

Apport de la géochimie des chapeaux de fer à la prospection des amas sulfurés volcanogènes des Jebilets centrales, Maroc

[Contribution of the geochemistry of the gossan to the prospection of volcanogenic sulphide deposits of Central Jebilets, Morocco]

Fouad Lotfi¹, M. Sohassou¹, Z. E. A. Morjani¹, A. Saad¹, S. Brunet², M. Chaïb³, and A. El Mimouni⁴

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

²Managen, Casablanca, Morocco

³ONHYM, 5, Avenue Moulay Hassan, Rabat, Morocco

⁴Laboratoire de Géosciences et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques-Guéliz, BP 549, Marrakech, Morocco

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 are occupied by the Saghlef series attributed to the upper Visean, are materialized by a predominance of the gossans, some of which directly cover massive sulphide predominantly pyrrhotite. These gossan with oxides and hydroxides of iron can be distinguished from East to West in three main plurikilometric axes sub-parallel to the meridian direction. The present study is concerned with the interpretation of geochemical data covering all Central Jebilets gossans. The analyzed elements such as Ag, As, Bi, Sn, Mo and Te, in addition to the base metals researched, made it possible to classify these gossans into three classes: 1) very promising class contains the Draa sfar and Koudiat Aïcha deposits, 2) moderately promising class includes the Kettra deposit and Ben Slimane and Lachach indices, 3) and the least promising class contains the rest of the sites. These chemical elements can be used as a basic prospecting guide for gossan in Central Jebilets province and extrapolate these results to all Hercynian lands.

KEYWORDS: Central Jebilets, Gossan, geochemical exploration, base metal.

RÉSUMÉ: Les Jebilets centrales sont occupées par la série de Saghlef attribuée au viséen supérieur, sont matérialisées par une prédominance à l'affleurement des chapeaux de fer dont certains coiffent directement des amas sulfurés à prédominance de pyrrhotite. Ces chapeaux de fer à oxydes et hydroxydes de fer, peuvent se distinguer d'Est en Ouest en trois principaux axes plurikilométriques sub-parallèles à la direction méridienne. Le présent travail porte sur l'interprétation des données géochimiques couvrant l'ensemble des chapeaux de fer des Jebilets centrales. Les éléments analysés tel que Ag, As, Bi, Sn, Mo et Te en plus des métaux de base recherchés, ont permis de bien ranger ces chapeaux de fer en trois classes: 1) Classe très prometteuse renferme les gisement de Draa sfar et Koudiat Aïcha, 2) Classe moyennement prometteuse englobe le gisement de Kettra et les indices de Ben Slimane et Lachach, 3) et la classe la moins prometteuse contient le reste des sites. Ces éléments chimiques peuvent être employés comme guide de prospection de base des chapeaux de fer dans la province des Jebilets centrales et d'extrapoler ces résultats vers l'ensemble des terrains hercyniens.

MOTS-CLEFS: Jebilets centrales, chapeau de fer, exploration géochimique, métaux de base.

1 INTRODUCTION

Dans un contexte où la plupart des gisements de surface ont été exploités, il devient crucial, afin de cibler de futures zones potentielles, de mieux comprendre l'architecture et la genèse des sites miniers. Cependant dans un champ aussi bien connu que celui des Jebilettes centrales, de nouvelles découvertes demandent des analyses et des interprétations de plus en plus poussées pour lesquelles les observations de surface ne suffisent pas.

En effet, les gisements de type VMS, tant qu'une origine hydrothermale, ce type de gisement est souvent accompagné d'une forte zone d'altération aux alentours. Des altérations en chlorite, en séricite peuvent ainsi être observées mais également des altérations ferrugineuses et développement de chapeaux de fer à l'affleurement [1]. La présence des minéraux d'oxyde et d'hydroxyde de fer rend l'utilisation des méthodes géochimiques très pertinentes. De plus, les sulfures métalliques à prédominance pyrrhotitique qui constituent ce type de gisements recherchés dans la province des Jebilettes centrales ont une densité et une conductivité électrique beaucoup plus élevée que les roches ignées encaissantes, peuvent être détectés par un simple levé magnétique, compte tenu de la forte susceptibilité de ce minéral. Cependant, avant d'effectuer de coûteux levés géophysiques, et des sondages carottés par la suite, il est important de savoir en exploration minière si les différentes lithologies présentent des données géochimiques intéressantes et discriminatoires que l'on pourra par la suite exploiter pour choisir les méthodes de prospection ultérieures qui conviennent le mieux à notre cas d'étude.

Les objectifs fixés sont donc de confirmer ou d'infirmer les observations géologiques de surface, d'évaluer leurs pertinences en profondeur par la géologie et la géochimie actuellement et si possible de déterminer des cibles ou des anomalies clés pour l'exploration minière. Cette démarche permettra la compréhension du champ dans son ensemble compte tenu de l'ensemble des données accumulées au cours de la prospection des amas sulfurés de la province.

Ce thème de recherche a pour but d'établir les relations de prospection entre les chapeaux de fer prometteurs et les amas sulfurés enfouis dans leurs contextes géologiques. L'idée de départ est qu'un chapeau de fer étant une altération météorique d'une extraordinaire accumulation en un point et en un temps donné des mêmes éléments de soufre, fer et métaux de base, issus de fluides hydrothermaux sur ou au-dessous du plancher sous-marin dans un milieu anoxique et faible fugacité en O_2 . Le résultat de cette altération météorique pourra garder l'empreinte minéralogique et la nature des éléments chimiques contenus au sein de la minéralisation primaire tout en tenant compte de leur degré de mobilité, et contribuer à déterminer la qualité du corps minéralisé en profondeur.

2 HISTORIQUE ET CADRE DE LA PROSPECTION

Les véritables recherches des amas sulfurés remontent au début du siècle dernier. Elles avaient pour but essentiel la recherche de minerai sulfuré source de soufre et de métaux de base. Le B.R.P.M (Bureau de Recherche et de Participation Minière), actuellement L'ONHYM (Office National des Hydrocarbures et des Mines) avait entrepris la reconnaissance des gisements de pyrrhotine des Jebilettes centrales. Il a été chargé de la mise en valeur du gisement Kettara à pyrrhotine. Cette dernière a constitué la matière première de soufre destinée à alimenter le complexe chimique de Safi qui traitait le soufre pour la fabrication de l'acide sulfurique H_2SO_4 et l'enrichissement des phosphates qui comporte un intérêt majeur pour l'Office Chérifien des Phosphates (O.C.P). En effet, le BRPM a entrepris des recherches systématiques, en premier lieu à l'intérieur du domaine minier de Kettara, ensuite à l'extérieur visant tous les indices ferrugineux (Draa Sfar, J. Ahmar, J. Sarhlef et autres). Ces recherches étaient pour but d'une part d'augmenter le tonnage de pyrrhotine de Kettara (11 MT démontrées), et d'autre part, de découvrir des gisements analogues, mais si possible plus riches en Cu ($> 0,7\%$ Cu) et même riche en métaux de base.

De ce fait là, les recherches à Draa Sfar (Sidi Mbarek et Tzakourt) et à Koudiat Aïcha -Lachach avaient prouvé cette possibilité de renfermer un véritable minerai polymétallique dans une paragenèse à pyrrhotine actuellement exploitée à Draa Sfar. Comme ces métaux de base, plus intéressants que le fer et le soufre, ne se dénotaient guère en affleurement, une recherche systématique de tous les chapeaux de fer même de petites dimensions s'imposait dans le but de découvrir de tels gisements à minéralisation polymétallique (Pb-Zn-Cu) analogue à celui de Draa Sfar et Koudiat Aïcha.

3 GÉOLOGIE RÉGIONALE

3.1 LES DOMAINES STRUCTURAUX DU MAROC

Le Maroc se situe au coin nord-ouest de la plateforme saharienne (Fig. 1a). Il est entouré par les plaques mobiles de la mer méditerranéenne au Nord et l'océan atlantique à l'Ouest. Son histoire géologique est polyphasée, et marquée par la succession des cycles orogéniques précambrien, hercynien et atlasique. Ces derniers sont responsables de la configuration structurale actuelle, et ont permis une subdivision en cinq domaines d'importances inégales [2]:

- Le domaine *Saharien* ou dorsale des Reguibates constitué essentiellement de terrains du protérozoïque inférieur, structurés par l'orogénèse Eburnéenne (2000 Ma) [3].
- Le domaine *Anti-Atlasique* est formé d'un socle précambrien façonné par l'orogénèse panafricaine (680-570 Ma) [4]. Sa couverture protérozoïque terminale et paléozoïque est affectée par une déformation hercynienne relativement modérée.
- Le domaine *Atlasique* correspond à la chaîne intracontinentale du Moyen-Atlas et du Haut-Atlas formée par des terrains mésozoïques et cénozoïques structurés par l'orogénèse Atlasique (Jurassique supérieur et phases de plissements tertiaires).
- Le domaine *Rifain* qui constitue une partie de la chaîne alpine est caractérisé par un empilement de nappes de charriages à vergence principale sud.
- Le domaine *Mésétien* qui représente la chaîne hercynienne plissée est formé par des massifs paléozoïques discontinus affleurant au sein d'une couverture mésozoïque et cénozoïque non déformées [5].

3.2 DOMAINE MÉSETIEN

Le domaine mésétien regroupe deux grandes provinces qu'on désigne par Méseta orientale (Méseta oranaise) et Méseta occidentale (Méseta Marocaine). Il est subdivisé en six zones structurales [5], [6] :

- La *zone orientale* qui correspond à l'ensemble de la Méseta oranaise est constituée d'affleurements de schistes du paléozoïque inférieur et de flyschs dévoniens.
- La *zone de transition* appelée aussi « zone de nappes » est représentée par la partie orientale du Maroc central formée par des bassins viséens [5].
- La *zone centrale* est représentée par les massifs des Rehamna oriental, Jebilets centrales, Guemassa, la majeure partie du massif central et les boutonnières paléozoïques du Haut Atlas occidental.
- La *zone occidentale* correspond aux parties ouest de la Méseta côtière nord-occidentale, des Rehamna et des Jebilets.
- La *zone Sud* ou avant pays saharien se situe au Sud de l'accident sud-atlasique et s'étend jusqu'à la plateforme saharienne en bordure du craton ouest africain.
- La *zone Nord* ou bloc de Sehoul est formée des terrains paléozoïques situés au Nord de la Méseta Centrale et limités au Sud par l'accident Rabat-Tifelt.

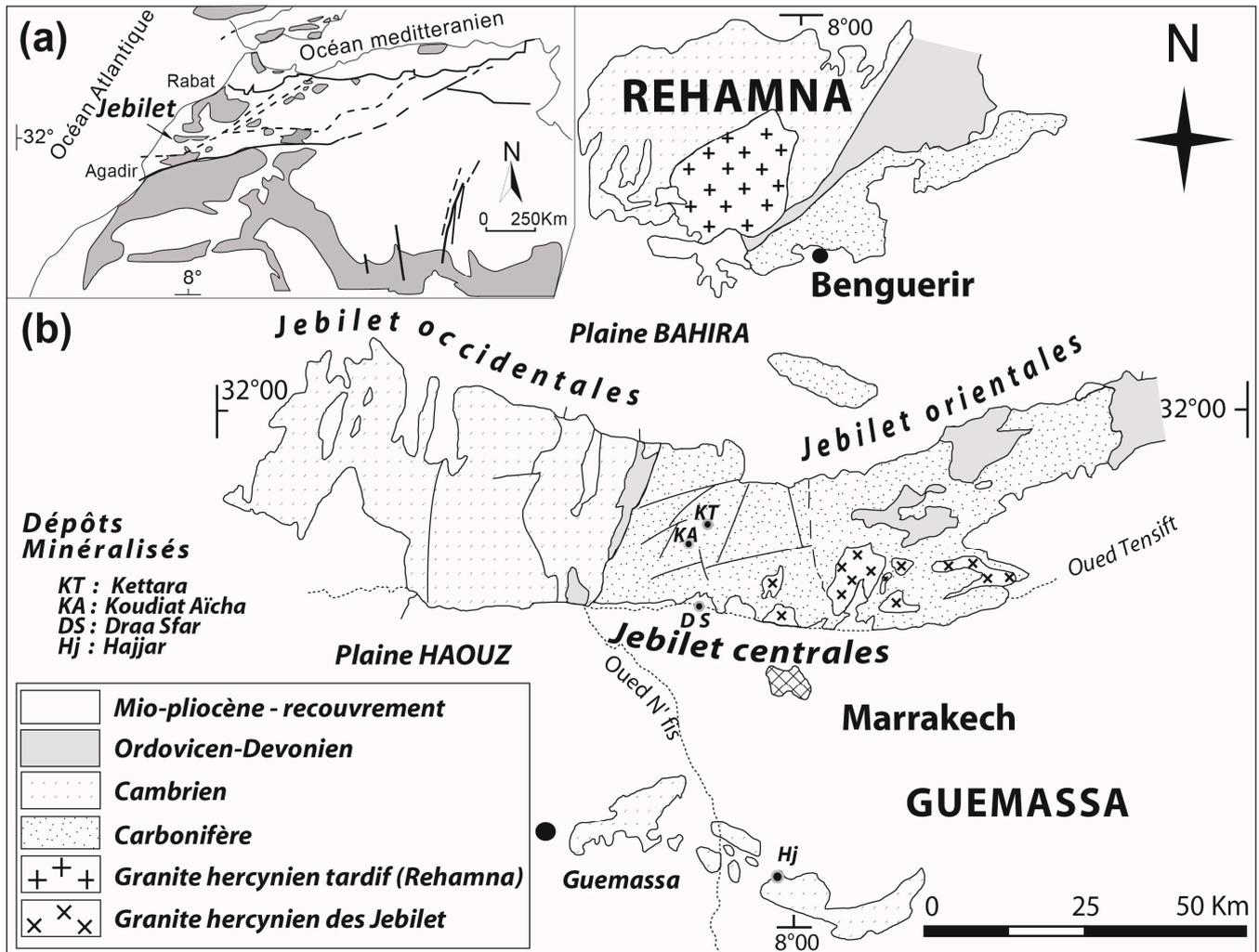


Fig. 1. (a) Situation géographique du massif des Jebilet dans le Maroc hercynien, (b) Esquisse géologique des massifs hercyniens du Maroc : Rehamna, Jebilet et Guemassa

3.3 PLACE DU MASSIF DES JEBILETS DANS LE BÂTI HERCYNIEN DU MAROC

Le massif hercynien des Jebilets (Jebilet, Djebilets) ou "petites montagnes", constitue un pays de collines d'accès facile, voisin des côtes du Maroc et des grands itinéraires. Il est localisé dans le Maroc occidental, renferme un ensemble de collines rocheuses et de plaines, constituées de terrains paléozoïques plissés en direction N-S, qui s'étendent au Nord de Marrakech sur 170 km environ d'Ouest en Est et sur 7 à 40 km du Nord au Sud, montrent une superficie d'environ 3800 km² entre les longitudes 7°W et 8°50'W et les latitudes 31°45'N et 32°05'N.

Le massif des Jebilets, est parallèle à celui du Haut-Atlas de Marrakech, est encadré par la plaine de la Bahira au Nord de la plaine du Haouz (ou plaine de Marrakech) au Sud, les collines de Jurassique-Crétacé des Mouissat à l'Ouest et les montagnes de l'Atlas de Beni Mellal à l'Est (Fig.1b). Il appartient à la dorsale marocaine ou promontoire africain, haut fond de terrains anciens. Ce massif constitue l'une des aires où affleure largement au Maroc le socle paléozoïque fortement affecté par l'orogénèse hercynienne. Selon des critères géologiques, structurales et géomorphologiques le massif des Jebilets a été subdivisé en trois unités distinctes [7] (Fig. 1b) :

- *Unité orientale*, constituée de méta-sédiments d'âges Viséen supérieur (Les flysch de Kharouba).
- *Unité centrale*, composée des schistes de Sarhlef attribués au Viséen supérieur- Namurien.
- *Unité occidentale*, formée essentiellement de séries cambro-ordoviciennes.

C'est cette partie centrale qui intéresse notre étude, puisque cette série dont les formations volcano-sédimentaires dévono-dinantiennes qui encaissent les amas minéralisés exploités à Kettara, en cours d'exploitation de Draa Sfar (Tazakourt et Sidi Mbarek), et en phase de développement de Koudiat Aïcha.

4 GÉOLOGIE LOCALE : LES JEBILETS CENTRALES

4.1 LITHOSTRATIGRAPHIE

L'unité centrale des Jebilets est principalement formée d'une entité volcano-sédimentaire désignée par série de Sarhlef (Fig. 2), datée du Viséen supérieur Namurien, elle est constituée de Shales fins à passés lenticulaires, de calcaire bioclastiques et de grès. Leur dépôt a été accompagné d'une activité volcanique pré-orogénique très intense [8], [9], [10], [11], qui se manifeste par des épanchements de laves acides et basiques, ainsi que par des cinérites, des jaspes et des tufs acides auxquels sont associées des minéralisations sulfurées connues dans les Jebilets centrales.

Stratigraphiquement, deux séries principales sont reconnues dans les Jebilets centrales [12]:

- Une série basale dite série de Sarhlef est constituée principalement de pélites et caractérisée par une activité volcanique qui débute par des manifestations laviques (brèches, tufs, etc.) et se poursuit par un volcanisme extrusif à caractères basiques (Viséen Supérieur-Namurien). Les minéralisations stratiformes sulfurées sont liées aux épisodes tardivolcaniques acides de la phase paroxysmale de la série de Sarhlef [9].
- Une série sommitale essentiellement carbonatée, appelée série de Teksim est formée de calcaires micro-conglomératiques et bioclastiques à la base et de pélites et grés au sommet (Viséen supérieur-Namurien).

4.2 STRUCTURATION DES JEBILETS CENTRALES

Les terrains carbonifères (schistes de Sarhlef) sont affectés par une intense déformation hercynienne caractérisée par une histoire tectono-métamorphique complexe. Toutefois, les caractéristiques structurales des Jebilets centrales sont le résultat de la succession de plusieurs événements tectoniques, enregistrés par la série de Sarhlef [8]:

- Mise en place de nappes de glissement d'âge Viséen supérieur après le dépôt des flysch de Kharouba,
- Plissement majeur post-Viséen caractérisé par des plis isoclinaux associés à une schistosité de flux ou une schistosité de fracture voire même de crénulations,
- Compression post-granite soulignée par des cisaillements et des remontées de magma acide,
- Distension postérieure à la granitisation responsable de la mise en place des filons microdioritiques et quartzo-carbonatés de direction E-W,
- Compression tardi-hercynienne.

4.3 MAGMATISME ET MÉTAMORPHISME

La fin du Carbonifère se traduit dans le massif des Jebilets par une intense activité magmatique (Fig. 2). Les Jebilets centrales, à l'encontre des parties occidentales et orientales, sont en effet lardées de roches magmatiques intrusives très variées [8], [9], [10] [11], [12], [13]. Cette activité magmatique des Jebilets centrales (série de Sarhlef) compte trois épisodes [8], [9], [14], [15], [16] :

- Magmatisme pré-tectonique : bimodal (2/3 basique, 1/3 acide) volcanique et plutonique, sous forme de coulées de laves acides et basique interstratifiées dans la série viséenne ou sous forme de plutons gabbroïques et kératophyriques,
- Magmatisme syn. à post tectonique : il est représenté par les granitoïdes hercyniens qui sont étroitement liés aux couloirs de cisaillements d'âges et des sources magmatiques variées,
- Magmatisme post-orogénique: correspond à la mise en place d'un faisceau de filons de micro-diorite, riches en enclaves d'origine crustale (Huvelin, 1977). Ces filons recoupent les granites orogéniques, ils sont issus d'un liquide initial basique d'affinité lamprophyrique.

Les terrains paléozoïques de la méseta occidentale ont été affectés par les cycles orogéniques aussi bien hercyniens qu'atlasiques. Au niveau du massif des Jebilets, l'orogénèse hercynienne paraît la mieux enregistrée. La faible profondeur du bassin de sédimentation des Jebilets n'a pas permis l'établissement de métamorphisme de type Barrow [7]. La structuration de la chaîne hercynienne durant la phase compressive a entraîné la réorganisation des grains parallèlement à la schistosité et aux plans de clivages ardoisiers. L'intensité du métamorphisme n'a pas dépassé le faciès de schiste vert à chlorite. Le métamorphisme a provoqué dans toute la région, dans les schistes à chlorite et à séricite et la transformation des grès en quartzite.

L'effet des flux thermiques est localement ressenti autour des intrusions de roches éruptives. Il se manifeste localement par l'apparition des faciès à schistes tachetés à biotite, voire des faciès cornés et tachetés, en particulier à proximité des intrusions basiques et des batholites acides syntectoniques [18].

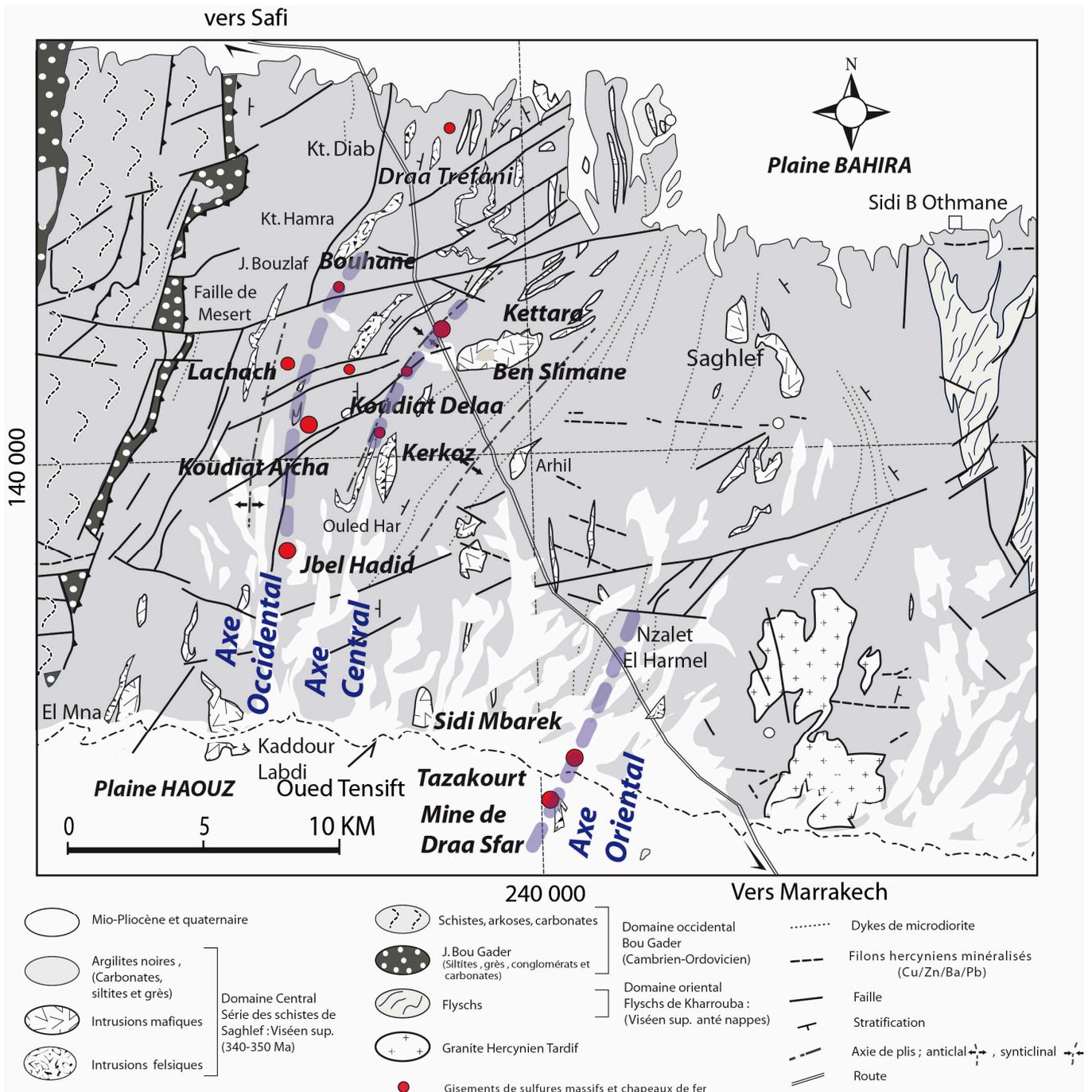


Fig. 2. Carte géologique simplifiée des Jebilet centrales et localisations des chapeaux de fer (Huvelin, 1977)

5 GÏTOLOGIE DES CHAPEAUX DE FER JEBILETS CENTRALES

5.1 DISPOSITION MINÉRALISATION DES DES JEBILETS CENTRALES

Dans cette région plus profondément érodée que celle de l'Atlas, et en ce qui concerne l'aspect gîtologique des Jebilet centrales, plusieurs catégories de gîtes ont été distinguées par Huvelin [8] (Fig. 2):

- les gîtes pré-hercyniens ou hercyniens : gîtes stratiformes du viséen supérieur et gîtes liés aux granites hercyniens,
- les gîtes pré-atlastiques : filons se mettant en place pendant les périodes de tectonique des blocs (ex.: filon du Sarhlef (Pb/Zn).

Seule la première catégorie des gisements qui répond à la thématique de prospection des amas sulfurés car elle est la seule à répondre à la problématique de la présente étude.

L'ensemble des chapeaux de fer connus dans les Jebilets centrales répertoriés par Huvelin [8] sous la dénomination lentilles de pyrrhotine s'organise, d'après, Bordonaro [9] selon deux niveaux stratigraphiques. L'un en liaison avec les tuffites du membre inférieur, l'autre avec les volcanites acides du membre supérieur :

D'un point de vue génétique, le niveau inférieur est considéré comme stratiforme et interstratifié dans les tuffites acides. Quant au niveau supérieur, Bordonaro le divise en deux sous-types:

- L'un directement en contact avec les volcanites dans le cas de Draa Sfar, et le magmatisme basique dans le cas du gisement de Koudiat Aïcha,
- L'autre, sans contact direct avec le volcanisme dans le cas de Kettara, Ben Slimane et Kerkoz, ou les amas seraient remobilisés par la tectonique et affleurent dans un encaissant étranger (série de Teksim à Kettara).

5.2 DISPOSITION DES MINÉRALISATIONS SULFURÉS ET LEURS CHAPEAUX DE FER

Les minéralisations sulfurées encaissées dans la série de Saghlef des Jebilets centrales affleurement en surface et présentent un chapeau de fer (gossan) bien développé. Ces derniers traduisent une nette association aux appareils magmatiques (Fig. 2). Ces chapeaux de fer montrent un tracé cartographique longiligne qui dépasse 20 km de long dans la mesure que l'on associe chapeau de fer, rubéfaction et altération ferrugineuse comme cela est le cas sur la carte de P. Huvelin [8] (Fig. 2). Pour ceci, un couloir ou axe minéralisé traduit l'alignement des chapeaux de fer et des schistes intensément rubéfiés. Dans les Jebilets centrales, les amas sulfurés peuvent se distinguer d'Est en Ouest en trois couloirs principaux plurikilométriques sub-parallèles à la direction méridienne (Fig. 2):

- Axe oriental : le couloir Draa Sfar - Nzalet El Harmel,
- Axe central : le couloir de Kerkoz - Ben Slimane - Kettara,
- Axe occidental: le couloir Jbel Hadid - Koudiat Aïcha – Lachach - Bouhane.

5.3 MINÉRALOGIE DES CHAPEAUX DE FER

A l'œil nu, les faciès de chapeau de fer montrent une absence totale de sulfures primaires. Dans ces faciès, la pyrrhotite qui constitue la principale composante du protore de l'ensemble des minéralisations des Jebilets centrales s'est en totalité désulfurée [18]. Ce minerai s'oxyde facilement à l'air libre et entraîne la formation de chapeaux de fer à l'affleurement. La pyrrhotite s'est transformée en oxydes et hydroxydes de fer (ocre). Cette altération chimique entraîne un lessivage et la migration de divers éléments chimiques mis en solution dans un milieu acide vers la profondeur "zone de cémentation" au-dessus du protore à pyrrhotine. La paragenèse minérale est formée principalement par l'hématite, magnétite, goethite et ocre.

Comme dans l'ensemble des chapeaux de fer des Jebilets centrales, des poches de goethite (prédominante) de dimensions variables sont isolées dans une masse d'hématite brune s'observant sur les parois d'anciens grattages (Kettara, Draa Sfar Koudiat Aïcha) [18]. L'observation microscopique a permis de constater que l'hématite constitue la phase dominante sous forme de plages xénomorphes qui se transforme depuis les bordures en goethite avec une texture en concrétion. Les minéraux résiduels peu abondants, sont présentés surtout par le quartz et plus rarement par la muscovite. L'établissement d'un ordre chronologique permet d'attribuer les oxydes et hydroxydes de fer à une transformation secondaire des sulfures primaires (altération chimique). La pyrrhotite s'est transformée en premier lieu en pyrite, en hématite en second lieu arrivant à la magnétite et la goethite et tardivement en minéraux argileux en phase finale.

6 GÉOCHIMIE DES CHAPEAUX DE FER

6.1 TRAITEMENT STATISTIQUES DES DONNÉES

Ce travail porte sur centaines d'analyses de quelques éléments chimiques ne peut se mener sans traitements statistiques. 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 empruntés depuis les anciens travaux [18]. En tout temps, nous nous sommes servis des données brutes, 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 de traitements univariés et à plusieurs variables ont été utilisées. Ces techniques dites exploratoires ont été utilisées dont le but est de faciliter la visualisation des données par l'utilisation de représentations graphiques adaptées sous une forme synthétique qui facilite leur interprétation.

6.2 STATISTIQUES ÉLÉMENTAIRES

Le but des analyses chimiques des échantillons de chapeau de fer était en plus de déterminer les teneurs de chaque éléments, 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 marquer des concentrations anormales pour certains éléments qui pourraient servir de guide pour la prospection minière.

La présente étude s'est fondée sur un total de 376 échantillons à 1748 analyses récupérées. Les analyses pris en considérations concernent un ensemble de sites répertoriés selon les trois axes minéralisés. Il s'agit des sites de Kettara, Ben Slimane, Kerkoz, Draa Tarfani, Koudiat Delaa, Jbel Hadid, Koudiat Aïcha, Lachach, Bouhane, Draa Sfar "Sidi Mbarek, et Tazakourt". Dans ce cas des chapeaux de fer, les éléments majeurs n'ont pas été pris en considération, de même que pour tous les éléments mineurs, du fait que leurs contenus était soit sous la limite de détection (intense lessivage), soit non analysés en totalité séparément dans chaque projet. En somme, cette approche de recherche tient à minimiser le nombre des éléments chimiques à analyser visons une approche des moyens facilement accessible pour toute opération de prospection minière (Spectromètre de FX (XRF) portatif). Les éléments considérés pour cette étude et analysés sont: Ag, As, Bi, Cu, Mo, Ni, Pb, Sn, Te et Zn.

Le tableau 1 présente quelques statistiques élémentaires pour les éléments analysés. Les résultats de ces éléments renferment des valeurs maximum relativement aux valeurs moyennes correspondantes pour chaque élément et pour chaque site minier de la province métallogénique des Jebilets centrales.

Les éléments tels que l'As, Cu, Pb Ni, et Zn présentent des étendues de plage de données assez important, témoignent de leur fort degré de rétention ainsi que la nature anormale du protore. 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. Les autres éléments présentent des valeurs minimum avec de faibles étendues et des écarts-type petits qui peuvent être attribués au fort degré de mobilité de ces éléments et au lessivage intense lors des actions météoriques.

Un calcul de l'indice de polymétallisme a été réalisé faisant ressortir la différenciation chimique des différents axes minéralisés. Les deux axes occidentale et orientale présentent des indices de polymétallisme plus différenciés par rapport à l'axe central. Dans cette optique, un calcul de cet indice a été réalisé pour chaque site des Jebilets centrales (Tabl. 2). Ce calcul à fait ressortir deux classes de chapeaux de fer. La première classe englobe le site de Sidi Mbarek (Draa Sfar Nord), Kettara, Ben Slimane, Koudiat Aïcha, et Lachach qui est considérée comme polymétallique. La seconde classe renferme les indices de Jbel hadid, Bouhane, Koudiat Delaa, Draa Trefani, et Kerkose ont été considéré comme moins polymétallique et ne peuvent pas être des chapeaux de fer prometteurs. L'indice polymétallique faible du site de Tazakourt (Draa Sfar Sud) en cours d'exploitation actuellement est dus au fait que les échantillons analysés ne coiffent pas directement le corps minéralisé polymétallique en profondeur et sont situés à l'est et l'ouest du corps magmatique volcanique du Draa Sfar.

Tableau 1. Statistique élémentaire des éléments traces analysés des chapeaux de fer de l'ensemble des chapeaux de fer des Jebilets centrales

élément	Ag	As	Bi	Cu	Mo	Ni	Pb	Sn	Te	Zn
Max	160	6910	380	23400	170	970	7580	100	98	15700
min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Moy	7,8	412,1	33,0	818,4	16,1	43,1	291,8	6,4	6,8	605,4
Ecartype	23,3	970,4	65,5	1612,5	29,8	122,4	906,9	17,2	16,3	1535,5

Tableau 2. Indice de polymétallisme de l'ensemble des chapeaux de fer des Jebilets centrales, (* indice calculé sur 3 éléments, ** indice calculé sur 7 éléments)

Site	Kettara	Ben Slimane	* Kerkoz	Kt. Delaa	Sidi Mbarek	Tazakourt	** Draa Tarfani	J. Hadid	Kt. Aïcha	Lachach	Bouhane	Axe Occidentale	Axe centrale	Axe orientale
Indice de polymétallisme	1,0	1,4	0,9	0,2	1,7	0,8	0,7	0,2	1,3	1,3	0,6	1,0	0,8	1,2

Les histogrammes de fréquence des différents éléments chimiques analysés sont illustrés par la figure 3. Ils traduisent le caractère unimodal homogène des résultats formés par une seule population. Ce caractère unimodal illustre la mise en place des minéralisations à la suite du même événement minéralisateur et à partir de la même source des métaux dans les mêmes conditions de dépôt dans le bassin des Jebilets centrales.

6.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Une première interprétation des résultats des analyses des chapeaux de fer a été basée sur l'utilisation des courbes gaussio-logarithmiques permettant de réduire l'asymétrie de la distribution des populations de données brutes. 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 brisée de trois segments de droite marquée par des points d'inflexions produites par le changement de pente de leur graphisme faisant ressortir trois domaines (bruit de fond, zone de transition et zone anomalique). L'exemple de ce type de distribution est représenté à la figure 4 pour l'ensemble des éléments chimiques analysés. Les résultats d'interprétation de distribution ont été reportés dans le tableau 3. Ces résultats serviront par la suite lors de l'interprétation des données de même à la réalisation cartes isovaleurs géochimiques.

Tableau 3. Limite de detection des anomalies du chapeau de fer des Jebilets centrales

Élément	Ag	As	Bi	Cu	Mo	Ni	Pb	Sn	Te	Zn
Bruit de fond	< 58	< 2000	< 120	< 7500	< 42	< 300	< 4500	< 25	< 45	< 5500
Zone de transition	58-120	2000-3000	120-220	7500-14000	42-65	300-550	4500-5500	25-40	25-80	5500-8000
Zone anomalique	> 120	> 3000	> 220	> 14000	> 65	> 550	> 5500	> 40	> 80	> 8000

6.4 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 des chapeaux de fer des Jebilets centrales, la méthode des cartes de symbolisation graduées a été adoptée compte tenu de la morphologie et la disposition des chapeaux de fer. Elle permet de visualiser rapidement les sites anomaliques tout en établissant une idée générale de la force des teneurs. Au cours de la réalisation des cartes, les résultats des traitements statistiques des courbes de distribution gaussio-logarithmique faisant ressortir l'individualisation des zones de bruit de fond, la zone de transition et la zone anomalique et ont été pris en considération. Dans notre cas, nous nous restreindrons à l'interpolation et l'extrapolation spatiale en deux dimensions. Dans un premier temps, les anomalies pour chaque élément chimique sur une carte distincte ont été localisées pour chaque site. En second lieu, les cartes obtenues ont été superposées de façon à faire ressortir les sites présentant des anomalies à plusieurs éléments.

Les cartes des éléments contenus dans les chapeaux de fer ont été reportées sur la figure 5 pour l'ensemble des éléments et résumé dans le tableau 4. L'important constat immédiat, en se référant aux résultats obtenus des cartes des anomalies fait ressortir l'individualisation de trois catégories de sites. La première catégorie renferme celle de Draa sfar (Sidi Mbarek) et Koudiat Aïcha avec un ensemble important d'anomalies. La seconde catégorie englobe les sites de Ben Slimane, Lachach et Kettara. La troisième classe englobe les autres sites de moindre importance. Cette subdivision permettra de focaliser les recherches et de comprendre les différentes corrélations entre éléments chimiques et d'étendre les résultats sur l'ensemble des terrains hercyniens des Jebilets voir leur extrapolation vers l'ensemble des terrains hercyniens.

Tableau 4. Anomalie des éléments chimiques de chapeau de fer du district des Jebilets centrales

	Ag	As	Bi	Cu	Mo	Ni	Pb	Sn	Te	Zn
Kettara			*							
Ben Slimane					*		*	*		
Kerkoz										
Kt, Delaa										
Sidi Mbarek	*		*	*				*	*	
Tzakourt										
Draa Tarfani										
Jbel Hadid										
Koudiat Aïcha		*				*	*			*
Lachach							*			
Bouhane										

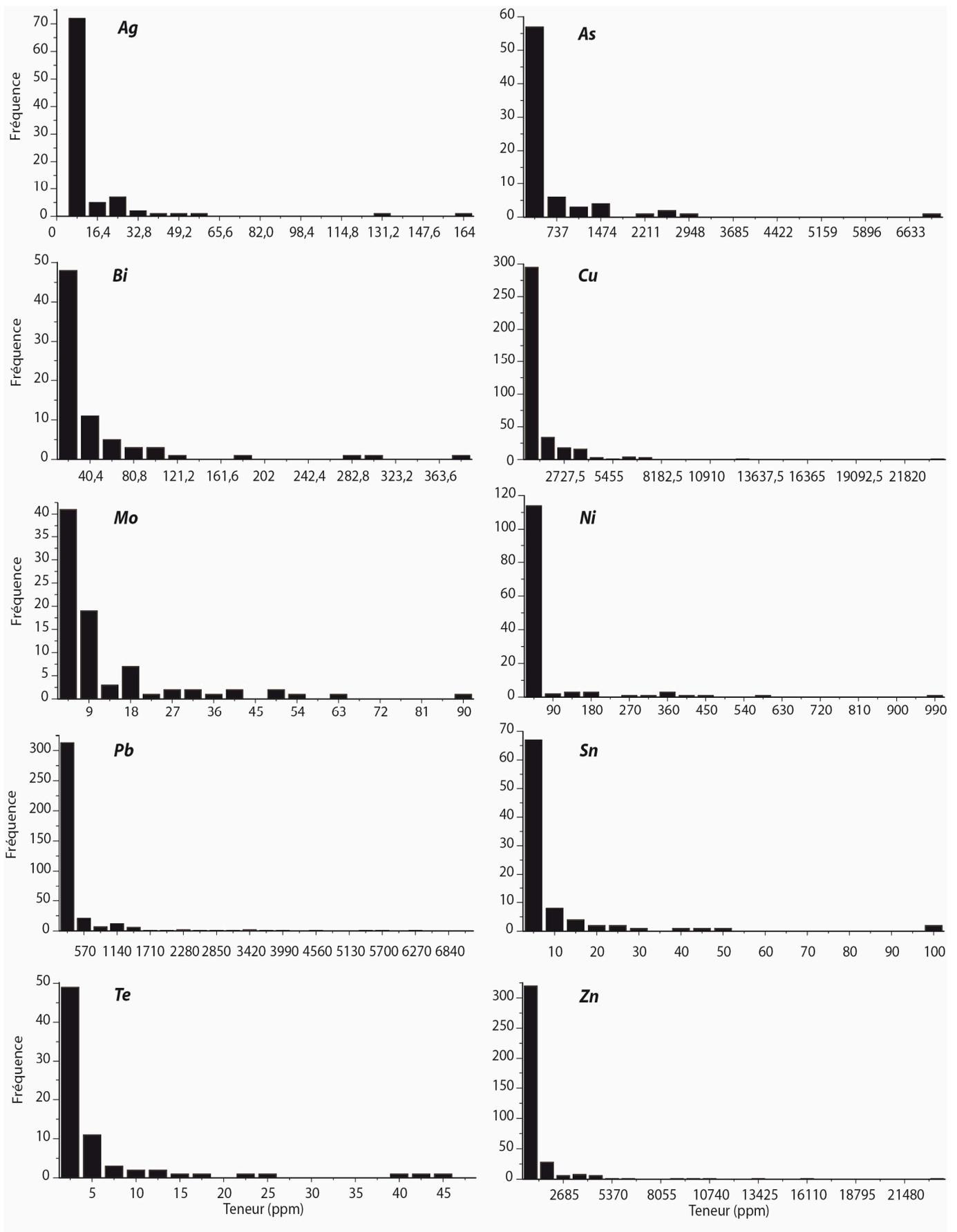


Fig. 3. Histogramme de fréquence des éléments traces des chapeaux de fer des Jebilettes centrales

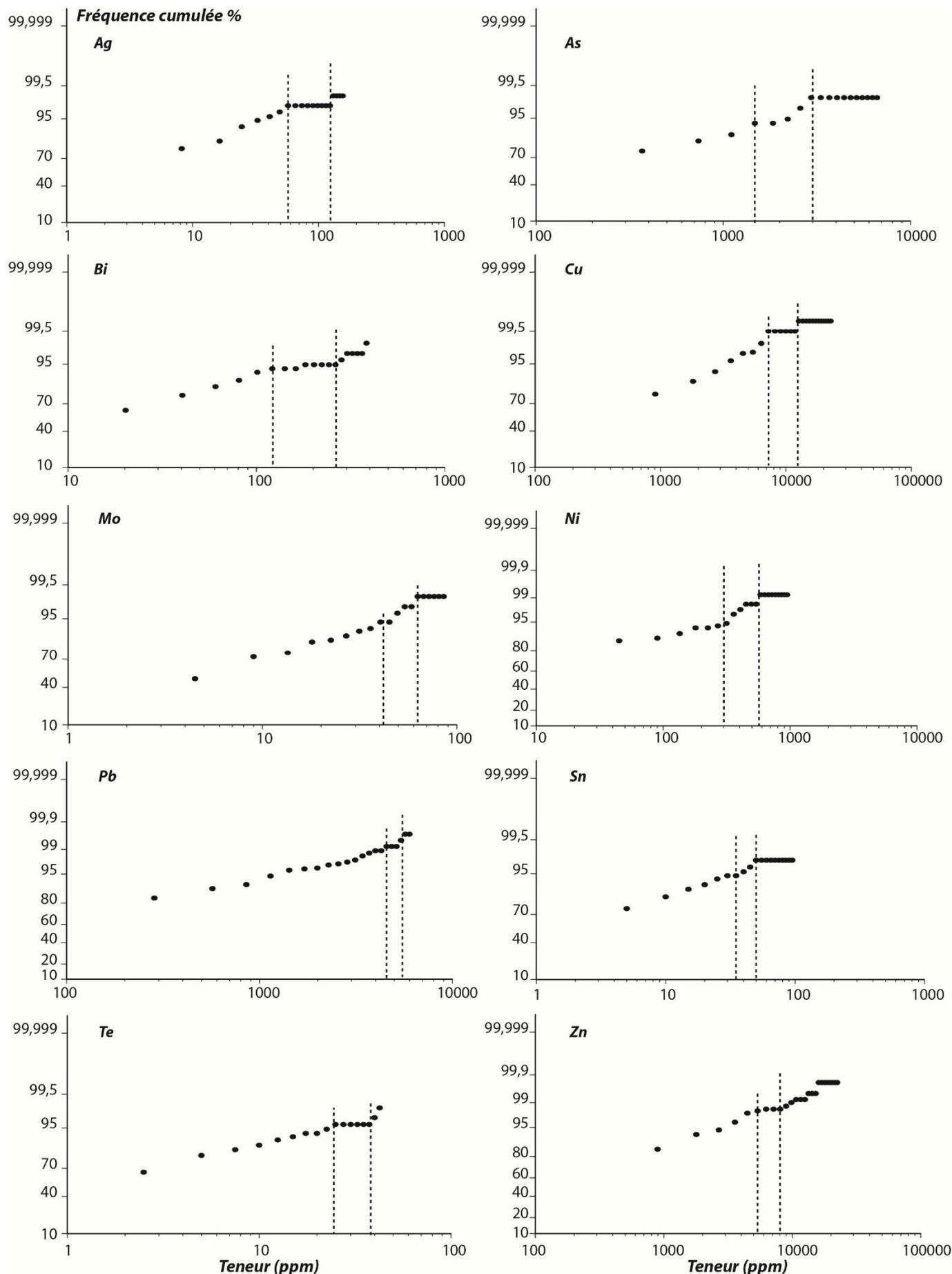


Fig. 4. Représentation graphique des fréquences cumulées en fonction de leurs teneurs des éléments des chapeaux de fer des Jebilet centrales



Fig. 5. Carte de distribution des anomalies des analyses des chapeaux de fer des Jebilets centrales

7 DISCUSSION

Cette étude constitue une des applications de la géochimie de prospection destinée aux chapeaux de fer et à l'évaluation du potentiel minéral de la province métallogénique à amas sulfurés des Jebilets centrales. La géochimie en tant qu'une méthode de prospection minière incontournable par sa simplicité et la quantité d'informations, peut être un outil de cartographie géochimique par excellence.

La province métallogénique des Jebilets recèle dans son sol un important potentiel minier attesté par les nombreux gisements de métaux de base et des métaux précieux qu'elle abrite. Le fait de concentrer l'échantillonnage dans tout le secteur des Jebilets centrales est intéressant pour classer les chapeaux de fer étudiés et d'essayer de dégager quelques guides de prospection régionale, et d'étendre les résultats sur l'ensemble des terrains hercyniens.

Au niveau du secteur de Jebilets centrales, la minéralisation sulfurée est marquée à affleurement par le développement de chapeaux de fer bien individualisés. 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 lors de l'ouverture du bassin des Jebilets centrales et la mise en place des corps minéralisés sur le plancher sous-marin. De ce fait là, Il suffit d'analyser les échantillons de chapeau de fer du même contexte pour l'élément recherché en association avec quelques minéraux indicateurs dont le but 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 de la province des Jebilets centrales ont servi de déterminer les seuils pour chaque élément chimique pour un éventuel traçage des cartes de symboles gradués des différents éléments en tenant compte avec les valeurs locales du bruit de fond et anomalique pour chaque élément analysé. Les valeurs élevées du bruit de fond des chapeaux de fer dans le secteur par rapport à ceux du Clark des éléments correspondant ont été attribuées au caractère minéralisé de la roche mère formant le protore encaissé dans les roches sédimentaires de la série de Saghlef.

L'interprétation des données des chapeaux de fer a fait ressortir trois grands ensembles distincts de point de vue le nombre d'anomalies obtenus en superposant les données de la géologie et des données des travaux récents.

La première classe renferme les gisements de Draa Sfar "Sidi Mbarek" en cours d'exploitation et celui de Koudiat Aïcha en cours de développement. Le chapeau de fer de Sidi Mbarek, montre une association de cinq anomalies (Ag, Bi, Cu, Sn et Te). De tels éléments localisés au niveau de la zone oxydée traduisent la présence d'un minerai primaire polymétallique riche en galène argentifère, la chalcopryrite sphalérite et la stannite [19] [20] [21]. Les ressources géologiques sont de l'ordre de 10Mt à 5,39% Zn, 1,94%Pb et 0,34%Cu [22] [23]. Les récents travaux et l'élaboration des modèles tridimensionnels ont démontré l'enracinement des minéralisations en profondeur (-1500 m) et ont permis la remise en activité de la mine Draa Sfar après 23 ans d'arrêt [22] [23] [24]. Le chapeau de fer de Koudiat Aïcha rangé dans la première catégorie montre une association de quatre anomalies (As, Ni, Pb et Zn). La présence de ces éléments traduit une richesse de la minéralisation primaire en arsénopyrite, galène et sphalérite [25] [26]. Les récents travaux de recherches géologiques et géophysiques et des sondages ont été entrepris dans le but d'intercepter et de déterminer l'allure générale et la morphologie du corps minéralisé en profondeur. Ces travaux ont permis de déterminer un enracinement de la minéralisation massive (-500 m) qui s'épaissit en aval (5-20m) et de mettre en évidence des ressources potentielles en métaux de base de 3.6 Mt à environ 3% Zn, 1% Pb et 0.6% Cu [27] [28] [29].

La seconde classe renferme les indices et gisements de Ben Slimane, Kettara et Lachach. Elle est moins polymétallique par rapport à la première. L'indice de Ben Slimane renferme l'association de trois anomalies (Mo, Pb et Sn). Il constitue la continuité SW du chapeau de fer de Kettara. Les sondages réalisés récemment sur ce secteur ont montré l'enracinement du corps minéralisé au moins jusqu'à la cote -350m. La minéralisation se présente sous forme d'une lentille unique de pyrrhotine massive avec seulement des traces de métaux de base sauf pour le cuivre qui est présent en quantité non-négligeable (2%). Le gisement de Kettara, avec son chapeau de fer bien développé, il a été le premier amas sulfuré découvert et exploité dans le massif des Jebilet. Les ressources calculées sont d'environ 25 millions de tonnes à 25% S et 0.7% Cu [7] [8]. Ce chapeau de fer a été exploité pour ses ocres "jaune et rouge" en premier lieu, pour sa pyrite de la zone de cémentation et la pyrrhotite primaire en second lieu pour l'enrichissement de l'acide phosphorique au profit de l'OCP. Cependant, la mine a été abandonnée suite à la pauvreté de la minéralisation en métaux de base (0.7% Cu) ainsi que pour ses problèmes environnementaux [30]. Cette pauvreté en métaux de base s'est bien manifestée par l'absence d'anomalies géochimiques de son chapeau de fer bien développé. Bien que le secteur de Lachach semble être, au moins géographiquement, la continuité directe du secteur de Koudiat Aïcha, le chapeau de fer ne montre qu'une seule anomalie à Pb compte tenu du contexte géologique et minier du secteur étudié. Le fait marquant d'une campagne de sondage réalisé récemment a donné des résultats intéressants de plus de 20m de stockwerk à pyrrhotine avec traces de métaux de base (chalcopryrite, galène et sphalérite). L'interprétation géophysique des anomalies magnétiques mises en évidence a permis de caractériser la structure profonde des corps

magnétiques de Lachach, qui pourraient correspondre à des amas sulfurés enracinés plus en profondeur [31] [32].

La troisième catégorie des chapeaux de fer ne montre pas d'anomalie. Il s'agit des chapeaux de fer de moins évolués tels que ceux de Draa Trefani, Kerkoz, Jbel Hadid, Bouhane et Koudiat Delaa. L'interprétation primaire des résultats obtenus permet de constater l'absence d'enracinement d'une minéralisation polymétallique en profondeur et pourraient pas être une cible pour les métaux de base actuellement.

8 CONCLUSION

La géochimie d'exploration a contribué de façon significative à la découverte de nombreux gisements métallifères. Elle constitue un outil de reconnaissance incontournable en particulier dans les zones où le socle hercynien, a été redressé à la verticale et marqué par une importante épaisse série de recouvrement. Cette approche d'exploration, a montré son importance et sa grande utilité dans le but de cibler et de localiser les potentialités métallifères en profondeur comme dans le prospect de la province métallogénique des amas sulfurés des Jebilet Centrales. L'étude a cependant montré que les éléments chimiques tels que l'Ag, As, Bi, Sn, Mo, et Te en plus des éléments de métaux de base recherchés peuvent être de bons indicateurs de la proximité de la minéralisation sulfurée polymétallique en profondeur. Ces résultats très intéressants peuvent être combinés avec les levés de géophysique et s'étendre sur l'ensemble des chapeaux de fer non étudiés de la présente province pour d'éventuelles découvertes futures.

REFERENCES

- [1] A.G. Galley, M.D. Hannington, & I.R. Jonasson, "Volcanogenic massive sulphide deposits, in Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods", Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 141-161, 2007
- [2] A. Piqué, "Géologie du Maroc. Les domaines régionaux et leur évolution structurale", Presses Universitaires Maghrébines Edition, 284 p. Marrakech, 1994.
- [3] J. Fabre, "Structure de l'Algérie saharienne. Eléments pour une carte tectonique", *Bull. Serv. Géol., Algérie, Nouvelle série*, V. 41, 161-185, 1971.
- [4] M. Leblanc & J. Lancelot, "Interprétation géodynamique du domaine pan-africain (Précambrien terminal) de l'Anti-Atlas (Maroc) à partir de données géologiques et géochronologiques", *Can. J. of Earth Sci.*, 17, 142-155, 1980.
- [5] M. Bouabdelli, "Tectonique et sédimentation dans un bassin orogénique: le sillon viséen d'Azrou-Khénifra (Est du massif central du Maroc)", *Thèse d'état, Univ. Strasbourg*, 262 p., 1989.
- [6] 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.
- [7] A.J. Bernard, O.W. Maier & A. Mellal, "Aperçu sur les amas sulfurés massifs des hercynides marocaines", *Mineralium Deposita* 23, 104-114, 1988
- [8] P. Huvelin, "Etude géologique et gîtologique du massif Hercynien des Jebilets (Maroc Occidental)," Note et Mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat, N° 232 bis, 307 p., 1977.
- [9] 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.
- [10] El.M. Aarab, "Mise en place du caractère cogénétique des roches magmatiques basiques et acides dans la série volcanosédimentaire de Saghlef (Jebilets, Maroc hercynien)", "Thèse Doctorat de 3ème cycle, Univ. Nancy I 145 p., 1984.
- [11] 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.
- [12] M. Bordonaro, J.L. Gaillet & A. Michard, "Le géosynclinal carbonifère sud-mésétien dans les Jebilets (Maroc); une corrélation avec la province pyriteuse du sud de l'Espagne," *CR Acad Sci Paris* 288-D, 1371-1374, 1979.
- [13] 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.
- [14] R. El Mouraouah, "Mise en évidence du caractère lamprophyrique des filons Tardihercyniens des Jebilet: Implication petrogénétique", *Thèse de 3ème cycle, Marrakech*, 104p., 1992.
- [15] 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
- [16] 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.
- [17] C. Le Corre, & A. Saquaque, "Comportement d'un systbme plutonencaissant 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.
- [18] A.T. Souaré, "Contribution à l'étude des amas sulfurés du district des Jebilets centrales et de leurs altérations supergènes (chapeau de fer). Comparaison avec les minéralisations sulfurées d'Agouim (Haut Atlas, Maroc)," Thèse 3ème cycle, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, 273 p., 1988.
- [19] A. Belkabir, 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.
- [20] L. Ben Aissi, "Contribution à l'étude gîtologique des amas sulfurés polymétalliques de Draa Sfar et de Koudiat Aïcha : comparaison avec les gisements de Ben Slimane et de Kettara (Jebilets centrales, Maroc hercynien)," Thèse de doctorat, Uni Cadi Ayyad, Marrakech, 333 p, 2008.
- [21] E. Marcoux, A. Belkabir, H. Gibson, & D. Lentz, "The Draa Sfar ore deposit (Jebilets, Morocco): an example of pyrrhotite dominant-polymetallic VHMS in Hercynian terranes," *Ore Geology*, 658. 33. 3-4, 304-328, 2008.
- [22] S. Rziki, A. Alansari, E. M. Mouguina, J. Simard., M. Zouhair & L. Maacha, "Apport du modèle géologique et géophysique 3D dans le développement du gisement polymétallique de Draa Sfar (Massif Hercynien des Jebilets centrales, Maroc)," *Estudios Geologicos*; 10.3989/egeol.40366.138, 2011.
- [23] S. Rziki, "Environnement géologique et modèle 3D du gisement polymétallique de Draa Sfar (Massif hercynien des Jebilets, Maroc) : Implications et perspectives de développement," Thèse présenté à la Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech. Maroc, 2012.
- [24] I. Messrar, "Contribution à l'étude structurale, gîtologique et métallogénique du gisement de Draa Sfar Nord (Jebilets centrale, Maroc)," Master F.S.T, Fès, Univ. Sidi Mohammed Ben Abdellah, 2016.

- [25] F. Lotfi, Contexte géologique et modèle de mise en place de la minéralisation à sulfures massifs du gisement polymétallique (Zn, Pb, Cu) de Koudiat Aïcha, Jebilet centrales, Maroc, in recueil des résumé, Actes de la 10ème édition du colloque International : Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées – 3MA10, 2017.
- [26] F. Lotfi, A. Belkibir; A.C. Brown, E. Marcoux, & S. Brunet, "Geology and mineralogy of the Hercynian Koudiat Aïcha polymetallic (Zn, Pb, Cu) massive sulfide deposit, Central Jebilets, Morocco, " *Exploration and Mining Geology*, 17, Nos. 3–4 : 45–162, 2008.
- [27] 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), Jebilets Centrales – Maroc," Actes des journées géologiques, Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Rabat, 2016.
- [28] F. Lotfi, "Contexte géologique et minéralisation à sulfures massifs (Zn, Pb, Cu) du gisement hercynien de Koudiat Aïcha, Jebilets Centrales, Maroc," PhD Thésis, Université Cadi Ayyad Marrakech, 180 pp, 2009.
- [29] F. Lotfi, "Utilisation des chapeaux de fer comme guide de prospection des amas sulfurés : cas du gisement polymétallique de Koudiat Aïcha, Jebilets Centrales Maroc, " In: recueil des résumés, Actes du Colloque international 3MA Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées, 9ème édition Taroudant – Agadir, le 02 au 04 avril, 2015.
- [30] R. Hakkou, M. Benzaazouam & B. Bussière: "Acid Mine Drainage at the Abandoned Kettara Mine (Morocco) : 1. Environmental Characterization; 2. Mine Waste Geochemical Behavior", *Mine Water Envir.* 27, 145-159 and 160-170, 2008.
- [31] M. Jaffal, N. El Goumi, M. Hibti, A. Adama Dairou, A. Kchikach, A. Manar, "Interprétation des données magnétiques du chapeau de fer de Lachach (Jebilets centrales, Maroc): Implications minières", *Estudios Geológicos*, 66(2) 171-180, 2010
- [32] M. Jaffal, L. Maacha, A. Jarni, A. Kchikach, P. Berube, M. Zouhair, A. Ouadjou, A. Radnaoui, J. Ait Taleb & O. Saddiqi, "Application des méthodes géophysiques à la recherche d'amas sulfurés : Cas du chapeau de fer de Lachach, Jebilets centrales, Maroc", in recueil des résumé, Actes de la 10ème édition du colloque International : Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées – 3MA10, 2017.