

Le champ filonien à Zn-(Pb, Cu, As, Hg) du district minier de Fedj Hassène (Nord Ouest de la Tunisie): Minéralogie, Eléments en traces, Isotopes du Soufre et Inclusions Fluides

The Vein-type Zn-(Pb, Cu, As, Hg) mineralization at Fedj Hassène orefield, North-Western Tunisia: Mineralogy, Trace Elements, Sulfur Isotopes and Fluid Inclusions

J. Bejaoui^{1, 2}, S. Bouhlel², D. Barca³, A. Braham⁴

RESUME

Le district minier de Fedj Hassène est situé à proximité de la frontière algéro-tunisienne, à 10 Km au sud de la ville de Ghardimaou. Il regroupe plusieurs filons à Pb-Zn, localement accompagnés par des sulfures de Cu, d'As et d'Hg. Les réserves sont estimées à 370.000 t à 10% de Zn et 0,2% de Pb.

Les minéralisations remplissent des fractures subparallèles à la faille d'Ain Kohla de direction ESE-WNW et des fentes d'extension qui recoupent les calcaires marneux du Turonien moyen. Le filon principal est formé par de la sphalérite massive brune et accessoirement par de la galène et de la barytine. Le minerai peut se présenter sous forme massive ou sous la forme de ciment de brèche. L'association minérale est composée par de la sphalérite, galène, chalcopryrite, pyrite et orpiment. La gangue est formée par de la calcite massive et localement par de la barytine et du quartz. L'analyse des éléments en trace dans la sphalérite révèle des teneurs en poids de 0,84% Fe, 0,14% Cd et 0,02% Mn.

L'étude des inclusions fluides dans la calcite et la sphalérite montre l'existence d'un fluide caractérisé par une salinité de l'ordre de 23% poids équiv. NaCl à température décroissante lors de la mise en place des minéralisations (194 °C lors du dépôt de la calcite et 133 °C lors du dépôt de la sphalérite). Ce fluide est caractérisé par une densité comprise entre 1,00 g/cm³ et 1,11 g/cm³ avec une pression de piégeage estimée de 200 bars. La précipitation des sulfures paraît être contrôlée par une chute de la température.

Les mesures des isotopes du soufre dans la sphalérite donnent des valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ toutes positives et variant dans une gamme très restreinte comprise entre + 4,6‰ et 6,4‰ (VCDT) (moyenne = 5,6‰). Ces valeurs indiquent une origine commune du soufre réduit qui est formé par les processus de réduction thermique de sulfates. La source des sulfates admet les évaporites triasiques de la région comme réservoir potentiel.

Les études géologiques et minéralogiques couplées à la microthermométrie des inclusions fluides et la géochimie des éléments en traces et des isotopes du soufre permettent de classer le gisement filonien de Fedj Hassène dans le groupe des gisements polymétalliques (Pb-Zn-As, Hg) typiques de la zone des nappes de la Tunisie du Nord et de l'Algérie nord-orientale.

Mots clés: Gisement filonien de Pb-Zn-As, éléments traces, minéralogie, inclusions fluides, isotopes du soufre, Fedj Hassène, Tunisie.

¹ Centre National des Sciences et Technologies Nucléaires. Pôle Technologique - 2020 Sidi Thabet BP 72, Tunisie. Email: bjaoui_geo@yahoo.fr

² U.R. de Minéralogie et Géochimie Appliquées, Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, 2092 Tunis, Tunisie.

³ Department of Earth Sciences - University of Calabria, Arcavacata, Rende, Italy.

⁴ Direction Inventaire et Exploration Minérale, Office National des Mines, 2035, La Chargaia, Tunis, Tunisie.

ABSTRACT

The Fedj Hassène district is localized at the edge of the Tuniso-Algerian border 10 km of Ghardimaou area. It consists of a Zn-Pb vein type with minor amounts of Cu-As-Hg. The total Zn reserves are about 370.000t. The mineralization occurs within subparallel fractures to the Ain El Kohla ESE-WNW fault. Host rocks consist of limestones and marly limestones of the Middle Turonian. In the principal lode of Fedj Hassène, the mineralization occurs as vein filling of massive and brecciated brown sphalerite and minor galena ore with gangue. Other trace minerals are pyrite, chalcocopyrite, orpiment, realgar, smithsonite and cerussite. LA-ICP-MS analyses in sphalerites show mean contents of 0,84 wt% Fe, 0,14 wt% Cd and 0,02 wt% Mn Ore.

Fluid inclusions study in calcite and sphalerite reveals one mineralizing fluid characterized by an average salinity 23% wt NaCl with decreasing homogenisation temperature. In fact the temperature shows decrease from sphalerite to calcite. The fluid density that corresponds to trapping pressure ranges between 1.00 g/cm³ and 1.11 g/cm³ and pressure close to 200 bars. Microthermometric data in fluid inclusion hosted by gangue mineral presented by calcite show an average temperature of formation around 194°C. These inclusions homogenized to the liquid phase between 156°C and 210°C and salinities values ranging from 22 to 28 wt% NaCl and an average around 23% wt NaCl.

The $\delta^{34}\text{S}$ (VCDT) values of sphalerite are in the range of + 4,6‰ to 6,4‰ (average=5,6‰). Thermochemical reduction of Triassic sulfate by reaction with hydro-carbons is the most probable source for the heavy and the narrow range of the $\delta^{34}\text{S}$ values.

Mineralogical, geochemical of trace elements, fluid inclusions and sulfur isotopes studies allow to include the vein-type ore field of Fedj Hassène in the polymetallic (Pb-Zn-As-Hg) vein mineralization of the nappe zone in northern Tunisia and north eastern Algeria.

Key words: Vein-type Zn-Pb ore deposit, mineralogy, trace elements, sulfur isotope, fluid inclusions, Fedj Hassène, Tunisia.

Introduction

Le district minier de Fedj Hassène présente des ressources initiales de l'ordre de 370.000 tonnes de zinc dont 60.000 tonnes des minerais, avec 10% Zn et 0,2% Pb, ont été exploitées jusqu'à 1992 Bouhleb (2007). Il est localisé à la côte de la confluence de l'Oued Medjerda et l'Oued El Melah, près de la frontière algéro-tunisienne à 10 Km au Sud de la ville de Ghardimaou. Il fait partie des gisements polymétalliques à Pb-Zn-Cu-Hg de la zone des nappes de la Tunisie septentrionale (fig.1). Ce gisement se situe au SW des gisements d'Oued el Maden, Ain el Bey et Kef Ettout (Bouhleb, 2005), qui s'ordonnent le long de l'accident Ghardimaou Cap Serrat. Le district minier du Fedj Hassène a fait l'objet de rares études géologique et minéralogique Sainfeld (1952); Slim-Shimi (1992) et Loukil (1990). Ces études sont souvent d'ordre descriptif et se sont limitées à des observations du terrain Sainfeld (1952) complétées par des études microscopiques des minerais Slim-Shimi (1992).

Dans cet article nous apportons des précisions et des nouveaux résultats sur (i) les conditions géologiques de la localisation du système filonien, (ii) la texture et la minéralogie des minéralisations et (iii) la pétrographie, les isotopes du soufre et la microthermométrie des inclusions fluides dans la calcite et la sphalérite. Ces nouvelles données permettent

de caractériser les conditions géochimiques et géothermobarométriques ayant gouverné la mise en place des minéralisations.

Contexte géologique

Le district minier de Fedj Hassène se trouve dans le domaine de l'Atlas Tellien, dans la zone des nappes du Nord de la Tunisie en bordure immédiate de la zone des flyschs numidiens, sur le bord du fossé d'effondrement de la moyenne Medjerda. La structure géologique du district se compose par deux compartiments bien distincts, de part et d'autre de la faille d'Aïn Kohla (fig. 2A). Le compartiment nord, appartenant à la bordure nord du bassin de la moyenne vallée de la Medjerda et un compartiment sud appartenant aux chaînons créta-cés de l'Ourgha. Le compartiment nord est formé par un bassin d'effondrement ayant reçu les produits de démantèlement des reliefs de la chaîne alpine durant le Néogène et le Quaternaire. Les pointements triasiques qui affleurent au milieu de ces séries, sont essentiellement constitués de gypse, d'argile le long d'accident sensiblement E-W. Cette direction de plissement du quaternaire ancien contraste avec l'orientation NE-SW des plis qui affectent le flysch numidien et son substratum créta-cé. Le compartiment sud est formé par le flanc

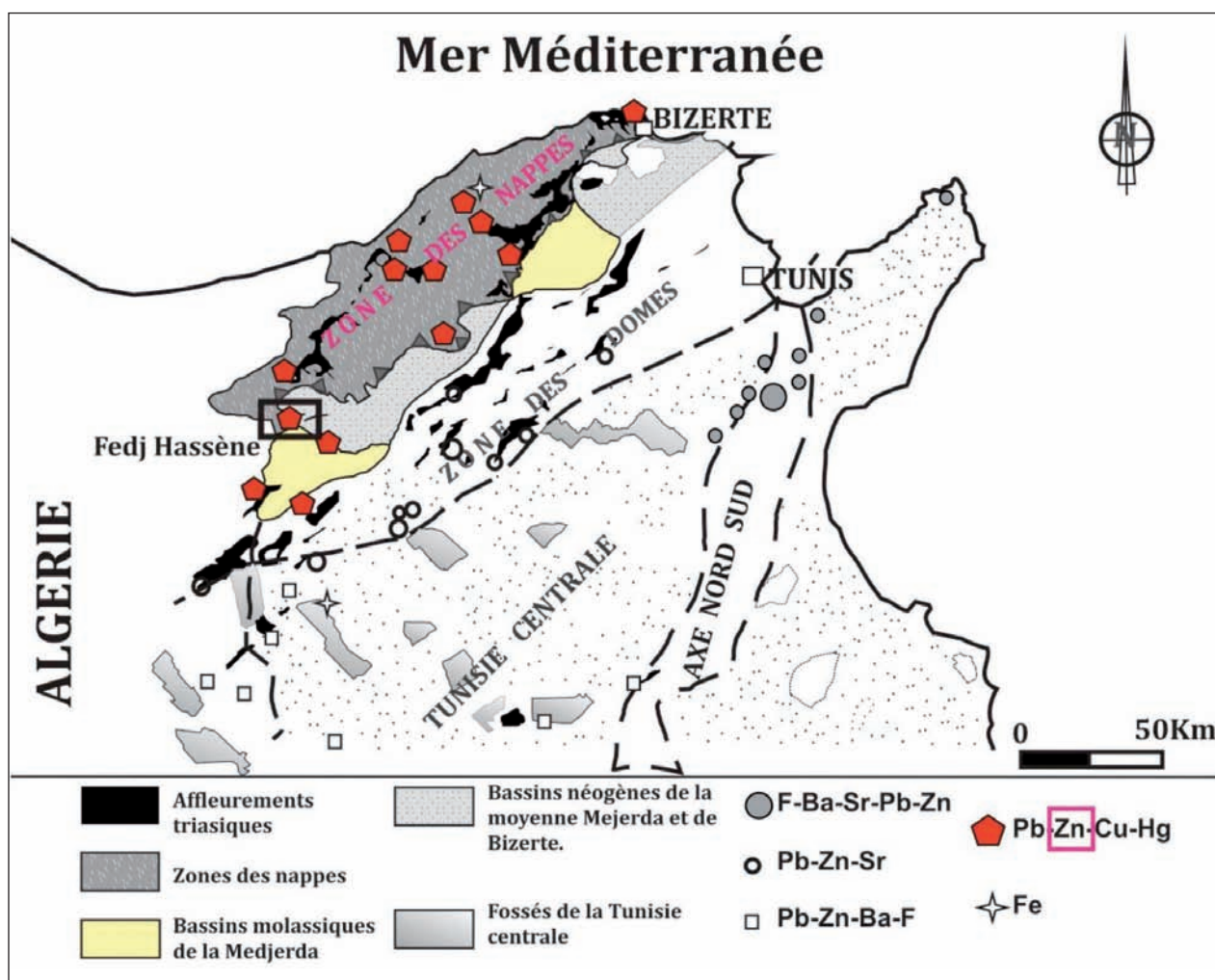


Fig. 1.—Localisation du gisement Fedj Hassène dans la carte géologique de la Tunisie (Adaptée de Bouhlef, 1993).

nord-ouest de l'anticlinal de l'oued Bou Adila et comporte deux unités structurales: la nappe du flysch numidien et les terrains crétaçés et tertiaires de l'autochtone. Le flysch Numidien argilo-gréseux affleure aux Jebel Hajra Hamra et au Jebel Chennkoura. Il repose par contact anormal sur un substratum formé de terrains crétaçés et tertiaires (fig. 2B). Sa mise en place est Serravalien-Tortonien basal Rouvier *et al.* (1985).

Le Crétaçé correspond à une série pélagique, formée de bas en haut par la succession suivante: une série albienne, épaisse de 400 m, formée essentiellement par des marnes à bélemnites et admettant quelques récurrences de calcaires en plaquettes. Elle est surmontée par le Cénomanién, épais de 120 m formé par des marnes grises à nuance bleutée surmontées par des calcaires en bancs métriques

terminés au sommet par des calcaires en plaquettes. Au dessus se développe une série turonienne épaisse de 150 m, formée par des calcaires argileux gris surmontant des marnes à intercalations de bancs de calcaire; une épaisse série marneuse de 700 m admettant à sa base deux bancs de calcaires à Inocérames (niveau repère) attribué au Coniacien-Santonien. La série épaisse de 400 m, se poursuit par les calcaires blancs à Inocérames du Campanien-Maastrichtien qui forment le Jebel Chennkoura (fig. 2A). La transition Crétaçé-Tertiaire s'effectue par des marnes sombres à rares intercalations calcaires d'âge Paléocène. Les terrains éocènes sont représentés par des calcaires à Nummulites, apparaissant en lambeaux le long de la faille d'Aïn Kohla.

D'un point de vue structural, le district minier est marqué par un accident majeur «Faille d'Aïn

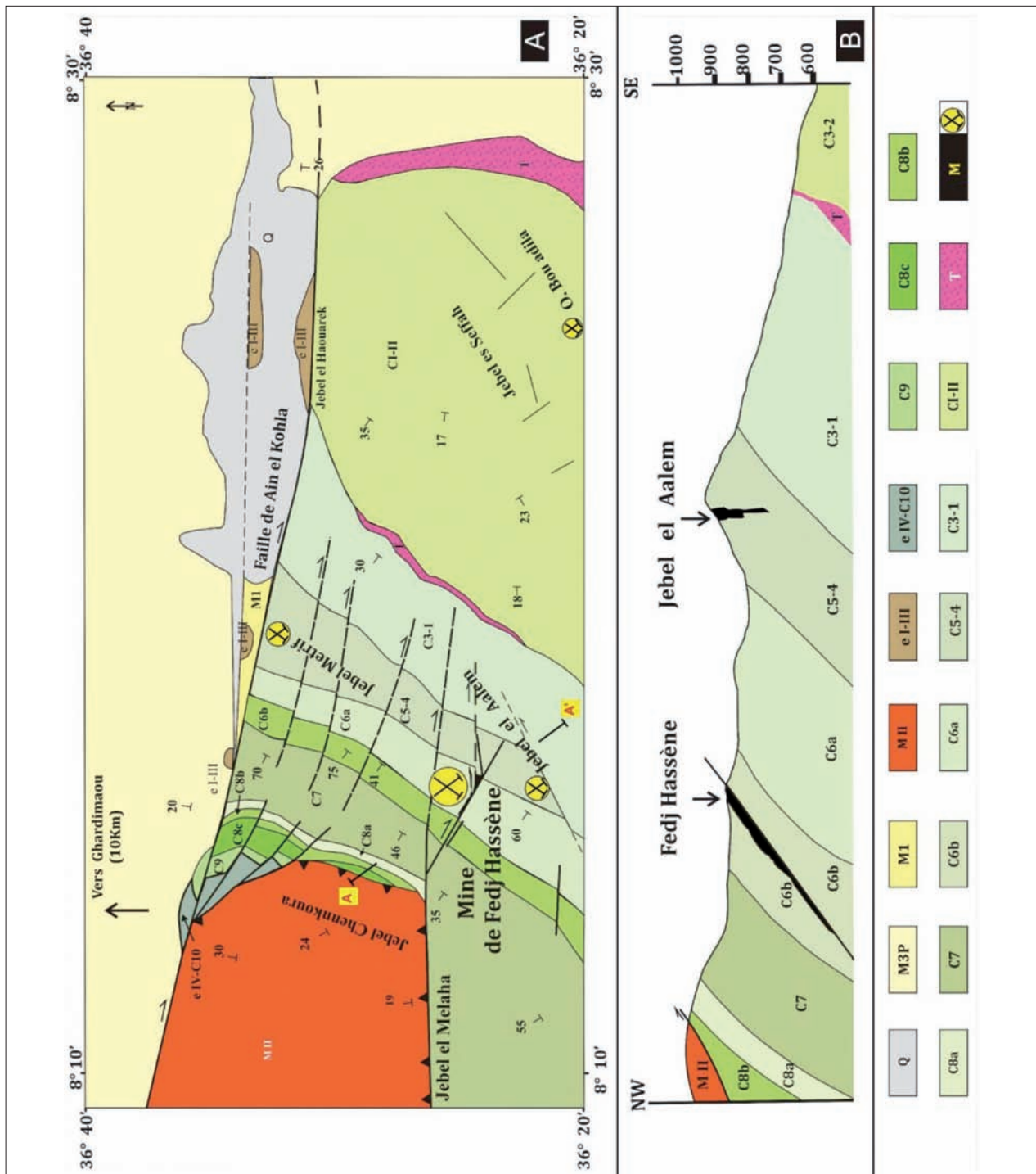


Fig. 2.—A) Esquisse géologique du champ filonien de Fedj Hassène (d'après la feuille d'Ouargha et de Ghardimaou au 1/50.000). B) Coupe géologique représentant le filon du Fedj Hassène d'après nos observations du terrain et d'après Sainfeld, 1952, modifiés. Q, Quaternaire (éboulis) ; M3P Mio-Pliocène (grès, argiles et conglomérats) ; M1, Miocène essentiellement gréseux ; MII, Oligocène (grès massifs et marnes grès glauconieux) ; EI-III, Lutétien (calcaires gris marno-calcaires glauconieux) ; EIV-C10, Paléocène (Marnes à quelques niveaux carbonatés) ; C9, Maastrichtien inférieur (marno-calcaires) ; C8c, Campanien supérieur (calcaires blanc) ; C8b, Campanien moyen (marnes et marno-calcaires) ; C8a, Campanien inférieur (marno-calcaires) ; C7, Coniacien-Santonien (marnes avec bancs repère à Incérâmes) ; C6b, Turonien (supérieur:marno-calcaires) ; C6a, Turonien moyen (marno-calcaires) ; C5-4, Cénomaniens (calcaires massifs marnes et marno-calcaires en plaquettes) ; C3-1, Albien (marno-calcaires noirs) ; CI-II, Aptien (calcaires siliceux et marnes) ; T, Trias (évaaporites, dolomies et des argiles bariolées) ; M, Minéralisation.

Kohla». Cette faille, de direction WNW-ESE, est soulignée par des injections triasiques et marque la bordure sud de la Vallée de la Medjerda. Le secteur est affecté aussi par une succession de failles sensiblement parallèles à la faille de Aïn Kohla, recoupant les séries crétacées du compartiment sud (anticlinal de l'Oued Bou Adila), selon un dispositif en marche d'escalier avec basculement des blocs et effondrement vers le Nord Braham *et al.* (1999). Le rejet de ces accidents augmente progressivement du Sud vers le Nord en relation avec les mouvements de l'ouverture du bassin de la Medjerda.

Minéralisations

Les minéralisations sont réparties inégalement selon l'âge des roches encaissantes et l'intensité de la tectonique cassante. Les formations néogènes, au Nord de la faille d'Aïn Kohla, ne contiennent que des traces de plomb et zinc; Ils renferment aussi, à quelques kilomètres au nord, un gîte d'imprégnation à sulfures d'arsenic (réalgar et orpiment) discordant sur des bancs de grès numidiens. Les formations crétacées encaissent les principaux gîtes à Pb-Zn de la région. Les principales concentrations se trouvent dans des gîtes filoniens. Ce sont les gîtes Aïn Kohla, Fedj Hassène et les occurrences de Jebels Métrif, Aalem, Haouarech, et de l'oued Bou Adila. Les minéralisations forment un remplissage de fractures E-W subparallèles à la faille d'Aïn Kohla.

Indices du Jebel Haouarech et de l'Oued Bou Adila

Ce sont des petits gîtes encaissés dans les grès de l'Aptien. La minéralisation forme des imprégnations de porosité et des veines centimétriques. Elle se compose de sphalérite et galène au Jebel Haouarech et par des minéraux de cuivre dans une gangue de quartz et calcite dans les indices de l'oued Bou Adila.

Gîtes du Jebel Métrif et du Jebel Aalem

Ce sont des petits gîtes filoniens encaissés dans les calcaires du Cénomaniens. Ils peuvent être soit riches en Zinc (Zn>>Pb), cas au Jebel Métrif ou à Pb et Ba (Pb>>Zn), cas au Jebel Aalem. Ces filons sont subverticaux, leurs évolutions en profondeur ne sont pas connues.

Gîte d'Aïn Kohla

Ce gîte est situé à quelques mètres au Sud de la Faille d'Aïn Kohla. Il est composé essentiellement par deux filons subparallèles encaissés dans les calcaires noirs du Turonien. La minéralisation est essentiellement formée de sphalérite massive, de galène en petits cristaux liée aux épontes et quelques enduits de réalgar.

À 600 m vers le Sud, le filon de Chaabet Kohol de pendage 70°SW, encaissé dans les calcaires du Turonien, comporte à l'affleurement un remplissage brèchique uniquement plombifère (galène en partie oxydée en cérusite).

Le filon de Fedj Hassène

Situé à 2 km au SSW de la faille d'Aïn Kohla, le filon de Fedj Hassène constitue le gîte principal de la région. Il est encaissé dans les calcaires marneux noirs du Turonien moyen. La morphologie de la minéralisation est de type filon. La caisse filonienne présente un pendage 65°N, et des puissances variant de 1 à 10 m. Le remplissage de la caisse filonienne est formé par une association minérale simple, composée de sphalérite et calcite, et accessoirement par la galène et pyrite. La minéralisation montre souvent un remplissage géodique et massif à sphalérite avec parfois des disséminations de galène en petits cristaux subautomorphes. Fréquemment la minéralisation constitue le ciment d'une brèche tectonique à éléments plus ou moins anguleux.

La zone filonienne du Fedj Hassène correspond à des failles de direction ENE-WSW à E-W, avec des ouvertures en transtension, qui hébergent les minéralisations. Le filon principal de Fedj Hassène se caractérise en surface par sa discontinuité et sa faible puissance (0.5 à 1m). Il a été reconnu sur plusieurs kilomètres le long d'une faille régionale de direction N 100 à N 115 et à pendage de 60 à 65 ° vers le NNE. En surface, cette faille est soulignée par une brèche tectonique à éléments formés par des calcaires marneux du Turonien. Cette brèche encaisse une faible minéralisation représentée par la barytine et des mouches de galène, des encroûtements de smithsonite, traces de cérusite et des veines avec goethite-hématite. La zone oxydée à smithsonite a été suivie sur 100 m de profondeur, vient ensuite sur 50 m de profondeur une zone mixte à smithsonite-sphalérite. En dessous la sphalérite est très peu ou pas oxydée.

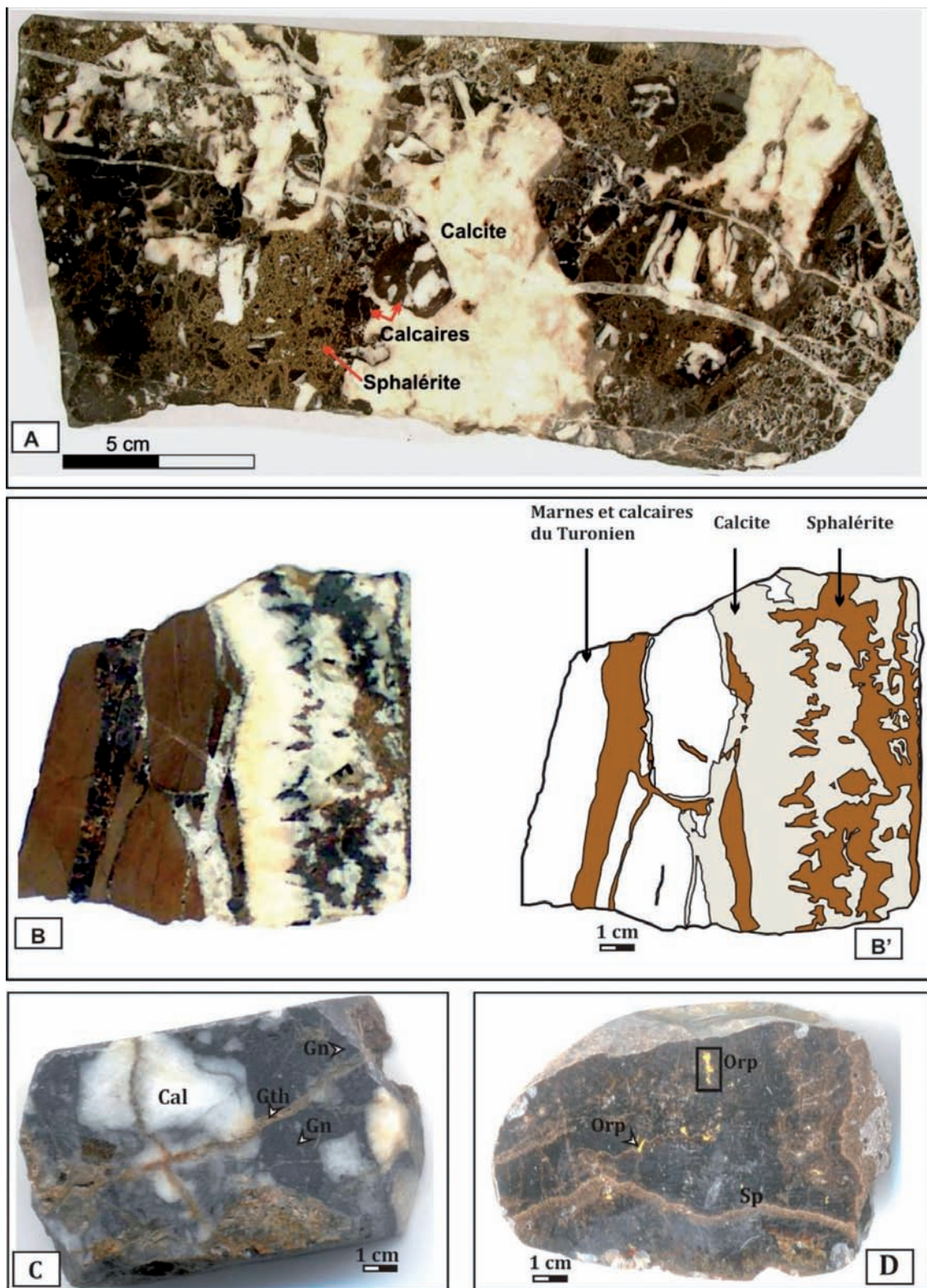


Fig. 3.—Photographies des échantillons représentatifs de la minéralisation dans le filon du Fedj Hassène. A) Association minérale calcite-sphalérite, en ciment de brèche. B et B') Association minérale en structure rubanée calcite-sphalérite. C) Echantillons minéralisés en galène et affectés par des fissures remplies par la goéthite. D) Structure massive de la sphalérite avec les bandes de croissance.

Les zones exploitées jusqu'à 1992, forment des colonnes de sphalérite massive. L'examen de trois niveaux d'exploitation (0, -40 m et -80 m) montre que la minéralisation se développe à l'intérieur d'une série de coins tectoniques, en forme de dièdres limités au Sud par une faille majeure (F) de direction N 100 à N 115 et à pendage 60 à 65°N et au Nord par une série de fractures (F1, F2, F3) de direction N 130 à N 140 et à pendage 70 à 80°N Braham *et al.* (1999).

L'intérieur de ces dièdres est rempli par des brèches à éléments de l'encaissant et à ciment de sphalérite et calcite (fig. 3A). L'intensité de la bréchification diminue lorsqu'on s'éloigne des zones d'interférence des réseaux de failles.

Structures et textures des minerais

L'étude macroscopique des échantillons récoltés dans le filon principal de la mine de Fedj Hassène montre des brèches minéralisées, des veinules et des remplissages de vides centimétriques à millimétriques.

Disséminations diagénétiques

Ce type de minéralisation est représenté par la pyrite, localement abondante, sous la forme de pyritosphères et parfois à texture framboïdale. Ces sulfures sont disséminés dans les calcaires marneux du Turonien. Il s'agit d'une minéralisation diagénétique, sans relation avec les minéralisations filoniennes.

Minéralisations filoniennes

Les minéralisations forment soit la matrice de brèches tectoniques, soit un remplissage rubané à géodique. L'association minérale comporte: sphalérite, calcite, galène, ± baryte ± réalgar ± orpiment ± géocronite.

Les minéralisations se présentent sous forme de (i) brèches; il s'agit de brèches tectoniques à éléments millimétriques à centimétriques de calcaires noirs du Turonien et de calcite blanche, cimentés par la sphalérite marron massive. Des vides résiduels sont remplis par la calcite blanche en gros cristaux. Ces brèches peuvent être traversées par des veinules de calcite blanche (fig. 3A), (ii) Le

remplissage rubané; Les colonnes minéralisées sont formées localement par des bandes parallèles aux épontes formées de sphalérite monominérale ou de calcite et de sphalérite. Ces bandes sont épaisses de 0,5 à 5 cm (fig. 3B et fig. 3B'). Ces structures rubanées témoignent de l'arrivée par saccades des fluides minéralisateurs associées à la fracturation des calcaires de l'encaissant.

Minéralogie et métallographie

L'association minérale, à l'échelle de l'ensemble du district est composée par: sphalérite, galène, chalcopryrite, pyrite, orpiment, réalgar, géocronite, jordanite, tennantite-tetraédrite. La gangue est formée par la calcite massive et localement par le quartz et des argiles.

L'association minérale dans la caisse filonienne de Fedj Hassène, est plus réduite et se compose surtout par sphalérite et calcite, et accessoirement par de l'orpiment, des sulfures de fer, de la galène et de la baryte. Les microphotographies et photographies de la figure 4 illustrent les caractéristiques du minerai observé dans des sections polies sous microscope métallographique et au microscope électronique à balayage.

La sphalérite est le sulfure le plus fréquent. Ce dernier à texture massive se présente en grandes plages millimétriques, en cristaux automorphes à subautomorphes, parfois on examine dans la sphalérite des inclusions micrométriques à millimétriques d'orpiment (As_2S_3) et/ou de réalgar (As_2S). Les lames minces faites dans la sphalérite massive révèlent, sous microscope à lumière transmise, des textures en zones de croissances fines et très abondantes (fig. 3D et 4D).

L'orpiment montre des structures de croissance ou en écailles. La calcite se montre sous forme massive et également sous forme de cristaux scalénoédriques et rhomboédriques de taille micrométriques à millimétriques. La succession de la séquence paragénétique est récapitulée dans la figure 5.

Procédures Analytiques

Analyse des éléments dans la sphalérite par LA-ICP-MS

Les analyses ont été effectuées au Département de Sciences de la terre, à l'Université de la Calabre,

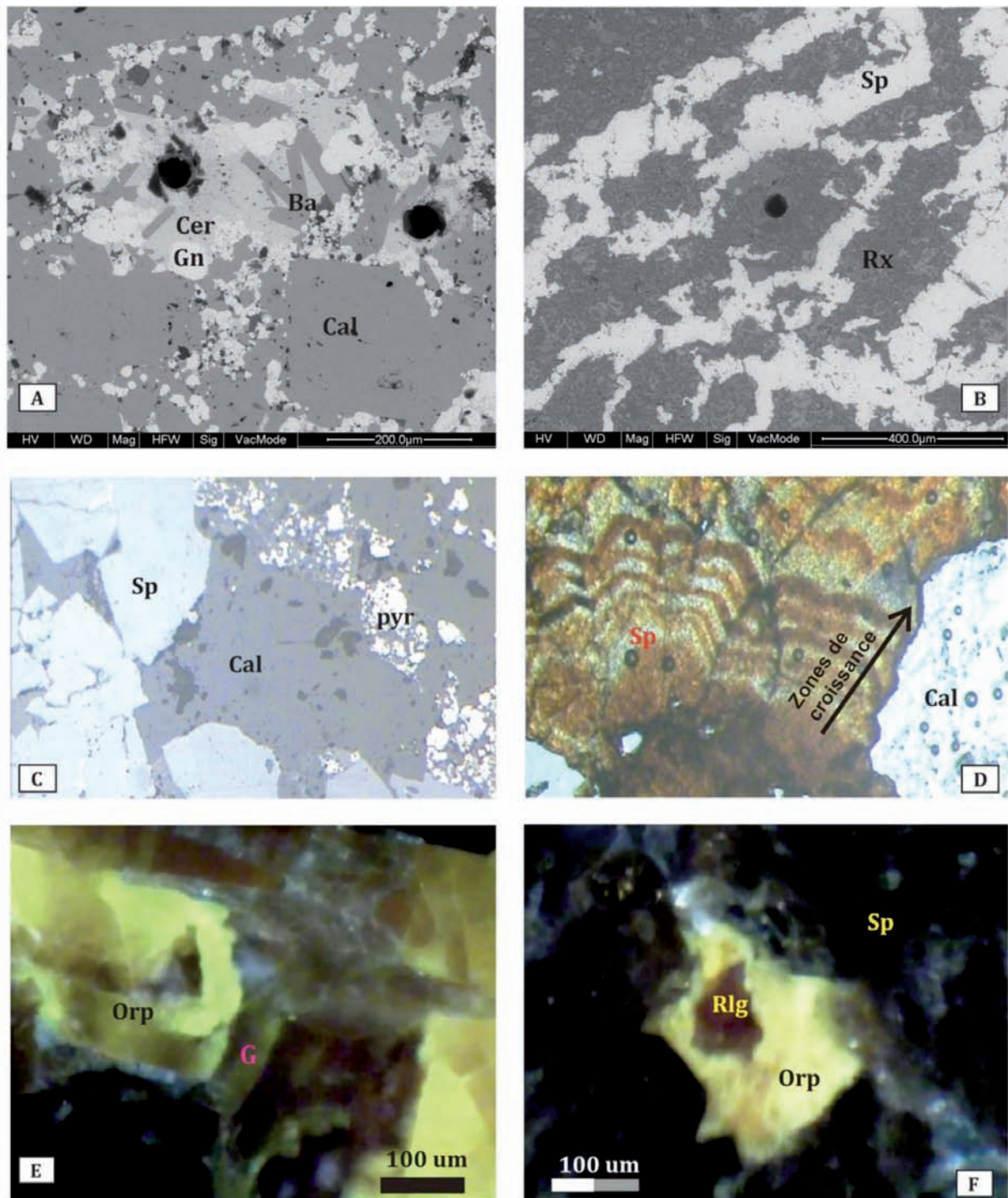


Fig. 4.—Microtextures de la minéralisation de Fedj Hassène. Microscopie SEM en A et B, optique à lumière réfléchiée en C, D, E et F, les trois dernières avec nicols croisés.

Abréviations minéralogiques: Py : pyrite ; Cal : calcite ; Rx : calcaires ; Sp : sphalérite ; Gn : Galène ; Rlg : réalgar ; Gth : Goethite ; Op : Orpiment ; G : Zones de croissance de l'Orpiment ; Ba : Barytine.

A) Calcite euhédral cimentée par la galène. B) Carbonates riche en foraminifères, remplacée par la sphalérite à texture rubanée. C) La calcite se cristallise en cristaux millimétriques, cimentés ultérieurement par de la sphalérite. La pyrite se présente souvent en fins cristaux groupés en pyritosphères dans les calcaires marneux du Turonien; D) texture collomorphe de la sphalérite présentant les zones de croissance. E) Structure de croissance de l'orpiment. F) Association sphalérite - orpiment-réalgar et la présence de l'orpiment en encroûtement autour de réalgar.

Paragenèse	Minéraux primaires		Minéraux d'altération
	Stade 1	Stade 2	
Pyrite	████████████████████		Fracturation
Calcite	████████████████████		
Sphalérite	████████████████████		
Galène	████████		
Barytine	██████		
Réalgar		██████	
Orpiment		████	
Cérusite			████████████████████
Smithsonite			████████████████████
Goethite			████████████████████

Fig. 5.—Séquence paragenétique des minéraux primaires et des minéraux d'altération au gisement du Fedj Hassène.

l'Italie, en utilisant une combinaison d'Ablation Laser (LA) avec la Spectrométrie de Masse Plasma Inductivement Couplée (ICP-MS). L'équipement était un Elan DRCE (Perkin Elmer/SCIEX), fonctionnant dans le mode normal comme un instrument standard ICP-MS ou dans une cellule de réaction dynamique (DRC), connecté à une New Wave UP213 solide Nd-YAG laser (213 nm). Les échantillons ont subi une ablation par le rayon laser dans une cellule et le matériel vaporisé a été alors rougi à l'ICP, où il a été évalué quantitativement. Le taux de répétition laser constant était 10 Hz et fluence environ 20 J/cm² Günther & Mermet (2000).

Chaque étape d'ablation était généralement de 50 μm de diamètre. Cette instrumentation peut rapidement analyser des échantillons solides et déterminer les éléments trace et les concentrations des REE en ppm et aussi en ppb, avec des limites de détection très basses et sans aucune manipulation type.

Le calibrage externe a été exécuté sur le matériel de référence de verre produit par l'Institut national de Standards et la Technologie NIST SRM 612 aux concentrations nominales des éléments de trace de 50 ppm en accord avec la standardisation interne, appliquant ZnO des concentrations ou PbO à chaque minéral décidé indépendamment par des analyses de SEM. Pour évaluer des erreurs possibles dans chaque ordre analytique, les déterminations

ont été aussi faites sur un matériel en verre référence NIST SRM 612, avec les concentrations nominales des éléments en trace de 500 ppm, comme l'échantillon inconnu et des concentrations des éléments dosés ont été comparés avec des valeurs de référence. Les données ont été transmises à un PC et traitées selon le programme GLITTER.

Un équipement SEM-EDS, Microscope Électronique de Balayage (EDAX GENESIS 4000, dans le Département des Sciences de la terre Université de Calabre, l'Italie) a été utilisé pour déterminer la composition des éléments majeurs de chaque minéral analysé.

La composition chimique majeure a été utilisée comme la norme interne pour calibrer des signaux LA-ICP-MS Fryer *et al.* (1995). Quand les analyses sont effectuées par l'ICP-MS la méthode de solution, qui exige la dissolution d'échantillons par la digestion avec la chaleur et des acides forts, des standards internes sont typiquement utilisées pour neutraliser la dérive instrumentale. Cette approche n'est pas disponible quand les analyses sont effectuées par la méthode LA-ICP-MS directement sur des échantillons solides intacts; donc, la concentration d'un élément majeur, décidé par la microinvestigation électronique, peut être utilisée pour la standardisation interne Axelsson & Rodushkin (2001).

Tableau 1.—**Résultats des analyses LA-ICP-MS dans la sphalérite. Teneurs en ppm à l'exception du Fe et du Zn en %**

ELEM	FHS1-01	FHS1-02	FHS1-03	FHS1-05	FHS1-06	FHS1-07	FHS1-08	FHS1-09	FHS1-10	FHS5-01	FHS5-02	FHS5-03	FHS5-04	FHS5-05	FHS5-06	FHS5-07	FHS5-08
Na	6,73	2,66	2,10	41,86		0,78	4,67		0,44	32,88	29,25	24,08	36,47	57,20	75,86	4,41	12,84
Mg	0,79		1,47						0,22			0,58		1,49	17,07	3,06	6,49
Al											12,95	3,13		9,03	103,96	2,51	259,14
Si				250,72				105,32	61,41	173,64	217,54	267,48			417,62	335,70	886,12
P	28,39	6,51										10,67	6,20		7,48	17,66	17,42
Ti		2,72	5,02		2,06	3,91	1,24	1,10	1,45	1,80	2,65	1,05	1,82	2,02	21,40	1,76	19,55
Mn		0,52	0,95	0,37	0,26	1,14	0,31		0,20	1,41	1,73	1,58	1,56	1,25	3,91	0,44	0,71
Fe	1,70%	1,62%	1,95%	1,07%	1,35%	2,43%	2,47%	0,52%	0,52%	0,9766	0,93%	0,10%	0,79%	0,85%	0,77%	0,24%	0,32%
Co	0,15	0,13	0,07	0,16	0,17	0,26	0,23	0,36	0,19	0,12	0,19	0,14	0,09	0,10	0,11	0,09	0,23
Cu							2,70	7,01	3,47	3,00	2,86	2,93	2,74	2,82	6,13	170,14	1102,81
Zn	39,86%	39,86%	39,24%	39,80%	40,24%	40,61%	40,70%	41,09%	41,18%	39,87%	39,87%	40,32%	40,29%	39,64%	40,39%	41,11%	41,11%
As	430,01	309,25	852,19	81,85	6,72	104,12	330,65	16,11	26,18	2774	2457	2042	2994	1895	3150	258	1415
Ag							0,45	0,68	0,45	0,26	0,38	0,29	0,35	0,35	0,49	1,31	20,42
Cd							687	941	984	961	1029	880	1495	845	1313	1220	3111
Sn								0,08	0,07	0,08	0,05	0,06	0,05			3,59	45,81
Sb							0,32	0,08	0,18	0,71	0,59	0,64	0,53	0,54	1,30	0,87	20,78
Pb	285	209	414	52,30	2,49	75,57	218	8,34	13,50	2247	2054	1679	2445	1537	2352	85,5	527

Microthermométrie

Les inclusions fluides sont étudiées dans des cristaux de calcite et dans des cristaux de sphalérite récoltées au sein du filon de Fedj Hassène.

Dans chacun des cristaux de calcite et de sphalérite ont été taillées des lames épaisses de 0,5 à 1mm que nous avons poli sur les deux faces. Les études microthermométriques ont été effectuées à l'aide d'une platine chauffante-réfrigérante LINKAM THM 600, permettant de mesurer les changements de phase sous microscope entre -180°C et 600°C, installée au Laboratoire de Minéralogie et Géochimie Appliquées du Département de Géologie de la Faculté des Sciences de Tunis.

La platine a été calibrée avec des inclusions fluides naturelles à CO₂ pur, piégées dans le quartz provenant d'autres dépôts. Les salinités ont été calculées à partir de l'équation de Bodnar (1993). Pendant l'interprétation des résultats on a utilisé le programme FLINCOR Brown (1989), pour tracer les isochores et déterminer les densités par la projection des résultats microthermométriques sur les isochores.

Isotope du soufre

Les compositions d'isotope du soufre ont été déterminées dans les laboratoires de l'US Geological Survey à Denver (Colorado, USA) en utilisant une méthode de flux continue décrite par Giese-

mann *et al.* (1994). Les résultats sont exprimés en ‰ relatifs au standard Cañon Diablo Troilite (VCDT).

Résultats et interprétations

Éléments traces dans la sphalérite

Les teneurs en éléments en trace dans la sphalérite sont variables (Tableau 1). Les teneurs en Cd varient de 0,14‰ à 0,31‰, en Fe de 0,83‰ à 2,47 pds‰, en As de 0,14 à 0,31‰, en Mn de 0,02 à 0,2‰ et en Cu de 0,016‰ à 0,11‰

La distribution de Cd en substitution de Zn dans la sphalérite montre une légère variation des teneurs. L'homogénéité de distribution de Cd suggère probablement une croissance lente lors de la précipitation de la sphalérite. La présence d'une zonation de Fe est probablement reliée à un processus d'absorption au niveau d'interface minéral-fluide contrôlé par une compétition entre Mn (en faible teneur) et Fe qui peut expliquer la limite d'observation des concentrations de ces éléments dans la sphalérite Di Benedetto *et al.* (2005).

La corrélation positive entre le Fe et Mn (fig. 6a) dans la sphalérite montre la présence d'une substitution du Fe par le Mn dans la sphalérite. L'existence du Fe dans la sphalérite est due probablement à la présence des microinclusions de la pyrite dans la sphalérite ou la présence d'une phase de transition traduit par l'existence d'un secteur diphasique pos-

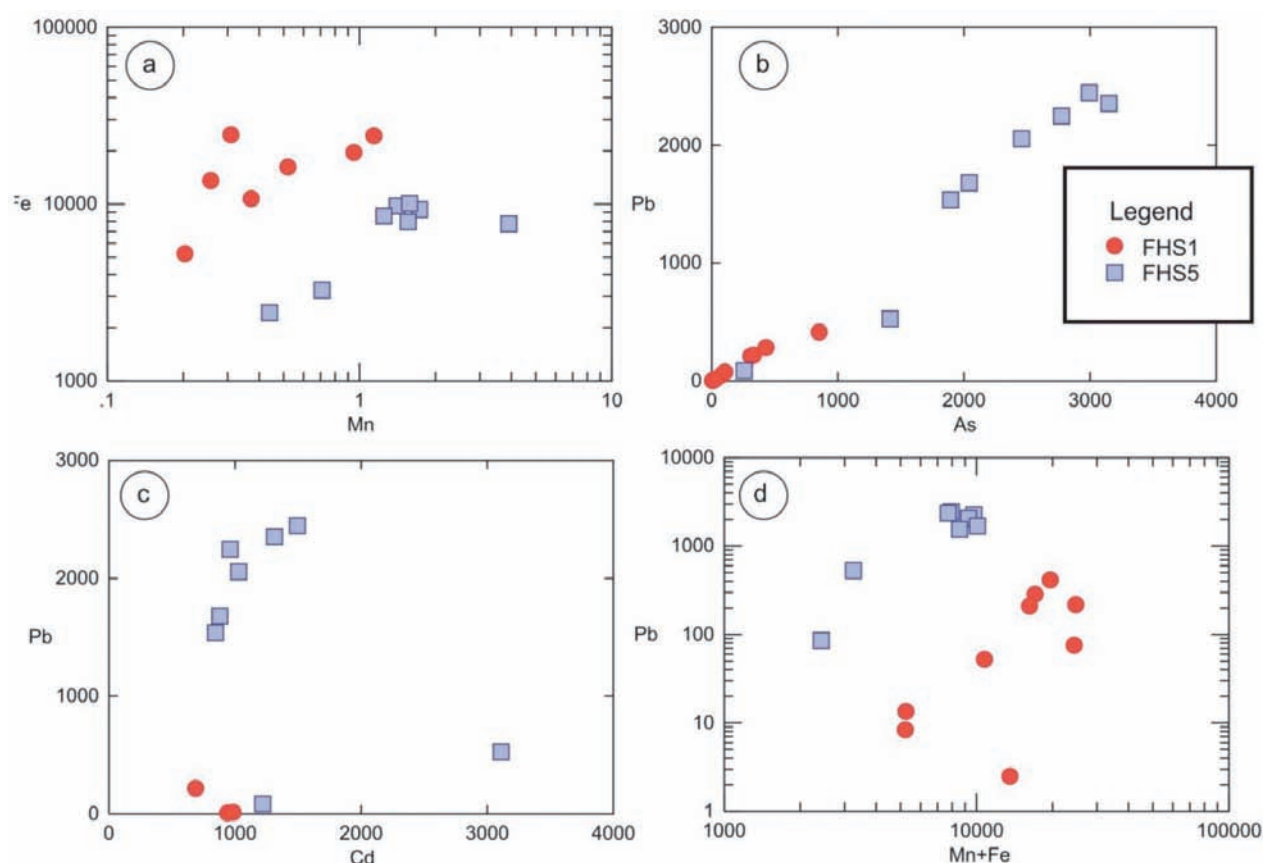


Fig. 6.—Courbes de corrélations de (a) Fe vs. Mn, (b) Pb vs. As (c) Pb vs. Cd et (c) Pb vs. Mn+Fe dans la sphalérite.

sible dans FeS-ZnS en solution solide Osadchii *et al.* (2004). Cette phase de transition a été montrée pour des teneurs en X_{Fe} entre 0,20 et 0,25 Osadchii *et al.* (2004) comparables aux teneurs trouvés dans le présent travail.

La corrélation positive entre Pb et As (fig. 6b) montre la présence à proportions différentes entre les échantillons FHS1 et FHS5 avec teneurs plus importants en Pb et en As dans l'échantillon FHS5 que celui de FHS1, cet enrichissement en Pb et en As est due à la présence des microinclusions de galène «Pb» et d'orpiment «As». De même pour la corrélation Pb et Cd (fig. 6c) montre un enrichissement en Cd et en Pb pour l'échantillon FHS5 par rapport à celui de FHS1, cette variation peut être expliquée par la présence de la galène en microinclusions dans la sphalérite et plausiblement la substitution du Zn par le Cd. La corrélation Cd Vs Mn+Fe (fig. 6d) révèle un enrichissement en Mn et Fe pour l'échantillon FHS1 par rapport à l'échantillon FHS5.

La concentration du Pb dans la sphalérite est très variable. Les teneurs élevées en Pb résultent de la présence de la galène en inclusions micrométriques dans la sphalérite.

Suite à la comparaison des teneurs en éléments traces dans les échantillons FHS1 et FHS5 dans la Figure 5, l'échantillon FHS1 montre un enrichissement en Fe et l'échantillon FHS5 un enrichissement en Pb.

La distribution des éléments en traces dans les sulfures peut être contrôlée par des différents facteurs. Les éléments tels que (Fe, Mn) dépendent largement de la géochimie de la roche encaissante. Les autres tels que (Cd, As, Ga, Ge) peut être lié à l'interaction du fluide hydrothermale avec la roche(s) source des métaux.

La technique LA- ICP- MS permet l'identification des éléments traces notamment le Cd, Mn, Fe et le Pb dans la sphalérite, la majorité des teneurs en éléments traces sont sous forme des minéraux en microinclusions enrichis de ces éléments et non

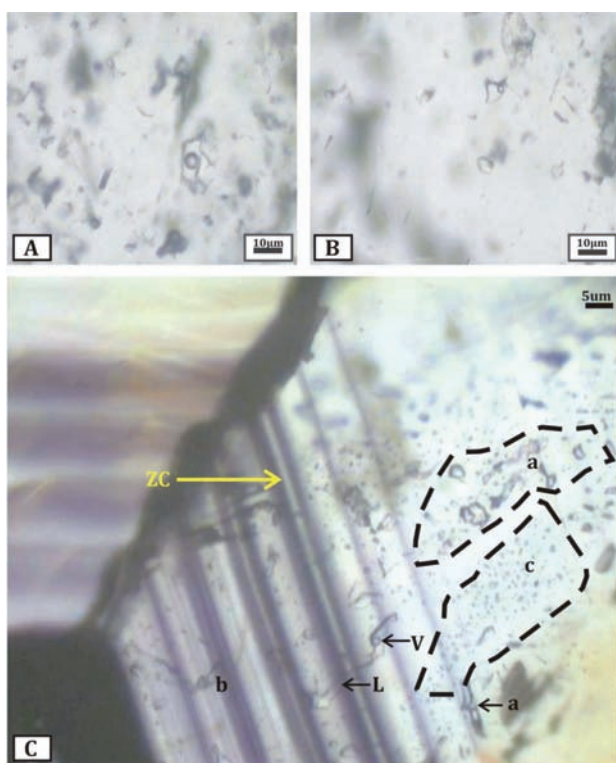


Fig. 7.—A) et B), Inclusions fluides primaires biphasées L+V piégées dans la calcite, C) Des associations d'inclusions fluides aqueuses en sphalérite : a) Inclusions fluides primaires, b) Inclusions fluides pseudo-secondaires et c) Inclusions fluides secondaires, de tailles minuscules (lenticulaires, allongées) en groupements, ZC) Zones de croissance.

sous forme des solutions solides Cook *et al.* (2009).

Inclusions Fluides

Les inclusions fluides examinées dans la calcite et la sphalérite montrent un remplissage en vapeur entre 15 à 30% (fig. 7). Les inclusions fluides piégées dans la calcite et la sphalérite analysées sont primaires et elles ont été classées sur la base de leur position, taille et morphologie Shepherd *et al.* (1985). Ces inclusions fluides sont de formes variables (irrégulières, allongées, vermiculaires,...) à contours nets ou parfois flous. Les inclusions fluides secondaires sont aqueuses biphasées.

L'étude microthermométrie des inclusions fluides primaires (n=63) piégées dans la calcite du Filon du Fedj Hassène montre que les températures de prise en glace qui sont comprises entre -100 °C et -80 °C. Les températures du début de fusion (Tdf) sont comprises entre -54 °C et -30 °C avec une moyenne à -41 °C inférieure au point eutectique du système NaCl-H₂O (-21,2 °C). Cette baisse

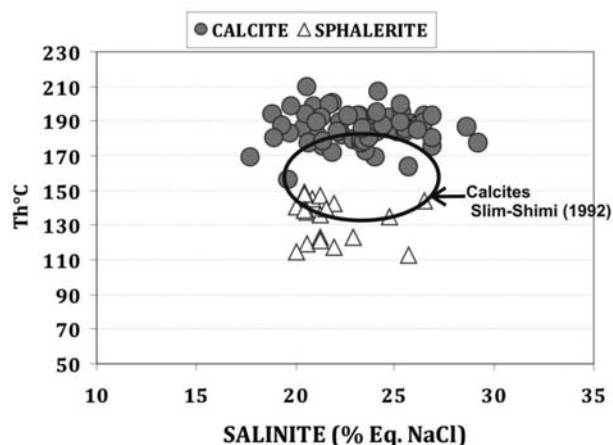


Fig. 8.—Corrélation Th-salinité des inclusions fluides aqueuses (L+V) piégées dans la calcite et la sphalérite dans le filon de calcite et de sphalérite du Fedj Hassène. L'ovale présente les données de calcites (Slim-Shimi, 1992).

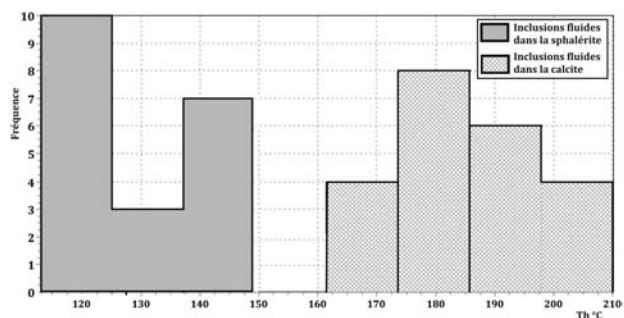


Fig. 9.—Histogramme des températures d'homogénéisation des inclusions fluides primaires, piégées dans la calcite et de la sphalérite.

de la température du début de la fusion est expliquée par la présence d'autres sels dissous différents de NaCl tels que CaCl₂, MgCl₂ Crawford (1981). Les cations (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) sont probablement transportés par des solutions chlorurées. Les températures de fin de fusion varient de -29,9 °C à -13,8 °C avec une moyenne de -21 °C. Les salinités varient de 17,5 à 29,1% poids. NaCl (fig. 8 et Tableau 2).

Les températures d'homogénéisations varient entre 156 et 210 °C avec une moyenne à 194 °C. La corrélation binaire Th-Salinité révèle l'existence d'un seul fluide (L) caractérisé par une température moyenne élevée à 194 °C et à salinité moyenne élevée à 23% éq. NaCl.

Ce fluide est caractérisé par une densité comprise entre 1,00 g/cm³-1,11 g/cm³ (fig. 10) la pression

Tableau 2.—**Résultats des analyses microthermométriques des inclusions fluides primaires aqueuses (L+V) en calcite et en sphalérite. Abréviations micro thermométriques: Tfg : Température de fusion de glace. Th °C : température d'homogénéisation. Salinité: % équiv.NaCl. n: nombre de mesures**

Inclusions fluides primaires dans la calcite				Inclusions fluides primaires dans la sphalérite							
Tfg °C	Salinité	Th °C	n	Tfg °C	Salinité	Th °C	n	Tfg °C	Salinité	Th °C	n
-22	24	156,1	1	-20,9	23	190	4	-16,5	20	113	1
-23,2	25	163,8	2	-25,5	26	195,1	2	-25,7	26,5	115	1
-24,5	25,5	169,2	1	-19,4	22	207	1	-17,5	21	117	1
-16	19,5	175,1	4	-24,3	25	198,3	1	-18	21	119	1
-21,9	24	177,3	1	-23,6	25	200,2	1	-17,2	20,5	123	3
-21,7	24	179,4	1	-25,7	26,5	185,9	2	-18	21	135	1
-23,3	25	182,2	2	-24,2	25,5	179,4	1	-19	22	138	2
-24,5	25,5	185,9	2	-20,8	23	177,3	1	-16,5	20	140,5	3
-19,5	22	187	8	-23,4	25	210	1	-24,5	25,5	144	2
-22	24	190	4					-17,2	20,5	148	2
-18,2	21	195,1	2					-19	22	144	2
-17,4	20,5	198,3	1					-17	20,5	148	2
-17	20,5	200,2	1					-17	20,5	138	2
-21,2	23,5	207	1					-18	21	119	1
-23	24,5	187	8					-17	20,5	123	3
-24	25,5	163,8	2					-18	21	117	1
-24,7	25,5	156,1	1					-23	24,5	115	1
-22,1	24	169,2	1					-18,5	21,5	113	1
-17,6	21	182,2	2					-20,3	23	135	1
-18,9	22	175,1	4					-16,5	26,5	137	1

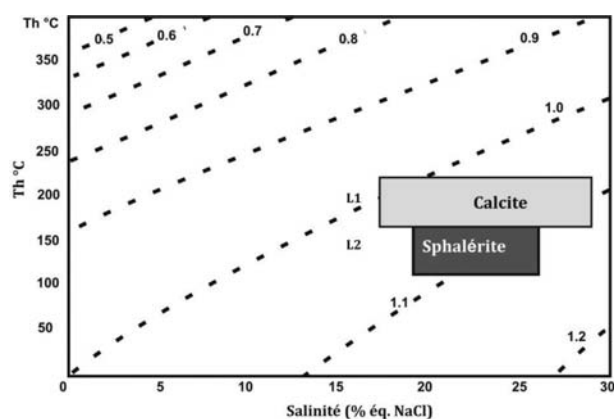


Fig. 10.—Courbe des Températures-salinités montrant les densités (g/cm^3) de solutions saturées en $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ et de vapeur. Les contours sont déduits des résultats trouvés à travers l'équation d'équilibre de Zhang and Frantz (Zhang 1987) en utilisant le programme FLINCOR (Brown 1998).

moyenne de fluides que remplissent le filon, doit être environ de 200 bars.

L'étude microthermométrique des inclusions fluides primaires ($n=32$) piégées dans la sphalérite du filon du Fedj Hassène montre une température moyenne de prise en glace à -100 °C. Les températures du début de fusion varient entre -51 °C et -28

°C compatibles avec par la présence d'autres sels dissous autres que NaCl tel que MgCl_2 et CaCl_2 Dubois & Marignac (1997) et Oakes *et al.* (1990).

Les salinités sont comprises entre 20% équiv.NaCl et 26,5% équiv.NaCl avec une moyenne à 23,2% équiv. NaCl. Les températures d'homogénéisation varient de 113 °C à 149 °C avec une moyenne à 133 °C.

La corrélation binaire Th-Salinité révèle l'existence d'un seul fluide (L) responsable à la précipitation de la sphalérite. Ce fluide est caractérisé par une température moyenne d'homogénéisation inférieure à celle de la calcite et une salinité moyenne proche de la salinité moyenne de la calcite (fig. 8).

Le fluide minéralisateur responsable à la précipitation de sphalérite du filon Fedj Hassène, s'est caractérisé par une salinité élevée à 23,2% équ. NaCl proche de la valeur eutectique du système $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$, ce qui confirme la richesse du fluide en cations Na^+ Roedder (1962).

La calcite et la sphalérite se sont précipitées plausiblement à partir d'un fluide de même salinité mais à température d'homogénéisation décroissante de la calcite à la sphalérite (fig. 8 et fig. 9). Les températures et les salinités obtenues dans les inclusions fluides piégées dans la calcite et la sphalérite sont comparables aux résultats trouvés dans les inclu-

sions fluides piégées dans la calcite du filon de sphalérite du Fedj Hassène Slim-Shimi (1992).

Isotope du soufre

Les compositions isotopiques du soufre ont été déterminées sur cinq échantillons de sphalérite et un échantillon de barytine provenant du filon principal de Fedj Hassène et sont rapportés dans le tableau 3).

Les sphalérites sont caractérisées par des valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ toutes positives et variant dans une gamme très restreinte comprises entre + 4,6‰ et 6,4‰ (VCDT) (moyenne = 5,6‰ VCDT). Ces valeurs indiquent une origine commune du soufre. Ce soufre réduit dérive des sulfates triasiques, localisés à la base de la série mésozoïque ou en dômes diapiriques. Les sulfates triasiques sont caractérisés par des $\delta^{34}\text{S}$ sont de l'ordre de 15 à 16‰ Charef *et al.* (1987), Orgeval (1994), Bouhleb (1993), Bouhleb (2007) et Bouhleb *et al.* (2009). L'absence de valeurs négatives et les larges variations dans les $\delta^{34}\text{S}$ militent en faveur d'une réduction thermique des sulfates triasiques. Les sulfates restant ont été enrichis en ^{34}S , comme l'indique une précipitation de barytine avec un $\delta^{34}\text{S}$ de 20‰ (VCDT).

Conclusion

Les minéralisations à Zn-(Pb) sont associées aux familles d'accidents E-W, et peuvent être localement de taille économique. Si les fractures E-W affectent indifféremment toutes les séries sédimentaires du compartiment sud du bassin, il n'en est pas de même pour la minéralisation qui ne semble s'exprimer que dans les niveaux calcaires compétants et favorables du Campano-Maastrichtien et surtout du Turonien. Les calcaires du Cénomaniens et de l'Aptien ne contiennent que des petites occurrences. Il apparaît donc que deux facteurs semblent conditionner la mise en place de la minéralisation: le facteur lithologique (encaissant calcaire) et le facteur tectonique (faille E-W). Toutefois, ces deux facteurs n'expliquent pas l'épanouissement de la minéralisation en profondeur, mise en évidence par les nombreux sondages effectués sur le filon principal de Fedj Hassène. En effet l'étude de détail réalisée au fond sur ce filon montre que les concentrations économiques sont plutôt liées au fonctionnement d'un système d'accidents plus complexe faisant intervenir en plus de la direction E-W des

Tableau 3.—**Résultats des analyses isotopiques dans la sphalérite et la barytine**

Echantillons	$\delta^{34}\text{S}$ ‰ (VCDT)
Sphalérite	6,3
Sphalérite	5,9
Sphalérite	5,9
Sphalérite	6,5

accidents N 130 à N 140. Ces failles correspondent à des ouvertures en transtension et qui hébergent les minéralisations. La tectonique cassante dans la région correspond à l'orogénèse alpine du Miocène supérieur, l'âge des minéralisations serait donc Miocène supérieur. Ce type de système filonien est à rapprocher aux champs filoniens liés à un régime d'extension miocène du domaine des nappes et du socle Kabyle de l'Algérie nord orientale Marignac (1983); Marignac (1985) et Marignac & Zimmermann (1983)

L'étude pétrographique des échantillons prélevés au sein du filon de sphalérite du Fedj Hassène montre l'association minérale suivante; sphalérite, galène, calcite, pyrite, réalgar, orpiment, baryte, marcassite, smithsonite, cérusite et de l'hématite.

La minéralisation au filon de Fedj Hassène est contrôlée structurellement de l'échelle du district à l'échelle de l'échantillon. La tectonique cassante a un rôle important pour la mise en place des concentrations métallifères économiques et ce par la création de drains pour les fluides minéralisateurs et la préparation des pièges qui correspondent à des discontinuités mécaniques affectant un encaissant calcaire.

Le caractère ancien profond de ces accidents est également à souligner puisque la communication avec le socle est prouvée par la présence d'Arsenic d'origine profonde.

Les résultats microthermométriques des inclusions fluides révèlent que les salinités des inclusions fluides examinées au sein de la calcite et de la sphalérite (23,2% poids. NaCl) sont comparables mais les températures d'homogénéisations sont différentes.

Le fluide précoce (L_1) piégée dans la calcite est caractérisé par une salinité semblable à celui du fluide tardif (L_2) piégée dans la sphalérite, qui est moins chaud que le fluide L_1 .

On se basant sur la similarité entre les valeurs de la salinité, on peut penser probablement à l'existence d'un seul type de fluide à température et à salinité relativement élevée. Ce fluide minéralisateur a

subit un léger refroidissement au cours de précipitation de la sphalérite. Les températures de la précipitation de la calcite atteignent, ou dépassent, 180°C. Le second stade, à sulfures essentiellement représentée par la sphalérite, commence par un épisode à sphalérite, galène, pyrite, chalcopirite, et des sulfures d'arsénique (réalgar et orpiment), à des températures atteignant 133°C. Cette variation de température de précipitation de la calcite et celle de la sphalérite, caractérisée par une température plus faible (de l'ordre de 133°C).

Ce refroidissement peut s'expliquer par la densité du fluide responsable à la précipitation de la sphalérite qui est supérieur à celui de la calcite, se qui induit vraisemblablement une diminution de la vitesse d'écoulement du fluide lors de sa montée à travers les fractures.

L'ensemble des études géologiques, minéralogiques couplées à la microthermométrie des inclusions fluides, à la géochimie des éléments en traces et à la géochimie des isotopes du soufre permettent de classer les gisements filoniens de Fedj Hassène dans le groupe des gisements polymétalliques (Pb-Zn-As,Hg) de la zone des nappes de la Tunisie du Nord et de l'Algérie nord-orientale associées aux activités hydrothermales liées à un régime tectonique en extension durant le Miocène supérieur, peu de temps après la mise en place des nappes.

REMERCIEMENTS

Le manuscrit a bénéficié d'une lecture, de remarques constructives et des discussions éclairantes par deux lecteurs anonymes, et aussi de l'aide du Dr. Jose M. Cebria qui est intervenue efficacement dans les divers stades de la révision du texte final, nous les remercions tous les trois.

Références

- Axelsson M.D. & Rodushkin I. (2001). Determination of major and trace elements in sphalerite using laser ablation double focusing sector field ICP-MS. *J. Geochemical. Exploration*. 72: 81-89. doi:10.1016/S0375-6742(00)00166-7
- Bouhlef S. (1993). *Gîtologie, minéralogie et essai de modélisation des minéralisations à F-Ba-Sr-Pb-Zn-(S) associées aux carbonates (jurassiques et créacés) et diapirs triasiques, gisements de Stah-Kohol, Zriba-Guebli, Bou Jabeur et Fedj Lahdoum (Tunisie septentrionale)* Thèse doct. D'état es-Sciences, Univ. Tunis II, 293 pp.
- Bouhlef, S. (2005). Carbonate hosted Mississippi Valley-type Pb-Zn deposits in Tunisia (Eastern-foreland belt). In: *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting, Beijing, China, 18-21 August, 2005*, (Zhao, C. & Guo, B., eds.), 3: 19-22.
- Bouhlef, S. (2007). Les ressources en plomb, zinc, fer, argent, cuivre, or, barytine, fluorine et célestite de la Tunisie: un bilan de 117 ans de recherches, d'explorations et d'exploitations. *XVII èmes Journées Nationales de la SSNT Hammamet*. Conférence plénière 1-2
- Bouhlef, S.; Leach, D.L.; Craig, A.J. & Lehman, B. (2009). Ore Textures and Isotope Signatures of the Peridiapiric Carbonate-Hosted Pb-Zn deposit of Bougrine, Tunisia. *Proceedings of the Tenth Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits*, 1: 409-411.
- Bodnar R J. (1993). Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 683-684. doi:10.1016/0016-7037(93)90378-A
- Braham A, M. Hammami, A. Kadri, N. Hatira, M. Chikhaoui & N. Ben Ayed. (1999). Le rôle de la tectonique cassante dans la répartition des concentrations métallifères de la mine de Fedj Hassène (Tunisie septentrionale). *Notes du Service Géologique*, 66: 90-103.
- Brown, P.E. (1989). FLINCOR, a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, 74: 1390-1393.
- Charef, A. & Sheppard, M.F. (1987). Pb-Zn mineralization associated with diapirism: fluid inclusion and stable isotope (H, C, O) evidence for the origin and evolution of the fluids at Fedj-El-Adoum, Tunisia. *Chemical Geology*, 61: 113-134.
- Crawford M.L. (1981). Phase equilibria in aqueous fluid inclusions. Short course in fluid inclusions: Applications to petrology. In: *Mineralogical Association of Canada course Handbook 6* (Hollister, L.S. & Crawford, L., eds.), 75-100.
- Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Pring, A., Skinner, W., Danyushevsky, L., Shimizu, M., Saini-Eidukat, B. & Melcher, F. (2009). Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICP-MS study. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 73: 4761-4791. doi:10.1016/j.gca.2009.05.045
- Di Benedetto, F.; Bernardini, G.P.; Costagliola, P.; Plant, D. & Vaughan, D.J. (2005). Compositional zoning in sphalerite crystals. *American Mineralogist*, 90: 1384-1392. doi:10.2138/am.2005.1754
- Dubois, M. & Marignac, C. (1997). The H₂O-NaCl-MgCl₂ ternary phase diagram with special application to fluid inclusions studies. *Economic Geology*, 92: 114-119. doi:10.2113/gsecongeo.92.1.114
- Fryer, B.J.; Jackson, S.E. & Longrich, H.P. (1995). The design, operation, and role of the laser-ablation microprobe coupled with an inductively coupled plasma-mass spectrometer (LAM-ICP-MS) in the Earth Sciences. *Canadian Mineralogist*, 33: 303-312.
- Giesemann, A.; Jäger, H.-J.; Norman, A.L.; Krouse, H.R. & Brand, W.A. (1994). On-line sulfur-isotope determination using an Elemental Analyzer coupled to a Mass Spectrometer. *Analytical Chemistry*, 66: 2816-2819.

- Günther D. & Mermet J.-M. (2000). Laser ablation for ICP MS. In: *Discrete Sample Introduction Techniques for Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (Beauchemin D.; Grégoire, C.D.; Günther, D.; Karanassios, V. Mermet, J.-M. & Wood, T.J., eds). Elsevier, Amsterdam, 445-501.
- Loukil, C. (1990). Fej Hcine sud. Prospection géochimique tactique. *Rapport ONM n7 geo 59/90*.
- Marignac, C. (1983). The polymetallic ore veins of Ain Barbar (Algeria) as a consequence of alpine geothermal activity. In: *Mineral deposits of the Alps and of the alpine epoch in Europe* (Schneider, H.J., ed.), Springer-Verlag, Heidelberg, 457-467.
- Marignac, C. (1985). *Les minéralisations filoniennes d'Ain Barbar (Algérie). Un exemple d'hydrothermalisme lié à l'activité géothermique alpine en Afrique du nord*. Thèse Doctorat d'Etat, I.N.P. Lorraine, Nancy, France.
- Marignac, C. & Zimmermann J.L. (1983). Ages K-Ar de l'événement hydrothermal et des intrusions associées dans le district minéralisé Miocène d'Ain-Barbar (Est Constantinois, Algérie), *Mineralium Deposita*, 18: 457-467. doi:10.1007/BF00204490
- Oakes C.S., Bodnar R.W. & Simonson J.M. (1990). The system NaCl-CaCl₂-H₂O. I. The ice liquidus at 1 atm total pressure. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 54: 603-610. doi:10.1016/0016-7037(90)90356-P
- Orgeval, J.J. (1994). Peridiapiric metal concentration: example of the Bougrine deposit (Tunisian Atlas). In: *Sediment-hosted Zn-Pb ores* (Fontboté, L. & Boni, M., eds.), *Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Special Publication 10*, Springer-Verlag, Heidelberg, 354-389.
- Osadchii, E.G.; Gorbatiy, Y.E. & Rappo, O.A. (2004). Lattice parameters and Raman spectroscopy of sphalerite solid solution (Fe_xZn_{1-x}) S at the standard T, p conditions. *Informational Bulletin of the Annual Seminar of Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry* - 2004, 1: 1-2.
- Roedder, E. (1962). Studies of fluids inclusions, I- low temperature application of a dual- purpose freezing and heating stage. *Economic Geology*, 57: 1045-1061. doi:10.2113/gsecongeo.57.7.1045
- Rouvier, H.; Perthuisot, V. & Mansouri, A. (1985). Deposits and salt bearing diapirs in southern Europe and North Africa. *Economic Geology*, 80: 666-687. doi:10.2113/gsecongeo.80.3.666
- Sainfeld, P. (1952). Les gîtes Plombo-Zincifères de Tunisie. *Annales des Mines et Géologie de Tunis*, 285pp.
- Shepherd, T.J.; Rankin, A.H. & Alderton, D.H.M. (1985). *A practical guide of fluid inclusions studies*. Blackie, Glasgow and London, 239 pp.
- Slim-Shimi, N. (1992). *Minéralogie et paragenèses des gîtes polymétalliques de la zone des nappes de la Tunisie. Conditions géochimiques de dépôt et implication génétiques*. PhD Thesis, Université de Tunis I, 292 pp.
- Zhang & Frantz J.D. (1987). Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O using synthetic fluid inclusions. *Chemical Geology*, 64: 335-350. doi:10.1016/0009-2541(87)90012-X

Recibido el 5 de febrero de 2010
 Aceptado el 30 de septiembre de 2010
 Publicado online el 3 de mayo de 2011