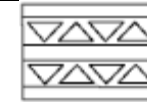
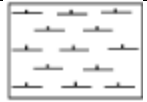






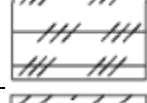


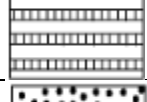

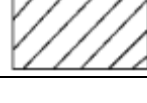
Magnétite.

Pyrrhotite chlorite amphibolite albite calcareuse a cœur de magnétite.

Silt décoloré avec unité de basalte silteux et gréseux dominés.

Figure II. 10 : Log stratigraphique synthétique du sondage Ts5

Légende :

| | | | |
|---|-------------------|--|----------------|
|  | Carbonate |  | Conglomérat |
|  | Magnétite |  | séricitisation |
|  | Trace de sulfures |  | Pélite |
|  | Silice |  | Stock-werk |
|  | Hématite | | |
|  | Quartz | | |
|  | Pyrrhotite | | |
|  | Schiste | | |
|  | Silt | | |
|  | Chlorite | | |
|  | Grés | | |
|  | Tuf | | |

L'analyse lithostratigraphique globale faite à partir des différents sondages utilisés (Tif 10, Tif14, Ts4, Ts5, TS2, TS3, TS1, Tif 15, Tif9) permet de mettre en relief une succession lithologique du secteur de Tiferouine comme suite :

De la base vers le haut on distingue :

- ↻ Des pélites gréseuses
- ↻ Des calcaires.
- ↻ Des pélites.
- ↻ Couverture Mio –Pliocène.

La lithologie retenue à partir des sondages est composée principalement de pélites gréseuses et des calcaires.

- Les pélites gréseuses, litées et rythmées, se caractérisent par un enrichissement important en chlorite. Ce sont des faciès altérés. Le caractère lité de ces pélites gréseuses se traduit par l'alternance de deux niveaux :

- ↻ L'un clair siliceux formés de quartz en clastes disséminés dans une matrice chloriteuse.
- ↻ L'autre sombre, très fins et riche en minéraux argileux. Par endroit des clastes de quartz et des granules de sulfures apparaissent dans ces niveaux sombres. On note également une forte chloritisation de ces niveaux.

La puissance de ces pélites gréseuses avoisine les 200 mètres. Au niveau des faciès chloritisés, la chlorite apparait le plus souvent orientée suivant le plan de schistosité.

Les calcaires se présentent sous forme de bancs lités, de couleur blanchâtre parfois gris verdâtre. Leur puissance varie de quelques centimètres à plus de 20 m. Localement, ces niveaux calcaire sont fortement altérés et transformés, avec présence de sulfures disséminés.

II. 3. Coupes réalisés à partir des logs

Nous avons effectué une analyse détaillée des descriptions faites sur les différents sondages carottés utilisés dans le but de comprendre la géologie locale de la région de Tiferouine. Ainsi, trois coupes géologiques ont été élaborées à partir des différents logs de sondages (**Figure II .11**). Ces coupes vont nous permettre de voir l'évolution spatiale de la série lithostratigraphique du secteur de Tiferouine.

- ☞ **La coupe A** (N-S), passe par les sondages Tif15, Tif14, et Tif10.
- ☞ **La coupe B** (N-S), passe par les sondages Tif9, Ts1, et Ts3.
- ☞ **La coupe C** (E-W), passe par les sondages Tif16, TS5, TS4, TS2, et TS3.

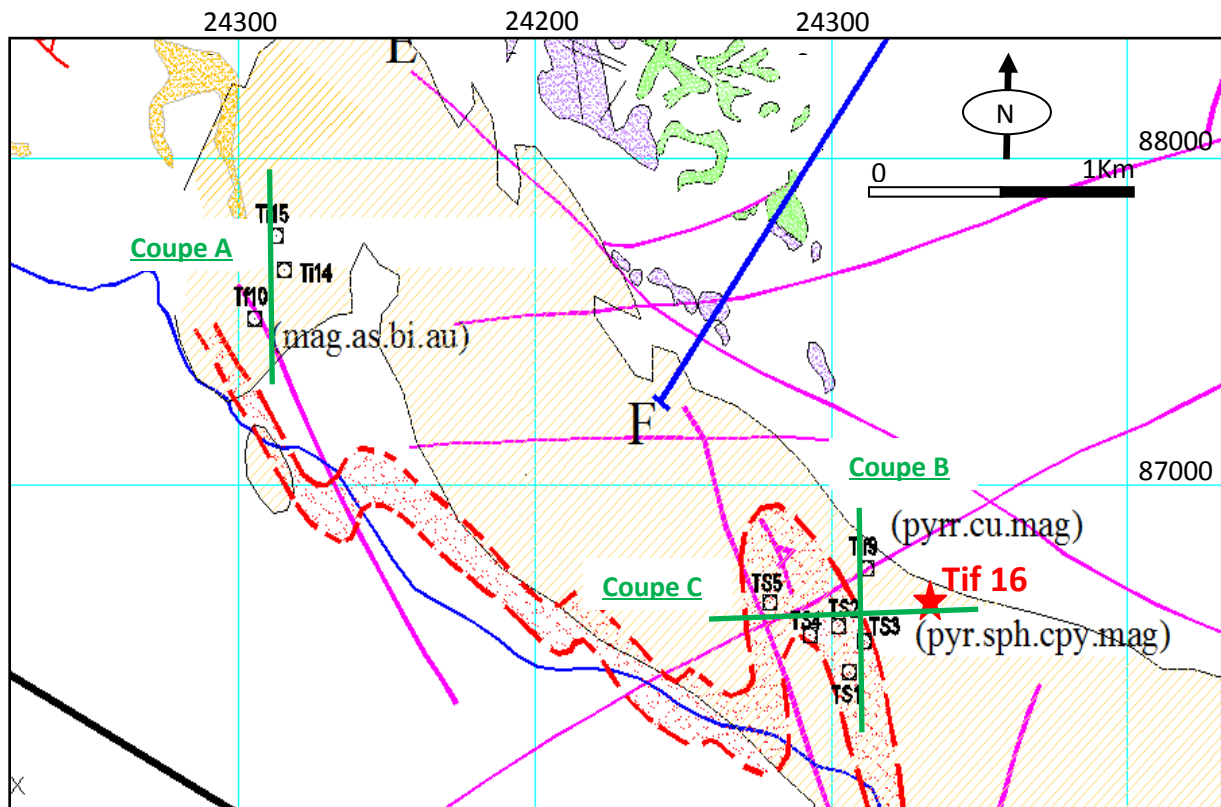


Figure II .11 :

Position des coupes géologiques réalisées dans le secteur de Tiferouine.

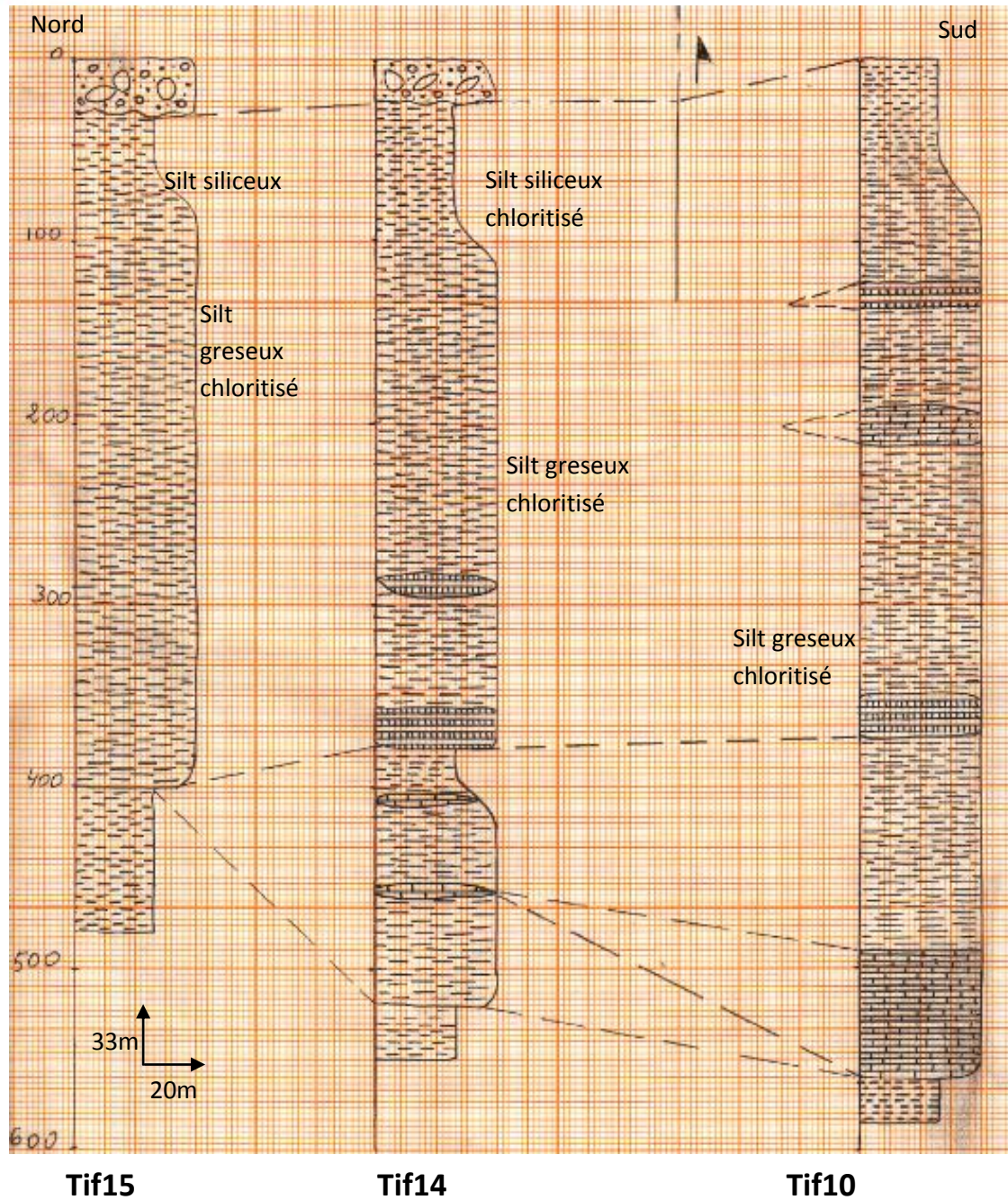


Figure II.12 : coupe géologique N-S (A), réalisée à partir des sondages 15, 14 et 10.

Légende :

 : Silt
  : Chlorite
  : Carbonate

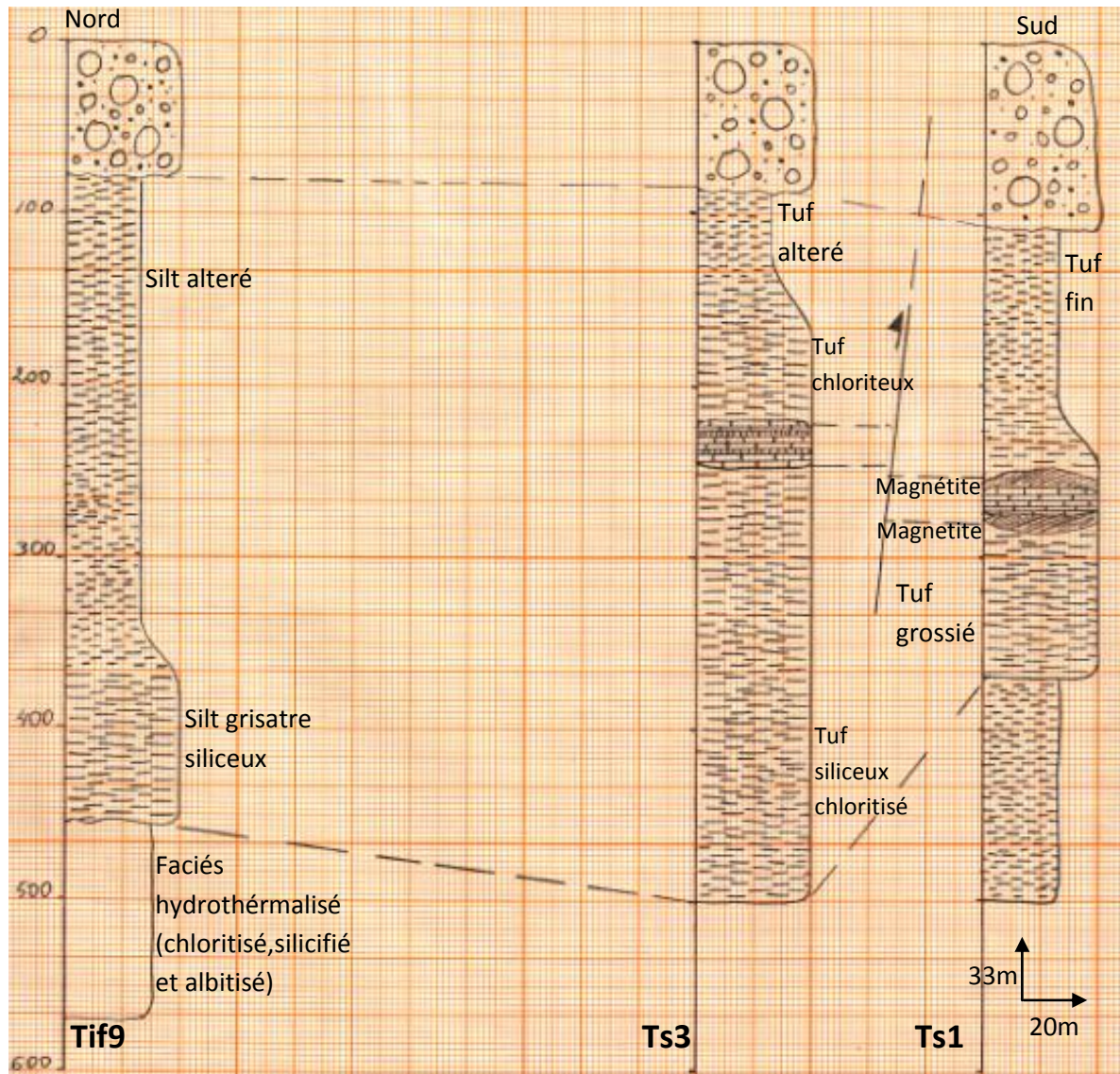
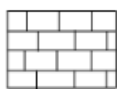


Figure II.13: coupe géologique (B) N-S réalisée à parties des sondages 9, 3 et 1.

Légende :



: Carbonate



: Silt



: Chlorite

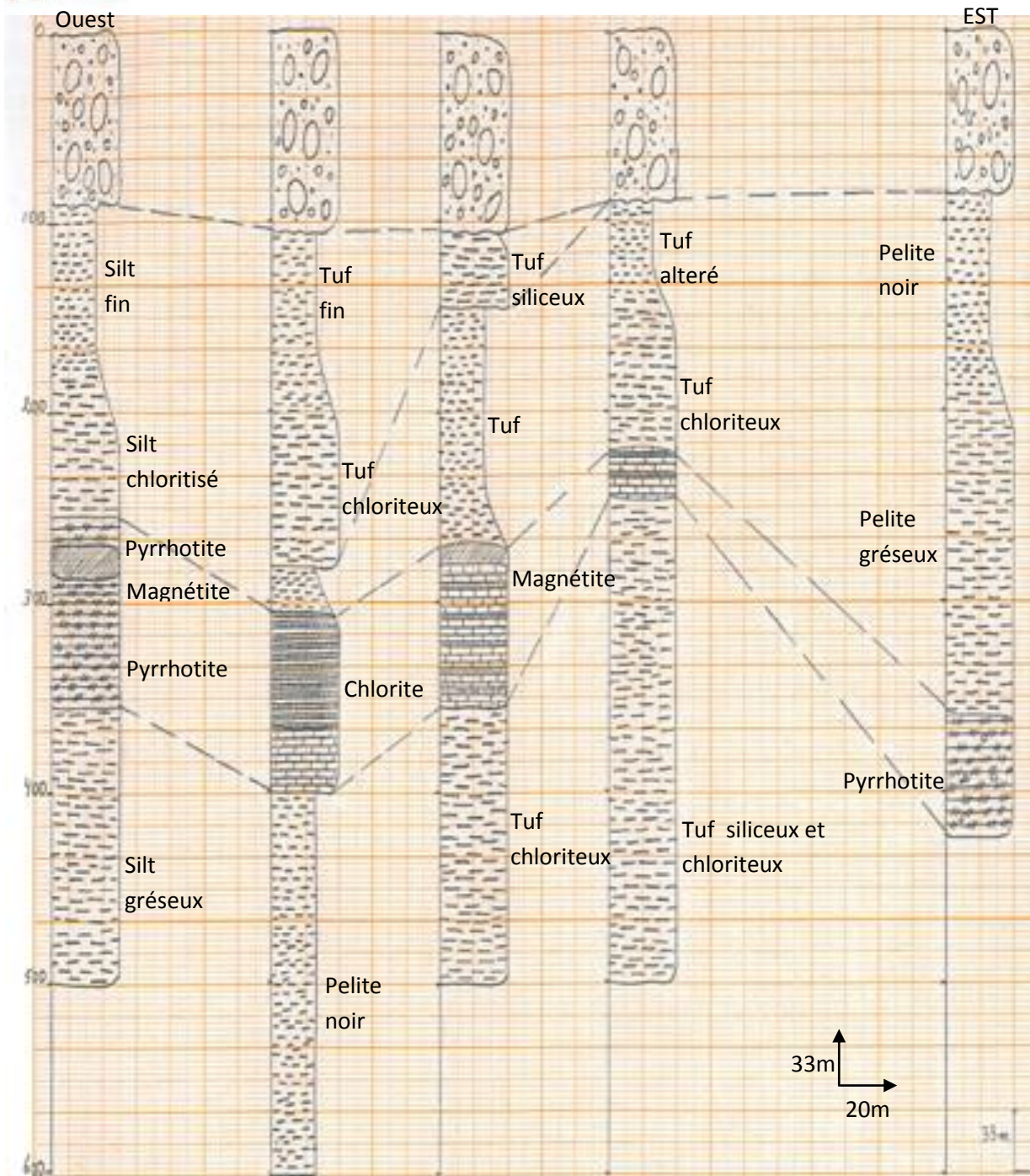


Figure II.14 : coupe géologique E-W (C), réalisée à partir des sondages 5, 4, 2, 3,16.

Légende :



II.4. Commentaire des coupes

Coupe A :

Cette coupe, réalisée à partir des sondages Tif 15, Tif 14 et Tif 10, montre que la partie occidentale du secteur de Tiferouine est formée d'une série silteuse à récurrences gréseuses et parfois à calcaire gréseux. Le sud de cette partie comporte des passages carbonatés sous forme de barres et de niveaux lenticulaires.

Dans cette zone, on note des manifestations hydrothermales qui se traduisent par une silicification et une chloritisation très intenses des faciès et en particuliers les grès et les calcaires gréseux. Ces phénomènes d'altération hydrothermale sont accompagnés par des dépôts de sulfures (sulfures lités, disséminés et en imprégnations).

Coupe B :

Cette coupe, orientée N-S, concerne la partie orientale du secteur. Elle a été réalisée sur la base des sondages Tif9, TS3 et TS1.

L'analyse de la coupe montre une lithostratigraphie dominée par des silts gréseux rythmés, à litage désorganisé attestant de phénomènes synsédimentaires. Ces silts gréseux sont localement chloritisés. Des niveaux carbonatés apparaissent également dans ces silts gréseux. Ces niveaux carbonatés, de puissance centimétrique à métrique, sont parfois altérés et associés à des niveaux à magnétites.

On note également que les niveaux calcaires sont abondants vers le sud du secteur par rapport au nord.

Coupe C :

Cette coupe, orientée E-W, couvre la totalité du secteur de Tiferouine. Elle a été dressée sur la base des sondages TS 5, TS4, TS2, TS3 et Tif 16.

Cette coupe montre une continuité lithostratigraphique des formations en allant de l'Est vers l'ouest. Ceci est très bien marqué au niveau des horizons minéralisés et transformés qui apparaissent continus de l'Est vers l'ouest.

Les décalages des niveaux transformés et minéralisés observés au niveau de la coupe peuvent être la conséquence de plis synschisteux NW-SE connus dans la région et/ou des structures faillées à caractère cisailant caractérisant le secteur (Hibti, 2001).

Cette coupe montre également un caractère continu des transformations hydrothermales observées dans les différents sondages et atteste de l'ampleur des manifestations hydrothermales qu'a connue la région.

Troisième partie
Etude pétrographique
et métallogénique

III .1. Introduction

Cette partie a pour objectif principal de définir la nature pétrographique, et métallographique des différents faciès et minéralisations qui caractérisent le secteur de Tiferouine. Ainsi, une dizaine d'échantillons ont été étudiés à partir des sondages Tif16 et Tif 10.

III .2. L'étude pétrographique

L'étude microscopique des différents échantillons révèle l'existence d'une monotonie de faciès, représentés principalement par des récurrences de pélites carbonatés et gréseuses.

Microscopiquement, ces pélites carbonatées sont dominés par les minéraux argileux auxquels s'associent de rares clastes de quartz. Ces minéraux sont noyés dans une matrice carbonatée.

Les pélites gréseuses sont lités et sont composées de quartz en clastes isolés et parfois recristallisés. La matrice de la roche est fines et est composée de minéraux micacés (séricite et muscovite) parfois biotitisés.

Localement, ces pélites carbonatés sont fortement altérés avec une minéralogie à chlorite, amphibole et épidotes. Par endroit, on observe des injections carbonatées tardives (**photo1 et 2**).

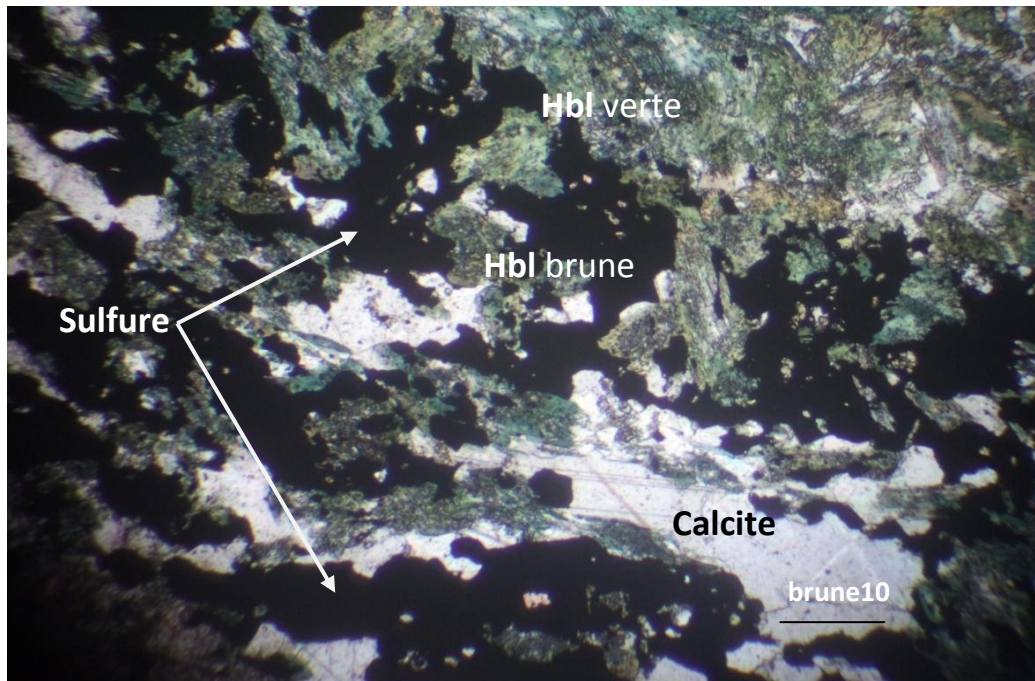


Photo 1 : calcite associé a des sulfures (Ech.5) (L.N.)

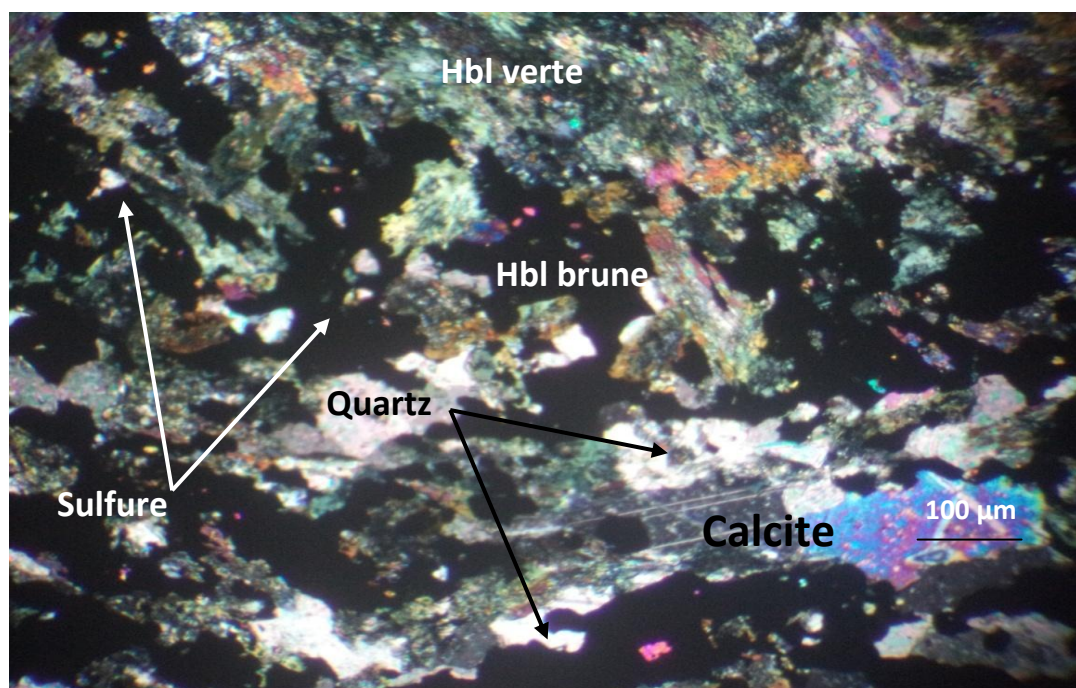


Photo 2 : calcite associé a des sulfures (Ech. 2) (L. P.)

Les amphiboles sont sous forme de cristaux allongés (**photo 4**), présentant seul famille de clivage. La biotite a été également observée (**photo 3**). Elle se présente sous forme de cristaux dispersés.

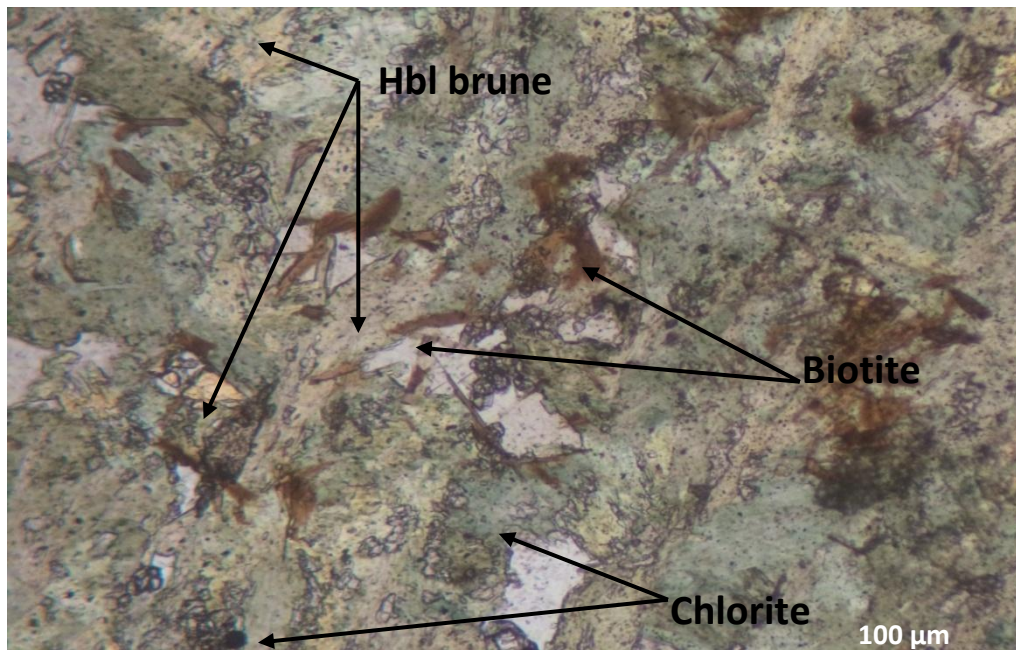


Photo 3: la biotitisation et la chloritisation bien développées (Ech. 5) (L. N.)

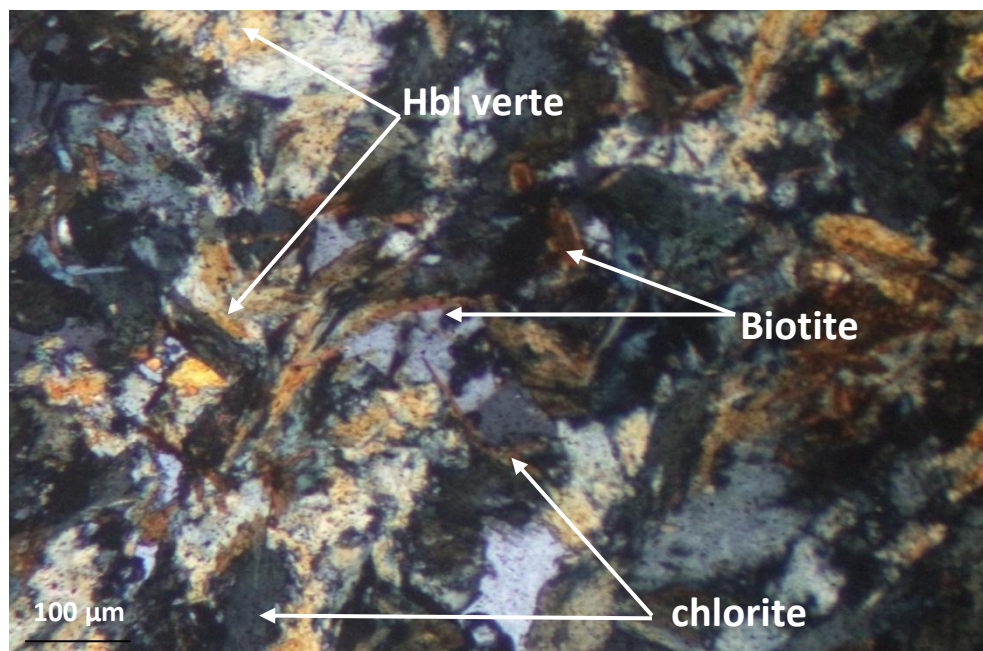


Photo 4 : cristaux d'amphibole en section longitudinale (Ech.5) (L. P.)

La présence des amphiboles et des épidotes attestent d'un métamorphisme hydrothermal (**photo 5 et 6**). Il s'agirait probablement de la transformation métasomatique d'une série carbonatée à l'origine.

On observe également une zone minéralisée essentiellement à sulfures auxquels s'associe de la calcite. Ces derniers baignent dans une trame essentiellement à chlorite (**photo 7**). On note également l'abondance d'amphibole sous forme de baguettes fines, parfois en fibres (**photo 8**).

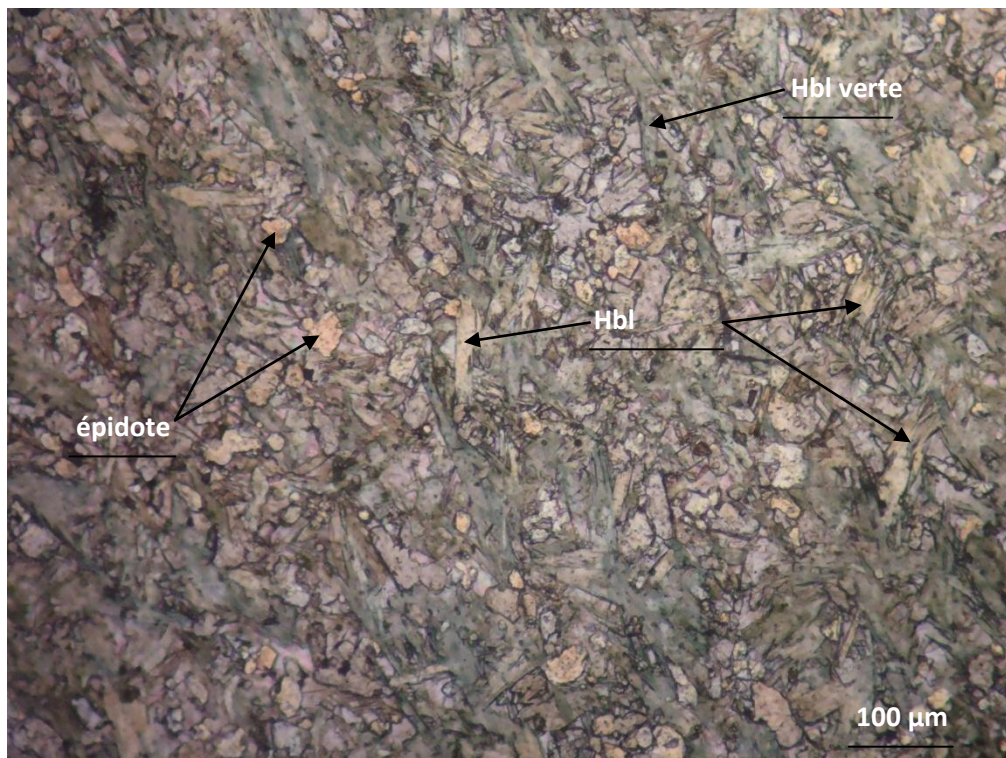


Photo 5 : cristaux d'épidote dispersés et non orientés (Ech. E2) (L.N.)

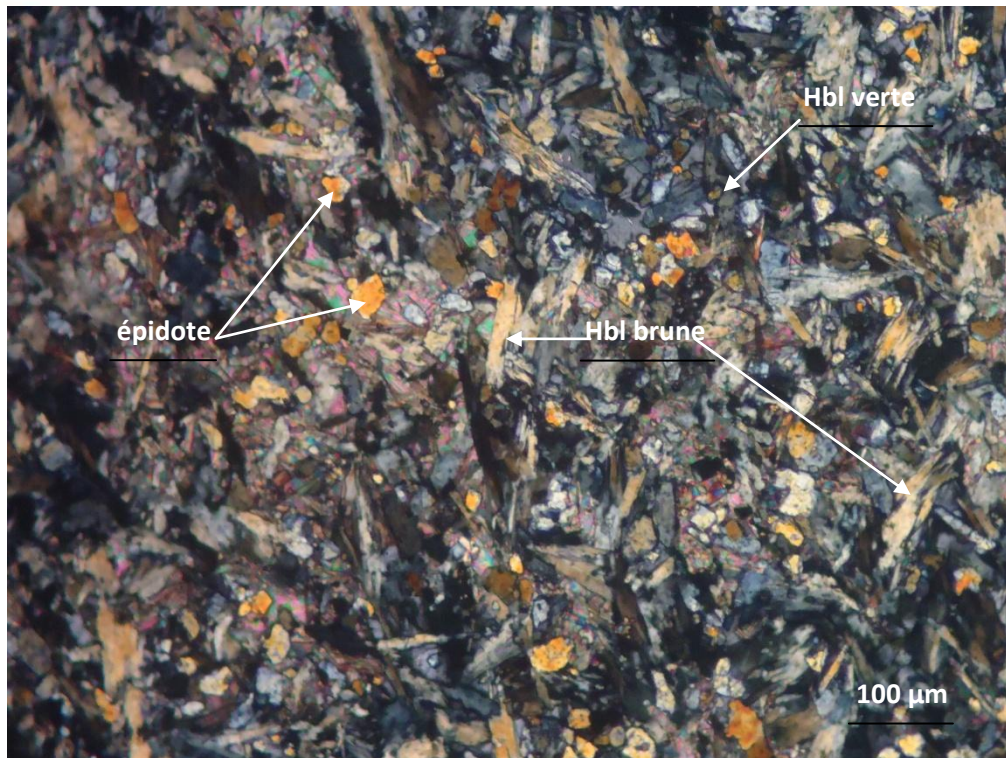


Photo 6 : cristaux d'épidotes dispersés et non orientés (Ech.2) en LP

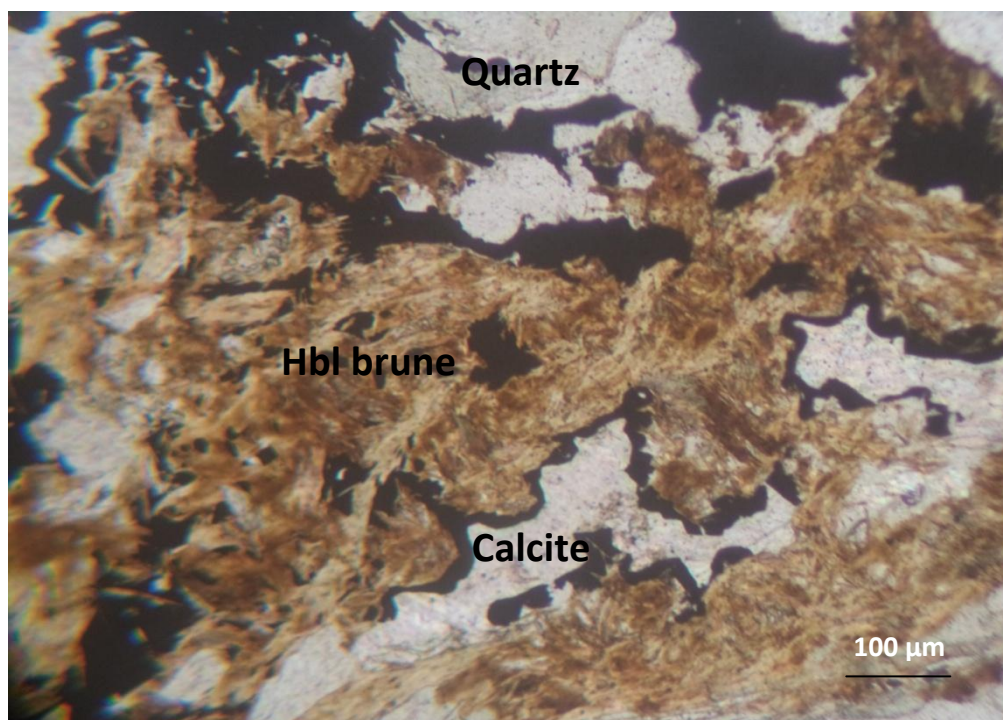


Photo7 : Les amphiboles orientés (Ech. 5) (L. P.)

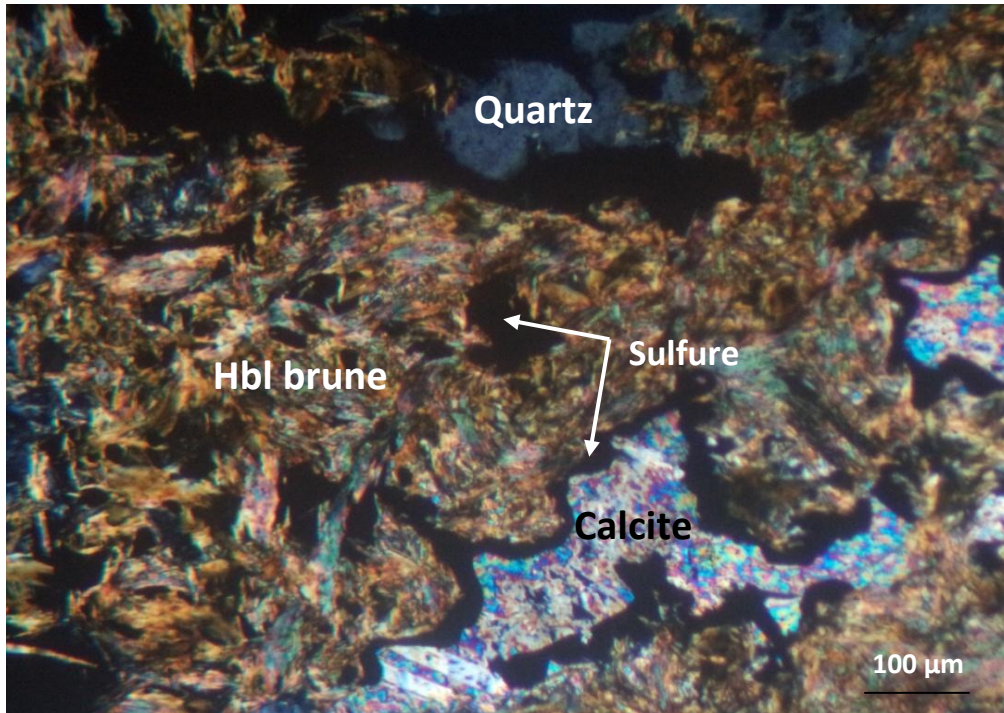


Photo 8: veine à calcite et sulfures observée dans les amphibolites (Ech. 5) (L. P.)

Au niveau des calcaires gréseux on remarque que la roche est dominée par de la calcite recristallisée, dans la quelle apparait par endroit des clastes de quartz (Photo, 9). Localement, on note la présence de cristaux de biotite et de chlorite. Les sulfures sous forme disséminés ont été également observés.

Dans ce faciès on note parfois le début de croissance des amphiboles. En effet, localement, on observe l'apparition de nouveaux cristaux d'amphiboles.

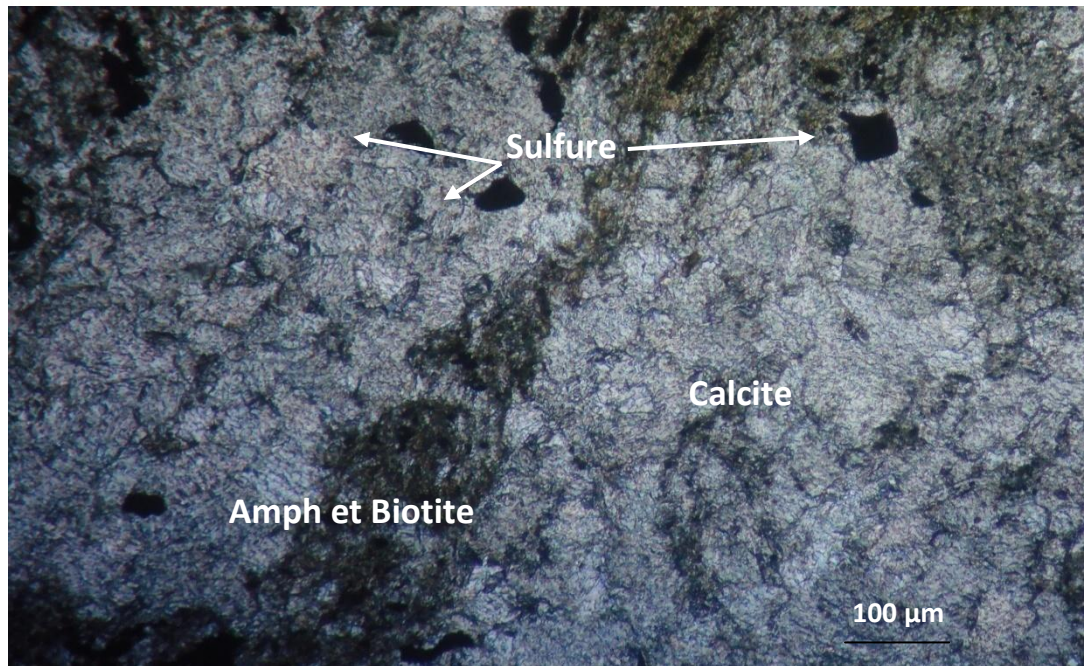


Photo 9 : début de formation des amphiboles (L. N.)

Les résultats minéralogiques systématiques des échantillons prélevés sur le sondage Tif 16 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

| N° Ech. | Côte | Description |
|----------------|-------------|---|
| 1 | 346 | Principalement de l'amphibole biotitisée. |
| 2 | 389 | C'est un faciès à amphibole et épidote, présentant une altération hydrothermal, avec orientation des circulations des carbonates, et révélation d'un événement de biotitisation. |
| 3 | 400 | Il s'agit d'une altérite a chlorite, amphibole et épidote, c'est un facies probablement carbonaté, avec manifestation d'une altération hydrothermale, les amphiboles témoignent une déformation de cisaillement. |
| 4 | 372 | On aperçoit une abondance de la chlorite accompagnée d'un phénomène de chloritisation qui suit la biotitisation, présence aussi la calcite avec quelques baguettes j d'amphibole qui sont au cours de biotitisation, c'est un facies carbonaté. |
| 5 | 376 | A partir de la lame de cet échantillon on distingue du chlorite, la biotite, présence des sulfures et des veines de quartz, et des amphiboles orientées. |
| 6 | 390 | On saisit pratiquement la même minéralogie retrouvée dans la lame de l'échantillon 5, avec l'ajout de la calcite. |
| 6' | 390 | On voit de la chlorite, de l'hornblende verte, des épidotes et abondance de la biotititsation. |
| 7 | 375 | On retrouve de la calcite qui borde la partie minéralisée, et des veinules de quartz qui travers la minéralisation. |

III .3.Gîtologie

Dans cette partie, on sera amené à apporter quelques précisions, tirées à partir de l'analyse du sondage TIF16, sur la morphologie et l'organisation de la minéralisation au niveau du secteur d'étude.

L'analyse détaillée des carottes du sondage TIF16 et des analyses microscopiques ont révélés la présence de 2 types de minéralisations : minerai massif plus ou moins rubané, minerai de type stock-werk.

Minerai massif plus ou moins rubané : c'est le minerai dominant dans notre secteur d'étude et qui est économiquement le plus intéressant. Il comporte la pyrrhotite omniprésente et prédominante, la chalcopryrite et de la magnétite. Le minerai est massif et présente parfois une succession de rubans sulfurés, parallèles à la stratification S0 de la roche encaissante. Ce minerai montre également une bréchification locale.

Minerai de type stock-werk : il apparait en imprégnation autour des fissures qui s'organisent en réseau de veinules plus ou moins anastomosées et remplies de pyrrhotite, de chalcopryrite et/ou de sphalérite. Les épontes des veinules de stock-werk montrent un important enrichissement en chlorite, calcite et quartz.

III .4. Paragenèse métallique

L'étude menée sur les sondages carottés TIF16 , et l'analyse microscopique ont montré plusieurs minéraux métalliques. Ainsi nous avons pu différencier deux types de paragenèses métalliques principales au niveau de ce sondage : une paragenèse primaire et une paragenèse secondaire.

Paragenèse primaire : elle se compose de pyrrhotite, magnétite, sphalérite, chalcopyrite et arsénopyrite.

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. Elle est présente dans presque tous les types et stades de minéralisation. Généralement elle est massive et fissurée. Au microscope, elle forme de larges plages où on retrouve des cristaux de pyrite, de sphalérite et de chalcopyrite.

La chalcopyrite : elle est moins abondante que la pyrrhotite (**photo 12**) et se présente, le plus souvent en inclusions dans les autres espèces minérales, parfois associée intimement a la pyrrhotite (**photo 10**) , ou bien présentée en liserés reprenant les petits fragments, ou en exsolutions surtout dans la sphalérite (**photo 11**).

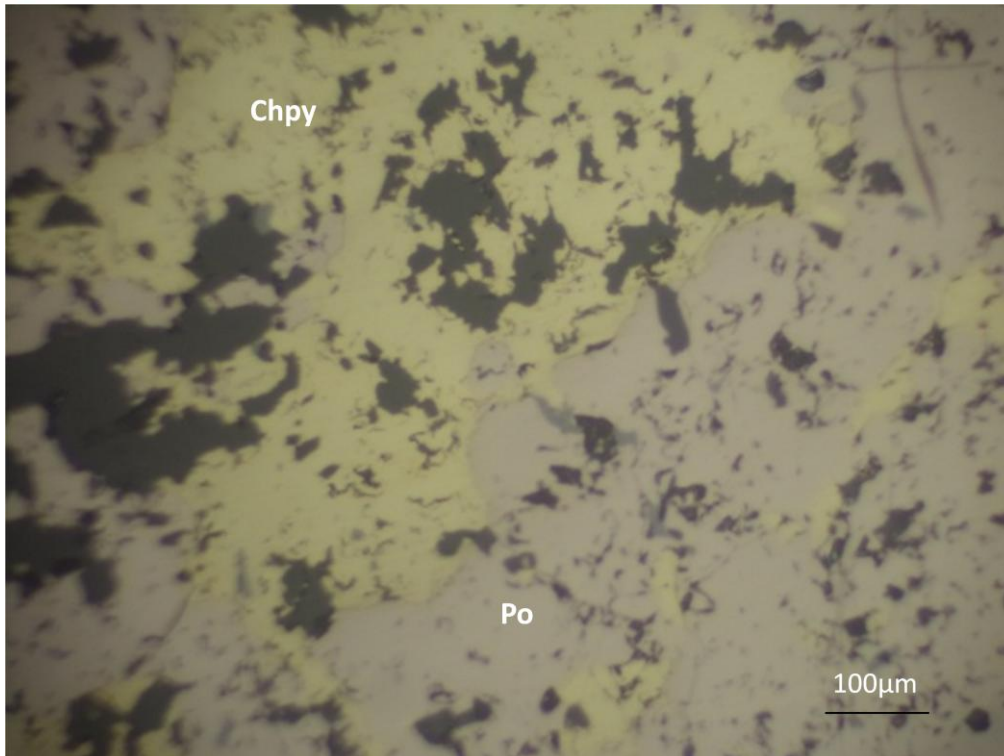


Photo 10 : association chalcopyrite - pyrrhotite (Ech.5) (L.N.)

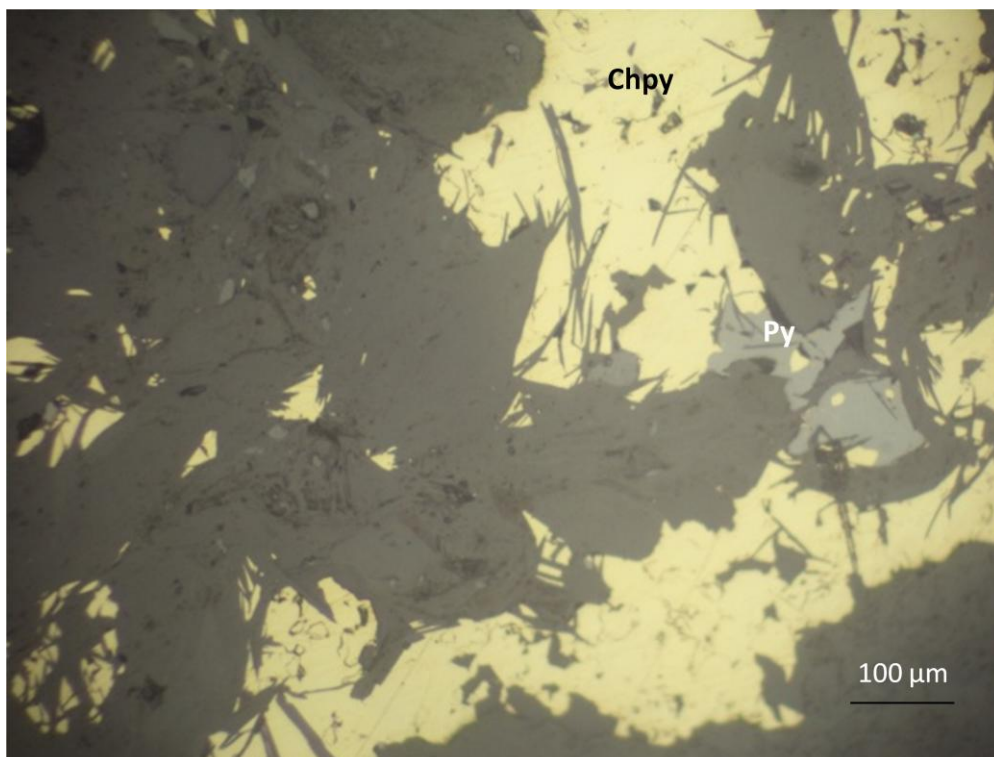


Photo 11 : la chalcopyrite en liserés et en exsolutions dans la sphalérite (Ech.5) (L.N.).

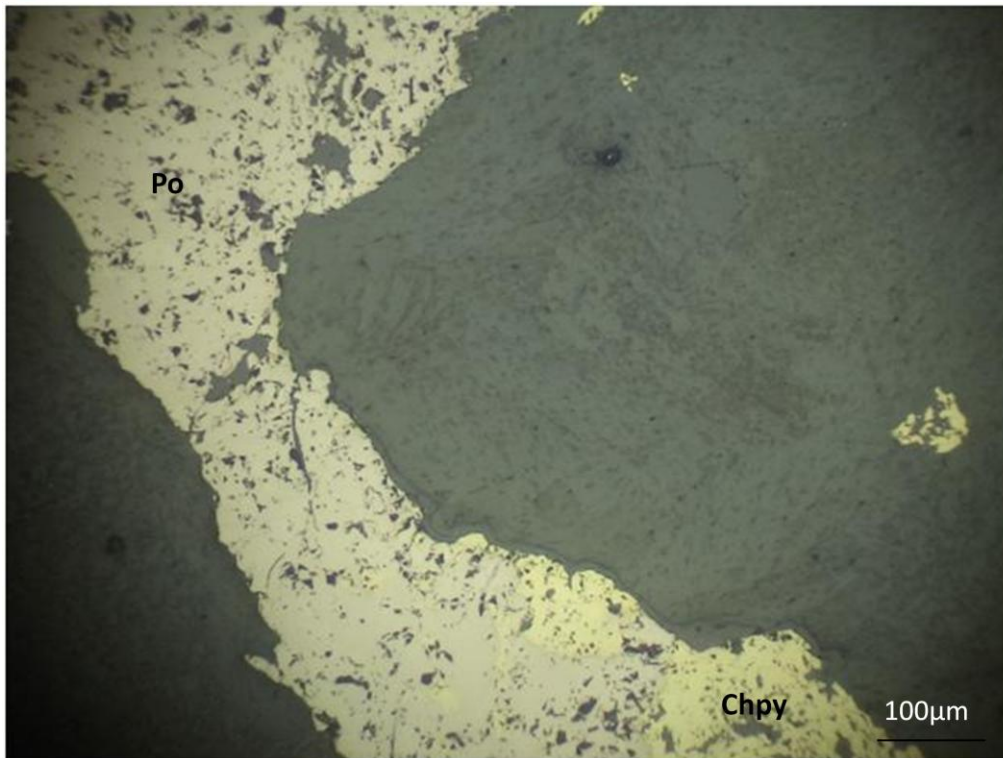


Photo 12: la chalcopyrrite semble bien moins abondante que la pyrrhotite (Ech.5) (L.N.).

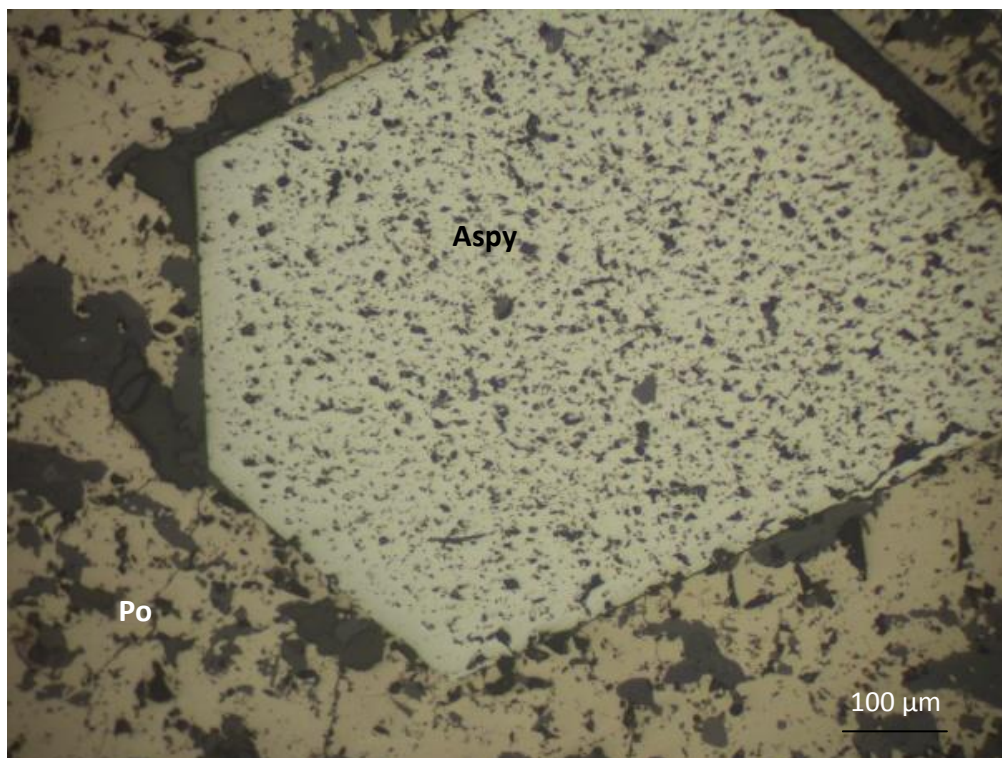


Photo 13 : Gros cristal d'arsenopyrite développé sur la pyrrhotite (Ech.2) (L.N.).

L'arsénopyrite : l'arsénopyrite est rarement présente, mais parfois, elle apparaît en fins cristaux dans les autres sulfures, notamment la pyrrhotite, d'autre fois même en grands cristaux (0.5 mm) (**photo 13**).

La magnétite : Elle a été très rarement observée. Elle se présente sous forme de cristaux isolés et disséminés au sein de la pyrrhotite (**photo 14**).

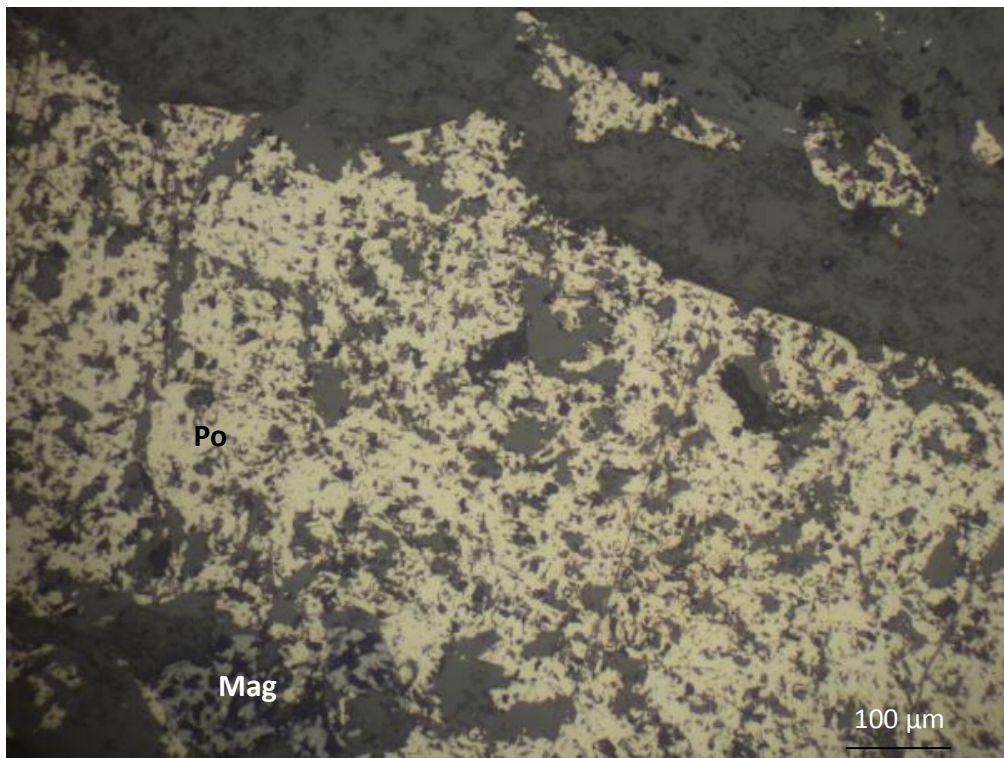
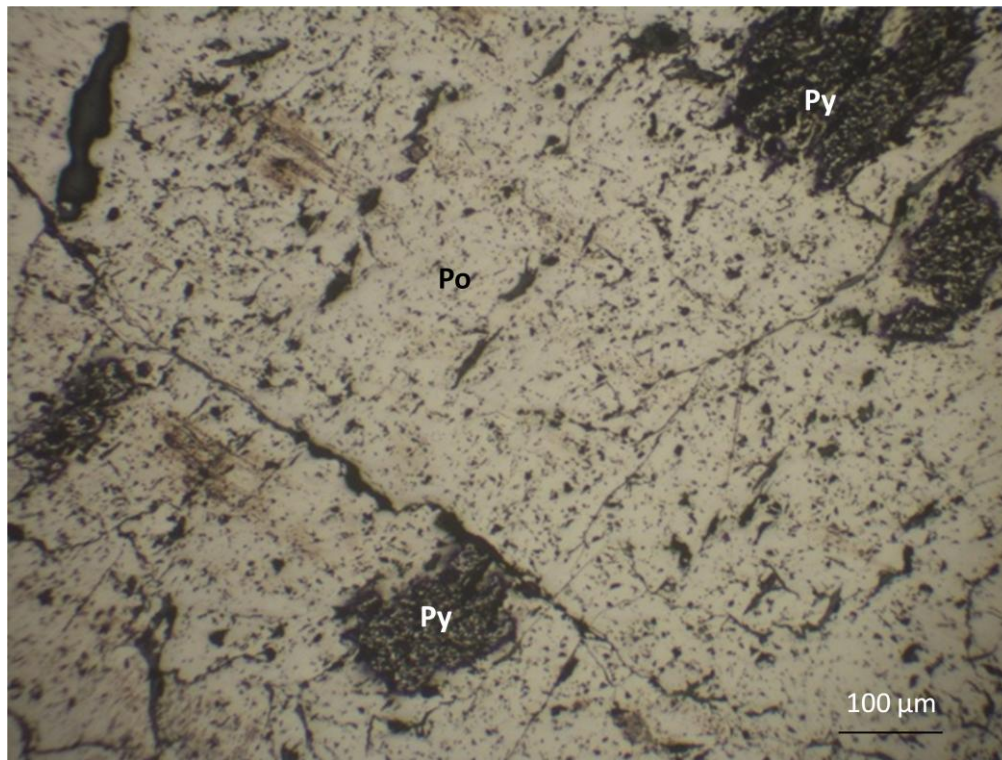


Photo 14: la magnétite en cristaux isolés et disséminés au sein de la pyrrhotite . (Ech.6)
(L.N.).

Paragénèse secondaire : la paragenèse minérale primaire a du subir une oxydation partielle, suite à une ouverture d'un système de fissures. Ceci a conduit à l'apparition

d'une paragenèse secondaire composée de pyrite, et de magnétite en très faible quantité.

La pyrite : la pyrite pousse sur la pyrrhotite en suivant les fissures et les fractures. Elle représente la transformation secondaire de la pyrrhotite, ce qui implique qu'elle provient de l'oxydation de la pyrrhotite (**photo 15**).



Photos 15 : pyrite poussant sur la pyrrhotite selon les fissures et les fractures. (Ech. 7)

III .5.Synthèse

A la lumière des données précédentes, les principales espèces minérales métalliques rencontrées dans le secteur de Tiferouine d'après les études des sondages carottés que nous avons effectué à travers les observations microscopiques, sont résumées selon :

Sulfures : pyrite, pyrrhotite, arsénopyrite, chalcoppyrite.

Oxydes : magnétite

Minéraux d'altération : quartz, biotite, chlorite, amphibole et épidote.

Quatrième partie
Étude géophysique

IV.1. Magnétisme

Principe général

La magnétométrie est une technique géophysique passive qui mesure les variations naturelles du champ magnétique terrestre. C'est l'une des méthodes les plus utilisées dans l'exploration minérale, de par la quantité d'informations qu'elle permet de recueillir et en regard à son faible coût, sa rapidité de mise en œuvre et sa facilité à opérer au point de vue instrumental. La source magnétique dont l'effet est mesuré en surface peut être localisée à une très grande profondeur. En vertu de leurs propriétés magnétiques, certains minéraux tels la magnétite produisent des perturbations locales dans le champ magnétique terrestre.

La méthode de prospection magnétique s'appuie sur la mesure des composantes du champ magnétique terrestre et les variations occasionnées localement par les différences de susceptibilité magnétique des terrains et des roches. Une des méthodes les plus utilisées est celle qui mesure le vecteur champ magnétique total.

En première approximation, le champ magnétique terrestre peut être représenté par celui d'un dipôle placé au centre de la terre pointant vers son pôle sud et faisant un angle de 11° environ avec son axe de rotation. Ce champ de forme dipolaire est représenté par un vecteur F défini en tout point du globe par trois composantes (**Fig. IV.1**) :

- une composante nord dirigée vers le nord magnétique (X)
- une composante (Y)
- une composante verticale (Z)

Très souvent, on donne une valeur exprimée par la grandeur du champ total F ou de sa composante horizontale H et sa déclinaison D ainsi que son inclinaison I . D est

l'angle entre la composante horizontale du champ et le nord géographique et l'angle entre F et l'horizontal.

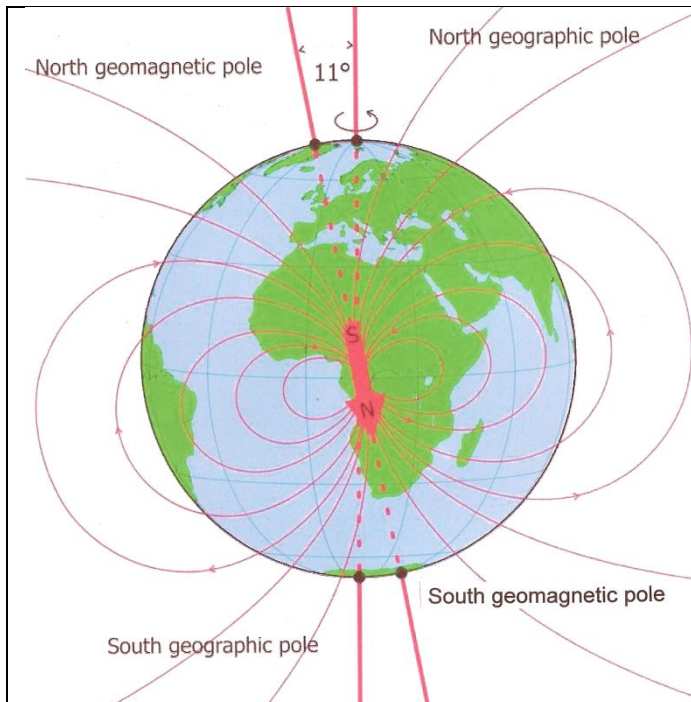


Figure IV.1a. Représentation du champ magnétique terrestre principal (dipolaire)

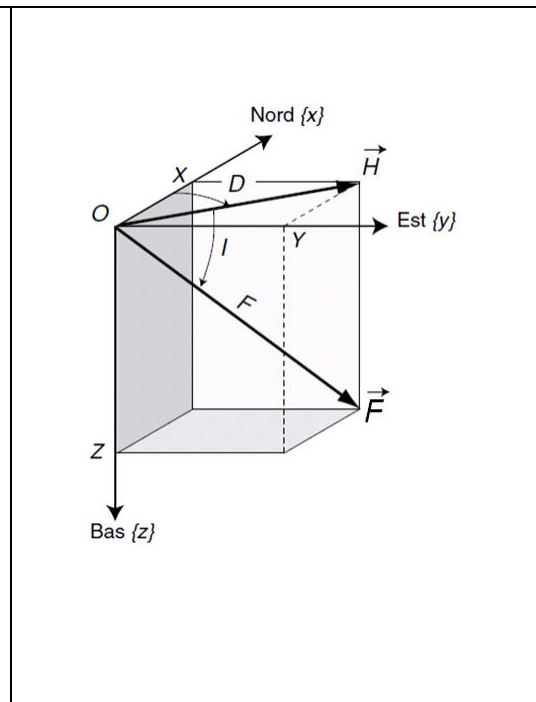


Figure IV.1b. Les composantes du vecteur champ magnétique terrestre

La mise en œuvre d'un levé magnétique est effectuée à l'aide de deux magnétomètres. Le premier est maintenu fixe en un même point durant toute la période de levé, il sert de station de base pour enregistrer les variations diurnes du champ magnétique terrestre. Le deuxième, mobile, est déplacé pour prendre les mesures du champ magnétique le long des lignes du levé. Les données magnétiques corrigées des variations diurnes peuvent déjà être analysées afin d'en déduire des informations sur les la teneur du sous-sol en minéraux magnétiques. Cependant, très souvent pour en faciliter l'interprétation, on leur applique certains traitements mathématiques avec en premier lieu la réduction au pôle qui vise à transformer les anomalies bipolaires en anomalies unipolaires formées d'un positif centré sur le corps

magnétique. Cette transformation consiste à éliminer les distorsions liées à l'inclinaison du vecteur champ magnétique terrestre.

Prospection magnétique du secteur de Tiferouine

Données utilisées

Les données analysées dans le cadre de cette étude ont été acquises lors d'un levé magnétique au sol destiné à la reconnaissance des environs du gisement de Hajjar. Ce levé a été mis en œuvre au début des années 1990 après l'ouverture de la mine. Les mesures ont été effectuées selon une grille formée par des lignes de direction NE-SW espacées de 100 m avec des stations régulièrement espacées de 12.5 m. La **Figure IV.2** montre la partie de cette grille qui couvre le secteur de Tiferouine, situé au sud-ouest du gisement de Hajjar.

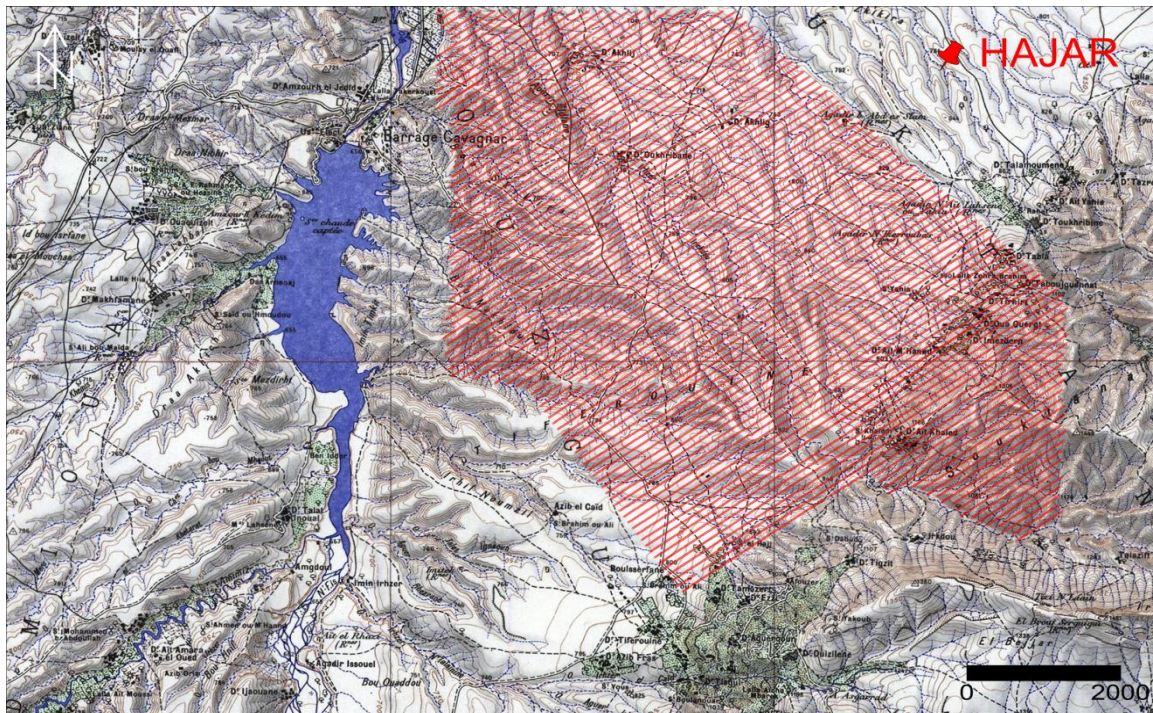


Figure IV.2. Grille du levé magnétique du secteur de Tiferouine

Analyse et interprétation

Les données magnétiques sont disponibles sous forme de valeurs du champ total. Elles ont d'abord été représentées sous forme d'une carte de contours après soustraction d'un niveau de base de 40000 nT (**Fig. IV.3**). Cette carte montre que la zone de Tiferouine est caractérisée par une anomalie magnétique bipolaire qui s'étend sur plusieurs kilomètres en direction NW-SE. L'amplitude de cette anomalie atteint son maximum de plus de 200 nT au centre de la carte et diminue en allant vers le sud-est parallèlement à l'élargissement de l'anomalie. Ces variations d'amplitude et de longueur d'onde de l'anomalie pourraient s'expliquer par un approfondissement de la source en allant du vers le sud-ouest.

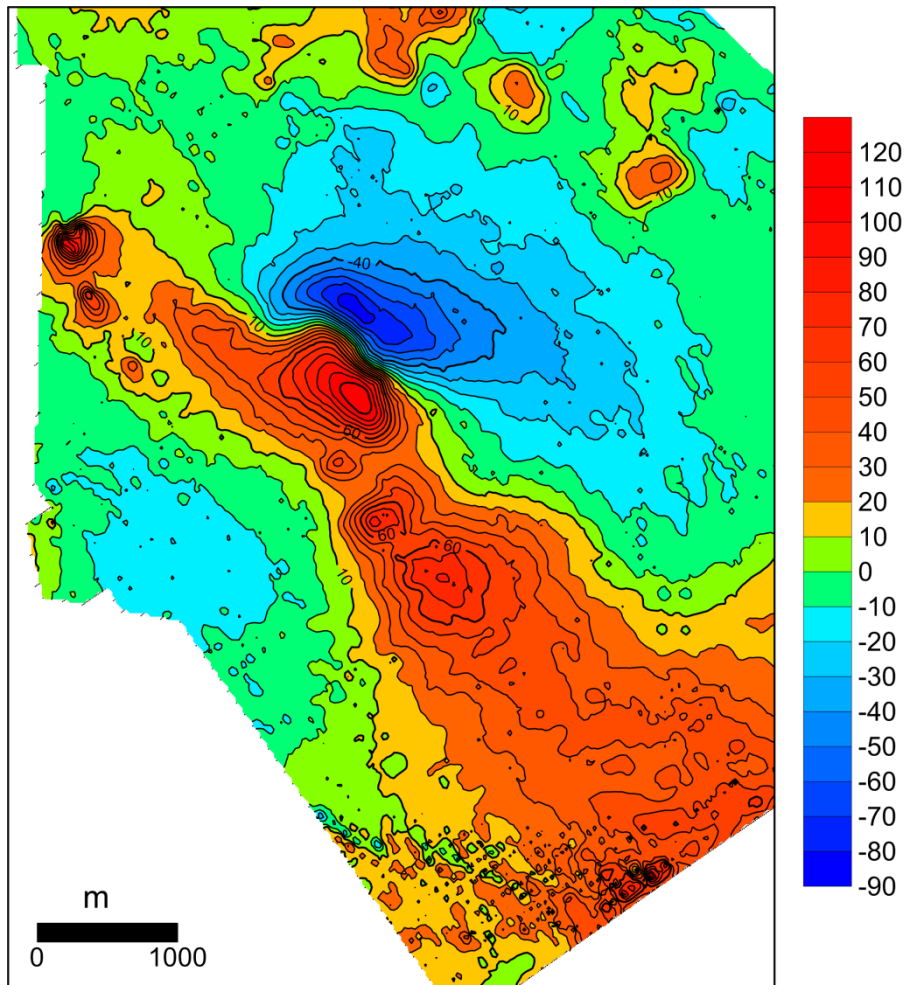


Figure IV.3. Carte magnétique de Tiferouine, contours du champ total après soustraction d'un niveau de base de 40000 nT.

La réduction au pôle permet de transformer les anomalies bipolaires en anomalies unipolaires positives centrées sur leurs sources. Dans le cas de Tiferouine, la carte du champ réduit au pôle fournit plus de précisions sur la forme générale, l'orientation et l'étendue de la zone magnétique. En effet, on note que cette zone traverse l'ensemble de la grille selon la diagonale NW-SE. Elle définit un axe de valeur relativement élevées au sein duquel s'individualisent cinq anomalies, notées A à E. Le décalage des anomalies C et D par rapport à l'alignement de B et E, pourrait s'expliquer par un de

failles transversales situées de part et d'autre du bloc C-D et qui le décaleraient vers le sud-ouest (**Fig. IV.4, II.5 et II.6**).

Les travaux de reconnaissance par sondages menés par le service géologique de la CMG font état de l'existence à Tiferouine d'une structure minéralisée dont la projection à 400 de profondeur est présentée sur la Figure IV.5 en surimpression sur la carte magnétique. Cette superposition montre que l'horizon minéralisé se corrèle parfaitement avec l'anomalie magnétique au centre de la carte. Par contre, sa partie nord-ouest apparaît légèrement décalée vers le sud-ouest par rapport à l'axe de l'anomalie. Ce décalage pourrait s'expliquer par un pendage vers le sud-ouest de la structure minéralisée. Or les données géologiques et la forme de l'anomalie de magnétique de Tiferouine indiquent plutôt un pendage dans le sens opposé c.-à-d. vers le nord-est. En tenant compte de ces éléments, on peut considérer que l'anomalie observée ne serait pas due uniquement à la structure minéralisée reconnue à Tiferouine mais il faudrait envisager une source plus grande qui inclut probablement l'horizon minéralisé et dont le centre de masse serait plus décalé vers le nord-est.

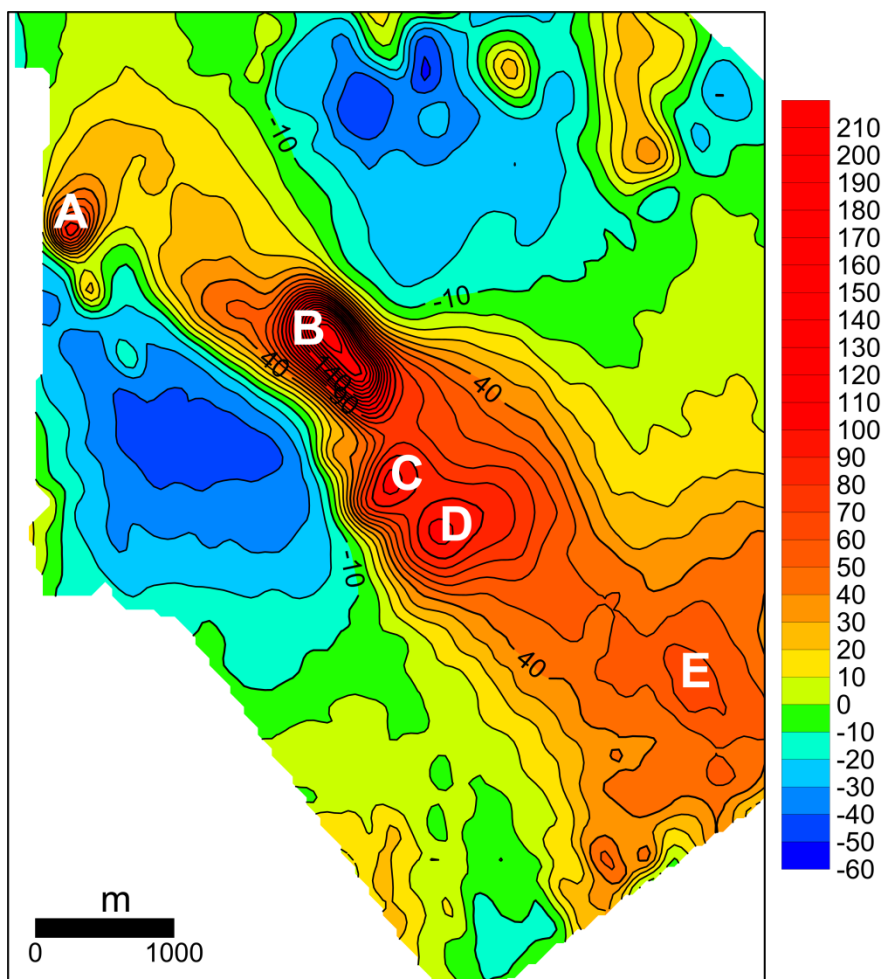


Figure IV.4. Carte du champ magnétique réduit au pôle.

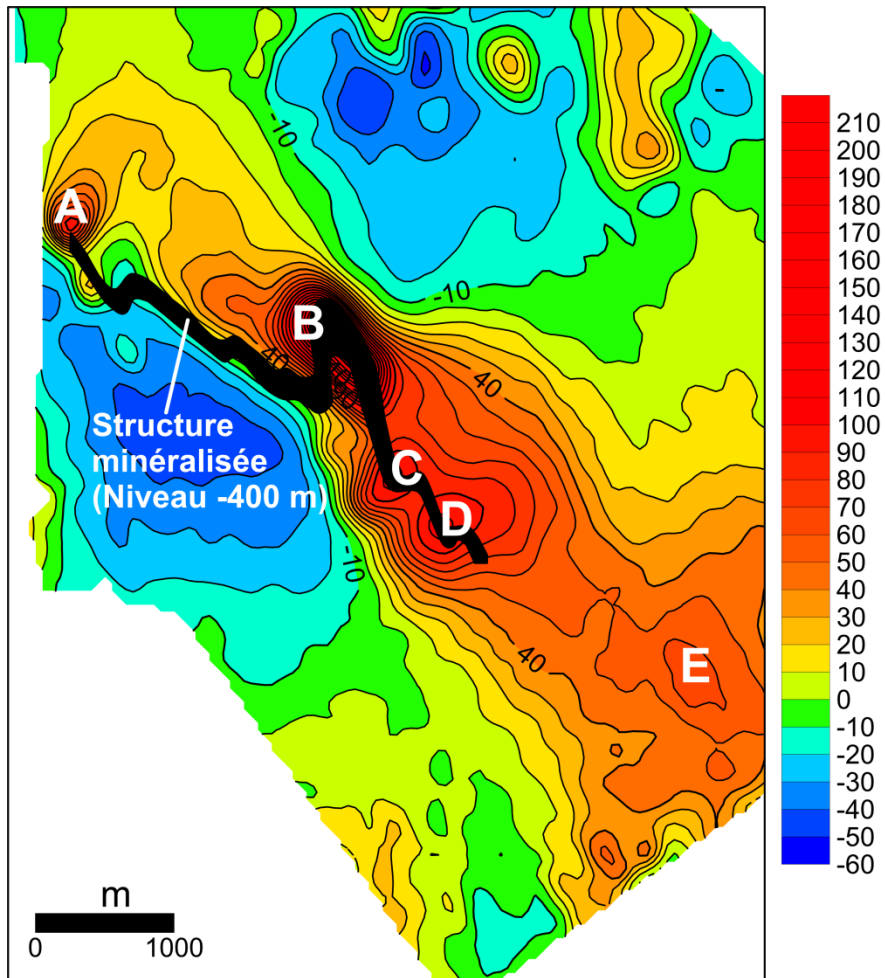


Figure IV.5. Carte du champ réduit au pôle superposée à la structure minéralisée de Tiferouine

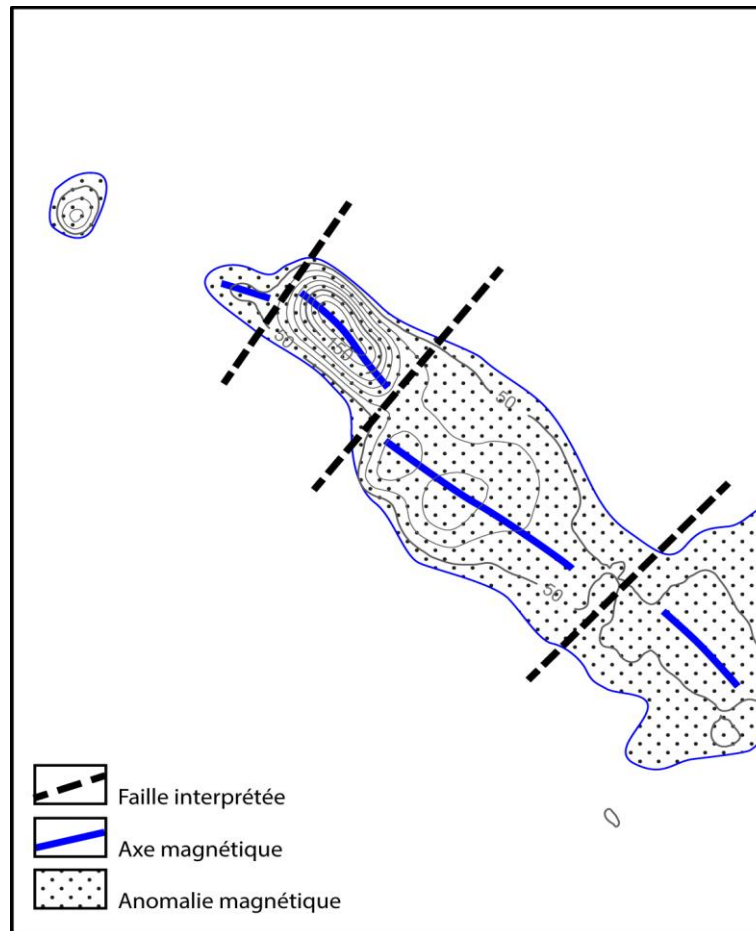


Figure IV.6. Carte d'interprétation qualitative.

Afin de mieux caractériser la source de l'axe magnétique de Tiferouine, une interprétation quantitative par modélisation inverse tridimensionnelle a été tentée. Le programme utilisé permet de calculer un modèle qui correspond à une distribution variable de la susceptibilité magnétique au sein du volume considéré qu'il découpe en blocs. En considérant une valeur de coupure de 0.008 (10-3SI), la surface enveloppe obtenue définit un corps à pendage vers le nord-est. Son sommet se situe à 250 m de profondeur sous l'anomalie B (**Fig. IV.7**). Ce corps s'approfondit progressivement en allant vers le sud-est probablement en raison de sa compartimentation par le jeu des failles représentées sur la carte d'interprétation (**Fig. IV.6**).

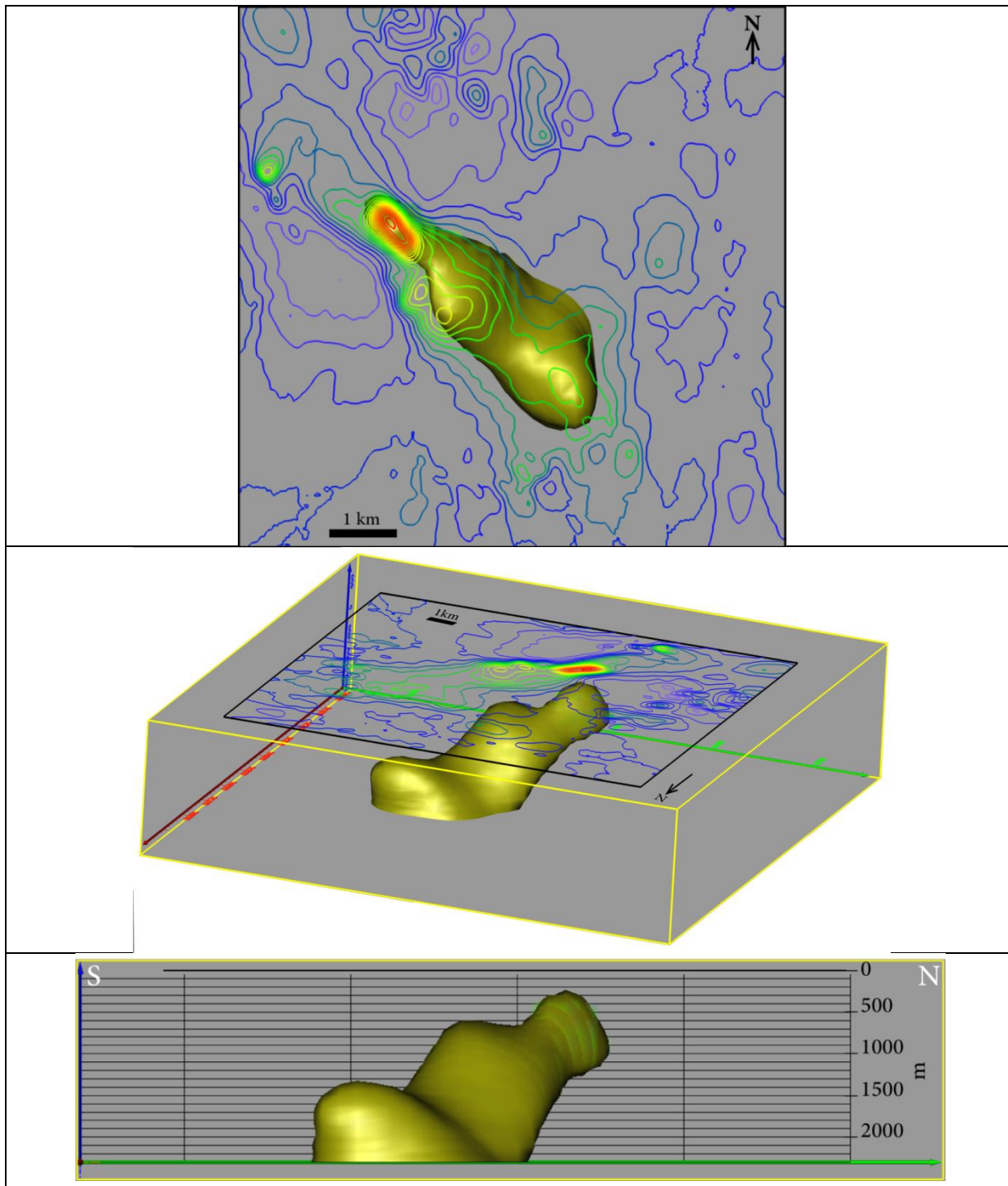


Figure IV.7. Inversion 3D des données magnétiques. (En haut : vue en plan, au milieu vue en perspective 3D et en bas vue de l'Est vers l'Ouest)

IV .2. La méthode audio-magnétotellurique (AMT)

Principe général

La magnétotellurique (MT) est une méthode électromagnétique à source naturelle utilisant les champs émis par les orages atmosphériques (fréquences > 1 Hz) ou par les courants ionosphériques liés à l'activité magnétique solaire (fréquences < 1 Hz). En effet, l'ionosphère est le siège de courants électriques intenses à l'origine d'un champ magnétique variable (champ primaire) qui se propage sous forme d'ondes planes et induit dans les conducteurs de la croûte terrestre des courants électriques telluriques dont les circulations se produisent à l'échelle du globe. Ces courants varient constamment en amplitude et en direction et génèrent à leur tour un champ magnétique secondaire mesurable en surface. Les variations les plus lentes des courants telluriques peuvent être assimilées à des courants continus dont l'intensité est fonction de la conductivité locale (**Fig. IV.8a**).

La gamme de fréquences exploitables s'étend de 0.001 à 1000 Hz. Il faut noter que la bande inférieure de ce spectre (< 1 Hz) correspond à des profondeurs d'investigation considérables (jusqu'à plusieurs centaines de km). Seule la partie supérieure de ce spectre (> 1 Hz) est utilisée en Audio-magnétotellurique (AMT). Le préfixe Audio- fait seulement référence à la gamme de fréquences audibles par l'homme, mais ce n'est qu'un parallèle, les ondes considérées en AMT n'étant évidemment pas des ondes sonores. Cette gamme de fréquence permet théoriquement des profondeurs d'investigation variant de plusieurs dizaines à plusieurs milliers de mètres.

En AMT, on mesure les deux composantes horizontales du champ électrique à l'aide de deux dipôles perpendiculaires et les deux (parfois trois) composantes du champ magnétique secondaire à l'aide de capteurs orthogonaux (magnétomètres) (**Fig. IV.8b**).

- En mode sondage, ces mesures sont effectuées au même endroit en faisant varier la fréquence de réception du champ électromagnétique tellurique
- En mode profilage, le dispositif de mesure est déplacé pour une fréquence constante.

Concrètement, les composantes horizontales du champ électrique sont mesurées à l'aide d'électrodes non-polarisables et les composantes du champ magnétique sont mesurées à l'aide de bobines solénoïdes. Pour des raisons pratiques la composante verticale du champ électrique n'est pas mesurée. En effet, pour obtenir un signal suffisant, les électrodes sont espacées d'une distance d'environ 50 m. Pour mesurer la composante verticale, il faudrait donc enterrer l'une d'entre elle à 50 m de profondeur. Les lignes électriques et les bobines sont parfaitement alignées sur les directions désirées, idéalement, dans la mesure du possible en fonction des axes de la géologie locale, sinon en direction Nord et Est. Le schéma ci-dessous montre le dispositif utilisé.

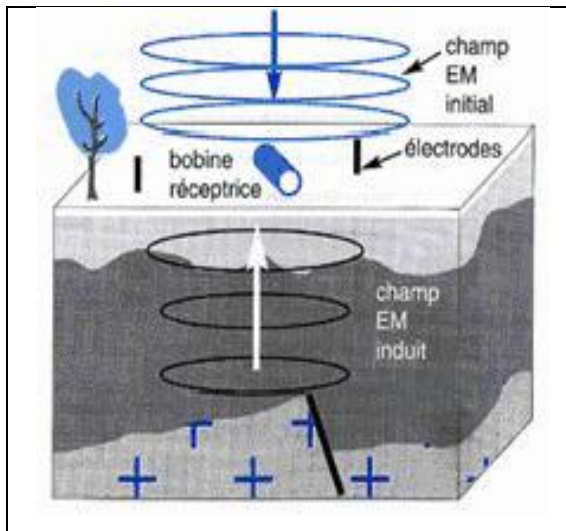


Figure IV.8a. Illustration schématique de la méthode audio-magnétotellurique

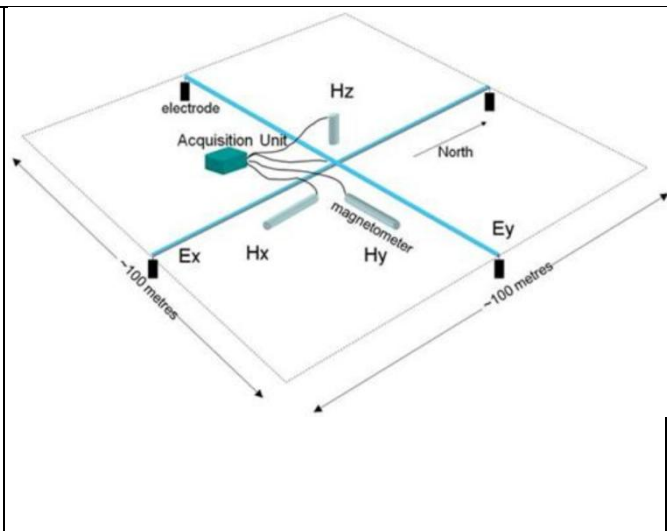


Figure IV.8b. Dispositif de mesure en audio-magnétotellurique

Les quantités mesurées des deux champs correspondent à des signaux qui, une fois amplifiés et filtrés, sont interprétés en termes de **RESISTIVITE APPARENTE** et de **PHASE**.

La **résistivité apparente** en est donnée par la formule de Cagniard :

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi f \mu_0} \frac{E_{tx}}{H_{ty}}$$

- ρ_a : résistivité apparente (Ohm.m),
- f : fréquence (Hz),
- μ_0 : perméabilité magnétique du vide (H/m)
- E : champ électrique (V/m),
- H : intensité du champ magnétique (A/m),

La **phase** est le déphasage entre les composantes E_{tx} du champ électrique et H_{ty} du champ magnétique. Théoriquement, pour un volume de terrain homogène, E_{tx} est généralement en avance de phase de $\frac{\pi}{4}$ par rapport à H_{ty} . Les hétérogénéités de conductivité du sous-sol engendrent des variations du déphasage.

En mode sondage AMT, pour chaque station, les valeurs calculées de la résistivité apparente (en échelle logarithmique) et la phase sont tracées en fonction de la fréquence (en échelle logarithmique). Les stations d'un même profil peuvent être rassemblées sous forme d'une pseudosection présentant soit la résistivité apparente, soit la phase, en iso-contours dans un diagramme ayant pour abscisse la distance le long du profil et pour ordonnée la fréquence (en échelle logarithmique). Les hautes fréquences sont figurées vers le haut des pseudo-sections, pour traduire le fait que leur investigation est superficielle.

Application au secteur de Tiferouine

Données utilisées

Au printemps 2006, une équipe russe de l'entreprise fédérale unitaire d'état «V/O «ZARUBEZHGEOLGIA », a mené une campagne de prospection géophysique par sondages audio-magnétotelluriques selon deux profils perpendiculaires à l'anomalie magnétique de Tiferouine (**Fig. IV.9**). Pour chaque sondage, les mesures de la résistivité apparente et de la phase ont été effectuées pour une vingtaine de fréquences selon deux directions perpendiculaires afin de mettre en évidence les propriétés d'anisotropie électrique des roches en profondeur et pour permettre l'inversion 2D des données. Les résultats sont visualisés sous forme de pseudo-

sections de résistivité apparente et de la phase. Dans ce type de représentation, les distances entre stations sont reportées en abscisses (échelle linéaire) et les fréquences, sont reportées en ordonnées (échelle logarithmique) (**Fig. IV.10 et 11**).

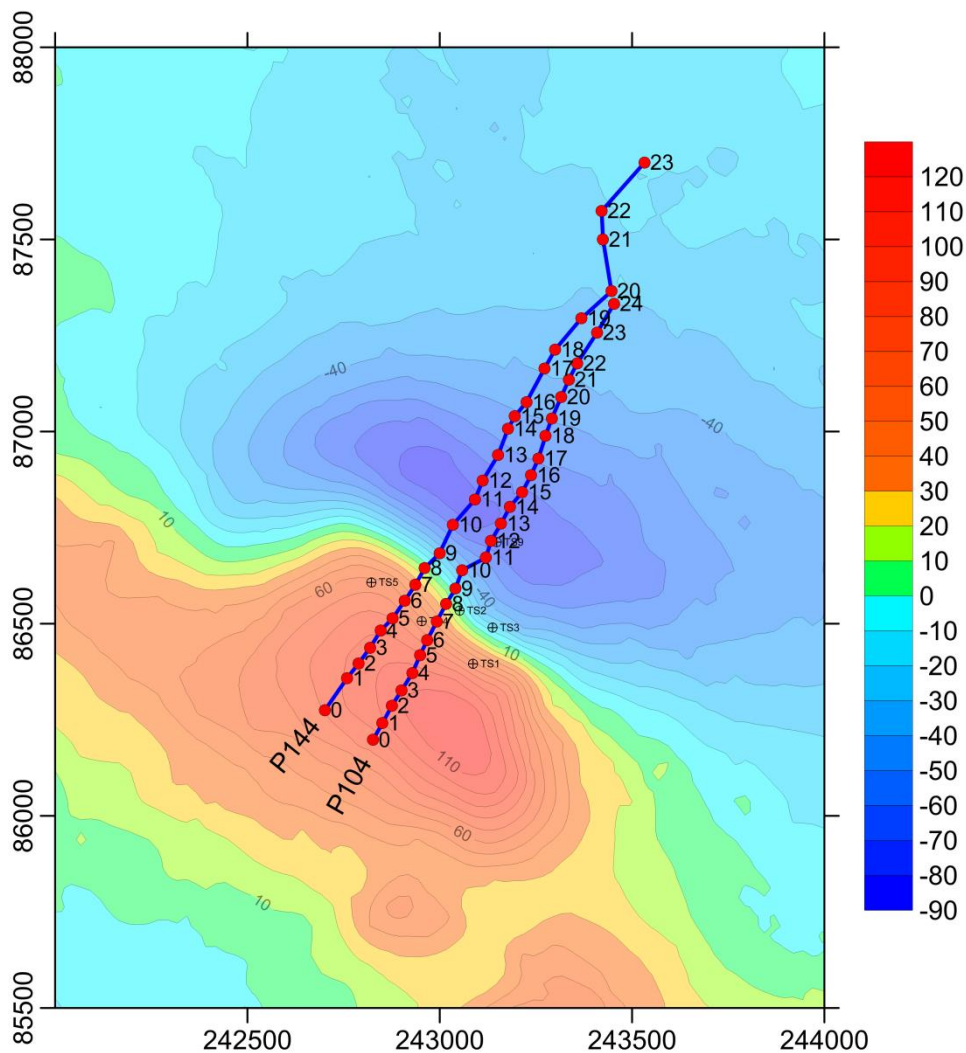


Figure IV.9. Localisation des sondages audio-magnétotelluriques réalisés à Tiferouine

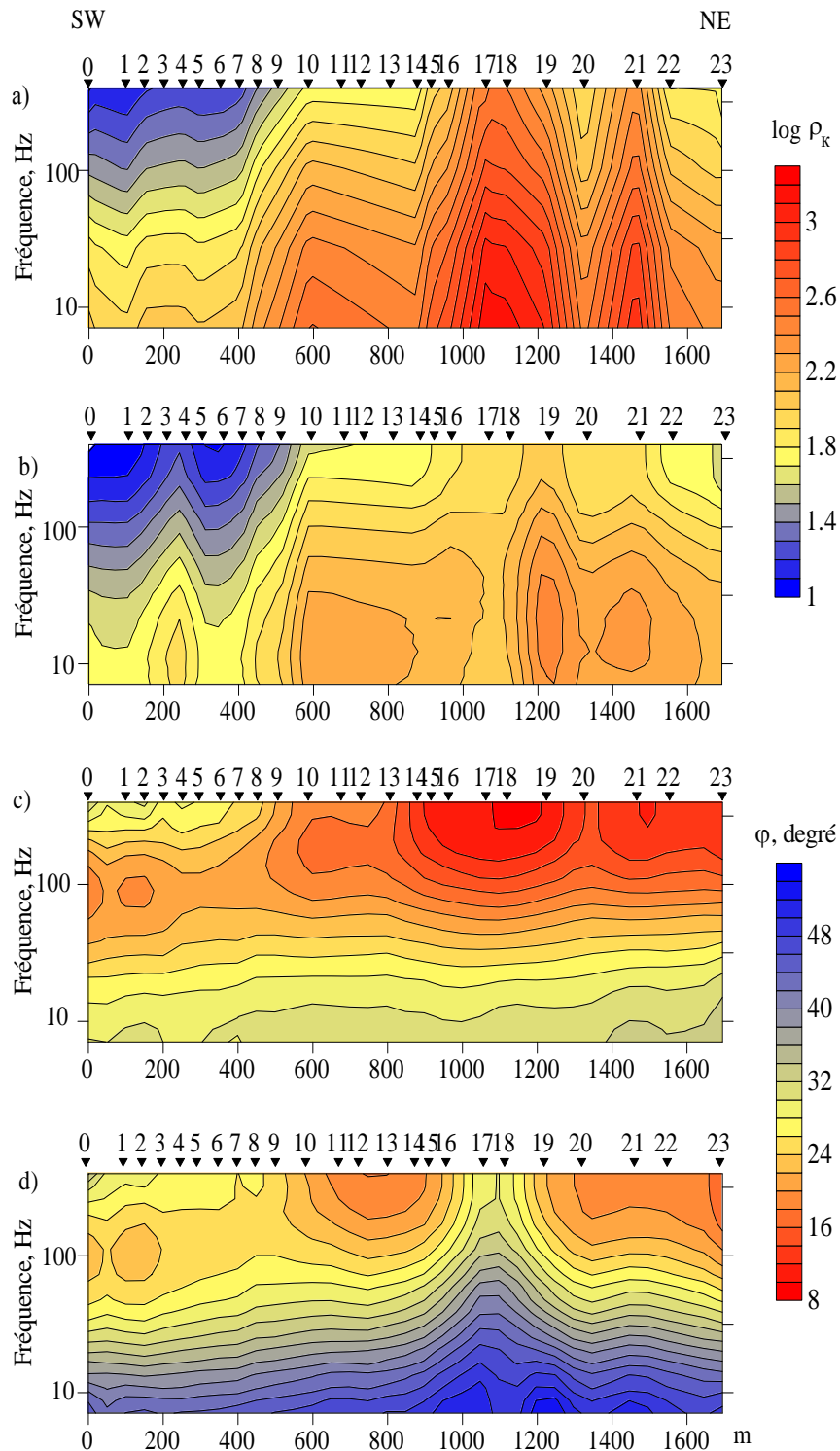


Figure IV.10. Pseudosections des valeurs de résistivité apparente (a, b) et la phase (c, d) enregistrées le long du profil 144 (a, c- Direction parallèle au profil ; b, d- Direction perpendiculaire au profil).

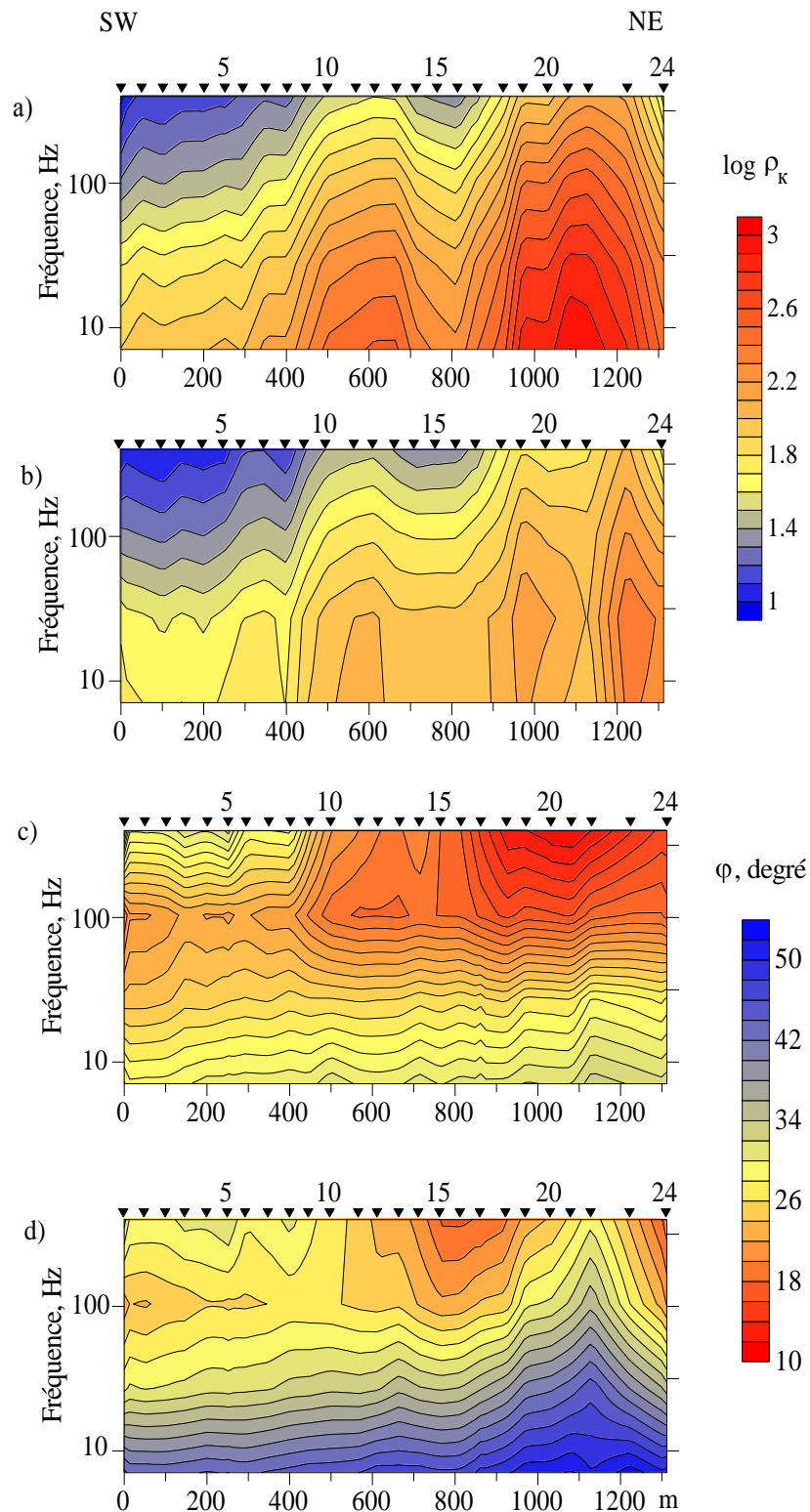


Figure IV.11. Pseudosections des valeurs de résistivité apparente (a, b) et la phase (c, d) enregistrées le long du profil 104 (a, c- Direction parallèle au profil ; b, d- Direction perpendiculaire au profil).

Analyse et interprétation

L'inversion de l'ensemble des données enregistrées sur chacun des deux profils a permis de calculer des modèles de résistivité du sous-sol sous forme de coupes géoélectriques verticales permettant d'imager le sous-sol jusqu'à une profondeur de 1000 m. En plus des baisses de résistivité superficielles dues au recouvrement plio-quaternaire, visibles sur toute la longueur des deux profils, des anomalies conductrices plus profondes ont également été mises en évidence (**Fig. IV.12 et 13**). Sur le profil 144, cette zone anormale commence à 250 m et s'enracine en profondeur au-delà de 1000 m. Elle définit un conducteur vertical dont le centre de masse se situe à la verticale du sondage AMT 9 (**Fig. IV 12**).

La coupe géoélectrique du profil 104 montre un conducteur similaire dont le sommet se situerait à 400 m de profondeur (**Fig. IV 13**). La superposition des résultats des études magnétiques et audio-magnétotellurique permet noter la convergence parfaite entre le corps magnétique et le conducteur du profil 144. Cependant, celui du profil 104 est légèrement décalé vers l'Est et ne présente qu'une superposition partielle avec le modèle magnétique (**Fig. IV.14 et 15**).

Ces résultats indiquent que le socle paléozoïque de la zone de Tiferouine encaisserait un corps conducteur qui serait en partie magnétique. Un tel corps pourrait bien correspondre à un gisement de sulfures massifs dont une partie seulement serait riche en pyrrhotine.

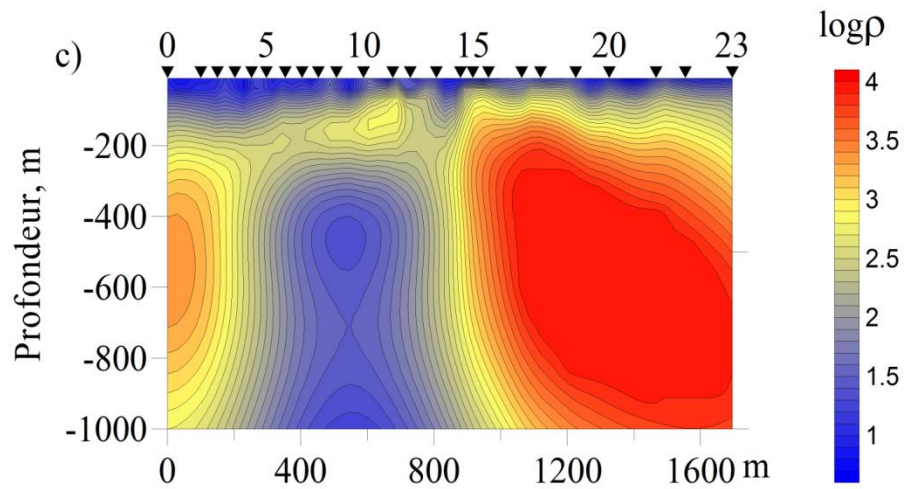


Figure IV.12. Modèle de résistivité obtenu par inversion des données audio-magnétotellurique le long du profil P144.

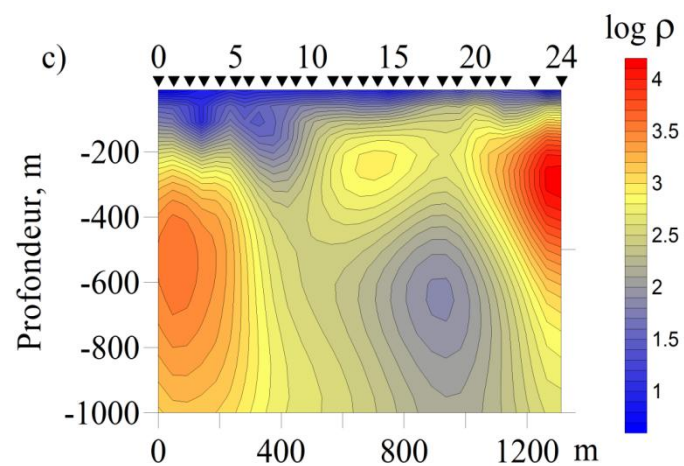


Figure IV.13. Modèle de résistivité obtenu par inversion des données audio-magnétotellurique le long du profil P104.

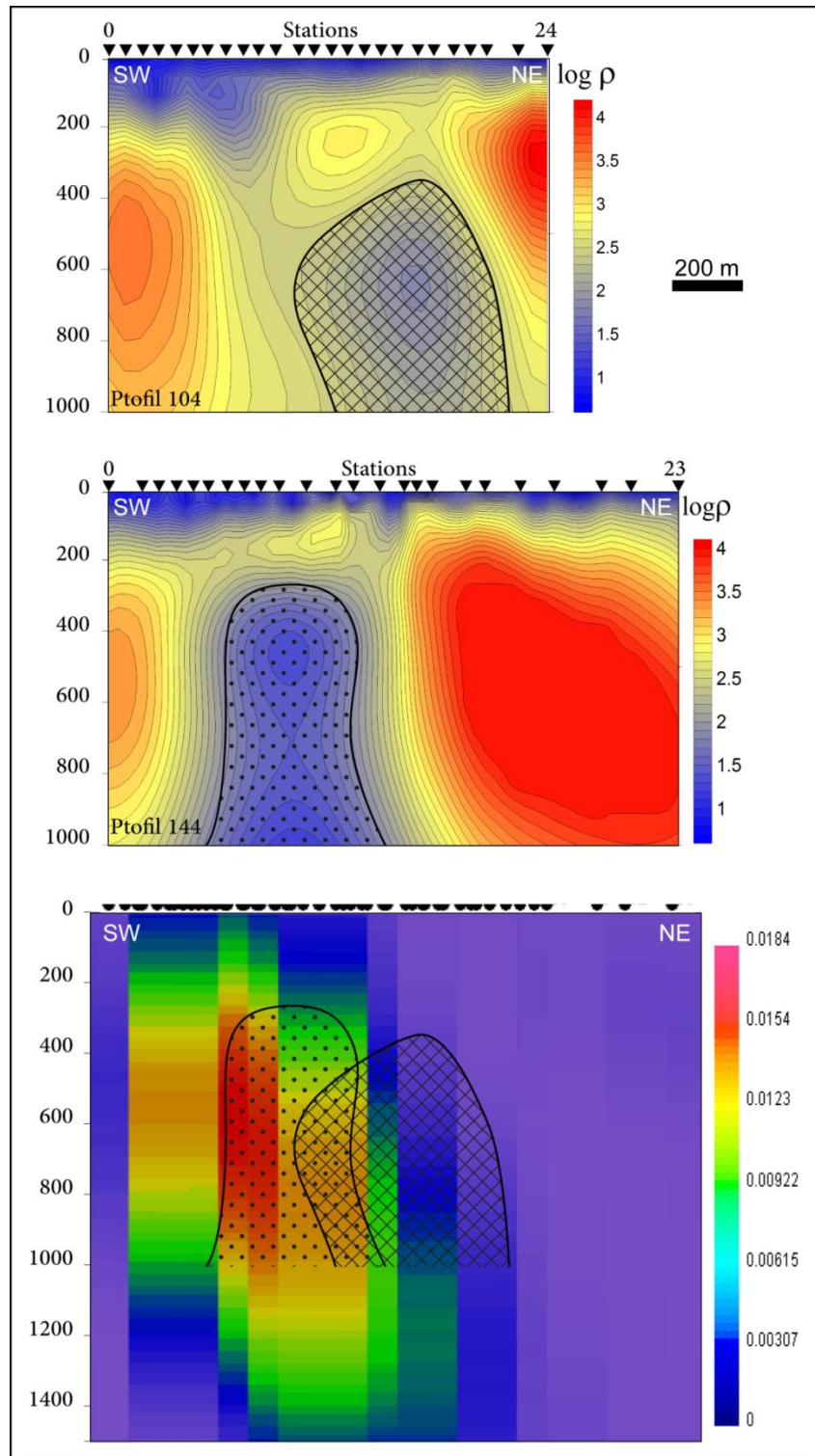


Figure IV.14. Comparaison des modèles de susceptibilité magnétique et de résistivité audio-magnétotellurique du secteur de Tiferouine

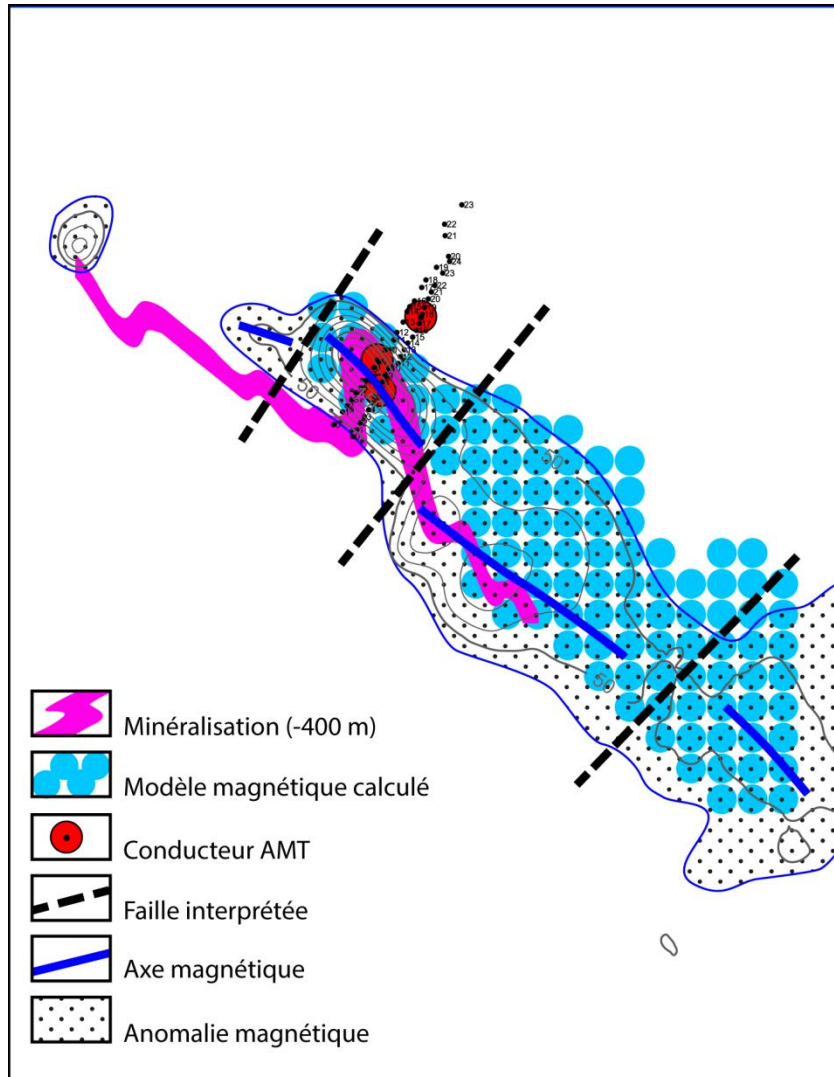


Figure IV.15. Synthèse des résultats

Conclusion générale et perspectives

Dans cette étude effectuée au niveau du secteur de Tiferouine, on dégage un certain nombre de résultats :

Lithologie : la minéralisation est encaissée par des formations de nature pélitiques avec des récurrences gréseuses et parfois de calcaire gréseux. Ces formations sédimentaires renferment également des passages carbonatés d'allure lenticulaires, bien exprimés au sud du secteur.

Le sondage TIF16 se caractérise par :

- Des pélites de couleur grisâtre à noirâtre. Localement, ces pélites sont fortement chloritisés et séricitisés attestant de phénomène de circulation hydrothermale.

Sur le sondage Tif 10 :

- On remarque la présence, en plus des faciès précédemment décrits, des calcaires gréseux fortement altérés. Ces calcaires gréseux se présentent sous deux aspects : un aspect de couleur clair siliceux formés de quartz en clastes disséminés dans une matrice carbonatée et chloritisée et un aspect sombre à verdâtre due à la présence de la chlorite (phénomène de chloritisation).

Pétrographie :

Le secteur de Tiferouine a été le siège d'une circulation hydrothermale intense. Ces circulations hydrothermales se traduisent par des phénomènes d'altération hydrothermale bien marqués et qui se traduisent par :

- Des altérations chloriteuses.
- Des altérations siliceuses.
- Des transformations des calcaires en amphibolite.
- Une biotitisation.

Ces altérations hydrothermales s'accompagnent parfois de dépôt des sulfures.

Métallographie : l'étude métallographique menée sur les sections polies confectionnées à partir du sondage carotté Tif16 a montré plusieurs espèces métalliques à savoir, la pyrrhotite qui représente le sulfure de fer le plus dominant. Cette dernière, le plus souvent massive, est omniprésente dans tous les échantillons étudiés. Elle est souvent en association avec la chalcopryrite, parfois avec la pyrite et l'arsénopyrite. La chalcopryrite est la phase métallique la deuxième phase sulfurée après la pyrrhotite.

La pyrite et la magnétite apparaissent secondaires par rapports aux sulfures sus-cités.

Géophysique :

- La prospection magnétique du secteur de Tiferouine a permis de mettre en évidence une anomalie qui s'étend sur plusieurs kilomètres et dont l'amplitude dépasse les 200 nT. L'interprétation quantitative de cette anomalie révèle l'existence d'un corps situé à 250 m de profondeur qui présente un pendage vers le nord-est. Ce corps s'étend en en direction NW-SE et s'approfondit en allant vers le sud-est.
- L'étude audio-magnétotellurique met en relief une structure conductrice qui coïncide partiellement avec le corps magnétique

Il est recommandé de réaliser un sondage profond qui ciblerait le cœur du corps magnétique et conducteur de Tiferouine.

Bibliographie :

Haimeur, J. (1988) : Contribution à l'étude de l'environnement volcano-sédimentaire et du minéral de douar Lahjar (Guemassa, Maroc), lithologie, paléo-volcanisme, géochimie, métallogénie. Thèse 3ème cycle, ENSG, Nancy, 151 p.

Hibti, M. (2001) : Les amas sulfurés des Guemassa et des Jebilet (Meseta sud Occidentale, Maroc) : Témoins de l'hydrothermalisme précoce dans le bassin mésétien. Thèse Doct. Etat, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, 301p.

HUVELIN, P. (1977) : Etude géologique et géochimique du massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental). Notes et Mém Ser. Géol. Maroc, 232bis. 308p.

ENTREPRISE FEDERALE UNITAIRE D'ETAT «V/O «ZARUBEZHGEOLOGIA» RAPPORT sur les études géoélectrochimiques dans la région de Jebilet-Guemassa effectuées en 2006
Exécuteur principal: Margovitch E.G. le collaborateur scientifique Moscou, 2007.

ENTREPRISE FEDERALE UNITAIRE D'ETAT «V/O «ZARUBEZHGEOLOGIA » ETUDES AUDIOMAGNETOTELLURIQUES DES GITES SULFURES DANS LA REGION DU GISEMENT POLYMETALLIQUE DE HAJAR, Exécutées par : A. Nikiforov-géophysicien, P. Parfentiev-géophysicien, M. Pertel-géophysicien, N. Romanova-géophysicienne, A. Saraev-dr. ès sciences géologiques et minéralogiques.