

UTILISATION ET APPORT DE LA GEOCHIMIE DES CHAPEAUX DE FER EN PROSPECTION DES AMAS SULFURES : CAS DU GISEMENT DE KOUDIAT AÏCHA DANS LES JEBILETS CENTRALES - MAROC

[USE AND CONTRIBUTION OF THE GEOCHEMISTRY OF GOSSAN TO THE PROSPECTING FOR MASSIVE SULPHIDE DEPOSIT : CASE OF THE KOUDIAT AÏCHA DEPOSIT IN CENTRAL JEBILET - MOROCCO]

Fouad Lotfi¹ and S. Brunet²

¹Exploration et Gestion des Ressources Naturelles et Environnementale, Université Ibn Zohr, Faculté
Polydisciplinaire de Taroudant, Maroc

²Managen, Casablanca, Maroc

Copyright © 2018 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The central Jebilets located to the south west of the Moroccan meseta represent a metalliferous province containing numerous deposits and massive sulphide index, of which the Kouidiat Aïcha deposit is one of them.

This last enclosed in the series of Saghlef attributed to the upper viséan. It is predominantly pyrrhotite, contains minerals of the base metals such as sphalerite, galena, chalcopyrite, arsenopyrite and some traces of stannite. The orebody is enclosed in argillites interspersed with gabbroic magmatic sills at the footwall and hanging wall of the mineralization. It is materialized on the surface by the development of a gossan with iron oxides and hydroxides (hematite, magnetite, goethite, limonite, malachite ...), and shows an NS orientation according to the direction of the orebody.

This study intersted with the search for distinctive criteria between gossan assigned to mineralization of economic interest in relation to massive sulphide and those developed on iron deposits or other non-economic iron indices near the sector of Kouidiat Aïcha. This approach has made it possible to identify criteria that make it possible to distinguish the gossan of products directly from polymetallic base metal mineralization. The elements analyzed, such as Ag, As, Bi and Sn, in addition to the elements searched, made it possible to identify the gossan directly assigned to the Kouidiat Aïcha deposit and to pinpoint its location.

The results obtained are in good agreement with the data of the magnetic and gravimetric studies realized in carried out around the area of Kouidiat Aïcha deposit. These results can be applied to all the ferruginous indices near the sector of Kouidiat Aïcha in the Central Jebilet, see its extrapolation towards all the Hercynian lands.

KEYWORDS: Central Jebilet, Kouidiat Aïcha, Gossan de fer, exploration base, metal.

RÉSUMÉ: Les Jebilet centrales situées au sud-ouest de la meseta marocaine représentent une province métallifère renfermant de nombreux gisements et indice à sulfures massifs dont le gisement de Kouidiat Aïcha en fait partie. Ce dernier encaissé dans la série de Saghlef attribué au visé en supérieur. Il est à prédominance de pyrrhotite, renferme des minéraux des métaux de base tels que la sphalérite, la galène, la chalcopyrite, l'arsénopyrite et quelques traces de stannite. Le corps minéralisé est encaissé au sein d'argillites intercalées par des sills magmatiques gabbroïques au toit et au mur de la minéralisation. Il est matérialisé en surface par le développement d'un chapeau de fer à oxydes et hydroxydes de fer (hématite, magnétite, goethite, limonite, malachite...), et montre une orientation NS selon la direction du corps minéralisé.

Cette étude porte sur la recherche des critères distinctifs entre les chapeaux de fer liés à des minéralisations d'intérêt économique en relation avec les amas sulfurés et ceux développés sur des gîtes ferrifères ou autres indices ferrifères non économiques avoisinant le secteur de Kouidiat Aïcha. Cette approche a permis de mettre en évidence des critères permettant

de distinguer les chapeaux de fer liés directement à la minéralisation polymétallique à métaux de base. Les éléments analysés tel que Ag, As, Bi et Sn en plus des éléments recherchés, ont permis de bien identifier les chapeaux de fer liés directement au gisement de Koudiat Aïcha, et de bien cerner son emplacement. Les résultats obtenus sont en bonne concordance aux résultats des études magnétiques et gravimétriques réalisées dans le secteur. Ces résultats peuvent être appliqués sur l'ensemble des indices ferrugineux avoisinant le secteur de Koudiat Aïcha dans les Jebilet centrales voir son extrapolation vers l'ensemble des terrains hercyniens.

MOTS-CLEFS: Jebilet centrales, Koudiat Aïcha, chapeau de fer, exploration, métaux de base.

1 INTRODUCTION

Les gisements de sulfures massifs volcanogènes présentent un mode de formation propre par rapport aux divers gisements métallifères connus. La minéralisation est mise en place localement par précipitation de sulfures sur le plancher sous-marin, précédé de l'altération hydrothermale des roches encaissantes.

La prospection classique du sol et des indices ferrugineux à l'affleurement permettra de délimiter les extensions des zones minéralisées dans les zones anormales. En revanche, la prospection géochimique permet dans un certains cas, d'obtenir des indications de l'emplacement précis du corps minéralisé avec une certaine finesse pour les gîtes cachés, redressés et encaissés en milieu d'épais recouvrements [1], et dans d'autres cas de distinguer à la surface les chapeaux de fer prometteurs.

Les chapeaux de fer constituent les cibles pour l'exploration géochimique à l'affleurement, et ont mené à la découverte de nombreux gisements minéralisés [2]. Un prélèvement des échantillons destinés à l'analyse pour les éléments métalliques recherchés ainsi que pour leurs éléments indicateurs serviront à l'élaboration des cartes de dispersion des différents éléments analysés [3]. Une bonne interprétation des cartes géochimiques pourra guider au meilleur profit la détermination parfaite du gisement prometteur, le lancement d'une campagne de sondages et par la suite l'ouverture d'un chantier minier.

Cette étude du secteur de Koudiat Aïcha, rentre dans le cadre du projet global d'exploration des amas sulfurés volcanogènes polymétalliques à Zn, Pb, Cu et Fe des Jebilet centrales et du massif de Guemassa entamées quelques décennies. L'objectif principal de la présente étude était de démontrer l'applicabilité de la méthode géochimique destinée aux chapeaux de fer affleurant dans le secteur de Koudiat Aïcha. Elle s'est focalisée sur la détermination des éléments métalliques contenus dans la zone d'oxydation comme moyen d'évaluation et de prospection initial, susceptible de compléter l'exploration géochimique des chapeaux de fer. L'étude consistait à développer une procédure efficace et économique, et investigate tous les résultats lithogéochimiques et géophysiques antérieurs pour affirmer toute hypothèse de présence de corps minéralisé en profondeur.

2 LOCALISATION ET GÉOLOGIE GÉNÉRALE

Le Maroc est localisé au coin nord-ouest de la plateforme saharienne. Il est entouré par les plaques mobiles de la mer méditerranée au Nord et l'océan atlantique à l'Ouest (Fig. 1a). Afin de situer la région étudiée, nous allons esquisser la géologie générale du Maroc hercynien.

En effet, au cours de sa longue histoire géologique conditionnée par cette position de charnière, entre les continents Africain, Européen et Américain..., plusieurs cycles orogéniques (Précambrien, Hercynien et Alpin) se sont succédés, contribuant chacun, par son contexte géodynamique et son ampleur, à façonner les grands domaines structuraux du Maroc. C'est ainsi que l'on en distingue trois domaines, définis en fonction de la localisation et de l'importance des effets des orogénèses les plus récentes. Du Sud au Nord, le domaine anti-atlasique et son prolongement saharien, le domaine atlasique et mésetien et le domaine rifain séparés les uns des autres, par l'accident sud-atlasique d'une part et la limite des charriages tertiaires venus du Nord, d'autre part. Les deux derniers domaines sont caractérisés par l'empreinte prédominante laissée par les orogénèses varisque et alpine tandis que le premier domaine a été essentiellement façonné par les orogénèses précambriennes et varisque. De ce fait, le Maroc a été subdivisé structurellement en cinq domaines [4] :

- Le domaine saharien ou dorsale des Reguibates constitue une partie du craton ouest africain [5]. Ce domaine est constitué de terrains d'âge protérozoïque inférieur, intensément déformés et métamorphisés durant l'orogénèse éburnéenne (2000 Ma). L'ensemble est couvert au Nord par les roches paléozoïques non déformées du bassin de Tindouf.

- Le domaine anti-atlasique est constitué d'un socle structuré par l'orogénèse panafricaine (680 et 570 Ma) [6]. Sa couverture protérozoïque terminale et paléozoïque est affectée par une déformation hercynienne relativement modérée. La couverture mésozoïque et cénozoïque ayant une faible puissance est non déformée.
- Le domaine atlasique allonge à travers la Méséta (Moyen Atlas) et entre la Méséta et le domaine anti-atlasique (Haut Atlas). Les terrains permo-mésozoïques et cénozoïques y sont structurés durant l'orogénèse atlasique (Jurassique supérieur et phases de plissements tertiaires).
- Le domaine rifain représente la limite septentrionale du Maroc. Il est constitué de nappes allochtones liées à l'orogénèse alpine chevauchant le domaine mésétien. Les terrains paléozoïques sont connus dans les zones internes de la chaîne (nappes paléozoïques ou Gomarides).
- Le domaine mésétien défini comme un domaine de la chaîne hercynienne et recouvert en discordance par les séries mésozoïques et cénozoïques non déformées. Il est divisé en deux parties distinctes : la méséta occidentale (Méséta Marocaine) et la méséta orientale (Méséta Oranaise).

2.1 LE MASSIF DE JEBILETS

2.1.1 CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES

Les Jebilet (DJebilets, Jbilet, DJebilet) ou «petites montagne», situées au Maroc occidental, sont un ensemble de collines et de plaines rocheuses du paléozoïque très plissées. Les Jebilet culminent à 1061m (Signal du J.Tekzim). Leurs formes sont passablement mûres par opposition à celles du Haut Atlas de Marrakech en raison du manque en vigueur des soulèvements les plus récents.

Les Jebilet appartiennent à la dorsale marocaine ou promontoire africain haut fond de terrains anciens qui, au cours du mésozoïque, se détachait du continent saharien vers le Nord et partant de l'Atlas de Marrakech.

Les affleurements paléozoïques du massif des Jebilet et des Guemassa font partie de la méséta centrale [7] [8]. Le massif hercynien des Jebilets appartient à la Meseta marocaine (Fig. 1a). Ce massif, situé au Nord de la ville de Marrakech, constitue l'un des principaux massifs hercyniens du Maroc. Sa position intermédiaire entre le massif des Rehamna au Nord et celui des Guemassa au Sud, justifie l'intérêt qu'il présente pour la compréhension de la géologie hercynienne au Maroc. Il encaisse plusieurs types de minéralisations d'intérêt économique non négligeable et ayant fait l'objet de travaux d'exploration et d'exploitation depuis le début du 2^{ème} siècle (Fig. 1b). Ainsi le travail d'Huvelin [9] [10] sur l'ensemble du massif tant sur le plan géologique que géologique reste une base pour toute étude envisageable dans le massif. Depuis les travaux se sont succédés et ont porté sur les problèmes stratigraphiques, sédimentologiques, structuraux, métamorphiques et magmatiques.

Les Jebilets forment un ensemble de collines et de plaines rocheuses de terrains paléozoïques. Les îlots hercyniens des Jebilets plongent sous la plaine de la Bahira au nord et la plaine du Haouz au Sud, d'âge Miopliocène et Quaternaire. De l'ouest, ils sont limités par les collines jurassico-cretacées de mouissat et à l'est, par les montagnes du moyen Atlas de Béni-Mellal. Les formations des Jebilets sont plissés et métamorphisés orientés suivant une direction atlasique E-W sur une longueur d'environ 170 Km et 7 à 40 Km de large (Fig. 1b). Le massif des Jebilet est caractérisé par rapport aux autres massifs hercyniens de la meseta marocaine par l'intensité de l'activité magmatique pré- à syn-orogénique qu'a connue cette région vers la fin du Carbonifère [10].

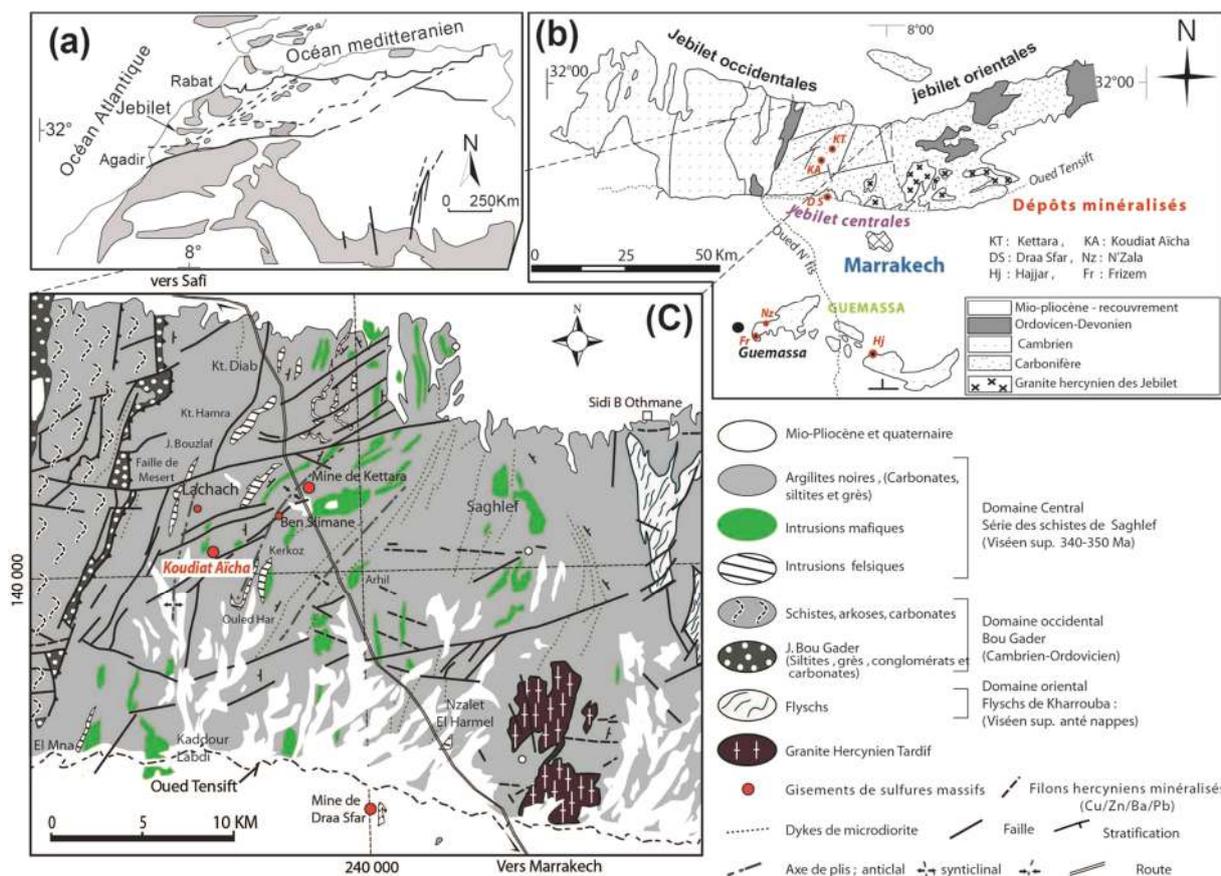


Fig. 1. a) Localisation géographique du massif des Jebilet et des affleurements hercyniens du nord-Afrique (en gris), b) Carte géologique simplifiée et localisations des principaux gisements sulfurés des massifs hercyniens des Jebilets et des Guemassa (Huvelin, 1977), c) Carte géologique des Jebilets Centrales et situation géographique du secteur de Koudiat Aïcha.

2.1.2 ZONATION STRUCTURALE

Le massif des Jebilets orienté globalement E-W, a été subdivisé en trois ensembles distincts ; d'Est en Ouest on observe (Fig. 1b) :

- Zone orientale (ou flyschs de Kharrouba) constituée de métasédiments datés de Viséen supérieur et caractérisés par la présence d'olistostromes et de séries ordovico-dévonniennes [10] [11] mises en place par des phénomènes de glissements gravitaires dans le bassin viséen [10] [12].
- Zone centrale (ou schistes de Sarhlef) dont les terrains sont également d'âge viséen namurien [10]. Ils sont déformés métamorphisés dans des conditions anchi à épizonales. Cet ensemble est caractérisé par la mise en place de corps intrusifs acides et basiques ainsi que des magmas granitiques.
- Zone occidentale essentiellement formée de séries cambro-ordoviciennes [10] [13], faiblement plissées (direction sub-méridienne) et peu ou pas métamorphisées.

2.1.3 STRATIGRAPHIE ET SÉDIMENTOLOGIE

La stratigraphie du massif des Jebilets se résume en deux périodes bien distinctes :

- La période anté-Viséen supérieur, représentée par les étages suivants, à savoir :
 - ✓ *Le Cambrien* : représenté par des formations détritiques avec épisodiquement des faciès volcaniques. Il est représenté principalement au niveau des Jebilet occidentales.
 - ✓ *L'Ordovicien* : présent dans les Jebilets occidentales. Sa lithostratigraphie est essentiellement représentée par des pélites argileuses, des sédiments détritiques et des grès conglomératiques.

- ✓ *Le Silurien* : connu uniquement dans les Jebilet orientales. Il est composé de schistes argileux à graptolites et de phanites.
 - ✓ *Le Dévonien* : formé de conglomérats rouges, de calcaires massifs et de grès quartzitiques au niveau des pays des Skhirat. Au niveau des Jebilet orientales, il s'agit de schistes à bivalves, de schistes à bancs de calcaires ainsi que d'une alternance de grès et de schistes.
 - ✓ *Le Tournaisien* ainsi que le *Viséen inférieur* sont absents.
- la période Viséen supérieur : correspond à une transgression majeure, originaire de l'Est ou du NE [14], [15]. Il comprend deux ensembles lithologiques qui sont, le flysch de Kharrouba, dans la moitié orientale des Jebilet et des schistes de Sarhlef, dans les Jebilet centrales. Les relations structurales sont encore discutables : selon [10], ces deux ensembles traduisent une évolution verticale, avec à la base, la série de Kharrouba, alors que selon Gaillet [16] et Bordonaro [17], elles correspondent à une variation latérale de faciès.

2.1.4 DÉFORMATION ET MAGMATISME

Dans le massif des Jebilet et particulièrement sa partie centrale, les études structurales entreprises visaient surtout la caractérisation des relations entre le magmatisme acide-basique et la déformation synschisteuse. En effet pour certains auteurs, ces corps magmatiques sont anté-tectoniques [10] [18] [19] [20]. Cependant, d'autres plaident beaucoup plus en faveur d'une mise en place dans un contexte compressif [21] [22] [23] [24]. Ils insistent sur le caractère syntectonique, contemporains de la déformation hercynienne synschisteuse et de la mise en place des plutons granodioritiques calco-alcalins [25].

Les Jebilet Centrales correspondent à la partie la plus déformée du massif par l'orogénèse hercynienne avec schistosité, granites, cisaillement ductiles et zones de culmination métamorphique. Cette déformation synschisteuse et hétérogène a été attribuée à une interférence entre le raccourcissement régional hercynien et la mise en place des diapirs granitiques [26] [27]. Pour certains de ces auteurs, les cisaillements transcurentiels liés à des perturbations locales du champ de contraintes au voisinage des plutons, seraient tardifs dans l'histoire de la déformation.

Dans les Jebilet centrales, la fin du Carbonifère se traduit par une intense activité magmatique qui se manifeste par trois principaux épisodes magmatiques ayant été identifiés, échelonnés temporellement par rapport au paroxysme de la déformation hercynienne. Ce magmatisme, qualifié de bimodale se manifeste dans un contexte géodynamique distensif, sous forme de sills dans la formation volcano-sédimentaire de Saghlef [10] [17] [18] [28] [29] [30] [31].

- La première activité, dite pré-tectonique, se compose d'un épisode magmatique principalement basique (gabbro et dolérite) associé à de rares termes acides (trondhjémites). La nature tholéiitique abyssale de ces matériaux et l'empreinte de la déformation hercynienne témoignent de leur mise en place contemporaine de l'ouverture du bassin, antérieurement à la tectonique hercynienne [10] [17].
- La deuxième activité, qualifiée d'orogénique, est marquée par la présence de granites calco-alcalins, mis en place sous forme de batholites circonscrits [10] [17] [18]. Par rapport à la déformation, ces plutons sont qualifiés de syntectoniques, contemporains du raccourcissement crustal post-viséen [32] [33] [34] [35].
- La troisième activité, qualifiée de post-orogénique, correspond à la mise en place de quelques filons de nature lamprophyrique de direction méridienne à subméridienne [30]. Ces filons de microdiorites, contenant divers types d'enclaves précambriennes [10] et généralement parallèles aux axes des plis hercyniens. Ils recoupent localement les produits magmatiques acides et basiques, ainsi que les plutons granitiques. Selon Huvelin [10], la mise en place de ces microdiorites est reliée à une phase de détente postérieure aux plis majeurs.

2.2 GÉOLOGIE DES JEBILET CENTRALES

Le gisement de Koudiat Aïcha est localisé dans la série viséenne de Saghlef située dans la partie centrale du massif hercynien des Jebilet. Le massif des Jebilet est formé d'Est en Ouest de trois domaines tectonostratigraphiques distincts [10] : Kharrouba (à l'Est), Saghlef (au centre) et Bou Gader (à l'Ouest) (Fig. 1b).

La série de Saghlef (ou Schistes de Saghlef) constitue l'unité principale des Jebilet centrales. Ses relations avec les domaines adjacents de Bou Gader et de Kharrouba sont de nature tectonique (un chevauchement et une faille de décrochement, respectivement). Bordonaro [17] a subdivisé les schistes de Saghlef en trois formations :

- au sommet, la *formation de Teksim*, calcaro-gréseuse et conglomératique à sa base, puis silto-argileuse au sommet. Elle est datée de la partie médiane du Viséen supérieur (*Posidonomya bechéri* BRONN, [36] et *Paragnathodus homopunctatus* WEYANT, [17]),

- au centre, la formation volcano-sédimentaire de Saghlef, dont l'âge est compris entre le Faménno-Tournaisien et le Viséen moyen-supérieur (*Posidonomya bechéri* BRONN, [10]). Cette formation peut elle-même être divisée en deux membres [17] :
 - ✓ un membre supérieur, comporte outre des silts et des shales, des roches volcaniques felsiques de faciès plus ou moins proximal,
 - ✓ un membre inférieur, caractérisé par deux niveaux repères à tuf, felsique à la base et mafique au sommet, associé à des shales et des silts et localement des quartzites, et plus à l'ouest, à des calcaires.
- à la base, la formation de Jbel Rhira, attribuée au Faménien supérieur, de nature quartzitique et argilitique.

2.3 STRUCTURE ET DÉFORMATION DES JEBILETS CENTRALES

Il s'agit d'un bassin géosynclinal intra-continentale d'âge devono-carbonifère entre la bordure de l'épicraton présaharien au SE caché sous la chaîne atlasique, et celle du mole côtier, vaste bloc rigide et non subsident au NW [7].

Bernard et al., (1988) informent que le bassin est de type arrière cordillère située au SE des massifs hercyniens. Ce bassin a fonctionné à partir du dévonien supérieur jusqu'au namurien.

Les derniers modèles géodynamiques proposés attribuent une histoire intracontinentale à la chaîne hercynienne marocaine [4].

Kharbouch [37], Aarab [19] par la suite, dans son étude du magmatisme des Jebilet a proposé le modèle d'ouverture du bassin carbonifère des Jebilet en système « Pull apart ». Il est lié au jeu de décrochement qui s'accompagne d'une distension limitée avec individualisation de failles profondes qui ont servi d'accès aux émissions magmatiques pré-tectoniques de nature tholéitiques.

Les études pétrologiques et paléontologiques [10] [19] [38] [39], montrent que le bassin carbonifère des Jebilet est caractérisé par une faible profondeur de dépôt et des conditions anoxiques prédominants, qui ont été particulièrement favorable au piégeage de certains sulfures (pyrrhotite).

Ces terrains ont été structurés par des phases tectoniques hercyniennes associées à un métamorphisme régional de contact. Ce qui rend difficile l'identification des faciès sédimentaires.

Depuis les travaux d'Huvelin, plusieurs logs stratigraphiques synthétiques ont été proposés, dont Beauchamp [40] ont proposé un log stratigraphique synthétique du massif des Jebilet, ou ils ont distingué notamment la période antéviséen supérieur, caractérisée par une transgression majeure à l'échelle du massif.

Structuralement, l'unité centrale a été affectée par de nombreux épisodes tectoniques, résumés par Bordonaro [17] en une succession de quatre principales déformations (D_1 , D_2 , D_3 et D_4), dont les deux premières (D_1 et D_2) sont les phases majeures:

- la déformation D_1 , est définie par un plissement de direction $N0^\circ$ à $N30^\circ$ accompagné d'une schistosité S_1 subparallèle avec la stratification (S_0) en général. Le pendage de S_1 varie d'un secteur à l'autre, peu penté à l'Ouest (Jbel Saghlef) et subvertical à l'Est (Jbel Ben el Garn).
- la déformation D_2 est responsable de toutes les structures majeures hectométriques à kilométriques synclinoriales et anticlinoriales et renforce la phase D_1 . Quand les schistosités S_1 et S_2 font un angle relativement important (S_1 subhorizontale et S_2 subverticale), on observe des plis P_2 à toutes les échelles (Bordonaro 1983).
- la déformation D_3 se manifeste par des plis mineurs (centimétriques à décimétriques) orientés $N150^\circ$ et liés aux chevauchements et aux déversements des structures vers l'Ouest.
- la déformation D_4 , présente partout dans les Jebilet centrales, est caractérisée par des décrochements conjugués d'ampleur variable dextres ($N70^\circ$) et senestres ($N135^\circ$), produisant des structures mineures (crochons et crénulations NS).

L'histoire de déformation établie dans les Jebilet centrales s'inscrit dans le cadre d'une compression régionale restant proche de la direction E-O. Il s'agit probablement d'un continuum de déformation postérieur au viséen supérieur-namurien et antérieur à l'autunien [17], tandis que les quelques décrochements dextres et leurs conjugués senestres (Jbel El Hadid) pourraient indiquer une compression NS tardive, qui peut être liée à la phase de compression atlasique, d'autant plus que certains d'entre eux recoupent les structures précédentes (ex. décrochement $N70^\circ$ dextre de Mesret) [17].

Dans les Jebilet centrales, la déformation est associée à un métamorphisme de faible grade correspondant au faciès des schistes verts et se caractérisant par un assemblage minéralogique typique à chlorite-séricite, quartz et actinote. Au contact immédiat des intrusions acides-basiques, l'encaissant sédimentaire peut développer localement un faciès de schiste tacheté à cordiérite.

2.4 GÎTOLOGIE DES JEBILET CENTRALES

Du point de vue métallogénique, l'unité centrale des Jebilet renferme plusieurs indices à minéralisations sulfurées rencontrés dans le massif des Jebilets. Les formations géologiques de Saghlef et de Teksim présentent un intérêt métallogénique important pour les amas sulfurés stratiformes. Bordonaro [17] décrit au niveau de la série de Saghlef l'existence de deux niveaux porteurs de la minéralisation sulfurée. Le premier niveau porteur coïncide avec le membre inférieur de la formation de Saghlef, tandis que le second niveau est en relation avec le volcanisme acide du membre supérieur de Saghlef. Ces minéralisations sont polymétalliques, interstratifiées au sein de la série viséenne des schistes de Saghlef, et sont à pyrrhotite dominante.

Les minéralisations sulfurées des Jebilet centrales sont déformées, pré-tectoniques et semblent spatialement liées aux sills magmatiques mafiques (Kettara, Koudiat Aïcha) ou felsiques (Draa Sfar). Ces corps minéralisés montrent en affleurement une altération supergène marquée par le développement de chapeaux de fer constitués essentiellement d'hématite et de goethite dont la profondeur peut atteindre 50 m [10] [17] [41] [42] [43] [44] [45] [46]. Cette altération est marquée par une zonation verticale supergène [10] [17] [39]. Ces corps minéralisés montrent une zonation minéralogique classique verticale développée lors de l'altération supergène des gîtes sulfurés (chapeau de fer, zone de cémentation et protore polymétallique) [10]. Ces gisements essentiellement pyrrhotitiques (ex. Kettara, Draa Sfar, Koudiat Aïcha, Laachach, ...) comportent en plus de la pyrrhotite qui représente le sulfure de fer le plus dominant, des minéraux de métaux de base (Zn, Cu, Pb et As) tels que la sphalérite, la chalcopyrite, la galène, l'arsénopyrite et la stanite. La teneur en ces minéraux varie aussi bien d'un gisement à l'autre qu'au sein d'une même lentille minéralisée [10] [17] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47].

3 GÉOLOGIE LOCALE DE KOUDIAT AÏCHA

3.1 PRÉSENTATION DE LA SOCIÉTÉ EXPLOITANTE

Le secteur de Koudiat Aïcha relève de la commune rurale Harbil de la subdivision de Marrakech (Caïdat BOUR), dans la région de Marrakech-Safi. La compagnie minière des Guemassa "CMG" est une filiale de Managem Holding de l'*Omnium Nord Africain* "ONA" détient les permis d'exploitation du secteur de Koudiat Aïcha cédé par l'Office National des Hydrocarbures et Mine "ONHYM". Elle développe les travaux de mine et exploite actuellement la mine de Draa Sfar plus au sud dans les Jebilets centrales et la mine Hajjar dans le massif des Guemassa. Elle est la plus importante compagnie minière au Maroc, et exploite actuellement des minerais de Plomb, Cuivre et de Zinc, et produit la moitié de la production du Maroc en métaux non ferreux.

3.2 LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE ET HISTORIQUE DE DÉCOUVERTE

Le secteur du gisement Koudiat Aïcha est situé dans la partie sud de la meseta marocaine, et précisément dans la partie centrale du massif hercynien des Jebilet. Il est distant d'environ 7 km au SW de l'ancienne mine à pyrrhotite de Kettara, et à 32 km au NW de Marrakech. Les formations du secteur de gisement Koudiat Aïcha appartiennent à la série viséenne de Saghlef [10], [17].

Le secteur de Koudiat Aïcha correspond à une anomalie magnétique aéroportée mise en évidence en 1963 par la S.A.P.A (*Société Anonyme de Prospection Aéroportée*). Depuis, les travaux de recherche se sont multipliés sur le site de Koudiat Aïcha où affleurent de nombreux chapeaux de fer. Le gisement de Koudiat Aïcha a été découvert suite à un levé magnétométrique au sol sur les indices ferrugineux des secteurs avoisinants l'ancienne mine à pyrrhotite de Kettara. Depuis, de nombreux travaux de recherches géologiques, géochimiques et géophysiques ainsi que des sondages carottés ont été entrepris dans le but d'intercepter la minéralisation primaire en profondeur et de déterminer l'allure générale du corps minéralisé. Ces travaux ont permis de mettre en évidence des ressources potentielles en métaux de base d'environ 3.6 Mt à environ à 3% Zn, 1% Pb et 0.6% Cu [46] [48].

3.3 TOPOGRAPHIE, CLIMAT, SOL ET VÉGÉTATION

Le secteur d'étude du gisement de Koudiat Aïcha correspond à une crête orientée NS sur environ 1.5 Km de long, dont l'altitude ne dépasse pas 520 m, séparant deux versants opposés à plaines marqués par une altitude d'environ 410 m. En

général, le climat dans le massif des Jebilet est continental typiquement aride à semi-aride. Il est caractérisé par une saison sèche s'étendant sur la plus grande partie de l'année et une saison "humide" à courte durée en hiver. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 17 °C qui pourrait atteindre des valeurs assez élevées en été (> 50°C). Les précipitations pluviales sont faibles (250 mm), généralement enregistrées en hiver, tandis qu'elles sont quasiment absentes à rarement enregistrées au cours des autres saisons de l'année.

A Koudiat Aïcha, le sol est généralement brut. La roche mère est couverte, cependant elle est visible au niveau de la crête et peu transformée. Les horizons du sol n'y sont pas bien différenciés. La végétation y est pauvre voire absente et les apports en matière organique sont quasi inexistantes.

3.4 STRATIGRAPHIE ET LITHOFACIÈS

Le secteur d'étude est formé par un ensemble de roches sédimentaires (80%) et magmatiques (20%) (Fig. 2). La stratigraphie locale est partiellement oblitérée sous l'effet conjoint de la déformation et du métamorphisme [47]. La cartographie de surface et l'analyse systématique des sondages carottés ont été réalisées. Ils ont permis de comprendre la succession stratigraphique locale à tendance stratigraphique générale des roches en une succession homoclinale de direction généralement NS à fort pendage vers l'Est. Plusieurs sondages ont intercepté un horizon minéralisé en sulfures, en plus des unités lithologiques reconnues à l'affleurement.

Les unités sédimentaires répertoriées à Koudiat Aïcha représentent les termes sommitaux de la formation de Saghlef et sont affectées par un métamorphisme de type schiste vert à mica blanc, chlorite, quartz et épidote. L'ensemble des descriptions pétrographiques et minéralogiques ont été résumé dans le tableau 1. La succession lithostratigraphique du secteur peut être subdivisée en deux unités distinctes :

- **L'unité sommitale**, formée d'un calcaire gréseux qui affleure en forme de lentilles discontinues. Elle est constituée de plusieurs bancs centimétriques à métriques de couleur beige séparés par des niveaux gréseux et silteux, localement imprégnés de pyrrhotite disséminée. Ce niveau carbonaté, localisé au-dessus de la minéralisation à pyrrhotite massive et des argillites (à muscovite-chlorite) du toit, est considéré comme un horizon repère marquant le sommet de la série stratigraphique du secteur et peut être attribué à la base de la série de *Teksim*.

L'examen microscopique de ces calcaires gréseux montre une association de sphéroïdes hétérogranulaires de carbonate dont la taille ne dépasse pas 0,5 mm. La paragenèse minérale est formée de quartz, de calcite, d'actinote et de sulfures, avec quelques traces d'épidote. Le quartz constitue 30 à 50% de la roche. L'actinote représente 15 à 20% de la roche et montre des cristaux automorphes à subautomorphes. La calcite est hypidiomorphe et constitue la matrice intragranulaire des cristaux composant ce calcaire gréseux.

- **L'unité basale**, formée principalement d'argillites massives très déformées, transformées en schistes à grains fins à séricite-chlorite-quartz-actinote, au sein desquelles apparaissent des niveaux grésos-quartzitiques, d'épaisseur centimétrique à métrique et moulés par la schistosité régionale S_1 . Cet ensemble est caractérisé à son sommet par la présence de niveaux stratiformes de sulfures massifs à pyrrhotite et métaux de base. Les argillites, qui caractérisent l'ensemble de la formation de Saghlef, sont interprétées comme des métapélites rythmées caractérisant un milieu de sédimentation anoxique [41]. Ce sont des sédiments fins (0.1 à 0.5 mm de diamètre), dont la couleur est typiquement noir-gris à verdâtre. Les argillites montrent un débit schisteux, avec des plans de schistosité S_1 et S_2 bien marqués et sont intercalées de quelques rares niveaux de grès. Leur minéralogie est dominée par une matrice à muscovite-chlorite sous forme de petites paillettes étirées qui dessinent la schistosité S_1 , avec du quartz (2 à 10 %) sous forme de niveaux microcristallins et de veinules millimétriques.

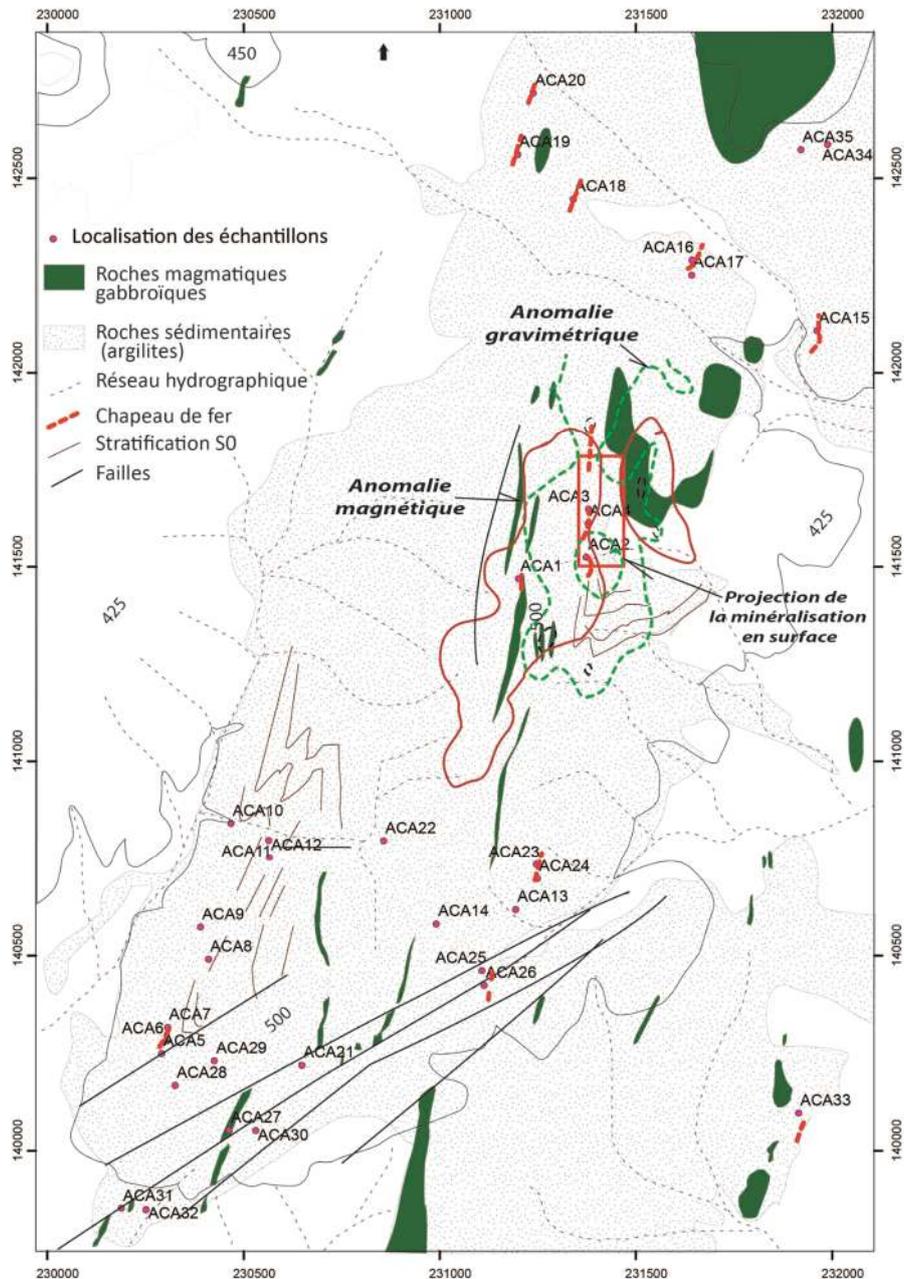


Fig. 2. Carte géologique simplifiée du secteur de Koudia Aïcha, emplacement de l'anomalie magnétique et gravimétrique et inventaire des affleurements et des échantillons prélevés des chapeaux de fer du secteur de Koudiat Aïcha.

Les grès et les siltstones forment une deuxième composante des roches sédimentaires détritiques. Ils sont moins abondants que les argillites et communément discontinus et boudinés le long de la schistosité S_1 . Ils présentent des lits d'épaisseur millimétrique à métrique qui montrent une direction méridienne à subméridienne et un fort pendage. La roche est compacte et donne des cassures conchoïdales, et peut présenter, malgré la déformation, quelques figures sédimentaires (rides de courants, figures de charge, slumps et granoclassements normaux). Elle est formée de grains de quartz (80%) de petite taille (0.1 à 0.25 mm), avec de minces lits de chlorite et de muscovite et des grains d'épidote, de feldspath, de calcite, de sphène et de leucoxène.

Tableau 1. Description pétrographique et minéralogique des principales lithologies répertoriées au niveau du gisement de Koudiat Aïcha

| Litho-faciès | Description générale | Minéraux | Textures / structures |
|--------------------------|--|---|--|
| Argillites | Noire-grisâtres à verdâtres à granulométrie fine, fortement séricitisées et chloritisées | Qtz (10-20% à Φ 0.1-0.5 mm), sér. chl. et bio. (50-70% à Φ 0.1-0.3 mm). | Massive, litée, déformée, foliée |
| Grés/silt | Bancs compacts, intercalés au sein des argillites, à granulométrie fine, chloritisés et séricitisés à rare biotite. | Qtz (50-95% à Φ 0.1-0.5 mm), sér., chl. et bio. (10-30% à Φ 0.1-0.3 mm). | Massif, réticulé et jointive |
| Calcaires gréseux | Barres discontinues (centimétrique à métriques), beiges intercalées par des niveaux de silts ayant subi l'effet de la déformation plicative. | Qtz (30-35% à Φ 0.2-0.4 mm), actinote (10-25% à Φ 0.2-0.5 mm), calcite 30-40% à Φ 0.3-0.5 mm). Traces de pyrrhotite (10-15% à Φ 0.3-0.5 mm). | Skarnifié, déformé. |
| Gabbro | Sills, de couleur vert foncé, à phénocristaux de plagioclases. | Plag. (albite) 40-50% à Φ 0.5-5 mm), amphiboles actinolitiques (Hb) 35-45% à Φ 0.5-1 mm), sér., chl., ilménite (10-15% à Φ 0.2-0.5 mm) P | Massif, doléritique aux épontes, et ophitique à sub-ophitique au centre. |
| Rhyodacite | Massif à submassif, grenue vert grisâtre à phénocristaux de plagioclases et de quartz à mésostase quartzo-feldspathique microgrenue. | Plag. (albite) (10-30%), Qtz (5-10% à Φ 0.5-2 mm), matrice quartzo-feldspathique recristallisé (50-60%, Φ <0.1 mm). | Felsitique. |

3.5 MAGMATISME DU SECTEUR DE KOUDIAT AÏCHA

Les roches intrusives du secteur de Koudiat Aïcha sont présentes sous forme de sills de gabbro (rarement des dolérites) au toit et au mur, déformés et paraconcordants à la stratification. Les sills sont de direction NS et s'étendent sur plus de 100 m, avec des épaisseurs variant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Les gabbros sont de couleur vert sombre et sillonnent tout le secteur de Koudiat Aïcha. Ce faciès présente des bordures figées d'ordre centimétrique, à texture microlitique porphyrique dont les phénocristaux sont constitués essentiellement de plagioclases pouvant dépasser plus de 2 mm. Le mur de la minéralisation est caractérisé par une multitude de sills gabbroïques peu épais (<15 m) à grains fins, tandis que le toit montre des sills moins nombreux mais plus épais (30-40m).

Les roches magmatiques felsitiques sont moins abondantes (moins de 2%) et correspondent à des coulées de laves rhyodacitiques. Ces laves sont finement grenues de couleur vert grisâtre, sont subconcordantes avec la stratification, d'épaisseur métrique et s'étendent sur quelques dizaines de mètres. Elles sont composées de phénocristaux de plagioclases et de quartz dans une mésostase de quartz-plagioclase-muscovite.

Les faciès tuffacés ont été interceptés en profondeur par sondage carottés réalisés sur le flanc Est de Koudiat Aïcha à une profondeur de 300 à 400 m visant la zone minéralisée à sulfures massifs. Ce sont des roches massives de couleur gris à gris-vertâtre formées de lapillitufs à lapilistone contenant des phénocristaux de même compositions que les laves intermédiaires rhyodacitiques.

3.6 GÉOLOGIE STRUCTURALE

La cartographie de surface et l'interprétation des carottes issues des sondages traversant la zone minéralisée montrent une tendance stratigraphique générale des roches, en une succession homoclinale de direction généralement NS à fort pendage vers l'Est. Les roches de Koudiat Aïcha, font partie du synclinorium de Koudiat Aïcha-Jbel Hadid.

L'étude structurale et microstructurale des unités lithologiques de Koudiat Aïcha a permis d'identifier un nombre de structures et microstructures tectoniques dont l'interprétation révèle l'existence de trois phases de déformation superposées et corrélables avec la déformation régionale des Jebilet centrales :

- Une première phase D_{0KA} , à caractère synsédimentaire, anté-schisteuse, distensive et associée à l'ouverture du bassin dévono-carbonifère. Elle se traduit par le développement de structures et de figures sédimentaires dont les slumps, les convolutes-turbidites, les figures de charge et les failles normales de dimensions centimétriques d'orientation méridienne à subméridienne. Ceci marque bien l'instabilité tectonique pendant l'ouverture du bassin de sédimentation.
- Une deuxième phase D_{1KA} , majeure, souple et caractérisée par une schistosité S_1 et des plissements P_1 . La S_1 , de direction NS à $N30^\circ$ et fortement pénétrative, est observée dans l'ensemble de la zone minéralisée et se confond au litage sédimentaire S_0 . Elle est marquée par la néoformation de la chlorite, du mica blanc (séricite), du quartz et d'oxydes, parallèlement aux plans d'aplatissement. Le développement de la schistosité S_1 est suivi localement par une schistosité de crénulation S_2 , locale et bien marquée. D_{1KA} est liée aux phases de déformations D_1 et D_2 de la déformation régionale des Jebilet.
- Une phase D_{2KA} , tardive, postschisteuse et à caractère cassant. Il s'agit d'une tectonique tardi- à post-hercynienne succédant à la phase synschisteuse. Cette déformation est marquée par l'apparition d'une schistosité de fracture S_3 au niveau des bancs silto-gréseux, à laquelle s'associe des microstructures telles que les kink-bands et des décrochements dextres d'orientation $N55$ à $N70^\circ$. Cette phase D_{2KA} peut être attribuée aux phases de déformation tardive D_3 et D_4 (Bordonaro 1983).

4 MINÉRALISATION DE KOUDIAT AÏCHA

Plusieurs sondages implantés au niveau du flanc Est de Koudiat Aïcha ont intercepté en plus des unités lithologiques reconnues à l'affleurement, un horizon minéralisé en sulfures primaires à partir de la côte -50 m. Ces sondages implantés ont permis de préciser la morphologie et l'extension latérale et verticale ainsi la nature des structures et textures de la minéralisation en profondeur [48]. La minéralisation est encaissée principalement entre les unités argilitiques supérieures de l'unité basale de Koudiat Aïcha (série supérieure de Saghlef) et l'unité sommitale carbonatée (série de Taksim). Elle forme un horizon à pyrrhotite sous forme de lentilles métriques à décamétriques allongées suivant la direction NS qui s'épaissit en profondeur (20 à 25 m).

Sur la base des teneurs en des métaux de base de la minéralisation massive, le gisement de Koudiat Aïcha a été rangé dans la catégorie des gisements sulfureux zincifères [46] [48].

Le corps minéralisé de Koudiat Aïcha, montre une zonation minéralogique classique verticale développée lors de l'altération supergène des gîtes sulfurés (chapeau de fer, zone de cémentation et protore polymétallique).

La minéralisation sulfurée est constituée de pyrrhotite qui représente le sulfure de fer le plus dominant à laquelle s'associe de la sphalérite, la chalcopryrite, la galène, l'arsénopyrite, la stannite et quelques traces de pyrite secondaire. Tous les minéraux sulfurés présentent des stades anté à syntectoniques à l'exception de la pyrite marquant un stade tardive de mise en place suite à la transformation secondaire de la pyrrhotite. La teneur en ces minéraux varie aussi bien d'une lentille à l'autre et aussi qu'au sein d'une même lentille minéralisée [46] [47] [48].

5 PÉTROGRAPHIE ET MINÉRALOGIE DES CHAPEAUX DE FER

5.1 ALLURE GÉNÉRALE DES CHAPEAUX DE FER ET LEUR DISPERSION

À l'affleurement, les chapeaux de fer du secteur de Koudiat Aïcha sont présents sous forme de sills au mur de la zone minéralisée. Ils sont déformés et paraconcordants à la stratification, et montrent une direction NS (Fig. 2, 3a). Ces chapeaux de fer s'étendent de quelques mètres à plus de 100 m, avec des épaisseurs variant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Ils montrent couleur rouge-brun à sombre et sillonnent tout le secteur de Koudiat Aïcha (Fig. 2, 3b, c).

La minéralisation polymétallique recherchée essentiellement à pyrrhotite dominante, conférant au secteur de Koudiat Aïcha une anomalie magnétique ayant attiré et poussé davantage les travaux de prospection dans le secteur [49]. Elle est encaissée en profondeur, et marquée en affleurement par un chapeau de fer bien développé à oxydes et hydroxydes de fer. Ces chapeaux de fer représentent une minéralisation de fer oxydée suite à l'oxydation, la dissolution et la précipitation de sulfures des minéraux secondaires lessivés et cimentés dans les roches avoisinantes au corps minéralisé. Le résultat de ces actions constitue une association de minéraux secondaires transformés depuis la minéralisation sulfurée primaire. Ils sont constitués essentiellement d'hématite, goethite, magnétite, limonite et quelques traces de malachite rares....

5.2 MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'ANALYSE

Les échantillons des chapeaux de fer destinés à l'analyse ont été pris au niveau du secteur de Koudiat Aïcha s'étendant sur une superficie de quelques km² (Fig. 2). Une trentaine d'échantillons ont été collectés sur l'ensemble des chapeaux de fer affleurant. Ces échantillons ont été prélevés dans la zone d'oxydation du chapeau de fer sur des cassures fraîches. La distribution des échantillons prélevés fait ressortir l'individualisation de trois zones bien distinctes : zone centrale (ACA1 à ACA4), zone nord (ACA5 à ACA12) et zone sud (ACA13 à ACA35) (Fig. 2).

Les échantillons prélevés ont été analysés par ICP-AES au laboratoire d'analyse géochimique pour les éléments traces. Ces échantillons ont été analysés pour un minimum variable d'éléments. Du fait que la géochimie est complexe et surtout coûteuse, il faut garder le nombre des éléments analysés au minimum, donc on analyse surtout l'élément recherché et parfois on y ajoute quelques uns par curiosité comme éléments indicateurs. Il est évident de prendre note que les éléments métalliques économiques recherchés présentent des degrés de mobilité différentes sous les conditions météoriques. De même, la caractérisation des zones d'activité dépend de la série d'éléments indicateurs que l'on analyse. Ainsi, lorsqu'on analyse peu d'éléments, on limite sérieusement le cadre d'interprétation et par conséquent on perd l'information et les guides de prospection.

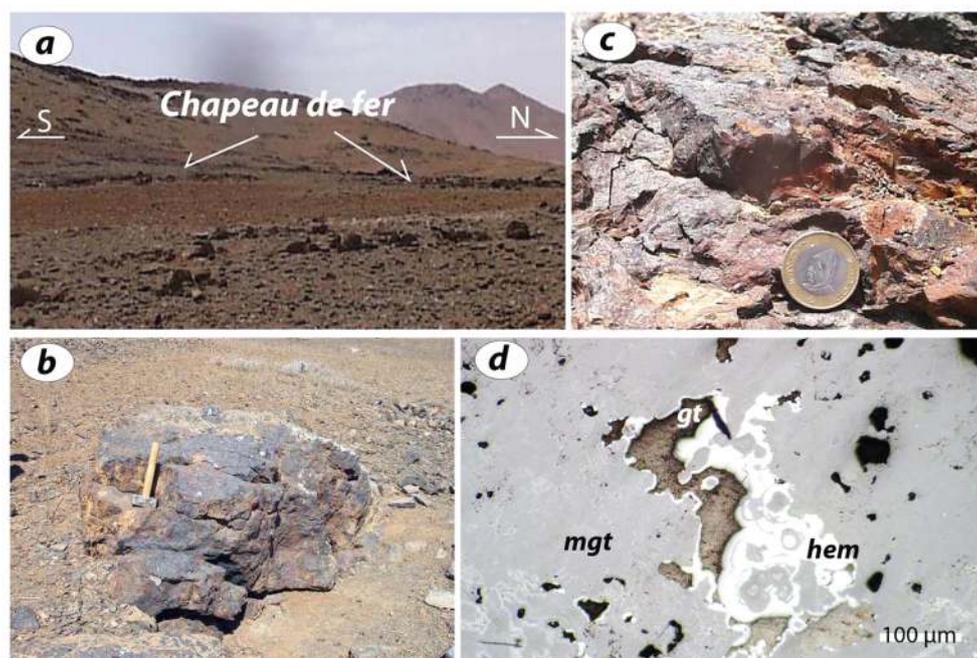


Fig. 3. (a) Panorama du gisement de Koudiat Aïcha et allure générale de l'alignement du chapeau de fer (CDF) dans le flanc Est de Koudiat Aïcha. (b, c) aperçus macroscopique du chapeau de fer (riche en hématite, goethite, limonite, et traces de malachite). (d) aperçu microscopique du chapeau de fer (riche en hématite (Hem), magnétite (Mgt) et goethite (Gt))

5.3 MINÉRALOGIE DES CHAPEAUX DE FER

La partie supérieure des minéralisations sulfurées a été altérée par l'action des agents atmosphériques (météorique) totalement au cours des temps géologiques provoquant la formation des chapeaux de fer. A l'œil nu ces faciès montrent une absence totale de sulfures primaires. Dans cette partie supérieure, le fer de la pyrrhotite qui constitue la principale composante de la minéralisation de Koudiat Aïcha est en totalité désulfuré. Elle s'est transformée en oxydes, hydroxydes (ocre) et de sulfates enrichis par la migration de divers éléments vers la profondeur (zone de cimentation).

Des sections polies et des sections minces polies d'échantillons en vrac sélectionnés ont été préparées en utilisant une résine époxy pour incorporer les échantillons.

L'examen des minéraux de lames polies en lumière réfléchie ont porté principalement des échantillons de chapeaux de fer pour la détermination de la composition minéralogique d'une part, et d'autre part de définir la séquence paragenétique et les figures de remplacement (structures et textures). Ces échantillons présentent une composition minéralogique pareille entre

eux. Ils sont formés principalement par la magnétite, l'hématite et la goéthite. L'observation microscope a permis de constater que la magnétite constitue la phase dominante sous forme de plages xénomorphes qui se transforment depuis les bordures en hématite avec une texture en concrétion (Fig. 3d).

L'établissement d'un ordre chronologique permet d'attribuer les oxydes et hydroxydes de fer à une transformation secondaire des sulfures (désagrégation mécaniques et de l'altération chimique). La pyrrhotite qui constitue la phase sulfurée dominante du gisement de Koudiat Aïcha s'est transformée en premier lieu en pyrite [46], suivi d'une transformation en magnétite et ensuite en hématite. Cette dernière se transforme en goéthite et en limonite (hydroxydes de fer et d'alumine et des minéraux argileux) en phase finale (Fig. 3d).

5.4 LES MÉTHODES D'APPROCHES GÉOCHIMIQUES

5.4.1 LA DIFFRACTION DES RAYONS X

Les déterminations par diffraction des rayons X sont avant tout qualitatives pour la détermination des espèces minérales, quelle que soit leur taille, entrant dans la composition d'un échantillon. Pour ce travail, la détermination minéralogique a été réalisée pour la plus grande partie à la faculté des sciences Semlalia de Marrakech de l'université Cadi Ayyad sur roche totale de chapeau de fer. La seule contrainte était le degré de cristallinité de l'espèce à déterminer. Ainsi un minéral est d'autant plus difficile à déterminer qu'il est plus mal cristallisé. Le dépouillement du spectre des rayons X a permis de confirmer les espèces minérales identifiées par études microscopiques. En plus des minéraux usuels d'oxydes et hydroxydes de fer du chapeau de fer tels que la magnétite, hématite et la goéthite, on note la présence d'ilménite (Fig. 4). Ce dernier est une espèce minérale formée d'oxyde minéral de fer et de titane de formule chimique FeTiO_3 avec des traces de magnésium, manganèse et vanadium. L'ilménite présente la même structure cristalline avec l'hématite ce qui permet d'avoir une solution solide à haute température.

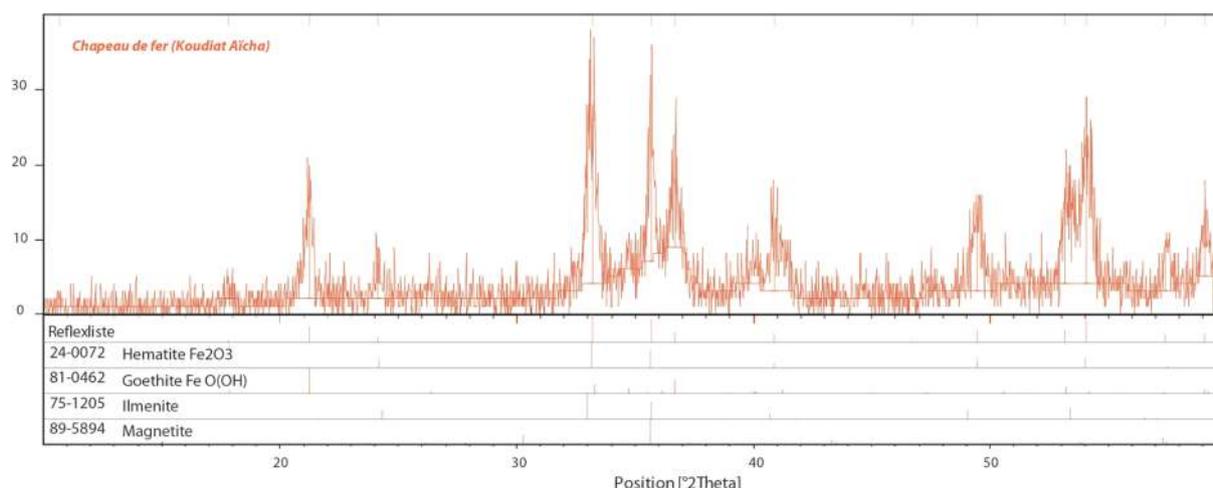


Fig. 4. Spectre du rayon X du chapeau de fer du secteur de Koudiat Aïcha.

5.4.2 PRÉPARATION ET DOSAGE CHIMIQUE

Les échantillons de la campagne d'échantillonnage furent préparés en diminuant autant que possible la granulométrie afin d'augmenter le degré de représentativité statistique en gardant à l'esprit le seul souci constant qui est d'éviter toute sorte de contamination chimique.

Aucune séparation minéralogique n'a été réalisée quelles que soit, afin d'utiliser les échantillons bruts provenant des chapeaux de fer du secteur de Koudiat Aïcha. Cette étape permet d'établir la composition chimique globale de l'échantillon. Les échantillons sont broyés dans un broyeur à galet d'acier au carbone qui ne contamine en rien d'autre qu'en fer. Les techniques d'analyses utilisées ont été mises au point au laboratoire d'Analyses Spectrochimiques. Les échantillons ainsi préparés sont systématiquement analysés en 10 éléments mineurs et traces. Ces éléments sont dosés au spectromètre à plasma ICP (Inductively Coupled Plasma). Pour les éléments analysés, les résultats sont exprimés en ppm sur la roche séchée à 110 °C.

5.4.3 TRAITEMENT STATISTIQUES DES RÉSULTATS

Ce travail qui porte sur dizaine d'échantillons avec analyse de quelques éléments chimiques ne peut se mener sans traitement statistique. Pour les traitements de données qui vont suivre, nous n'avons d'aucune façon filtré les données brutes pour éliminer telle ou telle valeur erratique ou corriger les valeurs brutes reçues. En tout temps, nous nous sommes servis des données brutes provenant des laboratoires afin que les résultats obtenus soient directement applicables par toute personne voulant faire un traitement de données ultérieurement. Cependant les éléments chimiques dont les valeurs sont au-dessus de la limite de détection ont été ramenés à une valeur nulle pour faciliter les traitements statistiques.

Ainsi pour une bonne description géochimique de l'ensemble des échantillons, les méthodes statistiques usuelles ont été utilisées:

- Traitements univariés: il s'agit de calcul des niveaux moyens de teneurs, moyennes et médianes, des écarts-types, des coefficients de variation et du tracé des diagrammes de distribution (histogrammes).
- Traitements à plusieurs variables: ce sont les corrélations (coefficients de corrélation et diagrammes de corrélation inter-éléments) et l'analyse factorielle. Cette dernière a été pratiquée pour déterminer la façon dont les éléments chimiques sont liés entre eux et de mettre ainsi en évidence les différentes "phases géochimiques". C'est l'analyse en composantes principales (ACP) qui a été pratiquée.

6 RÉSULTAT

6.1 STATISTIQUES ÉLÉMENTAIRES

Le but des analyses chimiques des échantillons de chapeau de fer était donc de définir par la suite les seuils de bruit de fond et celui de l'anomalie pour chaque élément analysé et, s'il y a lieu, de circonscrire des concentrations anormales de certains éléments qui pourraient servir de cible pour la prospection minière.

Pour ceci, un total de 35 échantillons ont été prélevés à partir des filons de chapeau de fer distribués dans le secteur de Koudiat Aïcha. Cette étude se base donc sur un total de 350 analyses, soit 10 éléments analysés par échantillon. Ces éléments analysés sont: Ag, As, Bi, Cu, Mo, Ni, Pb, Sn, Te et Zn. Les résultats des analyses sont exprimés dans le tableau 2. Dans ce contexte des amas sulfurés, des éléments mineurs non pas étaient analysés en totalité, et certains étaient inutilisables parce que leur contenu était sous la limite de détection suite à l'intense lessivage sous l'action météorique. En somme, nous visons une approche dont les moyens sont déjà en place ou facilement accessible pour toute opération de prospection minière (Spectromètre de FX (XRF) portable). L'application d'une telle méthodologie devrait permettre 1) de développer une technique d'exploration géochimique, 2) de fournir une approche logique d'un traitement géostatistique pour l'interprétation des résultats de données géochimiques, applicable à d'autres environnements similaires dans la même province métallogénique.

Le tableau 3 présente quelques statistiques élémentaires pour les éléments analysés. Les résultats des éléments analysés renferment des valeurs maximum relativement aux valeurs moyennes correspondantes pour chaque élément. Les éléments tels que l'As, Cu, Pb et Zn présentent des étendues de plage de données assez important. Ces éléments dont les valeurs extrêmes auront un impact sur l'interprétation des résultats obtenus par les méthodes classiques en se basant sur les valeurs moyennes. Pour les autres éléments tels que Ag, Bi, Mo, Te, Ni, Sn, présentent des valeurs minimum nulles avec de faibles étendues et des écarts-type petits.

Les histogrammes de fréquence de chacun des éléments chimiques analysés sont donnés à la figure 5 pour les 35 échantillons à notre disposition. Dans ce cas, les histogrammes ont été tracés après une classification des plages données en 16 classes. Un rapide coup d'œil permet de faire des constatations intéressantes. Les histogrammes réalisés montrent le caractère unimodal homogène des résultats formé par une seule population (Fig. 5). Ce caractère unimodal traduit la mise en place des filons à la suite de la même source de fluide minéralisateur.

6.2 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La représentation logarithmique des données brutes permet de réduire l'asymétrie de la distribution des populations de données, comme indiqué par les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement. Une première interprétation des résultats des analyses des chapeaux de fer, basée sur l'utilisation des courbes gaussio-logarithmiques a été présentée par Lotfi (2015) [49]. Il est généralement reconnu que les éléments traces possèdent une distribution naturelle lognormale. Sur un papier à échelle gaussio-logarithmique, une telle distribution sera représentée par une droite. Dans le cas le plus général, la courbe de distribution pour l'ensemble des analyses d'un élément sera une ligne brisée formée de trois segments de droite marquée par

des points d'inflexions produites par le changement de pente de leur graphisme. Le premier champ correspond aux valeurs les plus faibles représente la population principale ou bruit de fond local, celui correspondant aux valeurs les plus élevées représente la population anormale illustre l'anomalie de l'élément analysé, tandis que le segment de droite situé entre ces deux extrêmes représente un mélange des deux populations précédentes, soit une population intermédiaire constituée en partie d'échantillons appartenant à la population principale et à la population anormale qu'on nomme la zone de transition. L'exemple de ce type de distribution est représenté à la figure 6 pour l'As. Les éléments de Pb, Te, Zn, Mo, Ni, Bi montrent également le même type de distribution. Un peu plus rarement, la courbe de distribution gaussio-logarithmique n'est constituée que de deux segments de droite. Dans ce cas, celui correspondant aux valeurs les plus faibles représente le bruit de fond, tandis que celui correspondant aux valeurs les plus élevées représente la population anormale. Un exemple de ce type de distribution est représenté à la figure 6 pour Ag et Cu. Dans un seul cas pour Sn, la courbe de distribution gaussio-logarithmique est une droite unique, ce qui signifie qu'une seule population est présente, et qu'aucune anomalie ne peut être définie pour cet élément du fait que toutes les valeurs d'analyses se situent en-dessous de la limite de détection. La présence de Sn en analyse témoigne localement des teneurs anormales. Le tableau 4 donne, pour chacun des 35 échantillons analysés, les teneurs limites (minimum et maximum), le seuil d'anomalie tel que défini à l'aide des courbes gaussio-logarithmiques. Ces résultats serviront par la suite lors de la réalisation cartes géochimiques.

Les corrélations entre tous les éléments de notre étude ont été réalisées afin de saisir des liens possibles entre eux. De plus, de fortes corrélations nous permettraient peut-être de réduire le nombre d'éléments à analyser pour les prochaines études ou encore de renforcer une anomalie en considérant l'effet conjoint de ces éléments.

Les résultats de cette étude sont donnés sur un tableau combiné des corrélations (Tabl. 5). Dans notre cas nous n'avons retenu que la valeur absolue des coefficients de corrélation supérieurs à 0,7. Avant de voir en détail, les principales corrélations, il serait bon, de remarquer que les corrélations observées sont en fait la combinaison de corrélations reliées à la composition chimique du fluide minéralisateur responsable de la mise en place des minéralisations du secteur de Koudiat Aïcha. Les corrélations entre ces éléments mineurs sont en grande partie presque toutes positives et peu généralisées. On peut cependant noter qu'une seule famille d'affinité préférentielle présente le constat : *Pb-Ag-As-Sn*. Ce dernier a été prouvé également par la méthode d'ACP (Fig. 7). Cette affinité est de toute première importance comme indice de minéralisation et nous la considérerons fortement dans la construction des cartes de teneurs des éléments chimiques.

Tableau 2. Analyse chimique des chapeaux de fer du secteur de Koudiat Aïcha

| NUM | N° d'échantillon | Pb | Zn | Cu | Ag | As | Mo | Ni | Bi | Sn | Te |
|-----|------------------|------|-------|------|------|------|----|-----|-----|----|----|
| 1 | ACA1 | 48 | 3400 | 2010 | 0 | 0 | 0 | 59 | 108 | 0 | 0 |
| 2 | ACA2 | 7580 | 9580 | 374 | 16,5 | 6910 | 0 | 0 | 30 | 48 | 0 |
| 3 | ACA3 | 147 | 4290 | 2450 | 0 | 2430 | 21 | 0 | 51 | 0 | 5 |
| 4 | ACA4 | 963 | 1740 | 3760 | 0 | 2610 | 39 | 0 | 41 | 0 | 2 |
| 5 | ACA5 | 16 | 227 | 484 | 0 | 0 | 4 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | ACA6 | 0 | 139 | 617 | 0 | 0 | 4 | 19 | 0 | 0 | 2 |
| 7 | ACA7 | 9 | 57 | 196 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | ACA8 | 5 | 36 | 242 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23 | 0 | 0 |
| 9 | ACA9 | 9 | 171 | 1163 | 0 | 0 | 6 | 22 | 43 | 0 | 0 |
| 10 | ACA10 | 5 | 345 | 914 | 0 | 0 | 4 | 147 | 28 | 0 | 4 |
| 11 | ACA11 | 9 | 47 | 2010 | 0 | 0 | 3 | 35 | 0 | 0 | 2 |
| 12 | ACA12 | 0 | 65 | 195 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 13 | ACA13 | 7 | 134 | 707 | 0,3 | 0 | 0 | 359 | 15 | 0 | 0 |
| 14 | ACA14 | 866 | 10300 | 2650 | 0 | 127 | 4 | 321 | 14 | 0 | 4 |
| 15 | ACA15 | 5140 | 4310 | 491 | 0,4 | 26 | 0 | 0 | 15 | 0 | 5 |
| 16 | ACA16 | 3170 | 514 | 1079 | 1 | 269 | 4 | 0 | 21 | 0 | 2 |
| 17 | ACA17 | 1297 | 811 | 867 | 0 | 220 | 4 | 0 | 14 | 0 | 4 |
| 18 | ACA18 | 599 | 5700 | 2960 | 0 | 37 | 6 | 140 | 0 | 0 | 7 |
| 19 | ACA19 | 8 | 4590 | 3370 | 0 | 46 | 4 | 275 | 14 | 0 | 0 |
| 20 | ACA20 | 6 | 1094 | 1340 | 1 | 64 | 3 | 129 | 31 | 0 | 2 |
| 21 | ACA21 | 1065 | 1463 | 2170 | 0 | 412 | 14 | 150 | 12 | 0 | 2 |
| 22 | ACA22 | 17 | 271 | 5550 | 0 | 24 | 4 | 548 | 27 | 0 | 5 |
| 23 | ACA23 | 66 | 428 | 5720 | 0 | 36 | 0 | 227 | 57 | 0 | 11 |
| 24 | ACA24 | 43 | 78 | 1500 | 0 | 0 | 0 | 18 | 24 | 0 | 2 |
| 25 | ACA25 | 0 | 254 | 875 | 0,3 | 0 | 29 | 0 | 0 | 0 | 2 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------|------|-------|------|-----|-----|----|-----|----|---|---|
| 26 | ACA26 | 16 | 697 | 2410 | 0,4 | 0 | 4 | 118 | 15 | 0 | 2 |
| 27 | ACA27 | 54 | 1117 | 1520 | 0 | 529 | 3 | 34 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | ACA28 | 388 | 3910 | 424 | 0 | 0 | 2 | 39 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | ACA29 | 0 | 145 | 1142 | 0 | 35 | 5 | 18 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | ACA30 | 3240 | 13300 | 830 | 0,7 | 351 | 15 | 349 | 13 | 0 | 0 |
| 31 | ACA31 | 50 | 15700 | 5680 | 2,1 | 0 | 0 | 970 | 37 | 0 | 0 |
| 32 | ACA32 | 37 | 8100 | 1490 | 1,2 | 26 | 15 | 417 | 0 | 0 | 3 |
| 33 | ACA33 | 12 | 117 | 489 | 0 | 0 | 3 | 375 | 0 | 0 | 2 |
| 34 | ACA34 | 139 | 153 | 1192 | 0,3 | 744 | 4 | 0 | 12 | 0 | 2 |
| 35 | ACA35 | 76 | 893 | 416 | 0 | 90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tableau 3. Statistique élémentaire des éléments traces analysés des chapeaux de fer du secteur de Kouidiat Aïcha

| Variable | Min | Max | Moyenne | Ecart-type | 1 ^{er} Quartile 25% | Médiane 50% | 3 ^{ème} Quartile 75% |
|----------|-------|---------|---------|------------|------------------------------|-------------|-------------------------------|
| Ag | 0,0 | 16,5 | 1 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 0,3 |
| As | 0,0 | 6910,0 | 428 | 1275,7 | 0,0 | 25,0 | 150,3 |
| Bi | 0,0 | 108,0 | 18 | 22,5 | 0,0 | 14,0 | 27,3 |
| Cu | 195,0 | 5720,0 | 1694 | 1537,0 | 490,5 | 1152,5 | 2230,0 |
| Mo | 0,0 | 39,0 | 6 | 8,6 | 0,0 | 4,0 | 4,3 |
| Ni | 0,0 | 970,0 | 137 | 209,1 | 0,0 | 28,0 | 169,3 |
| Sn | 0,0 | 48,0 | 1 | 8,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Pb | 0,0 | 7580,0 | 717 | 1640,5 | 7,8 | 40,0 | 440,8 |
| Te | 0,0 | 11,0 | 2 | 2,6 | 0,0 | 2,0 | 3,3 |
| Zn | 36,0 | 15700,0 | 2691 | 4063,1 | 143,5 | 605,5 | 4005,0 |

Tableau 4. Limite de detection des anomalies du chapeau de fer de Kouidiat Aïcha.

| Élément | Ag | As | Bi | Cu | Mo | Ni | Pb | Sn | Te | Zn |
|--------------------|------|----------|-------|-------|--------|---------|-----------|----|---------|-----------|
| Bruit de Fond | <2,5 | <850 | <15 | <4000 | <6 | <300 | <1500 | 0 | <2,1 | <6000 |
| Zone de transition | >2,5 | 850-2200 | 15-80 | >4000 | 6-10,2 | 300-450 | 1500-2800 | 0 | 2,1-3,5 | 6000-8000 |
| Zone anormale | | >2200 | >80 | | >10,2 | >450 | >2800 | >0 | >3,5 | >8000 |

Tableau 5. Matrice de corrélation des éléments traces analysés des chapeaux de fer de Kouidiat Aïcha.

| Variabes | Ag | As | Bi | Cu | Mo | Ni | Pb | Sn | Te | Zn |
|----------|------------|------------|------------|------------|------|------------|------------|------|------|-----|
| Ag | 1,0 | | | | | | | | | |
| As | 0,9 | 1,0 | | | | | | | | |
| Bi | 0,1 | 0,2 | 1,0 | | | | | | | |
| Cu | -0,1 | 0,0 | 0,5 | 1,0 | | | | | | |
| Mo | -0,1 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 1,0 | | | | | |
| Ni | 0,0 | -0,2 | 0,1 | 0,6 | -0,1 | 1,0 | | | | |
| Pb | 0,7 | 0,7 | 0,1 | -0,2 | 0,0 | -0,1 | 1,0 | | | |
| Sn | 1,0 | 0,9 | 0,1 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | 0,7 | 1,0 | | |
| Te | -0,2 | -0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -0,1 | 1,0 | |
| Zn | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | -0,1 | 1,0 |

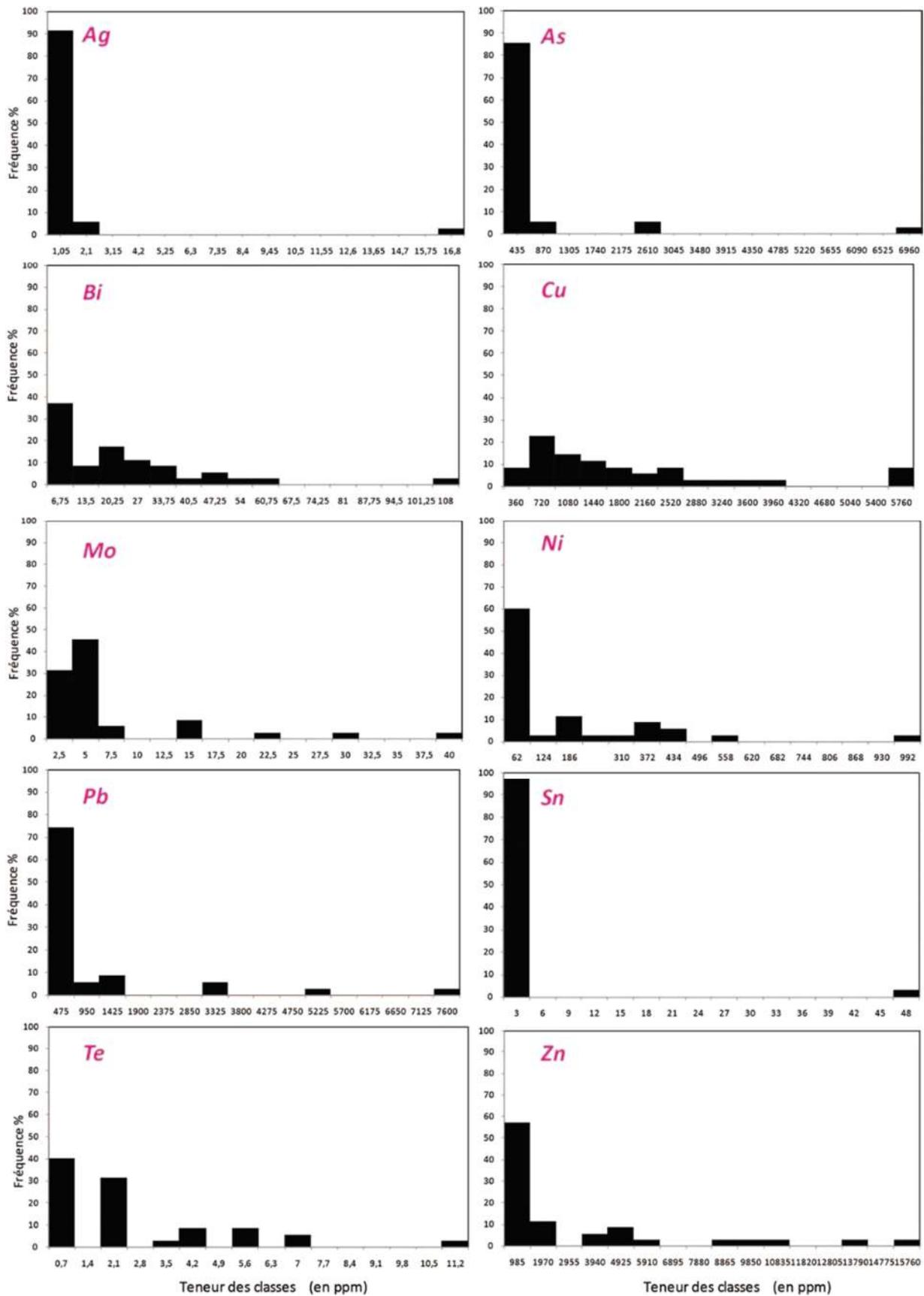


Fig. 5. Histogramme de fréquence des éléments traces du chapeau de fer du secteur de Koudiat Aïcha

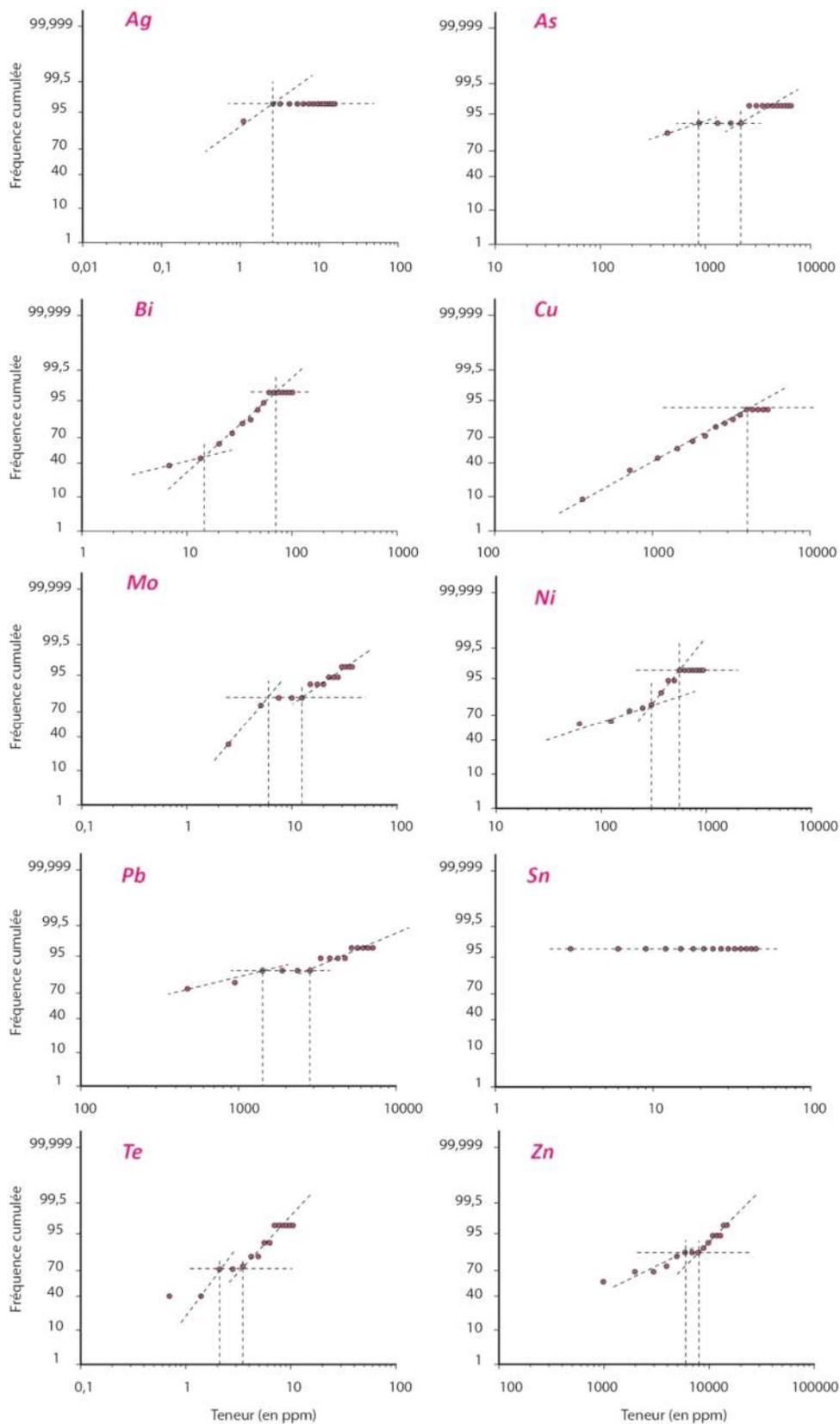


Fig. 6. Représentation graphique des fréquences cumulées des éléments du chapeau de fer en fonction de leurs teneurs

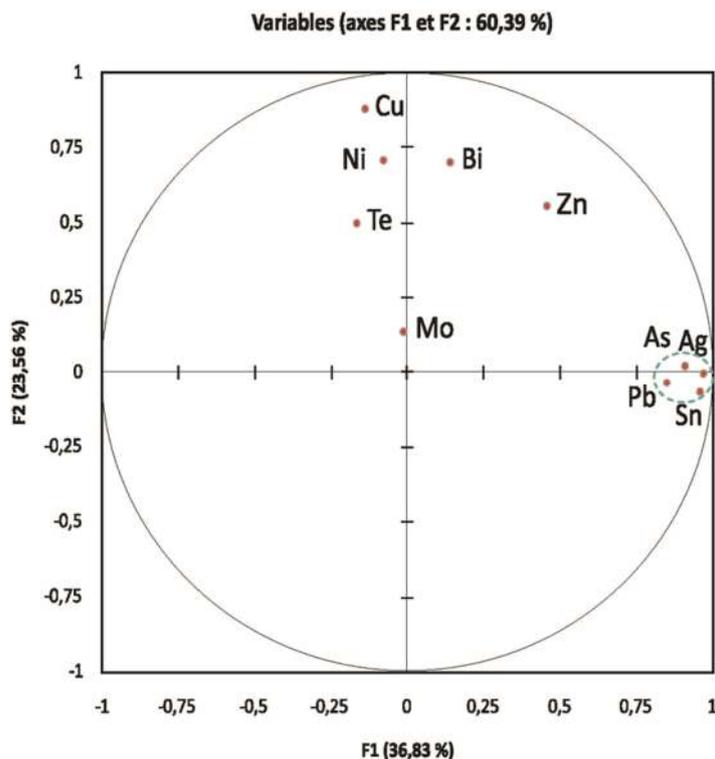


Fig. 7. Analyse de composantes principales des analyses des chapeaux de fer de Koudiat Aïcha.

6.3 CARTOGRAPHIE ET PRÉSENTATION DES DONNÉES DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

Les cartes de compilation et d'interprétation géochimique donnent la possibilité aux géochimistes de repérer et d'identifier rapidement les dispersions ou les zones d'activités géochimiques. Dans le cas de Koudiat Aïcha, la méthode des cartes de symbolisation graduées a été adoptée. Elle permet de visualiser rapidement les zones à forte teneur tout en donnant une idée générale de la force des teneurs.

Au cours de la réalisation des cartes, les résultats des traitements statistiques ont été pris en considération. Dans un premier temps, les anomalies pour chaque élément sur une carte distincte ont été localisées. En second lieu, les cartes obtenues ont été superposées de façon à faire ressortir les zones présentant des anomalies en plusieurs éléments. Cependant, il a fallu accorder une grande importance à quelques éléments indicateurs étant donné que certains sont des indicateurs plus importants que d'autres.

Les résultats des analyses ont été converti en symboles gradués accordé pour chaque point d'échantillon analysé en fonction de la teneur de l'élément tout en respectant les résultats des courbes de distribution gaussio-logarithmique dépendant de leur importance. Ici, nous nous restreindrons à l'interpolation et l'extrapolation spatiale en deux dimensions. Le bruit de fond a été considéré lors de la présentation des données d'une part, d'autre part la zone de Koudiat Aïcha n'a connu jusqu'à maintenant aucune activité minière ou source de contamination récente qui pourrait induire toutes causes de fausses anomalies probables. Cette approche permet d'augmenter le degré de confiance et d'éliminer toute hypothèse de contamination locale, et l'erreur d'analyse, etc..., dans le fait que les anomalies présentées dans les chapeaux de fer correspondent bien à des anomalies existant dans le protore [49]. Les cartes des éléments contenus dans les chapeaux de fer ont été reportées sur la figure 8 pour les éléments d'Ag, As, Sn corrélables. L'important constat immédiat, en se référant aux résultats obtenus des courbes de distribution, seule la zone centrale montre un intérêt de prospection.

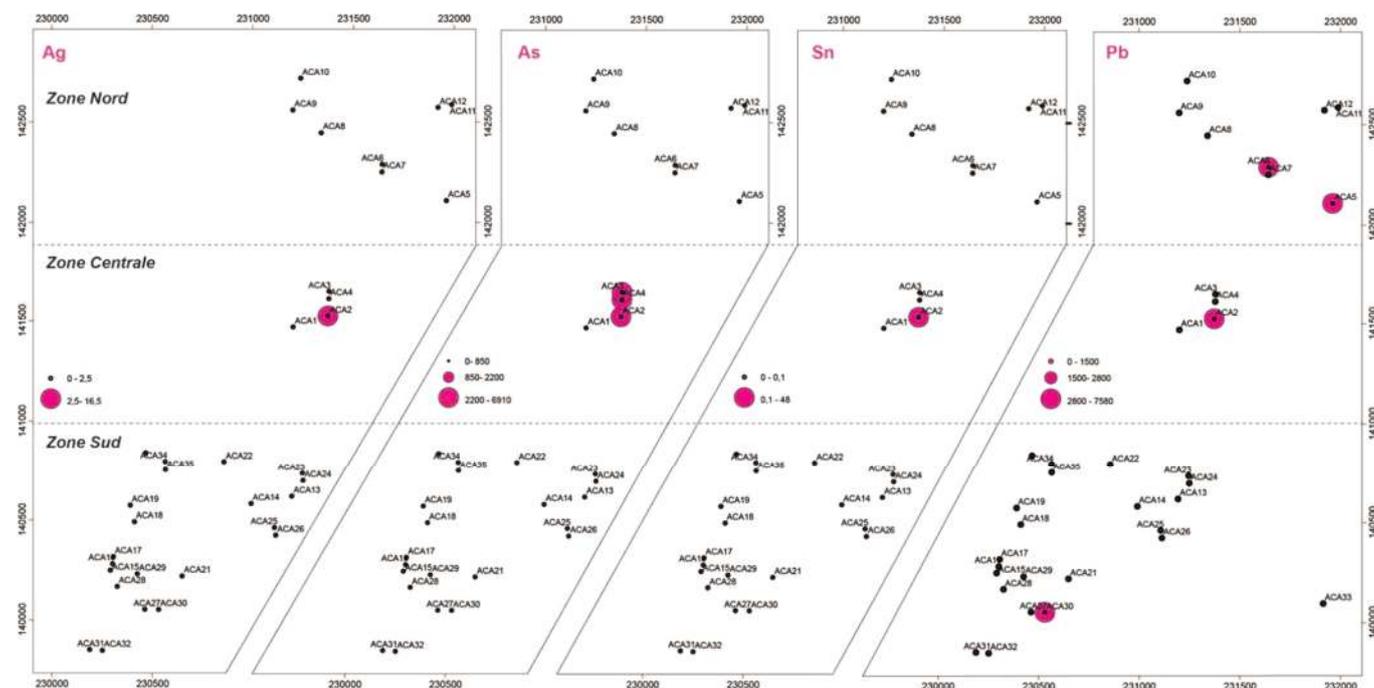


Fig. 8. Cartographie géochimique de la dispersion des éléments de chapeau de fer analysés

7 DISCUSSION

Cette étude constitue l'une des applications de la géochimie des chapeaux de fer à l'évaluation du potentiel minéral du secteur de Koudiat Aïcha. Le fait de concentrer l'échantillonnage près du secteur du gisement de Koudiat Aïcha est intéressant pour dégager des guides de prospection locale au voisinage et au contact immédiat de l'emplacement du gisement, et d'étendre les résultats sur l'ensemble des Jebilet Centrales.

Au niveau du secteur de Koudiat Aïcha, la minéralisation sulfurée est marquée à affleurement par le développement de chapeaux de fer bien individualisés. Ces derniers constituent les cibles pour l'exploration géochimique ayant menés à la découverte de nombreux gisements minéralisés [50].

Les conclusions tirées de la statistique classique et celles déduites des variogrammes concordent assez bien. Le caractère unimodal homogène pour l'ensemble des éléments traduit l'appartenance à la même population et par conséquent au même cycle minéralisateur. Il suffit d'analyser les échantillons pour l'élément recherché en association avec quelques minéraux indicateurs. Tout autre élément qui fait augmenter les coûts et sans information géochimique est inutile à analyser. Cette opération va permettre d'optimiser les coûts inhérents à l'amont pour un tel projet par la diminution du nombre d'éléments à analyser et d'augmenter le nombre d'échantillons suffisants pour obtenir une confiance statistique valable.

Les résultats des éléments analysés du chapeau de fer du secteur du gisement de Koudiat Aïcha ont servi pour tracer les cartes de symboles gradués des différents éléments (Fig. 8) en tenant compte avec les valeurs locales du bruit de fond et anomalies pour chaque élément analysé. Les valeurs élevées du bruit de fond des chapeaux de fer dans le secteur ont été attribuées au caractère minéralisé de la roche mère formant le protore encaissé dans les roches sédimentaires du gisement de Koudiat Aïcha, ainsi qu'au caractère mobile de certains éléments chimiques (Cu-Zn) et à l'absence de roches actives.

En tenant compte des résultats des traitements statistiques, la zone centrale montre un intérêt pour la prospection des amas sulfurés. Les cartes ainsi que l'emplacement des anomalies d'Ag-As-Pb-Sn combinées marquent bien leur parfaite superposition parallèlement aux tracés de l'emplacement du gisement de Koudiat Aïcha. La projection du contour du corps minéralisé déduit à partir de la modélisation combinée des données géophysiques (magnétiques, et gravimétriques) et depuis l'interprétation des sondages carottés, coïncide parfaitement avec la zone centrale à chapeau de fer le long d'axe NS et les anomalies produites par les éléments Ag, As, Pb et Sn des échantillons ACA2 à ACA4 (Fig. 2). Seul l'échantillon ACA2 présente une anomalie en Sn. Cet enrichissement en Sn traduit la présence de la stannite dans le protore polymétallique.

L'anomalie de Bi (ACA1) bien localisée et plus enrichie localement a été considérée comme un bon indicateur des zones nourricières «stockworks» des gisements de sulfures massifs de la ceinture ibérique pyriteuse IPB [51]. Les zones nourricières

matérialisent généralement la zone d'échange située à la base des corps minéralisés à sulfures massifs volcanogènes (VMS) et qui contiennent les minerais de bismuth et de cobalt [51]. Ce dernier constat a permis de mieux distinguer les veinules de sulfure appartenant aux zones de stockwork des gisements sulfures massifs et les veinules de nature ambiguë, et fournit des critères chimiques de la proximité aux zones de stockwork liées au corps minéralisé. A partir de ces résultats, on déduit que les anomalies produites par le As, Ag, Pb et Sn correspondent à l'anomalie produite par le corps minéralisé tandis que celle produite par le Bi correspondent à la zone de stockwork du gisement de Kouadiat Aïcha ayant été détaché, déformé et transposé sous l'effet de la déformation hercynienne le long de la zone minéralisée [52]. Cependant les autres éléments analysés tel que l'Cu, Mo, Ni, Te, et Zn ne montrent pas de bonne corrélation avec les anomalies produites par le Ag, As, Bi, Sn et le Pb au niveau de la zone minéralisée. Ces éléments traduisent une grande mobilité et un enrichissement dans la zone de cémentation dans les environnements semblables, et marquent une dispersion variable et ne peuvent pas être considérés comme éléments indicateurs dans le secteur du gisement de Kouadiat Aïcha ainsi que dans les cas similaires encaissés dans la province métallogénique des Jebilet centrales.

8 CONCLUSION

La plupart des découvertes historiques des gisements de VMS polymétalliques sont à la base de localisation de veines à l'affleurement suivies des opérations de décapage descendant des déclin réguliers le long de la veine.

L'exploration récente est basée sur les méthodes géophysiques et géochimiques ainsi que sur l'analyse des minéraux lourds et les terres rares.

Cette exploration est basée sur la géochimie des chapeaux de fer, a montré son importance et sa grande utilité dans le but de cibler et de localiser les potentialités métallifères comme dans le prospect de Kouadiat Aïcha du grand secteur de Kettara. L'étude a cependant montré que les chapeaux de fer associés au même système hydrothermal, présente une forte corrélation entre Ag, As, Sn et Pb. Les chapeaux de fer les plus éloignés, non économiques se caractérisent par de très faibles corrélations en ces éléments. Les anomalies géochimiques produites par les éléments tels que l'Ag, As, Sn et Pb marquent bien l'appartenance au gisement encaissé en profondeur.

Cette constatation a été renforcée par les méthodes géophysiques (magnétiques, gravimétriques) et confirmé par les sondages carottés ayant intercepté en plus des unités lithologiques connues à l'affleurement le corps minéralisé en profondeur. Cependant, l'anomalie de Bi illustre bien la zone nourricière et d'échange au-dessous du corps minéralisé, et pourraient refléter l'appartenance des veines au même système hydrothermal ayant déposé le gisement. On conclut et à partir des éléments analysés que les éléments Ag, As, Bi, Sn sont les plus favorables pour localiser un dépôt de sulfures polymétallique dans ce contexte des Jebilet Centrales.

En dépit de l'abondance très basse des éléments de Ag, As, Bi, Sn dans les chapeaux de fer du secteur, ces éléments pourraient être employés comme étant de bons éléments indicateurs localisées à la proximité de la minéralisation au cours de l'exploration des minéralisations sulfurées similaires dans les Jebilet centrales et Guemassa, voir son extrapolation vers l'ensemble des terrains hercynien.

REFERENCES

- [1] E., Çiftçi, H. S. Kolayli, & S. Tokel, "Lead-arsenic soil geochemical study as an exploration guide over the Killik volcanogenic massive sulfide deposit, Northeastern Turkey," *Journal of Geochemical Exploration*. 86, 49–59, 2005.
- [2] A. Atapour, & A. Aftabi, "The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: Implications for exploration and the environment," *Journal of Geochemical Exploration* 93(1):47-65, 2006.
- [3] A.A. "Levinson, Introduction to exploration geochemistry applied publishing Ltda,". 600p. 1980.
- [4] A. Piqué, & A. Michard, "Moroccan Hercynides. A synopsis. The Paleozoic sedimentary and tectonic evolution at the northern margin of West Africa". *Amer. J. Science* 29, 286-330, 1989.
- [5] J. Fabre, "Structure de l'Algérie saharienne. Eléments pour une carte tectonique," *Bull. Serv. Géol., Algérie, Nouvelle série, V. 41, 161-185, 1971.*
- [6] M. Leblan & J. R. Lancerot, "Interprétation géodynamique du domaine panafricain (précambrien terminal de l'Anti-Atlas (Maroc) à partir des données géologiques et géochronologiques," *Jour. Can. Sci. Terre*, V. 17, p. 142-155, 1980.
- [7] A. Michard, "Eléments de géologie marocaine," *Notes et Mém. Serv. géol. Maroc*, n° 252, 420 p., 1976.
- [8] A. Piqué, & A. Michard, "Les zones structurales du Maroc hercynien," *Sci. Géol. Bull., Vol. 34, Strasbourg. 135-146, 1981.*
- [9] P. Huvelin, "Relation entre les granitisations hercyniennes majeurs dans les Jebilets : comparaisons avec Oulmès," Rapport E.G.M. N° 967. Rabat, 1975.

- [10] P. Huvelin, "Etude géologique et gîtologique du massif Hercynien des Jebilet (Maroc Occidental)," *Note et Mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat, N° 232 bis, 307 p.*, 1977.
- [11] F. Permingeat, "Sur viséen des Jebilet orientales au sud de l'oued Tensift," *Notes et mem. Serv. Géol. Maroc. 121, 17-22*, 1954.
- [12] H. Bamoumen, "Les déformations superposées contemporaines de la mise en place des nappes gravitaires des Jebilet orientales (Maroc)," Thèse de 3ème cycle, Marrakech, 189p., 1988.
- [13] M. Gigout, "*Etude géologique sur la meseta marocaine occidentale (arrière pays de CasaBlanca, Mazagan et Safi)*," *Trav. Inst. Cher. Rabat. 3. Notes et Mem. Serv. Géol. Maroc, 86 : 507 p.*, 1951.
- [14] J. "Beauchamp, Le Carbonifère inférieur des Jebilet et de l'Atlas de Marrakech (Maroc) : Migration et comblement d'un bassin marin," *Bulletin Société Géologique de France 7-XXVI-6, 1025-1032*, 1984.
- [15] A. Piqué, "Géologie du Maroc. Les domaines régionaux et leur évolution structurale". Presses Universitaires Maghrébines Edition, 284 p. Marrakech, 1994.
- [16] J.L. Gaillet, "Sur les relations entre les schistes du saghlef et le flysh de Kharrouba dans le massif hercynien des jebilets (Maroc)," *C.R. Acad. Sci. Paris*, 288, pp. 791-794, 1979.
- [17] M. Bordonaro, "Tectonique et pétrographie du district à pyrrhotine de Kettara (Paléozoïque des Jebilets, Maroc)". Thèse de 3ème cycle Université Louis Pasteur de Strasbourg, 132pp, 1983.
- [18] El.M. Aarab, *Mise en place du caractère cogénétique des roches magmatiques basiques et acides dans la série volcanosédimentaire de Saghlef (Jebilet, Maroc hercynien)*. Thèse Doctorat de 3ème cycle, Univ. Nancy I 145 p. 1984.
- [19] El.M. Aarab, "Genèse et différenciation d'un magma tholeiitique en domaine extensif intracontinental : l'exemple du magmatisme pré-orogénique des Jebilet (Maroc Hercynien)," Thèse Doctorat d'état. Univ. Cadi Ayyad Marrakech, 253p, 1995.
- [20] M. Jadid, "Etude des processus de différenciation des roches magmatiques préorogéniques des Jebilet centrales sur l'exemple du massif stratiforme de Koudiat Kettara (Maroc hercynien). Thèse de 3ème cycle, Marrakech, 215p. 1989.
- [21] H. Admou, "Etude de la déformation synschisteuse dans le secteur Est de Jebel Sarhlef (Jebilet centrales)," *Mém C. E. A. Univ, Marrakech*, 1986.
- [22] N. Saber, *Etude pétrographique et structurale du massif de Kaddour Labdi (Jebilet centrales)*. Mem. C.E.A. Univ, Marrakech, 1986.
- [23] M. Ait Tahar, *Géométrie et cinématique de la déformation post viséenne autour des gabbros des Jebilet*. Thèse de 3ème cycle, 144 p., Université de Marrakech, Maroc, 1987.
- [24] A. Essaifi, "Le magmatisme acide basique des Jebilet centrales (Maroc). Ses relations avec la déformation hercynienne synschisteuse. Implications géodynamiques," Thèse de 3ème cycle Marrakech, 152p, 1989.
- [25] A. Essaifi, "Relation entre magmatisme, déformation et altération hydrothermale. L'exemple des Jebilet centrales (hercynien, Maroc)," Thèse d'Etat es sciences, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, 331p, 1995.
- [26] J.L. Lagarde & P. Choukroune, "Cisaillement ductile et granitoïdes syntectoniques: l'exemple du massif hercynien des Jebilet (Maroc)," *Bulletin de la Société Géologique de France, XXIV2, 299-307*, 1982.
- [27] Cl. Le Corre, & J. Bouloton, "Un modèle de «structures en fleur» associant décrochement et convergence: Les Jebilets centro-occidentales (Maroc hercynien)," *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris*, 304, série II: 751-755, 1987.
- [28] Z. Mrini, "Age et origine des granites hercyniens du Maroc, apport de la géochronologie et de la géochimie isotopique (Sr, Nb, Pb)," Thèse, Uni. Clermont Ferrand II, 156p. 1985.
- [29] Z. Mrini, "Chronologie (Rb-Sr, U-Pb), traçage isotopique (Sr-Nb-Pb) des sources des roches magmatiques éburnéennes, panafricaines et hercyniennes du Maroc," Thèse d'Etat, Uni. Cadi Ayyad, Marrakech, 198 p. 1993.
- [30] R. El Mouraouah, "*Mise en évidence du caractère lamprophyrique des filons Tardihercyniens des Jebilet: Implication petrogénétique*," Thèse de 3ème cycle, Marrakech, 104p, 1992.
- [31] A. El Harti, "*Mode de gisement, étude structurale et contexte de mise en place des corps magmatiques preorogéniques des Jebilet centrales. Sur l'exemple des intrusions de Koudiat Kettara (Maroc Hercynien)*," Thèse de 3ème cycle, Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia, Marrakech, Maroc, 142 p, 1995.
- [32] J.L. Lagarde. & P. Choukroune, "Cisaillement ductile et granitoïdes syntectoniques: l'exemple du massif hercynien des Jebilet (Maroc)," *Bulletin de la Société Géologique de France, XXIV2, 299-307*, 1982.
- [33] J.L. Lagarde, "Les plutons granitiques hercyniens marqueurs de la déformation crustale. L'exemple de la Meseta," Thèse d'Etat es Sci. Université de Rennes, France, 371 pp, 1989.
- [34] A. Chemsseddoha, "Cisaillement ductile et granite syntectoniques dans les Jebilet centrales: l'exemple du pluton hercynien (Massif des Jebilet, Meseta Sudmarocaine)," *Thèse 3ème cycle, Univ. Rennes I, 155p*, 1986.
- [35] C. Le Corre, & A. Saquaque, "Comportement d'un système pluton-encaissant dans un champ de déformation régional:

- le granite du Bramram (Jebilet, Maroc hercynien)" *Bull. Soc. géol. France*, (8), t. III, n° 4, pp. 665-673, 1987.
- [36] H. Hollard, "Recherches sur la stratigraphie des Formations du Dévonien Moyen, de l'Emsien Supérieur au Franien, dans le Sud du Tafilalt et dans le Ma'der (Anti-Atlas oriental)," *Notes du Service Géologique du Maroc*, v. 36(264), p. 7-68, 1974.
- [37] F. Kharbouch, "Les laves dévono-dinantiennes de la meseta marocaine. Etude petrogéochimique et implication géodynamique," Thèse d'Etat, Uni. Bretagne, 336 p 1994.
- [38] M. Bordonaro, J.L. Gaillet & A. Michard, "Le géosynclinal carbonifère sud-mésétien dans les Jebilet (Maroc) ; une corrélation avec la province pyriteuse du sud de l'Espagne," *CR Acad Sci Paris 288-D*, 1371-1374, 1979.
- [39] A.J. Bernard, O.W. Maier, & A. Mellal, "Aperçu sur les amas sulfurés massifs des hercynides marocaines," *Mineralium Deposita* 23, 104-114, 1988.
- [40] J. Beauchamp, A. Izart, & A. Piqué, "Les bassins d'avant-pays de la chaîne hercynienne au Carbonifère inférieur," *Canadien Journal of Earth Sciences* 28, 2024-2041, 1991.
- [41] M. Hibti, "Les amas sulfurés des Guemassa et des Jebilet (Meseta Sud-Occidentale, Maroc) : Temoins de l'hydrothermalisme précoce dans le bassin mesetien". Thèse de Doctorat d'Etat Es-Sciences.Unv. Marrakech, 301 p, 2001.
- [42] S. Brunet F. Lotfi & A. Belkabar, "Les gisements de sulfures massifs hercyniens du Maroc : Exemple du gîte polymétallique de Koudiat Aïcha, Jebilet Centrales. *Actes du congrès The 3rd Conference of the Association of African Women Geoscientists* 6-8 Mai 2005, El Jadida – Maroc, 2006.
- [43] A. Belkabar, H. Gibson, E. Marcoux, D. Lentz, & S. Rziki, "Geology and Wall-Rock Alteration at the Hercynian Draa Sfar Zn-Pb-Cu deposit, Morocco," *Ore Geology Reviews* 658, 33. 3-4, 280-306, 2008.
- [44] L. Ben Aissi, "Contribution à l'étude géologique des amas sulfurés polymétalliques de Draa Sfar et de Koudiat Aïcha : comparaison avec les gisements de Ben Slimane et de Kettara (Jebilet centrales, Maroc hercynien)," Thèse de doctorat, Uni Cadi Ayyad, Marrakech, 333 p, 2008.
- [45] E. Marcoux, A. Belkabar, H. Gibson, & D. Lentz, "The Draa Sfar ore deposit (Jebilet, Morocco): an example of pyrrhotite dominant-polymetallic VHMS in Hercynian terranes," *Ore Geology*, 658. 33. 3-4, 304-328, 2008.
- [46] F. Lotfi, A. Belkabar; A.C. Brown, E. Marcoux, & S. Brunet, "Geology and mineralogy of the Hercynian Koudiat Aïcha polymetallic (Zn, Pb, Cu) massive sulfide deposit, Central Jebilet, Morocco," *Exploration and Mining Geology*, 17, Nos. 3-4 : 45-162, 2008.
- [47] F. Lotfi, "Utilisation de la géochimie des minéraux d'altération hydrothermale comme guide de prospection des massifs sulfurés volcanogènes (VMS) polymétalliques : cas du gisement de Koudiat Aïcha (Pb, Zn, Cu), Jebilet Centrales – Maroc," Actes des journées géologiques, Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Rabat, 2016.
- [48] F. Lotfi, "Contexte géologique et minéralisation à sulfures massifs (Zn, Pb, Cu) du gisement hercynien de Koudiat Aïcha, Jebilet Centrales, Maroc," PhD Thésis, Université Cadi Ayyad Marrakech, 180 pp, 2009.
- [49] F. Lotfi, "Utilisation des chapeaux de fer comme guide de prospection des amas sulfurés : cas du gisement polymétallique de Koudiat Aïcha, Jebilet Centrales Maroc," In: *recueil des résumés, Actes du Colloque international 3MA Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées, 9^{ème} édition Taroudant – Agadir, le 02 au 04 avril*, 2015.
- [50] A. Habibeh, & A. Alijan, "The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: Implications for exploration and the environment," *Journal of Geochemical Exploration*. 93, 47-65, 2007.
- [51] E. Marcoux, Y. Moëlo, & J.M. Leistel, "Bismuth and cobalt minerals as indicators of stringer zones to massive sulphide deposits, iberian pyrite belt," *Mineralium Deposita*. 31 (1-2) : 1-26, 1996.
- [52] D.F., Sangster, "Precambrian volcanogenic massive sulfide deposits in Canada", *A review. Geological Survey of Canada*, Paper 72-22, 43 p. 1972.